

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS CURITIBA
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

CAIO CESAR PELLEGRIM
LETÍCIA BRIZOLLA PROENÇA
VICTOR EVANGELISTA DE JESUS

**PANELA COM CONTROLE DE TEMPERATURA PARA ETAPA DE
BRASSAGEM DA FABRICAÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2017

CAIO CESAR PELLEGRIM
LETÍCIA BRIZOLLA PROENÇA
VICTOR EVANGELISTA DE JESUS

**PANELA COM CONTROLE DE TEMPERATURA PARA ETAPA DE
BRASSAGEM DA 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 de
Controle e Automação do Departamento
Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Luiz Moritz

CURITIBA

2017

Caio Cesar Pellegrim
Letícia Brizolla Proença
Victor Evangelista de Jesus

Panela com Controle de Temperatura para Etapa de Brassagem da Fabricação de Cerveja Artesanal

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro de Controle e Automação, do curso de Engenharia de Controle e Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 27 de março de 2017.

Prof. Paulo Sergio Walenia, Esp.
Coordenador de Curso
Engenharia de Controle e Automação

Prof. Marcelo de Oliveira Rosa, Dr.
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia de Controle e Automação do DAELT

ORIENTAÇÃO

Guilherme Luiz Moritz, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Guilherme Luiz Moritz, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ohara Keraususkas Rayel, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Glauber Brante, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

RESUMO

PELLEGRIM, Caio Cesar.; PROENÇA, Letícia B.; JESUS; Victor E. de. **Panela com Controle de Temperatura para Etapa de Brassagem da Fabricação de Cerveja Artesanal**. 2017. 75p. TCC (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

A fabricação de cerveja artesanal tem entrado no gosto das pessoas e se tornado um hobby cada dia mais comum. Uma das etapas deste processo, chamada brassagem, requer que o mosto (mistura de água e malte) siga uma configuração específica de tempo e temperatura a fim de garantir determinadas características do produto final. O processo convencional utilizando um fogareiro, apresenta algumas desvantagens, como a necessidade da supervisão contínua do cervejeiro durante toda preparação da receita, controlando a temperatura através do fluxo da chama. O objetivo deste trabalho é apresentar uma alternativa simplificada para fabricação artesanal de cerveja. O protótipo de uma panela elétrica com controle de temperatura foi montado para que, através de interface gráfica, o operador entre com dados do processo, que será desempenhado sem necessidade de acompanhamento contínuo. O controle de temperatura é feito através de programação em um microcontrolador que, recebendo a leitura de um sensor PT100, controla a potência entregue a uma carga resistiva que esquenta o mosto. A indicação de projeto mecânico, estudo e montagem de hardware, implementação e integração de software e coleta de dados de processo são tópicos integrantes deste trabalho.

Palavra chaves: Cerveja. Brassagem. Controle de Temperatura.

ABSTRACT

PELLEGRIM, Caio Cesar.; PROENÇA, Letícia B.; JESUS; Victor E de. **Pan with Temperature Control for Homemade Brewing**. 2017. 75p. TCC (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Making beer at home has been growing on the market and becoming a hobby each day more common. One of the steps of the process to make it, called brew, requires that the beer wort (a mix of water and malt) follows a specific configuration of time and temperature in order to fulfill the final product specifications. The conventional process using a stove, however, presents some disadvantages, such as the need of a continuous supervision of the brewer during the whole recipe preparation, controlling the temperatures through the flames. The purpose of this work is to present a simple alternative to brew at home. The prototype of an electrical pan with temperature control was built so that through a graphical interface, the user sets up the process data, that will be performed without the need of continuous supervising. The control of the temperature is programmed in a microcontroller that uses a temperature sensor PT100 and controls the power provided to a resistive charge that heats the wort. The idea of a mechanical project, study and assembly of hardware, implementation and integration of software and data gathering are topics presented in this documentation.

Keywords: Beer. Brew. Temperature Control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas de Fabricação	12
Figura 2 - Esquema simplificado da panela.....	18
Figura 3 - Bomba Utilizada	22
Figura 4 - Resistência Elétrica Circular 5KW JCS 168B	24
Figura 5 - Esquema simplificado das conexões das panelas	24
Figura 6 - Niple Duplo $\frac{1}{2}$ e $\frac{3}{4}$	25
Figura 7 - Luva $\frac{1}{2}$	25
Figura 8 - Niple Duplo $\frac{1}{2}$	25
Figura 9 - Espigão $\frac{1}{2}$	25
Figura 10 - T de $\frac{1}{2}$	25
Figura 11 - Registro $\frac{1}{2}$	25
Figura 12 - Esquema de circuito detector de cruzamento por zero	27
Figura 13 - Circuito de controle gradador do TRIAC	28
Figura 14 - Representação e topologia do BTA41-600B.....	29
Figura 15 - Circuito de condicionamento de sinal do RTD	30
Figura 16 - Circuito de acionamento da bomba.....	31
Figura 17 - Diagrama de Blocos.....	34
Figura 18 - Legenda para Representação das Etapas.....	35
Figura 19 - Panela em funcionamento - Etapa 1	36
Figura 20 - Panela em funcionamento - Etapa 2.....	36
Figura 21 - Panela em funcionamento - Etapa 3.....	37
Figura 22 - Panela em funcionamento - Etapa 4.....	37
Figura 23 - Panela em funcionamento - Etapa 5.....	38
Figura 24 - Panela em funcionamento - Etapa 6.....	39
Figura 25 - Panela em funcionamento - Etapa 7	39
Figura 26 - Panela em funcionamento - Etapa 8.....	34
Figura 27 - Panela em funcionamento - Etapa 9.....	40
Figura 28 - Circuito detector de cruzamento por zero	42
Figura 29 - Funcionamento do circuito cruzamento por zero	43
Figura 30 - Circuito Gradador.....	44
Figura 31 - Pulsos de controle usados como entrada do circuito gradador.....	44
Figura 32 - Sinais de entrada/saída do circuito gradador	45
Figura 33 - Onda de tensão retificada pelo circuito gradador.....	44
Figura 34 - Circuito de condicionamento de sinal para PT100	46
Figura 35 - Variação da tensão pela temperatura para validação do circuito PT100.....	46
Figura 36 - Circuito de acionamento da bomba.....	47
Figura 37 - Fluxograma Firmware	48
Figura 38 - Fluxograma do PID	50
Figura 39 - Fluxograma de Controle do TRIAC	51
Figura 40 - Fluxograma da aquisição da temperatura.....	52
Figura 41 - Fluxograma do CLI_TASK	53
Figura 42 - Interface Gráfica do Usuário	55
Figura 43 - Interface Gráfica do Usuário em Segmentos	56
Figura 44 - Interface Gráfica – Porta Serial.....	56
Figura 45 - Interface Gráfica – Monitoramento.....	57

Figura 46 - Interface Gráfica – Bomba	57
Figura 47 - Interface Gráfica – Start/Stop.....	57
Figura 48 - Interface Gráfica – Informação.....	58
Figura 49 - Interface Gráfica – Pré-aquecimento	59
Figura 50 - Interface Gráfica – Informação.....	59
Figura 51 - Interface Gráfica – Brassagem	60
Figura 52 - Interface Gráfica – Informações.....	60
Figura 53 - Interface Gráfica – Fervura	61
Figura 54 - Interface Gráfica – Informações.....	61
Figura 55 - Hardware conectado e operante.....	62
Figura 56 - Protótipo Mecânico para Sintonização do PID.....	62
Figura 57 - Gráfico para a Primeira Coleta.....	65
Figura 58 - Gráfico para a Segunda Coleta.....	65
Figura 59 - Gráfico para a Terceira Coleta.....	66
Figura 60 - Protótipo Mecânico – Teste Final.....	67
Figura 61 - Gráfico para a Coleta Final	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Temperatura e função dos grupos enzimáticos	14
Tabela 2 - Lista de Materiais e Preços.....	32

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. TEMA	11
1.1.1. Delimitação do Tema	13
1.2. PROBLEMAS E PREMISSAS.....	15
1.3. OBJETIVOS	16
1.3.1. Objetivo Geral	17
1.3.2. Objetivos Específicos	17
1.4. JUSTIFICATIVA	18
1.5. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	19
1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	20
2. DESENVOLVIMENTO.....	21
2.1. MECÂNICA	22
2.1.1. Bomba.....	22
2.1.2. Resistência.....	23
2.1.3. Conexões	24
2.2. HARDWARE	25
2.2.1. Circuitos Utilizados	25
2.2.2. Acionamento de Potência	26
2.2.3. PT100 a Circuito de Condicionamento de Sinal.....	29
2.2.4. Liga/ Desliga Bomba	31
2.3. LISTA DE MATERIAIS	32
2.4. DIAGRAMA DE BLOCOS	33
2.5. SOFTWARE	34
2.5.1. Controlador PID.....	34
2.6. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CERVEJA UTILIZANDO A PANELA ELÉTRICA	35
3. IMPLEMENTAÇÃO	42
3.1. MONTAGEM DOS CIRCUITOS E VALIDAÇÃO DE FUNCIONAMENTO	42
3.1.1. Detector de Cruzamento por Zero	42
3.1.2. Controle Gradador e Triac	43
3.1.3. Condicionamento de Sinal do Pt100	46
3.1.4. Liga / Desliga Bomba	47
3.2. FIRMWARE	48
3.2.1. PIDCONTROLLER.....	49

3.2.2.	TRIACPOWERCONTROL	50
3.2.3.	ADC.....	51
3.2.4.	CLI_TASK	52
3.2.5.	PROCESS_CONTROL	53
3.3.	INTERFACE GRÁFICA DO USUÁRIO	54
3.3.1.	Interface GUI.....	54
3.3.1.1.	Programa em C#	55
3.4.	INTEGRAÇÃO E RESULTADOS	62
4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	69
4.1.1.	REFERÊNCIAS.....	72
4.1.2.	APÊNDICE A	75

1. INTRODUÇÃO

1.1. TEMA

A produção de cerveja vem despertando grande interesse, aparecendo como um *hobby* ou mesmo uma opção comercial. Não se sabe ao certo o ano exato de descoberta da cerveja, mas o processo de fermentação já existe há 10.000 anos. Acredita-se que a forma mais “primitiva” dessa bebida, também conhecido como “Pão Líquido”, surgiu acidentalmente na Suméria. Para os gregos e romanos, a cerveja era para aqueles que pertenciam à classe menos favorecida. Foi na idade média que a cerveja ganhou o gosto característico que tem hoje, os Gauleses passaram a adicionar malte em sua fabricação. Antes mesmo da chegada dos europeus na América do Sul, os Incas já apreciavam uma bebida similar. Foi a Lei Alemã de Pureza que determinou quais seriam os exatos ingredientes aceitos em sua fabricação e são eles até hoje: água, malte, lúpulo e levedura.

No Brasil a cerveja chegou apenas em 1808. Em 1836 foi quando surgiu a primeira notícia de fabricação dessa bebida no país. Anos depois nasce a primeira fábrica em São Paulo, Antarctica Paulistana, e em seguida, a concorrente Brahma. Foi no carnaval de 1934 que a grande novidade, cerveja Brahma em garrafa, foi lançada e foi em Curitiba que lançaram o primeiro Curso de Cervejeiro Prático da América Latina (COUTINHO, s.d.).

Com a popularização da bebida, muitos começaram a fabricar por conta própria. A produção da cerveja tornou-se um hobby. E com o passar do tempo, mais cervejarias artesanais estão surgindo e mais famílias se dedicando à fabricação da bebida.

O foco deste TCC é facilitar a produção e melhorar a qualidade da cerveja artesanal. Para se entender melhor as ideias apresentadas nesse trabalho, é necessário compreender as etapas para se chegar ao produto final da bebida. As etapas estão descritas e mostradas na Figura 1 a seguir.



Figura 1 – Etapas Fabricação
Fonte: Autoria própria.

Etapa 1 - Seleção e Moagem do Malte: O malte deve ser moído até quebrar a sua casca.

Etapa 2 - Mosturação (brassagem): Etapa em que o malte moído é misturado com água aquecida. Nesse momento as enzimas presentes no malte são ativadas, convertendo amido em açúcares fermentáveis e proteínas em nutrientes. Esta etapa será explicada mais detalhadamente em seção posterior.

Etapa 3 - Recirculação/Lavagem: Processo lento e importante para diminuir as impurezas na cerveja, o mosto deve ser filtrado e recirculado. Feito isso, inicia-se o processo de lavagem do malte (SILVA, 2015).

Etapa 4 - Fervura: É onde ocorre a caramelização dos açúcares e esterilização do mosto. Os lúpulos são adicionados nessa etapa. Quanto mais tempo fervendo, mais clara a cerveja.

Etapa 5 - Resfriamento: O resfriamento tem que ser feito da forma mais rápida possível para evitar a contaminação do líquido. A levedura é adicionada nessa etapa e as temperaturas variam entre 8°C a 15°C (para cervejas do tipo *Lager*) ou de 15°C a 23°C (para cervejas do tipo *Ale*).

Etapa 6 - Fermentação: A cerveja fica em um repouso de até 15 dias. O controle da temperatura nessa fase é importante.

Etapa 7 - Maturação: Ocorre o armazenamento da cerveja em baixas temperaturas. O tempo de armazenamento depende do tipo de cerveja que se deseja obter, por exemplo, cerveja do tipo *Pilsener* permanece maturando por 15 dias. É nesse período que ocorre a segunda fermentação, importante para definir as características da cerveja, tais como sabor e aroma.

Variáveis como a temperatura, tempo de fervura, fermentação e maturação definem o produto final, o tipo de cerveja obtida. Por isso é de grande importância ter um controle rigoroso de cada etapa para que no final se obtenha o resultado esperado.

1.1.1. Delimitação do Tema

A etapa de Mosturação pode também ser chamada de Brassagem. Esta é uma das mais importantes, pois é nela que se determina o tipo e a qualidade da cerveja.

Durante a mostura, uma quantidade limitada de outras modificações pode acontecer, mas o principal evento é a conversão das moléculas de amido em açúcares fermentáveis e a conversão das dextrinas não fermentáveis pelas enzimas diastáticas. Cada um desses grupos de enzimas é favorecido por diferentes temperaturas e níveis de pH. O Cervejeiro pode ajustar a temperatura da mostura para favorecer sucessivamente a função de cada enzima e deste modo adequar o

mosto a seu gosto e propósito (How To Brew, JOHN J. PALMER, pg. 174).

A Tabela 1 mostra os principais grupos enzimáticos e suas respectivas funções.

Enzima	Faixa Ideal de Temperatura	Faixa de PH	Função da Enzima
Phytase	30-52°C	5,0-5,5	Diminuição do pH da mostura
Debranching (var.)	35-45°C	5,0-5,8	Solubilização de Amidos
Beta Glucanase	35-45°C	4,5-5,5	Gelatinização, auxiliando na liberação de açúcares disponíveis
Peptidase	45-55°C	4,6-5,3	Produz maior quantidade de proteínas solúveis no mosto
Protease	45-55°C	4,6-5,3	Quebra proteínas que geram turvação da cerveja.

Tabela 1- Temperatura e função dos grupos enzimáticos

Fonte: How to Brew, John J Palmer.

Há dois modos de fazer a mosturação, por infusão simples ou por maceração escalonada. Por infusão a temperatura é mantida a mesma durante todo o processo. Por maceração escalonada, curvas e patamares de temperaturas são seguidos para favorecer diferentes grupos de enzimas.

A variação de temperatura pode ser feita de três maneiras: adicionando água quente diretamente na panela (infusão), esquentando diretamente o recipiente em que está o mosto ou aquecendo uma parte do mosto e adicionando ao mosto principal (decoção) (HOMINILÚPULO, 2011).

Para os cervejeiros, esse controle de temperatura é complicado e trabalhoso, exige tempo e paciência. O mosto deve estar em constante movimento e a temperatura não deve passar de 80°C, o que causaria a inativação das enzimas. A rampa desejada deve ser seguida à risca, caso contrário, o resultado não vai ser o desejado.

1.2. PROBLEMAS E PREMISSAS

É na etapa de mosturação que o malte é hidratado e as enzimas são ativadas. Cada enzima é ativada por uma rampa de temperatura específica, o que faz com que existam determinadas curvas de rampas e patamares para diferentes receitas de cerveja. Nesta técnica de brassagem, com múltiplas rampas de temperatura para tempos determinados, esquentam-se o mosto em diferentes faixas.

Deste modo, através da atuação enzimática, é possível personalizar a cerveja que se deseja fabricar, uma vez que é justamente com essa curva que se determinam características de grande importância para o produto final, como o teor alcoólico, a claridade do líquido, a estabilidade da espuma formada e a densidade da cerveja.

Como exemplo, pode-se ter a situação de duas rampas de temperatura, sendo a primeira no intervalo 60-64°C e a segunda 70-75°C. Se o aquecimento do mosto privilegiar a primeira rampa, ficando mais tempo nela, o resultado será uma cerveja com maior teor alcoólico, mais fermentável e seca. Se a rampa privilegiada for a segunda, a cerveja será menos fermentável e alcoólica, em contrapartida será mais encorpada e densa. Por conta disso, se faz necessário ter um bom controle de temperatura e tempo, visto que uma rampa de temperatura errada, não controlada e ajustada para os requisitos que se deseja, pode comprometer todo o processo, influenciando, assim, na qualidade da cerveja artesanal fabricada.

Uma das maiores dificuldades no processo convencional é fazer esse controle de temperatura e tempo das faixas de atuação enzimática. Quando esquentado numa panela em um fogareiro, a temperatura do mosto deve ser monitorada constantemente por termômetro, fazendo com que o mestre cervejeiro esteja totalmente preso ao processo, junto à necessidade de estar continuamente mexendo o mosto na panela para que não queime, processo esse que não está imune a contaminações externas. Esse tipo de controle rústico faz também com que seja difícil repetir com excelência uma mesma receita de cerveja, uma vez que o processo manual de medição é impreciso. Em grandes cervejarias o problema do controle de temperatura não é recorrente, devido ao

fato de que, geralmente, não produzem muitas receitas de cerveja, sendo mais fácil, assim, ter o controle do processo.

Em relação ao ambiente de produção da cerveja, um problema notado é o grande espaço necessário. No método produtivo convencional, o uso de um fogareiro ou fogão, junto a utilização de uma panela para diferentes etapas (brassagem, filtração e fervura), faz com que seja necessário um espaço relativamente grande para que a cerveja seja produzida. O ambiente é também bastante ruidoso, principalmente na etapa da fervura. A brassagem feita no fogareiro ainda apresenta outros problemas, como a baixa eficiência térmica do processo, uma vez que apenas a menor parte do calor gerado pela chama é realmente consumida para esquentar a panela, além da possibilidade de algum imprevisto, como o gás acabar no meio do processo.

Construindo uma panela elétrica, onde o mosto será esquentado por uma resistência, e o controle de temperatura feito por um controlador que recebe o *feedback* de um sensor colocado dentro do recipiente, o processo se tornará muito mais simples, eficiente, silencioso e independente, por não precisar do controle contínuo e manual feito com termômetro. Estará, também, livre de qualquer contaminação, uma vez que a recirculação do mosto será feita por uma bomba para fluidos em alta temperatura, não sendo necessário o operador estar sempre mexendo a panela. No mesmo recipiente poderá ser feita a brassagem, a filtração (por uma segunda panela menor colocada dentro da maior) e, posteriormente, a fervura, fazendo com que a integração das etapas influencie diretamente no tempo de produção, otimizando-o.

1.3. OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho é ter no final uma panela capaz de ajudar o cervejeiro na fabricação de sua cerveja artesanal. Essa ajuda irá englobar o controle de temperatura do processo de mosturação através de um microcontrolador, um sensor de temperatura, implementação de um sistema de potência para aquecer o mosto, criação de um compartimento interno para a filtragem do mosto, utilização de uma bomba para líquidos em alta temperatura para constante circulação do mosto, engates mecânicos rápidos para facilitar as

trocas das etapas da confecção da cerveja, e também uma configuração de curvas de temperatura e tempo via remoto através da elaboração de uma interface de controle.

1.3.1. Objetivo Geral

Construir uma panela para o controle de temperatura do processo de mosturação de tipos diferentes de cervejas. A panela possuirá engates rápidos para facilitar a troca de etapas e será configurável, através de uma interface gráfica, a fim de se customizar sua curva de temperatura.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Identificar problemas que os mestres cervejeiros caseiros possuem quando estão no processo de fabricação de suas cervejas;
- Descrever os problemas, a fim de saber detalhadamente como se pode trabalhar para resolvê-los;
- Avaliar a viabilidade econômica do produto;
- Levantar componentes e materiais;
- Comprar componentes e materiais já levantados;
- Construir *hardware* que contemplará toda a parte mecânica para que o devido controle seja feito;
- Construir *software* que implementará o controle de tempo e temperatura por meio de código elaborado;
- Construir um controlador que, com o sinal do sensor de temperatura, controlará o processo;
- Construir uma interface gráfica para o usuário, que permitirá configuração da curva de brassagem.

1.4. JUSTIFICATIVA

Na Figura 2 está apresentado o esquema simplificado da panela projetada, tendo seus componentes numerados, especificados ao lado e referenciados no texto que segue.

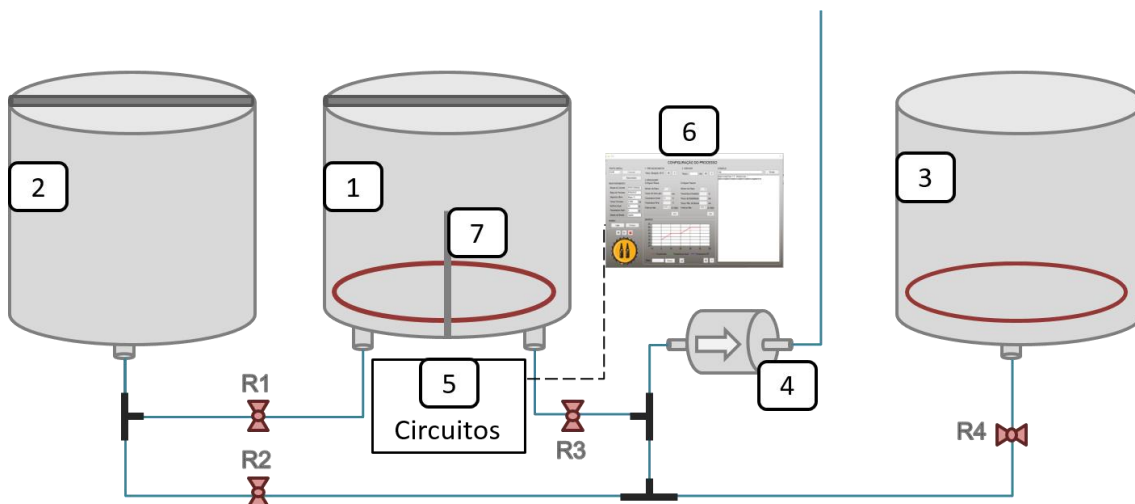


Figura 2 – Esquema simplificado da panela
Fonte: Autoria própria.

O equipamento desenvolvido tornará o processo de fabricação da cerveja artesanal mais prático e simples. O projeto é composto por três painéis (itens 1, 2 e 3), que tornará o método mais integrado, uma vez que o projeto englobará três etapas do processo de fabricação: pré-aquecimento, brassagem e fervura.

O mosto estará mais protegido de contaminações externas, visto que, por meio de uma bomba para fluidos em alta temperatura (item 4) acoplada entre a panela 1 e a panela 3, a recirculação estará constantemente acontecendo, enquanto ocorre o aquecimento conforme a curva de brassagem da cerveja fabricada. Isso, além de prevenir contaminação do conteúdo da panela, dispensará a necessidade de o cervejeiro estar preso ao cansativo processo de mexer o mosto para que este não queime e prejudique o todo.

O controle de temperatura do processo será feito por um controlador (item 5) que receberá o sinal de um sensor de temperatura (item 7) posicionado no interior do recipiente, e, conforme código elaborado, controlará o aquecimento

do mosto dentro das especificações de temperatura e tempo, por meio de um sistema de potência (item 5).

O acesso remoto feito por uma interface gráfica (item 6) para configurar os parâmetros de tempo e temperatura da curva de mostura, além de agregar caráter tecnológico e inovador ao trabalho, permitirá que o operador faça diferentes receitas de cerveja com mais facilidade, sendo possível reproduzi-las com mais êxito posteriormente, conforme vontade do cervejeiro.

Em relação à parte mecânica do projeto, além de contar com o compartimento interno que permitirá a filtragem simultânea ao processo de mostura, e depois de retirado permitirá que a fervura aconteça na mesma panela, e contar com a bomba para constante circulação do mosto dentro da mesma, existirão sistemas de conexões que facilitarão as etapas seguintes, principalmente de resfriamento do mosto. Nessa etapa, a conexão permitirá que se conecte a panela ao *chiller* ou panela auxiliar e seu conteúdo sejam movidos conforme necessidade.

O sistema de potência, por fim, que será responsável por aquecer o mosto dentro da panela elétrica, utilizará uma resistência acoplada dentro da panela 1. A resistência presente na panela 3, será responsável por aquecer a água da lavagem enquanto o processo de brassagem acontece. O abandono do fogareiro e adoção do aquecimento elétrico, além de permitir o controle do processo, traz mais eficiência térmica ao mesmo, uma vez que a maior parte do calor gerado pela resistência realmente será utilizada para aquecer o mosto, tendo assim, menos perdas.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O passo inicial para desenvolvimento e implementação do projeto é entender o processo total da fabricação da cerveja artesanal. Para isso, conta-se com o auxílio de livros, páginas web, ajuda de cervejeiros e visitas técnicas em cervejarias. Partindo daí a ideia do trabalho é modelada e apresentada.

O primeiro semestre de 2016 foi dedicado à preparação de todo referencial teórico e estrutura de conhecimento para posterior implementação do

projeto. No segundo semestre de 2016 e início do ano de 2017, o grupo se propôs a colocar em prática de forma operacional o que foi anteriormente discutido. Este planejamento contempla a montagem dos circuitos elétricos como hardware, a elaboração do código de controle, toda interface do aplicativo que será utilizado e montagem de um protótipo mecânico. O orçamento está apresentado da maneira mais econômica e coerente possível no Capítulo 2.3 desse trabalho. O estudo de projetos semelhantes dá ao grupo conhecimento necessário para pensar em uma alternativa mais viável para implementação do trabalho.

1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho é composto por 5 Capítulos. No Capítulo 1 é feita a introdução e delimitação do tema. Neste está apresentado a base teórica para posterior desenvolvimento do projeto. Devem integrar também este assunto tópicos como objetivos da pesquisa e outros elementos necessários para situar o trabalho (justificativa, procedimentos metodológicos, estrutura do trabalho). O Capítulo 2 é composto pelo desenvolvimento, onde estão expostos e explicados detalhadamente todos os procedimentos, materiais, metodologias e resultados da fabricação do projeto desenvolvido, do microcontrolador e também do aplicativo. O Capítulo 3 é composto pela implementação prática do trabalho, contemplando montagem, especificação de códigos de controle e interface gráfica, além de apresentar as discussões dos resultados em cima de dados coletados. O Capítulo 4 é constituído pela conclusão do projeto, apresentação de considerações finais e pontos levantados para projetos futuros. O quinto e último capítulo é composto pelos elementos pós-textuais que integram o trabalho e devem ser colocados na seguinte ordem: referências e apêndice.

2. DESENVOLVIMENTO

Nesta seção do trabalho apresenta-se um panorama sobre o desenvolvimento do projeto e como a equipe pretende aplicá-lo, tudo baseado na construção de um referencial teórico.

Como já citado no Capítulo 1, a função da panela é tornar o processo de fabricação da cerveja artesanal mais prático, eficiente, independente e dinâmico. O processo torna-se mais prático, pois o controle de temperatura na curva de rampas e patamares que caracteriza determinado tipo de cerveja será feito por um microcontrolador, com o sinal advindo de um sensor de temperatura e um sistema de potência para esquentar o conteúdo da panela. O sensor manda sinal de realimentação para o microcontrolador, que, conforme código elaborado efetuará o controle para que o sistema de potência aqueça o mosto. O kit adotado para tal finalidade é o Tiva C Series. A intenção é que para implementação final do projeto mecânico todos os dispositivos de hardware montados, compreendido pelos circuitos elétricos, estejam dispostos em um suporte externo acoplado à alguma das painéis. A potência das resistências que se pretende adotar para implementação do projeto final para aquecimento do mosto é da ordem de 5kW. Serão duas resistências dispostas no fundo das painéis 1 e 3.

O processo torna-se mais eficiente devido à substituição do método tradicional em um fogareiro pelo aquecimento elétrico. No aquecimento convencional, feito pela chama de um fogão, apenas a menor parte do calor gerado pela chama é realmente usado para esquentar o mosto, sendo que o restante é dissipado. A disposição da resistência dentro da panela aumentará bastante a eficiência térmica do processo, podendo ainda ser otimizado com a colocação de uma manta térmica envolvendo a panela externa, dificultando ainda mais a dissipação de calor.

A panela torna-se mais independente devido ao fato do controle de temperatura ser efetuado pelo microcontrolador, tornando desnecessária a supervisão constante e controle manual da temperatura do mosto, normalmente feita com um termômetro. Outro ponto importante neste tópico é a adoção da

bomba de recirculação de líquidos em altas temperaturas, que garantirá que o mosto seja recirculado em tempo integral durante a brassagem e a fervura.

Nos subcapítulos seguintes, serão detalhados os circuitos montados, *softwares* e códigos utilizados, as etapas de fabricação de cerveja utilizando o projeto proposto e a criação da interface gráfica.

2.1. MECÂNICA

2.1.1. Bomba

A bomba representada na Figura 3 é a escolhida para fazer a circulação do mosto entre as painelas. Esta possui um motor sem escova usada geralmente para bombear água quente de painéis solares de corrente contínua. Sua tensão varia de 12 a 24 volts com uma corrente nominal máxima de 1A. Suas conexões de entrada e saída são de ½” e ambas macho. A bomba pode fluir até 1000 litros por hora se utilizar a tensão máxima. Seu fluxo nominal fica entre 350/700 litros por hora e pode suportar até 100 graus sem danificar seus componentes internos.



Figura 3: Bomba Utilizada
Fonte: Fotografia de Autoria própria.

2.1.2. Resistência

Representada na Figura 4, a resistência escolhida será circular e com uma potência de 5000W em aço inox. Serão instaladas duas dessas resistências na parte inferior da panela 2 e panela 3. Dessa maneira, aumenta-se a eficiência térmica do sistema.

A água para lavagem (também chamada de água secundária) deve ser aquecida rapidamente. Utiliza-se seguinte fórmula para calcular o tempo de aquecimento:

$$h = \frac{M.C.(T2 - T1)}{860.P}$$

Onde:

P = Potência em kW

M = Massa do líquido a ser aquecido em Kg (como é água, considera-se 1Kg por litro)

C = Calor específico em caloria por Min (considera-se 1cal/min)

T1 = Temperatura inicial em °C

T2 = Temperatura final em °C

h = Tempo de aquecimento em horas

860 = Constante para conversão de kW para calorias

Por exemplo: em uma receita que se utiliza 10kg de grãos, sabe-se que a quantidade de água para brassagem é 25L e 37,5 L para a etapa de lavagem.

Considera-se a temperatura inicial da água (T1) igual a 20°C e a final (T2) igual a 75 °C.

$$h = \frac{37,5.1.(75 - 20)}{860.5}$$

$$h = 0,218 = 28,8 \text{ min}$$

Então se sabe que a resistência em sua potência máxima, aqueceria 37,5L de água cerca de 30 min. Comparando com um fogareiro de baixa pressão, a mesma quantidade de água demoraria em torno de 1h20min para ser aquecida (NOMADE KRAFT BIER, 2012).

Cabe ressaltar que a resistência nem sempre irá operar em sua potência máxima, a potência vai depender da temperatura programada. Por exemplo, na etapa de brassagem, é preciso ter diferentes temperaturas em tempos variáveis.



Figura 4 – Resistência Elétrica Circular 5KW JCS 168B
Fonte: <http://www.lojamegapeças.com/resistenciaselétricas/>

2.1.3. Conexões

Para facilitar a representação das conexões, a Figura 5 mostra uma representação gráfica das conexões, cada uma numerada para posterior explicação:

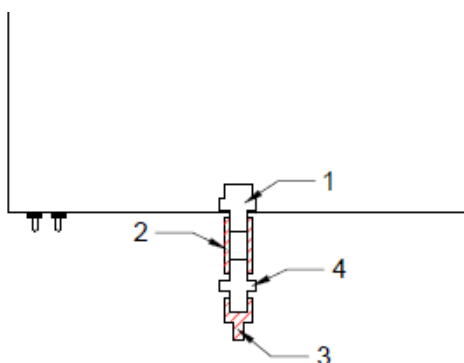


Figura 5 – Esquema simplificado das conexões das painéis
Fonte: Autoria própria.

Todas as furações para conexões serão iguais no que se refere a disposição e interligação entre elas. Estará presente um conjunto das conexões representadas nas painéis 2 e 3. Para a panela 1 estarão dispostos na parte inferior dois conjuntos (Figura 2). O conjunto é composto por um *niple* duplo de

$\frac{1}{2}$ " e $\frac{3}{4}$ "(1) no centro da panela, representado pela Figura 6. Utiliza-se o lado menor do conector para ter uma "parede" que irá auxiliar na vedação. O lado menor acompanhará uma luva de mesmo tamanho em que será alocado na superfície externa da panela (2), representada na Figura 7. Na luva de $\frac{1}{2}$ " será colocado um *niple* duplo de $\frac{1}{2}$ "(4), representado pela Figura 8, que se juntará a outro conector (pode ser adaptado um espigão) (3), como da Figura 9 que conduzirá a tubulação à saída da bomba.

Para as conexões fora das panelas, serão utilizados 3 Ts de $\frac{1}{2}$ ', como na figura 10, que serão ligadas em mangueiras de silicone. Quatro registros de mangueira $\frac{1}{2}$ ', como na Figura 11, serão instalados entre as mangueiras.

Os conectores e as mangueiras são resistentes à alta temperatura. A mangueira escolhida resiste até 260°C e é utilizada especificamente para condução de bebidas. As Figuras 6 a 11 foram retiradas do site <http://www.mercadolivre.com.br/>.



Figura 6 - Niple Duplo $\frac{1}{2}$ e $\frac{3}{4}$



Figura 7 - Luva $\frac{1}{2}$



Figura 8 - Niple Duplo $\frac{1}{2}$



Figura 9 - Espigão $\frac{1}{2}$



Figura 10 - T de $\frac{1}{2}$



Figura 11 - Registro $\frac{1}{2}$

2.2. HARDWARE

2.2.1. Circuitos Utilizados

Após concluir a parte mecânica do projeto, compreendendo a importância da eficiência da estrutura geral, conexões e vedações, parte-se para

a etapa de *hardware*. Na elaboração da panela projetada, entende-se por *hardware* toda a construção eletrônica, desde recebimento de sinal à entrega de potência para a carga, que fornecerá o meio para que o controle seja efetuado através de *software*. Serão projetados diferentes circuitos. Alguns auxiliarão na entrega da potência necessária a carga, um outro que receberá o sinal de realimentação vindo do transdutor de temperatura a fim de efetuar o controle em malha fechada esperado e também um circuito de acionamento para a bomba. Todos eles serão mais especificados nas seções que seguem dentro deste mesmo capítulo.

2.2.2. Acionamento de Potência

Para o acionamento da potência que irá esquentar o mosto, utiliza-se um circuito gradador implementado por dois circuitos apresentados em sequência. Primeiramente, implementa-se um circuito de cruzamento por zero. O circuito de cruzamento por zero funciona como um circuito de sincronismo. A função deste é detectar o momento em que a onda de tensão passa por zero volt e, de posse dessa informação, sincronizar os pulsos de comando do tiristor, a fim de controlar a potência entregue a carga.

O circuito utilizado no projeto está apresentado na Figura 12.

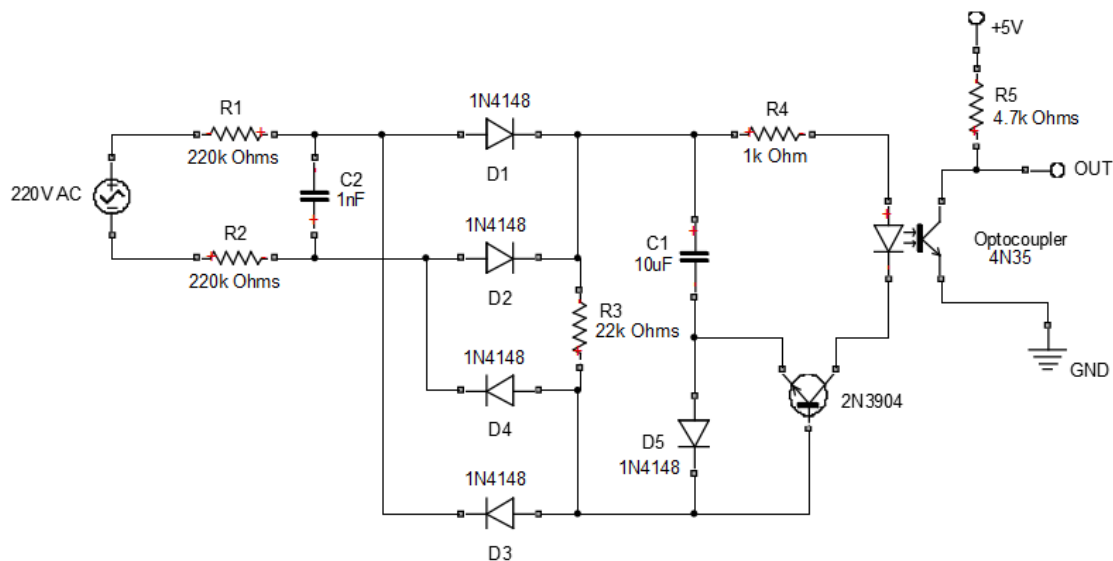


Figura 12 - Esquema de circuito detector de cruzamento por zero

Fonte: Reprodução no SimuLink de circuito apresentado em www.dextrel.net/diyzerocrosser.htm.

Este circuito é interessante para o projeto da panela, pois além da simples implementação eletrônica, trabalha numa faixa de 100 à 240V (será utilizado 220 V).

É composto pelos resistores R1-R2, logo na entrada da onda de tensão da rede elétrica, pelos diodos D1-D4 responsáveis pela retificação de onda completa, pelo capacitor C1, responsável pelo armazenamento da tensão média e pelo transistor, que funciona como um comparador de tensão. O resistor R3 tem por função fornecer uma corrente para base do transistor e operar como um divisor de tensão de entrada, juntamente com R1-R2. O resistor R4, por sua vez, limita e define a corrente que chega ao optoacoplador. O diodo D5 é responsável por impedir a polarização reversa entre a junção base-emissor do transistor (DXTREL, s.d.).

Este circuito tem alta precisão na detecção do cruzamento por zero, garantindo deste modo que o controle seja efetuado com eficiência, tem estabilidade para trabalhar em um ambiente com variação de temperatura ainda conta com a vantagem do acoplador óptico 4N35, responsável por fazer o isolamento elétrico, dificultando que eventos indesejados nas ondas de corrente e tensão sigam para o restante do circuito.

Tendo a informação do cruzamento por zero vinda do circuito anteriormente apresentado, é necessário controlar a potência entregue à resistência a fim de aquecer o mosto conforme especificações da receita. O controle será efetuado entregando mais ou menos potência à resistência elétrica. Para tal, implementa-se um circuito gradador, utilizado para variar o valor eficaz de uma tensão alternada, tendo a possibilidade de entregar parcialmente a onda de tensão para a carga acionada. Circuitos desse tipo são bastante utilizados para sistemas de controle de temperatura, sendo uma boa opção para a aplicação em questão.

O circuito utilizado como gradador no projeto da panela elétrica está apresentado em sequência na Figura 13.

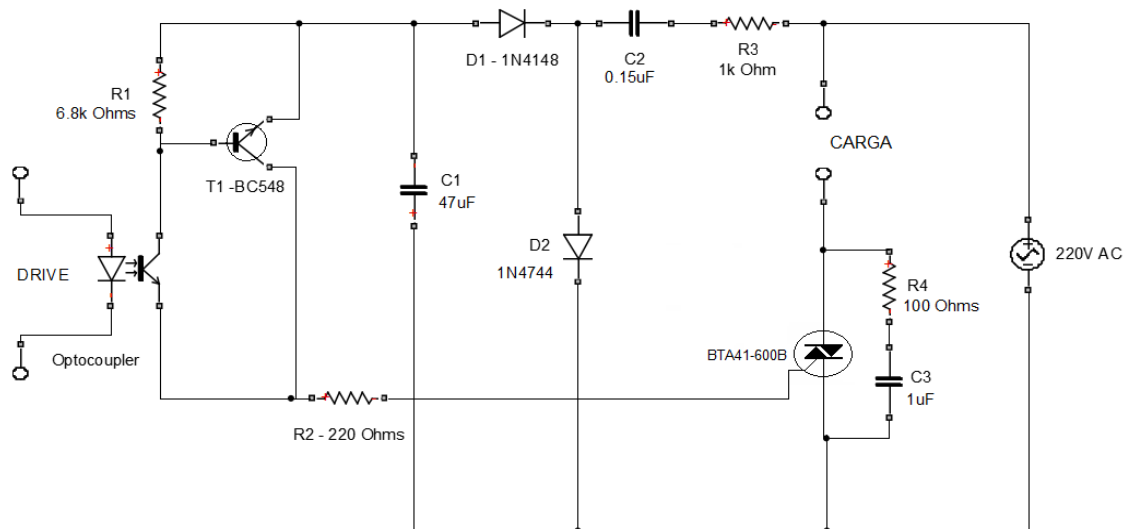


Figura 13 - Circuito de controle gradador do TRIAC

Fonte: Reprodução no SimuLink de circuito apresentado em

<http://www.electroschematics.com/6561/universal-triac-control-with-optocoupler>.

Neste circuito, a base do transistor T1 é acionada através do sinal proveniente do optoacoplador. O capacitor C2 é responsável por evitar perdas de carga e também por evitar o carregamento da linha de alimentação. R3, por sua vez, será responsável por limitar a corrente de comutação, enquanto o diodo D1 opera como um retificador de meia onda, junto ao capacitor C1, que opera como um filtro *ripple*. O transistor T1 irá conduzir quando receber o pulso enviado pelo optoacoplador à sua base. O resistor R2 tem por função limitar a corrente do *trigger* em cerca de 40 mA. O circuito RC, composto pelo resistor R4 e capacitor C3, protege o TRIAC de picos de tensão (ELECTROSCHEMATICS, s.d.).

O dispositivo de comutação responsável pelo disparo e entrega de corrente à carga é o TRIAC BTA41-600B (Figura 14). O TRIAC é um dispositivo que funciona como uma chave eletrônica bidirecional para correntes alternadas, como se fossem dois tiristores dispostos em paralelo, podendo controlar o ângulo de disparo através de uma corrente aplicada no terminal de gate e, desta forma, por meio de um sistema de condução e bloqueio, regular a potência entregue a carga. O componente apresenta três terminais, conforme a Figura 14, sendo que dois destes (A1 e A2) trabalham com a comutação entre os estados de condução e bloqueio, e o outro é o terminal de gate (G), que, assim como nos tiristores, necessitam de uma corrente de gatilho para começar a conduzir. Na maioria dos triacs são necessárias correntes na ordem apenas de miliamperes para controlar

correntes de centenas de amperes e grandes potências. Desta forma, o componente é uma ótima opção para o controle de resistências de aquecimento, sendo uma boa alternativa para o projeto da panela elétrica, pois é possível, através do ângulo de disparo, controlar a potência entregue à resistência e assim, configurar rampas e patamares na etapa da brassagem.

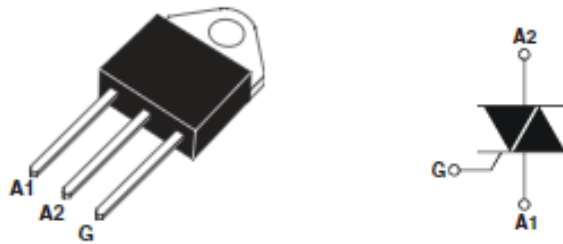


Figura 14- Representação e topologia do BTA41-600B
Fonte: BTA41-600B Datasheet.

Importantes informações de operação são encontradas no *datasheet* (STMICROELECTRONICS, 2005) deste equipamento, como a tensão e corrente nominais, de 600V e 40A, respectivamente, e a corrente de disparo de 50mA. O circuito, assim como apresentado, será alimentado com tensão alternada de 220V e o mesmo também apresenta em sua estrutura o acoplador óptico 4N35 responsável pelo isolamento elétrico.

2.2.3. PT100 e Circuito de Condicionamento de Sinal

O PT100 é o dispositivo transdutor utilizado para efetuar a leitura da temperatura do mosto dentro da panela, fornecendo sinal de realimentação para efetuação do controle malha fechada. Este dispositivo é uma termorresistência, isto é, opera baseado no princípio de variação da resistência elétrica conforme varia-se a temperatura. Também conhecido como RTD, o PT100 fornece uma resistência ôhmica de 100 ohms quando está à 0°C, e uma faixa de temperatura que pode ir de -270°C à 962°C para aplicações industriais. Isso justifica sua grande aplicação nesse ramo, uma vez que é altamente preciso, com alta estabilidade e sensibilidade (EXACTA, s.d.).

Para implementação do projeto ele se apresenta como uma boa opção pois, além da ampla escala de variação de temperatura de operação, assumindo que o processo contará com precisão de medição para uma escala de 0 a 110°C, tem excelente precisão de leitura e não é tão suscetível à ruídos dependendo da faixa de operação, que poderiam prejudicar o controle das rampas e patamares, que devem ser bem definidos. São resistentes à contaminação, sendo uma boa opção para um sensor que precisa ter contato com produto alimentício e um comportamento praticamente linear no que se refere a relação do coeficiente de temperatura (variação da resistência elétrica com temperatura), o que simplifica seu uso e compreensão.

Para utilização desse sensor é necessário um circuito de condicionamento de sinal. Condicionar o sinal é convertê-lo de forma adequada a haver comunicação com o microcontrolador. O circuito utilizará um sistema de conexão 3-fios que será responsável por transformar a escala de resistência lida pelo PT100 em níveis de tensão compatíveis com a escala de entrada do Tiva (0 a 3,3V). Na Figura 15 está apresentado o circuito utilizado para condicionar o sinal do transdutor utilizado.

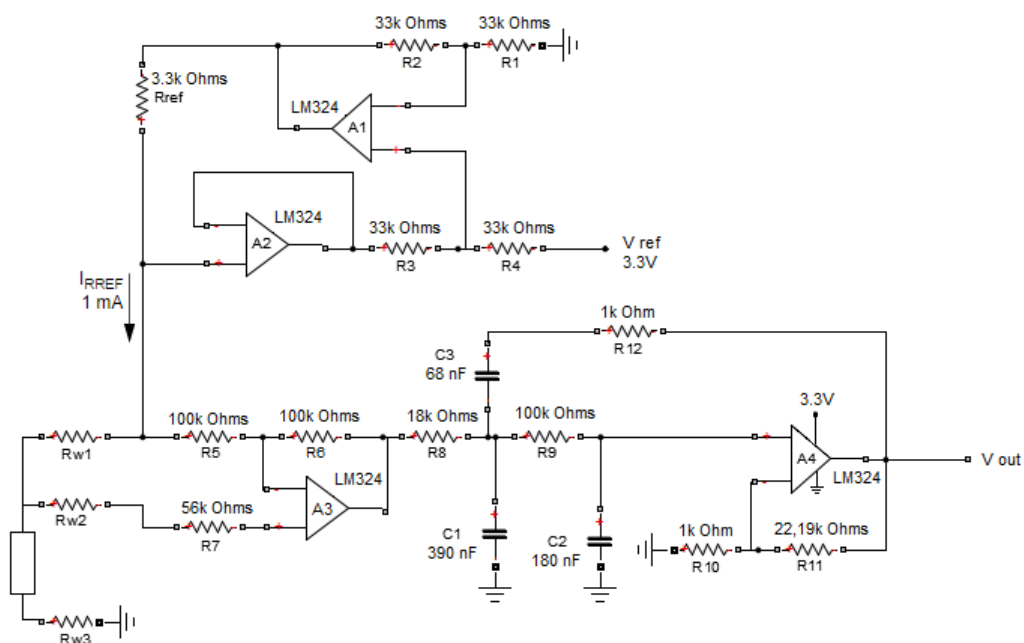


Figura 15 - Circuito de condicionamento de sinal do RTD utilizando conexão 3-fios
Fonte: Reprodução no SimuLink de circuito apresentado pela Microship.

Neste circuito uma parte funciona como fonte de corrente de 1 mA, onde vê-se I_{RREF} , para excitação do transdutor. O amplificador A3 é responsável por

cancelar o erro da resistência do fio, enquanto o último, A4, tem função de filtrar e atribuir ganho ao sinal. A saída V_{OUT} do circuito é um sinal de tensão que poderá variar de 0 a 3,3V, e será transformada pelo conversor analógico digital do microcontrolador (BAKER, 2008).

Para reprodução do circuito, oferecido pela Microchip com faixa original de medição de temperatura de -200 a 600°C, foram necessárias adaptações que satisfizessem as especificações para medição de 0 à 110°C. Os cálculos para valores das resistências usadas nesse ponto do trabalho estão apresentados no Apêndice A deste documento.

2.2.4. Liga / Desliga Bomba

Não será durante todo o processo que a bomba da panela estará ligada. Em alguns momentos é necessário que a bomba esteja desligada para efetuar os passos de determinada etapa, como quando necessário mudar o fluxo do líquido do mosto através da abertura e fechamento de registros. Para tal, será implementado o circuito de comando para ligar e desligar a bomba. O microcontrolador será responsável nesta etapa por enviar um sinal para um relé, que estará funcionando como uma chave, a qual dependendo do sinal recebido irá acionar ou desligar a bomba (BRAGA, s.d.).

O circuito de comando implementado para essa etapa está apresentado na Figura 16.

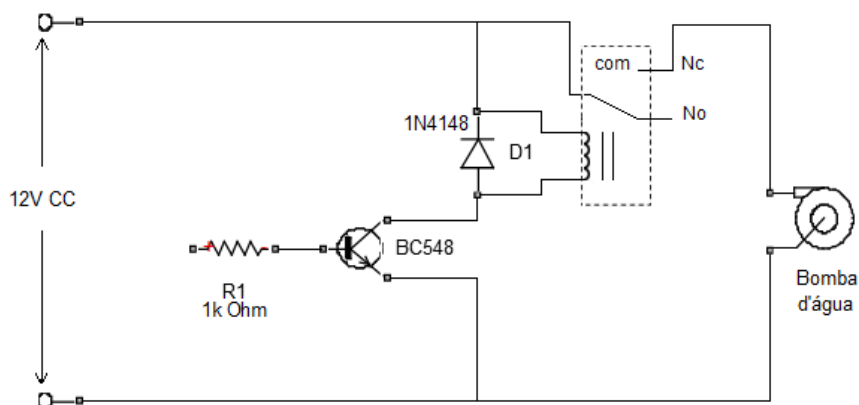


Figura 16 - Circuito de acionamento da bomba
Fonte: Reprodução no Simulink de circuito adaptado apresentado em
<http://engenheirando.com/electronica/relés>

2.3. LISTA DE MATERIAIS

Lista de Materiais			
Item	Qtd	Preço Unitário	Preço Total
Parte Mecânica			
Panela 60L (N°45)	2	R\$ 184,99	R\$ 369,98
Panela 3 (auxiliar) 30L (N°35)	1	R\$ 90,00	R\$ 90,00
Resistência Elétrica Circular 5KW	2	R\$ 90,00	R\$ 180,00
Bomba Recirculação	1	R\$ 200,00	R\$ 200,00
Niple Duplo ½ e ¾	4	R\$ 9,40	R\$ 37,60
Luva ½	4	R\$ 7,90	R\$ 31,60
Niple Duplo ½	4	R\$ 8,00	R\$ 32,00
Espigão ½	2	R\$ 6,90	R\$ 13,80
T de ½	3	R\$ 5,50	R\$ 16,50
Registro para Mangueira ½	4	R\$ 5,90	R\$ 23,60
Mangueira Silicone (metro)	3	R\$ 28,90	R\$ 86,70
Hardware			
Kit Tiva™ C Series TM4C123G LaunchPad	1	R\$ 120,00	R\$ 120,00
Circuito Zero Crossing Detector			
Resistência - 220kΩ	2	R\$ 0,50	R\$ 1,00
Resistência - 22kΩ	1	R\$ 0,50	R\$ 0,50
Resistência - 1kΩ	1	R\$ 0,50	R\$ 0,50
Resistencia – 4,7kΩ	1	R\$ 0,50	R\$ 0,50
Optoacoplador- 4N35	1	R\$ 0,50	R\$ 0,50
Transistor- 2N3904	1	R\$ 2,50	R\$ 2,50
Capacitor - 10uF/10V	1	R\$ 3,00	R\$ 3,00
Diodo - 1N4148	5	R\$ 1,30	R\$ 7,80
Gradador e Triac			
Resistência - 6,8kΩ	1	R\$ 1,50	R\$ 1,50
Resistência - 200Ω	1	R\$ 1,20	R\$ 1,20
Resistência - 1KΩ	1	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Resistência - 100Ω	1	R\$ 1,20	R\$ 1,20
Transistor– BC548	1	0,01	R\$ 0,01
TRIAC BTA41- 600B	1	R\$ 9,99	R\$ 9,99
Capacitor - 47µF/25V	1	R\$ 1,00	R\$ 1,00
Capacitor – 0,15µF	1	R\$ 0,50	R\$ 0,50
Capacitor – 0,1µF/400V	1	R\$ 1,00	R\$ 1,00
Diodo - 1N4148	1	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Diodo - 1N4744/15V	1	R\$ 2,00	R\$ 2,00
PT100 e Circuito de condicionamento de Sinal			

Sensor PT100/3fios - 30cm	1	R\$ 20,00	R\$ 20,00
Resistência - 33k Ω	3	R\$ 0,50	R\$ 0,50
Resistência - 1k Ω	2	R\$ 0,01	R\$ 0,01
Resistência - 18k Ω	1	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Resistência - 56k Ω	1	R\$ 0,50	R\$ 0,50
Resistência - 100k Ω	3	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Resistência - 22k Ω	1	R\$ 1,50	R\$ 1,50
Capacitor - 180nF	1	R\$ 0,30	R\$ 0,30
Capacitor - 390nF	1	R\$ 0,20	R\$ 0,20
Capacitor - 68nF	1	R\$ 5,00	R\$ 5,00
Amp. Op. LM324	4	R\$ 3,86	R\$ 15,44
Liga/Desliga Bomba			
Resistência - 1k Ω	1	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Diodo - 1N4148	1	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Transistor - BC548	1	R\$ 0,01	R\$ 0,01
Total			R\$ 1.279,94

Tabela 2 - Lista de Materiais e Preços

Fonte: Autoria própria.

Muitos dos componentes citados na Tabela 2 são comprados em grandes quantidades, por isso alguns itens estão com o valor zerado (não há a necessidade de mais de um pacote para uso). Os valores estão sujeitos a alteração e são referentes, na maior parte, a preços de lojas de componentes eletrônicos.

2.4. DIAGRAMA DE BLOCOS

De acordo com as explicações dadas anteriormente, apresenta-se o diagrama de blocos da parte de hardware está apresentado na Figura 17:

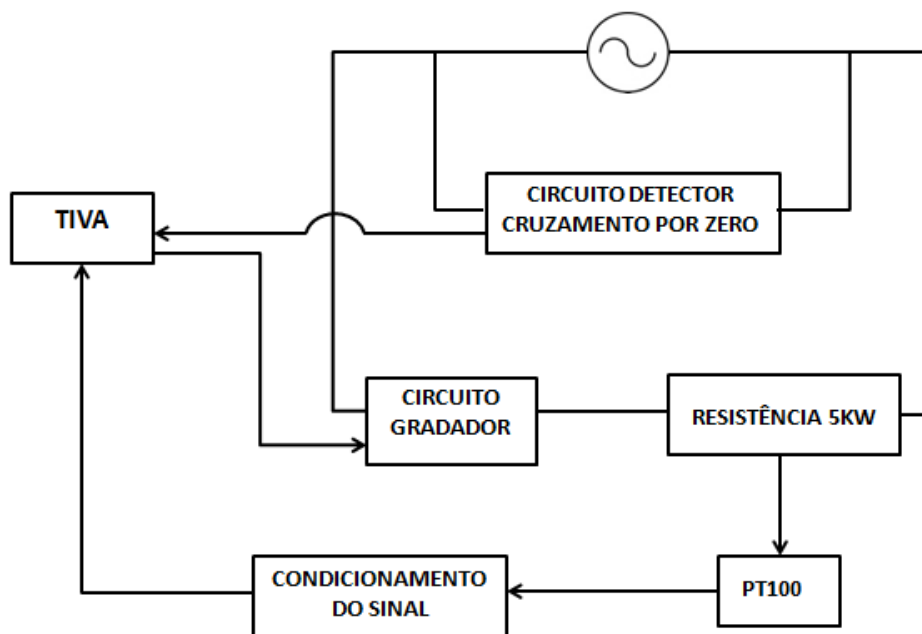


Figura 17 - Diagrama de Blocos Hardware
Fonte: Autoria própria.

2.5. FIRMWARE

2.5.1. Controlador PID

O controlador PID é o mais utilizado em sistemas de controle realimentados. Isto se justifica pela sua fácil implementação, além de serem de baixo custo, robustos e versáteis, com a capacidade de fornecer comportamentos transitórios e de regime permanente satisfatório para uma grande variedade de processos encontrados na indústria, o que consequentemente promove a diversidade de aplicações em sistemas de controle (NATIONAL INSTRUMENTS, 2011).

Uma vantagem apresentada é que quando não se tem possibilidade de uma abordagem analítica, é possível, ainda assim, a obtenção de sintonia dos parâmetros por meio de abordagens experimentais. São várias as técnicas de sintonia possíveis de serem aplicadas, as quais podem ir desde os métodos tradicionais a técnicas mais recentes.

O principal motivo da escolha do controlador PID para o projeto é a facilidade de implementação. Na panela, os parâmetros do PID são responsáveis por tornar o processo controlável, a fim de atribuir ganhos para o

controlador e minimizar o overshoot. No processo de elevação da potência da resistência é de extrema importância que a temperatura não passe da temperatura desejada justamente para não ocasionar problemas ao mosto, como por exemplo a caramelização deste. O erro de regime permanente é o mínimo possível, como já visto, os patamares de temperatura devem ser bem definidos, fazendo com que todas as características desejadas da cerveja sejam atendidas. Com o PID sintonizado da forma correta, o controle de temperatura da panela pode ser realizado perfeitamente.

2.6. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CERVEJA UTILIZANDO A PANELA ELÉTRICA

Nesta seção descreve-se o processo de fabricação de cerveja utilizando a panela projetada. Entre cada etapa mencionada e explicada a seguir, a bomba deve ser desligada e todos os registros fechados para evitar que ocorra algum erro durante o processo.

A Figura 18 apresenta a legenda para os símbolos utilizados na sequência desse capítulo.



Figura 18 - Legenda para representação das etapas de funcionamento da panela
Fonte: Autoria própria.

ETAPA 1

Nessa primeira etapa, o malte deve ser colocado na panela 2, a água da brassagem na panela 1 e na panela 3 a água da lavagem. As duas resistências devem estar ligadas e apenas a resistência da panela 1 é controlada (Figura 19). A quantidade inicial de água para brassagem varia de receita para receita e esta deve ser esquentada até atingir 50 °C.

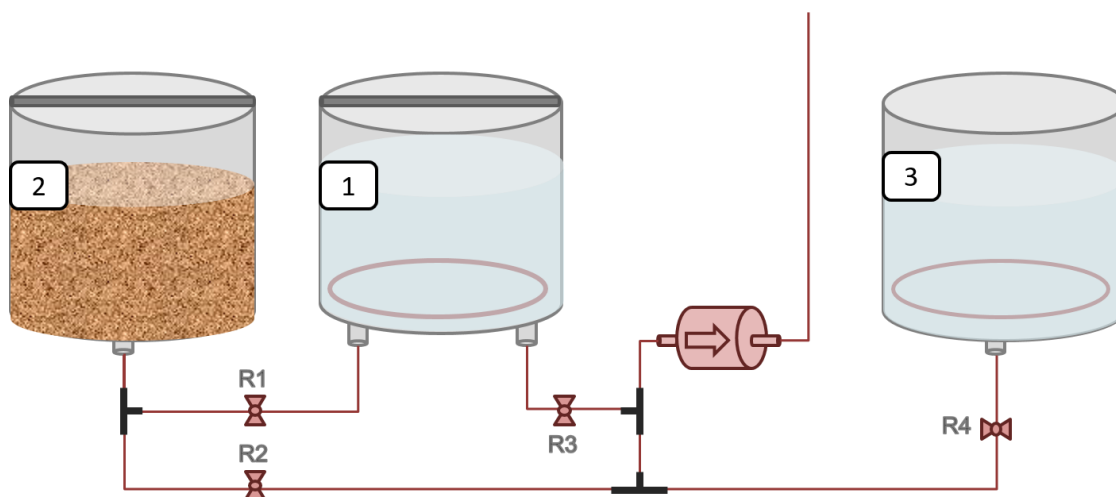


Figura 19 - Panela em funcionamento - Etapa 1

Fonte: Autoria própria.

ETAPA 2

Assim que a temperatura da água alcançar 50°C, o registro R1 deve ser aberto para que a água da panela 1 se divida e vá também para a panela 2 (Figura 20). Esse processo ocorre por vasos comunicantes.

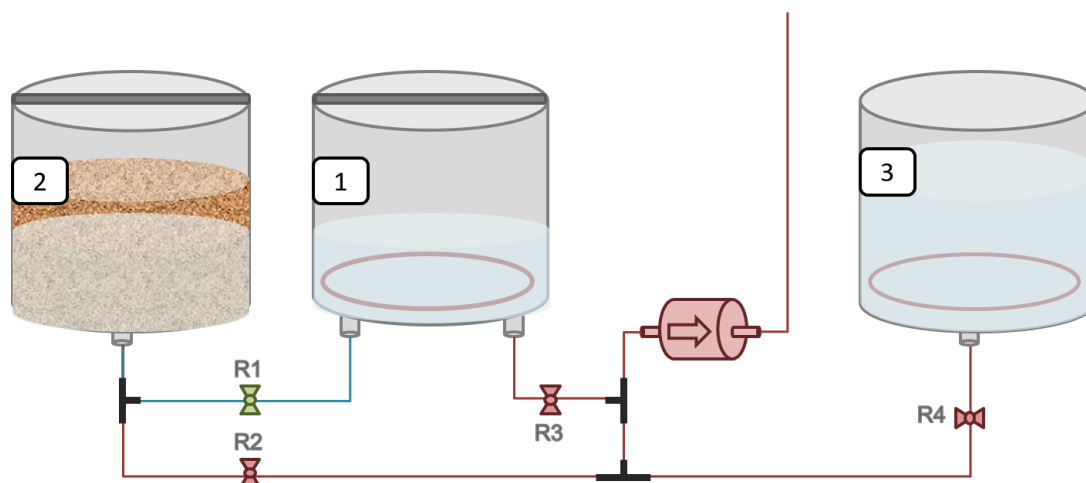


Figura 20 - Panela em funcionamento - Etapa 2

Fonte: Autoria própria.

ETAPA 3

Para iniciar a brassagem, o Registro R3 deve ser aberto e a partir desse momento a bomba pode ser ligada, puxando a água da panela 1 e despejando em cima do malte presente na panela 2 (Figura 21). Enquanto a brassagem durar, a bomba estará ligada para manter o fluxo e homogeneização de temperatura do líquido.

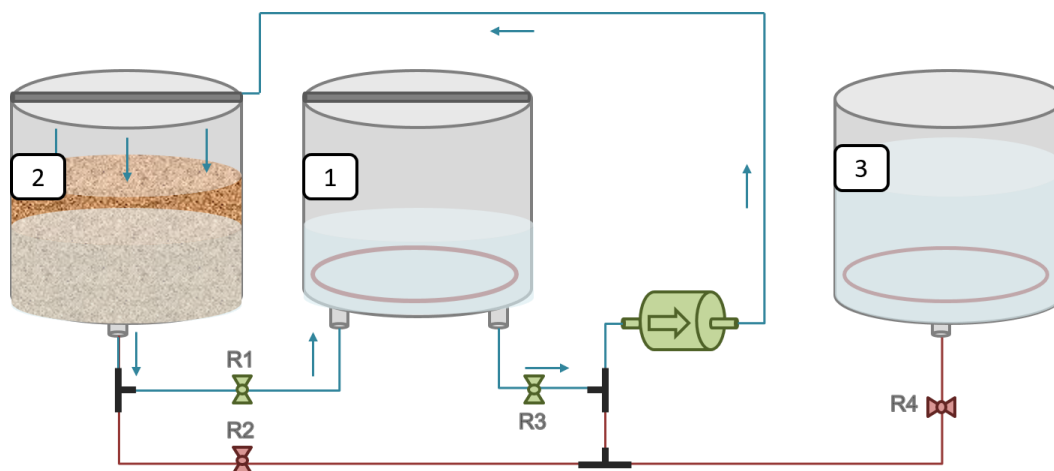


Figura 21 - Panela em funcionamento - Etapa 3
Fonte: Autoria própria.

ETAPA 4

Com a brassagem finalizada, o mosto deve ser concentrado na panela 1. Para isso, o cervejeiro deve abrir apenas o registro R2. A bomba continua ligada para que todo mosto seja transferido para a panela 1 (Figura 22). A condução da extremidade da mangueira para cima da panela mencionada é feita manualmente.

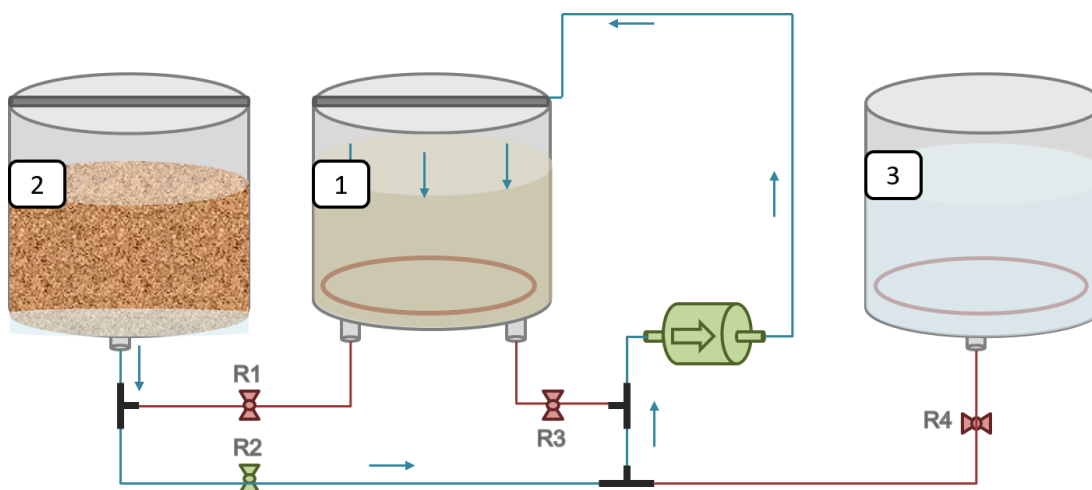


Figura 22 - Panela em funcionamento - Etapa 4
Fonte: Autoria própria.

ETAPA 5

A água da lavagem que está concentrada na panela 3, durante o processo de brassagem, foi aquecida e deve ter sua temperatura em torno de 75 a 79 °C. Acima disso pode ocorrer à extração de taninos, presentes nas cascas dos grãos e isso poderá causar adstringência na cerveja. E abaixo dessa temperatura, se perde a eficiência na extração dos açúcares residuais.

A quantidade de água varia de receita para receita e para determiná-la existe um cálculo que deve ser feito. Alguns cervejeiros utilizam um aplicativo que os auxiliam na elaboração de receita e calcula automaticamente a quantidade de água necessária. Através de pesquisas feitas em blogs cervejeiros foi constatado que o software *BeerSmith* é o mais utilizado entre os produtores, ele permite a criação e alteração de receitas completas, cadastro de ingredientes e controle da produção com informações do dia. (PLEZURO, 2015)

Para iniciar a lavagem, apenas o registro R4 deve estar aberto, a bomba ligada e toda água da panela 3 deve ser transferida para a panela 2 (Figura 23).

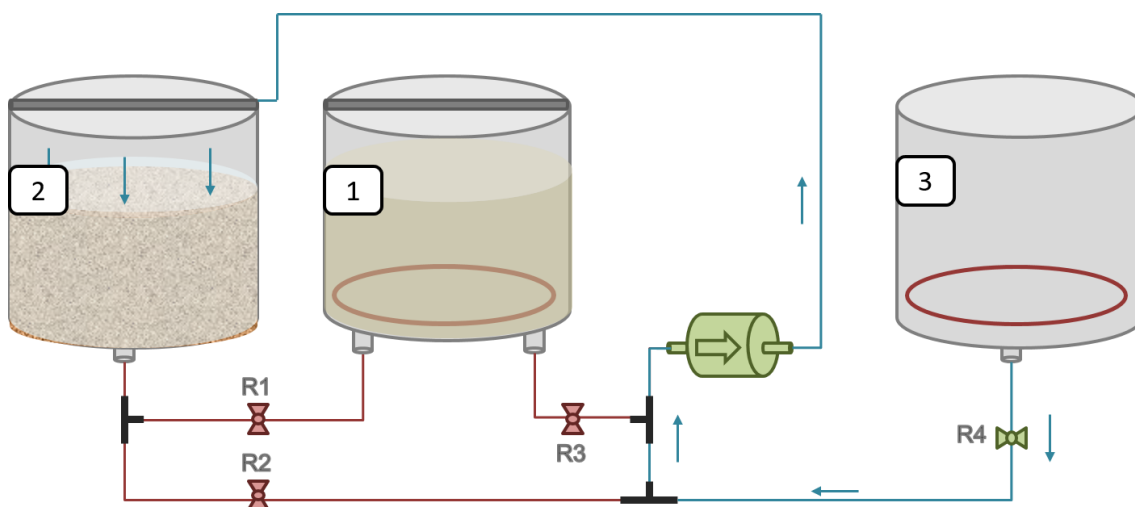


Figura 23 - Panela em funcionamento - Etapa 5

Fonte: Autoria própria.

ETAPA 6

Para continuar a lavagem, o registro R2 deve ser aberto e a bomba ligada. A água passará pelo malte o lavando, esse processo ocorre várias vezes, conforme a Figura 24.

A lavagem é importante para que se extraia todo o açúcar que ainda resta no malte e deve ser efetuada até que se atinja um bom resultado, analisado visualmente através da coloração da água.

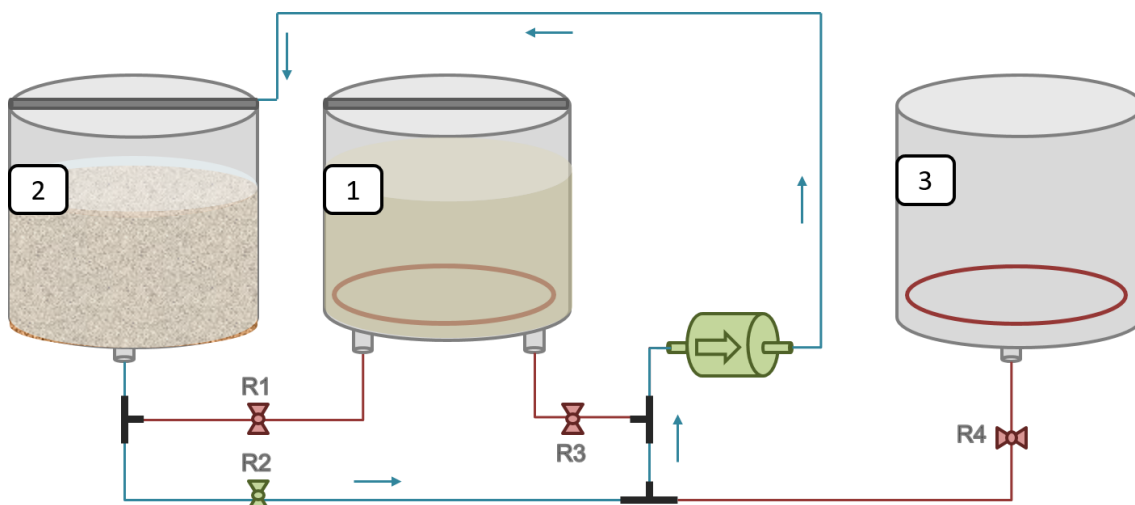


Figura 24 - Panela em funcionamento – Etapa 6
Fonte: Autoria própria.

ETAPA 7

Ao final de lavagem, e para iniciar a fervura, o mosto deve permanecer nas panelas 2 e 1, os registros R1 e R3 devem ser abertos e a bomba ligada para que os mostos se misturem e para que a resistência da panela 1 possa ferver o mosto (Figura 25).

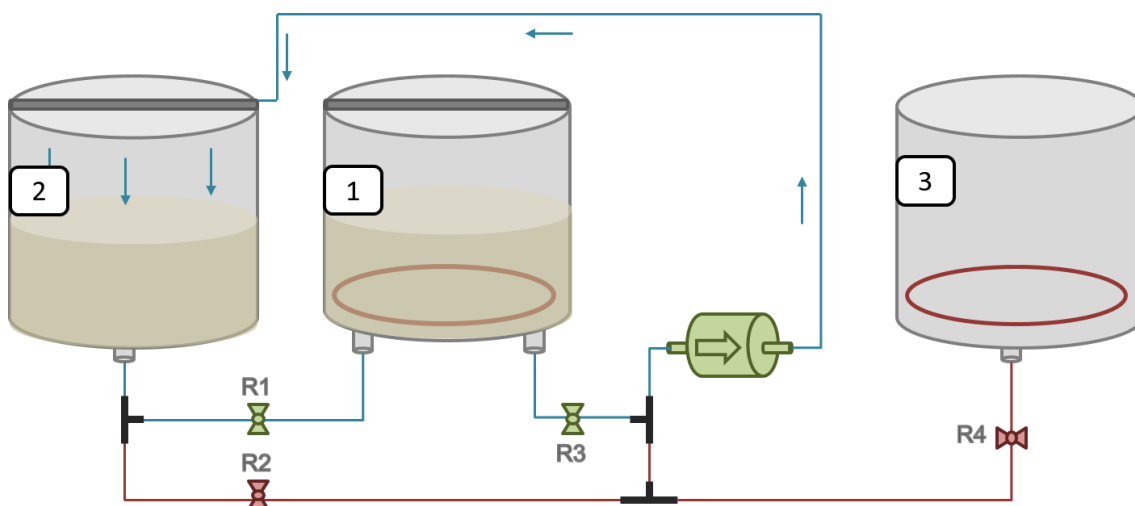


Figura 25 - Panela em funcionamento - Etapa 7
Fonte: Autoria própria.

ETAPA 8

Para finalizar a fervura, o mosto fervido deve ser concentrado na panela 1. Deve ser feito o mesmo que a Etapa 4: ligar a bomba e abrir somente o registro R2. Ver Figura 26 abaixo.

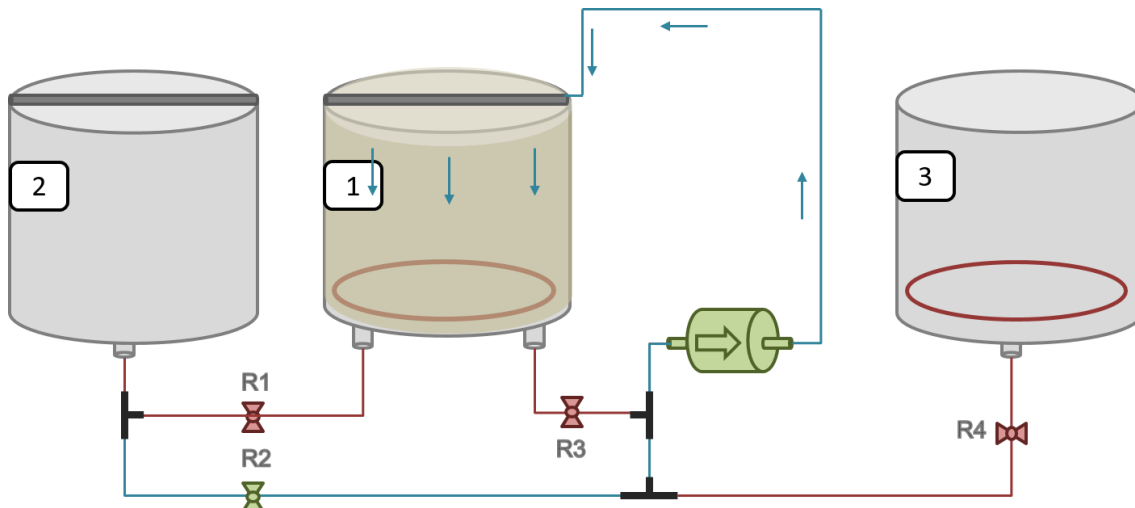


Figura 26 - Panela em funcionamento – Etapa 8
 Fonte: Autoria própria.

ETAPA 9

Nessa última etapa, todo o mosto fervido deve ser resfriado para seguir para etapa de fermentação. A mangueira deve ser conectada no *Chiller*, o registro R3 aberto e a bomba ligada (Figura 27).

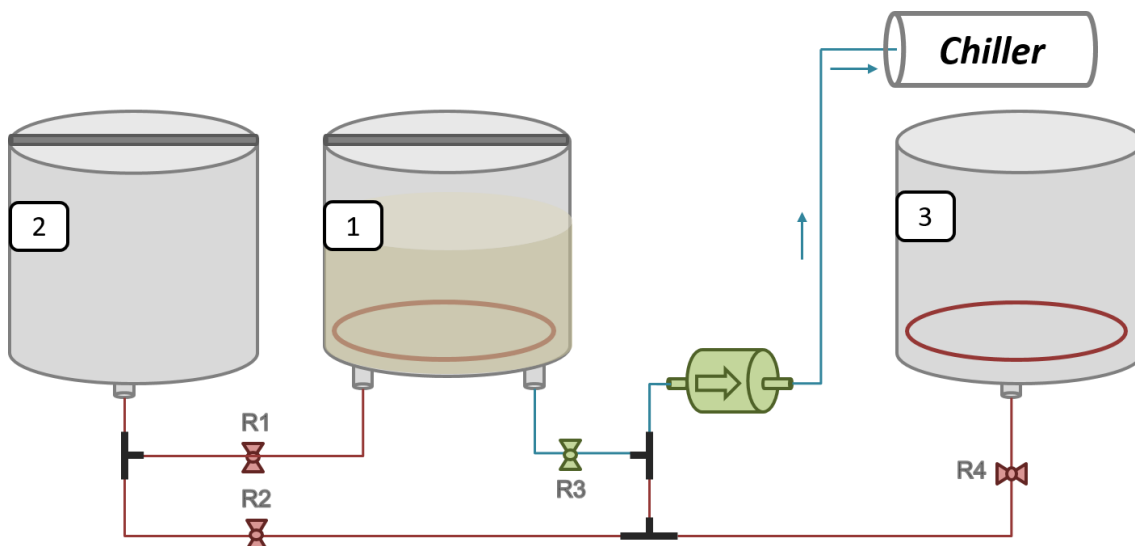


Figura 27 - Panela em funcionamento - Etapa 9
 Fonte: Autoria própria.

ETAPA 10

Após o término da etapa 9, a panela não será mais utilizada. Para fazer a limpeza das mangueiras e da bomba, deve-se ferver água na própria panela e garantir que ela passe por todos os tubos.

3. IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS

3.1. MONTAGEM DOS CIRCUITOS E VALIDAÇÃO DE FUNCIONAMENTO

Tendo a estrutura do projeto definida no que diz respeito aos circuitos, suas respectivas funções e como se integram, a equipe dedicou sua atenção à montagem. Todo o material utilizado para implementação dos circuitos está anteriormente apresentado na Tabela 2.

Primeiramente, para validação e teste, os circuitos foram montados em *protoboard*. Tendo garantido o funcionamento destes, partiu-se para implementação e montagem em placas perfuradas universais. No total, a montagem contempla cinco diferentes placas, sendo quatro destas, circuitos utilizados como hardware e uma auxiliar, para fixação do kit microcontrolador e distribuição do sinal de alimentação 3,3 V. Os circuitos implementados são apresentados em sequência como subitens desta mesma seção.

3.1.1. Detector De Cruzamento por Zero

O circuito de cruzamento por zero é apresentado na Figura 28 e foi o primeiro a ser testado devido à facilidade em conferir sua operação correta, uma vez que para este não se faz necessária nenhuma programação do microcontrolador, apenas o sinal de tensão 3,3 V disponibilizado no circuito do kit.

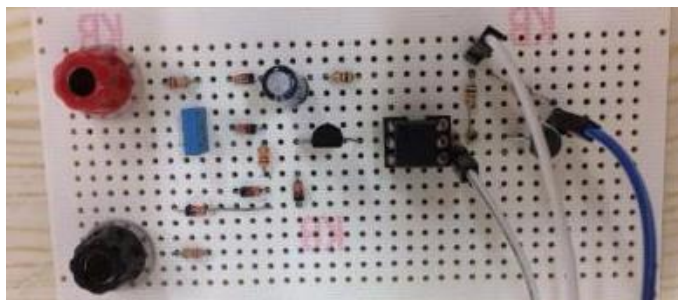


Figura 28 – Circuito detector de cruzamento por zero
Fonte: Fotografia de autoria própria.

Os testes foram efetuados em 127 V. O resultado da conferência de operação, coletado na saída do circuito com auxílio de um osciloscópio, é apresentado na Figura 29. Para tal registro é apresentado um sinal que tem um pulso cada vez que a onda de tensão da rede elétrica passa por zero, resultando em uma frequência de 120 Hz.

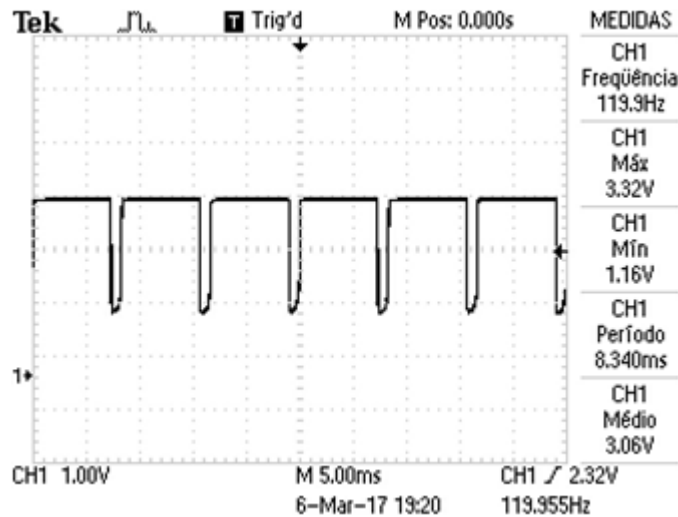


Figura 29 – Funcionamento do circuito cruzamento por zero
Fonte: Registro do osciloscópio por autoria própria.

3.1.2. Controle Gradador e TRIAC

Garantindo a operação correta do circuito detector de cruzamento por zero, a equipe tem o necessário para efetuar os testes de validação do circuito gradador. Como apresentado anteriormente em referencial teórico, este circuito é responsável pela entrega de potência à carga através de controle implementado no microcontrolador. O resultado da montagem do circuito gradador é apresentado na Figura 30.

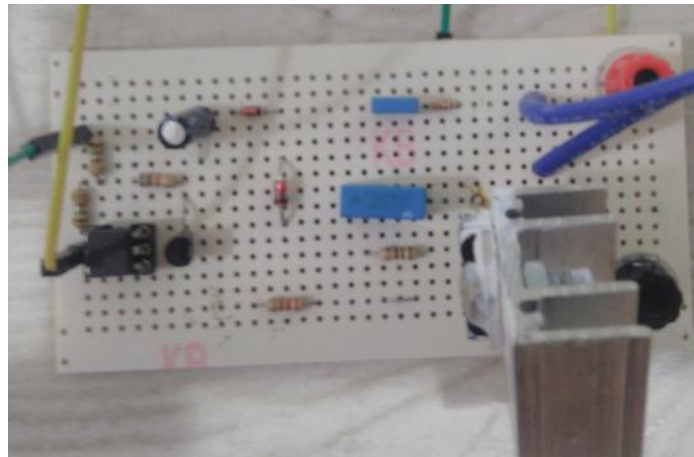


Figura 30 – Circuito Gradador
Fonte: Fotografia de autoria própria.

Este circuito recebe como entrada um sinal de pulso vindo do microcontrolador, a fim de limitar a entrega de potência para a carga resistiva através da ação do TRIAC. Ainda que não seja o sinal de saída do gradador, conferir a operação correta dos pulsos de controle é o primeiro passo para garantir o funcionamento deste circuito.

Na Figura 31 é apresentado, juntamente ao sinal de saída do detector de cruzamento por zero, o registro dos pulsos de controle utilizados como entrada do circuito gradador.

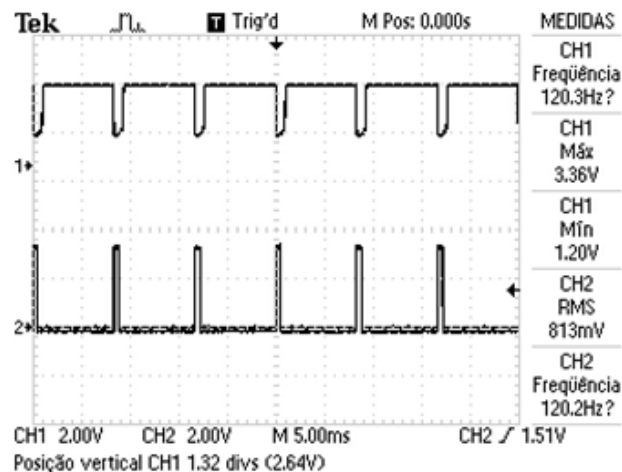


Figura 31 – Pulsos de controle usados como entrada do circuito gradador
Fonte: Registro do osciloscópio por autoria própria.

Para verificação de funcionamento deste circuito foi necessário conectar cargas resistivas à sua saída (inicialmente utilizou-se resistores shunt e lâmpadas incandescentes). O sinal de saída do gradador é uma onda de tensão

alternada retificada pela ação do TRIAC. Para testes finais e coleta de dados a equipe utilizou como carga um rabo quente (carga resistiva de 1 kW utilizado para esquentar líquidos).

Um registro exemplo do sinal de saída do circuito em questão é apresentado nas Figuras 32 e 33. Nesta primeira, o osciloscópio da esquerda monitora sinal saída do detector de cruzamento por zero e entrada do gradador, e o osciloscópio da direita monitora sinal de tensão alternada da tensão da rede e saída do gradador. A segunda figura apresenta a onda de tensão retificada pela ação TRIAC do circuito gradador.

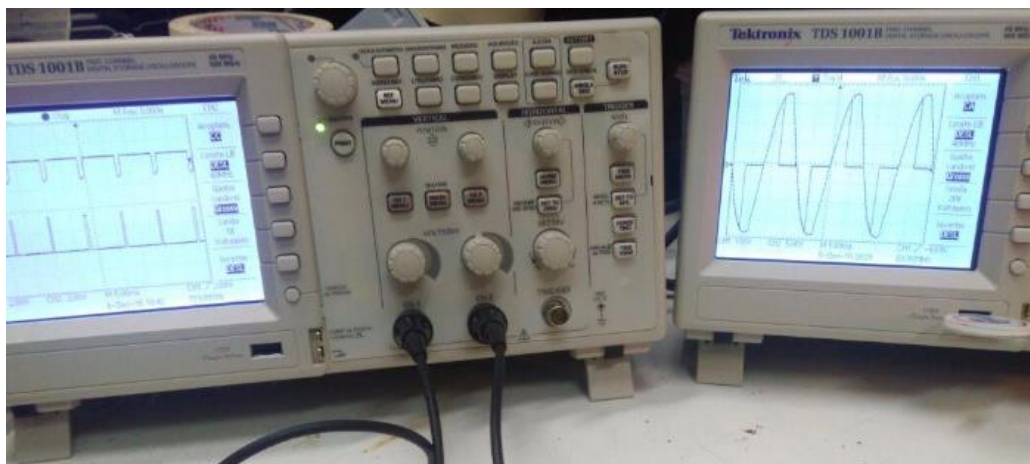


Figura 32 – Sinais de entrada/saída do circuito gradador
 Fonte: Fotografia de autoria própria.

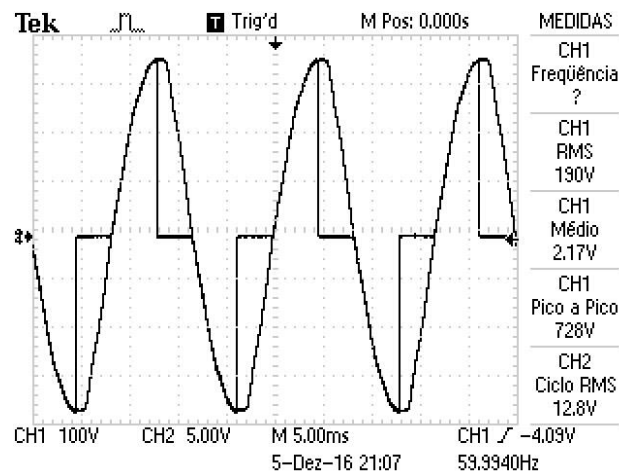


Figura 33 – Onda de tensão retificada pelo circuito gradador
 Fonte: Registro do osciloscópio por autoria própria.

3.1.3. Condição de Sinal do PT100

A montagem do circuito de condicionamento de sinal utilizado para tratamento do sinal de temperatura é apresentada na Figura 34.

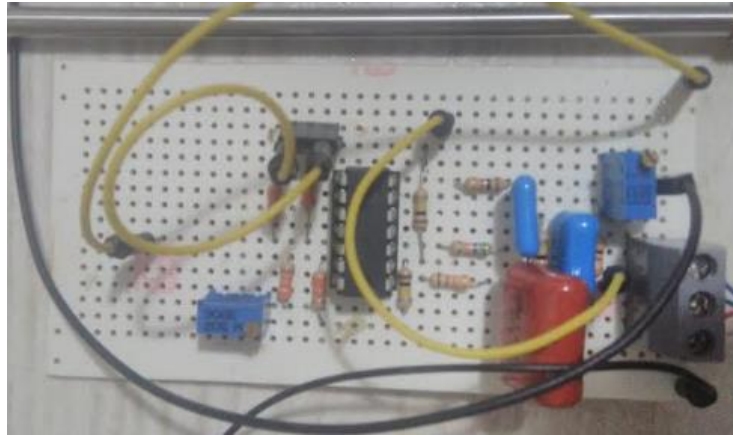


Figura 34 – Circuito de condicionamento de sinal para PT100
Fonte: Fotografia de autoria própria.

Há implementados nesta montagem dois trimpots. O disposto mais à esquerda na imagem é responsável por ajustar a corrente de excitação do PT100. O ajuste foi feito ainda em protoboard com auxílio de um multímetro na função amperímetro, garantindo que no sensor fluísse 1 mA. O segundo trimpot auxilia no ajuste do ganho do sinal de saída para a faixa adequada de medição. Após efetuados os ajustes os dados de medição foram coletados e a curva de operação do sensor apresentada na Figura 35 foi montada no Excel.

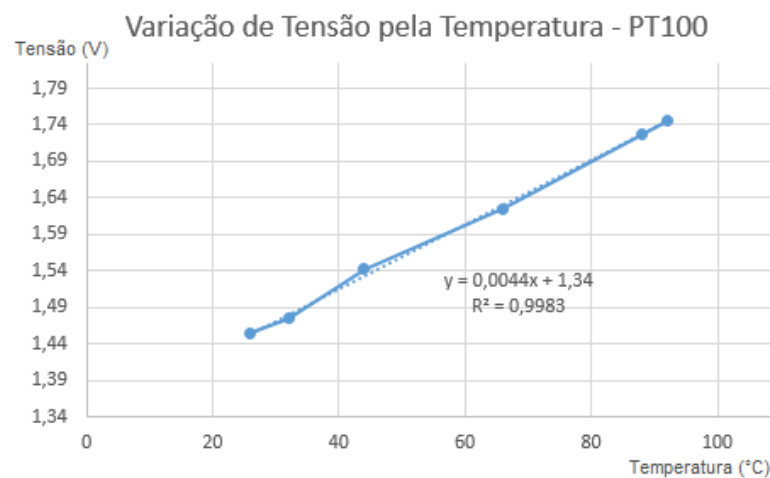


Figura 35 – Variação da tensão pela temperatura para validação do circuito PT100.

Fonte: Registro Excel de autoria própria.

Nesta curva, o eixo X representa a temperatura lida com o termopar de um multímetro, e o eixo y representa a saída do circuito, um sinal de tensão em corrente contínua. De posse dessas informações, a equipe pode validar o comportamento linear do sensor, garantindo-o como apto para aplicação no processo de controle de temperatura.

Sabendo que a porta de conversão de sinal analógico/digital do kit microcontrolador trabalha de 0 a 4095 (12 bits) para um sinal de 0 a 3,3 V, a equipe teve que efetuar um cálculo de adaptação da leitura. Com o ganho implementado, para a variação da temperatura de 0 a 110°C, o sinal de saída foi de aproximadamente 1,3 a 1,8 V (equivalente à 1613 a 2233), desta forma implementou-se que a temperatura lida será dada pela seguinte equação:

$$\text{Temperatura Real em } ^\circ\text{C} = \left(\frac{((110^\circ * \text{Leitura}) - 1613)}{(2233 - 1613)} \right) + 11$$

3.1.4. Liga / Desliga Bomba

O resultado final da montagem do circuito de acionamento da bomba é apresentado na Figura 36.

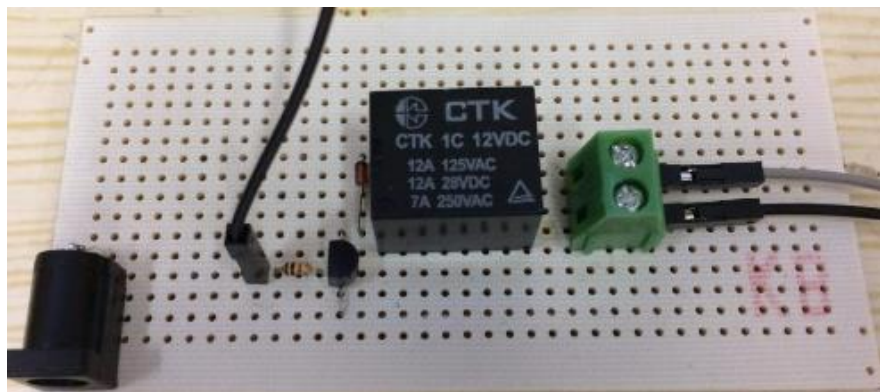


Figura 36 – Circuito de acionamento da bomba
Fonte: Fotografia de autoria própria.

Como a operação deste circuito é bastante simples, trabalhando com uma lógica de relé de contato aberto e fechado, o teste consistiu apenas em aplicar, ou não, o sinal de tensão de 3,3 V na entrada do circuito, observando a atuação do relé e ligamento/desligamento da bomba. Vale lembrar que o circuito

é alimentado por uma fonte de 12 V DC, e que a bomba vai conectada na saída do relé.

3.2. FIRMWARE

O firmware do projeto é formado basicamente por cinco programas principais, sendo estes:

- PIDController
- TriacPowerControl
- ADC
- Cli_Task
- Process_Control

Na Figura X é apresentado um fluxograma que simplifica o funcionamento do sistema completo.

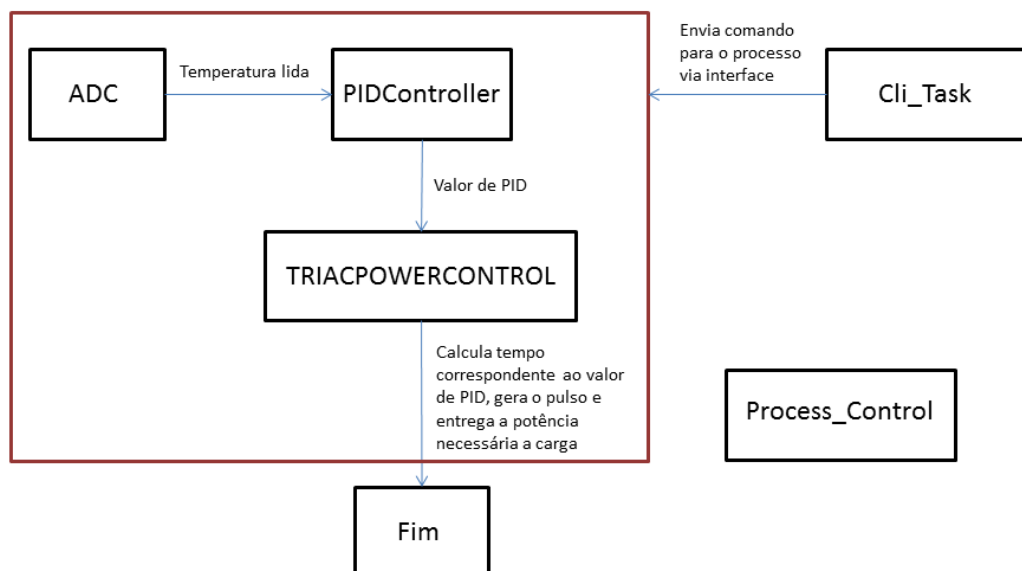


Figura 37 – Fluxograma Firmware
Fonte: Fotografia de autoria própria.

O processo se inicia com a aquisição de uma amostra de temperatura no código ADC. Essa aquisição é utilizada para calcular um valor para o

controlador dentro do código PIDController que será responsável, mais adiante, por regular a potência entregue à carga resistiva no código TriacPowerControl.

A aquisição de temperatura, assim como o cálculo de um valor para o controlador, são feitos ciclicamente seguindo a frequência de suas respectivas *tasks*, enquanto o cálculo do posicionamento do pulso de controle é desempenhado na frequência da interrupção de cruzamento por zero. O posicionamento do pulso de controle para o TRIAC será proporcional ao valor de potência necessária calculado pelo controlador PID.

O Cli_Task é responsável por operar os comandos solicitados pelo operador através da interface gráfica do usuário, enquanto o Process_Control será um código paralelo, responsável pela sequenciação das etapas de fabricação da cerveja artesanal.

3.2.1. PIDCONTROLLER

A função deste programa é calcular valores de ganho proporcional, integral e derivativo correspondentes à temperatura do processo lida no código do ADC. O cálculo do PID é efetuado ciclicamente em um período de 9 ms, definido pela *task* do PID. Este valor em milissegundos foi definido para que o código efetuasse os cálculos do controlador para cada semiciclo da rede elétrica (8,33 ms), de forma a sempre calcular o PID baseado em um novo valor de temperatura coletado.

O fluxograma apresentado na Figura 37 apresenta a sequência de ações definidas nessa parte do controle.

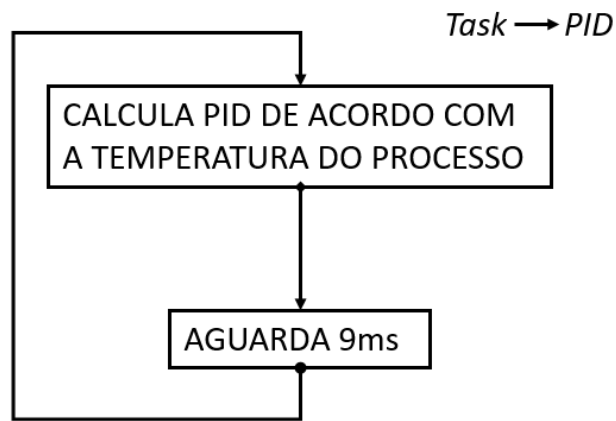


Figura 38 – Fluxograma do PID
 Fonte: Autoria própria.

Toda vez que o PID é chamado, o erro entre a temperatura de *setpoint* e a temperatura lida pelo sensor é calculado e atribuído à uma variável. Esta variável será operada no cálculo dos ganhos do controlador. Ao final, o PID é composto pela soma dos valores dos ganhos calculados e atribuído a uma variável no código TRIACPOWERCONTROL que será responsável pelo controle da potência entregue à carga.

Não foi necessário implementar o ganho derivativo, uma vez que com proporcional e integral o processo já respondeu de modo suficientemente estável, e este ganho poderia atribuir ainda mais ruídos ao sistema devido ao caráter preditivo.

A task trabalha ciclicamente seguindo uma frequência compatível à aproximadamente um semiciclo da rede elétrica (8,33 ms). O valor de 9 ms foi implementado a fim de facilitar o projeto, uma vez que a definição da frequência como um valor decimal traria maiores dificuldades de programação, e o valor inteiro já era suficientemente eficiente para tal finalidade.

3.2.2. TRIACPOWERCONTROL

É neste código onde será feito o controle da potência entregue à carga resistiva. Há na Figura 38 um fluxograma que apresenta a sequência de ações operadas por esse programa.

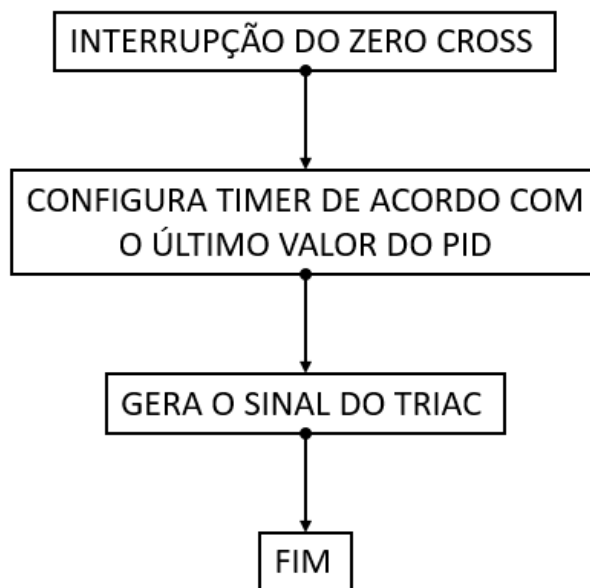


Figura 39 – Fluxograma de Controle do TRIAC
Fonte: Autoria propria.

Para o fluxograma apresentado, o primeiro ponto é a geração da interrupção do *zero cross handler*, responsável por configurar o timer para controle da potência com a informação coletada do cálculo do PID. Com o último valor calculado, gera um pulso de controle para cada semiciclo da rede. A posição do pulso é dada através de um cálculo de tempo em milissegundos proporcional à porcentagem de potência que será entregue à carga resistiva. Por exemplo, se o cálculo do PID exigir 30% da potência total, uma função dentro desta interrupção irá calcular um valor de tempo proporcional para posicionar o pulso de controle de modo a entregar à carga a potência calculada. Desta forma, toda vez que o PID é calculado, a função recalcula o valor do tempo para o pulso correspondente.

3.2.3. ADC

Nesta parte do controle é feita a aquisição das amostras de temperatura para cálculo do valor de PID. Um fluxograma da sequência de ações é apresentado na Figura 39. Para esta aplicação a frequência de 8,33 ms é definida no *free_RTOS*, o sistema multitarefa que opera os códigos.

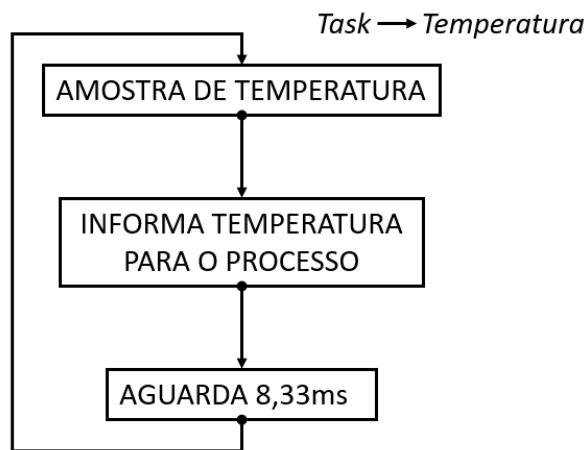


Figura 40 – Fluxograma da aquisição da temperatura
Fonte: Autoria própria.

O processo se inicia com a aquisição das amostras, que têm por finalidade informar ao código a temperatura atual do processo. Isto é feito através da conversão dos valores analógicos lidos pelo PT100 em um correspondente digital que o microcontrolador consiga trabalhar. Uma *task* é responsável por reiniciar o processo ciclicamente, aguardando sempre um período de 8,33 ms, correspondente a um semiciclo da rede elétrica, para coletar a amostra de temperatura.

No que se refere à conversão de valores, a leitura analógica de 0 a 3,3 V corresponde a uma escala de 0 a 4095 no microcontrolador, uma vez que este é de 12 bits. Uma variável é responsável por receber o valor digital lido na porta e o transformar em um valor de temperatura, que será utilizado mais a diante para cálculo do controlador PID.

3.2.4. CLI_TASK

No código CLI_TASK encontram-se os comandos referentes à interação entre o operador e o que ele gostaria de configurar via terminal. Os comandos programados neste código e suas respectivas funções são apresentados em sequência.

- *Help*: Exibe lista de comandos disponíveis e uma breve explicação da função.
- *SetProcessRamp*: Adiciona uma rampa de temperatura ao processo.

- *SetProcessWait*: Adiciona um patamar no processo de temperatura.
- *DeleteProcessSegment*: Apaga um segmento de temperatura do processo.
- *GetProcessSegment*: Exibe lista de todos os segmentos configurados em *SetProcessRamp* e *SetProcessWait*
- *GetProcessStatus*: Retorna o estado atual do processo de controle.
- *SetPump*: Configura o estado da bomba d'água do processo.
- *StopProcess*: Para o processo de controle, o estado atual do sistema é mantido, o tempo de processo é interrompido.
- *SetProcessPhase*: Configura a fase atual do processo de acordo com as especificações. Deve ser seguida de um *StartProcess*.
- *StartProcess*: Inicia o processo de controle.
- *OpenLoop*: Configura a panela para funcionar em malha aberta.

A Figura 40 apresenta o fluxograma que descreve a sequência de ações para solicitação de comando do CLI_TASK.

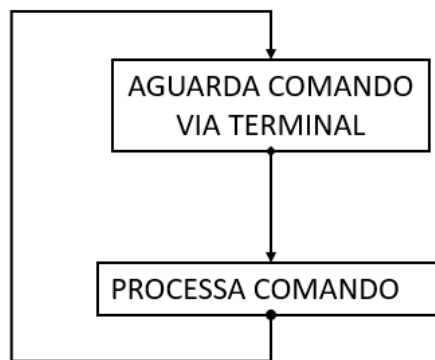


Figura 41 – Fluxograma do CLI_TASK
Fonte: Autoria própria.

A *task* fica aguardando qualquer comando que o mestre cervejeiro incluir via terminal e, de acordo com a função solicitada e parâmetros atribuídos, o código processa o comando, estando novamente disponível para nova solicitação do operador.

3.2.5. PROCESS_CONTROL

O programa *PROCESS_CONTROL* é um código que trabalha paralelamente em relação aos demais apresentados. É encontrado nele a lógica de sequenciação das etapas de fabricação da cerveja (*Start*, *Setup*, *Preheat*,

Mashing, Boil), isto é, implementam-se condições que serão responsáveis por alterar as etapas conforme o processo evolui.

Há neste código a implementação da lógica que define valores de setpoint para as etapas de *PREHEAT*, *MASHING* e *BOILING*, correspondentes ao pré-aquecimento da água, brassagem e fervura. Além disso, é definido também quais ações devem ser tomadas para determinadas fases do processo, como acionar ou não a bomba, definir potência máxima da carga e aplicar o controlador calculado ao processo.

Na etapa de brassagem (*MASHING*), é implementada a lógica que define o *setpoint* das rampas e patamares do processo, de forma a configurá-lo de acordo com os tempos e temperaturas solicitados pelo operador.

3.3. INTERFACE GRÁFICA DO USUÁRIO

A interface gráfica do usuário (do inglês *Graphical User Interface* – GUI) é o software criado que oferece e realiza a interação entre o usuário e máquina. As GUIs substituem as interfaces de comando de linha (CLI), na qual uma palavra-chave é digitada e seu comando realizado. Os sistemas CLI requerem que o usuário memorize os comandos, os sistemas GUI permitem uma abordagem intuitiva e visivelmente melhor. O comando enviado e recebido é programado dentro do microcontrolador.

3.3.1. Interface GUI

A interface final do usuário, apresentada na Figura 41, foi criada no Visual Studio em linguagem C# (C Sharp).

O sistema para aquisição de dados do terminal é composto pelo microcontrolador conectado a uma porta serial do PC, recebendo os parâmetros através da interface do usuário. Cada elemento inserido no formulário recebe um

nome. E ao clicar no elemento inserido, pode-se programar conforme necessário.

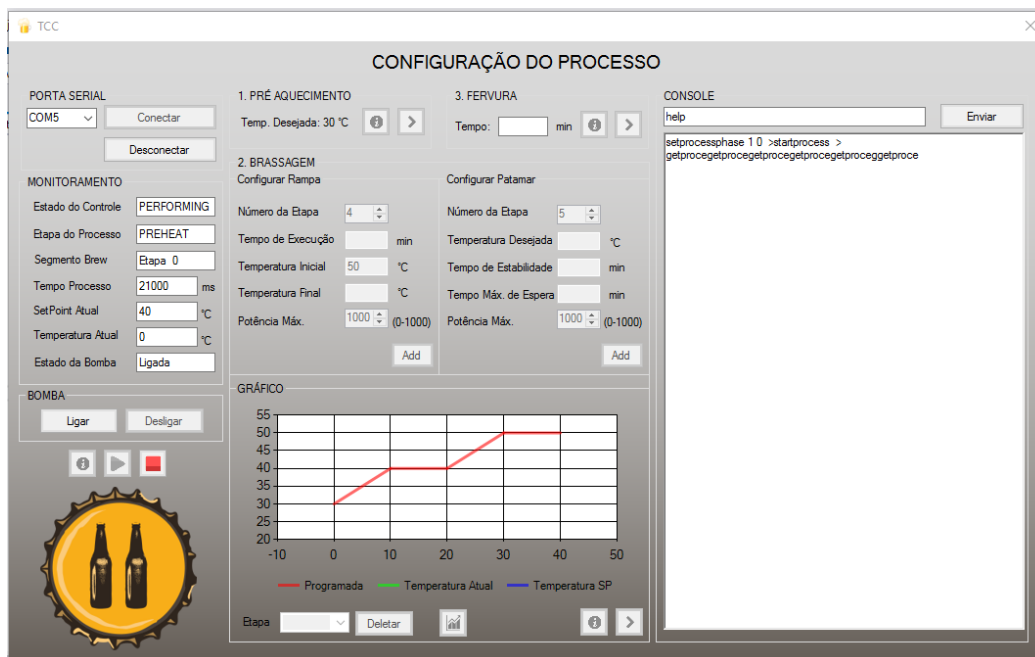


Figura 42 – Interface Gráfica do Usuário
Fonte: Fotografia de autoria própria.

3.3.1.1. Programa em C#

Para explicar a programação feita em C#, a interface foi dividida em segmentos conforme mostrado na Figura 42 abaixo.

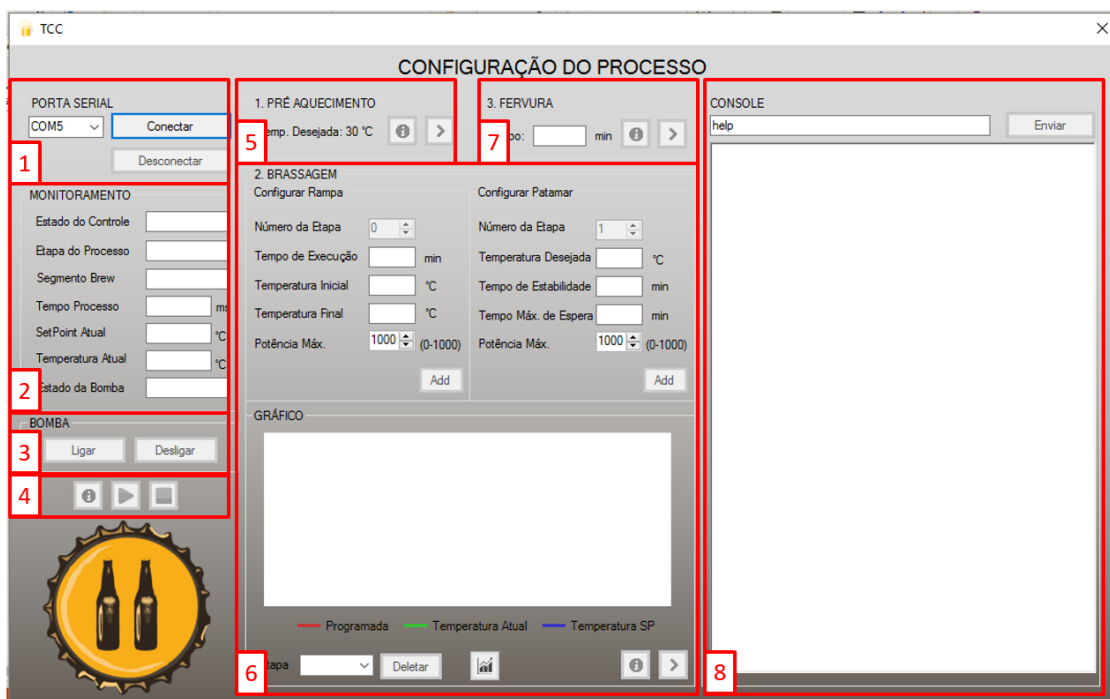


Figura 43 – Interface Gráfica do Usuário em Segmentos
Fonte: Fotografia de autoria própria.

1 – Porta Serial (Figura 43)

Nessa parte do formulário é onde o usuário seleciona a porta serial desejada para que a conexão com o microcontrolador seja feita. O programa identifica quais portas seriais estão disponíveis e exibe dentro da *combox*. Ao clicar no botão conectar, ele define a taxa de transmissão de 115200, abre a porta selecionada e configura mais alguns elementos. O botão desconectar, fecha a porta COM aberta.

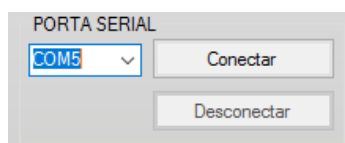


Figura 44 – Interface Gráfica – Porta Serial
Fonte: Fotografia de autoria própria.

2 – Monitoramento (Figura 44)

Os dados são monitorados através de caixas de textos que mostram o status do processo. Para isso, o programa, através de um timer, envia o comando `GetProcessStatus` a cada 3 segundos para o microcontrolador e divide a string retornada, em substrings. Cada substring dividida é encaminhada para

sua caixa de texto correspondente. O timer é ativado quando o botão start é clicado.

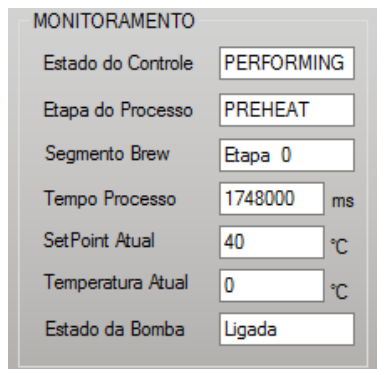


Figura 45 – Interface Gráfica – Monitoramento
Fonte: Fotografia de autoria propria.

3 – Bomba (Figura 45)

A bomba é acionada automaticamente no processo, mas caso o cervejeiro queira acionar a bomba em outras ocasiões, pode fazer isso através do botão ligar. Ao apertar em Ligar, é enviado para o microcontrolador o comando SetPump 1 e ao apertar o botão Desligar, o comando enviado é SetPump 0.



Figura 46 – Interface Gráfica – Bomba
Fonte: Fotografia de autoria propria.

4 – Start/Stop do Processo (Figura 46)

O botão Start deve ser acionado apenas depois de configurar a curva de temperatura da brassagem, por isso ele é habilitado assim que a primeira rampa é adicionada ao processo. Ao apertar o botão Start, são enviados ao microcontrolador os seguintes comandos: SetProcessPhase 1 0 (indicando que o programa vai começar no *Preheat*) e StartProcess. O botão de Stop, envia o comando StopProcess.



Figura 47 – Interface Gráfica – Start/Stop
Fonte: Fotografia de autoria propria.

O botão de informação exibe outro formulário com informações de como a panela deve estar antes de iniciar o processo (Figura 47). Esses formulários que aparecem entre as etapas, são os mesmos passos descritos na sub-seção 2.1.14. É importante os passos serem seguidos para que não haja falha no processo.



Figura 48 – Interface Gráfica – Informação
Fonte: Fotografia de autoria própria.

5 – Pré – Aquecimento (Figura 48)

A temperatura desejada na etapa de pré-aquecimento é programada dentro do microcontrolador. Ao iniciar o programa, o campo Estado do Controle passa de WAITING para PERFORMING, ao chegar em um valor entre 98% e 102% da temperatura desejada, e permanecer nesse intervalo durante 10 segundos (programação feita no microcontrolador), o status do controle muda para DONE.

Ao acabar o pré-aquecimento, o segundo botão de Informação e o botão próxima etapa são ativados. Ao apertar próxima etapa, o comando enviado para o Tiva é SetProcessPhase 2 0 (2 de brassagem) + StartProcess e um segundo timer é ativado que roda a função chartRT() a cada 3s. Essa função plota a temperatura atual e a temperatura de *setpoint* no gráfico em tempo real.

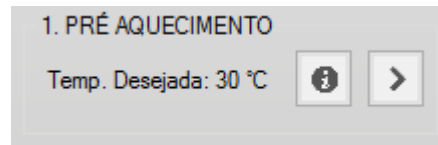


Figura 49 – Interface Gráfica – Pré-aquecimento
Fonte: Fotografia de autoria própria.

Assim como o primeiro botão de informação, o segundo botão mostra as mudanças (Figura 49) que devem ser feitas na panela para que etapa de brassagem se inicie.



Figura 50 – Interface Gráfica – Informação
Fonte: Fotografia de autoria própria.

6 – Brassagem (Figura 50)

A etapa de brassagem deve ser configurada antes de se iniciar o processo. A curva de temperatura é criada conforme as rampas e os patamares forem adicionados pelo usuário. Caso uma rampa seja adicionada, o comando enviado ao microcontrolador é `SetProcessRamp` + os parâmetros que são coletados das caixas de texto preenchidas pelo usuário. O mesmo é feito ao adicionar um patamar: `SetProcessWait` + parâmetros.

O usuário tem a opção de deletar a última etapa adicionada através do botão deletar, que envia o comando `DeleteSegment` + Segmento selecionado na *ComboBox*. O botão com um gráfico, ao ser clicado, exibe no console as etapas programadas até o momento.

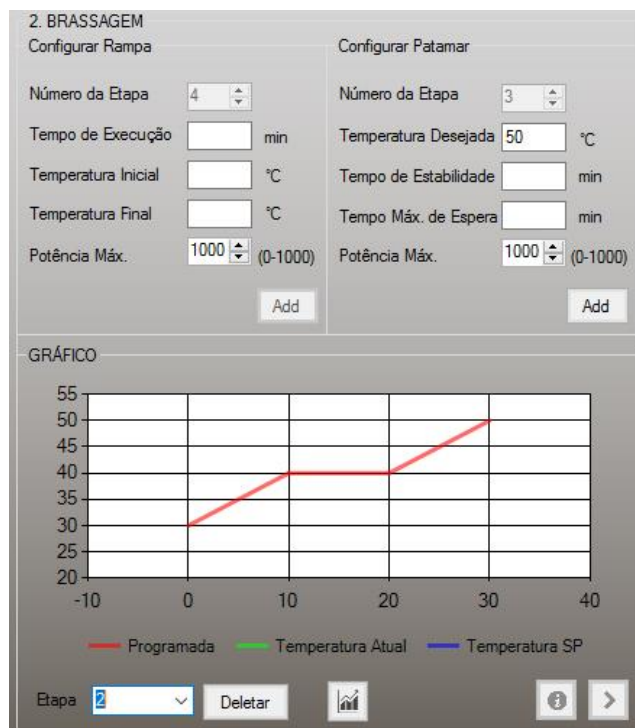


Figura 51 – Interface Gráfica – Brassagem
Fonte: Fotografia de autoria própria.

Ao concluir a etapa de brassagem, o Estado do Controle passa de *PERFORMING* para *DONE*, e nesse momento o terceiro botão de informação e o botão próxima etapa são acionados. Ao apertar próxima etapa, o micro recebe os comandos *SetProcessPhase 3 0* (3 para fervura) + *StartProcess*.

O botão de informação pré fervura exibe uma sequência de formulários (Figura 51), pois entre a brassagem e a fervura deve ser feito a lavagem.

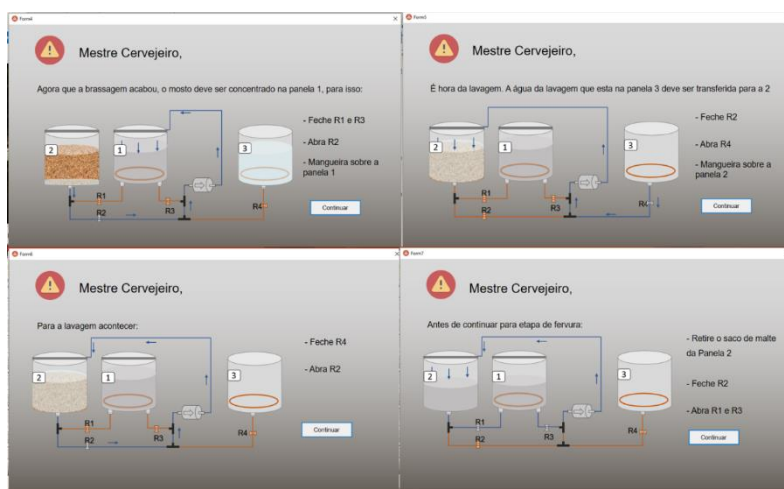


Figura 52 – Interface Gráfica – Informações
Fonte: Fotografia de autoria própria.

7 – Fervura (Figura 52)

Para a etapa de fervura, o único dado exibido é o tempo em que o mosto está fervendo. Quando a etapa finalizar e o Estado do Controle passar para *DONE*, o último botão de informação é habilitado.

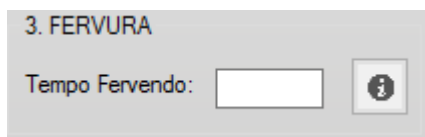


Figura 53 – Interface Gráfica – Fervura
Fonte: Fotografia de autoria propria.

Ao clicar no botão de informação, outros dois formulários, apresentados na Figura 53, abrem com um passo a passo do que deve ser feito para transferir o mosto para a etapa de fermentação.

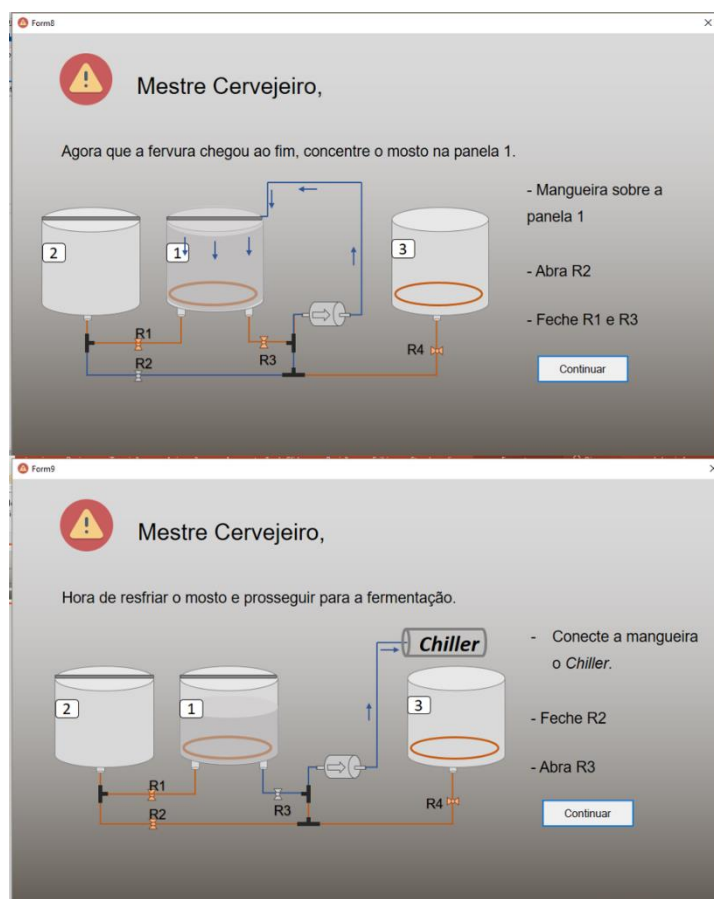


Figura 54 – Interface Gráfica – Informações
Fonte: Fotografia de autoria propria.

3.4. INTEGRAÇÃO E RESULTADOS

Primeiramente, uma imagem de todos os circuitos conectados e operando em conjunto é apresentada na Figura 54.

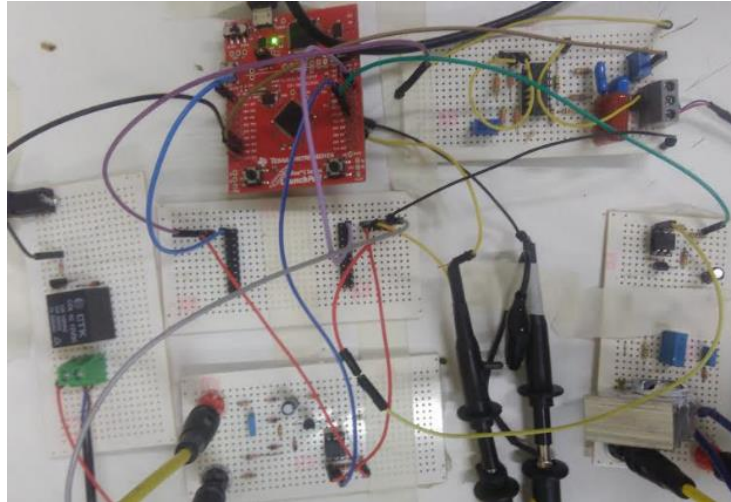


Figura 55 – Hardware conectado e operante
Fonte: Fotografia de autoria propria.

Tendo concluído a montagem dos circuitos, a programação e integração dos códigos no microcontrolador e a criação da interface, os integrantes da equipe puderam passar para a montagem do protótipo, a fim de coletar dados para sintonizar o controlador PID.

O protótipo mecânico foi montado utilizando um balde plástico com aproximadamente cinco litros de água, um cabo quente de 1 kW, o transdutor de temperatura PT100 e a bomba já especificada nesse trabalho, e o processo foi operado em 127 V. Os testes para sintonia do controlador foram feitos em escala reduzida. O resultado da montagem do protótipo está apresentado na Figura 55.

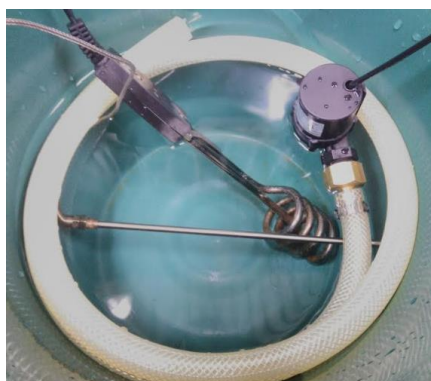


Figura 56 – Protótipo Mecânico para Sintonização do PID
Fonte: Fotografia de autoria propria.

Inicialmente os testes foram feitos para certificação do bom funcionamento da interface gráfica. Tendo garantido o sucesso na operação desta, partiu-se para coleta de dados e sintonia do controle.

Com o objetivo de sintonizar o PID e considerando as características construtivas do protótipo montado, como o material do balde usado como recipiente, a equipe optou por não configurar altas temperaturas e tempos longos. As temperaturas e tempos configurados são apresentados abaixo:

- Temperatura de Pré-Aquecimento: 30°C;
- Primeira Rampa da Brassagem: 30°C até 35°C em 5min;
- Primeiro Patamar da Brassagem: 35°C durante 2,5min;
- Segunda Rampa da Brassagem: 35°C até 40°C em 5min;
- Segundo Patamar da Brassagem: 40°C durante 2,5min;
- Fervura: 45°C durante 2,5 min.

Tem-se a seguir um exemplo de como esses dados seriam digitados no terminal (para a interface os dados de tempo e temperatura são inseridos nos campos anteriormente indicados).

```
SetProcessRamp -1 300000 300 350 1000
SetProcessWait -1 350 150000 150000 1000
SetProcessRamp -1 300000 350 400 1000
SetProcessWait -1 340 150000 150000 1000

SetProcessPhase 1 0
StartProcess

//(Quando Pré-Aquecimento = DONE)
SetProcessPhase 2 0
StartProcess

//(Quando Brassagem = DONE)
SetProcessPhase 3 0
StartProcess
```

Os dados do processo foram coletados para três configurações diferentes das variáveis de controle K_p , K_i e K_d , porém as especificações de tempo e temperatura das rampas e patamares, assim como a quantidade de água, foram mantidas iguais para todas as situações.

A escolha de valores para as variáveis K_p , K_i e K_d foi feita empiricamente, e os resultados dos três testes de sintonia são apresentados em sequência.

Para cada teste realizado foi calculado a média do erro percentual para verificar qual das sintonizações abaixo teve o menor erro e, portanto, qual sintonização deve ser escolhida para realização do teste final. Abaixo tem-se a fórmula do erro percentual:

$$\text{Erro(\%)} = \frac{\text{Temperatura de SetPoint} - \text{Temperatura Medida}}{\text{Temperatura de SetPoint}} * 100$$

Quanto mais baixo o erro percentual calculado, melhor é o resultado da sintonização. Um sistema ideal, sem ruídos, teria um erro percentual muito próximo de zero.

- **TESTE 1:**

O resultado da primeira coleta é apresentado na Figura 56. Nesta, a curva em azul representa o *SetPoint* configurado, enquanto a curva em vermelho representa a temperatura real do processo, obtida pela leitura do sensor. Os valores arbitrados para esta primeira situação foram: $K_p= 100$; $K_i= 0.5$; $K_d= 0$. O gráfico resultante do primeiro teste realizado tem uma média de erro percentual de **5,25%**.

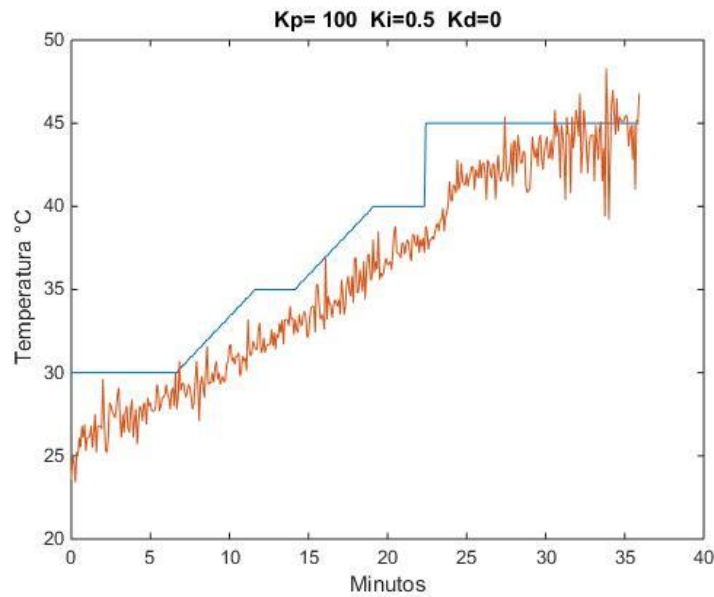


Figura 57 – Gráfico para a Primeira Coleta
Fonte: Aquisição de imagem do MatLab de autoria própria.

- **TESTE 2:**

Observando a ineficiência do controle no processo para a configuração anterior, os alunos arbitraram novos valores para as variáveis. O ganho proporcional foi aumentado e o integral diminuído, a fim de tornar a resposta mais rápida. Os novos valores configurados foram $K_p= 500$; $K_i= 0.2$; $K_d= 0$, e o resultado é apresentado na Figura 57. A média do erro percentual para esse segundo teste realizado é de **3,1%**.

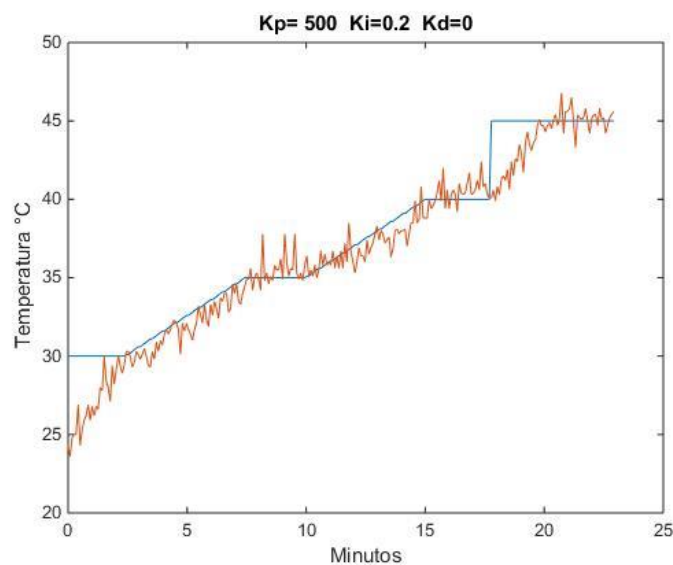


Figura 58 – Gráfico para a Segunda Coleta
Fonte: Aquisição de imagem do MatLab de autoria própria.

- **TESTE 3:**

Na intenção de tornar o processo ainda mais rápido o ganho proporcional foi novamente incrementado para a terceira coleta de dados. Os resultados para esta última situação estão expostos na Figura 58, e a configuração dos ganhos foi $K_p = 800$; $K_i = 0.35$; $K_d = 0$. O terceiro teste realizado obteve uma média de erro percentual **2,71%**.

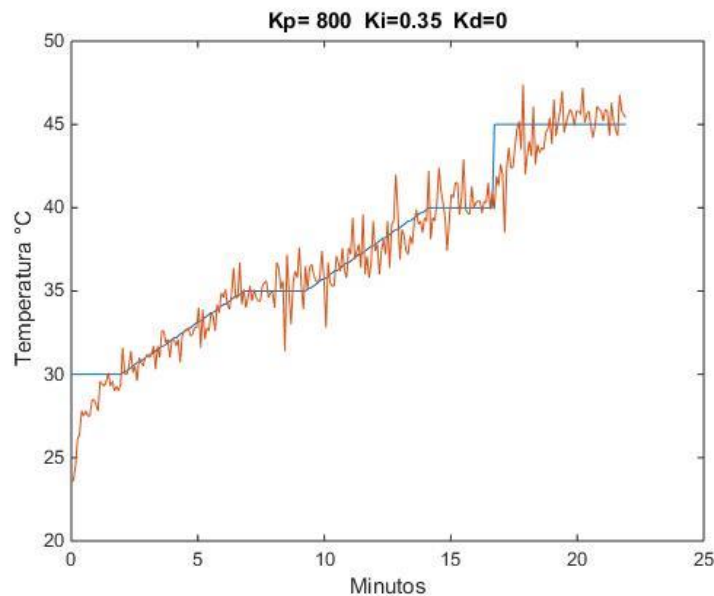


Figura 59 – Gráfico para a Terceira Coleta
Fonte: Aquisição de imagem do MatLab de autoria própria.

Vale lembrar que a sintonia é feita empiricamente. O levantamento dos ganhos é para uma situação genérica, não considerando a mudança no perfil das rampas e patamares. Para um controle ainda mais eficiente, de forma que o processo se adaptasse automaticamente para configurações distintas, seria necessário buscar um controlador mais poderoso, a fim de efetuar controle ótimo.

- **TESTE FINAL:**

Com o PID devidamente sintonizado, a fim de simular uma situação real, a equipe realizou um último teste com os valores de temperaturas mais elevadas e tempos mais longos.

O teste final foi realizado com cinco litros de água em uma panela de alumínio, para aguentar a temperatura elevada. Dois debulidores de água de 1KW cada foram empregados como carga resistiva, e os termopares de três multímetros foram usados para monitoramento da temperatura. A Figura 59 representa o novo protótipo montado.



Figura 60 – Protótipo Mecânico – Teste Final
Fonte: Fotografia de autoria própria.

Para este teste, as temperaturas e tempos configurados são apresentados em sequência:

- Temperatura de Pré-Aquecimento: 50°C;
- Primeira Rampa da Brassagem: 50°C até 60°C em 7min;
- Primeiro Patamar da Brassagem: 60°C durante 10min;
- Segunda Rampa da Brassagem: 60°C até 70°C em 7min;
- Segundo Patamar da Brassagem: 70°C durante 10min;
- Terceira Rampa da Brassagem: 70°C até 80°C em 7min;

- Terceiro Patamar da Brassagem: 80°C durante 6min;
- Fervura: 90°C durante 2,5 min.

A Figura 60 apresenta a aquisição da curva do processo retirada da interface gráfica. Nesta, a curva plotada em verde representa a temperatura atual do processo, enquanto a azul representa a temperatura definida como *setpoint*. A representação contempla apenas as curvas e patamares definidos para etapa de brassagem. Para esta situação o erro percentual não está exposto pois a aquisição foi feita pela tela gráfica da interface desenvolvida.

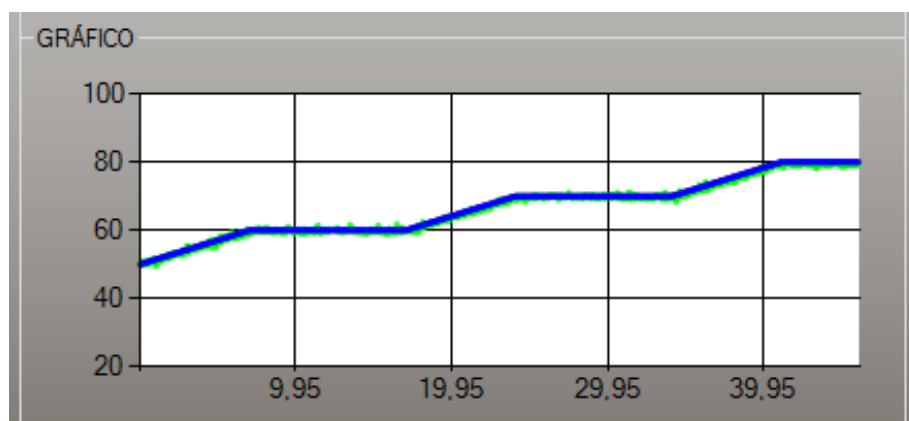


Figura 61 – Gráfico para a Coleta Final
 Fonte: Aquisição de imagem da Interface Gráfica do usuário

Quando comparado com os gráficos dos testes de sintonização do PID, o teste final parece responder de forma bem mais estável. Isso acontece devido à escala empregada no eixo das ordenadas, que corresponde à temperatura do processo. Enquanto as aquisições do Matlab apresentavam uma faixa de temperatura de 20 a 50 °C no eixo Y, tornando qualquer variação bastante visível, no último teste, utilizando interface, a faixa de 20 a 100 °C torna as variações mais imperceptíveis.

A exibição de temperatura é feita sempre com o dado de aquisição do sensor. Para o cálculo de PID, porém, foi feita uma média de aquisições, de forma que a variação ocasionada pelos ruídos não interferisse significativamente no processo de controle.

Essa aquisição de dados ainda mais aplicada ao processo, com tempos maiores e temperaturas mais elevadas, mostra como o controle está sendo efetuado de maneira eficiente.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Neste ponto do trabalho a primeira consideração importante é definir o que de fato foi alcançado e o que pode ser deixado como projeto futuro. A construção dos circuitos, validação do funcionamento integrado aos códigos de controle e operação da interface para um protótipo, comprovam que a equipe foi capaz de demonstrar os conceitos do que apresentou anteriormente como objetivos. A intenção de apresentar o controle de temperatura funcional para a etapa de brassagem da fabricação de cerveja artesanal foi alcançado com êxito.

A parte mecânica ficou apresentada como projeto, que após estudos e várias adaptações pareceu funcional e eficiente para a equipe, faltando de fato a implementação e validação, parte esta que pode ser viabilizada como projeto futuro, uma vez que todo o restante do projeto como um todo depende deste. Nesse ponto o desenvolvimento de um sistema automático de válvulas para sequenciação das etapas de fabricação também traria facilidade ao processo. Outro ponto interessante para o futuro é a adaptação da interface gráfica em um aplicativo para *smartphone* e *tablet*, tornando o processo ainda mais moderno e acessível. O controle de temperatura na panela que esquenta água para o processo de lavagem também pode ser implementado em rojetos futuros, já que não é parte componente deste.

O desenvolvimento deste projeto, ainda que tendo inicialmente construído estrutura teórica para compreensão do processo e busca por alternativas que eram tecnologias já usadas e difundidas, junto a conceitos já compreendidos pelos integrantes da equipe durante a graduação, apresentou algumas dificuldades de implementação e alguns desafios. Dentro das suas limitações, porém, como financeira para buscar soluções ótimas e indisponibilidade de equipamentos mais precisos, a equipe conseguiu alcançar um ponto satisfatório e desenvolver bem o conceito que teve por objetivo. Muitos pontos que ficaram definidos ao final do TCC1 só demonstraram sua real dificuldade de

implementação no momento da montagem e integração do sistema. Quanto a isso, foi requerido da equipe uma readaptação e reformulação do trabalho, a fim de apresentar o conteúdo ao que se propuseram. O projeto apresentado é um protótipo funcional do que, no futuro, com estudo e otimização, pode se tornar um ótimo produto com potencial comercial.

Os primeiros contratempos surgiram já na etapa de montagem e testes da parte de hardware, contemplada pelos circuitos elétricos. Alguns tiveram excelente funcionamento desde o começo por ter operação e compreensão simples, como o circuito de cruzamento por zero, gradador com o ótimo controle de potência do TRIAC e acionamento da bomba. O circuito de condicionamento de sinal do PT100, porém, desafiou a equipe em relação à sua operação. Inicialmente foi montado um circuito para essa finalidade que, após simulado e testado, não operou conforme a necessidade do projeto. Isso fez com que a equipe devesse buscar uma segunda opção, chegando à solução apresentada neste trabalho. O problema do circuito implementado para tal é a pequena faixa de operação, na ordem de 0.5 V, que a equipe conseguiu garantir como máxima para que o sensor funcionasse. Para tal, o ponto negativo está no fato de um pequeno ruído do sistema poder atrapalhar significativamente a correta leitura de temperatura do mesmo. Para elevadas temperaturas o funcionamento do circuito pareceu um pouco menos eficiente no que diz respeito ao comportamento linear. Para aplicações futuras pode ser feito um melhor dimensionamento e ajuste do circuito de condicionamento, melhor calibração do sistema e utilização de instrumentação mais exata para definição do erro de *offset*, ou mesmo busca por uma opção ainda mais adequada de circuito.

Garantindo êxito na operação dos circuitos, novos desafios surgiram no momento de implementação dos códigos de controle. A inicial falta de compreensão da equipe com as funções específicas do microcontrolador impediu que o trabalho de programação fosse mais rápido e fluido. Desta forma foi necessário bastante estudo e entendimento da operação para que, apenas depois, os alunos pudessem de fato focar na implementação dos conceitos de controle.

É necessário ressaltar que o controle foi sintonizado para condições específicas de volume, líquido e capacidade máxima da resistência. Para situações diferentes (uma panela com outro volume, com o mosto propriamente

dito e uma resistência de maior potência) a sintonia deve ser refeita a fim de obter sucesso no processo de controle. É importante pontuar que, tendo feito os testes apenas com aquecimento de água, é necessário ver o êxito na operação da bomba, por exemplo, para o mosto, uma vez que se altera a densidade do líquido.

É apresentado neste trabalho o desenvolvimento de um projeto mecânico, validação dos circuitos e códigos de controle que, conforme testes e coleta de dados utilizando protótipo, mostraram funcionamento eficiente, trabalhando em conjunto com uma interface gráfica bastante simples e visual. Muitas melhorias podem ser feitas, visando chegar numa solução ótima com baixo custo de implementação. A estrutura para isso é aqui apresentada de maneira clara, deixando aberto o espaço para otimização do resultado alcançado pela equipe.

4. REFERÊNCIAS

BRAGA, Newton. **Comandos de Relés (ART673)**. Disponível em: < <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/eletronica/57-artigos-e-projetos/5086-art673> >. Acessado em 12 de maio de 2016.

COUTINHO, Carlos Alberto Tavares. **A História da Cerveja no Brasil**. Disponível em: < <https://www.cervesia.com.br/historia-da-cerveja/72-a-historia-da-cerveja-no-brasil.html> >. Acessado em 12 de outubro de 2015.

DEXTREL. **DIY - Isolated High Quality Mains Voltage Zero Crossing Detector**. Disponível em: < <http://www.dextrel.net/diyzerocrosser.htm> >. Acessado em 15 de março de 2016.

ELECTROSCHEMATICS. **Universal Triac Control with Optocoupler**. Disponível em: < <http://www.electroschematics.com/6561/universal-triac-control-with-optocoupler> >. Acessado em 15 de março de 2016.

EXACTA. **Princípio e características técnicas para termorresistências PT-100**. Disponível em: < <http://www.exacta.ind.br/?p=conteudo&id=197> >. Acessado em 6 de abril de 2016.

HOMINILÚPULO. **Brassagem avançada**, nov. 2011. Disponível em: <<http://www.hominilupulo.com.br/cervejas-caseiras/brassagem-avancada>>. Acessado em 21 de outubro de 2015.

MICROCHIP. **Precision Temperature-Sensing with RTD Circuits**. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00687c.pdf>>. Acesso em 20 de novembro de 2016.

MICROSOFT. **Developer Network**, 2015. Disponível em: <<https://msdn.microsoft.com/pt-BR/library/kx37x362.aspx>>. Acesso em 3 de janeiro de 2017.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Explicando a Teoria PID**, dez. 2011. Disponível em: < <http://www.ni.com/white-paper/3782/pt/> >. Acessado em 3 de junho de 2016.

NOMADE KRAFT BIER. **Teorias para determinar a potência de uma resistência**, jan. 2012. Disponível em: <<http://nomade-kraftbier.blogspot.com.br/2012/01/produzindo-cerveja-artesanal-teorias.html>>. Acessado em 10 de março de 2016.

NOVUS. **Acionamento de cargas por ângulo de fase e por trem-de-pulso**. Disponível em: <<http://www.novus.com.br/downloads/Arquivos/artigo%20news.pdf>>. Acessado em 2 de abril de 2016.

ORDONEZ, Edward David; PENTEADO, Cesar Giacomini; SILVA, Alexandre César. **Microcontroladores e FPGAs: Aplicações em Automação**. Novatec Editora, 2006.

PALMER, John. **How to Brew**. 1 Edição. Natl Book Network, 2006.

PLEZURO. **Qual o Melhor Aplicativo para Receitas de Cerveja?** Jul. 2015. Disponível em: <<http://www.plezuro.org.br/inicio/qual-o-melhor-aplicativo-para-receitas-de-cerveja>>. Acessado em 14 de junho de 2016.

REATOR QUIMICO. **Processo de Mosturação em Cervejaria**. Disponível em: <<https://reatorquimico.wordpress.com/2009/12/02/processo-de-mosturacao-em-cervejaria>>. Acessado em 15 de outubro de 2015.

SILVA, David. Condado da Cerveja. **Aprenda mais sobre a Brassagem da Cerveja Artesanal**, mar. 2015. Disponível em: <<http://www.condadodacerveja.com.br/aprenda-mais-sobre-a-brassagem-da-cerveja-artesanal>>. Acessado em 16 de outubro de 2015.

SILVA, David. Condado da Cerveja. **Aprenda mais sobre Clarificação e Lavagem do Mosto**, mar. 2015. Disponível em: <<http://www.condadodacerveja.com.br/aprenda-mais-sobre-clarificacao-e-lavagem-do-mosto/>>. Acessado em 25 de março de 2016.

STMICROELECTRONICS. **BTA40, BTA41 and BTB41 Series**. Disponível em: <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/22042/STMICROELECTRONICS/BTA41-600B.html>>. Acessado em 25 de março de 2016.

UTFPR. **Normas para elaboração de trabalhos acadêmicos**. Disponível em: <www.utfpr.edu.br/dibib/normas-para-elaboracao-de-trabalhos-academicos/normas_trabalhos_utfpr.pdf>. Acesso em 22 de outubro de 2015.

APÊNDICE A – Cálculo do dimensionamento do circuito de condicionamento de sinal do PT100.

Para conhecimento de valores de resistência compatíveis à temperaturas, utilizou-se a: “TABELA DE VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA COM A TEMPERATURA PARA BULBO DE RESISTÊNCIA (PT 100)”, disponibilizada em www.ecil.com.br/upload/produto/pdf/1291296955.pdf, acessado em 10 de Outubro de 2016.

Para o cálculo dos componentes do circuito são necessários seguir alguns passos. A faixa de medição de temperatura adotada foi de 0° a 100°C. Os cálculos são apresentados e executados em sequência.

Para a temperatura de 110°C, escolhida como máxima para ação do controle, a resistência do PT100 é de 142,29 Ω. A fim de obter-se uma corrente de 1mA é implementado um potenciômetro de 5 kΩ em Rref para ajustar este ganho inicial. Para I_{RREF}, tem-se:

$$V_1 = 1 \text{ mA} * 142,29 \text{ } \Omega = 0,14229 \text{ V}$$

Considerando-se o sinal de referência de 3,3V:

$$\text{GANHO} * V_1 = 3,3\text{V};$$

$$\text{GANHO} = \frac{3,3}{0,14229} = 23,19$$

O ajuste para resistência no filtro com os resistores R₁₀ e R₁₁ é dado por:

$$\frac{R_{11}}{R_{10}} + 1 = 23,19$$

$$R_{11} = R_{10} * 22,19$$

Para tal foi implementado em R₁₀ um resistor de 1 kΩ, enquanto para R₁₁ foi implementado um potenciômetro de 50 kΩ, a fim de permitir que os alunos pudessem, ainda que de posse dos cálculos, ajustar o ganho para a faixa mais adequada.