

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

GABRIEL PARIZOTTO

**AUTOMAÇÃO DE EQUIPAMENTO PARA FABRICAÇÃO DE CERVEJA
ARTESANAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2017

GABRIEL PARIZOTTO

**AUTOMAÇÃO DE EQUIPAMENTO PARA FABRICAÇÃO DE
CERVEJA ARTESANAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Elétrica – DAELE – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. César Rafael Claire Torrico.

PATO BRANCO

2017

TERMO DE APROVAÇÃO

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado **AUTOMAÇÃO DE EQUIPAMENTO PARA FABRICAÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL**, do aluno **Gabriel Parizotto** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **131** de 2017.

Fizeram parte da banca os professores:

Prof. Dr. César Rafael Claire Torrico

Prof. Dr. Carlos Marcelo de Oliveira Stein

Prof. Dr. Rafael Cardoso

A Ata de Defesa assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos:

À minha noiva Giovana, ofereço um agradecimento muito especial, por ter vivenciado comigo passo a passo todos os detalhes deste trabalho, por ter me dado todo o apoio que necessitava nos momentos difíceis durante a graduação, todo carinho, respeito, por ter suportado meus momentos de estresse, e por tornar minha vida cada dia mais feliz.

À minha família, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Um agradecimento especial aos meus orientadores, inicialmente Msc. Johnny Werner por ter proposto o tema do trabalho, pela transmissão de conhecimento referentes a produção de cerveja, como também da disciplina de Sistemas de Controle, a qual foi utilizada para a realização do trabalho. Ao Dr. César Rafael Claire Torrico, por se dispor a dar continuidade à orientação, pelo esclarecimento de dúvidas na área de Sistemas de Controle e de sistemas Microcontrolados, durante o desenvolvimento do trabalho, com excelência e dedicação.

Aos meus amigos Darlan Rigo, Ótávio Augusto Gomes e Pablo Henrique Seibert Jahno, agradeço pelo apoio, companheirismo, pela troca de experiências. O compartilhamento de materiais e conhecimentos durante todo o processo foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Enfim, a todos os meu amigos e colegas de graduação, que ao longo dessa jornada sempre buscaram dar apoio e incentivo.

RESUMO

PARIZOTTO, Gabriel. Automação de Equipamento para Fabricação de Cerveja Artesanal. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

Este trabalho tem por objetivo realizar a automação de um equipamento de fabricação de cerveja artesanal, controlando a temperatura e o tempo de duração em duas etapas do processo, sendo elas: a de mosturação e a de fervura. Inicialmente é apresentado de maneira sucinta os ingredientes e o modo de preparo da cerveja, além de um estudo sobre como modelar um processo térmico e as ações básicas de controle comumente utilizadas. Para a implementação do protótipo, primeiramente foi adaptada uma resistência elétrica em um caldeirão e desenvolvida a instrumentação para adquirir os dados referentes ao sistema. Após a verificação da não linearidade do sistema foram projetados três controladores (PI), para atender determinadas faixas de operação do equipamento. A interação do usuário com o equipamento foi realizada através de uma interface com *display* gráfico e botões, possibilitando, assim, parametrizar uma receita e visualizar o andamento do processo.

Palavras-chave: Cerveja artesanal, controle de processos, interface com usuário.

ABSTRACT

PARIZOTTO, Gabriel. Equipment automation for home brewing. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

This work aims the automation of a home brewing equipment, controlling the temperature and the time between two of the process's steps: mashing and fermenting. Initially, the ingredients and a method for brewing are briefly presented, as well as a study on how to model a thermal process and basic control techniques commonly used. For the implementation of a prototype, a electrical resistance was adapted in a cauldron and the data acquisition system to collect data was developed. After verifying the non-linearity of the system, three (PI) controllers were projected, to satisfy certain of the equipment's operating range. The interaction of the user with the equipment was implemented through an interface using a graphic display and buttons, allowing setting a recipe and monitoring the process.

Keywords: Home brewing, process control, user interface.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Exemplo de Fluxograma do processo de fabricação de cerveja | 13 |
| Figura 2 – Etapa de mosturação com temperatura escalonada. | 14 |
| Figura 3 – Etapa de fervura..... | 15 |
| Figura 4 – Sistema térmico..... | 18 |
| Figura 5 – Diagrama de blocos de um sistema de controle. | 20 |
| Figura 6 – Diagrama de blocos do controlador proporcional..... | 21 |
| Figura 7 – Comportamento de um sistema com a ação do controlador proporcional | 21 |
| Figura 8 – Diagrama de blocos do controlador integral..... | 22 |
| Figura 9 – Comportamento de um sistema com a ação do controlador integral | 22 |
| Figura 10 – Diagrama de blocos do controlador proporcional integral. | 23 |
| Figura 11 – Sinal da ação de controle do controlador PI..... | 23 |
| Figura 12 – Diagrama de blocos Controlador proporcional derivativo PD | 23 |
| Figura 13 – Diagrama de blocos da estrutura acadêmica do controlador PID | 24 |
| Figura 14 – Diagrama de blocos de um sistema de controle com realimentação unitária | 25 |
| Figura 15 – Lugar das raízes..... | 26 |
| Figura 16 – Resistência elétrica de imersão..... | 27 |
| Figura 17– Ciclo de controle integral | 28 |
| Figura 18 – Interface com o usuário..... | 28 |
| Figura 19 – Esboço do arranjo físico do sistema a ser implementado. | 29 |
| Figura 20 – Curva de resposta sensor PT-100..... | 31 |
| Figura 21 – Circuito de instrumentação..... | 31 |
| Figura 22 – Kit Launchpad MSP-EXP432P401R. | 32 |
| Figura 23 – Figura ilustrativa de um caldeirão..... | 33 |
| Figura 24 – Motor de agitação..... | 33 |
| Figura 25 – Motobomba para a recirculação..... | 33 |
| Figura 26 – Resistência de imersão e relé de estado | 34 |
| Figura 27 – (a) Esquema de ligação do sinal de controle e conexão elétrica (b) operação do relé | 34 |
| Figura 28 – Circuito drive para acionamento do relé de estado sólido..... | 35 |
| Figura 29 – Display gráfico e push button utilizados para realizar a interface com o usuário | 35 |
| Figura 30 – Resposta do sistema à quatro degraus de potência | 36 |
| Figura 31 – Comparação aos degraus de potência do processo. | 37 |
| Figura 32 – Comparativo entre a resposta experimental e teórica do sistema, para quatro etapas do processo | 38 |
| Figura 33 – Planta e controlador genérico. | 39 |
| Figura 34 – Fluxograma, representado a ação de controle dinâmica implementada no microcontrolador..... | 41 |
| Figura 35 – Diagrama de blocos método de discretização..... | 41 |
| Figura 36 – Ação de controle e Anti-Windup implementadas em microcontrolador. . | 43 |

| | |
|--|----|
| Figura 37 – Equipamento para a fabricação de cerveja artesanal adaptado. | 43 |
| Figura 38 – Parâmetros de tempo e temperatura da etapa de mosturação, para a fabricação da cerveja Coopers Pale Ale..... | 44 |
| Figura 39 – Resposta do sistema referente a etapa de mosturação somente com água. | 45 |
| Figura 40 – Adição de malte moído a água na etapa de mosturação | 45 |
| Figura 41 – Resposta do sistema referente a etapa de mosturação | 46 |
| Figura 42 – Comportamento da temperatura da água para a lavagem do mosto. | 46 |
| Figura 43 – Comportamento da temperatura da água na etapa de fervura. | 47 |
| Figura 44 – Dispositivos de potência e painel com display gráfico e botões para parametrização..... | 55 |
| Figura 45 – Placa de instrumentação..... | 55 |
| Figura 46– Fonte simétrica e circuito drive..... | 55 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1 - Funções de transferência obtidas experimentalmente. | 38 |
| Quadro 2- Funções de transferências dos controladores calculados a priori. | 40 |
| Quadro 3- Funções de transferências dos controladores utilizados no processo. ... | 40 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO | 12 |
| 1.1 OBJETIVOS | 15 |
| 1.1.1 Objetivo Geral | 15 |
| 1.1.2 Objetivos Especificos | 16 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 17 |
| 2.1 MODELOS MATEMÁTICOS DE SISTEMAS | 17 |
| 2.1.1 Modelagem teórica de um sistema térmico | 17 |
| 2.1.2 Modelagem experimental | 19 |
| 2.1.3 Não linearidades e linearização | 20 |
| 2.2 SISTEMAS DE CONTROLE | 20 |
| 2.2.1 Ações básicas de controle..... | 21 |
| 2.2.2 Projeto de controladores | 24 |
| 2.2.3 Microcontrolador..... | 26 |
| 2.2.4 Condicionamento de sinal e instrumentação..... | 27 |
| 2.2.5 Elementos atuadores, relé de estado sólido e resistência..... | 27 |
| 2.2.6 Interface com usuário | 28 |
| 3 PROJETO DE SISTEMA DE AUTOMAÇÃO PARA O PROCESSO DE MOSTURAÇÃO E FERVURA DE CERVEJA ARTESANAL..... | 29 |
| 3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA..... | 29 |
| 3.2 MATERIAIS E MÉTODOS..... | 30 |
| 3.2.3 Instrumentação e aquisição de sinais do processo térmico | 30 |
| 3.2.1 Microcontrolador..... | 32 |
| 3.2.4 Caldeirão | 32 |
| 3.2.5 Moto bomba, motor de agitação, dispositivos de acionamento e proteção | 33 |
| 3.2.2 Atuador..... | 34 |

| | |
|---|----|
| 3.2.6 Interface com o usuário | 35 |
| 3.3 LEVANTAMENTO DO MODELO MATEMÁTICO E PROJETO DE CONTROLADOR PARA O PROCESSO DE CONTROLE DE TEMPERATURA | 36 |
| 3.4 RESULTADOS OBTIDOS | 43 |
| 3.4.1 Etapa de mosturação | 44 |
| 3.4.1 Etapa de fervura | 47 |
| CONCLUSÕES | 48 |
| REFERÊNCIAS | 50 |
| APÊNDICE A | 52 |
| APÊNDICE B | 53 |
| APÊNDICE C | 55 |

1. INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

Atualmente tem-se observado um relevante aumento no consumo de cervejas artesanais, as quais se caracterizam por ser um produto fabricado em menor escala. Todo o processo de fabricação é acompanhado pelos produtores, prezando a qualidade da cerveja, além de manter a tradição do 'puro malte'¹, dissociando-se da imagem de produção em massa (MORADO, 2009). Embora os processos industriais de fabricação de cerveja em larga escala sejam responsáveis por cerca de 98,6 % do mercado nacional, os produtos ofertados são muito semelhantes entre si (SEBRAE, 2015).

Devido ao gosto apurado de um público de consumidores que procuram por uma cerveja com mais nuances de sabores, cores e aromas, as nano/micro cervejarias tentam suprir essa demanda, a qual, normalmente não é satisfeita pelos grandes fabricantes. Nesse âmbito, emergem também os chamados “cervejeiros caseiros”, que fabricam a própria cerveja em casa, buscando produzir uma bebida de qualidade, seguindo os moldes tradicionais de produção dos antigos mestres cervejeiros.

De acordo com Beckhauser² (1984 apud FERNANDES; FRANZEN 2011, p. 2), a produção artesanal de cerveja resume-se basicamente em dez passos: elaboração da receita, moagem do grão, mostura, filtração do mosto, fervura, resfriamento, aeração e inoculação do fermento, fermentação, maturação, filtração da cerveja e engarrafamento, como ilustrado na Figura 1.

¹ Em sua composição apenas contêm cereais que passaram pelo processo de germinação e secagem para transformação do amido em açúcares fermentescíveis (MORADO, 2009, p. 323).

² BECKHAUSER, Laércio. O mundo da cerveja caseira e de outras bebidas. Joinville, 1984.

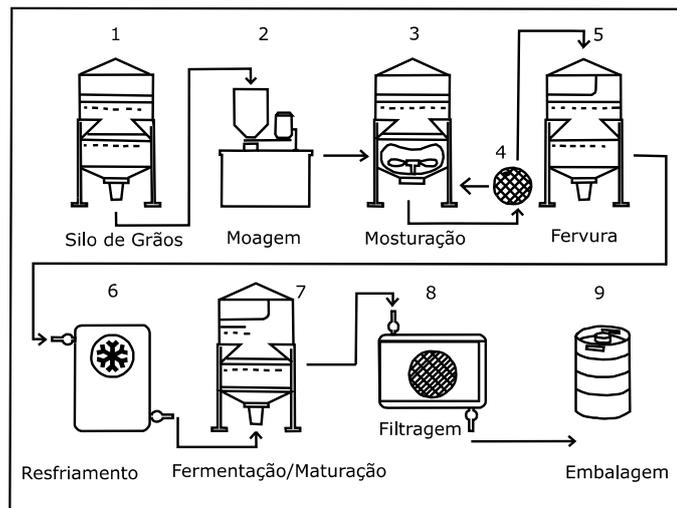


Figura 1 - Exemplo de Fluxograma do processo de fabricação de cerveja.

Fonte - Adaptado de infográfico produção de cerveja³.

Os quatro ingredientes básicos para a fabricação da cerveja são:

- **Água:** que representa grande maioria da composição do produto final, sendo fundamental o controle de pH e minerais deste ingrediente para a sua utilização;
- **Cevada maltada:** é o grão de cevada germinado e seco que propicia a liberação de enzimas utilizadas no processo de fabricação de cerveja;
- **Lúpulo:** é uma flor cônica de plantas trepadeiras, que é utilizado para conferir amargor, sabor e aroma, além de ser considerado um conservante natural;
- **Fermento:** fungo microscópico, cuja função é transformar os açúcares presentes no mosto⁴ em álcool e gás carbônico (MORADO, 2009; PALMER, 2006).

Para a fabricação de cerveja em casa, os equipamentos geralmente utilizados são: panelas de inox ou alumínio, fogão a gás, termômetros, *timer* digital, densímetro, refratômetro, entre outros dispositivos que auxiliam o operador⁵. O controle de temperatura da água é realizado através do ajuste manual do registro do gás, controlando assim a intensidade da chama. A temperatura é aferida com o auxílio de um termômetro. O tempo do processo e da adição de lúpulos exige que utilize-se um *timer* (HUGHES, 2014).

³Disponível em: <http://www.dreamstime.com/stockillustration-brewery-infographics-beer-illustrationsicons-labels-symbols-designelements-image45447530>. Acesso em 16/02/2016.

⁴ Solução açucarada destinada à fermentação alcoólica.

⁵ Pessoa que executa as ações necessárias para a fabricação de cerveja.

Dos vários passos para que o cervejeiro caseiro chegue a uma cerveja artesanal de qualidade, o mais trabalhoso é a etapa de mosturação, que compreende o aquecimento de uma mistura de malte moído (cevada e/ou trigo) e água. O aquecimento escalonado na etapa da mosturação, como exemplificado na Figura 2, visa favorecer a ação de diferentes grupos de enzimas responsáveis por fazer a conversão do amido dos grãos em açúcares fermentescíveis (PALMER, 2006).

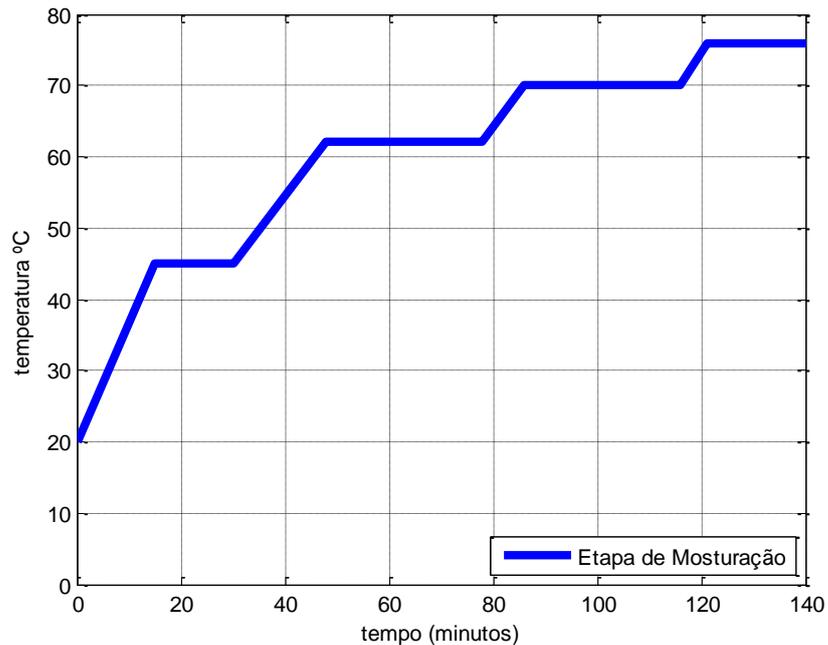


Figura 2- Etapa de mosturação com temperatura escalonada.
Fonte – Autoria própria.

Ao fim da etapa de mosturação, chega-se ao mosto filtrado que deverá ser fervido durante um período de tempo definido. Segundo Palmer (2006), na etapa de fervura devem ser adicionados os lúpulos. Esta etapa caracteriza-se pelo controle nos tempos de adição dos lúpulos e na temperatura, a qual, deve ser mantida em constante ebulição, conforme indicado pela Figura 3.

Em processos caseiros, geralmente existe menor disponibilidade de recursos tecnológicos de baixo custo que sejam adaptáveis a equipamentos de pequeno porte e que permitam o controle automático da temperatura e tempo do processo nas etapas de mosturação e fervura. Dessa forma, exige-se uma intervenção e monitoramento humano constante durante essas duas etapas.

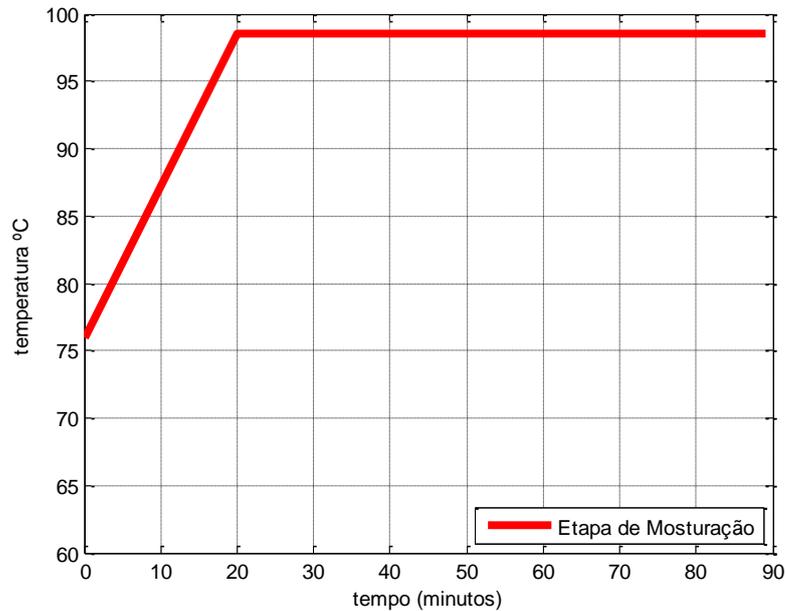


Figura 3- Etapa de fervura.
Fonte – autoria própria.

Uma alternativa para a diminuição da ação do operador, seria a automação de um ou mais processos no equipamento caseiro para fabricação da cerveja artesanal. A regulação automática de processos visa, através de dispositivos, controlar as variáveis físicas presentes em um determinado sistema, como a temperatura, o tempo, a pressão e a vazão (NISHINARI; SIGHIERI, 2003).

Assim, o presente trabalho objetiva a adaptação de um equipamento para a produção de cerveja artesanal, visando o controle de temperatura, do tempo de processo e de adição de ingredientes.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema de automação para o processo de mosturação e fervura de cerveja artesanal, que permita controlar a temperatura e o tempo de forma adequada e prontamente adaptável em equipamentos de pequeno porte, com capacidade de produção média estimada entre 20 a 200 l.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar revisão bibliográfica e estudos acerca do processo de fabricação de cerveja, automação de processos, métodos de controle digital e demais assuntos correlacionados;
- Levantamento dos requisitos para a funcionalidade do sistema;
- Projetar circuitos de aquisição e acionamento;
- Definir os materiais e equipamentos necessários para a construção do protótipo;
- Implementar circuitos de acionamento, sensoriamento e fechar malha;
- Desenvolvimento de uma interface com o usuário;
- Implementar sistema piloto;
- Aquisição e análise dos resultados;
- Estimativa de custo do sistema (apêndice A).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MODELOS MATEMÁTICOS DE SISTEMAS

Segundo Ogata (2000, p. 48), as equações diferenciais são aplicadas para descrever a dinâmica de muitos sistemas, sejam eles, térmicos, mecânicos, elétricos e outros. Esse conjunto de equações tem como intuito a representação matemática da dinâmica do sistema de maneira satisfatória (OGATA, 2000).

O modelo matemático de um sistema, quando limitado a uma única variável de entrada e saída, invariante no tempo e linear⁶, pode ter as suas equações diferenciais descritas no domínio da frequência por intermédio da transformada de Laplace, facilitando o método de solução (DORF, 2001; OGATA, 2000).

2.1.1 Modelagem teórica de um sistema térmico

Segundo Garcia (2005, p. 26), os modelos matemáticos que descrevem um sistema podem ser obtidos empregando as leis básicas que o caracterizam, como as leis de Newton para sistemas mecânicos, leis de Kirchhoff para circuitos elétricos e leis da termodinâmica para sistemas térmicos (GARCIA, 2005; COELHO, 2004).

Um sistema térmico é representado na Figura 4 e consiste em um recipiente termicamente isolado com sua resistência térmica equivalente (R_t), revestindo uma capacitância térmica (C_t). Para efeito de análise, a temperatura interna (T) é considerada uniforme e a temperatura ambiente (T_{amb}) é considerada constante. O fluxo de calor fornecido pela resistência elétrica é indicado por (q_e), a tensão de alimentação da resistência é representada por (V) e o fluxo de calor cedido ao ambiente é indicado por (q_s) (GARCIA, 2005; OGATA, 2000).

⁶ As equações diferenciais ordinárias que descrevem o sistema são determinadas desprezando algumas propriedades físicas intrínsecas ao processo, como a não linearidade.

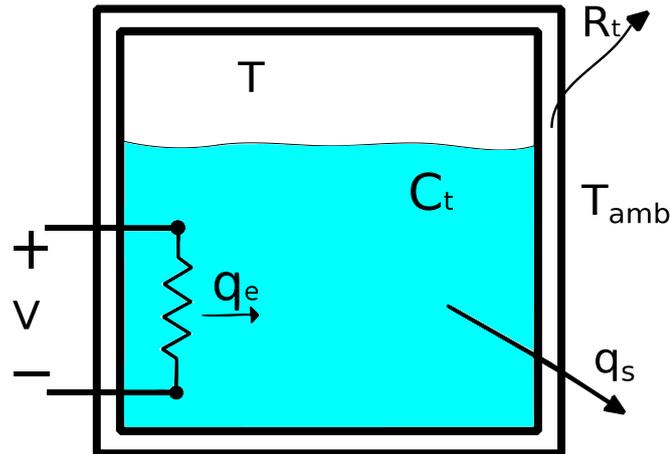


Figura 4– Sistema térmico.
Fonte - Adaptado de Garcia (2005, p.95).

Segundo Garcia (2005), a função de transferência que descreve o sistema é a relação entre a temperatura interna e o fluxo de calor injetado, sendo descrita pela equação (1).

$$\frac{T(s)}{q_e(s)} = \frac{\frac{1}{C_t}}{s + \frac{1}{R_t C_t}} = \frac{R_t}{R_t C_t s + 1} \quad (1)$$

Para efeito de simplificação da análise, Ogata (1993, p. 105) afirma que o sistema térmico pode ser representado por um modelo de parâmetros concentrados. Através dessa simplificação a capacitância térmica é definida pela equação (2):

$$C_t = M c_p \quad (2)$$

Em que (M) é a massa da substância considerada em [kg] e (c_p) é o calor específico da mesma substância [kcal/kg°C].

A resistência térmica por convecção ou condução é representado pela equação (3):

$$R_t = \frac{1}{K} \quad (3)$$

O coeficiente (K) [kcal/s°C] para condução e convecção é dado respectivamente pelas equações⁷ (4) e (5)

⁷Segundo Ogata (2000, p.80), a maioria dos fenômenos térmicos presentes nos sistemas de controle não envolve transmissão de calor por radiação

$$K_{\text{cond}} = \frac{kA}{\Delta X} \quad (4)$$

$$K_{\text{conv}} = HA \quad (5)$$

onde (k) é a condutividade térmica do material [kcal/ms°C], (A) área normal ao fluxo de calor [m²], ΔX espessura do condutor [m], (H) coeficiente de convecção [kcal/m²s°C]

A resistência térmica tanto para a condução ou convecção são considerados constantes, devido aos coeficientes de condutividade e de convecção térmica ser aproximada demente constantes (OGATA, 1993).

2.1.2 Modelagem experimental

Muitas vezes a modelagem teórica de um sistema se torna relativamente complexa, devido à dificuldade de obter um modelo matemático que represente as leis físicas que influenciam o sistema em questão . Uma forma alternativa é realizar a modelagem experimental, a qual, consiste em medidas ou observações dos sinais de entrada e saída de um sistema, com o objetivo de obter um modelo que represente a dinâmica do processo. Não é pretendida na análise experimental obter um modelo matemático com exatidão, mas sim, um modelo apropriado para uma dada aplicação (COELHO, 2004).

Segundo Nise (2013, p.134), em um sistema com uma única entrada e saída, pode-se alcançar a função de transferência que o descreve, a partir de uma excitação a um degrau. Aplicando um degrau à entrada da planta⁸ e utilizando de algum meio para medir e coletar as informações da saída, é possível, com a análise dos dados, determinar os parâmetros pertinentes para a determinação da função de transferência.

⁸ Planta representa o sistema ou processo a ser controlado.

2.1.3 Não linearidades e linearização

A linearidade de um sistema pode ser verificada através da aplicação de duas propriedades, superposição e homogeneidade. De acordo com Nise:

A propriedade da superposição significa que a resposta da saída de um sistema à soma de entradas é a soma das respostas às entradas individuais. Assim, se uma entrada $r_1(t)$ produz uma saída $c_1(t)$, e uma entrada $r_2(t)$ produz uma saída $c_2(t)$, então, uma entrada $r_1(t) + r_2(t)$ produz uma saída $c_1(t)+c_2(t)$. A propriedade de homogeneidade descreve a resposta do sistema para a multiplicação da entrada por um escalar. Especificamente, em um sistema linear, a propriedade de homogeneidade é demonstrada se, para a entrada $r_1(t)$ que produz uma saída $c_1(t)$, uma entrada $A r_1(t)$ produz uma saída $A c_1(t)$ (2013, p. 70).

Para ser linear, o sistema precisa atender as duas propriedades. Um sistema não linear pode ser aproximado a um sistema linear para algumas condições de operação. A linearização pode ser realizada em um ponto de operação da curva não linear, em que os valores de entrada variam em torno do ponto de operação (NISE, 2013).

2.2 SISTEMAS DE CONTROLE

Um sistema de controle é caracterizado pela realimentação das informações obtidas do processo, com base nesses dados o controlador opera sobre o sistema até o estado desejado. Um sistema de controle pode ser caracterizado pela Figura 5 (SANTOS; SILVEIRA,1998; NISHINARI; SIGHIERI, 2003)

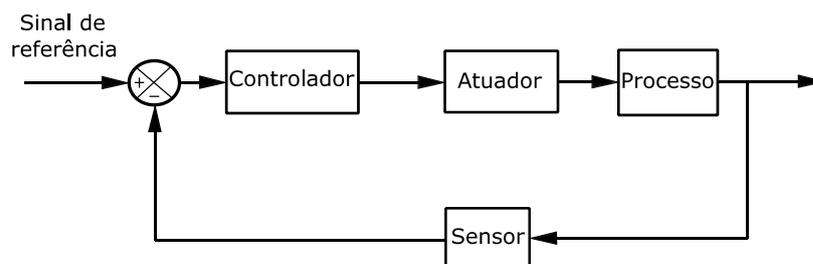


Figura 5– Diagrama de blocos de um sistema de controle.
 Fonte – Adaptado de Ogata (2000, p. 178).

Um segmento dos sistemas de controle é controle de rastreamento, que por intermédio de dispositivos como sensores, controladores e atuadores, objetiva controlar variáveis físicas como a temperatura, a pressão, a vazão, o nível, entre outros. (NISHINARI; SIGHERI, 2003). O controle de rastreamento, visa, assim, trazer uma maior comodidade para o operador, diminuindo a sua intervenção no processo e propiciando um aumento na qualidade do produto.

2.2.1 Ações básicas de controle

A classificação dos controladores industriais são atribuídas de acordo com a ação de controle utilizada, sendo que os principais são:

- Controlador proporcional (P)

Essa ação de controle é caracterizada pela relação de entrada (sinal de erro $E(s)$) e saída do controlador (ação de controle $U(s)$) por meio de uma constante (k_p) (ganho proporcional). A Figura 6 apresenta o diagrama de blocos do controlador proporcional.

Ao ser aplicado uma entrada degrau, o controle proporcional de um sistema do tipo zero, ou seja, que não possui um integrador em sua função de transferência, acarretará na resposta em regime permanente, um erro residual, conforme a Figura 7 (OGATA, 2010, p. 198).

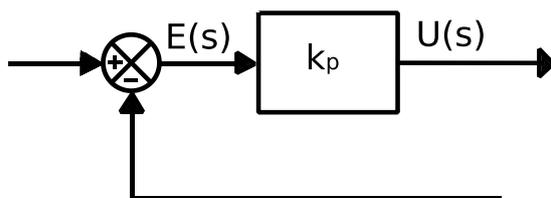


Figura 6 – Diagrama de blocos do controlador proporcional.
Fonte – Adaptado de Ogata (2000).

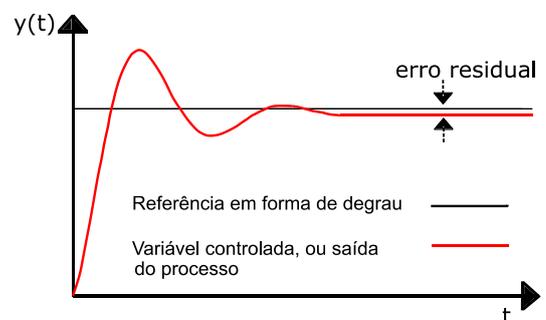


Figura 7 - Comportamento de um sistema com a ação do controlador proporcional.
Fonte – Adaptado de Nise (2009).

- Controlador do tipo integral (I)

Esse controlador eleva o tipo do sistema (por exemplo, de tipo zero para um), inserindo um pólo na origem, e, em regime, extingue o erro residual quando aplicada uma entrada degrau para uma realimentação unitária, como apresentado nas Figuras 8 e 9 respectivamente. A ação de controle puramente integral pode provocar uma resposta transitória capaz de levar o sistema à instabilidade, muitas vezes, não desejada para as aplicações pretendidas.

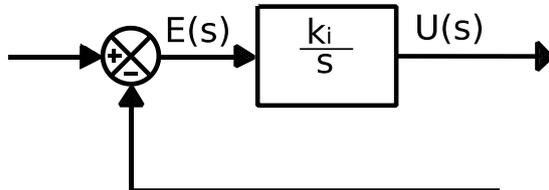


Figura 8- Diagrama de blocos do controlador integral.
 Fonte – Adaptado de Ogata (2000).

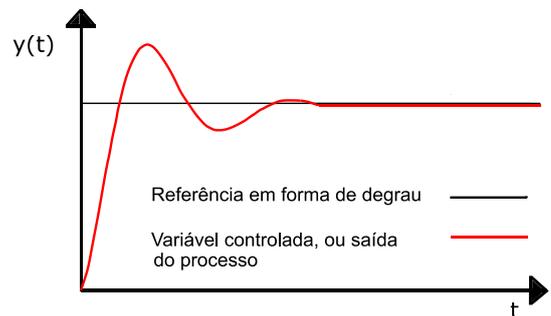


Figura 9 – Comportamento de um sistema com a ação do controlador integral.
 Fonte – Adaptado de Nise (2009).

- Controlador do tipo proporcional e integral (PI)

O controlador integral (I) quando introduzido isoladamente, eventualmente pode instabilizar o sistema de controle, mas, elimina o erro residual em regime permanente. Com a junção do controlador proporcional (P), que visa melhorar a resposta transitória, obtém-se o controlador proporcional e integral (PI). Considerando a estrutura acadêmica para a representação do controlador (PI), (k_p) e (T_i) , denotam o ganho proporcional e o tempo integral, respectivamente. O tempo integral condiz somente com a parcela integral do controlador e o valor de (k_p) influencia ambas as parcelas do controlador, isto é, proporcional e integral. As Figuras 10 e 11 apresentam respectivamente o diagrama de bloco do controlador e a ação de controle do mesmo (OGATA, 2003).

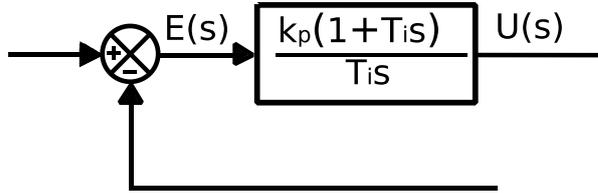


Figura 10 – Diagrama de blocos do controlador proporcional integral.

Fonte – Adaptado de Ogata (2000).

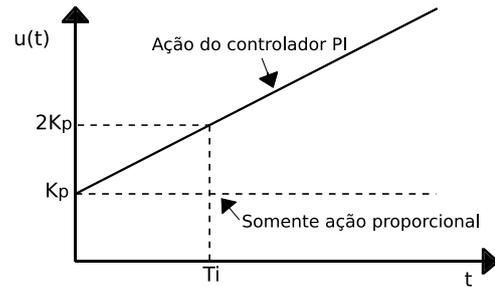


Figura 11 – Sinal da ação de controle do controlador PI.

Fonte – Adaptado de Ogata (2000).

Em processos, cuja a dinâmica é caracterizada por um sistema de primeira ordem, o comportamento desejado poderá ser atendido pelo controlador (PI) (ASTRÖM; HÄGGLUND, 2009, p. 91)

- Controlador do tipo proporcional e derivativo (PD)

A ação de controle derivativa nunca é utilizada de maneira isolada, geralmente é empregada, ao menos em conjunto com o controlador proporcional. A ação derivativa atua sobre a taxa de variação do erro, essa característica promove que a ação de controle corretiva ocorra de maneira antecipativa. A Figura 12 mostra o diagrama de blocos do controlador (PD) (OGATA 2003).

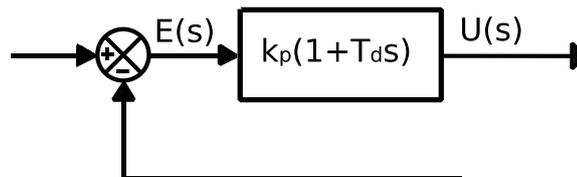


Figura 12– Diagrama de blocos Controlador proporcional derivativo PD.

Fonte – Adaptado de Ogata (2000).

- Controlador do tipo proporcional, integral e derivativo (PID)

É a junção das três ações de controle, proporcional, integral e derivativo. Unindo suas características de operação como o erro nulo em regime permanente e melhora da resposta ao período transitório. Uma das estruturas de implementação do controlador (PID), como também dos controladores (PI) e (PD), é a combinação de cada termo proporcional, integral e derivativo, combinadas paralelamente como mostra a Figura 13 (ASTRÖM; HÄGGLUND, 2009).

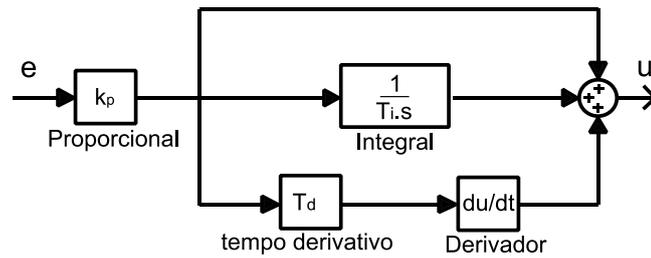


Figura 13 - Diagrama de blocos da estrutura acadêmica do controlador PID.
Fonte – Adaptado de (ASTRÖM; HÄGGLUND, 2009).

A equação (6) representa a estrutura acadêmica conforme Figura 12.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = kp\left(1 + \frac{1}{Ti.s} + Tds\right) \quad (6)$$

2.2.2 Projeto de controladores

A elaboração do projeto de um controlador visa atender as especificações impostas para o funcionamento adequado de um sistema. O desempenho do sistema pode ser descrito no domínio do tempo ou no domínio da frequência, sendo que, em ambos os casos podem ser utilizadas ferramentas gráficas para analisar esse desempenho. No domínio do tempo o controlador pode ser determinado através da técnica de espaço de estados que utiliza (através da alocação de pólos), do lugar geométrico das raízes (LGR) para estabelecer os autovalores desejados (“ponto de projeto”). No domínio s ou plano s , para a definição dos parâmetros do controlador são utilizadas as ferramentas gráficas como o LGR, diagrama de Bode, diagrama de Nyquist, entre outras (DORF; BISHOP, 2009, p. 436 a 454).

No transcorrer do trabalho será adotada a análise no domínio da frequência, e a técnica utilizada para a elaboração do projeto do controlador é o lugar geométrico das raízes, possibilitando assim, abstrair informações referentes ao intervalo transitório e de regime permanente do sistema em questão, além de proporcionar a determinação dos pólos à malha fechada partindo dos pólos e zeros à malha aberta (NISE, 2009).

A Figura 14 apresenta o diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada (MF), também descrito como sistema de controle por realimentação, sendo o valor medido na saída $Y(s)$ comparado com o valor de referência $R(s)$ (valor desejado na saída). A diferença entre esses dois valores gera um sinal de erro $E(s)$, o sinal de erro é processado pelo controlador, gerando o sinal de controle $U(s)$ que atua na planta $G(s)$. O comportamento do sistema em malha fechada (MF), após uma variação de ganho e/ou uma inserção de um controlador, pode ser obtido a partir da observação do percurso das raízes obtidas, através da equação característica esboçadas no plano S , como mostra a Figura 15 (DORF; BISHOP, 2009).

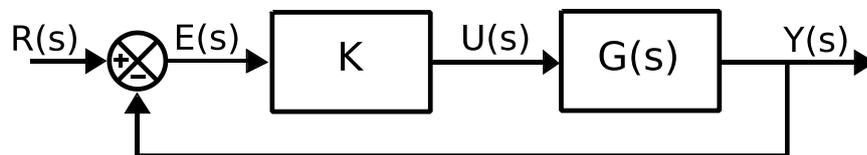


Figura 14 - Diagrama de blocos de um sistema de controle com realimentação unitária.

Fonte – Adaptado de Dorf (2009, p. 263).

A função de transferência de malha fechada é dada pela equação

$$FTMF(s) = \frac{KG(s)}{1 + KG(s)}; \quad (7)$$

A equação característica é obtida através do denominador da $FTMF(s)$, sendo ela:

$$1 + KG(s) = 0 \quad (8)$$

podendo ser reescrita da forma:

$$1 + \frac{K(s + z_1)(s + z_2)(s + z_3) \dots (s + z_m)}{(s + p_1)(s + p_2)(s + p_3) \dots (s + p_n)} = 0 \quad (9)$$

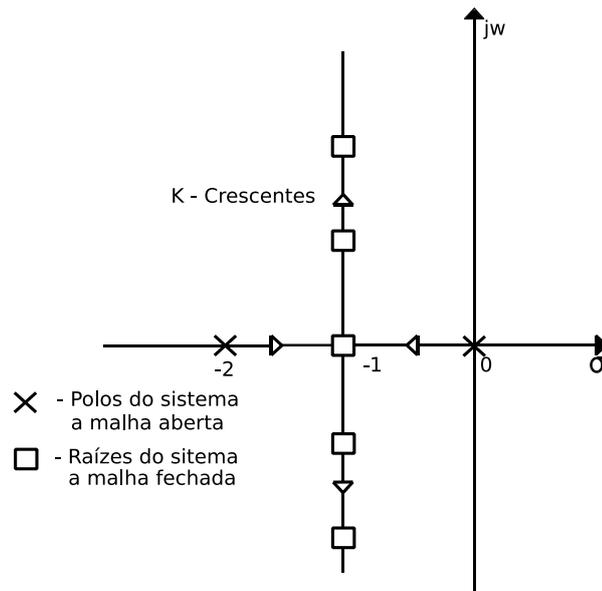


Figura 15 – Lugar das raízes.
Fonte – Adaptado de Dorf (2009, p. 264).

2.2.3 Microcontrolador

Um microcontrolador contém um microprocessador e periféricos como: dispositivos de entrada e saída (E/S), memória de dados e programa, conversores analógicos - digitais (A/D) e digitais - analógicos (D/A), temporizadores, geração PWM, entre outros, integrando em um único circuito.

Com o auxílio de um software de ambiente para desenvolvimento integrado (IDE) é possível desenvolver um programa (algoritmo) para o controle dos periféricos do microcontrolador, e, em consequência atuar sobre os dispositivos externos (IBRAHIM, 2002).

As aplicações geralmente são dedicadas para uma determinada tarefa, sendo alguma delas:

- Automação industrial e residencial;
- Eletrodomésticos;
- Instrumentos de medição;
- Dispositivos móveis.

2.2.4 Condicionamento de sinal e instrumentação

Um das alternativas para a medição da temperatura é a utilização de termômetros de resistência (RTD). Seu funcionamento consiste na variação da resistência elétrica de um metal, em função da variação da temperatura. A termoresistência de platina, conhecida como PT100, é comumente utilizada e apresenta uma resistência ôhmica de 100Ω a 0°C . Sua faixa de operação é de -200 a $+850^\circ\text{C}$.

Uma maneira de medir a temperatura quando empregado um sensor RTD é a utilização de circuitos em ponte, como a de *wheatstone*, convertendo a variação da resistência em um sinal elétrico de tensão ou corrente. Após a conversão, cabe adequar o sinal elétrico para níveis aceitáveis, sendo possível, assim, a utilização de dispositivos como microcontroladores ou computadores para a aquisição e processamento desse sinal (BEASLEY; FIGLIOLA, 2007).

2.2.5 Elementos atuadores, relé de estado sólido e resistência

A resistência de imersão construtivamente pode ser composta por um ou mais elementos resistivos, e, seu funcionamento é delimitado na conversão da energia elétrica em calor por efeito joule, como exemplificado pela Figura 16.

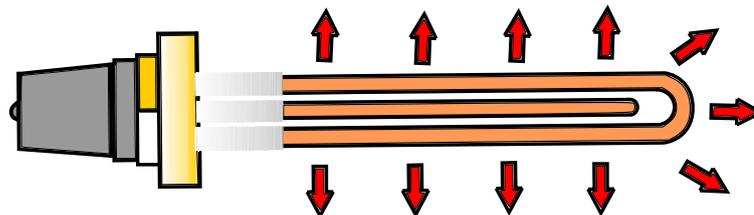


Figura 16- Resistência elétrica de imersão.
Fonte – Autoria própria.

Uma maneira de controlar a potência entregue à carga, da qual a tensão de fornecimento é alternada, é denominada ciclo integral. Este modo de controle é aplicado em sistemas cuja constante de tempo é relativamente grande, como em sistemas térmicos, por exemplo. O controle da potência é realizado por intermédio de um dispositivo, interrompendo o fornecimento por alguns ciclos da onda e após um

determinado período religa-se o fornecimento, como apresentado na Figura 17. A proporção entre estado ligado e desligado é denominado ciclo de trabalho (d), no qual, através do ajuste do (d), é possível controlar a potência média entregue à carga (AHMED 2000, p. 404 a 408).

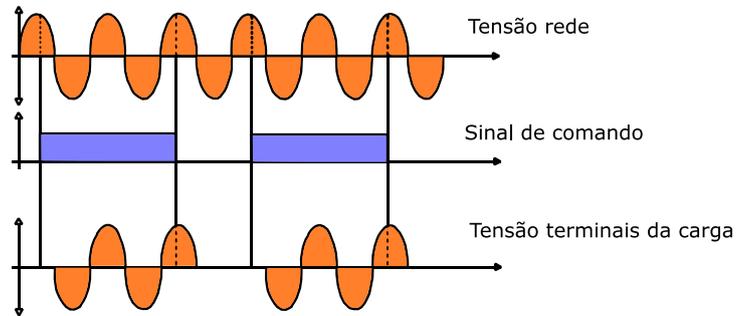


Figura 17- Ciclo de controle integral
Fonte – Autoria própria.

A equação (10) descreve a potência média (P_o) entregue a uma carga resistiva (R_c), a raiz do valor quadrático médio (RMS) da tensão de entrada é representado por (V_i), o ciclo de trabalho (d) é a razão entre o estado ligado e a soma entre estado ligado e desligado por um período de tempo.

$$P_o = \frac{V_i^2}{R_c} d \quad (10)$$

2.2.6 Interface com usuário

A interface com o usuário (Interface Homem Máquina - IHM), como exemplificado na Figura 18, possibilita o monitoramento do processo através da visualização de informações apresentadas por um *display* gráfico, como também, o operador utilizar botões ou teclado para a parametrização de uma determinada atividade que o equipamento deve realizar (Texas Instruments, 2014, p. 2).

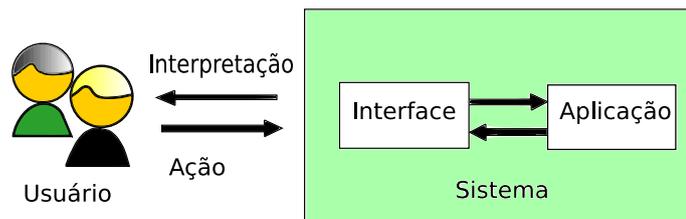


Figura 18 - Interface com o usuário.
Fonte – Autoria própria.

3 PROJETO DE SISTEMA DE AUTOMAÇÃO PARA O PROCESSO DE MOSTURAÇÃO E FERVURA DE CERVEJA ARTESANAL

3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A Figura 19 apresenta um esboço do arranjo físico do sistema a ser automatizado. Inicialmente, esse protótipo terá capacidade de fabricar 20 litros de cerveja, porém, pode ser expandido para um volume de até 200 l, mediante redimensionamento das resistências.

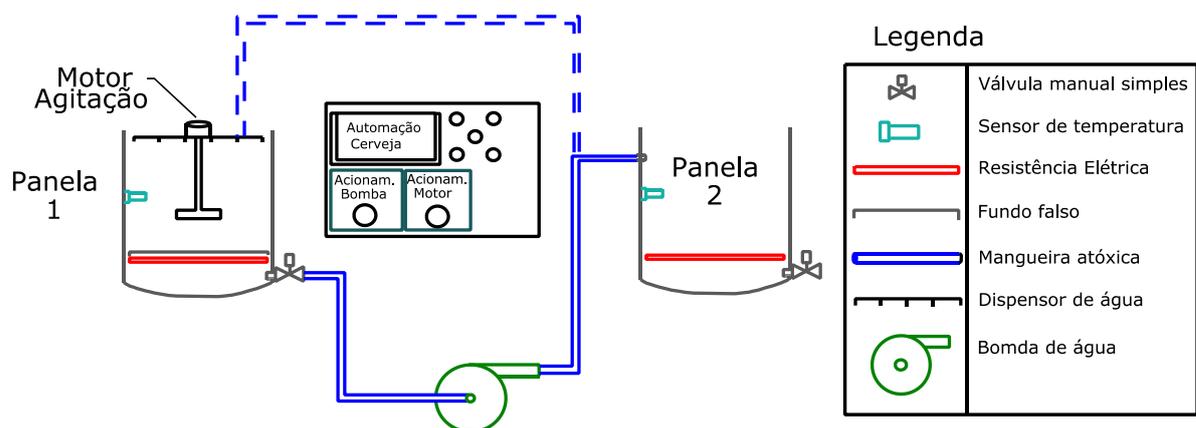


Figura 19 - Esboço do arranjo físico do sistema a ser implementado.
Fonte – Autoria Própria.

O sistema consiste em duas panelas conectadas através de mangueiras atóxicas e válvulas para controle do fluxo de água e do mosto. Serão utilizadas resistências elétricas de baixa potência e de imersão para o aquecimento, uma vez que são a melhor opção (CALEGARI, 2013). Na panela 1 ocorrerá o processo de mosturação. É nesta etapa que serão realizados os degraus de temperatura. Nessa panela será acoplado um motor com pás para agitação do mosto, uniformizando a temperatura e facilitando a extração dos açúcares dos grãos. Na panela 2 será aquecida a água para fazer a lavagem do mosto. Posteriormente, essa mesma panela será utilizada também para a fervura do mosto. A bomba de água é utilizada na etapa de recirculação e na transferência do mosto da panela 1 para a panela 2.

Para a alocação dos componentes elétricos foi utilizada uma placa de montagem, fixando e interligando os componentes. Para a visualização das etapas do processo foi fixado na porta do painel um *display* gráfico, além de botões para alteração de parâmetros e botoeiras para o acionamento manual da bomba d'água e do motor de agitação. Por fim, os circuitos eletrônicos desenvolvidos, foram alocados dentro do painel.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Após a apresentação do arranjo físico, conforme a Figura 19, serão abordados e explanados os equipamentos, componentes e circuitos utilizados para a idealização do projeto.

3.2.3 Instrumentação e aquisição de sinais do processo térmico

O sensor utilizado para a realização da medição de temperatura é a termoresistência PT-100. Como apresentado na subseção 2.2.4, seu funcionamento é caracterizado pela variação da resistência, quando submetido a uma variação de temperatura. Para a realização do condicionamento da variação da resistência em um sinal de tensão, é necessária a visualização da resposta da resistência do sensor PT-100, mediante consulta de catálogo do fabricante, conforme a figura 20. Neste, os valores de temperatura e resistência do sensor, no processo, são de 0 °C (100 Ω) a 100 °C (138,51 Ω).

Com base nestas informações, o condicionamento de sinal é desenvolvido para adequar a escala de tensão para a conexão à porta do ADC do microcontrolador, de 0 a 3,3 V. O circuito de instrumentação é ilustrado na Figura 21. O sensor PT-100 é conectado na ponte de *wheatstone*, convertendo a variação da resistência do sensor para um sinal de tensão. O circuito integrado (CI) TL084⁹, possui quatro amplificadores operacionais, e serão utilizados para montar três circuitos de ganhos, um para cada

⁹ Não foi utilizado outro CI, por exemplo o IN-AMP, devido a seu elevado preço de aquisição em comparação com o CI TL084.

braço da ponte e um após o circuito subtrator. O circuito subtrator realiza a diferença do sinal tensão gerado pelo desbalanço da ponte de *wheatstone*. Para a atenuação de ruídos de alta frequência, adicionou-se na saída do condicionamento de sinal um filtro passivo, passa baixa de 1ª ordem com uma frequência de corte de 10 Hz, e, por fim, para isolar eletricamente o circuito de instrumentação com a entrada do ADC do microcontrolador é utilizado um buffer.

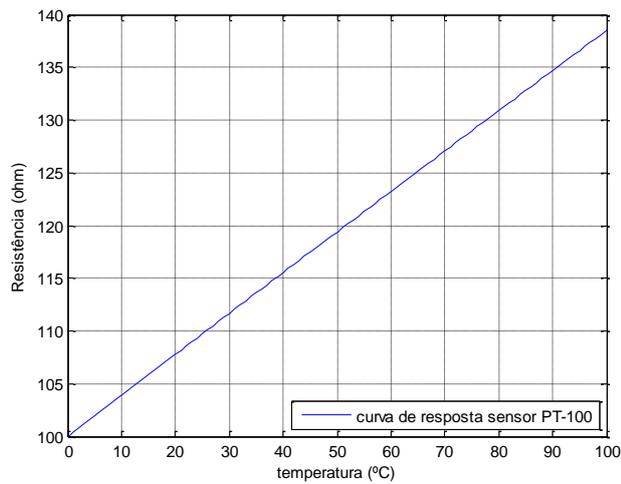


Figura 20 - Curva de resposta sensor PT-100.
Fonte. Novus¹⁰

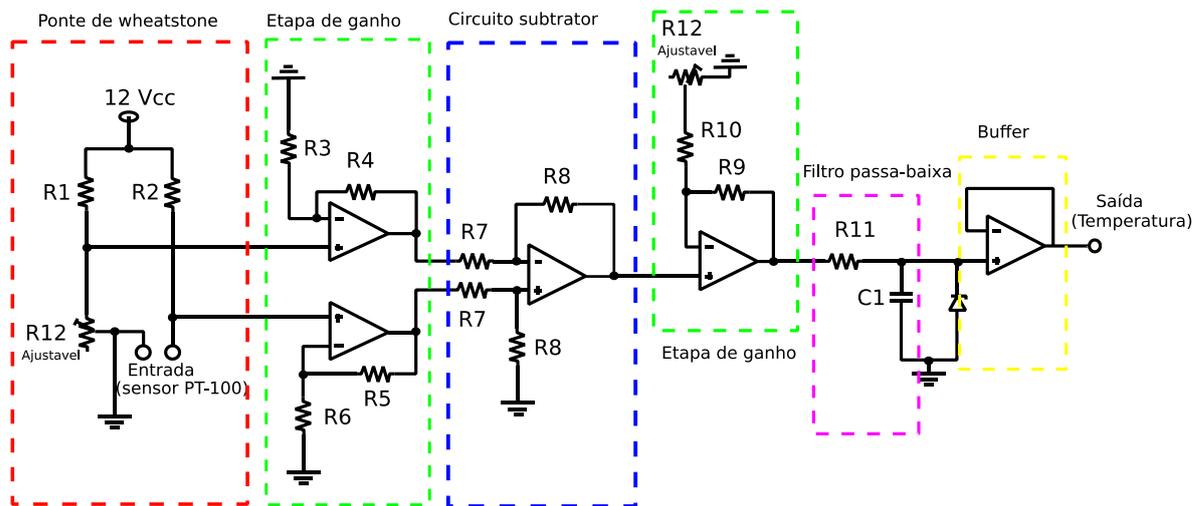


Figura 21 - Circuito de instrumentação.
Fonte – Autoria própria.

¹⁰ Disponível em: http://www.novus.com.br/downloads/Arquivos/folheto_pt100.pdf. Acesso em: 16 de dez. 2016.

3.2.1 Microcontrolador

O microcontrolador utilizado para a aquisição dos dados de temperatura, e posteriormente a interface com o usuário e o controle do processo, foi o *kit* de desenvolvimento *Launchpad MSP-EXP432P401R* da fabricante Texas Instruments, mostrado na Figura 22.

O microcontrolador utilizado na composição do *kit* possui uma CPU ARM Cortex-M4F de 32 bits com ponto flutuante e com a frequência máxima de *clock* de 48 MHz, 256 KB de memória *flash*, 64 KB de memória SRAM. Os periféricos disponíveis são: ADC de 14 bits, DCA de 16 bits, *timers*/PWM, relógio de tempo real (RTC), *interfaces* de comunicação serial (I²C, SPI, UART e IrDA).

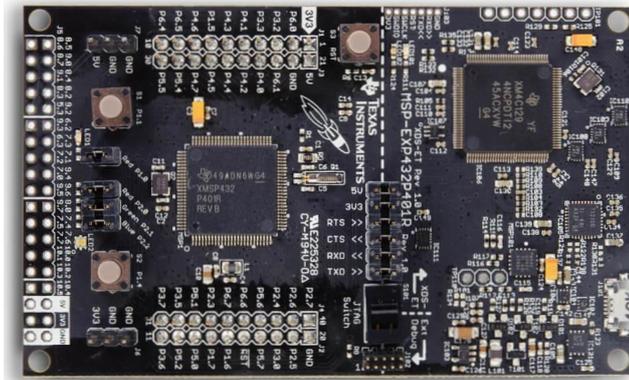


Figura 22 - Kit Launchpad MSP-EXP432P401R.
Fonte – Texas Instruments¹¹.

3.2.4 Caldeirão

Para obter ao final do processo 20 l de cerveja, foi necessário a utilização de dois caldeirões (panelas) de 27 l, Figura 23.

¹¹ Disponível em: <http://www.ti.com/ww/en/launchpad/img/launchpad-msp432-thumb2.jpg>. Acesso em jan. 2017.



Figura 23 - Figura ilustrativa de um caldeirão.
Fonte – Autoria própria.

3.2.5 Moto bomba, motor de agitação, dispositivos de acionamento e proteção

Para a agitação do mosto utilizou-se um motor de 1/3 de CV. O motor já possuía adaptada uma caixa de redução de velocidade no eixo. Com o auxílio do laboratório de Engenharia Mecânica da universidade, adaptou-se uma pá na ponta do eixo e o motor no caldeirão, como mostra a Figura 24. A bomba d'água escolhida é comumente utilizada por fabricantes de cervejas artesanais, tem uma potência de 50 W, e será utilizada para fazer a recirculação e a transferência do mosto. Ela é apresentada na Figura 25. O modo de acionamento adotado para ambos os motores foi a partida direta e os dispositivos utilizados para o seccionamento e proteção foram disjuntor, relé térmico, contadores e botoeiras.



Figura 24 - Motor de agitação.
Fonte – Autoria própria.



Figura 25 – Motobomba para a recirculação.
Fonte – Autoria própria

3.2.2 Atuador

O funcionamento do atuador (conjunto resistência elétrica de imersão e relé de estado sólido), foi abordado na subseção 2.2.5. A metodologia para o dimensionamento que definiu a escolha da resistência elétrica de imersão utilizada, está contida no apêndice B. Após determinado o valor da potência da resistência elétrica, foi possível definir o relé de estado sólido (RES) a ser utilizado, ambos os componentes se apresentam na Figura 26.



Figura 26 - Resistência de imersão e relé de estado sólido.
Fonte – Autoria própria.

Durante o processo ocorre uma ação de controle, em que o sinal oriundo do microcontrolador, conforme Figura 27(a), permitirá que o relé entre em condução efetivamente, na próxima passagem da tensão da rede por zero, como consta na Figura 27 (b).

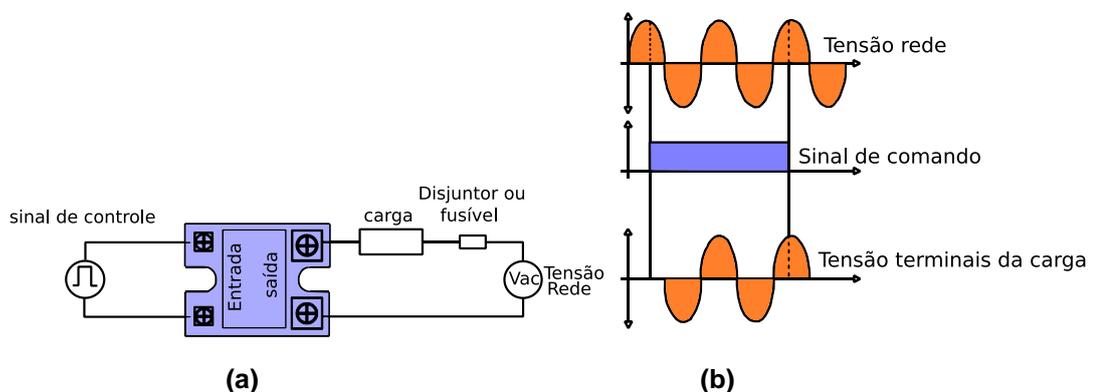


Figura 27 – (a) Esquema de ligação do sinal de controle e conexão elétrica com a carga. (b) operação do relé.

Fonte – Adaptado de Novus¹².

¹² Disponível em: <http://www.novus.com.br/downloads/Arquivos/5000015%20v1%20-20manual%20sr%2010-100%20a%20-%20portuguese.pdf> Acesso em jan. 2017.

Para adequação do nível de tensão do sinal PWM, e também a conexão no RES, foi necessário implementar um circuito *drive*, amplificando o sinal de controle proveniente do microcontrolador. Seu esquemático é ilustrado na Figura 28.

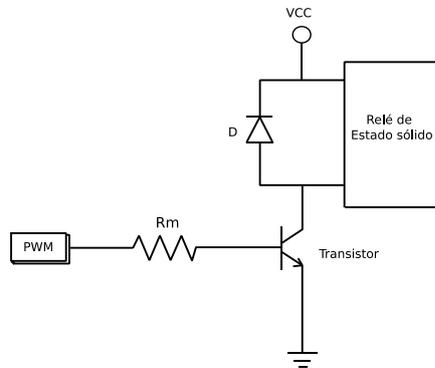


Figura 28 - Circuito drive para acionamento do relé de estado sólido.
Fonte – Fonte própria.

3.2.6 Interface com o usuário

Para a idealização da interface com o usuário utilizou-se um *display* gráfico 128x 64, e *push button*, como apresentado na Figura 29, a qual será retratada na seção 3.4.

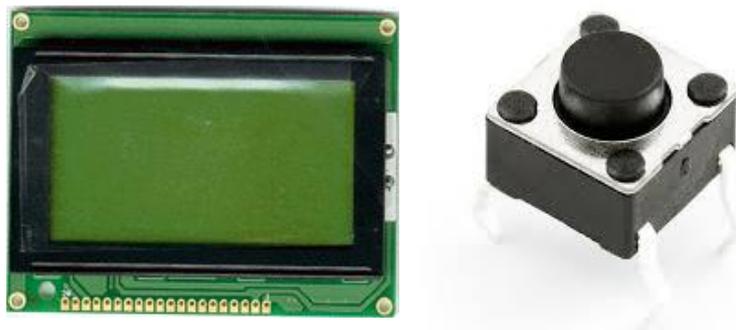


Figura 29- Display gráfico e push button utilizados para realizar a interface com o usuário.
Fonte – Aatoria Própria.

3.3 LEVANTAMENTO DO MODELO MATEMÁTICO E PROJETO DE CONTROLADOR PARA O PROCESSO DE CONTROLE DE TEMPERATURA

Para o projeto de um controlador, é necessário a obtenção do modelo matemático do sistema, extraindo informações que o caracterizam, por exemplo: a constante de tempo, valor em regime permanente e a observação das características de ordem do sistema (primeira ou segunda ordem). Como indica Nise (2009, p. 134 a 148), experimentalmente, a partir de uma resposta ao degrau é possível a visualização do comportamento de um sistema conforme ilustrado no gráfico da Figura 30.

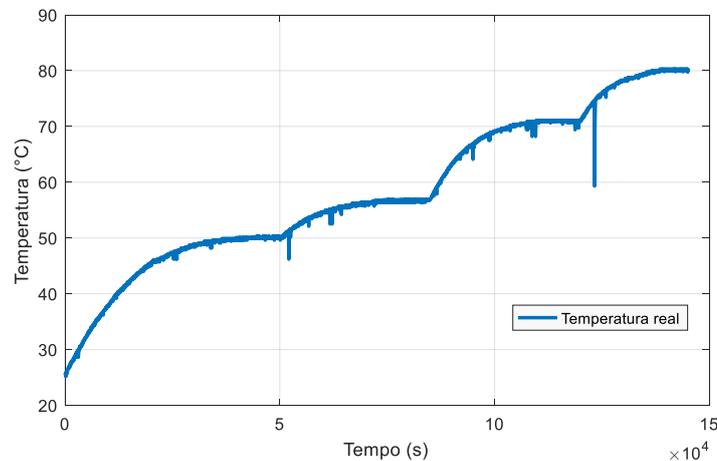


Figura 30 – Resposta do sistema à quatro degraus de potência.

Fonte- Autoria própria.

Após efetuado o condicionamento de sinal, a obtenção da planta foi realizada em malha aberta com a utilização de equipamentos de laboratório, sendo eles, um regulador de tensão monofásico (varivolt) para o controle da potência fornecida à resistência através do ajuste de tensão, multímetros para a medição da tensão e corrente, um computador para armazenar os dados coletados após o tratamento de sinal realizado pelo microcontrolador e a bancada do laboratório do curso de Engenharia Elétrica, que situa-se na sala I-009 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Pato Branco-PR.

A obtenção do modelo experimental do sistema, para a etapa de mosturação¹³, consistiu de maneira simplificada somente com a utilização de um volume de 15 l de

¹³ Para a etapa de fervura não foi obtido um modelo experimental.

água¹⁴. Iniciou-se com a verificação da linearidade do sistema, aplicando-se quatro degraus de potência através do controle de tensão fornecida pelo varivolt, de maneira a abranger uma ampla faixa de operação (da temperatura ambiente até cerca de 80°C.

Para realizar comparação visual entre a entrada (potência) e a saída (temperatura), faz-se necessário que ambas estejam na mesma escala, logo, os degraus de potências foram multiplicados pelos ganhos das plantas obtidas. A relação entre entrada e saída é deslocada para a origem, como apresentada na Figura 31.

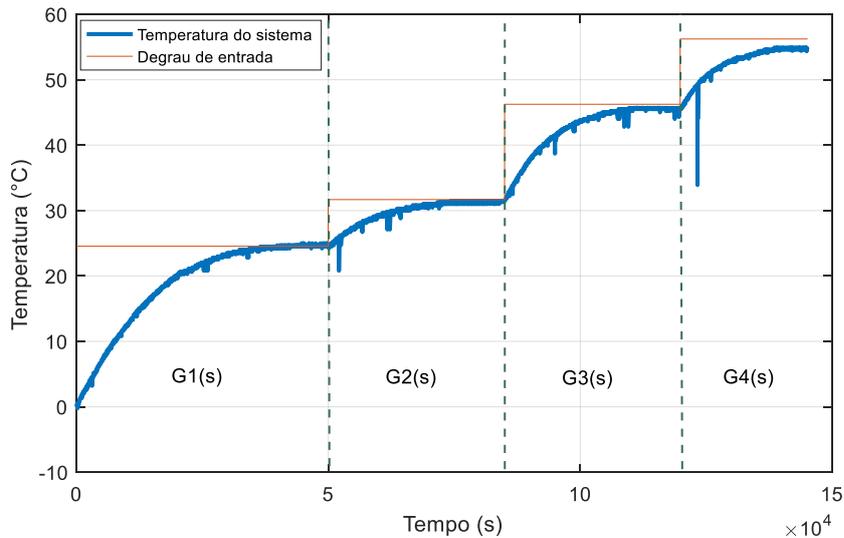


Figura 31 - Comparação aos degraus de potência do processo.
Fonte - Autoria própria.

O quadro 1, apresenta um resumo dos dados colhidos e as respectivas funções de transferência obtidas através da manipulação de vetores no *Matlab* e da utilização da ferramenta *APP System Identification* do *Matlab*¹⁵.

| | Temperatura inicial | Temperatura Final | Δ Degrau de Potência | Planta Obtida |
|-----------|---------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| 1º degrau | 25,4 °C | 50,1 °C | 142 W | $G1(s) = \frac{0,1729}{13824 s + 1}$ |
| 2º degrau | 50,1 °C | 56,9 °C | 40,16 W | $G2(s) = \frac{0,1773}{9149 s + 1}$ |
| 3º degrau | 56,9 °C | 70,9 °C | 68,22 W | $G3(s) = \frac{0,2136}{8360 s + 1}$ |
| 4º degrau | 70,9 °C | 80,0 °C | 25,37 W | $G4(s) = \frac{0,3806}{7163 s + 1}$ |

¹⁴ É de conhecimento que o sistema real irá consistir no volume de 15 l de água, além do malte necessário para a realização da receita de cerveja desejada.

¹⁵ Não foi considerado a variação da temperatura ambiente.

Quadro 1 - Funções de transferência obtidas experimentalmente.

Analisando os resultados obtidos, pode ser observado que o sistema tem um comportamento quase linear entre o primeiro e o segundo degrau, pois a diferença entre os ganhos é pequena (2 %). Para os outros dois pontos de operação, ao qual foi possível obter $G3(s)$ e $G4(s)$ o comportamento do sistema não foi linear¹⁶, apresentando uma diferença percentual acima de 20,41 % em relação a $G1(s)$ e $G2(s)$, não atendendo a propriedade da superposição. Logo, o sistema não é linear para toda a faixa de operação.

A Figura 32 apresenta-se um comparativo entre a resposta do sistema real e o valor obtido de maneira experimental, apresentando um comportamento similar entre ambos.

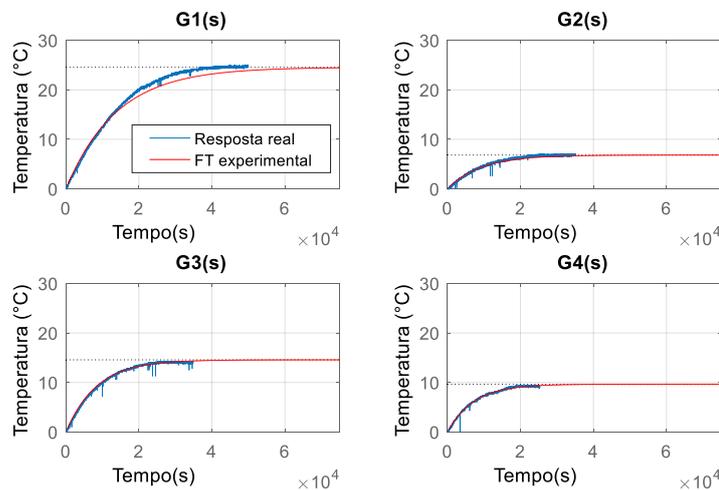


Figura 32 – Comparativo entre a resposta experimental e teórica do sistema, para as quatro etapas do processo.

Fonte – A autoria própria.

O sistema tem um comportamento característico de primeira ordem. Como abordado na subseção 2.2.1, a ação de controle utilizada será a proporcional integral (PI). Para a simplificação do controle do processo, idealizou-se três controladores (PI): um para atender a faixa de operação que engloba as plantas $G1(s)$ e $G2(s)$; e os dois controladores restantes irão atender as faixas de operação que englobam $G3(s)$ e $G4(s)$. Para a determinação dos ganhos dos controladores, a Figura 33 apresenta uma planta e um controlador genérico (PI) como indicado pela equação (6) (desconsiderando a parte referente a ação derivativa).

¹⁶ O local onde foi efetuado os experimentos, não tinha o ambiente controlado (temperatura constante), logo, no decorrer das experimentações ocorreram variações na temperatura ambiente.

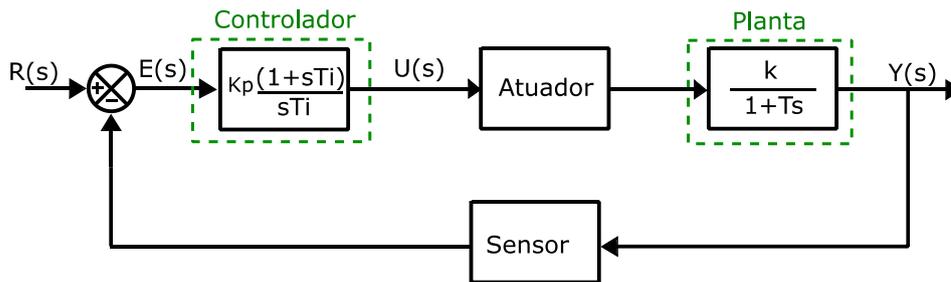


Figura 33 - Planta e controlador genérico.
Fonte – Autoria própria.

As variáveis abordadas na Figura 33 são: (k_p) o ganho proporcional, (T_i) o tempo integral, (k) o ganho da planta e (T) a constante de tempo da planta. O sistema é caracterizado por um processo de primeira ordem e de tipo 0. O controlador (PI) é adicionado ao ramo direto, o que aumenta o tipo do sistema, logo, para uma entrada degrau, o erro em regime permanente é nulo.

Pode-se adotar o tempo integral como sendo igual à constante de tempo do sistema ($T_i = T$). Dessa maneira ocorre o cancelamento entre o zero do controlador com o pólo da planta. A função de transferência à malha fechada (FTMF(s)) obtida é expressa pela equação (11), apresentando as características de um sistema de primeira ordem

$$FTMF(s) = \frac{1}{sT_{MF} + 1} \quad (11)$$

A constante de tempo da FTMF(s) é $T_{MF} = \frac{T}{k_p \cdot k}$, sendo uma razão entre a constante de tempo do sistema pelo produto entre o ganho proporcional do controlador e o ganho da planta.

Um método para determinar o ganho proporcional (k_p) e em consequência o ganho integral ($k_i = \frac{k_p}{T_i}$), é através da equação que descreve o tempo de assentamento. Segundo Nise (2009, p.134), o tempo de assentamento é o tempo necessário para que o sistema atinja 2% em torno do seu valor de regime, como apresentada na equação (12).

$$T_{ass(2\%)} = 4T_{MF} = \frac{4T}{k_p \cdot k} \quad (12)$$

O tempo de assentamento utilizado para projetar os três controladores foi de 600 segundos (10 minutos), os controladores estão evidenciados no Quadro 2.

| |
|---|
| $G_{c1}(s) = 498,82 + \frac{0,0383}{s}$ |
| $G_{c2}(s) = 265,10 + \frac{0,0326}{s}$ |
| $G_{c3}(s) = 126,44 + \frac{0,0193}{s}$ |

Quadro 2- Funções de transferências dos controladores calculados a priori.
Fonte – Autoria própria.

Após algumas experiências (testes) para a verificação do funcionamento do sistema, notou-se que os ganhos utilizados nos controladores $G_{c2}(s)$ e $G_{c3}(s)$ não atendiam de maneira satisfatória os requisitos do processo (referência e temperatura e tempo de assentamento). Com o intuito de atender as especificações do processo, percebeu-se a necessidade de aumentar os ganhos dos controladores $G_{c2}(s)$ e $G_{c3}(s)$. Deste modo, podem ser observados os parâmetros dos controladores utilizados no quadro 3.

| |
|---|
| $G_{c1}(s) = 498,82 + \frac{0,0383}{s}$ |
| $G_{c2}(s) = 460 + \frac{0,0326}{s}$ |
| $G_{c3}(s) = 470 + \frac{0,0370}{s}$ |

Quadro 3- Funções de transferências dos controladores utilizados no processo.
Fonte – Autoria própria.

No decorrer do processo de mosturação, a utilização dos controladores foi empregada de maneira dinâmica, ou seja, para uma determinada faixa de temperatura um determinado controlador foi utilizado, como exemplifica o fluxograma na Figura 34.

Para a implementação da ação de controle PI em um microcontrolador é necessário a discretização do controlador. O diagrama de blocos da Figura 35 exemplifica uma alternativa, transformando o controlador do domínio de Laplace para o plano Z através da técnica de discretização pela aproximação de diferença progressiva, para então aplicar o método das equações de diferença (OGATA, 1995).

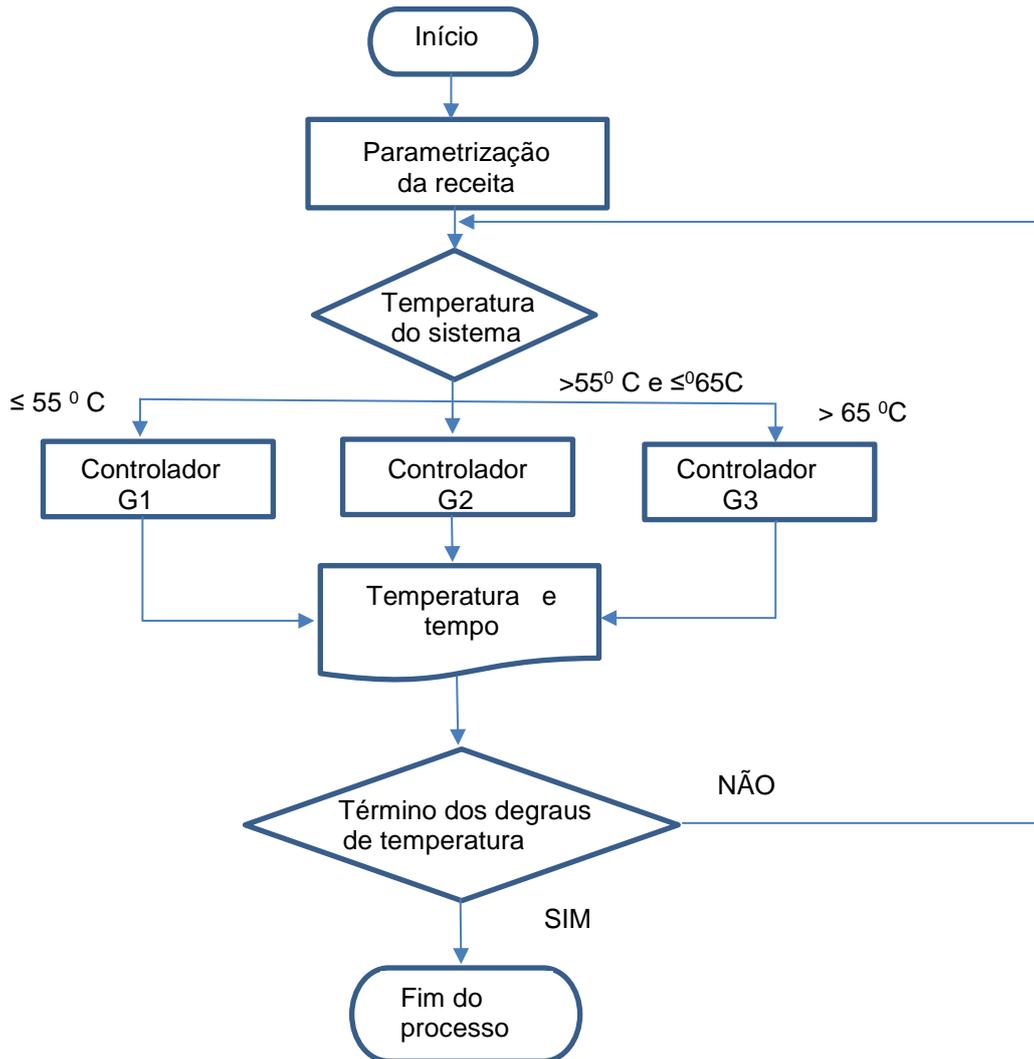


Figura 34 - Fluxograma, representado a ação de controle dinâmica implementada no microcontrolador.

Fonte – Autoria própria.



Figura 35 - Diagrama de blocos método de discretização.

Fonte – Autoria própria.

Dado o controlador da equação (6), desconsiderando a parte derivativa.

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

Pela aproximação da diferença progressiva.

$$s \approx \frac{1 - Z^{-1}}{T_a Z^{-1}} \quad (14)$$

O período de amostragem (T_a) utilizado é de quatro segundos. A função de transferência do PI discretizado é:

$$G_c(Z) = \frac{U(Z)}{E(Z)} = K_p + \frac{K_i T_a Z^{-1}}{1 - Z^{-1}} \quad (15)$$

Reescrevendo a função de transferência

$$U(Z) = \underbrace{K_p \cdot E(z)}_{U_p(Z)} + \underbrace{\frac{K_i T_a Z^{-1} \cdot E(z)}{1 - Z^{-1}}}_{U_i(Z)} \quad (16)$$

Para a representação no domínio do tempo da função complexa $U(Z)$, é necessário obter a transformada Z inversa. O método utilizado, como descrito em Ogata (1995 p.46) é o da equação de diferença. A discretização do controlador é descrita pelas equações (17), (18) e (19).

$$u_p[k] = K_p \cdot e[k] \quad (17)$$

$$u_i[k] = T_a \cdot K_i \cdot e[k - 1] + u_i[k - 1] \quad (18)$$

$$u_{pi}[k] = u_p[k] + u_i[k] \quad (19)$$

Outro ponto desenvolvido para o projeto do controlador foi a utilização do *anti-windup*, reduzindo o ganho da parcela integral do controlador no período em que a ação de controle esteja saturada (PINTO, 2014, p. 13). O diagrama de blocos da ação de controle e do *anti-windup* é retratado na Figura 36.

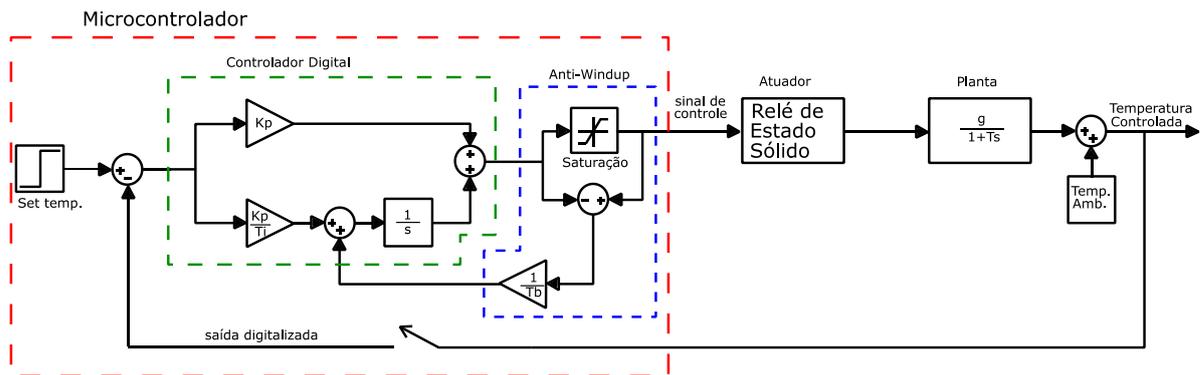


Figura 36 - Ação de controle e *Anti-Windup* implementadas em microcontrolador.
 Fonte – Autoria própria.

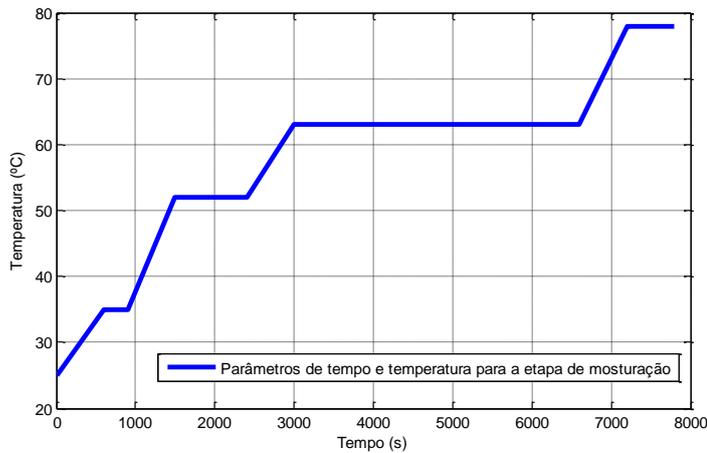
3.4 RESULTADOS OBTIDOS

Para possibilitar que o usuário do equipamento parametrize uma receita de cerveja e que possa visualizar os dados e o andamento do processo, foi instalado em um painel o *display* gráfico, as chaves *push button* e botões liga/desliga para o acionamento do motor de agitação e da bomba de água, como mostra a Figura 37.



Figura 37 – Equipamento para a fabricação de cerveja artesanal adaptado.
 Fonte - Autoria própria.

Os parâmetros de tempo e temperatura da etapas de mosturação e fervura, são referentes à utilizada para a fabricação da cerveja Coopers Pale ale, como apresentado na Figura 38.



| Temperatura | Tempo |
|-------------|--------|
| 35 °C | 5 min |
| 52 °C | 15 min |
| 63 °C | 60 min |
| 78 °C | 10 min |

Figura 38- Parâmetros de tempo e temperatura da etapa de mosturação, para a fabricação da cerveja Coopers Pale Ale.

Fonte – Autoria própria.

A Figura 38 demonstra o tempo e temperatura mais adequados para a extração dos açúcares. No período transitório, em que se eleva a temperatura para outro patamar, a ação de controle foi elaborada de maneira a seguir a referência de degrau de temperatura e não da referência em rampa. O tempo de cada degrau é contado a partir do regime permanente.

3.4.1 Etapa de mosturação

O primeiro teste realizado no equipamento, foi em relação à panela 1, na qual, a função é para a etapa de mosturação. Inicialmente utilizou-se somente água para a realização do teste. Através da Figura 39 é possível vislumbrar a resposta do comportamento do sistema, cuja ação de controle utilizada foi o (PI), diminuindo assim o tempo de assentamento e zerando o erro em regime permanente, atendendo de maneira satisfatória os parâmetros impostos pela receita.

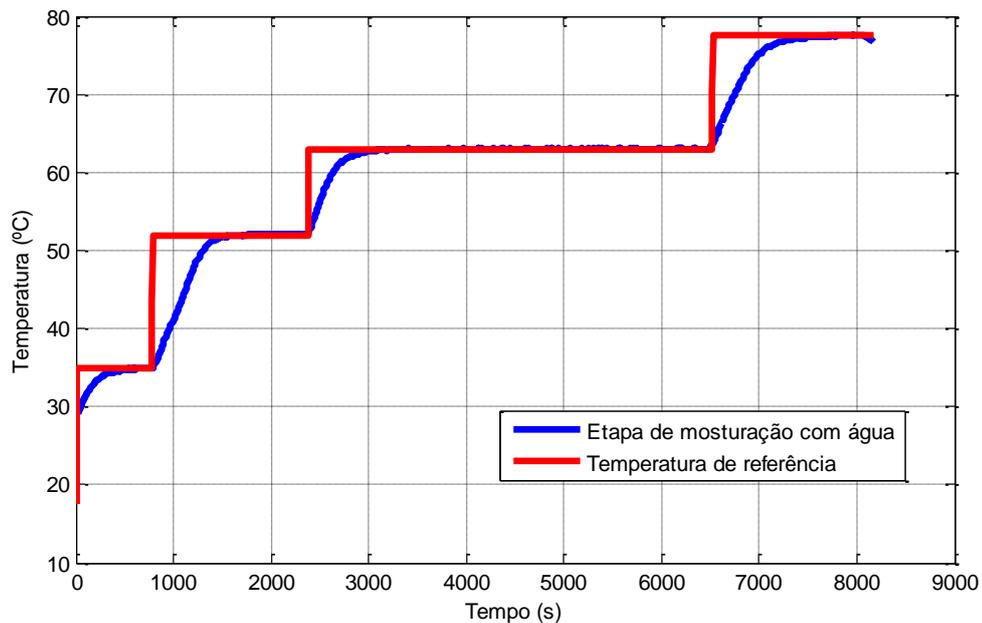


Figura 39 - Resposta do sistema referente a etapa de mosturação somente com água.
Fonte – Autoria própria.

Para o segundo teste, de acordo com a receita, o malte moído é adicionado à água na temperatura de 35 °C (1º degrau), de maneira analógica ao primeiro teste, o controlador PI diminuiu o tempo de assentamento e eliminou o erro em regime. Nesse teste constatou-se a ocorrência de dois overshoots de 1,7 % e 2,54 % referentes aos degraus de 52 °C (2º degrau) e 63° C (3º dedrau) respectivamente, como apresentado na Figura 41. Exceto pelos sobresinais de temperatura, o sistema de controle atendeu de maneira satisfatória os parâmetros da receita, após a adição de malte moído na água.



Figura 40 - Adição de malte moído a água na etapa de mosturação.
Fonte – Autoria própria.

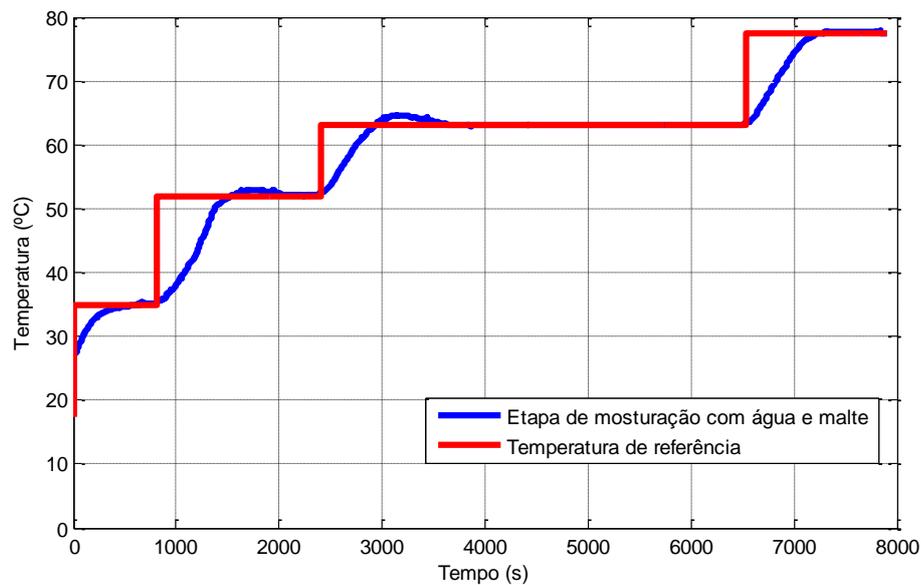


Figura 41 – Resposta do sistema referente a etapa de mosturação com água e malte.
Fonte – Autoria própria.

Em paralelo com a etapa de mosturação, em outra panela, um volume de 13 l de água foi aquecido até 78^{17} °C para efetuar a lavagem¹⁸ do bagaço do malte ao finalizar a etapa de mosturação. O controlador utilizado foi (PI), bem como os parâmetros do controlador já determinados na subseção 3.3 referentes à panela de mosturação. Essa segunda panela se desliga ao término do processo de mosturação e seu comportamento da temperatura é exibido na Figura 42.

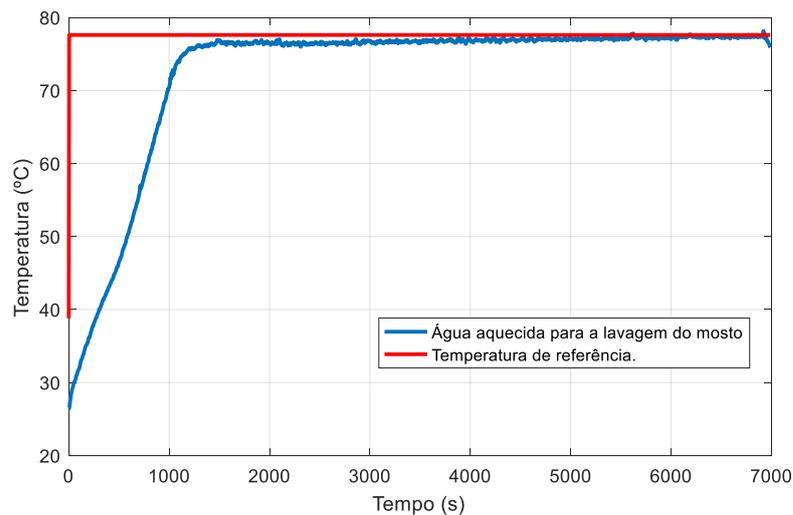


Figura 42 - Comportamento da temperatura da água para a lavagem do mosto.
Fonte – Autoria própria.

¹⁷ O Valor da temperatura de lavagem é indicado pela receita da cerveja.

¹⁸ Maneira de otimizar a extração dos açúcares ainda presente no bagaço do malte.

Cabe destacar que nessa “sub etapa” não foi levantado a função de transferência referente a segunda panela, pelo motivo do volume de água utilizado ser muito semelhante ao volume de água da etapa de mosturação (13 l), em consequência, não foi determinado um controlador em específico para ela. Os parâmetros dos controladores utilizados foram oriundos dos parâmetros dos controladores da etapa de mosturação. Após realizados testes, constatou-se que atendeu de forma adequada o pretendido, chegando na temperatura especificada na receita para a lavagem do mosto.

3.4.1 Etapa de fervura

Após realizada a lavagem do bagaço, o mosto é condicionado na panela 2. A ação de controle utilizada para a realização da etapa de fervura é a ON/OFF, a parametrização da ação de controle foi realizada de maneira a acionar a resistência elétrica até a temperatura de 98,5 °C e manter desligado até a temperatura de 97 °C pelo período de uma hora.

É nessa etapa que através do *display* gráfico o usuário é informado da adição do lúpulo ou algum outro ingrediente.

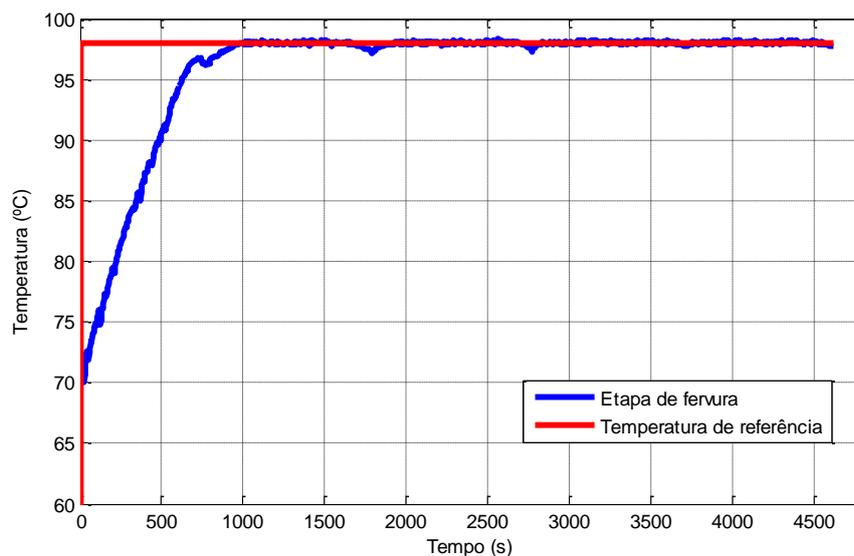


Figura 43 - Comportamento da temperatura da água na etapa de fervura.
Fonte – Autoria própria.

CONCLUSÕES

A partir deste trabalho, em que o objetivo geral consistia em desenvolver um sistema de automação para o processo de mosturação e fervura de cerveja artesanal que permitisse controlar a temperatura e o tempo de forma adequada e prontamente adaptável em equipamentos de pequeno porte com capacidade de produção média estimada entre 20 a 200 l, percebeu-se que o controle do processo, nas duas etapas propostas, foi atingido de maneira satisfatória.

Como objetivos específicos, foram definidos os seguintes pontos: realizar revisão bibliográfica e estudos acerca do processo de fabricação de cerveja, automação de processos, métodos de controle digital e demais assuntos correlacionados, levantamento dos requisitos para a funcionalidade do sistema, projetar circuitos de acionamento e de controle, definir os materiais e equipamentos necessários para a construção do protótipo, levantamento de preços dos materiais e equipamentos, implementar circuitos de acionamento, sensoriamento e fechar malha, desenvolvimento de uma interface com o usuário, implementar sistema piloto, aquisição e análise dos resultados e correções necessárias. Esses, por sua vez, também foram alcançados a partir das teorias e procedimentos práticos adotados.

Nesse sentido, esse trabalho constatou que através da aquisição de dados (temperatura), foi possível a representação do sistema no domínio da frequência. Na sequência verificou-se que para a faixa de operação do equipamento (de 20°C a aproximadamente 100°C) o sistema não se apresentou linear. Na tentativa de atender as especificações de funcionamento, foi determinado três controladores (PI) para controlar a temperatura na etapa de mosturação, em seguida, os controladores foram discretizados e implementados no microcontrolador MSP-EXP432P401R. Na etapa de fervura o controle utilizado foi o ON/OFF, devido a simplicidade dessa etapa, que era de manter o mosto fervendo. Para sinalizar o usuário, o andamento dos processos e informações pertinentes foi utilizado um display gráfico.

As principais contribuições visualizadas durante o estudo foi a elaboração de um sistema de automação dedicado para a finalidade de produção de cerveja artesanal. O estudo abrangeu várias áreas do conhecimento do curso de engenharia elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, sendo elas, sistema de

controle, eletrônica e acionamentos elétricos, necessitando uma ampla revisão bibliográfica, a utilização de laboratórios da universidade e oficinas de empresas para a execução da implementação.

De maneira geral, esse estudo atendeu ao problema de pesquisa, contudo, no decorrer de seu desenvolvimento, perceberam-se a existência de limitações e dificuldades como: na construção da placa de instrumentação, queimas de microcontroladores, utilização de um período de tempo considerável para coleta de dados referentes aos sistema. Pontos estes que foram possíveis de serem revertidos.

Por fim, são propostos alguns aspectos que podem ser estudados em futuros trabalhos como forma de aprofundamento e melhorias do processo:

- Um estudo mais detalhado da parte mecânica, de maneira a melhor dispor sensores, resistência elétrica, conjunto motor e pá de agitação;
- Utilização de outros sensores, como o digital, simplificando a aquisição dos dados;
- Utilização de outros microcontroladores, ou até mesmo desenvolver o monitoramento do processo e a implementação da ação de controle em um conjunto IHM/CLP.

REFERÊNCIAS

SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas – Cervejas Artesanais. Disponível em: <https://www.sebraeinteligenciasetorial.com.br/produtos/relatorios-de-inteligencia/cervejas-artesanais/55c4ad3614d0c01d007ffeae#download>. Acesso em: Novembro de 2016.

PALMER John. **How to Brew**. 3 Ed. Boulder, CO: Brewers Publications, 2006.

FERNANDES, Anita M. R.; FRANZEN, Tiago A. Automação e controle em uma micro cervejaria artesanal. In: VIII SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 8, Resende, 2011. **Anais**. Resende: Associação Educacional Dom Bosco. 2011. p. 1-14.

NISHINARI, Akiyoshi; SIGHIERI, Luciano. **Controle automático de processos industriais: instrumentação**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2003.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 5ª ed. São Paulo: Pearson Education, v. I, 2010.

OGATA, Katsuhiko. **Discrete-Time Control Systems**. 2ª ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1995.

NISE, Norman S. **Engenharia de sistemas de controle**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, c2009.

GARCIA, Claudio. **Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos**. 2ª. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005.

COELHO, Antônio A. R.; COELHO, Leandro S. **Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2004.

AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de Potência**. São Paulo: Prentice Hall, 2000.

MORADO, Ronaldo. **Larousse da Cerveja**. São Paulo: Larousse do Brasil, 2009.

HUGHES, Greg. **Cerveja Feita em Casa: Tudo sobre os ingredientes, os equipamentos e as técnicas para produzir a cerveja em vários estilos**. São Paulo: Publifolha, 2014.

ASTRÖM, Karl J.; HÄGGLUND, Tore. **Control PID Avanzado**. Madrid: Pearson Educación S.A, 2009.

SILVEIRA, Paulo R.; SANTOS, Winderson E. **Automação e Controle Discreto**. São Paulo: Érica Ltda, v. único, 1998.

DORF, Richard C.; BISHOP, Robert.H. **Sistemas de Controle Moderno**. 11^a. Ed. Rio de Janeiro: LTC, v. único, 2009.

Ibrahim, D., **Microcontroller Based Temperature Monitoring and Control**. 1^a Ed. Newnes, 2002

BEASLEY, Donald E.; FIGLIOLA, Richard S. **Teoria e Projetos para Medições Mecânicas**. 4^a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

TEXAS INSTRUMENTS. Human Machine *Interface* (HMI) Guide: Industrial Automation Solutions. 2014. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/sl/slyy049a/slyy049a.pdf>>. Acesso em: 22 de dez 2016>.

CALEGARI, Rafael. **Projeto de uma Microcervejaria: Concepção, Dimensionamento e construção**. 2013. 15 f. Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Departamento de Engenharia Mecânica Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

HALLIDAY, RESNICK, WALKER. Fundamentos de Física. Vol. 2, 8. ed., LTC. 2009.

INCROPERA, Frank P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2008.

ÇENGEL, Yunus A; Ghajar, Afshin J. **Transferência de Calor e Massa: Uma abordagem Prática**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH editora LTDA, 2012.

PINTO, Jan E. M. G., Aplicação Prática do Método de Sintonia de Controladores PID Utilizando o Método de Relé com Histerese. 2014. 116 f. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2014.

APÊNDICE A

A estimativa de custo em materiais é apresentada na Tabela 1.

| Quant. | Unid. | Descrição | Valor unitário | Valor Total |
|---------------------------|-------|---|----------------|--------------------|
| 2 | pç | Resistência 3000 W | R\$160,00 | R\$320,00 |
| 2 | pç | Caldeirão em alumínio | R\$100,00 | R\$200,00 |
| 2 | pç | Relé de estado sólido | R\$50,00 | R\$100,00 |
| 1 | pç | Display gráfico | R\$69,90 | R\$69,90 |
| 3 | pç | Microcontrolador | R\$100,00 | R\$300,00 |
| 1 | pç | Caixa para montagem plástica | R\$182,10 | R\$182,10 |
| 2 | pç | Registro duas posições | R\$48,00 | R\$96,00 |
| 2 | pç | Espigão | R\$18,00 | R\$36,00 |
| 1 | pç | Motor de agitação | R\$415,00 | R\$415,00 |
| 1 | pç | Bomba Circulação para cerveja artesanal | R\$105,00 | R\$105,00 |
| 2 | pç | Contator | R\$78,90 | R\$157,80 |
| 2 | pç | Relé térmico | R\$40,00 | R\$80,00 |
| 2 | pç | Sensores PT100 | R\$9,90 | R\$19,80 |
| 3 | mts | Mangueira atóxica | R\$24,90 | R\$74,70 |
| | | Componentes eletrônicos | | R\$120,00 |
| | | Materias para adaptação da painelas | | R\$350,00 |
| CUSTO DO PROTÓTIPO | | | | R\$2.626,30 |

Tabela 1. Estimativa de custo do protótipo.

Fonte – Autória própria.

APÊNDICE B

DIMENSIONAMENTO DAS RESISTÊNCIAS

Massa específica da água----- $\rho_{\text{água}} = 1000 \text{ kg/m}^3$

Massa específica do Alumínio----- $\rho_{\text{Al}} = 2700 \text{ kg/m}^3$

Calor específico da água ----- $c_{\text{água}} = 1000 \frac{\text{J}}{\text{kg.K}}$

Calor específico do alumínio----- $c_{\text{Al}} = 2700 \frac{\text{J}}{\text{kg.K}}$

Constante de Stefan-Boltzmann----- $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2.\text{K}^4}$

Emissividade do alumínio ----- $\varepsilon_{\text{Al}} = 0,2$

Coeficiente de transferência de calor por convecção (valor tabelado)----- $h = 25 \frac{\text{W}}{\text{m}^2.\text{K}}$

Constante de condutividade térmica do alumínio----- $k = 237 \frac{\text{W}}{\text{m.K}}$

Gradiente de temperatura----- $\frac{dT}{dx} \approx 0$

Taxa de variação de temperatura----- $\text{taxa} = \frac{1 \text{ }^\circ\text{C}}{60 \text{ s}}$

PANELA DE MOSTURA

$$T_{\text{amb}} = (15 + 273)\text{K} \quad V_{\text{água}} = 0,028 \text{ m}^3 \quad r = 0,1725 \text{ m} \quad \text{hpa} = 0,3 \text{ m} \quad \text{es} = 0,001 \text{ m}$$

$$T_f = (67 + 273)\text{K} \quad V_{\text{Al}} = 2 \cdot \text{es} \cdot \pi \cdot r^2 + 2 \cdot r \cdot \text{es} \cdot \pi \cdot \text{hpa} = 5,121 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$E_{\text{ac}} = \rho_{\text{água}} \cdot V_{\text{água}} \cdot \text{taxa} + \rho_{\text{Al}} \cdot V_{\text{Al}} \cdot \text{taxa} = 1,971 \text{ kW}$$

Considerando a área da panela igual a de um cilindro

$$AT = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \text{hpa} + 2 \cdot \pi \cdot r^2 = 0,512 \text{ m}^2$$

Transferência de calor por radiação, convecção e condução

$$Q_{\text{rad}} = \sigma \cdot \epsilon_{\text{Al}} \cdot AT \cdot (T_f^4 - T_{\text{amb}}^4) = 37,656 \text{ W}$$

$$Q_{\text{conv}} = h \cdot AT \cdot (T_f - T_{\text{amb}}) = 665,755 \text{ W}$$

$$Q_{\text{cond}} = 0$$

$$E_g = E_{\text{ac}} + Q_{\text{rad}} + Q_{\text{conv}} + Q_{\text{cond}} = 2,675 \text{ kW}$$

PANELA DE FERVURA

$$T_{\text{amb1}} = (15 + 273)^\circ\text{K} \quad T_{f1} = (100 + 273)^\circ\text{K}$$

$$T_f = (67 + 273)^\circ\text{K} \quad V_{\text{Al}} = 2 \cdot \text{es} \cdot \pi \cdot r^2 + 2 \cdot \text{r} \cdot \text{es} \cdot \pi \cdot \text{hpa} = 5,121 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$E_{\text{ac1}} = E_{\text{ac}}$$

Transferência de calor por radiação, convecção e condução

$$Q_{\text{rad1}} = \sigma \cdot \epsilon_{\text{Al}} \cdot AT \cdot (T_{f1}^4 - T_{\text{amb1}}^4) = 26,26 \text{ W}$$

$$Q_{\text{conv1}} = h \cdot AT \cdot (T_f - T_{\text{amb}}) = 307,27 \text{ W}$$

$$Q_{\text{cond1}} = 0$$

$$E_g = E_{\text{ac}} + Q_{\text{rad}} + Q_{\text{conv}} + Q_{\text{cond}} = 2,305 \text{ kW}$$

A potência elétrica das resistências utilizadas no protótipo é de 3 kW (Valor comercial mais próximo do dimensionado).

APÊNDICE C

Imagens adicionais do protótipo.



Figura 44 – Dispositivos de potência e painel com display gráfico e botões para parametrização.
Fonte – Autoria própria.

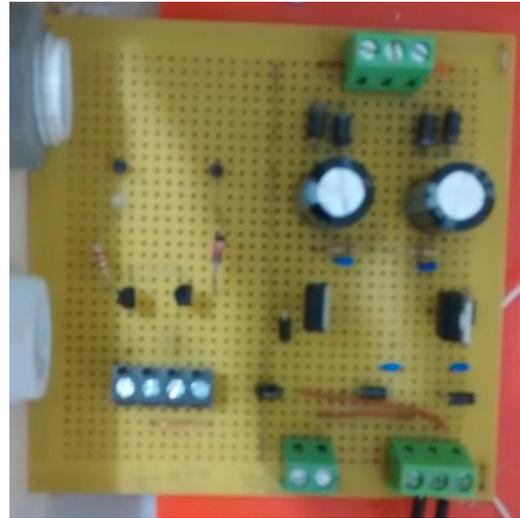


Figura 46– Fonte simétrica e circuito drive.
Fonte – Autoria própria.



Figura 45 – Placa de instrumentação.
Fonte – Autoria própria.