



DANIELE APARECIDA DE OLIVEIRA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE CONTROLADORES *FUZZY* PARA
O PROCESSO DE TORRAÇÃO DO CAFÉ ARÁBICA**

**LAVRAS – MG
2019**

DANIELE APARECIDA DE OLIVEIRA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE CONTROLADORES *FUZZY* PARA O PROCESSO DE
TORRAÇÃO DO CAFÉ ARÁBICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Carlos José Pimenta
Orientador/ DCA

Prof. Dr. Roney Alves da Rocha
Co-orientador/ DCA

Prof. Dr. Daniel Furtado Leite
Co-orientador/ DEG

**LAVRAS – MG
2019**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Silva, Daniele Aparecida de Oliveira.

Desenvolvimento de Controladores Fuzzy para o Processo de
Torrção do Cafê Arábica / Daniele Aparecida de Oliveira Silva. -
2019.

76 p. : il.

Orientador(a): Carlos José Pimenta.

Coorientador(a): Roney Alves da Rocha, Daniel Furtado Leite.
Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2019.

Bibliografia.

1. Torra do Cafê. 2. Controle de Temperatura. 3. Controle
Fuzzy. I. Pimenta, Carlos José. II. Rocha, Roney Alves da. III.
Leite, Daniel Furtado. IV. Título.

DANIELE APARECIDA DE OLIVEIRA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE CONTROLADORES *FUZZY* PARA O PROCESSO DE
TORRAÇÃO DO CAFÉ ARÁBICA**

**FUZZY CONTROLLER DEVELOPMENT FOR ARABICA COFFEE TOWING
PROCESS**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Ciência dos Alimentos, para a
obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 27 de Setembro de 2019

Dra. Caroline Lima Angélico EPAMIG

Prof. Dr. Daniel Furtado Leite UFLA

Prof. Dr. Roney Alves da Rocha UFLA

Profa. Dra. Sara Maria Chalfoun de Souza EPAMIG

Profa. Dra. Sílvia Costa Ferreira UFLA

Profa. Dra. Tatiane Carvalho Alvarenga IFSUDESTE/MG

Prof. Dr. Carlos José Pimenta
Orientador/ DCA

**LAVRAS – MG
2019**

A Deus pela dádiva da vida e por me permitir percorrer este caminho.

Aos meus pais, José Félix da Silva e Antônia Beatriz de Oliveira Silva, por serem os grandes responsáveis por esta conquista e por serem meus grandes exemplos de competência e de força de vontade.

Ao meu avô materno, João Luiz de Oliveira (*in memorian*) pelos momentos da minha infância, os quais trazem boas lembranças. A minha avó paterna, Mariana das Graças (*in memorian*) por sempre guiar nossa família, de onde quer que ela esteja.

Aos meus avós, Joaquim Carolina e Neide Resende por todo amor, carinho, mimos e orações dedicadas a mim e aos ensinamentos sobre a vida.

Aos meus irmãos, Mailson, Michele e Letícia por serem meus companheiros de todas as horas, meus melhores amigos e minhas inspirações.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus pela minha vida, por me permitir realizar este sonho e por guiar meus passos.

À Universidade Federal de Lavras, por me permitir grandes momentos e ao Departamento de Ciência dos Alimentos.

Ao meu orientador Carlos José Pimenta e aos co-orientadores Roney Alves da Rocha e Daniel Furtado Leite, pelos ensinamentos, orientação, conselhos, ajuda e paciência e por ter contribuído muito para o meu crescimento.

Aos meus pais, José Félix da Silva e Antônia Beatriz de Oliveira Silva, pelos ensinamentos e exemplos constantes, por todo amor, dedicação, carinho, amizade durante esses anos e por sempre estarem presentes em minha vida.

Aos meus avós, Joaquim e Neide que são a minha vida e minha base, por me acolherem sempre, pelo amor incondicional, por entenderem a minha constante ausência e pelas suas orações a mim dedicadas.

Aos meus queridos irmãos, Mailson, Michele e Letícia, pelo carinho, amor, amizade, cumplicidade e conselhos de todas as horas.

Aos meus amigos de longas datas, os de São Tiago por se fazerem presentes sempre na minha jornada, tornando a vida mais leve e aos amigos que conquistei durante os 7 anos e meio de UFLA, em especial aos amigos do Laboratório de Análises Avançadas pelos conselhos, pela companhia nos dias de trabalho e pelas palavras de conforto durante os dois anos de mestrado.

Aos professores do Departamento de Ciência dos Alimentos, pelos inúmeros ensinamentos, em especial aos professores do programa de Mestrado em Ciência dos Alimentos, e a todos aqueles que fazem do programa uma excelência.

Ao eletricitista Júlio pela ajuda na montagem do equipamento e toda assistência técnica disponível. Ao Fernando e Silas pelo auxílio nos momentos de precisão.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Agradeço a mesma a concessão da bolsa de mestrado e o incentivo a pesquisa.

E a todos que contribuíram de alguma forma direta ou indireta para a realização desta dissertação.

MUITO OBRIGADA!

RESUMO

A torração é um processo térmico no qual os grãos de café são submetidos para o desenvolvimento do aroma, sabor e textura. Para a sua realização requer-se que certas variáveis do processo sejam controladas, como o fluxo de ar e de calor, temperatura do torrador, tempo da torra, entre outros; sendo que o fator mais impactante é a relação entre os dois últimos (temperatura e tempo da torra), uma vez que os demais são consequências desses. Para conseguir o controle do sistema, os operadores realizam ajustes manualmente e com base no seu conhecimento e experiência. Outra alternativa é o controle automático, o qual pode ser feito usando recursos eletrônicos e computacionais. Neste trabalho, a abordagem de controle de temperatura em função do tempo foi feita usando sistemas inteligentes, particularmente, sistemas *fuzzy*. Essa se baseia na teoria de conjunto *fuzzy* e na lógica *fuzzy*. Ela é muito utilizada em controle não linear de processos principalmente em situações em que não existem metodologias específicas e equações diferenciais conhecidas para representar o sistema em estudo. O objetivo deste trabalho consistiu no desenvolvimento de controladores *fuzzy* para o controle da temperatura do processo de torração do café. A metodologia baseou-se na elaboração de um controlador PD *fuzzy* e PID *fuzzy* segundo fundamentos de sistema *fuzzy*, os quais são a fuzzificação, inferência à uma base de regras e a defuzzificação. O software MATLAB foi utilizado para o projeto dos controladores e para simulações preliminares do processo, sendo que essas últimas foram feitas no ambiente *Simulink*. Primeiramente, estudou-se a dinâmica do processo de torração, analisando-o em malha aberta, e posteriormente em malha fechada. O desempenho dos controladores quanto à resposta transitória e estacionária foram analisados. Assim, o trabalho contribui para garantir certos comportamentos do processo de torração do café. Validou-se a importância de controladores inteligentes *fuzzy* para perseguição da trajetória irregular da temperatura desejada. Além disso, o trabalho pode ser considerado como um passo inicial para a automatização do processo de torra do café Arábica.

Palavras - chave: Torra do café. Controle de Temperatura. Controle *Fuzzy*.

ABSTRACT

Roasting is a thermal process in which coffee beans are subjected to the development of aroma, flavor and texture. Some process variables are required to be controlled, such as air and heat flow, roaster temperature, roasting time, among others; being the most important factor the relationship between the. To achieve system control, operators perform remainder comes as a consequence based on their knowledge and experience. An alternative is automatic control, which can be done using electronic and computational resources. In this manuscript, intelligent fuzzy modeling approaches are addressed for temperature control. Based on fuzzy set theory and fuzzy logic. It is widely used in nonlinear process control mainly in situations in which there are no specific methodologies and known differential equations to be considered for the system under study. The objective of the present study is to develop fuzzy systems to control the temperature of the coffee roasting process. The methodology is based on the design of a fuzzy PD and a fuzzy PID controllers according to fuzzy system fundamentals, which are fuzzification, inference to a rule base, and defuzzification. The MATLAB software was used for controller design and preliminary process simulations, the latter being done within the Simulink environment. First, we validate the dynamic of the roasting process by analyzing it in open loop. Then the performance of the fuzzy closed-loop system regarding the transient and stationary responses is analyzed. The results obtained contribute to the study of the coffee roasting process behavior. The results support the importance of fuzzy intelligent control to track the irregular trajectory of desired temperatures. In addition, this study can be considered an initial step for the automation of the Arabica roasting process.

Keywords: Coffee roast. Temperature control. Fuzzy control.

LISTA DE FIGURAS

PRIMEIRA PARTE

Figura 1- Torrador elétrico de café da marca Probat.....	21
Figura 2- Diagrama de blocos para um sistema de controle da torração do café.....	25
Figura 3- Diagrama de blocos para a função de transferência.....	27
Figura 4- Diagrama de polos e zeros ou plano s.....	28
Figura 5- Resposta típica de um sistema de segunda ordem subamortecido.....	31
Figura 6- Comportamento dos casos para a resposta ao degrau.....	32
Figura 7- Resposta ao degrau unitário para sistema de segunda ordem.....	34
Figura 8- Resposta de um sistema de segunda ordem para o caso subamortecido.....	37
Figura 9- Diagrama de blocos.....	37
Figura 10- Função de pertinência triangular.....	43
Figura 11- Função de pertinência gaussiana.....	43
Figura 12- Função de pertinência trapezoidal.....	44
Figura 13- Estrutura básica de um controlador <i>fuzzy</i>	46

SEGUNDA PARTE- ARTIGO

Figura 1- Funções de pertinência das variáveis de entrada dos controladores PD <i>fuzzy</i> e PID <i>fuzzy</i>	56
Figura 2- Função de pertinência da saída dos controladores PD <i>fuzzy</i> e PID <i>fuzzy</i>	57
Figura 3- Diagrama de blocos do processo de torração do café com o PD <i>fuzzy</i>	59
Figura 4- Diagrama de blocos do processo de torração do café com o PID <i>fuzzy</i>	59
Figura 5- Curva de Torra do café.....	60
Figura 6- Diagrama de polos e zeros do sistema.....	61
Figura 7- Resposta ao degrau para o sistema em malha aberta.....	62
Figura 8- Ação de controle do PD <i>fuzzy</i> para entrada degrau.....	63
Figura 9- Resposta do sistema do PD <i>fuzzy</i> para entrada degrau.....	64
Figura 10- Ação de controle do PD <i>fuzzy</i> para entrada curva de torra.....	65
Figura 11- Resposta do sistema do PD <i>fuzzy</i> para entrada curva de torra.....	66
Figura 12- Ação de controle do PID <i>fuzzy</i> para entrada degrau.....	67
Figura 13- Resposta do sistema do PID <i>fuzzy</i> para entrada degrau.....	68
Figura 14- Ação de controle do PID <i>fuzzy</i> para entrada curva de torra.....	70
Figura 15- Resposta do sistema do PID <i>fuzzy</i> para entrada curva de torra.....	70

LISTA DE TABELAS

SEGUNDA PARTE - ARTIGO

Tabela 1- Regras do controlador PD <i>fuzzy</i>	57
Tabela 2- Regras do controlador PID <i>fuzzy</i>	58
Tabela 3- Parâmetros de desempenho para o sistema de malha aberta.....	63
Tabela 4- Parâmetros de desempenho do controlador PD <i>fuzzy</i> para entrada degrau.....	65
Tabela 5- Parâmetros de desempenho do controlador PID <i>fuzzy</i> para entrada degrau.....	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PRIMEIRA PARTE

$c(t)$	Variável de saída do sistema
$r(t)$	Variável de entrada do sistema
\mathcal{L}	Transformada de Laplace
$G(s)$	Função de transferência
$C(s)$	Saída do sistema
$R(s)$	Entrada do sistema
σ	Parte real do polo ou zero
$j\omega$	Parte complexa do polo ou zero
w_n	Frequência natural não amortecida (rad/s)
ξ	Coefficiente de amortecimento
w_d	Frequência de oscilação amortecida
t_d	Tempo de atraso
t_r	Tempo de subida
t_p	Tempo de Pico
t_s	Tempo de estabelecimento ou de acomodação
M_p	Sobressinal máximo
$E(s)$	Erro em regime permanente ou estacionário
e_{ss}	Erro em estado estacionário
K_p	Constante de erro de posição
A	Conjunto <i>fuzzy</i>
x	Variável de interesse
U	Universo de discurso
$u_A(x)$	Grau de pertinência de x no conjunto A
$supp(A)$	Suporte de A
$nuc(A)$	Núcleo de A
A_α	Conjunto α – <i>corte</i>
min	Operador de interseção e é um exemplo de T-norma
max	Operador de união e um exemplo de S-normas
PID	Proporcional Integral Derivativo
PD	Proporcional Derivativo
PI	Proporcional Integral
FT	Função de Transferência

SEGUNDA PARTE

<i>Ident</i>	<i>Toolbox</i> de Identificação de Parâmetros de Sistema Dinâmicos
PID	Proporcional Integral Derivativo
PD	Proporcional Derivativo
FT	Função de Transferência

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	12
1 INTRODUÇÃO.....	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1 Café: Cultivo e pós-colheita	15
2.2 Torra do café.....	16
2.2.1 Mudanças físicas dos grãos durante a torra.....	17
2.2.2 Composição dos grãos de café cru e torrado e reações químicas da torração.....	18
2.2.3 Torradores	20
2.3 Mecanismo de controle automático da torra.....	22
2.3.1 Controle de processos.....	22
2.3.1.1 Controle do sistema de torra do café.....	25
2.3.2 Função de transferência, polos, zeros e estabilidade.....	26
2.3.3 Sistema de segunda ordem	30
2.3.3.1 Resposta ao degrau unitário para sistema de segunda ordem	32
2.3.3.2 Especificações de resposta transitória para sistema de segunda ordem.....	35
2.3.3.3 Erro em regime estacionário	37
2.4 Lógica <i>Fuzzy</i> : Revisão de literatura voltada para aplicação	39
2.5 Controlador <i>fuzzy</i>	41
2.6 Software: MATLAB	47
3 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	47
REFERÊNCIAS	49
SEGUNDA PARTE – ARTIGO	52
Projeto e simulação de controladores <i>fuzzy</i> para o processo de torração do café.....	52
1 INTRODUÇÃO.....	52
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	54
2.1 Processo de torração	54
2.2 Identificação da função de transferência do torrador.....	54
2.3 Desenvolvimento dos controladores <i>fuzzy</i>	55
2.4 Simulação computacional	58
2.5 Análise de desempenho	60
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	60
3.1 Curva de Torra do café	60

3.2 Função de transferência, estabilidade do sistema e resposta em malha aberta.....	61
3.3 Resposta do controlador PD <i>fuzzy</i> no sistema de malha fechada	63
3.4 Resposta do controlador PID <i>fuzzy</i> no sistema de malha fechada	67
4 CONCLUSÃO.....	73
REFERÊNCIAS	73

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

O café é de origem Africana, mais especificamente oriundo da Etiópia. No século XVIII, o café começou a ser difundido no Brasil, chegando aos estados de São Paulo e Paraná. Atualmente, o Brasil é o maior produtor e exportador de café e o primeiro maior consumidor mundial.

Desde o início da produção no Brasil, com o mercado sempre mudando, o consumo de café também sofreu modificações. Por isso, falam-se hoje sobre as ondas de consumo, as quais são divididas em três. A primeira onda está relacionada com um elevado consumo de café pelo mundo, porém não tem preocupação com a qualidade, apenas interesse pela sua utilidade e por isso, o café era caracterizado como um produto de cesta básica. Nesta época, o processo de torra era bem artesanal e os grãos eram considerados torrados quando carbonizados, ou seja, a torra do café ideal era a escura e a principal forma de consumo era o café coado.

A segunda onda caracteriza pela uma maior preocupação com a bebida. Surgiram os cafés expressos e o consumo de café em cafeterias, modificando a cultura de consumo de cafés. Por causa disso, o café agora é saboreado com outros incrementos mais sofisticados e surge também o famoso *latte art*. Começa aparecer o conceito de cafés especiais e por isso, o processo de torra é trabalhado com mais cuidado, com mais variações e começa a ser requerido pelo consumidor torras médias. Nesta onda quem comandava o mercado eram as grandes indústrias.

E a terceira onda, que vivenciamos hoje, o consumidor quer conhecer a origem dos grãos, a qualidade, a forma como o café é obtido desde os processos na produção até a xícara e tem uma maior preocupação com meio ambiente e questões sociais. Nesta onda trabalha-se muito com a individualidade do café, surgindo os cafés em microlotes e por isso, o café começa a ser valorizado não somente pela bebida, mas pela experiência única que ele fornece ao consumidor. O processo de torra é bastante trabalhado em pequenas indústrias, onde se tem uma maior preocupação em mostrar para o consumidor todas as características da bebida e valorização do pequeno produtor.

O café passa por um conjunto de fatores, como manejo no campo, colheita, secagem, beneficiamento, armazenamento, torração e moagem para tornar-se uma bebida desejável ao

paladar humano. A torração é um dos processos que influencia na qualidade uma vez que as alterações químicas e físicas estão diretamente associadas à formação da textura crocante, aroma e sabor.

Na torra, as mudanças físicas, como a expansão volumétrica, perda de peso e cor juntamente com as transformações químicas e o surgimento do aroma e sabor são consequências do processo. O processo de torra depende de fatores como temperatura do torrador, temperatura da massa do grão, tempo, fluxo de calor e de ar e tipo de torrador. Esses, para proporcionar café com qualidade, devem ser controlados durante toda a etapa da torração. Isso pode ser feito manualmente ou por meio de mecanismo de controle. O controle deve considerar a importância que a torra tem sobre a qualidade do grão e da bebida.

Quando o controle é realizado manualmente, necessita-se que o profissional tenha conhecimento do processo uma vez que ele é o responsável por avaliar todos os critérios para a obtenção de cafés torrados com qualidade. Por ser um processo no qual o mestre torrefador confia somente na sua experiência e usa apenas indicadores subjetivos e empíricos, é muito suscetível a falhas humanas. Logo, automatizar a torração visando o monitoramento e controle da mesma é uma opção. Neste caso, o controle é feito por meio de comandos eletrônicos e a partir de *softwares*, sensores e atuadores. Cada vez mais, o crescimento dos processos automatizados fornecem produtos de alta qualidade, reduz custos e gera aumento da produção além de proporcionar uma maior otimização do processamento, proporcionando maior competitividade às empresas no mercado.

O Brasil ainda é fornecedor de matéria-prima para o mundo. Na medida em que aprimoramos o processo industrial aumenta a competitividade do café como produto final que implica em grandes ganhos para todo o setor. A tendência de pequenas torrefadoras, cafeterias e próprios consumidores em torrar o café em diferentes origens, características da terceira onda e da possível quarta onda de consumo, fortalece a necessidade de que esse controle seja automatizado, por isso o controle de variáveis do processo de torração do café vem junto à ânsia de conseguir oferecer para o mercado no futuro um produto de tecnologia que atende as mudanças de consumo do mercado cafeeiro.

O controle pode ser feito por diversas estratégias, como por exemplo, por meio de sistemas em malha fechada. Este consiste em um sistema no qual a medida obtida a partir de sensor é comparada com um valor de referência predefinido. A partir da diferença entre o valor medido e o valor desejado, um valor de erro é obtido. A finalidade do sistema de malha fechada é atuar em um instrumento da planta para fazer com que o erro seja reduzido à zero em um tempo razoável e sem grandes oscilações em torno do valor de referência. É

fundamental que o sistema seja estável e apresente uma certa robustez com relação à perturbações externas.

Quando se deseja controlar a torração do café, encontramos um problema do tipo servo. Este consiste na alteração da variável controlada ao longo do tempo de acordo com um valor de referência variante no tempo. Assim, no processo de torra, a variável controlada é a temperatura e essa varia em função do tempo. Essas duas variáveis, tempo e temperatura, são as variáveis que influenciam no controle da torra, por isso é necessário que ambas sejam observadas. Portanto, a chamada curva de torra, um gráfico que representa a temperatura ideal ao longo do tempo, é o *set point* ou a referência do problema. A curva de torra ditará o que se espera do controlador automático da temperatura.

Para realizar o controle do processo podem ser utilizados controladores *fuzzy*. O controlador é dividido em três blocos funcionais chamados de fuzzificação, inferência e defuzzificação. No presente trabalho, o propósito foi utilizar o controlador *fuzzy* como ferramenta para o controle da temperatura dentro no processo de torrefação. O motivo da escolha deste controlador se deve ao fato de que métodos *fuzzy* são de fácil aplicação, uma vez que utilizam conhecimento de especialistas sobre o problema. Além disso, sistemas de inferência *fuzzy* evitam a dificuldade de se obter e identificar parâmetros e estrutura de equações diferenciais e evitam aproximações lineares comuns das teorias de controle clássica e moderna. Dois controladores *fuzzy* são elaborados: Proporcional integral derivativo (PID) *fuzzy* e o Proporcional derivativo (PD) *fuzzy*. Utilizou-se dos conceitos dos controladores convencionais e da técnica do controlador *fuzzy* para melhorar a resposta transitória e eliminar o erro em estado estacionário.

O trabalho consistiu na realização da modelagem, identificação de parâmetros e simulação em malha aberta do processo no software MATLAB. Em seguida, são desenvolvidos os controladores PID *fuzzy* e PD *fuzzy*. O ambiente *Simulink* foi usado para simulações em malha fechada considerando o processo de torração do café, representado por uma função de transferência de segunda ordem, e os demais componentes por blocos funcionais. O objetivo foi obter controladores *fuzzy* com índices de desempenho satisfatórios. Espera-se que, quando for implementá-lo na prática, o sistema de controle *fuzzy* apresente comportamento semelhante.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Café: Cultivo e pós-colheita

Existem mais de 100 espécies do gênero *Coffea*. Porém, no Brasil, apenas duas são comercializadas, sendo elas a *Coffea arabica* L. e a *Coffea canephora* (robusta). Ambas as espécies divergem quanto às características físicas, químicas e sensoriais (ILLY; VIANI, 1998).

O *Coffea arabica* L. para ser produzido, precisa estar sob condições específicas como, clima úmido, temperaturas amenas e regiões mais elevadas. E para a produção de cafés com melhores qualidades devem também ser considerados o tipo da variedade, estágio de maturação e os tratos culturais (PIMENTA, 2003).

Além disso, a pós-colheita é um processo importante na qualidade final do café e por isso esse trabalho deve ser feita cuidadosamente. A primeira etapa é a colheita, a qual é feita por derriça, no pano ou também de forma mecanizada. O ideal é realizá-la quando se tem o maior percentual de frutos maduros. Porém, a colheita consiste na retirada de todos os frutos verdes, cerejas, passas e bóias. Em seguida, é feita uma pré-limpeza na qual são retiradas todas as impurezas, folhas e paus. Após isso, os frutos são separados em função da densidade, no qual os bóias (secos, passas, brocados e mal granados) são isolados das cerejas e frutos verdes (PIMENTA, 2003).

A próxima etapa é o processamento dos cafés, que pode ser feito por via seca ou úmida. A primeira, conhecida também por produzir cafés naturais, consiste na secagem do fruto com a casca, independente se ocorreu ou não a separação dos bóias, verdes e cereja. A segunda é quando se obtém cafés cereja descascados, desmucilados e despulpados. O café cereja descascado é proveniente de frutos maduros que tiveram o exocarpo e parte do mesocarpo removido por descascadores mecânicos. Esses, se levados a tanques de fermentação para remover totalmente a mucilagem (mesocarpo) por meio da fermentação biológica, origina os cafés despulpados. Caso o café cereja descascado seja encaminhado para o desmucilador, o produto resultante é conhecido como café desmucilado (BORÉM, 2008).

A secagem pode ser feita em terreiros, secadores mecânicos ou até mesmo combinando ambos. É ideal que a secagem seja iniciada o mais breve possível depois da colheita para impedir a perda da qualidade (BORÉM, 2008). Após isso, os cafés são armazenados até o beneficiamento. Essa é a etapa que elimina alguns defeitos, como grãos quebrados ou malformados. Distingue-se os grãos pela cor por meio de um colorímetro, separando em grãos pretos, preto-verdes, claros ou manchados (PIMENTA, 2003).

Depois dessas etapas concluídas, o café é classificado com relação ao tipo de acordo com o Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Nesta etapa o café é avaliado como um todo, formato (chato ou moca), cor, tamanho dos grãos, defeitos, matérias estranhas e impurezas. Em seguida, é feita a classificação por tipo, no qual são levados em consideração os três últimos quesitos e também a bebida feita pela Classificação Oficial Brasileira (COB) (BRASIL, 2003) ou pelo sistema SCA quando se pretende a classificação de cafés especiais.

2.2 Torra do café

A torração é a etapa realizada depois do beneficiamento ou da classificação. Ela consiste no tratamento térmico ao qual os grãos de café são submetidos, com o objetivo de causar mudanças físicas e químicas, como aumento de volume e desenvolvimento da textura, assim como o surgimento da cor, aromas e sabores. Ela está diretamente associada à qualidade, uma vez que o processo pode ou não ressaltar as características do grão na bebida (PIMENTA, 2003).

O processo da torra do café é a transferência de calor que ocorre do exterior dos grãos para o interior, através da condução, convecção e radiação. A primeira ocorre por meio do contato dos grãos com a superfície aquecida da parede da câmara de torrefação. A convecção é devido o ar quente envolver os grãos criando um fluxo laminar e turbulento. E a radiação se deve pelo aquecimento da superfície dos grãos uma vez que há proximidade com as paredes aquecidas do torrador (ILLY; VIANI, 1995).

Torrar é um processo complexo envolvendo energia (do torrador ao grão) e massa (vapor de água e compostos voláteis do grão para o meio) implicando em mudanças nas principais características dos grãos de café. Nos primeiros estágios ocorrem as reações endotérmicas (água evaporando), enquanto que as reações exotérmicas (pirólise) ocorrem nos últimos estágios da torra (CID; DE PEÑA, 2016).

Na torra, pode-se considerar que ocorrem três fases principais, a pirólise, secagem e resfriamento. Os grãos são aquecidos a 150-250 °C, de 8 a 12 min, dependendo da técnica utilizada e torra desejada (clara, média ou escura). As alterações iniciais ocorrem acima de 150 °C quando a proteína nas células do tecido se desnatura. A pirólise faz com que a água do interior dos grãos seja transformada em vapor, causando o início das reações químicas e formando os compostos voláteis (CID; DE PEÑA, 2016).

Durante a fase de secagem, a 150 °C a maior parte da água livre evapora. Com o aumento da temperatura, existe uma liberação de produtos voláteis (água, CO e CO₂), o que resulta em um aumento de 50-80% no volume do grão e é perceptível a mudança da cor verde

para amarelada. A 170-200 °C, as reações pirolíticas modificam drasticamente a composição química pela formação de centenas de substâncias que dão ao café o seu aroma e sabor característico. Nessas temperaturas, a tonalidade marrom clara e média já começa a ser desenvolvida (CID; DE PEÑA, 2016).

O grão de café, em seguida, começa a estourar devido ao aumento da pressão interna, e com a cor já específica indica que o processo deve ser interrompido por resfriamento, o qual pode ser realizado pelo ar ambiente ou água em forma de *spray*. Além das mudanças químicas, os parâmetros físicos do café também mudam consideravelmente, as perdas de peso chegam a mais de 11% e tem-se aumento do volume (CID; DE PEÑA, 2016).

Se o processo da torra não for finalizado, com o aumento da temperatura acima de 232 °C percebe-se o surgimento da cor marrom escuro. Esse ponto é conhecido como *French roast*. Acima dessa temperatura, tem-se um grau de torração chamado de *Italian roast*, com um marrom bem mais escuro e uma perda de peso maior, acima de 20% (SIVTEZ; FOOTE, 1963).

2.2.1 Mudanças físicas dos grãos durante a torra

As mudanças físicas fundamentais que ocorrem nos grãos de café durante a torra são a cor, a textura, expansão volumétrica e perda de peso (JANSEN, 2006). Esses são resultados de um conjunto de fatores, como o tempo, temperatura, método da torra, teor de umidade inicial do grão, transferência de calor e o tipo de processamento (SIVTEZ; FOOTE, 1963).

A cor está diretamente relacionada com o grau de torração, no qual são definidas em torras claras, médias e escuras. As características químicas, físicas e sensoriais finais mudarão conforme o tipo de torra e está muito relacionada com a qualidade. Pode-se dizer que os cafés em torra mais clara apresentam uma acidez maior e pouca doçura. Em contrapartida, na torra média, os grãos conseguem um maior equilíbrio dos aromas e dos sabores. Na torra escura predomina-se o amargor (MELO, 2004).

A expansão volumétrica é resultado da pressão gerada pela evaporação da umidade residual dos grãos crus de café gerada sobre a parede celular, causando inclusive perda da resistência da mesma. Isso é consequência de transformações na microestrutura celular e nos componentes poliméricos os quais mudam para estado elástico, facilitando a perda de massa e aumento do volume. No resfriamento os componentes da parede celular voltam ao estado rígido. A formação dos gases também influencia, já que o volume de gás é alto, fazendo com que as células não suportem. (CLARKE; VITZTHUM, 2001). Segundo Jansen (2006), essa

mudança propicia a redução da densidade e uma textura quebradiça e porosa que favorece a etapa da moagem.

A perda de peso no processo é devido à evaporação de água e aos gases gerados nas reações químicas e mudanças físicas. Considera-se que isso ocorre por meio das desidratações lentas e rápidas, quando tem-se temperaturas abaixo e acima de 100 °C, respectivamente. Outro fator que também pode contribuir é a eliminação da película prateada. Alguns cafés apresentam maior quantidade dela devido ao processamento, como é o caso dos cafés produzidos em via seca (JANSEN, 2006).

2.2.2 Composição dos grãos de café cru e torrado e reações químicas da torração.

Os grãos de cafés crus apresentam composição química diferente dos grãos de cafés torrados. Vários fatores interferem na formação química do grão cru, como altitude, espécie, variedade, maturação e os processos da pós-colheita (SILVA, 2008).

Os constituintes presentes no café cru são os precursores dos compostos produzidos durante o processo de torra, os quais são incumbidos de conferir sabor e aroma ao café (CID; DE PEÑA, 2016).

Pode-se dizer que a primeira reação que ocorre na torração do café é a pirólise. Essa é uma reação que ocorre a altas temperaturas, na qual envolvem a ruptura da estrutura molecular de compostos de alta massa molecular em pequena massa molecular na ausência de oxigênio ou em poucas concentrações. O principal produto originado dessa reação é o dióxido de carbono. Além dele, outros podem ser formados como aldeídos, cetonas, triacilgliceróis e glicerol (SIVETZ; FOOTE, 1963).

A torração do café cru é um processo brando de pirólise. Em altas temperaturas, os grãos elevam o volume, mudam de cor e desenvolvem o aroma. Essa expansão dos grãos está relacionada com a pirólise. Quando essa está ocorrendo, tem-se uma pressão gerada pelos gases nas moléculas de celulose, hemicelulose e lignina. O resultado é uma modificação na estrutura celular, causando um inchaço e liberando os gases (SIVETZ; FOOTE, 1963).

Os lipídeos são um grupo orgânico presente em muitos alimentos. No café, eles localizam-se no endosperma e uma pequena parte na superfície dos grãos. Com a torração, tem-se um aumento no teor de lipídeos devido à degradação de carboidratos e a perda total do conteúdo da matéria seca (CID; DE PEÑA, 2016). E eles são indicadores da qualidade do café, pois depois da torra eles fixam na superfície do grão, auxiliando na retenção do aroma (CLARKE; VITZTHUM, 2001).

Os carboidratos constituem metade do peso seco dos grãos crus, sendo que os maiores compostos dessa classe encontrados no café são os polissacarídeos e os açúcares (CID; DE PEÑA, 2016). Uma parte dos polissacarídeos é perdida na torra, quando se aglomera a outros compostos como as proteínas e ácidos clorogênicos. A função deles é praticamente reter aroma na bebida e ajudar na viscosidade da mesma (FLAMENT, 2002).

O grão cru contém açúcares redutores em pouca quantidade, porém durante a torra consegue-se um aumento do teor, uma vez que são degradados os açúcares não redutores (FLAMENT, 2002). A sacarose compõe quase que a totalidade de açúcar livre em um grão maduro de café. Ela é considerada precursora do sabor e aroma e o seu teor varia entre as espécies (CLARKE; VITZTHUM, 2001).

Os açúcares redutores são importantes durante a torração. É devido à presença deles que ocorre a caramelização. Essa é uma transformação química catalisada pelas altas temperaturas no qual, os açúcares redutores são degradados formando principalmente os hidroximetilfurfural (HMF). Com a continuação da reação, ocorre a polimerização do HMF originando as melonoidinas, sendo essas as responsáveis por conferir cor ao café torrado (FENNEMA; DAMODARAN; PARKIN, 2010).

Outras reações estão envolvidas durante a torra as quais são importantes na formação do sabor e cor do café torrado. São as reações de decomposição e a reação de Maillard (CARVALHO; CHAGAS; SOUZA, 1997). A reação de Maillard, conhecida como reação de escurecimento não enzimático, é a reação química entre um grupamento carbonila e um aminoácido livre (FENNEMA; DAMODARAN; PARKIN, 2010).

O açúcar redutor D-glicose ou frutose, especificamente o grupo aldeído, reage com amina e forma glicosilamina. Por meio dessa, ocorre uma reação conhecida como rearranjo de Amadori, originando o 1-amino-1-deoxi-D-frutose. A reação continua, formando um composto que desidrata. Em seguida, um derivado de furano é formado. Caso seja de uma hexose, o composto é o 5-hidroximetil-2-furaldeído (HMF). Isso considerando o pH 5 ou menos. Quando é em pH maior que isso, os compostos cíclicos reativos polimerizam gerando produtos de coloração escura, os quais são insolúveis e contém nitrogênio, responsáveis pela coloração (FENNEMA; DAMODARAN; PARKIN, 2010).

Alguns autores afirmam que durante o final da fase intermediária da reação de Maillard ocorre também a degradação de Strecker. Essa é a reação das dicarbonilas das deidorredutonas com um aminoácido formando uma base de Schiff. As primeiras foram formadas pela desidratação do açúcar em meio básico e pela oxidação. A base formada sofre descarboxilação com formação de dióxido de carbono e uma base de Schiff com um carbono

a menos. Por meio da hidrólise, forma-se aldeídos e um composto cetoamino. Esses sofrem condensação e ciclização, originando compostos importantes na formação do sabor e aroma (FENNEMA; DAMODARAN; PARKIN, 2010).

Muitos compostos nitrogenados estão presentes no café, como a cafeína. Ela é termorresistente, assim não sofre nenhuma mudança durante a torra do café, é farmacologicamente ativa e possui um amargor próprio (FLAMENT, 2002; VIANI; HORMAN, 1974).

Sobre os fenólicos não voláteis, os ácidos clorogênicos (ACGs) são os predominantes. Em elevadas temperaturas produzem ácidos fenólicos livres. Esses, quando degradados, formam os fenólicos voláteis (CID; DE PEÑA, 2016).

Os tipos, as quantidades dos compostos voláteis, a liberação deles, a intensidade da percepção dependem de inúmeros fatores, como interações sinérgicas entre os próprios compostos voláteis e entre outros grupos não voláteis (CID; DE PEÑA, 2016). Alguns compostos são presentes nos grãos crus e degradados em altas temperaturas, outros não existem no café cru, porém com a torra são originados (FLAMENT, 2002).

Existe uma infinidade de constituintes voláteis no grão de café e muitos deles estão relacionados com as características sensoriais encontradas no café torrado, como aroma floral, frutado, doce, especiarias, manteiga, açúcar queimado entre outros e até mesmo os aromas indesejados, como odor de ácido acético e vinagre, fumaça e muitos outros (FLAMENT, 2002; MOREIRA et al., 2000).

2.2.3 Torradores

A eficiência do processo e qualidade do café torrado depende de vários fatores, incluindo: o tipo do grão, temperatura e fluxo de calor, tempo do processo, fluxo de ar, temperatura da massa do grão e tipo de torrador. É preciso ter uma boa interação entre esses parâmetros, pois são eles, em conjunto, que determinarão a qualidade da torra (PITTIA; ROMANI, 2010).

A torra realizada nos torradores geralmente é feita em batelada (CLARKE, 1987). Alguns torradores presentes no mercado são os da marca Probat Leogap, Atilla, Lilla e Camomarq. Atualmente, a maioria destes equipamentos já possui uma tecnologia bem avançada que contribui para um melhor processo de torra. Geralmente, os torradores contêm controle digital para a temperatura do grão e controle da pressão do gás. A maioria possui isolamento térmico e permite um rápido resfriamento do café torrado. Além disso, é possível

realizar as curvas de torras no próprio torrador, e em alguns tipos consegue-se realizar a repetitividade da torra apenas programando-o (CARMOMAQ, 2018).

O funcionamento de um torrador, basicamente, segue o princípio de recirculação de ar. Primeiramente, a energia proveniente do gás GLP ou da energia elétrica é transformada em ar quente. Essa por sua vez, ao entrar no torrador direciona-se para os locais menos aquecidos, ou seja, parte frontal do equipamento. Em seguida, ocorre a recirculação desse ar quente, aquecendo os grãos de café. Nos primeiros minutos, é necessária uma maior quantidade de calor uma vez que ainda estão iniciando as reações endotérmicas. Com o desenvolver do processo, o calor requerido é menor, devido o início das reações exotérmicas. Muitos dos torradores têm acoplado ao sistema os ciclones, os quais têm a função de separar (casca e película do grão) dos grãos em si, que são liberados durante a torração (SILVA, 2008).

A cor, fluxo de calor e de ar e temperatura do torrador e dos grãos devem ser controlados ou monitorados durante todas as etapas, evitando o desperdício de energia (CLARKE, 1987). Além disso, monitoramento e controle possibilitam cafés com melhores qualidades (SILVA, 2008).

Na Figura 1, é apresentado um conjunto de seis torradores elétricos acoplados no mesmo eixo de rotação. É possível observar na figura abaixo que existem três chaves de liga/desliga. Essas são utilizadas para ligar os torradores, sendo que uma delas consegue acionar dois deles. Na imagem, também está presente o controle de temperatura para ser ajustado manualmente e a chave para controlar o fluxo de ar. A estrutura do equipamento também permite realizar o resfriamento do café, para cessar o processo térmico.

Figura 1 - Torrador elétrico de café da marca Probat



Fonte: Do autor (2019)

2.3 Mecanismo de controle automático da torra

A necessidade de controlar sistemas e processos físicos existe há muitos anos. O objetivo é corrigir algum desvio no sistema a fim de manter algumas variáveis em certos níveis (COUGHANOWR; KOPPEL, 1998). Isso auxilia na compreensão e análise do comportamento do sistema quando ele é submetido a perturbações. O controle de processos faz-se por meio de recursos eletrônicos, como o uso de um *software* e *hardware*. Esses, em conjunto com sensores e atuadores acoplados ao sistema, fornecem diversas medidas em tempo real e meios de se alterar o valor de variáveis. Obtém-se, como resultado final, o monitoramento e o controle automático do que se deseja.

2.3.1 Controle de processos

Um sistema de controle é representado por subsistemas e processos cujo objetivo é obter uma saída desejada para uma entrada definida (NISE, 2017). Para um sistema de controle possuir desempenho desejado, é necessário que todos os componentes do mesmo estejam interconectados e que as variáveis do processo sejam controladas corretamente. Para isso, existem dois tipos de controle de processos, os quais são denominados de controle manual e controle automático (COUGHANOWR; KOPPEL, 1998).

O controle manual ou controle em malha aberta é aquele que precisa de um profissional para ser responsável pelas operações. Com o passar do tempo e a evolução das atividades humanas, juntamente com o desenvolvimento científico e tecnológico, surgiu a importância de se automatizar os processos por meio de sistemas que controlam as variáveis sem a intervenção de um especialista humano, conhecido então como controle automático ou também controle em malha fechada (COUGHANOWR; KOPPEL, 1998).

Alguns problemas surgem quando é utilizado o controle manual. O responsável sempre deve acompanhar as variáveis do processo para tomar uma ação corretiva quando as mesmas tiverem um desvio do valor desejado, o que pode ocasionar falhas se não for feito no momento certo. Além disso, a dúvida na hora da tomada de decisão pode ser um fator preocupante, uma vez que diferentes operadores tomam diferentes decisões, o que resulta em uma operação não muito consistente (COUGHANOWR; KOPPEL, 1998).

Outro problema é que devido a grandes números de variáveis de um processo que devem ser mantidas em seus valores desejados, é necessária uma sincronização entre operador e máquina (COUGHANOWR; KOPPEL, 1998; KWONG, 2013). Todos esses possíveis problemas são considerados de extrema importância dentro da indústria com relação a se

adotar controle manual ou automático, pois estão associados a gastos, desperdiço, segurança, qualidade (KWONG, 2013) e uniformidade do produto obtido em batelada.

Os sistemas de controle podem ser de duas configurações, sendo sistema de controle de malha aberta e de malha fechada. O primeiro consiste em um sistema que utiliza um atuador para o controle do processo, sem aplicar a realimentação, ou seja, a saída do sistema não é medida e nem realimentada no mesmo. Esse tipo de controle também é conhecido com controle *feedforward*. Em contrapartida, o sistema de malha fechada, ou sistema de controle *feedback*, realimenta o sinal de saída ao sistema, o qual esse é comparado com o valor desejado (*set point*). Em seguida, o erro gerado é enviado ao controlador cujo objetivo é eliminá-lo (COUGHANOWR; KOPPEL, 1998; NISE, 2017; OGATA, 2011).

A utilização de um controlador contribui para modificar a dinâmica do processo, uma vez que muda a relação entrada/saída do sistema, por meio da mudança dos seus parâmetros. O objetivo de chegar a uma resposta específica, mantendo as variáveis nos valores pré-definidos (OGATA, 2011). Existem dois tipos de variáveis. As variáveis manipuladas do processo são aquelas que sofrem uma ação direta do controlador. As variáveis que sofrem mudanças para atingir algum requisito são conhecidas como variáveis controladas (COUGHANOWR; KOPPEL, 1998).

A maioria dos processos industriais opera com o controlador Proporcional- Integral-Derivativo (PID), o qual é uma combinação dos três tipos de controladores conhecidos como Proporcional (P), Derivativo (D), Integral (I). O PID possui variações os quais são o PD e o PI. As respostas desses controladores são baseadas nos ganhos, os quais são definidos como os ganhos K_p , K_d e K_i . Todos os três controladores vão ter a influência do K_p . Esse possibilita que o sinal de saída do controlador seja proporcional ao erro e quando têm-se aumento dele, o controlador diminui o erro no estado permanente, mas não elimina. Além disso, esse ganho torna o sistema mais oscilatório no regime transitório e por isso, pode tornar o sistema instável (FERREIRA, 2009; OGATA, 2011).

O controlador PD é uma combinação da ação proporcional e derivativa e por causa disso a ação de controle é proporcional à variação do erro. Além do ganho K_p , a presença do ganho K_d , faz a resposta do sistema ser mais rápida uma vez que, a ação derivativa tem a função de antecipar a ação do controlador e eliminar o erro rapidamente. Esse controlador é muito utilizado quando trabalha-se com tempos grandes, garantindo uma maior estabilidade. Porém com tempos muito pequenos, ocorrem oscilações podendo diminuir a estabilidade (FERREIRA, 2009; OGATA, 2011).

O controlador PI é uma combinação da ação proporcional e da ação integral. Quando trabalha-se com a variável tempo, e ele é pequeno, ocorre muitas oscilações na resposta, fazendo que o sistema demore a estabilizar. Porém com o tempo grande, a resposta fica muito lenta, fazendo com que a variável demore chegar ao *set point*. Com a presença do ganho Ki ocorre à saturação, pois esse ganho faz com que o controlador continue variando a saída até chegar o estado da saturação, porém à medida que o sistema vai conseguindo atingir o objetivo, o erro vai diminuindo, por isso a característica desse controlador é eliminar o erro no estado permanente. O controlador PID possui todos os ganhos possibilitando melhorar o estado transitório e o estado permanente, por isso muito utilizado na prática (FERREIRA, 2009; OGATA, 2011).

Segundo a teoria de controle clássica e moderna, para aplicar as técnicas de controle de maneira ótima, é necessário conhecer minuciosamente o modelo matemático que rege o processo. Porém, às vezes, o processo é muito complexo e isso acaba não sendo viável. O uso do controlador PID, por exemplo, requer o conhecimento da função de transferência para que seja possível obter os ganhos apropriados. Além disso, o controle PID, por possuir 3 parâmetros ajustáveis, os quais são o K_p , K_d e K_i , são menos flexíveis que o controle *fuzzy*, outro tipo de controlador que também é utilizado. Enquanto é dispendioso obter uma sintonia dos parâmetros PID, há uma variedade de possibilidades de ajustes dos parâmetros de funções de pertinência, operadores de agregação *fuzzy* e operadores de defuzzificação para se alcançar respostas transitórias e estacionárias interessantes (FERREIRA, 2009; LEITE et al., 2015).

Ademais, um controlador PID garante bom desempenho para sistemas lineares, invariantes e sem atraso de tempo. Quando o sistema não se enquadra em tais definições, o controle PID opera de forma aproximada e, portanto, com eficiência reduzida (FERREIRA, 2009). Ao contrário, controladores *fuzzy* são inerentemente não-lineares, e podem ser variantes no tempo desde que equipados com um algoritmo de aprendizado de máquina ou otimização recursivo (LEITE et al., 2015; SKRJANC et al., 2019).

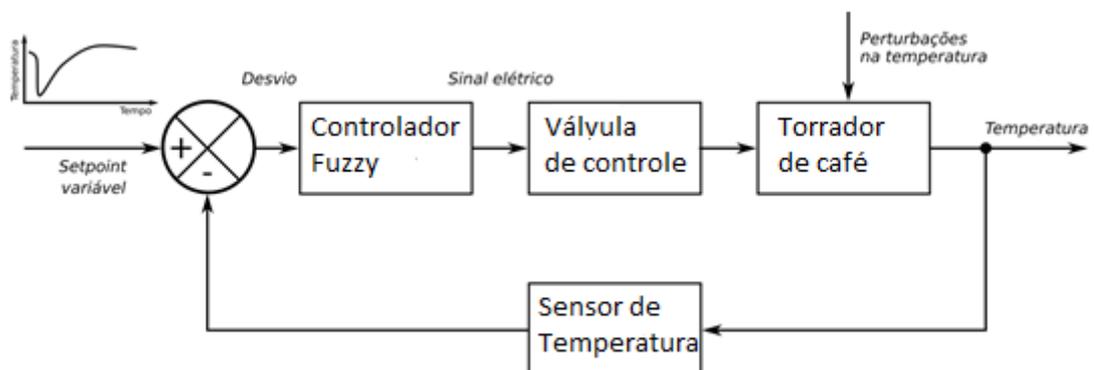
A aplicação de técnicas *fuzzy* em sistemas de controle de processos é útil quando é conveniente manusear informações imprecisas de maneira mais rigorosa e quando é necessário transformar base de dados em modelos interpretáveis. Além disso, controle *fuzzy* considera o relacionamento entre as variáveis de entrada e saída, sem que seja necessário ter uma entrada precisa para gerar algum valor de saída. Essas vantagens permitem que os sistemas de controle em malha fechada obtenham melhor robustez à perturbações e menor complexidade por meio do uso de controlador *fuzzy*, ao invés de controlador PID, no ramo direto (RIGNEL; CHENCI; LUCAS, 2011).

2.3.1.1 Controle do sistema de torra do café

Considerando o processo de torração do café, o qual será definido como um sistema de malha fechada, a primeira etapa é definir a temperatura inicial que os grãos serão colocados no torrador (CID; DE PEÑA, 2016). Para determinar os valores de temperatura ao longo do processo, um termopar pode ser empregado. Esse sensor detecta um sinal ou estímulo e produz uma saída. O sinal de saída representa a variável controlada, que será comparada com um valor de referência, o qual é a variável desejada (*set point*). Caso haja alguma diferença entre as duas variáveis, um erro será gerado. O erro é alimentado no controlador, cuja função é ajustar o elemento final de controle (atuador) a fim de conseguir que a variável controlada alcance o valor de *set point*. (COUGHANOWR; KOPPEL, 1998; KWONG, 2013). No caso da torração, o elemento final de controle é o dispositivo que controla a potência, sendo esta responsável pelo aumento ou diminuição da temperatura.

O sistema de controle pode ser representado por diagrama de blocos, conforme mostra a Figura 2. É possível perceber que o sistema apresenta a relação entre a entrada e a saída de um determinado componente (NISE, 2017) e que o controlador *fuzzy* foi empregado.

Figura 2 - Diagrama de blocos para um sistema de controle da torração do café



Fonte: Do autor (2018)

Dois tipos de situações podem ser encontrados em sistemas de controle. Uma delas é o problema conhecido como regulador. Nesse caso, o valor de referência é fixo e a função do sistema é conseguir manter a variável controlada no valor estabelecido. A ideia nesse caso é suprimir perturbações. Na segunda situação, o problema é conhecido como do tipo servomecanismo ou apenas servo, o qual se tem uma alteração da variável de referência ao longo do tempo de acordo com alguma função. O foco é o mesmo, fazer com que a variável controlada siga a referência (COUGHANOWR; KOPPEL, 1998; KWONG, 2013). Portanto,

na torração do café temos um problema do tipo servo, uma vez que o *set point* segue uma curva de tempo *versus* temperatura, como pode ser observado na Figura 2.

Todo sistema é chamado de dinâmico quando a resposta a uma determinada entrada for uma resposta transitória antes de obter uma resposta em regime permanente ou estacionária. Esses dois tipos de respostas citadas ditam as principais medidas de desempenho de um sistema, o qual é importante para descobrir se os requisitos especificados de um sistema de controle foram atendidos. A resposta transitória compreende parte da resposta do estado inicial ao estado final, sendo que o comportamento do sistema varia muito com o tempo. E a resposta em regime permanente, descreve a resposta quando t tende ao infinito, ou seja, quando a resposta do sistema tende a ser semelhante ao *set point*. Além dessas respostas, outro requisito fundamental em sistema de controle é a estabilidade, pois se um sistema é instável, a resposta transitória e o erro em regime permanente serão irrelevantes (NISE, 2017).

Por meio dessas respostas, é possível verificar se o desempenho é satisfatório e, caso não seja, se alguns ajustes podem ser feitos nos parâmetros do sistema. Por causa disso, é importante o estudo dos tipos de sistemas que existem, tal qual sistemas de primeira ordem, sistemas de segunda ordem e sistema de ordem superior, pois cada um desses terá comportamentos diferentes aos diversos sinais de teste de entrada (função degrau, rampa, etc.) e, conseqüentemente, diferentes respostas transitórias (NISE, 2017; OGATA, 2011).

2.3.2 Função de transferência, polos, zeros e estabilidade

Todo sistema linear invariante no tempo pode ser modelado por uma equação diferencial linear, tal como (NISE, 2017):

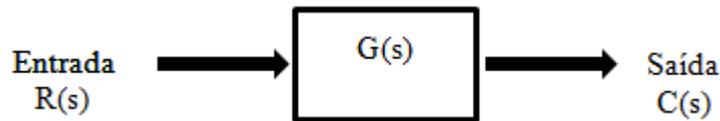
$$a_n \frac{(d^n c(t))}{dt^n} + a_{n-1} \frac{(d^{n-1} c(t))}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 c(t) = b_m \frac{(d^m r(t))}{dt^m} + b_{m-1} \frac{(d^{m-1} r(t))}{dt^{m-1}} + \dots + b_0 r(t) \quad (1)$$

sendo que, as variáveis de saída e entrada do sistema são, respectivamente dados por $c(t)$ e $r(t)$. E os coeficientes constantes são representados por a_n e b_m . A partir da entrada $r(t)$, e considerando condições iniciais nulas é possível conhecer a saída $c(t)$, aplicando a Transformada de Laplace (\mathcal{L}) na equação (1). Em seguida, dividindo $C(s) = \mathcal{L}[c(t)]$ por $R(s) = \mathcal{L}[r(t)]$, é possível encontrar a função de transferência do sistema $G(s)$ (NISE, 2017):

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0} \quad (2)$$

A função de transferência relaciona algebricamente a saída de um sistema com sua entrada. E ela possibilita melhorar a visualização do sistema, pois consegue separar a entrada da saída e elas do sistema. Além disso, ela pode ser representada por meio de diagrama de blocos (NISE, 2017), como exemplifica a Figura 3.

Figura 3 - Diagrama de blocos para a função de transferência



Fonte: Do autor (2019)

Por meio da função de transferência é possível também calcular a saída $C(s)$, apenas organizando a equação (2) conforme,

$$C(s) = G(s)R(s) \quad (3)$$

O diagrama de blocos fornece graficamente uma visão global do sistema indicando a finalidade dos componentes dentro do mesmo (NISE, 2017). Na Figura 3, tem-se que o sinal de entrada multiplicada pelo ganho do bloco $G(s)$ produz o sinal de saída que é representado pela equação (3).

No geral, a função de transferência fornece uma descrição completa das características dinâmicas do sistema, porém não informa sobre as características físicas do mesmo. Ela pode ser obtida experimentalmente, através de teste de sinais de entrada e analisando as respostas obtidas. Com a função de transferência determinada, tem-se que analisar a resposta da mesma a diversas entradas, para então, conseguir o comportamento do sistema (OGATA, 2011).

A função de transferência pode ser representada pela equação (2), como já foi dito. Ela é descrita na forma complexa de s . No denominador de $G(s)$, é possível conhecer a ordem do sistema. Se a maior potência de s , é n , pode-se dizer que a ordem é então n . Além disso, é possível saber quais são os zeros e polos da função de transferência. Para isso, é necessário obter a forma fatorada de $G(s)$, sendo representada abaixo (OGATA, 2011):

$$G(s) = \frac{K(s-z_1)(s-z_2)\dots(s-z_m)}{(s-p_1)(s-p_2)\dots(s-p_m)} \quad (4)$$

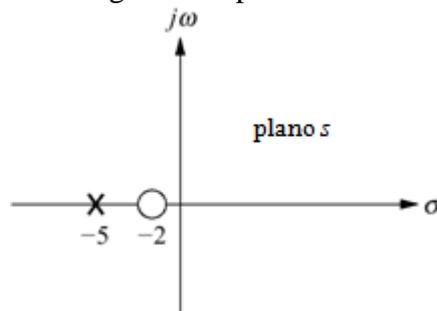
sabe-se que K é uma constante que representa o ganho, z_1, z_2, z_m são as raízes do numerador e conhecidos também como os zeros e p_1, p_2, p_m são as raízes do denominador e chamadas também de polos (NISE, 2017).

Os zeros são os valores de s para os quais a função de transferência é zero, ou seja, $G(s) = 0$. E os polos são os valores de s para os quais a função de transferência é infinita, isto é, $G(s) \rightarrow \infty$, e o denominador é zero (NISE, 2017). Tanto polos como zeros podem ser descritos como (NISE, 2017):

$$S = \sigma + j\omega \quad (5)$$

em que σ é a parte real do polo ou zero e $j\omega$ representa a parte imaginária do polo ou zero, por isso polos e zeros podem ser quantidades complexas ou reais (NISE, 2017). Para melhor visualização, através de um diagrama é possível representar os polos e zeros de uma função de transferência, utilizando-se um x para o polo e um círculo para o zero (NISE, 2017), como é mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Diagrama de polos e zeros ou plano s



Fonte: NISE (2017)

Os polos são muito importantes, pois são eles, principalmente, que descrevem a dinâmica temporal do sistema e, além disso, pela posição deles no plano s , é possível determinar a estabilidade do sistema. Existem diversos conceitos de estabilidade de um sistema e segundo Ogata (2011), uma delas é: “Um sistema de controle linear e invariante no tempo é estável se a saída sempre retorna ao estado de equilíbrio quando o sistema é submetido a uma condição inicial.”

Outra definição de estabilidade é referente à localização dos polos no plano s . O sistema é estável, quando todos os polos têm a parte real negativa, ou seja, estão localizados no semiplano esquerdo. O sistema é instável, quando qualquer polo tem a parte real positiva, isto é, está localizado no semiplano direito (NISE, 2017). Um sistema pode ser ainda definido como oscilatório, quando qualquer polo está posicionado sobre o eixo imaginário, fora da

origem. Caso, o sistema possua um par de polos imaginários, dizemos que os polos são complexos conjugados (OGATA, 2011).

Cada polo representa no domínio do tempo, uma exponencial. Isso é importante para entender o conceito de estável e instável somente analisando a localização do polo no plano s . Quando o polo tem parte real negativa, a resposta natural do sistema tem uma exponencial que decresce com o tempo até o sistema atingir o regime permanente, estabilizando no valor de entrada, ou seja, a resposta natural tende a zero, conforme o tempo tende ao infinito (NISE, 2017). Já quando o polo tem parte real positiva, tal exponencial é crescente, e tende ao infinito, o que caracteriza a instabilidade (NISE, 2017).

Quando o polo tem parte real nula, o sistema permanece somente no regime permanente e as oscilações do sinal de saída repetem de forma contínua (OGATA, 2011). Caso o sistema possua ao menos um par de polos complexos conjugados sobre o eixo imaginário $j\omega$, a resposta em regime transitória é uma senóide (NISE, 2017).

Os polos ainda podem ser denominados de polos dominantes quanto mais próximos da origem eles estiverem. Esses são caracterizados por apresentarem exponencial com decaimento mais lento e a resposta final do sistema sofre mais influência desses polos, do que aqueles que estão longe do eixo imaginário (NISE, 2017).

Sistemas com polos no semiplano esquerdo mais afastados do eixo imaginário estabilizam mais rápido do que os que possuem polos próximos à origem (NISE, 2017). Por isso, surgiram dois conceitos de estabilidade. A estabilidade absoluta é aquela que avalia se o sistema é estável ou instável (OGATA, 2011), ou seja, leva em consideração apenas se todos os polos estão compreendidos no lado semiplano esquerdo do plano s (NISE, 2017). E estabilidade relativa engloba o fato de que um sistema pode ser mais estável que outro, considerando o quão próximo ou afastado os polos estão do eixo imaginário, no semiplano esquerdo (OGATA, 2011).

Em um projeto de controle, é importante o conhecimento da estabilidade, pois sistemas físicos que são instáveis, apresentando polos no semiplano direito, geram saídas que ao longo do tempo, só tendem a crescer. Se não houver nenhum dispositivo protetor que satura o valor das saídas, a tendência é o sistema operar de forma inesperada, causando problemas na operação (NISE, 2017).

Os zeros também têm sua interferência na dinâmica temporal do sistema, uma vez que eles afetam a amplitude da resposta. No semiplano do lado esquerdo, os zeros, quanto mais afastados do eixo imaginário, conhecidos como zeros rápidos, não apresentam um impacto significativo na resposta transitória. Já quanto mais próximo da origem, chamados de zeros

lentos, eles interferem no aumento do sobressinal, uma vez que diminui o amortecimento do sistema (NISE, 2017; OGATA, 2011).

Já quando um sistema possui zeros no plano direito, ele não fica instável, porém obtém-se um valor negativo no início da resposta (*undershoot*). Quando isso ocorre, denomina-se sistema de fase não mínima (NISE, 2017).

2.3.3 Sistema de segunda ordem

Sabe-se que a equação diferencial de um sistema de segunda ordem é representada por:

$$\frac{d^2c(t)}{dt^2} + 2\Xi w_n \frac{dc(t)}{dt} + w_n^2 c(t) = w_n^2 r(t) \quad (6)$$

Se aplicar a transformada de Laplace, considerando que as condições iniciais são nulas, obtém a seguinte expressão:

$$C(s)s^2 + 2\Xi w_n sC(s) + w_n^2 C(s) = w_n^2 R(s) \quad (7)$$

e, assim, é possível obter a função de transferência de um sistema de segunda ordem, tal como (NISE, 2017):

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{(w_n^2)}{s^2 + 2\Xi w_n s + w_n^2} \quad (8)$$

onde, têm-se dois parâmetros, w_n e Ξ . Os valores destes parâmetros revelam o comportamento da resposta transitória de um sistema de segunda ordem. Sabe-se que w_n é a frequência natural não amortecida (rad/s), que por definição é a distância radical da origem até o polo, visto em um diagrama s , e é também a frequência em que a resposta pode oscilar, quando o amortecimento é reduzido a zero. O parâmetro Ξ é o coeficiente de amortecimento (NISE, 2017; OGATA, 2011). Pode-se definir o coeficiente de amortecimento como a razão entre a frequência de decaimento exponencial e a frequência natural (rad/s), sendo que essa razão é constante e independe da escala de tempo da resposta (NISE, 2017). Para um sistema de segunda ordem, temos três casos, considerando o valor de Ξ .

Se $0 < \Xi < 1$ tem-se o caso subamortecido. A característica desse caso é que o sistema apresenta dois polos complexos conjugados e tem oscilações (NISE, 2017). Pela equação (8), percebe-se que os polos são:

$$-\Xi w_n \pm w_n \sqrt{\Xi^2 - 1} \quad (9)$$

sabendo que w_d é frequência de oscilação amortecida e que ela pode ser descrita pela equação (10), é possível ver que um aumento de ξ , reduz a w_d (NISE, 2017):

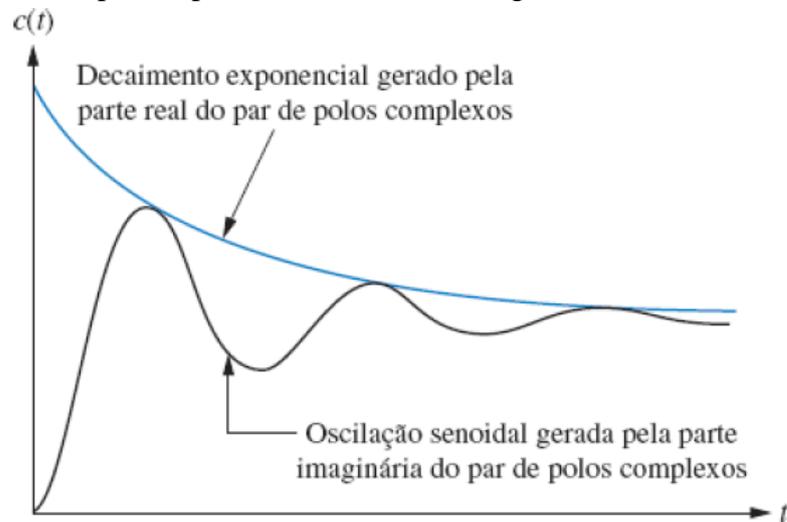
$$w_d = w_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (10)$$

E os polos podem ser representados pela parte real e pelo complexo conjugado, conforme equação (11) (NISE, 2017).

$$-\sigma \pm jw_d \quad (11)$$

Na Figura 5 é mostrada a resposta senoidal do caso subamortecido, no qual a resposta transitória é uma oscilação amortecida. Essa resposta transitória corresponde a uma amplitude de decaimento exponencial, devido à parte real do polo, multiplicada por uma onda senoidal, devida à parte imaginária do polo. A onda senoidal possui uma frequência de oscilação conhecida como frequência de oscilação amortecida w_d (NISE, 2017):

Figura 5 - Resposta típica de um sistema de segunda ordem subamortecido

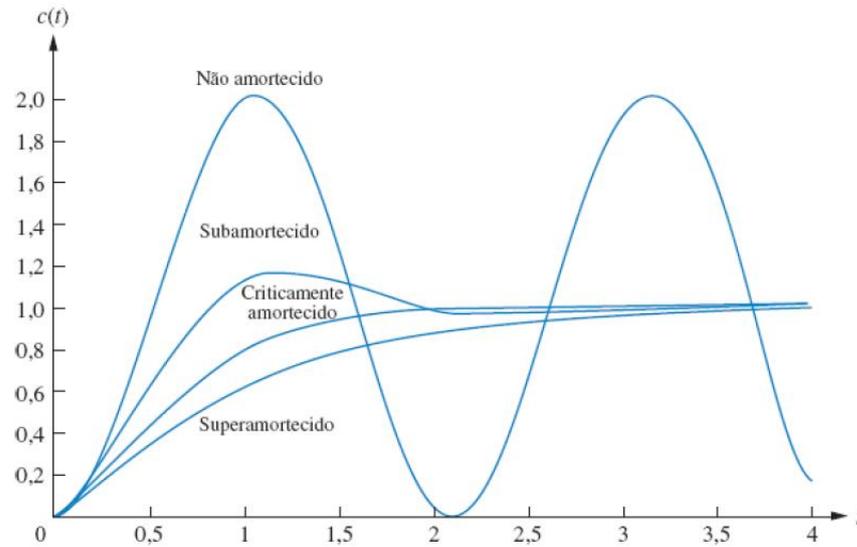


Fonte: NISE (2017)

Se $\xi = 1$ temos um caso criticamente amortecido, onde existem dois polos reais e iguais e não apresentam oscilações. A resposta desse caso são as mais rápidas (NISE, 2017). E se $\xi > 1$ é conhecido como caso superamortecido, com dois polos reais e diferentes. Neste caso, quando ξ aumenta, a tendência é o sistema apresentar um comportamento semelhante ao sistema de primeira ordem (NISE, 2017).

Na Figura 6 é apresentado um gráfico exemplificando o comportamento desses casos para a resposta ao degrau. Percebe-se que o caso criticamente amortecido separa o caso superamortecido do caso subamortecido e a resposta dele é bem mais rápida (NISE, 2017).

Figura 6 - Comportamento dos casos para a resposta ao degrau



Fonte: NISE (2017)

2.3.3.1 Resposta ao degrau unitário para sistema de segunda ordem

Para analisar uma função de transferência, pode-se aplicar um degrau unitário como sinal de entrada e analisar o comportamento na saída. Se a função degrau é do tipo: $R(s) = \frac{1}{s}$ e temos um sistema de segunda ordem, a resposta ao degrau pode ser representada multiplicando $R(s)$ por $C(s)$ (NISE, 2017):

$$C(s) = G(s)R(s) = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} * \frac{1}{s} \quad (12)$$

logo, tem-se que:

$$C(s) = \frac{w_n^2}{(s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2)} \quad (13)$$

Visto isso, a resposta ao degrau para os três casos citados acima será diferente. Para o caso subamortecido pode representar por meio de frações parciais (OGATA, 2011):

$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{s + \zeta w_n}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \quad (14)$$

$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{s + \zeta w_n}{(s + \zeta w_n)^2 + w_d^2} - \frac{\zeta w_n}{(s + \zeta w_n)^2 + w_d^2} \quad (15)$$

Consultando uma tabela de transformação, é possível obter a transformada inversa de Laplace de $C(s)$ (OGATA, 2011):

$$c(t) = 1 - e^{-\xi w_n t} \left(\cos w_d t + \left(\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \right) \sin w_d t \right), \quad (16)$$

$$c(t) = 1 - \frac{e^{-\xi w_n t}}{\sqrt{1-\xi^2}} \operatorname{sen} \left(w_d t + \tan^{-1} \sqrt{\frac{1-\xi^2}{\xi}} \right); \quad t \geq 0 \quad (17)$$

Quando t tende ao infinito a resposta tende ao valor de 1, o qual é a amplitude do degrau. Se considerarmos $\xi = 0$, temos que $w_d = w_n$. Logo, podemos reduzir a equação acima para (OGATA, 2011):

$$c(t) = 1 - \cos w_d t, \quad t \geq 0 \quad (18)$$

A partir da equação (18), percebe-se que a resposta oscila sem amortecimento em torno do valor 1 na frequência natural. Logo, a resposta é considerada não amortecida (OGATA, 2011). Para o sistema criticamente amortecido, no qual $\xi = 1$ e existem raízes reais e múltiplas, têm-se (OGATA, 2011):

$$s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2 = (s + w_n)^2 \quad (19)$$

substituindo em $C(s)$:

$$C(s) = \frac{1}{s} * \frac{w_n^2}{(s+w_n)^2} \quad (20)$$

onde, obtém-se a resposta ao degrau que pode ser representada como:

$$c(t) = 1 - e^{-\xi w_n t} (1 + w_n t), \quad t \geq 0 \quad (21)$$

Se $\xi > 1$, então o sistema é superamortecido e possui duas raízes reais e distintas, logo:

$$s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2 = (-\xi w_n \pm w_n \sqrt{\xi^2 - 1}) \quad (22)$$

substituindo em $C(s)$, têm-se:

$$C(s) = \frac{1}{s} * \frac{w_n^2}{(-\xi w_n \pm w_n \sqrt{\xi^2 - 1})} \quad (23)$$

Por meio da transformada inversa de Laplace, a resposta desse sistema é dada por:

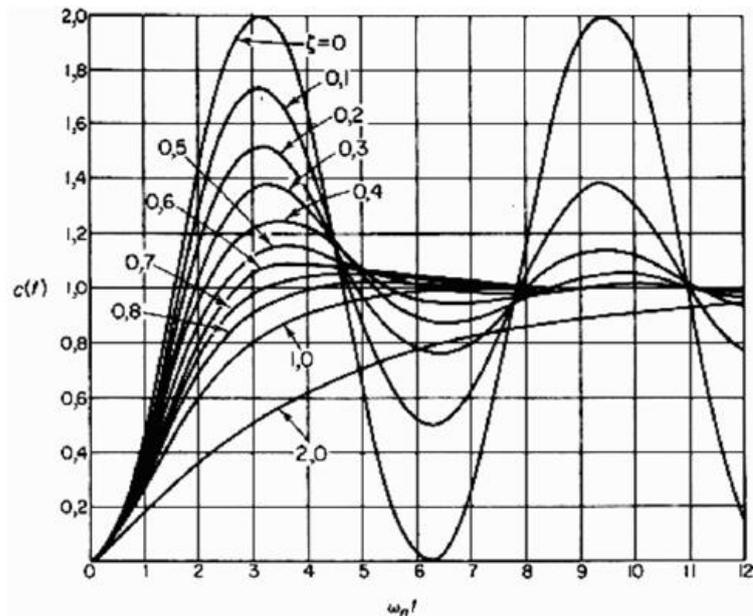
$$c(t) = 1 + (w_n) 2\sqrt{\xi^2 - 1} \left[\frac{e^{s_1 t}}{s_1} - \frac{e^{s_2 t}}{s_2} \right], \quad t \geq 0 \quad (24)$$

onde s_1 e $s_2 = -\xi\omega_n \pm \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1}$. Considerando que $\xi > 1$, o polo $s_1 = -\xi\omega_n - \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1}$ tem pouca influência na resposta, pois representa o decaimento da exponencial, podendo ser desprezado. Sendo assim, pode-se simplificar a equação acima para a descrita logo abaixo. Observa-se que a resposta agora é igual a uma resposta de sistema de primeira ordem (NISE, 2017).

$$c(t) \cong 1 + \frac{\omega_n}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} * \frac{e^{s_1 t}}{s_1}; t \geq 0 \quad (25)$$

Em seguida é mostrada a Figura 7 com respostas ao degrau unitário para sistemas de segunda ordem considerando os três casos estudados, no qual temos variação de ξ (OGATA, 2011). No eixo y temos a resposta ao degrau unitário que está representado pelo $c(t)$. E no eixo x, tem-se $\omega_n t$.

Figura 7 - Resposta ao degrau unitário para sistema de segunda ordem



Fonte: OGATA (2011)

Na Figura 7, observa-se que para sistemas de segunda ordem, é esperado que a resposta transitória seja razoavelmente rápida e amortecida. Por causa disso, espera-se que a resposta esteja dentro da faixa $0,4 \leq \xi \leq 0,8$, uma vez que, valores menores que $\xi \leq 0,4$ resultam em sobressinal excessivo e valores maiores que $\xi \geq 0,8$, o sistema responde de forma lenta (NISE, 2017; OGATA, 2011).

2.3.3.2 Especificações de resposta transitória para sistema de segunda ordem

Em sistemas de segunda ordem, o desempenho dos controladores podem ser determinados em termos de grandeza no domínio do tempo, pois é importante que o sistema seja ajustado até obter a resposta transitória adequada. Para isso, usa-se a entrada degrau unitário devido a sua facilidade de aplicação com bons resultados (NISE, 2017; OGATA, 2011).

É importante conhecer o desempenho do sistema, pois, no geral, todo o sistema não consegue responder imediatamente o sinal e por causa disso, têm-se respostas transitórias sempre que tem alterações na entrada ou quando ocorre de ter alguma perturbação (NISE, 2017). Os principais parâmetros usados para caracterizar o desempenho de um sistema são:

- t_d : *delay time* (tempo de atraso) é o tempo para a resposta alcançar pela primeira vez a metade do valor final (OGATA, 2011).
- t_r : *rise time* (tempo de subida) é o tempo que a resposta leva para ir de 10% a 90% do seu valor final, ou seja, é o tempo que a resposta leva pra cruzar um limite inferior até cruzar certo limite superior, sendo definida por (NISE, 2017; OGATA, 2011).

$$t_r = \frac{(\pi - \beta)}{w_d} \quad (26)$$

$$\beta = t_g^{-1} \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi} \quad (27)$$

A partir das equações (26) e (27) é possível ver que quanto maior o coeficiente de amortecimento, maior é o tempo de subida e isso pode ser observado na Figura 7.

- t_p : *peak time* (tempo de Pico) é o tempo onde a resposta atinge o máximo valor. Pode ser determinada pela fórmula (NISE, 2017; OGATA, 2011):

$$t_p = \frac{\pi}{w_d} \quad (28)$$

- t_s : *settling time* (tempo de estabelecimento ou de acomodação) é o tempo que a resposta leva para atingir 95% ou 98% da resposta, ou que alcance e permaneça dentro de uma faixa em torno do valor final. Sendo assim, é comum ser especificada por 5% ou 2% (NISE, 2017; OGATA, 2011):

$$t_s = \frac{4}{\xi w_n} \quad \text{para 2\%} \quad (29)$$

$$t_s = \frac{3}{\xi w_n} \text{ para } 5\% \quad (30)$$

Pela Figura 7 e pelas equações (29) e (30), observa-se que quanto maior o coeficiente de amortecimento e a frequência natural não amortecida, menor é o tempo de estabelecimento.

- M_p : *Overshoot* (sobressinal máximo) é um indicativo de estabilidade relativa do sistema e é também o máximo valor da resposta medida a partir do valor final. Podem-se usar duas fórmulas para o cálculo, sendo que uma delas é expressa em percentagem (NISE, 2017; OGATA, 2011). Essa última, o resultado é obtido através do cálculo de $c(t_p) = 0$, o qual é uma condição, sendo caracterizada de inclinação nula ao ponto máximo de $c(t)$ para o menor tempo possível, o qual é conhecido como tempo de pico.

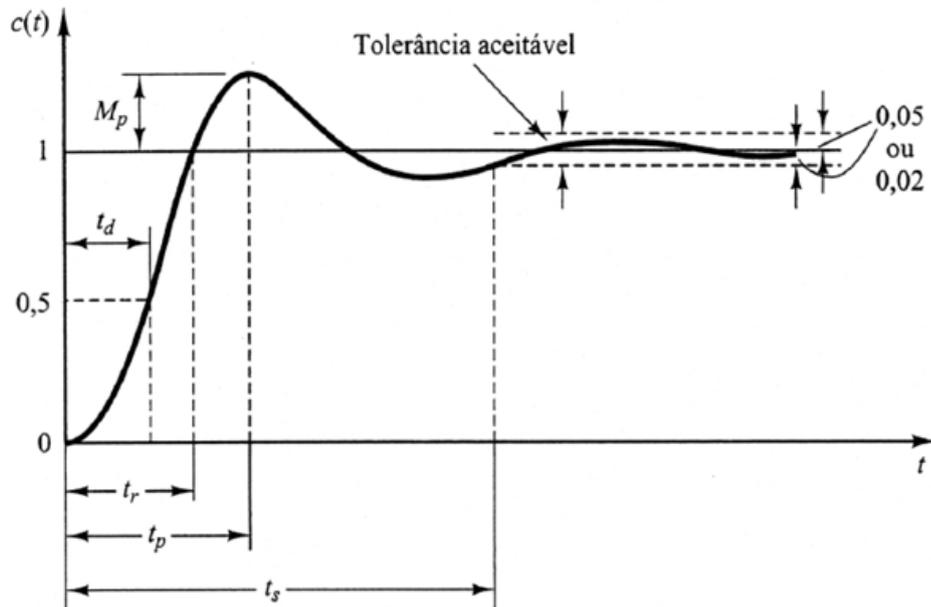
$$M_p = e^{-(\xi/\sqrt{1-\xi^2})\pi} \quad (31)$$

$$M_p(\%) = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} 100\% \quad (32)$$

Pela equação (31), nota-se que quanto maior o coeficiente de amortecimento, menor o sobressinal, como também pode ser observado na Figura 7.

É importante o conhecimento desses parâmetros e da relação entre eles. O tempo de subida, tempo de pico e tempo de acomodação indica a velocidade da resposta transitória (NISE, 2017). Se a resposta precisar ser rápida é necessário que w_n seja grande. Para o tempo de acomodação e o sobressinal máximo serem pequenos, o coeficiente de amortecimento precisa ser relativamente grande. Outra questão também, é que alguns desses índices são inversamente proporcionais. Se o tempo de subida é alto, consequentemente o sobressinal máximo será baixo. Em seguida, o gráfico exemplificando como é a resposta de um sistema de segunda ordem para o caso subamortecido (OGATA, 2011).

Figura 8 - Resposta de um sistema de segunda ordem para o caso subamortecido

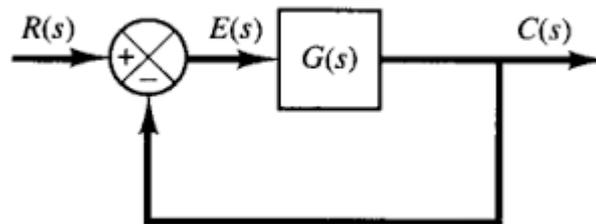


Fonte: OGATA (2011)

2.3.3.3 Erro em regime estacionário

O erro em regime estacionário para os sistemas de malha fechada, o qual é definido como a diferença entre o sinal de saída e o sinal de referência. O erro em regime permanente ou estacionário diz respeito apenas à capacidade do sistema em seguir sinais de entrada (NISE, 2017; OGATA, 2011). A Figura 9 apresenta um diagrama de bloco representando o sistema:

Figura 9 - Diagrama de blocos



Fonte: NISE (2017)

O erro $E(s)$ do sistema pode ser dado pela fórmula (NISE, 2017; OGATA, 2011):

$$E(s) = R(s) - C(s) = R(s) - E(s)G(s) \quad (33)$$

fazendo as modificações na equação (33), tem-se:

$$E(s) = \frac{1}{1+G(s)} * R(s) \quad (34)$$

Se o sistema é estável, pode-se aplicar o teorema do valor final, logo obtém-se o erro, definido como (NISE, 2017; OGATA, 2011):

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) \quad (35)$$

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1+G(s)} \quad (36)$$

Para uma entrada degrau unitário, tem-se o erro estacionário definido como:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s(1/s)}{1+G(s)} = \frac{1}{1+G(s)} = \frac{1}{1+\lim_{s \rightarrow 0} G(s)} = \frac{1}{1+G(0)} \quad (37)$$

Considerando $G(0) = K_p$, o qual é definido como constante de erro de posição, pode simplificar a fórmula para (NISE, 2017; OGATA, 2011):

$$e_{ss} = \frac{1}{1+K_p} \quad (38)$$

onde, a constante de erro de posição (K_p) é uma medida do erro em estado estacionário entre a entrada e a saída, e o degrau unitário é a entrada do sistema. Pela equação (38), observa-se que quanto mais alta a constante de erro de posição, menor é o erro estacionário. Sabe-se que (NISE, 2017; OGATA, 2011):

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} G(s) \quad (39)$$

onde, $\lim_{s \rightarrow 0} G(s)$ é o ganho estático e s é a variável de frequência está tendendo a zero. Para conseguir um erro em regime permanente nulo, é necessário que (NISE, 2017; OGATA, 2011):

$$\lim_{s \rightarrow 0} sG(s) = \infty \quad (40)$$

Portanto, para que o limite seja infinito, o denominador de uma função de transferência deve tender a zero quando s tende a zero. E isso só ocorre quando a função de transferência tem pelo menos um polo na origem (NISE, 2017; OGATA, 2011). Com as considerações descritas, para sistemas de ordem superior a 1, obtém-se a seguinte resposta:

$$e_{ss} = \frac{1}{1+\infty} = 0 \quad (41)$$

Assim, para sistemas de segunda ordem, o erro no estado estacionário tem que ser nulo. Porém, no mundo real, é inevitável que não ocorra erro, pois o sistema de controle está sujeito a perturbações externas. Por isso, é aceitável que o erro tenha um valor mínimo (NISE, 2017; OGATA, 2011).

2.4 Lógica *Fuzzy*: Revisão de literatura voltada para aplicação

Controle *fuzzy* tem tido aplicações bem sucedidas em muitos campos, tais como: processos industriais, negócios, indústria química, etc (RIGNEL; CHENCI; LUCAS, 2011). Um exemplo de aplicação de controle *fuzzy* no processo de torração do café é o trabalho elaborado por Godoy et al. (2013). Os autores fizeram um controlador *fuzzy* para controlar a temperatura dentro de um torrador. As variáveis de entradas utilizadas foram a temperatura de entrada de ar quente e a temperatura da câmara de torrefação. E as variáveis de saída foram o fluxo de gás, o fluxo de ar quente e o fluxo de água.

Godoy et al. (2013) definiram o universo de discurso para cada variável com base no conhecimento do processo e criaram funções de pertinência e variáveis linguísticas que consideraram ser suficientes para o controle. No trabalho, os autores não fizeram uso da simulação do processo e nem testaram o controle *fuzzy* em torradores, mas foi mostrado que é viável usar *fuzzy* em processos de torração do café, uma vez que, por meio da ativação das regras, conseguiram observar o comportamento da temperatura em função das outras variáveis.

Virgen - Navarro et al. (2016b) propuseram um modelo neuro-*fuzzy* que monitorava a cor do café durante a torração. Segundo os autores, é muito difícil medir os parâmetros que podem determinar a qualidade do café torrado, porém a cor é um dos parâmetros que pode estar diretamente associado ao grau da torra e conseqüentemente com a temperatura final, uma vez que, quanto maior a temperatura final, mais escuro é o café. Visto isso, os autores desenvolveram um sistema de inferência *fuzzy* baseado em redes adaptativas (ANFIS) e em análise de imagens coloridas para estimar o teor de umidade do grão de café durante a torração.

No trabalho de Virgen - Navarro et al. (2016b) foram obtidos os valores de cor em três temperaturas do ar no processo de torração, 400°C, 450°C e 500°C. A cada 5 minutos era retirada uma amostra e quando essa resfriava, uma câmara digital capturava as fotos. O colorímetro foi utilizado para obter as curvas de calibração. Para criar a rede ANFIS as variáveis de entrada foram a luminosidade (L), a distância geométrica entre cores (E) e o

índice de escurecimento (BI), cujos dados são do colorímetro. E como variável de saída, a umidade, porque segundo os autores, ela contribui para determinar o grau da torra. Foi utilizado o *fuzzy c-means* (FCM) para gerar os conjuntos *fuzzy*. Feito isso, a rede foi treinada e os autores concluíram que o modelo apresentou boa precisão e desvios médios pequenos em relação ao comportamento experimental, mostrando que pode ser uma alternativa para indústria de café, uma vez que, poderá ser um substituto para os dispositivos de cor que são sensíveis a altas temperaturas.

Outra aplicação de *fuzzy* na área de café, foi o trabalho de Tominaga et al. (2001). Os autores criaram um modelo neuro-*fuzzy* que estima a avaliação sensorial do café e compararam com outros modelos, como o Método da Superfície de Resposta (RSM) e Análise de Regressão Múltipla (MRA). Os cafés eram de três países produtores, Brasil, Colômbia e Indonésia e o objetivo era analisar sensorialmente a bebida desses cafés em diferentes torras, clara, média e escura. Para a rede de neuro-*fuzzy* a entrada foram os tipos de cafés e a saída eram os atributos sensoriais. A rede foi treinada e testada e os autores concluíram que a neuro-*fuzzy* pode ser utilizada na estimativa da avaliação sensorial e foi a que obteve melhor resultado dentre os demais modelos.

O trabalho de Flores e Pineda (2016) também utiliza *fuzzy* para avaliar a qualidade do café. Os autores afirmam que a degustação de cafés por profissionais treinados ditará o sucesso do café no mercado, pois, a análise sensorial serve para fazer um julgamento objetivo da qualidade e consequentemente do preço. Visto isso, o objetivo dos autores foi desenvolver um sistema de lógica *fuzzy* tipo 2 que auxiliasse a treinar os provadores inexperientes. O sistema foi feito com 5 antecedentes, os quais foram algumas características do café, como cor, aroma, sabor, retrogosto e corpo. E o consequente foi a qualidade. O sistema foi montado e para teste foi criada uma interface onde o provador colocava as características que ele encontrava no café e o sistema avaliava a qualidade.

O trabalho dos autores Virgen - Navarro et al. (2016a) comparou duas técnicas para obter o coeficiente de difusão efetivo no processo de torração do café, em função da temperatura da superfície da partícula e da umidade reduzida. Os autores consideram que o coeficiente de difusão efetivo é importante para entender o processo de torração. Visto isso, ele utiliza dois modelos, o modelo de Parâmetros Ajustáveis e o modelo *fuzzy* tipo Mandani e compara ambos com os dados experimentais obtidos durante a torra. O *fuzzy* tipo Mandani foi composto de duas entradas e uma saída. As entradas foram a temperatura da superfície da partícula e o teor de umidade. E a saída foi o coeficiente de difusão efetivo. As regras foram elaboradas conforme o conhecimento do processo e de estudos na literatura. Era conhecido

que à medida que a temperatura da superfície da partícula aumentava, o valor do coeficiente de difusividade aumentava também, enquanto que, como a umidade é perdida, a difusividade da água era lenta.

Com os resultados do trabalho, Virgen - Navarro et al. (2016a) concluíram que os dois modelos foram satisfatórios, porém o modelo *fuzzy* ajustou melhor aos dados experimentais. Os autores concluíram que o modelo *fuzzy* não depende de modelagens complexas e é uma boa opção para aqueles que querem modelar o comportamento da torração do café com relação ao tempo.

2.5 Controlador *fuzzy*

A lógica *fuzzy* é uma abordagem baseada no raciocínio humano em vez de cálculos rígidos, sendo mais intuitiva do que a lógica clássica, por isso é muito utilizada sempre que existe uma incerteza. Ela permite compreender melhor os problemas imprecisos e difíceis de modelar, sendo assim muito aplicada a sistemas de modelagem e controle de processos. (BENNOUNA; TKIOUAT, 2018).

A lógica *fuzzy*, uma extensão da lógica booleana, foi criada por Lotfi Zadeh em 1965. Ela é baseada na teoria dos conjuntos *fuzzy*, a qual é uma generalização da teoria dos conjuntos clássicos. A lógica *fuzzy*, conhecida também como lógica nebulosa, compreende que o raciocínio é aproximado em vez de exato e por causa disso o valor verdade de uma hipótese pode assumir um subconjunto *fuzzy* dentro de algum conjunto. Diferentemente, os sistemas de lógicas tradicionais, como os sistemas de lógica binária, ditam que o valor verdade compreende somente dois valores: verdadeiro ou falso (GOMIDE; GUDWIN, 1994).

Em sistemas *fuzzy*, os elementos têm um grau de pertinência em vários conjuntos, ou seja, eles podem pertencer a mais de um conjunto *fuzzy* (ZADEH, 1965). Um conjunto *fuzzy* é definido por:

$$A = \{u_A(x)/x\} \quad x \in U \quad (43)$$

Na equação (43), A representa o conjunto *fuzzy*, x é a variável de interesse, U é o universo de discurso, e $u_A(x)$ é o grau de pertinência de x no conjunto A . Pode-se interpretar a função da seguinte forma: um conjunto *fuzzy* A em um universo de discurso U é caracterizado por uma função de pertinência $u_A(x)$ que associa cada ponto x a um número real em um determinado intervalo com valores de x representando um grau de pertinência de x em A (ZADEH, 1965).

Um conjunto *fuzzy* é normalizado quando o valor máximo é 1 e um conjunto *fuzzy* que não é normal é denominado de subnormal. Os conjuntos *fuzzy* possuem duas características importantes: o suporte e o núcleo. Por definição, o suporte de A é a parte de U , na qual a função de pertinência de A não é nula. A notação é descrita abaixo (ZADEH, 1965):

$$\text{supp}(A) = \{x \in U / u_A(x) \neq 0\} \quad (44)$$

onde, o núcleo de A não será vazio se o conjunto *fuzzy* A for normalizado. A notação é descrita como (ZADEH, 1965):

$$\text{nuc}(A) = \{x \in U / u_A(x) = 1\} \quad (45)$$

Com essas definições é possível definir dois tipos de conjuntos. O conjunto *Singleton* é aquele que o suporte é um único ponto de U com $u_A(x)=1$. Pode-se chamar também de conjunto unitário *fuzzy*. O conjunto α – *corte* pode ser definido como (ZADEH, 1965):

$$A_\alpha = \{x \in U / u_A(x) \geq \alpha\} \quad (46)$$

no qual, a notação mostra que o α – *corte* é um conjunto *fuzzy* que possui uma limitação ao domínio do conjunto de acordo com o valor de α , ou seja, todos aqueles elementos do domínio que tenha $u_A(x) \geq \alpha$ pertence ao conjunto resultante (ZADEH,1965).

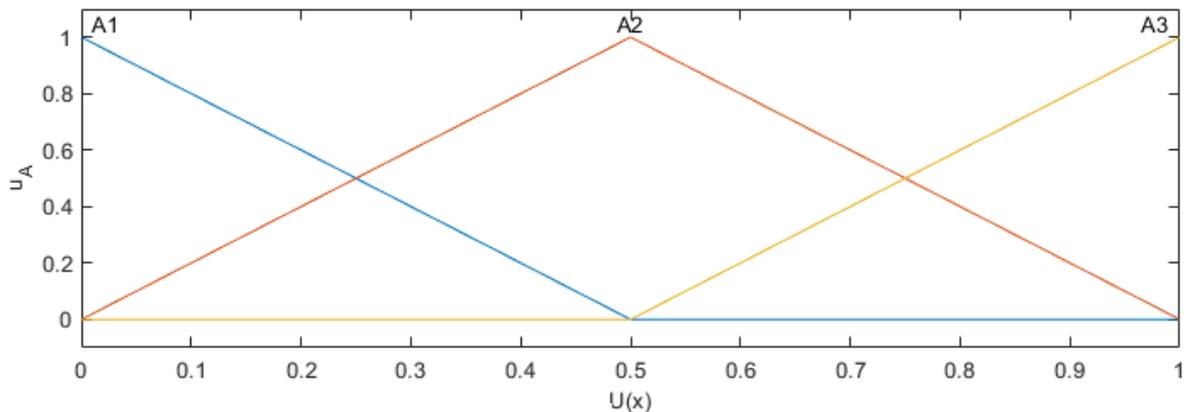
Quando utiliza-se *fuzzy*, trabalha-se com variáveis linguísticas, as quais são variáveis compostas por palavras ou frases e não números. Geralmente são termos simples, como ‘alta’, ‘média’, ‘baixa’ entre outras. Essas variáveis poderiam ser as variáveis linguísticas para descrever a temperatura. O motivo de utilizar essas variáveis em *fuzzy* é devido à facilidade em capturar descrições especialistas de sistemas complexos (GOMIDE; GUDWIN; TANSCHKEIT, 1995).

As variáveis linguísticas são representadas pelas funções de pertinências. Essas, por definição, são funções numéricas que ditam valores de pertinência *fuzzy* para valores de uma variável, em seu universo de discurso. Elas podem ser de diversas formas, sendo as mais comuns as formas triangular, trapezoidal e gaussiana. A escolha de qual dessas funções utilizar, não segue uma regra, logo, são definidas por meio de conhecimento especialista. A vantagem é que, pode-se alterar a função, conforme os resultados (ZADEH, 1965).

A Figura 10 é uma função triangular, a qual é representada por 3 valores. Os pontos que compreendem os valores 0 e 1 é referente ao intervalo dentro do qual a função de pertinência pode assumir valores. E o ponto representado pelo A_2 na figura, é o ponto onde a

função de pertinência é máxima, chamado também de núcleo. No eixo vertical são representados os valores da função de pertinência $\mu_A(x)$, no qual é entre 0 e 1. No eixo horizontal, são os valores do universo de discurso $U(x)$. A função triangular é muito utilizada quando é necessário obter ajustes mais precisos (ZADEH, 1965).

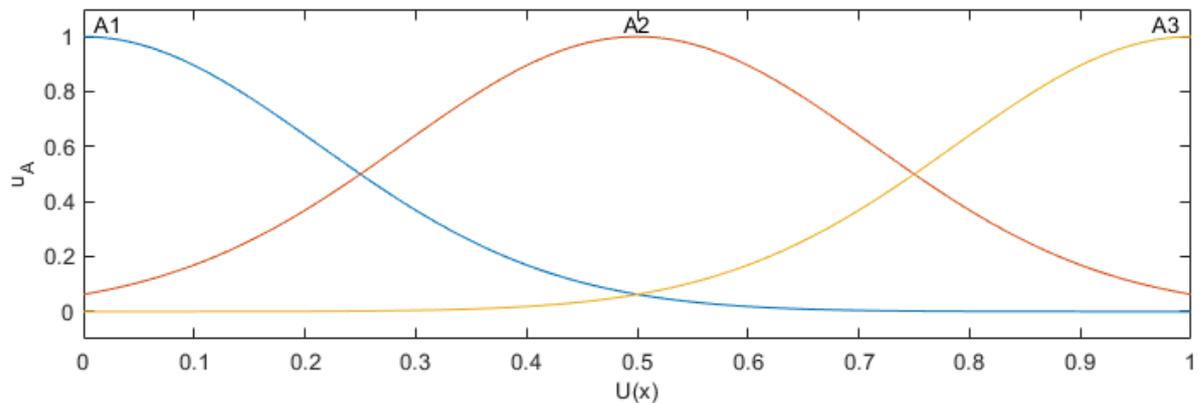
Figura 10 - Função de pertinência triangular



Fonte: Do autor (2019)

A Figura 11 representa a função gaussiana, na qual é representada pela média e o desvio padrão. Ela é caracterizada por ter um decaimento suave (ZADEH, 1965).

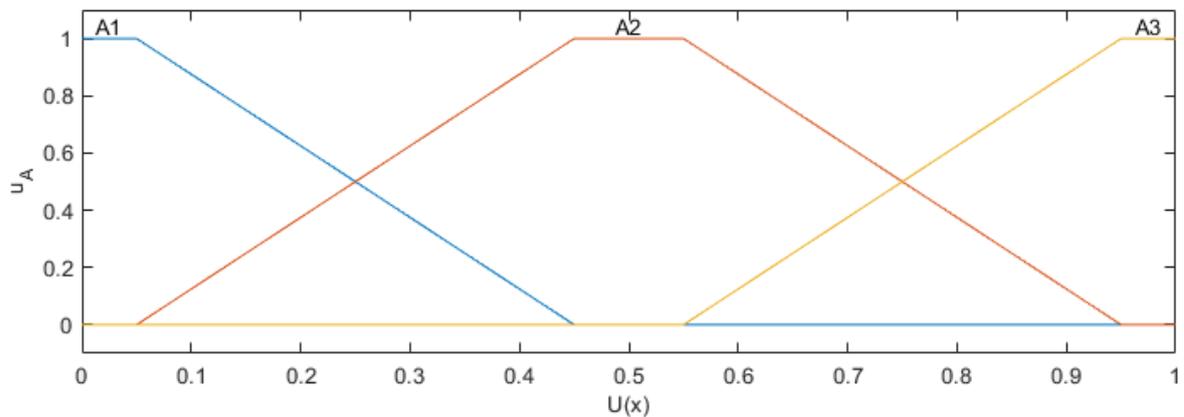
Figura 11 - Função de pertinência gaussiana



Fonte: Do autor (2019)

A Figura 12 é uma função trapezoidal, sendo representada por 4 parâmetros. Os dois parâmetros intermediários formam um intervalo denominado núcleo; os dois parâmetros extremos formam um intervalo denominado suporte. A pertinência de uma entrada x posicionada no suporte $A(x) > 0$. E a pertinência de uma entrada x posicionada no intervalo definido pelo núcleo $A(x) = 1$ (ZADEH, 1965).

Figura 12 - Função de pertinência trapezoidal



Fonte: Do autor (2019)

Sistemas de inferência *fuzzy* operam sobre os conjuntos. Assim como a teoria clássica de conjuntos conta com operadores de união, interseção e complemento, os conjuntos *fuzzy* são representados por operadores *min* e *max*. O primeiro é um operador de interseção e é um exemplo de operador T-norma. O segundo é um operador de união e um exemplo de S-normas. O *min* e o *max* são considerados T-norma e S-norma já que atendem as seguintes condições: comutativa, associativa, monotônica e contorno. Abaixo, são representadas essas propriedades, respectivamente (ZADEH,1965; BELIAKOV; PRADERA; CALVO, 2007):

- a) $xTy = yTx$
- b) $xT(yTz) = (xTy)Tz$
- c) $xTw \leq yTz$, se $x \leq y$, $w \leq z$
- d) $xT0$; $xT1 = x$

Um modelo *fuzzy*, pode ser projetado baseado em conhecimento especialista para a finalidade de controlar variáveis. Basicamente, um controlador *fuzzy* é composto pela fuzzyficação, base de conhecimento, procedimento de inferência e a defuzzificação (GOMIDE; GUDWIN, 1994).

A fuzzificação permite converter os valores de entrada x , em um conjunto *fuzzy* A para tornarem-se variáveis linguísticas, ou seja, são determinados os graus de pertinência $u_A(x)$, através das funções de pertinência para as variáveis de entrada. Para essa etapa, as funções que melhor representam a fuzzificação geralmente são do tipo trapezoidal ou triangular, sendo que a primeira é mais utilizada para as variáveis de entrada e saída porque é mais fácil de implementar, porém não existe um regra para a escolha delas (BENNOUNA; TKIOUAT, 2018; KHAN; KHAN, 2013).

Por definição, a base de conhecimento é um conjunto de regras que define a estratégia de controle e suas metas (GOMIDE; GUDWIN, 1994). As regras associam os valores de entradas com os de saída. Elas podem ser determinadas através de conhecimento de especialista ou elaboradas em programa a partir de uma base de dados. As regras de um controlador *fuzzy*, seguem o modelo abaixo, sendo que os conjuntos A e B são conjuntos de entrada conhecidos como antecedentes, e o conjunto C é o conjunto de saída, chamado de consequente (ZADEH,1965).

$$\text{SE } x \text{ é } A \text{ E } y \text{ é } B, \text{ ENTÃO } Z \text{ é } C \quad (47)$$

Esse enunciado determina que a ligação dos antecedentes seja feita pela regra do tipo *if-then* (se-então), originando o consequente. Quando se tem mais de um antecedente, usam-se os conectivos *and* ou *or* para se obter um consequente (ZADEH,1965). Essa etapa é denominada de mecanismo de inferência e o objetivo é processar os dados *fuzzy* de entrada juntamente com as regras e assim tomar a decisão e efetivamente aplicar as ações de controle (BENNOUNA; TKIOUAT, 2018).

O método de inferência utiliza das T-normas e S-normas para descrever a base de regras, que são ligados pelos conectivos *and* ou *or*, conhecidos como operadores de agregação. O primeiro quando é utilizado é modelado pela aplicação da T-norma (*mim*) e o segundo é pela S-norma (*max*) (BELIAKOV; PRADERA; CALVO, 2007).

Os tipos de método de inferência mais utilizados são conhecidos como métodos de Mamdani e Takagi-Sugeno. Ambos são estruturas formadas por regras do tipo se-então e os antecedentes são formados por variáveis linguísticas conectadas por *and* ou *or*, como já citado. A diferença entre essas metodologias está no termo consequente (ZADEH, 1965).

No modelo de Mamdani, o antecedente e o consequente são variáveis linguísticas explícitas através de conjuntos *fuzzy*. O modelo Takagi-Sugeno considera a inclusão de uma função matemática (saída como uma função das entradas) na consequente de cada regra, ou seja, o consequente não é formado por conjuntos *fuzzy* (GODOY et al., 2013).

Quando utiliza-se o modelo de Mamdani, as regras são implementadas por meio de operadores para interligar os antecedentes e por meio da função de implicação que é responsável pela formação do consequente, o conjunto *fuzzy* de saída. Neste modelo é necessário então fazer a defuzzificação, para se obter um valor de saída numérico. A regra de Mamdani (ANDRADE; JACQUES, 2008) é dada conforme:

$$\text{SE } x \text{ é } A \text{ E } y \text{ é } B, \text{ ENTÃO } Z \text{ é } C \quad (48)$$

O modelo Takagi- Sugeno, como já mencionado, tem o consequente definido como uma função das variáveis linguísticas de entrada, ou seja, o resultado final é um valor numérico. Por esse motivo, algumas etapas desse controlador podem ser eliminadas. Não é necessária uma função de implicação específica, uma vez que o resultado é feito por meio de uma média ponderada das respostas de cada regra. Além disso, não se faz uso da defuzzificação. A regra de Takagi-Sugeno (ANDRADE; JACQUES, 2008) é:

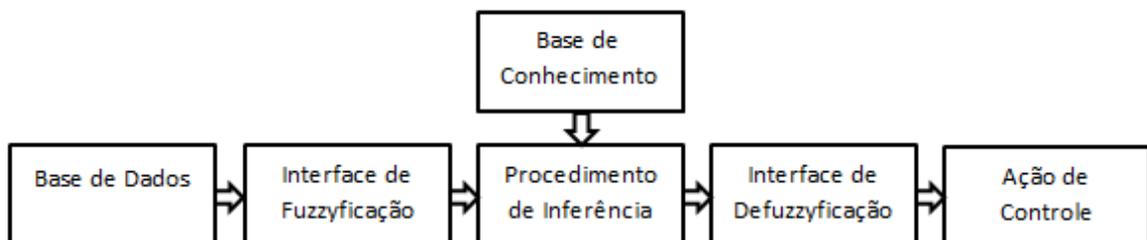
$$\text{SE } x \text{ é } A \text{ E } y \text{ é } B, \text{ ENTÃO } Z = f(x,y) \quad (49)$$

Visto isso, a escolha do modelo para a aplicação no projeto depende do conhecimento de especialista e a eficiência da resposta do controlador no projeto final. Sendo assim, a aplicação dos modelos não segue uma regra específica (GODOY et al.,2013).

O processo de defuzzificação é a etapa que as ações de controle *fuzzy* passam por mudanças e geram as ações de controle não-*fuzzy*. Isso é necessário, pois só assim compreende-se qual é a decisão não- *fuzzy* que melhor reflete a decisão *fuzzy* para ser então enviada ao controle final. O objetivo de fazer a defuzzificação é obter um valor numérico (BENNOUNA; TKIOUAT, 2018; KHAN; KHAN, 2013).

Os métodos mais utilizados nesta etapa são o centróide (centro de gravidade), o método da média dos máximos e o primeiro dos máximos. O primeiro é quando o valor de saída é o centro da área da função, ou seja, fornece a média das áreas que representa os graus de pertinência de um subconjunto *fuzzy*. O segundo é quando o ponto médio é o valor de saída. E o método do primeiro dos máximos é quando o ponto máximo é o valor de saída. No processo de defuzzificar também não existe um regra para a escolha desses métodos (GOMIDE; GUDWIN; TANSCHKEIT, 1995). A Figura 13 mostra a estrutura de um controlador *fuzzy*.

Figura 13 - Estrutura básica de um controlador *fuzzy*



Fonte: Do autor (2019)

2.6 Software: MATLAB

O *MATrix Laboratory*, também conhecido como MATLAB, é um *software* que tem linguagem C ++, muito utilizado para implementação de algoritmos, cálculos com matrizes, construção de gráficos, modelagem matemática entre outras funcionalidades (MATHWORKS, 2019).

Além disso, o MATLAB contém muitas funções matemáticas já implementadas, as quais são agrupadas conforme a área de estudo em *toolboxes* e armazenadas em diretórios próprios. Isso permite diversas aplicações em muitos ambientes de estudos como controle de processo e inteligência artificial (MATHWORKS, 2019).

No trabalho é utilizado o *Fuzzy Logic Toolbox*, o qual é uma interface que possui vários recursos destinados ao uso da lógica *fuzzy*. Por ele, foram desenvolvidos os controladores *fuzzy* descritos neste trabalho (MATHWORKS, 2019).

O *Simulink* é uma interface gráfica do MATLAB. Esse é muito utilizado para fazer modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos. Para isso, o sistema é representado por meio do diagrama de blocos. Isso é uma vantagem, uma vez que substitui programação, facilitando o trabalho dos programadores. No *Simulink*, existe uma variedade de blocos para tratar sistemas lineares, não lineares, contínuos e discretos (MATHWORKS, 2019).

3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste trabalho, foi abordado o sistema de segunda ordem, uma vez que, o processo de torração do café Arábica pode ser aproximado por uma função de transferência de ordem 2. Além disso, foi estudado somente o sinal de entrada degrau para teste de resposta, já que essa função é muito utilizada quando existem variações bruscas na entrada como é característico da curva de torra, visto que, no início da torra, têm-se uma queda na temperatura quando é adicionado o café no torrador.

Para a verificação da estabilidade de um sistema linear e invariante no tempo, o método de estabilidade utilizado foi pela localização dos polos do sistema no plano complexo ou plano s .

Foi utilizado o controle *fuzzy* para o controle da temperatura no processo de torração. Foram considerados controladores *fuzzy* de dois tipos: PD *fuzzy* e PID *fuzzy*, pois a combinação de modelo de regra *fuzzy* com a essência dos conceitos de controladores clássicos PID possibilita melhorar a resposta transitória, devido à redução do sobressinal e do tempo de acomodação. Além disso, controle *fuzzy* pode contribuir com a minimização ou eliminação do

erro em estado estacionário. A escolha de estudar somente os controladores PID e PD e não o PI se deve ao fato de que o PID já consegue eliminar o erro no estado estacionário, a mesma função do PI, porém a resposta desse é muito lenta, não justificando então seu uso neste trabalho, uma vez que precisa que a dinâmica seja mais rápida.

Além disso, o trabalho aborda o controle discreto em sistemas dinâmicos contínuos. Isso quer dizer que o projeto todo é feito no plano s , ou seja, no tempo contínuo. Apenas os blocos responsáveis pela derivada e integral que são representadas no espaço z . No diagrama de blocos apresentado no artigo seguinte, foi necessário incluir então o segurador de ordem zero, pois seu efeito influencia a resposta no sistema estudado, uma vez que esse mantém o sinal de saída constante entre os instantes de amostragem, para que o sinal possa ser aplicado a um sistema contínuo. Isso foi importante para simplificar o projeto e não aprofundar no modelo discreto.

Outra consideração importante no trabalho é que foram utilizadas no artigo para descrever as variáveis de entrada dos controladores a *Variação do Erro* e o *Acúmulo do erro*. Essas foram as variáveis descritas para representar a derivada e a integral discreta, respectivamente no controlador.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, M.; JACQUES, M. A. P. Estudo comparativo de controladores de Mamdani e Sugeno para controle de tráfego em interseções isoladas. **Transportes**, v. XVI, n. 2, p. 24-31, 2008.
- BELIAKOV, G.; PRADERA, A.; CALVO, T. **Aggregation Functions: A Guide for Practitioners**. Poland: Editor-in-chief, 2007.
- BENNOUNA, G.; TKIOUAT, M. Fuzzy logic approach applied to credit scoring for microfinance in Morocco. **Procedia Engineering**, Marrocos, p. 274-283, 2018.
- BORÉM, F.M. **Pós-colheita do Café**. Lavras: Ed. UFLA, 2008.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa n.8, de 11 de junho de 2003**. Aprovado Regulamento Técnico de Identidade e de Qualidade para a Classificação do Café Beneficiado Grão Cru. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, n. 48, p. 4,13 jun. 2003. Seção 1.
- CARMOMARQ, 2018. Produtos. Disponível em: < http://www.carmomaq.com.br/produtos.php?produto=46&torrador_speciatto#altura >. Acesso: 31/08/2018.
- CARVALHO, V.D.; CHAGAS, S.J.R.; SOUZA, S.M.C. **Fatores que afetam a qualidade do café**. Informe Agropecuário. Belo Horizonte, v.18; n.187, p.5-20, 1997.
- CID, MC. ; DE PEÑA, M-P. **Coffee: Analysis and Composition**. Encyclopedia of Food and Health. University of Navarra, Pamplona, Spain, p. 225-231, 2016.
- CLARKE, R.J. Roasting, In: CLARKE, R.; MACRAE, R. **Coffee: technology**. London. Ed: Elsevier Applied Science, 1987.
- CLARKE, R.J.; VITZTHUM, O.G. **Coffee Recent Developments**. Editora Offices, 2001.
- COUGHANOWR, D.R.; KOPPEL, L.B. **Análise e Controle de Processos**. Ed. Primor S.A. Rio de Janeiro, Brasil. p. 235, 1998.
- FENNEMA, O.R.; DAMODARAN, S.; PARKIN, K.L. **Química de alimentos de Fennema**. Porto Alegre, Ed: Artmed, 2010. 900 p.
- FERREIRA, C. **Estudo Comparativo entre as Técnicas de Controle Fuzzy, PI e Adaptativo Aplicado ao Processo de Fabricação de Papel Reciclado Utilizando a Ferramenta Delta Tune**. 2009, 91 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2009.
- FLAMENT, I. **Coffee flavor chemistry**. Chichester: J. Wiley, 2002. 424 p.
- FLORES, W.C.; PINEDA, G. M. A Type-2 Fuzzy Logic System Approach to Train Honduran Coffee Cuppers. **IEEE**, 2016.
- GODOY, W. F. et al. Fuzzy logic applied at industrial roasters in the temperature control. **IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)**. São paulo, Brasil. p. 450-455, 2013.

GOMIDE, F.A.C.; GUDWIN, R.R. Modelagem, Controle, Sistemas e Lógica Fuzzy. SBA Controle e Automação. v.4; n.3; Setembro/ Outubro, 1994.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R.; TANSCHKEIT, R. Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e aplicações. **Proc. 6 th IFSA Congress-Tutorials**, n. July, p. 1-38, 1995.

ILLY, A.; VIANI, R. **Espresso Coffee**. London: Ed. Academic, 1995.

ILLY, A.; VIANI, R. **Espresso Coffee The chemical of quality**. London: 3° ed. Academic, 1998, 253p.

JANSEN, G.A. **Coffee roast magic-art-science physical chances and chemical reactions**. **Munich**: Corporate media GmbH, 2006.

KHAN, N.; KHAN, F. Fuzzy based decision making for promotional marketing campaigns. **International Journal of Fuzzy Logic Systems (IJFLS)**. v.3, n. 1, 2013.

KWONG, W.H. **Introdução ao controle de processos e a instrumentação usando Scicos**. Ed: UFSCAR, São Carlos, p. 147, 2013.

LEITE, D. et al. Evolving granular fuzzy model-based control of nonlinear dynamic systems Fuzzy Systems. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**. v. 23, n. 4, p. 923-938, 2015.

MATHWORKS, 2019. MATLAB. Disponível em:
<https://www.mathworks.com/?s_tid=gn_logo> Acesso: 25/02/2019.

MELO, W.L.B. **A importância da informação sobre o grau de torra do café e sua influência nas características organolépticas da bebida**. Brasília: Embrapa, 2004. (Comunicado Técnico, 58).

MOREIRA, R.F.A. et al. Componentes voláteis do café torrado. Parte II: Compostos alifáticos, alicíclicos e aromáticos. **Química Nova**. São Paulo, v.23, n.2, p.195-203, maio/jun. 2000.

NISE, N.S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. Rio de Janeiro: LTC, 7.ed, 2017,745 p.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. São Paulo: Pearson, 5ª ed, 2011, 809 p.

PIMENTA, C.J. **Qualidade de café**. Lavras: Ed. UFLA, 2003,304 p.

PITTIA, P, ROMANI, S. **Coffee Processing**. in kristbergsson k, otlles s editors. Food Processing - Part IV Food Processing Operations, ISEKI Food Series , Springer; 2010. In press.

RIGNEL,D.G.S.; CHENCI,G.P.; LUCAS, C.A. Uma introdução a Lógica Fuzzy. **Revista Eletrônica de Sistemas de Informação e gestão Tecnológica**, v. 1, n.1, p. 17-28, 2011.

SILVA, J.R. **Otimização do processo de torração do café pelo monitoramento de parâmetros e propriedades físicas e sensoriais**. 2008, 82 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008 .

SIVETZ, M; FOOTE, H.E. **Coffe processing technology**. Westport: AVI. 1963. v.2.

SKRJANC, et al. Evolving fuzzy and neuro-fuzzy approaches in clustering, regression, identification, and classification: A Survey. **Information Sciences**. v.490, p. 344-368, 2019.

TOMINAGA, O.; ITO, F.; HANAI,T.; HONDA, H.; KOBAYASHI,T. Sensory Modeling of Coffee with a Fuzzy Neural Network. **Journal of food science**. v. 67, n° 1, 2001

VIANI, R.; HORMAN, I. Thermal behavior of trigoneline. **Journal Food Science**, Chicago, v.39, n.6. p.1216-1217, Nov/Dec. 1974.

VIRGEN-NAVARRO, L. et al. Diffusivity coefficient estimation during coffee roasting in a spouted bed using a fuzzy model . **Revista Mexicana de Ingeniera Quimica**, v. 15, n. 2, p. 513-524, 2016a.

VIRGEN-NAVARRO, L. et al. Neuro-fuzzy model based on digital images for the monitoring of coffee bean color during roasting in a spouted bed. **Expert Systems with Applications**, v. 54, p. 162-169, 2016b.

ZADEH, L. **Fuzzy Sets - Information and Control**, v.8, 1965, 338-353 p.

SEGUNDA PARTE – ARTIGO

Projeto e simulação de controladores *fuzzy* para o processo de torração do café

Daniele Aparecida de Oliveira Silva ¹, Daniel Furtado leite², Roney Alves da Rocha³, Carlos José Pimenta⁴

¹ Departamento de Ciência dos Alimentos, Universidade Federal de Lavras.

² Departamento de Automática, Universidade Federal de Lavras.

³ Departamento de Ciência dos Alimentos, Universidade Federal de Lavras.

⁴ Departamento de Ciência dos Alimentos, Universidade Federal de Lavras.

RESUMO

O processo de torração é importante, pois nesse processo o café obtém suas características sensoriais como o aroma e sabor pela ação de diversas reações químicas e físicas. No presente trabalho, dois controladores *fuzzy* foram propostos para o controle de temperatura no processo de torração do café. O *Erro* e a *Varição do Erro* foram às variações de entrada do controlador PD *fuzzy* e o *Controle* foi a variável de saída. Para o controlador PID *fuzzy*, além dessas variáveis, foi adicionada mais uma entrada, *Acúmulo do erro*. Utilizou-se o método de inferência *min-max* de Mamdani. Para analisar o desempenho dos controladores *fuzzy* foi criado no *Simulink* do MATLAB um diagrama de blocos com uma planta, representada por uma função de transferência obtida a partir do ajuste de dados experimentais. Foi analisada a estabilidade do sistema pelo diagrama de polos e zeros e os critérios de desempenho do controlador pelo, sobressinal máximo, tempo de acomodação, tempo de pico, tempo de subida e erro nulo no estado estacionário. Os resultados obtidos comprovam a potencialidade de utilizar o controle PD *fuzzy* e o PID *fuzzy* para controlar a temperatura em um processo de torra do café, com *set point* variável. Os ajustes dos parâmetros das funções de pertinência e as regras elaboradas mostraram-se capazes de produzir um bom desempenho, com sobressinal máximo e tempo de acomodação satisfatório e tendo-se, inclusive, eliminado o erro no estado estacionário com o controlador PID *fuzzy*.

1 INTRODUÇÃO

As características da bebida do café, como aroma, sabor e cor são desenvolvidas durante o processo de torração, tornando-o uma etapa muito importante para obtenção de cafés com alta qualidade (CID; DE PEÑA, 2016). No entanto, o processo é complexo, pois envolve diversas reações químicas bem como mudanças físicas que são responsáveis pelo tipo de bebida originada (SIVETZ; FOOTE, 1963). Se alguns fatores não forem controlados, como fluxo de calor, de ar e a temperatura, os cafés torrados podem não ter a qualidade esperada. De todos os parâmetros envolvidos na torra, a temperatura é considerada uma das mais

críticas (SCHENKER et al., 2000). Por causa disso, o controle da mesma durante todo o processo deve ser realizado.

O sistema em estudo deste trabalho compreende um torrador de amostra de café. O problema de controle consiste em conduzir o sistema, de forma que a trajetória do *set point* siga a curva de torra que é um gráfico elaborado a partir do processo de torração, o qual descreve os valores de temperatura versus o tempo do processo, caracterizando-se, portanto, como um problema de controle tipicamente servo, com *set point* variável.

No trabalho é utilizado o controlador *fuzzy*, por ser mais fácil e mais rápido de ser implementado e ajustado, uma vez que não exige um conhecimento do modelo matemático do sistema para o projeto do controlador (GHOUSH et al., 2008). Além disso, ele é mais intuitivo e depende principalmente da experiência e conhecimento do operador e utiliza-se de regras lógicas no algoritmo de controle (ZHANG; LITCHFIELD, 1993). Uma estratégia de controle bem projetada pode substituir a falta de detalhes do modelo do processo e resultar em um bom desempenho de controle (ODETUNJI; KEHINDE, 2005), sendo então uma opção viável no controle da temperatura da torra, já que o processo de torração é difícil de ser descrito matematicamente.

O controlador *fuzzy*, tornou-se uma alternativa aos controladores convencionais em processos complexos, uma vez que combina as vantagens dos controladores clássicos e a experiência dos profissionais. Geralmente, os controladores *fuzzy* possuem como entradas o erro, derivada do erro e somatório do erro. Essas entradas estão associadas fisicamente com os controladores PID. Os controladores *fuzzy* podem ser implementados em muitas estruturas (BOUBERTAKH et al., 2010), as quais duas delas foram abordadas neste trabalho. O PD *fuzzy* e PID *fuzzy*.

Normalmente, um controlador *fuzzy* é do tipo PD ou PID se a saída do controlador é um sinal de controle, além de possuir as variáveis de entradas já especificadas (BOUBERTAKH et al., 2010). O primeiro acrescenta-se ao controlador *fuzzy* o termo derivativo que auxilia na redução do sobressinal, o qual é representado no trabalho pela derivada do erro. E o segundo, além do termo derivativo, tem-se o integrador. Esse é aproximado no trabalho por um somatório do erro que auxilia na redução do erro no regime estacionário (PREMKUMURA; MANIKANDA, 2016; KUDINOVA et al., 2017).

Em qualquer projeto de sistema a estabilidade do mesmo é o primeiro fator a ser analisado. A *análise de polo e zero* é um dos métodos utilizados para isso. Os polos e zeros são determinados por meio da função de transferência. Os zeros são as raízes do numerador da função de transferência e os polos são as raízes do denominador da mesma (SREELATHA

et al., 2015). Se o sistema em malha aberta não for estável, as especificações de desempenho em malha fechada não tem nenhum significado.

O objetivo deste trabalho foi identificar o modelo do processo e desenvolveu dois controladores *fuzzy* usando o método de Mamdani. Um controlador PD *fuzzy* e PID *fuzzy*. Além disso, simulou o processo de torração do café em malha fechada no *Simulink*, a fim de ajustar o controlador para o alcance do desempenho satisfatório e erro nulo no regime estacionário.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Processo de torração

Para obter a curva de torra, a curva referência do processo, foi torrado 100 g de café do XIV Concurso de Qualidade dos Cafés de Minas. O café foi obtido da propriedade Sítio Belé, localizado em Governador Valadares e a cultivar foi Catuaí Vermelho.

O processo de torra foi realizado em um torrador elétrico de prova da marca Probat do ano de 1997. As leituras das temperaturas foram medidas utilizando-se um Termômetro Digital do modelo TP-101. A temperatura inicial para a torra foi de 180 °C, e, no momento que atingiu essa temperatura o café foi introduzido na câmara de torração para o início do processo. A curva de torra foi obtida coletando valores de temperatura a cada 30 segundos até finalizar o processo para a obtenção da torração média que, segundo Silva (2008), consiste em um tempo de 9 a 10 minutos de torra. O trabalho foi conduzido no Departamento de Ciência dos Alimentos, localizado na Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brasil.

2.2 Identificação da função de transferência do torrador

Por meio do *Toolbox* de Identificação de Parâmetros de Sistemas Dinâmicos, conhecido como *Ident*, do MATLAB, 2014 cuja licença para utilização é do Departamento de Automática da Universidade Federal de Lavras, foi possível determinar uma função de transferência que representasse a planta física, o torrador. O *Ident* permite a criação de modelos de sistemas dinâmicos e a definição de seus parâmetros.

A primeira etapa consistiu em coletar dados de temperatura em um torrador elétrico de prova vazio. Foi colocado um Termômetro Digital do modelo TP-101 no torrador. Em temperatura ambiente, ligou-se a chave do torrador e coletou-se os valores de temperatura com um tempo de amostragem de 5 segundos. Isso foi feito até que a temperatura oscilasse

pouco em torno de um valor. Em seguida, desligou-se a chave do torrador e observou-se os valores de temperatura conforme o equipamento voltasse à temperatura ambiente.

A segunda parte foi a Identificação da função de transferência no *Ident*. No *Toolbox* do *Ident* carregaram-se os dados coletados relativos ao transitório de temperatura. Foi utilizado um *Sample Time* de 5 segundos, pois este foi o intervalo entre amostras definido durante a coleta. A função de transferência obtida possui como saída a temperatura e como entrada a tensão que controla a válvula.

A função de transferência foi definida em tempo contínuo. Para definir a melhor aproximação da curva transitória de temperatura determinou-se a função de transferência com 3 polos e 1 zero. Esta escolha permitiu uma certa flexibilidade da curva de aproximação, e caso zero e polo sejam quase-coincidentes, eles tendem a se cancelar. Depois de obtida a função, por meio do *Ident*, também foi possível obter diagrama de polos e zeros do sistema, ou, em outras palavras, a representação da função de transferência no plano s ou plano de Argand-Gauss.

2.3 Desenvolvimento dos controladores *fuzzy*

Utilizou-se o *Toolbox Fuzzy Logic* do MATLAB para o desenvolvimento dos controladores PD *fuzzy* e PID *fuzzy*.

Primeiramente, definiu-se as variáveis de entrada para o controlador PD *fuzzy* como *Erro (E)* e *Variação do Erro (ΔE)* e de saída a variável *Controle*. O *Erro* representa a diferença entre a variável do processo que é controlada e o valor de *set point*. E a *Variação do Erro* é gerada a partir do erro em instantes consecutivos (ROCHA, 2017).

A *Variação do Erro* neste trabalho é variação temporal na temperatura. Como ela varia com o tempo, pode-se dizer que a *Variação do Erro* é a diferença entre a temperatura a ser controlada em determinado instante e a temperatura medida no passo anterior. E é ela que informa o sentido da temperatura. Se em um instante a variação é positiva, a temperatura a ser controlada está aumentando, se a variação é negativa, é porque a temperatura está diminuindo. E se é igual à zero, não há variação na temperatura.

Para o controlador PID *fuzzy*, acrescentou-se uma variável de entrada, a qual foi definida como *Acúmulo do erro (Σ)*. Essa variável representa o somatório do erro. Neste tipo de controlador, têm-se o termo proporcional, derivativo e integrativo (KUDINOVA et al., 2017).

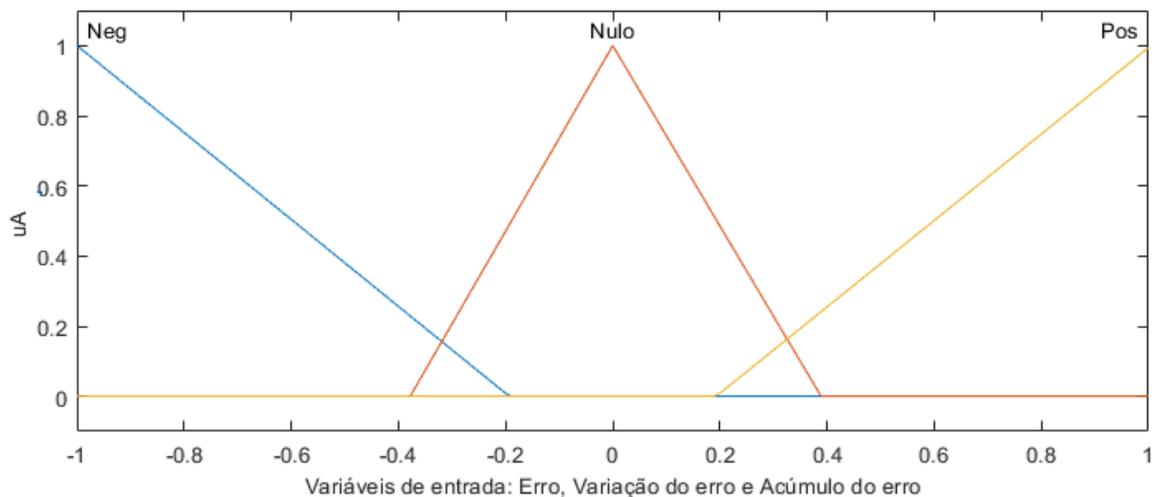
Em seguida, as funções de pertinência definidas para o trabalho foram as triangulares e estabeleceu os termos linguísticos para o *Erro*, *Variação do Erro* e *Acúmulo erro*. São eles:

Negativo (Neg), Nulo, Positivo (Pos). E para a variável *Controle* foi: Controle Baixo (Baixo), Nulo e Controle Alto (Alto).

Definidos os valores linguísticos, foram criados os conjuntos *fuzzy*. Foram testadas funções de pertinência distribuídas igualmente no intervalo, porém não foi possível obter um resultado satisfatório a partir de um controlador *fuzzy* simétrico. Conseqüentemente, ajustes foram feitos, e assimetrias inseridas em vista de um melhor desempenho do projeto. Por meio das simulações em malha fechada em *Simulink*, observou-se que as regras mais ativadas eram as regras elaboradas a partir da variável *Erro* e do termo linguístico Nulo. Logo, diminui-se o intervalo de ativação delas. Sendo assim, o intervalo adaptado sugeriu as funções: Neg [-1 -0,6 -0,2], Nulo [-0,4 0 0,4] e Pos [0,2 0,6 1].

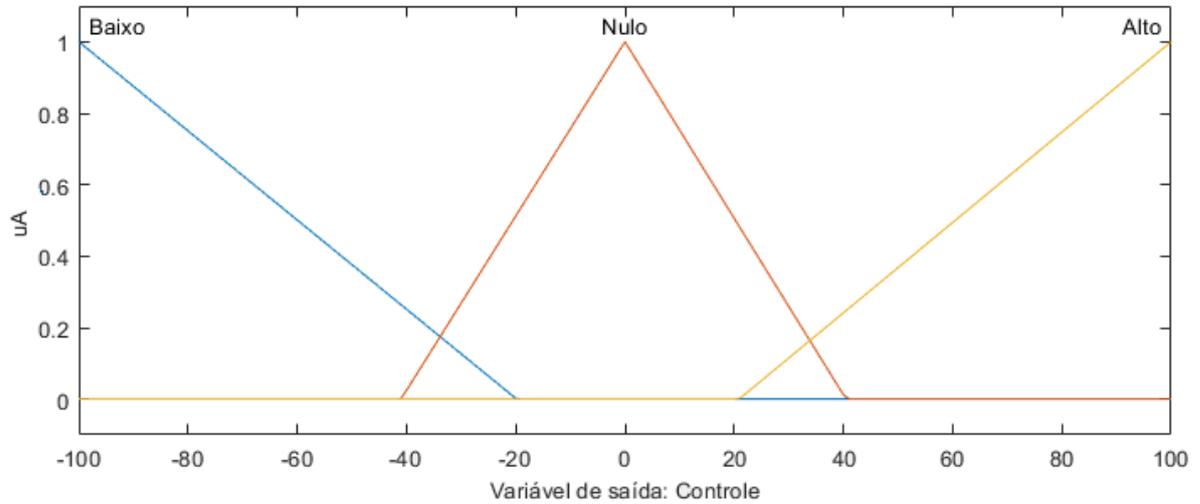
Na Figura 1 são apresentadas as funções de pertinências para as variáveis de entrada dos controladores PD *fuzzy* e PID *fuzzy*, normalizadas no intervalo -1 a 1. Tal faixa de valores possibilita que a válvula do torrador tenha uma rápida atuação no processo (LEITE; FILETI; SILVA, 2010). Foram utilizados os mesmos tipos e números de funções de pertinência e o mesmo intervalo para todas as variáveis de entradas em ambos os projetos, PD *fuzzy* e PID *fuzzy*.

Figura 1 – Funções de pertinência das variáveis de entrada dos controladores PD *fuzzy* e PID *fuzzy*



Fonte: Do autor (2019)

A Figura 2 mostra as funções de pertinência para a variável de saída *Controle*. Para esta variável, foram utilizadas três funções de pertinência com intervalo variando de -100 a 100. Os valores negativos se referem a ação de resfriamento do processo, e os valores positivos sugerem o aquecimento. Isso permite maior controle em relação à trajetória da temperatura e à diminuição do sobressinal máximo (LEITE; FILETI; SILVA, 2010).

Figura 2 - Função de pertinência da saída dos controladores PD *fuzzy* e PID *fuzzy*

Fonte: Do autor (2019)

Para o projeto dos controladores, utilizou-se a fuzzyficação, o mecanismo de inferência e a defuzzificação. Para o primeiro considerou-se dois operados *mim* e *max*. Para o mecanismo de inferência o Mamdani com a operação de agregação *max* foi aplicado, pois esse, confere melhor continuidade e uma saída mais suave. E o método de defuzzificação utilizado foi o centro de gravidade (GODOY et al., 2013; ROCHA, 2017).

Para elaborar as regras foi utilizada a operação linguística *and* e o operador *min* e elas são baseadas em proposições compostas condicionais do tipo *if-then* (SE «condição», ENTÃO «ação»). Naturalmente, visto à sobreposição de funções de pertinência antecedentes, as regras são ativadas em um certo grau, e combinadas, para produzir a ação de controle global. As regras foram elaboradas de acordo com o estudo do processo de torra e considerando que para todo valor de temperatura abaixo do *set point*, ou seja, valor do *Erro* negativo, o controle é baixo, assim como para valor de *Erro* nulo. Na Tabela 1, são listadas as regras que foram utilizadas para correlacionar as entradas e a saída do controlador PD *fuzzy*.

Tabela 1 - Regras do controlador PD *fuzzy*

Erro (E) / Variação do Erro (ΔE)	Neg	Nulo	Pos
Neg	Baixo	Baixo	Baixo
Nulo	Baixo	Baixo	Baixo
Pos	Alto	Alto	Alto

Fonte: Do autor (2019)

Para o controlador PID *fuzzy*, as regras seguiram o mesmo princípio do controlador PD *fuzzy*, todo valor de temperatura abaixo do *set point*, ou seja, valor do *erro* negativo, o controle é baixo, assim como para valor de *Erro* nulo. Porém, pela adição de uma variável de entrada ao modelo, o número de regras aumentou para 27. Na Tabela 2, as regras que foram utilizadas no controlador PID *fuzzy*.

Tabela 2 - Regras do controlador PID *fuzzy*

		Erro a partir do setpoint (E)								
		Neg			Nulo			Pos		
Variação do Erro (ΔE)	Pos	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Alto	Alto	Alto
	Nulo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Alto	Alto	Alto
	Neg	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Alto	Alto	Alto
		Neg	Nulo	Pos	Neg	Nulo	Pos	Neg	Nulo	Pos
Acúmulo do erro (Σ)										

Fonte: Do autor (2019)

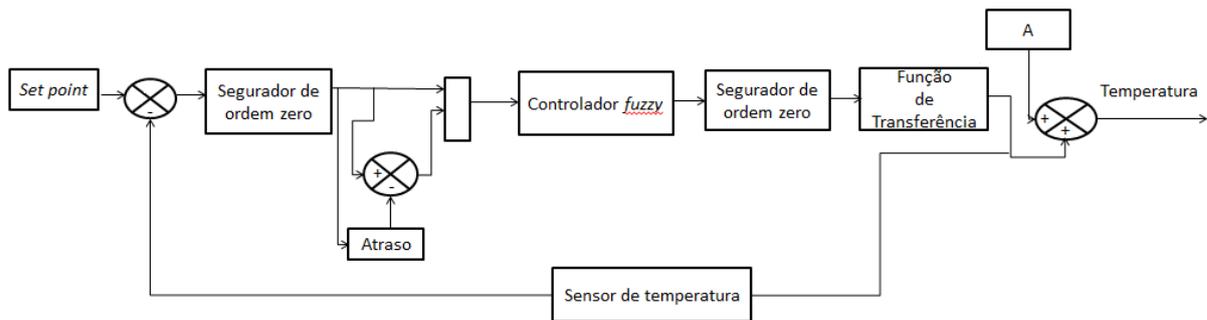
A última etapa do desenvolvimento dos controladores foi implementar e ajustar os mesmos conforme era necessário. Foram realizados testes com diferentes tipos de função de pertinência e com maior número de conjuntos *fuzzy*, porém as citadas no texto foram as que obtiveram melhor desempenho nas simulações.

2.4 Simulação computacional

O diagrama de blocos do processo para o controlador PD *fuzzy* é mostrado na Figura 3. Para a obtenção dos resultados o mesmo foi elaborado no *Simulink* do MATLAB. O diagrama apresenta um bloco de *set point*. Esse representa a entrada degrau e também a curva de torra, que foram os dois *set point* analisados no trabalho. A curva de torra na simulação foi com uma escala de temperatura menor, pois não foram realimentadas temperaturas na mesma faixa de valores da curva. A curva de torra original foi dividida por 500 por meio do seguinte comando no MATLAB: $BB = [B(:,1) \ B(:,2)/500]$, onde B contém a curva de torra original. O

set point encontra-se com o bloco de sinal de erro, o qual é a diferença entre o *set point* e a variável de processo, a temperatura, que está sendo realimentada no sistema. Esse sinal será lido no controlador *fuzzy* juntamente com um sinal de atraso que é representado no bloco Atraso. Esse possui a função de reter ou atrasar a entrada. O sinal do controlador é alimentado na planta que no caso está representado pela função de transferência do processo físico. A constante que é somada no final do sistema é para fazer a resposta começar juntamente com a curva de referência, no valor de 0.36. Isso ocorre porque na torração do café, aquece o torrador até certa temperatura, para depois colocar o café e iniciar o processo. Ressalto que no trabalho foi utilizado o controle discreto em sistemas contínuos, por isso o uso do segurador de ordem zero que possui a função de manter o sinal de saída constante entre os instantes de amostragem.

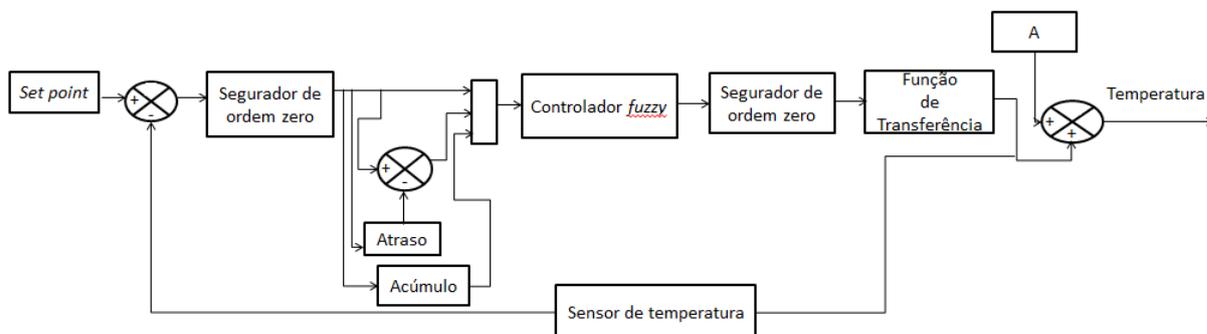
Figura 3 - Diagrama de blocos do processo de torração do café com o PD *fuzzy*



Fonte: Do autor (2019)

Para o controlador PID *fuzzy*, acrescentou-se uma variável de entrada, logo foi adicionado o bloco Acúmulo ao diagrama de blocos. Esse bloco é responsável pela integral do erro. A Figura 4 representa o processo para o controlador PID *fuzzy*.

Figura 4 - Diagrama de blocos do processo de torração do café com o PID *fuzzy*



Fonte: Do autor (2019)

2.5 Análise de desempenho

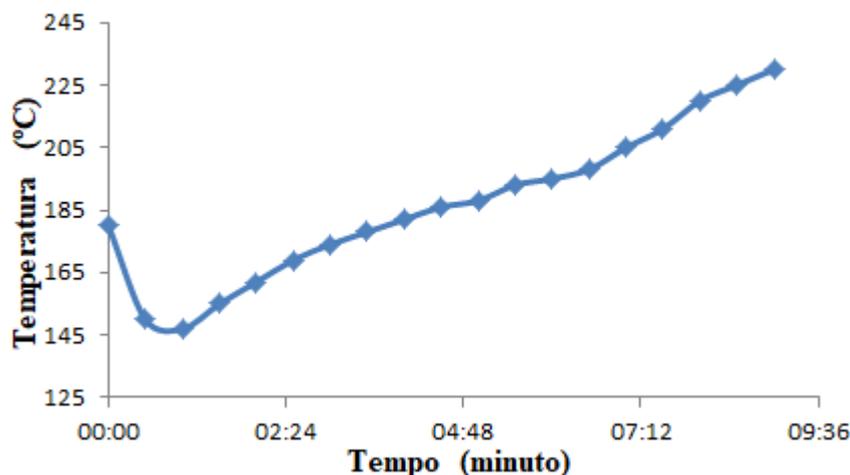
Para o sistema primeiramente foi analisada a estabilidade, utilizando-se para isso o diagrama de polos e zeros. Em seguida, foram avaliados os requisitos de desempenho do controlador, uma vez que ele deve gerar respostas dentro de valores desejados. No trabalho foi estudado o tempo de subida (*rise time*), tempo de pico (*peak time*), sobressinal máximo aceitável (*overshoot*), tempo de acomodação do transitório (*settling time*) e erro de regime nulo (*offset*) (NISE, 2017; OGATA, 2011).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Curva de Torra do café

Nota-se na Figura 5 que a temperatura do início da torra foi de 180 °C. Quando foi acrescentado o café no torrador obteve uma queda de temperatura, chegando a quase 145 °C. Isso ocorreu porque tem uma diferença de temperatura entre os grãos de café e a temperatura do torrador (ILLY; VIANI, 1995). Nesse momento a chave que controla a fluxo de ar está fechada, pois é importante o aumento da temperatura, porém de maneira controlada, uma vez que está ocorrendo às reações endotérmicas e é prejudicial temperaturas muito elevadas (CID; DE PEÑA, 2016). Nos últimos dois minutos da torra, aumentou-se a fluxo de ar para impedir o aumento exagerado da temperatura, uma vez que, isso poderia ocasionar cafés queimados. Percebe-se que depois da queda de temperatura no início, a temperatura praticamente só aumentou.

Figura 5 - Curva de Torra do café



Fonte: Do autor (2018)

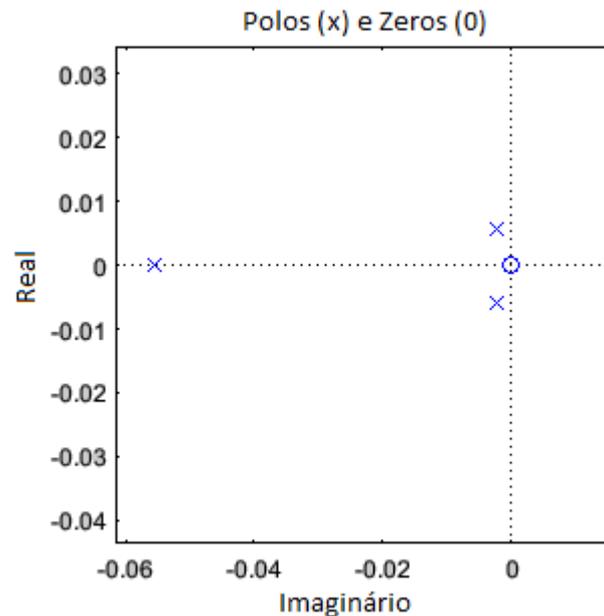
3.2 Função de transferência, estabilidade do sistema e resposta em malha aberta

A função de transferência (FT) que representa o processo de torração do café é definida por:

$$FT(s) = \frac{(7.991e^{-05} s + 5.339e^{-09})}{s^3 + 0.0601s^2 + 0.0002892s + 2.142e^{-06}} \quad (1)$$

A função de transferência possui 3 polos e 1 zero, como pode ser observado na equação (1). Os polos da mesma são: $-0.0556 + 0.0000i$; $-0.0023 + 0.0058i$ e $-0.0023 - 0.0058i$ e o zero é $-6.6813e^{-05}$. Pelo Diagrama de polos e zeros, na Figura 6 é possível verificar que os polos estão localizados no semiplano esquerdo, caracterizando um sistema de malha aberta estável. Os polos apresentam também parte imaginária, logo pode-se dizer que os polos são complexos conjugados. Por causa disso, a resposta do sistema em regime transitória é oscilatória (NISE, 2017; OGATA, 2011), como é observado na Figura 7.

Figura 6 - Diagrama de polos e zeros do sistema

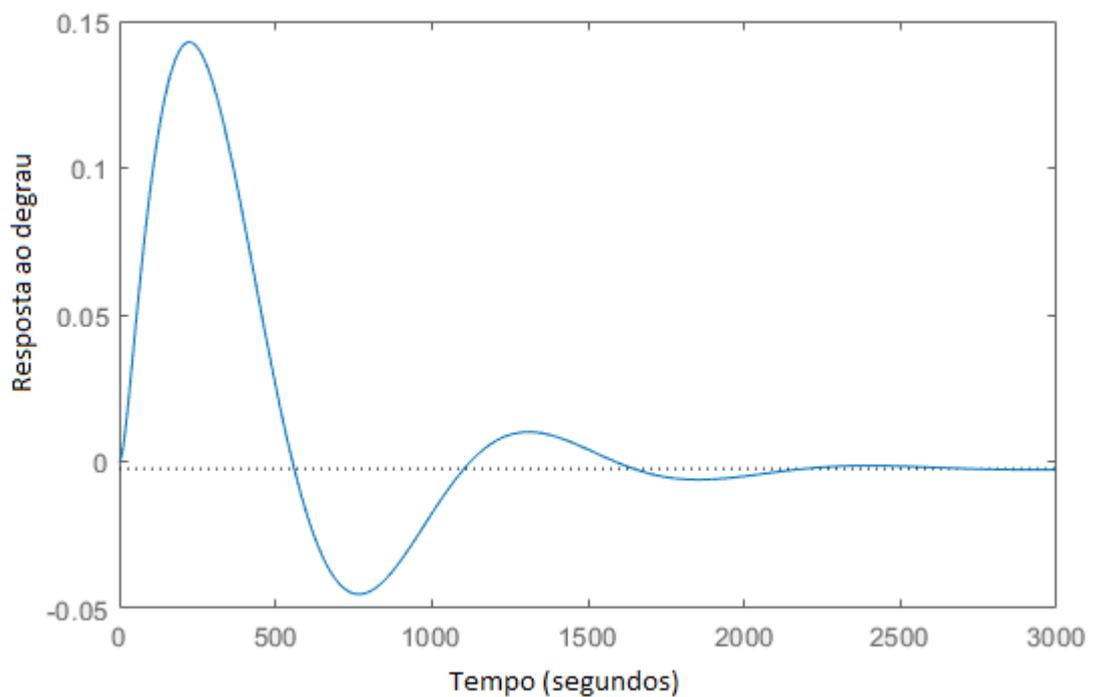


Fonte: Do autor (2018)

Quando o sistema possui 2 polos complexos e 1 polo real, a resposta total é uma combinação das duas predominantes, sendo que, se o sistema possuir polos dominantes é a resposta deles que influenciará mais. Como o sistema estudado possui 2 polos dominantes, a resposta é caracterizada por ser lenta e com poucas oscilações (NISE, 2017; WANG et al., 2009), como pode ser observado na Figura 7. Além disso, o fato do sistema ter esses dois polos dominantes complexos faz com que o mesmo possa ser aproximado por um sistema de 2ª ordem (NISE, 2017).

No diagrama de polos e zeros, Figura 6, percebe-se que o zero está na região nula, caracterizando-o como um zero lento. Isso justifica o alto sobressinal máximo do sistema de malha aberta, uma vez que o zero nesta posição diminui o amortecimento do sistema (NISE, 2017; OGATA, 2011). Outra questão também é que o zero está muito próximo dos polos dominantes, o que gera maior interferência dele na resposta transitória, reduzindo inclusive a influência desses (NISE, 2017). Isso também pode ser observado na Figura 7, que mostra a resposta ao degrau unitário para o sistema em malha aberta.

Figura 7 - Resposta ao degrau para o sistema em malha aberta



Fonte: Do autor (2019)

Na Figura 7, a curva azul, nos primeiros segundos, atinge para um valor de quase 0,15 no eixo y. Em seguida, ela apresenta um comportamento oscilatório durante os 2000 s.

Observa-se também na Figura 7 e na Tabela 3 que o sistema em malha aberta apresentou um tempo de acomodação e sobressinal máximo extremamente alto. Nota-se que existe um polo próximo dos polos dominantes. Isso pode aumentar o problema de desempenho do sistema, justificando o uso do sistema em malha fechada (WANG et al., 2009).

Tabela 3 – Parâmetros de desempenho para o sistema de malha aberta

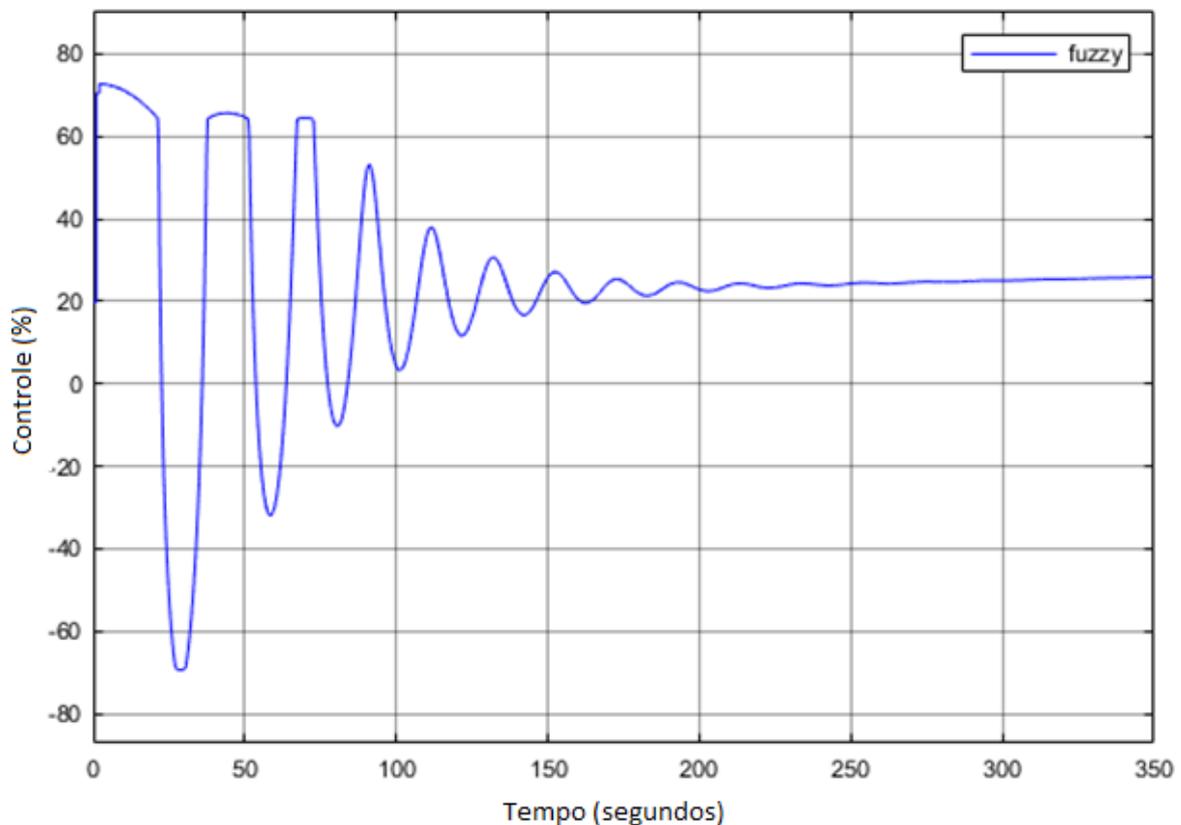
Tempo de subida (s)	Tempo de pico (s)	Tempo de acomodação(s)	Sobressinal máximo (%)
0,06	2,27	1973,8	5738,6

Fonte: Do autor (2018)

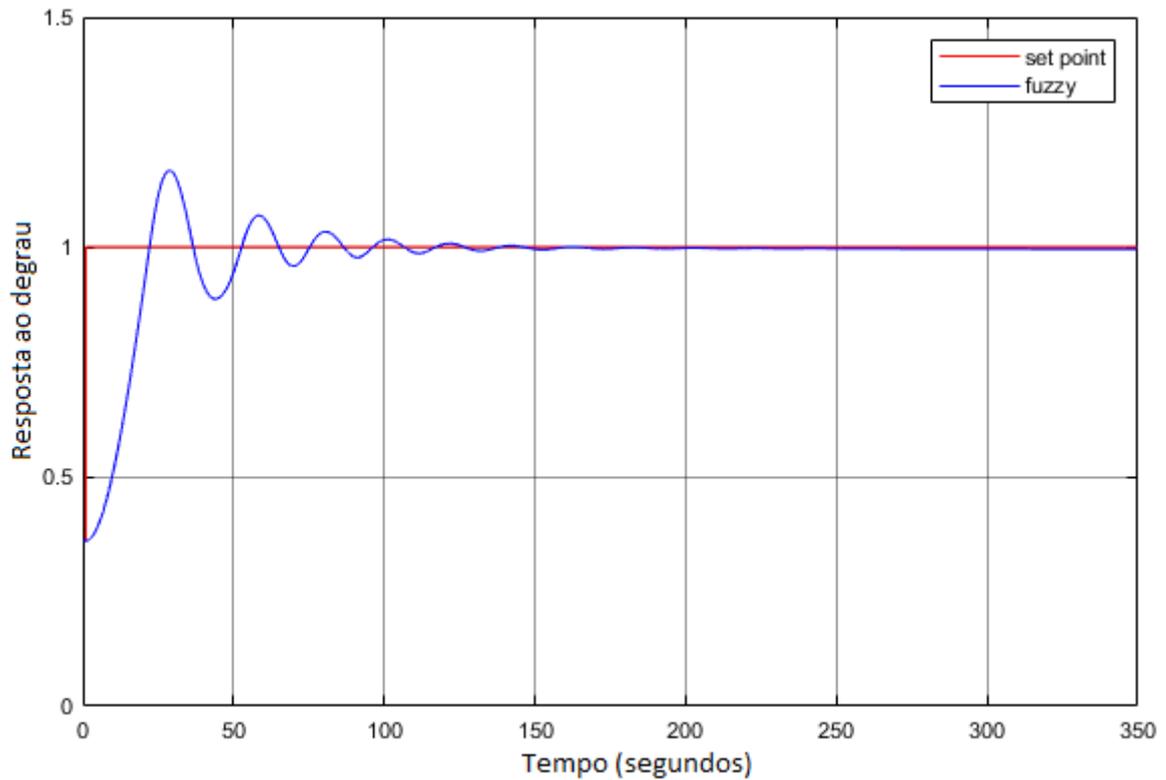
3.3 Resposta do controlador PD *fuzzy* no sistema de malha fechada

Para o sistema em malha fechada, como não variou o ganho, esse é estável também, logo, pode-se avaliar o desempenho do mesmo com o uso dos controladores. O sinal em degrau é utilizado para verificar a resposta do sistema em malha fechada com o controlador *fuzzy*, o qual é um sinal de teste que possibilita realizar os ajustes necessários para a resposta obter melhor resultado (NISE, 2017; OGATA, 2011). Por causa disso, primeiramente têm-se os resultados da simulação para o controlador e para a resposta do sistema ao degrau unitário. A Figura 8 representa a ação do controle do PD *fuzzy* e a Figura 9 trata-se da resposta do sistema em malha fechada ao degrau unitário para esse controlador.

Figura 8 - Ação de controle do PD *fuzzy* para entrada degrau



Fonte: Do autor (2019)

Figura 9 - Resposta do sistema do PD *fuzzy* para entrada degrau

Fonte: Do autor (2019)

Primeiramente foi feita a simulação na malha de controle fechada com o *set point* sendo a função degrau. O tempo de simulação foi de 350 s, no qual os primeiros 100 s foram caracterizados por um sobressinal máximo, como mostra a Figura 9. Isso pode ser explicado, conforme observa-se na Figura 8, que o sinal no controlador começou com controle de 20%, aumentou até aproximadamente 70% e em seguida decaiu para -70% de controle, nos primeiros 30 s. Logo, a ação do controlador oscila mais em torno dos valores positivos e negativos até pouco mais de 80 s. Nota-se uma resposta mais rápida do sistema por causa dessas variações abruptas e por causa da ação derivativa do controlador PD *fuzzy*, que o faz antecipar a ação de controle, fazendo com que o erro diminua assim mesmo que surgir, melhorando a resposta transitória (OGATA, 2011). Após esse tempo, o controlador oscila pouco o que justifica a resposta na Figura 9. Isto mostra que com a redução do erro, o controlador fecha a válvula que controla a potência, ou seja, realiza um controle baixo.

Nos segundos restantes o controlador tentou ajustar a variável para que ela atingisse o estado estacionário, como representa a Figura 9. Isso é visível na Figura 8 quando o controlador fica próximo de 20%, ou seja, realizando um controle baixo também, fechando a válvula. Na Figura 9 e na Tabela 4 é possível visualizar que o sistema atinge o *set point*, com

um tempo de acomodação de 104,85 s, porém tem a presença de um pequeno erro em regime estacionário, mas é insignificante.

Na Tabela 4, é possível ver os valores de desempenho do controlador PD *fuzzy* para entrada degrau. Observa-se que o sistema apresentou um sobressinal máximo de 17,22 % e um tempo de subida de 13,97 s.

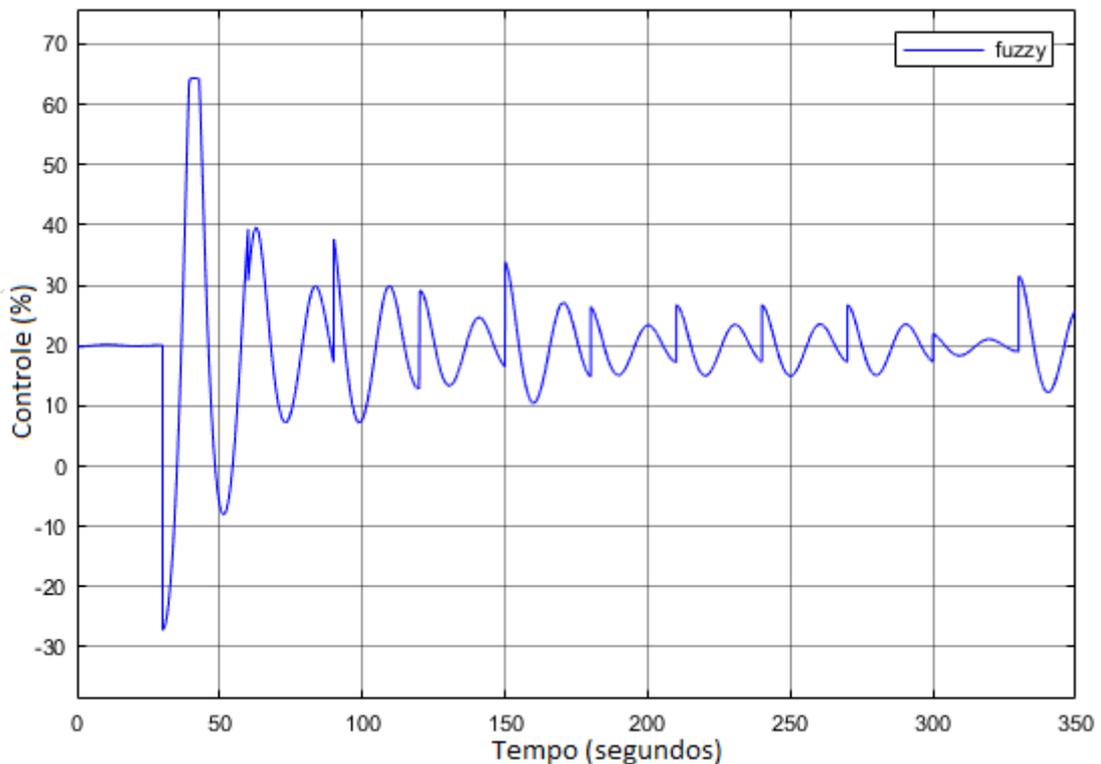
Tabela 4 – Parâmetros de desempenho do controlador PD *fuzzy* para entrada degrau

Tempo de subida (s)	Tempo de pico (s)	Tempo de acomodação(s)	Sobressinal máximo (%)
13,97	28,80	104,85	17,22

Fonte: Do autor (2019)

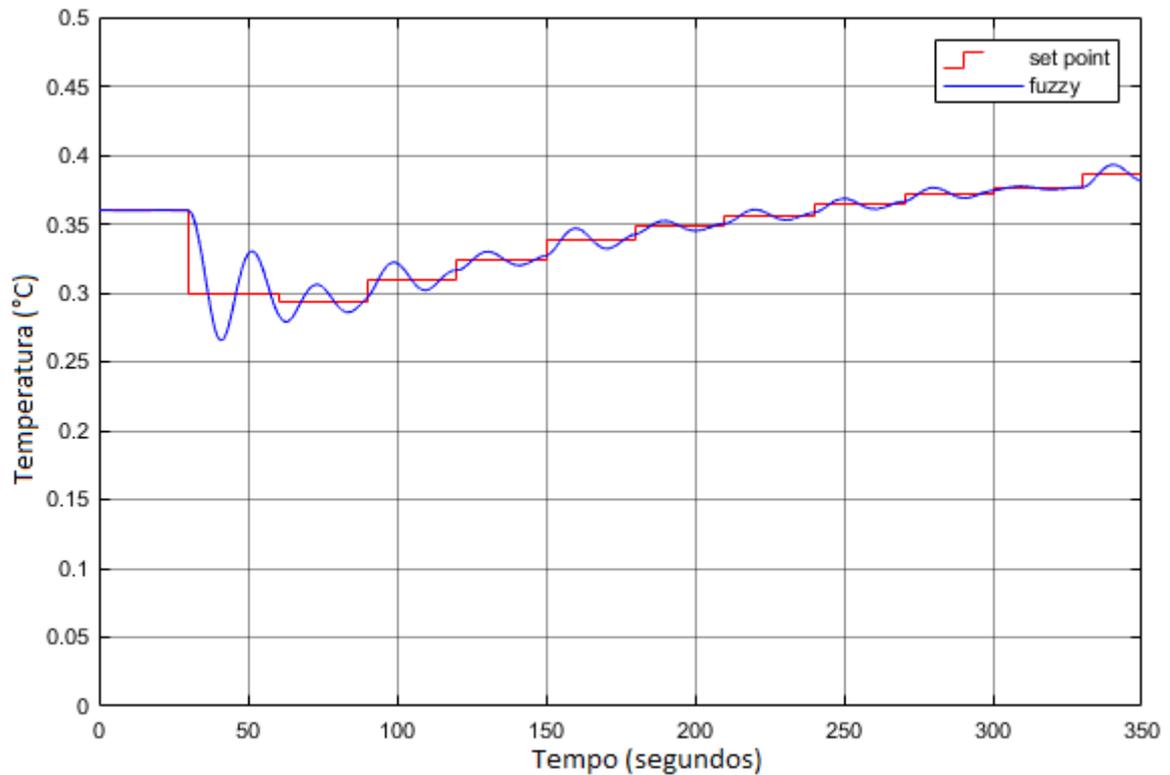
Para o *set point* do processo de torração, a curva de torra, a ação do controlador PD *fuzzy* e a resposta do sistema ao *set point* são vistos a seguir nas Figuras 10 e 11.

Figura 10 - Ação de controle do PD *fuzzy* para entrada curva de torra



Fonte: Do autor (2019)

Figura 11 - Resposta do sistema do PD *fuzzy* para entrada curva de torra



Fonte: Do autor (2019)

O tempo de simulação também foi de 350 s. Na Figura 10 é possível ver que o controlador estabilizou com uma ação de controle de 20% nos primeiros 30 segundos, o qual fez a resposta do sistema estabilizar também, impedindo assim de ocorrer um sobressinal máximo inicial, como mostra a Figura 11. Logo após, o controlador PD *fuzzy*, começou a oscilar em torno dos valores +60% e -25% que foi a amplitude máxima atingida pelo controlador.

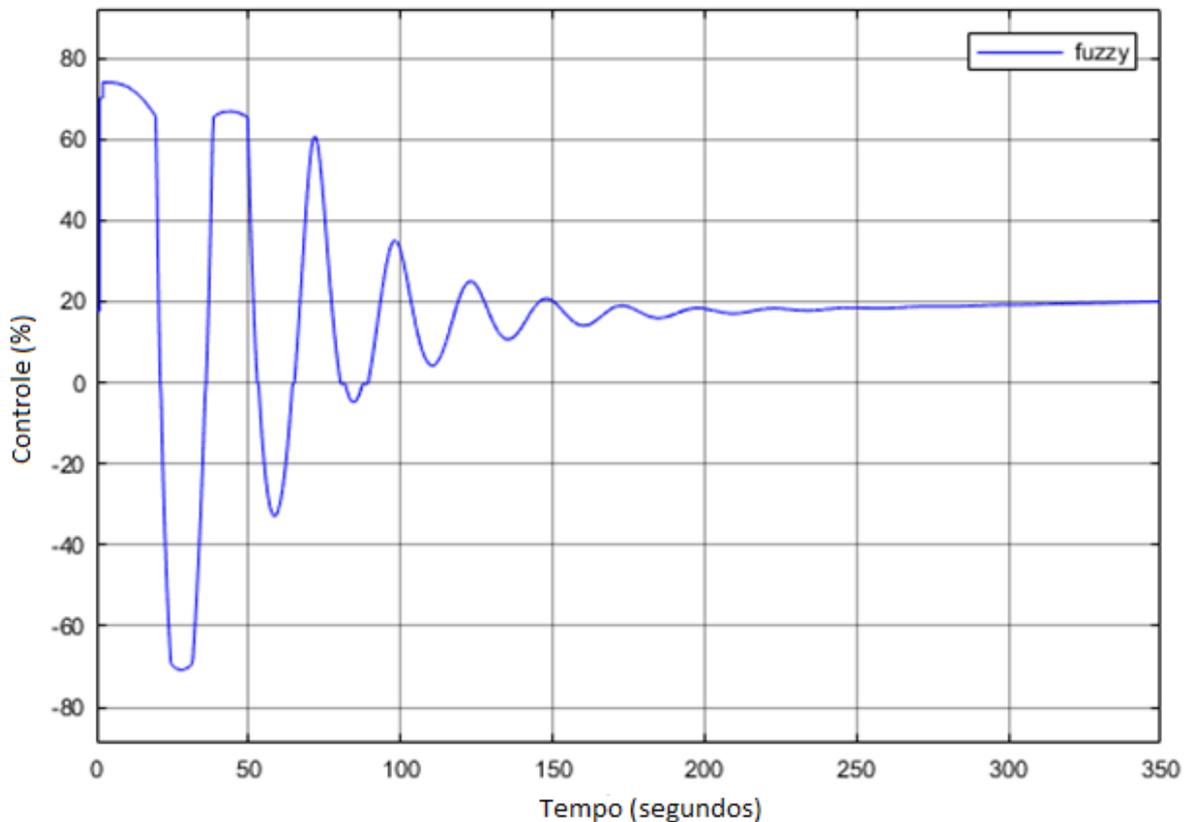
Depois disso, a ação do controlador oscila em torno dos valores positivos 40% e 10% até 100 s, o que faz o sistema oscilar também em torno do *set point* (Figura 11), gerando respostas também rápidas. Após esse tempo, o controlador continua oscilando, porém com amplitudes menores e em torno do valor 20, o que justifica as pequenas oscilações da resposta na Figura 11. Isto mostra que com a redução do erro, o controlador fecha a válvula de aquecimento. Nota-se que o controlador nos minutos restantes da simulação oscilou perto do valor de 20%, igualmente o que aconteceu com a ação do controlador da entrada degrau, como pode ser visto na Figura 8. Isso representa que o sinal teste degrau utilizado, representou bem o processo.

Na Figura 11, observa-se que a resposta não obteve erro nulo no estado estacionário, isso é devido o *set point* ser composto de vários degraus, impedindo-o de estabilizar em um valor e, conseqüentemente, a resposta do sistema. Para a resposta com o *set point* curva de terra não é possível discutir valores para sobressinal máximo e nem tempo de acomodação, já que a curva de terra possui vários degraus.

3.4 Resposta do controlador PID *fuzzy* no sistema de malha fechada

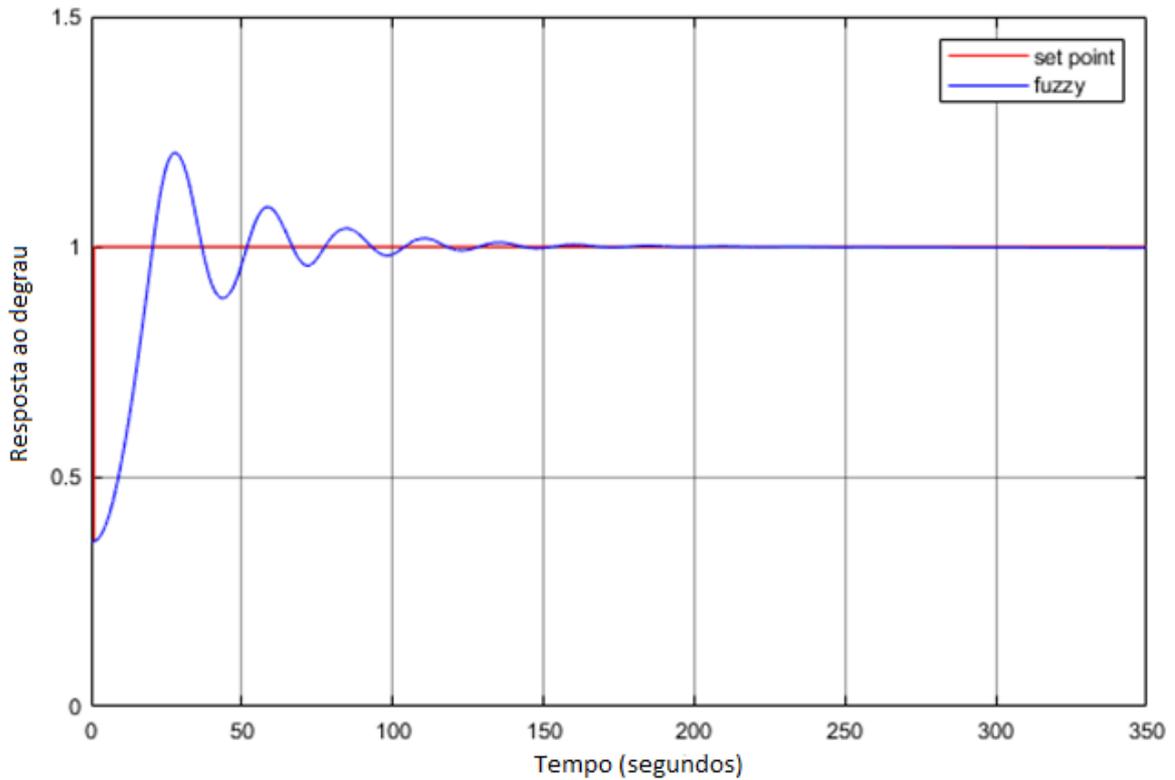
Assim como o PD *fuzzy*, o controlador PID *fuzzy* também utilizou a entrada degrau. Logo, primeiro têm-se os resultados da simulação para o controlador e para a resposta do sistema ao degrau unitário. A Figura 12 representa a ação do controle PID *fuzzy* e a Figura 13 mostra a resposta do sistema ao degrau unitário para esse controlador.

Figura 12 - Ação de controle do PID *fuzzy* para entrada degrau



Fonte: Do autor (2019)

Figura 13 - Resposta do sistema do PID *fuzzy* para entrada degrau



Fonte: Do autor (2019)

O tempo de simulação foi de 350 s também, no qual os primeiros 100 s foram caracterizados por um sobressinal máximo, como mostra a Figura 13. Isso pode ser explicado, conforme é observado na Figura 12 que o sinal no controlador começou com controle de 20%, aumentou até aproximadamente 70% e em seguida decaiu para -70% de controle, nos primeiros 30 s. Logo, o controlador oscilou mais em torno dos valores positivos e negativos até pouco mais de 80 s. Após esse tempo, o controlador oscila pouco o que justifica a resposta na Figura 13. Isto mostra que com a redução do erro, o controlador fecha a válvula, ou seja, realiza um controle baixo.

Nos segundos restantes o controlador tentou ajustar a variável manipulada para que ela atingisse o estado estacionário, como representa a Figura 13. Isso é visível na Figura 12 quando o controlador fica próximo de 20%, ou seja, realizando um controle baixo. Na Figura 13 é possível visualizar que o sistema atinge o *set point*, com mais ou menos 180 s e sem erro no estado estacionário. Isso é devido à redução da amplitude de oscilação da ação do controlador, o qual ocorre pelo fato do mesmo utilizar uma resposta mínima para corrigir o erro quando a temperatura está próxima do valor de referência. Conseqüentemente, o

controlador exigirá menos do atuador, no caso, válvula que controla a potência, e terá diminuição do stress mecânico (LEITE; FILETI; SILVA, 2010).

Na Tabela 5, é possível ver os valores de desempenho do controlador PID *fuzzy* para entrada degrau. Observa-se que o sistema apresentou um sobressinal máximo de 20,73 % e um tempo de acomodação de 114,88 s, o que mostra que o processo apresentou uma resposta dinâmica mais lenta, quando comparada à resposta com o uso do PD *fuzzy*. Isso é devido o controlador utilizar um sinal de controle de maior amplitude. Além disso, nota-se que o tempo de subida foi menor quando comparado com o PD *fuzzy*. Isso aconteceu porque o sobressinal máximo foi maior.

Devido à adição do termo integrador na entrada do controlador PID *fuzzy*, têm-se uma saturação da ação de controle. Isso ocorre porque o controlador continua integrando o erro sem ter uma correção (OGATA, 2011). Geralmente, ocorre quando a válvula do sistema está totalmente aberta e o controlador não consegue controlar a variável controlada, e mesmo assim, o controlador continua a variar a saída, chegando à saturação e prejudicando a resposta transitória (LEITE; FILETI; SILVA, 2010).

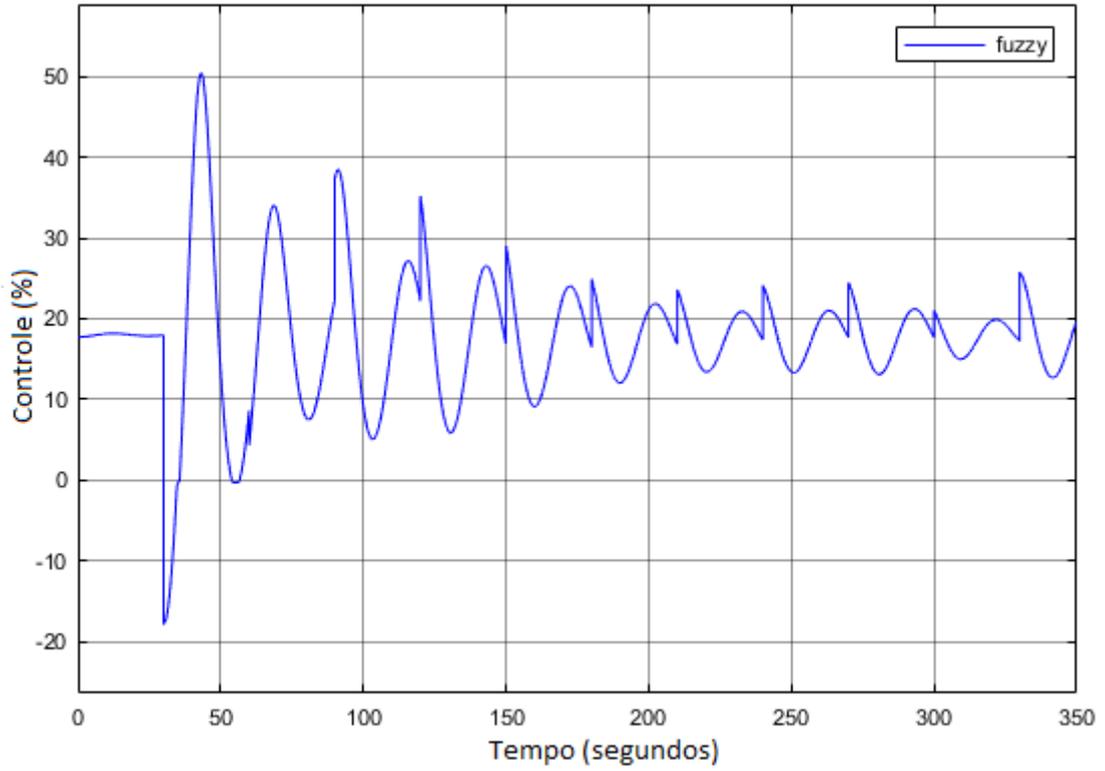
Tabela 5 – Parâmetros de desempenho do controlador PID *fuzzy* para entrada degrau

Tempo de subida (s)	Tempo de pico (s)	Tempo de acomodação(s)	Tempo de Sobressinal máximo (%)
12,85	27,88	114,88	20,73

Fonte: Do autor (2019)

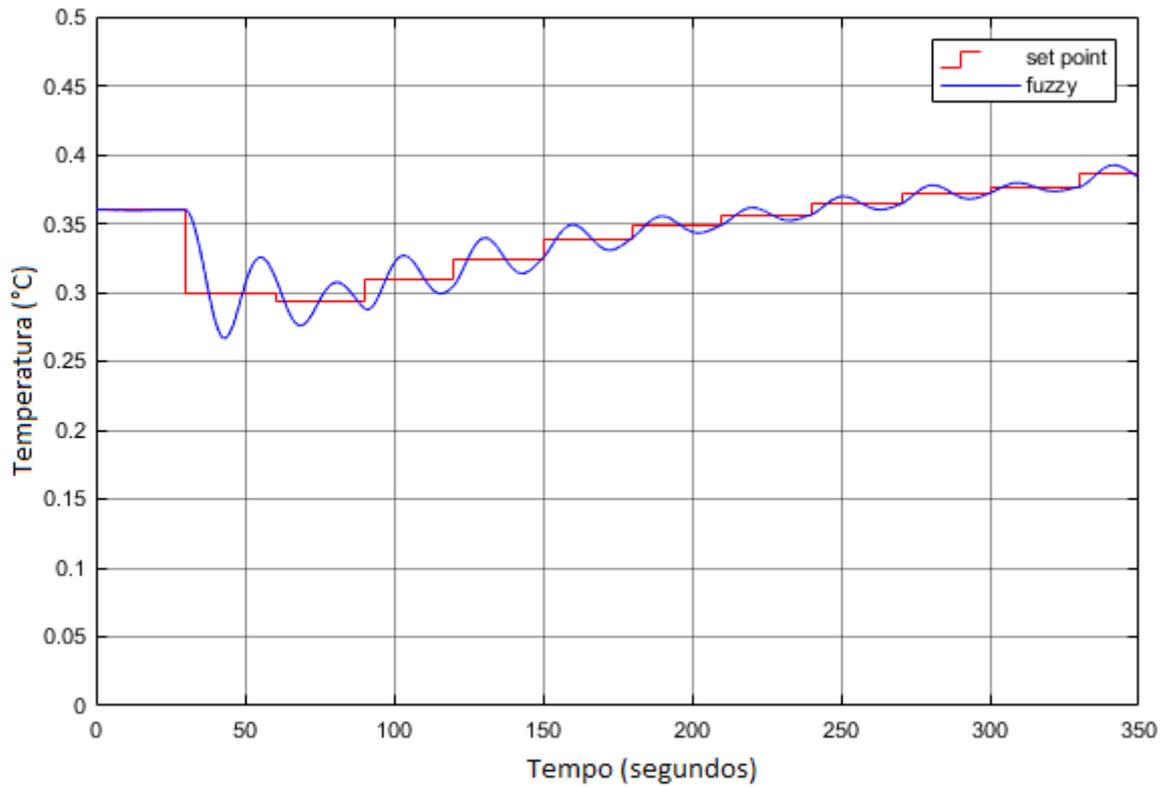
Para o *set point* do processo de torração, a curva de torra, a ação do controlador PID *fuzzy* e a resposta do sistema ao *set point* são vistos a seguir nas Figuras 14 e 15.

Figura 14 - Ação de controle do PID *fuzzy* para entrada curva de torra



Fonte: Do autor (2019)

Figura 15 - Resposta do sistema do PID *fuzzy* para entrada curva de torra



Fonte: Do autor (2019)

O tempo de simulação também foi de 350 s. Na Figura 14 é possível ver que o controlador estabilizou com uma ação de controle de 18% nos primeiros 30 segundos, o qual fez a resposta do sistema estabilizar também, impedindo assim de ocorrer um sobressinal máximo inicial, como mostra a Figura 15. Logo após, a saída do controlador PID *fuzzy*, começou a oscilar em torno dos valores + 50% e -18% que foi a amplitude máxima atingida pelo controlador.

Depois disso, o controlador oscila em torno dos valores positivos 35% e 10% até pouco mais de 100 s, o que faz o sistema oscilar também em torno do *set point* (Figura 15). Após esse tempo, o controlador continua oscilando, porém com menos amplitude e em torno do valor 20%, o que justifica as pequenas oscilações da resposta na Figura 15. Isto mostra que com a redução do erro, o controlador fecha a válvula.

O controlador PID *fuzzy* teve amplitudes menores de oscilações do que o PD *fuzzy*, o que mostra que na atuação o PID *fuzzy* ficou mais suave, por isso teve uma maior amplitude de oscilação em torno do *set point* na resposta da Figura 15, nos primeiros 200 s em comparação a Figura 11. Sabe-se que o controlador PID possui uma entrada a mais. Isso implica em um maior processamento, mas possibilita suavizar a ação de saída do controlador, e é por isso, que a atuação do controlador teve uma maior frenagem na mudança de direção da curva de temperatura.

Observa-se que o controlador nos minutos restantes da simulação oscilou perto do valor de 20%, igualmente o que aconteceu com a ação de controlador da entrada degrau, como pode ser visto na Figura 12. Isso representa que o sinal teste degrau utilizado, representou bem o processo.

Na Figura 15, observa-se que a resposta também não atinge o estado estacionário com erro nulo, isso se deve ao fato do *set point* ser composto de vários degraus, impedindo-o de estabilizar em um valor e, conseqüentemente a resposta do sistema.

Fazendo uma análise sobre a influência das regras dos controladores no processo, percebe-se que quando o erro é positivo, temperatura acima do *set point* e variação do erro negativo, positivo ou nulo, ou seja, independe o sentido da temperatura, é necessário realizar um *controle alto* na válvula do torrador. Com esse cenário e considerando que o tempo de torração do café está nos minutos iniciais, no qual ocorrem as reações endotérmicas com apenas perda de água pelos grãos de café e produção de gás carbônico e, conseqüentemente aumento do tamanho dos grãos (CID; DE PEÑA, 2016), a temperatura elevada poderá prejudicar as mudanças importantes em termos de cor, volume, massa e componentes voláteis causando o incompleto desenvolvimento dos sabores e aromas nos instantes finais, uma vez

que, uma quantidade de calor exagerada não permitirá as reações químicas ocorrerem de forma correta (BAGGENSTOSS et al., 2007).

Apesar disso, nos primeiros segundos do processo não seria tão preocupante o desvio da temperatura, uma vez que o acréscimo de café no torrador faz com que tenha a diminuição da mesma. Isso ocorre porque no início do processo, a temperatura dos grãos é diferente da temperatura do torrador, ou seja, tem um gradiente de temperatura. Sendo assim, haverá troca de calor e, conseqüentemente a diminuição da temperatura (ILLY; VIANI, 1995).

Observa-se que quando o erro é negativo, temperatura abaixo do *set point* e variação do erro negativo, positivo ou nulo, ou seja, também independe o sentido da temperatura, é necessário realizar um *controle baixo* na válvula do torrador. Com esse cenário e considerando que o tempo de torração do café não está nos minutos finais, a temperatura abaixo do ideal não causará muitos problemas nos grãos de café uma vez que, no início e em mais da metade do tempo do processo é importante dar pouco calor aos grãos, para ter o completo desenvolvimento dos sabores e aromas, devido no início predominarem as reações endotérmicas (CID; DE PEÑA, 2016).

Já na etapa final da torra, pode-se oferecer um pouco mais de calor aos grãos, pois é a etapa importante para as reações exotérmicas, como Maillard e caramelização. Porém, é importante a finalização do processo no tempo correto e um rápido resfriamento para evitar a torrefação excessiva, o que alteraria a qualidade do produto, produzindo cafés carbonizados com bebidas muito amargas (BAGGENSTOSS et al., 2007).

Nota-se, que no trabalho o controlador sempre está atuando na válvula, nunca realizando um *controle nulo*. Isso ocorre porque a temperatura do processo de torra do café nunca estabiliza em um valor, por isso as oscilações em torno da curva de torra também. Essas oscilações poderiam ser minimizadas se levássemos em consideração outras variáveis do processo, como o fluxo de ar e de calor e também as características do grão, como a umidade, por exemplo, uma vez que, seriam trabalhadas mais variáveis, diminuindo as incertezas do processo. De forma geral, a principal incerteza encontrada no processo de torra estudado é o fato de a temperatura variar em função do tempo, o que a maioria das vezes resulta no controle inadequado do processo, influenciando na qualidade do grão (VIRGEN-NAVARRO, L. et al., 2016b).

4 CONCLUSÃO

O trabalho possibilitou a obtenção de uma função de transferência que representa o processo de torra e com isso, obter informações sobre o comportamento dinâmico do processo, antes não conhecidas. Com relação ao sistema de malha fechada, o controlador PD *fuzzy* melhorou a resposta transitória para a entrada degrau e a curva de torra, porém para a resposta estacionária foi observado erro, porém insignificativo. E o sistema com o controlador PID *fuzzy*, devido ao termo integrador, eliminou o erro estacionário, porém apresentou um aumento do sobressinal máximo e do tempo de acomodação em comparação à resposta do controle PD *fuzzy* para uma entrada em degrau. Apesar disso, conclui-se que ambos controladores apresentaram desempenho satisfatório e por isso, valida-se a utilização dos mesmos no controle da temperatura do processo de torração do café. Para a implementação na prática, recomenda-se o controlador PID *fuzzy*, pois degraus em diferentes níveis precisam ser aplicados ao longo do processo, o que torna a questão do estado permanente em diferentes amplitudes importantes.

Como observado, a metodologia do desenvolvimento dos controladores *fuzzy* para o controle da temperatura no processo de torração do café baseou-se no método de tentativa e erro, porém levando em consideração conhecimento especialista sobre o processo. Nota-se que, para a construção dos controladores *fuzzy*, foi necessário possuir uma percepção mais profunda da dinâmica por meio das simulações do processo, pois a partir disso, percebeu-se que não era necessária a utilização do conjunto *fuzzy* Nulo da variável de controle, o que possibilitou chegar às respostas satisfatórias.

Tais resultados indicam a possibilidade de automação do processo de torra, proporcionando ou adicionando significativa melhoria e sistematização ao processo. Por isso, espera-se em trabalhos futuros que seja implementado o controlador PID *fuzzy* no processo de torra do café e que seja possível atestar a qualidade do produto café torrado com o mesmo.

REFERÊNCIAS

- BAGGENSTOSS, J. et al. Influence of water quench cooling on degassing and aroma stability of roasted coffee. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. v. 55, p. 6685-6691, 2007.
- BOUBERTAKH, H. et al. Tuning fuzzy PD and PI controllers using reinforcement learning. **ISA Trans**. v. 49, p. 543-551, 2010.
- CID, MC. ; DE PEÑA, M-P. **Coffee: Analysis and Composition**. Encyclopedia of Food and Health. University of Navarra, Pamplona, Spain, p. 225-231, 2016.

- GHOUSH, M.A. et al. Formulation and fuzzy modeling of emulsion stability and viscosity of a gum-protein emulsifier in a model mayonnaise system. **Journal of Food Engineering**. v. 84, p. 348-357, 2008.
- GODOY, W. F. et al. Fuzzy logic applied at industrial roasters in the temperature control. **IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)**. São paulo, Brasil. p. 450-455, 2013.
- ILLY, A.; VIANI, R. **Espresso Coffee**. London: Ed. Academic, 1995.
- KUDINOVA, Y.I. et al. Optimization of fuzzy PID controller's parameters. **Procedia Computer Science**. v. 103, p. 618-622, 2017.
- LEITE, M.S.; FILETI, A.M.F.; SILVA, F.V. Desenvolvimento e aplicação experimental de controladores *fuzzy* e convencional em um bioprocesso. **Revista Controle e Automação**. v. 21, n. 2, p. 147-158, 2010.
- NISE, N.S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. Rio de Janeiro: LTC, 7.ed, 2017, 745 p.
- ODETUNJI, O.A.; KEHINDE, O.O. Computer simulation of fuzzy control system for gari fermentation plant. **Journal of Food Engineering** . v. 68, p.197-207, 2005.
- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. São Paulo: Pearson, 5ª ed, 2011, 809 p.
- PREMKUMURA, K.; MANIKANDAN, B.V. Bat algorithm optimized fuzzy PD based speed controller for brushless direct current motor. **Engineering Science and Technology**. v. 19, p. 818-840, 2016.
- ROCHA, M.M. **Estudo de um controlador *fuzzy* aplicado a um sistema eólico de velocidade variável conectado à rede elétrica**. 2007, 76 p. Dissertação (Mestrado em Sistema de Comunicação e automação) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Rio Grande do Norte, 2007.
- SCHENKER, S. et al. Pore structure of coffee beans affected by roasting conditions. **Journal of Food Science**. v. 65, n. 3, p. 452-457, 2000.
- SILVA, J.R. **Otimização do processo de torração do café pelo monitoramento de parâmetros e propriedades físicas e sensoriais**. 2008, 82 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008 .
- SIVETZ, M.; FOOTE, H.E. **Coffe processing technology**. Westport: AVI. 1963. v. 2.
- SREELATHA, B. et al. Sensitivity, Polo-Zero and Distortion Analysis of State Variable Filter With Multiple Faults. **Procedia Materials Science**. v. 10, p. 748-753, 2015.
- VIRGEN-NAVARRO, L. et al. Neuro-fuzzy model based on digital images for the monitoring of coffee bean color during roasting in a spouted bed. **Expert Systems with Applications**, v. 54, p. 162-169, 2016b.
- WANG, Q.G. et al. Guaranteed dominant pole placement with pid controllers. **J Process Contr**, v.19, p. 349, 2009.
- ZHANG, Q.; LITCHFIELD, J. Fuzzy logic control for a continuous crossflow grain dryer. **J. Food Process Eng**. v. 16, p. 59-77, 1993.