



**INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA**

**CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECATRÔNICA**

GABRIEL GONÇALVES POSSAMAI

**Automatização da fase quente do processo de
fabricação de cerveja artesanal caseira**

**Florianópolis - SC
2019**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECATRÔNICA**

GABRIEL GONÇALVES POSSAMAI

**AUTOMATIZAÇÃO DA FASE QUENTE DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE
CERVEJA ARTESANAL CASEIRA**

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

Professor Orientador: Adriano Regis, Dr.

FLORIANÓPOLIS, JULHO DE 2019.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Possamai, Gabriel Gonçalves

Automatização da fase quente do processo de fabricação de cerveja artesanal caseira / Gabriel Gonçalves Possamai; orientação de Adriano Regis. – Florianópolis, SC, 2019. 56p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Mecatrônica. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica.

Inclui Referências.

1. Automatização. 2. Cerveja Artesanal. 3. Protótipo.

I Regis, Adriano. II. Instituto Federal de Santa Catarina. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica. III. Automatização da fase quente do processo de fabricação de cerveja artesanal caseira.

**AUTOMATIZAÇÃO DA FASE QUENTE DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE
CERVEJA ARTESANAL CASEIRA**

GABRIEL GONÇALVES POSSAMAI

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

Florianópolis, 03 de julho de 2019.

Banca examinadora:

Prof. Adriano Regis, Dr.
Orientador

Prof. Francisco Edson Nogueira de Melo, M.Sc.
Membro Titular

Prof. Francisco Rafael Moreira da Mota, Dr.
Membro Titular

Prof. Raimundo Ricardo Matos da Cunha, Dr.
Membro Titular



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

DECLARAÇÃO DE FINALIZAÇÃO DE CURSO

Declaro que o estudante GABRIEL GONÇALVES POSSAMAI, matrícula 141004844-6, do curso de ENGENHARIA MECATRÔNICA, defendeu o trabalho intitulado AUTOMATIZAÇÃO DA FASE QUENTE DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL CASEIRA, o qual está apto a fazer parte do banco de dados da Biblioteca Hercílio Luz do Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.

Florianópolis, 02 de agosto de 2019.

Prof. Orientador do TCC: Adriano Regis

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por todo apoio e suporte, além do investimento na minha educação.

Ao meu irmão Rafael pelos conselhos, pelo apoio e pelos momentos que só um irmão pode proporcionar.

Ao Professor Adriano Regis, pela orientação deste trabalho.

Aos demais professores da Engenharia Mecatrônica, por terem repassado os conhecimentos que me permitiram executar este projeto.

Aos meus colegas da graduação que me apoiaram durante toda a minha formação, com os quais também aprendi muito.

À minha namorada, Nicole, pelo apoio durante todo este trabalho.

RESUMO

A praticidade alcançada pelos sistemas de automatização e controle de processos permite que a produção de cerveja artesanal caseira possa ser difundida para um maior número de usuários interessados em produzir sua própria cerveja. O processo manual, amplamente difundido, exige certo grau de expertise, dedicação no preparo, atenção e cuidados nos controles de tempo e temperatura, além de não garantir a repetibilidade do processo e a manutenção rígida dos parâmetros que interferem na qualidade final do produto. No intuito de proporcionar maior comodidade ao usuário, este trabalho propõe desenvolver um protótipo para automação e controle da fase quente do processo de fabricação de cerveja artesanal caseira, capaz de reproduzir uma gama de receitas simples, garantindo a precisão das variáveis críticas responsáveis pela qualidade final da cerveja. Para isso foi necessário projetar e construir a estrutura mecânica que suporta os subsistemas eletroeletrônicos e os equipamentos destinados às etapas de Brassagem e Fervura. O protótipo foi testado para produção de 20 litros de cerveja tipo Pale Ale e os parâmetros críticos como tempo, temperatura e densidade do mosto foram comparados com os obtidos pelo processo manual. Os resultados dos testes foram satisfatórios, comprovando a viabilidade técnica do produto e seu potencial de aplicação para fabricação de cerveja artesanal caseira.

Palavras-chave: Automatização; Cerveja Artesanal; Protótipo.

ABSTRACT

The automation and control process systems allows home brewers production to be disseminated to a greater number of users interested in producing their own beer. The manual process, widely diffused, requires a certain degree of expertise, dedication, attention and care in the controls of time and temperature, besides not guaranteeing the repeatability of the process and the maintenance of the parameters that interfere in the final product quality. In order to provide greater convenience to the user, this work proposes to develop a prototype for automation and control of the hot phase of the homemade craft brewing process, capable of reproducing a range of simple recipes, guaranteeing the precision of the critical variables responsible for the beer final quality. For this, it was necessary to design and build the mechanical structure that supports the electro-electronic systems and the equipment destined to the brewing stages. The prototype was tested for production of 20 liters of pale ale beer and critical parameters such as time, temperature and must density were compared to those obtained by the manual process. The results were satisfactory, proving the technical viability of the product and its potential of application for homemade brewing.

Keywords: Automation; Homemade beer; Prototyping

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produção utilizando um kit.....	18
Figura 2 – Produção com extrato de malte.....	19
Figura 3 – Processo de produção com grãos.....	20
Figura 4 – Equipamentos para o método utilizando grãos.....	21
Figura 5 – Painel <i>Single Vessel</i>	23
Figura 6 – System Identification MATLAB.....	26
Figura 7 – Resposta do System Identification MATLAB.....	27
Figura 8 – Diagrama de funcionamento do processo de fabricação.....	28
Figura 9 – Esboço da máquina.....	29
Figura 10 - Modelo CAD da estrutura metálica.....	31
Figura 11 - Simulação da Estrutura metálica.....	32
Figura 12 - Fixação Do quadro de comando.....	32
Figura 13 - Fixação da bomba.....	33
Figura 14 - Mecanismo de lupulagem.....	34
Figura 15 - Máquina montada.....	34
Figura 16 – Quadro elétrico.....	35
Figura 17 - Esquemático eletrônica de potência.....	35
Figura 18 – Vista interna da tampa do quadro elétrico.....	36
Figura 19 – Chaveamento do relé de estado sólido.....	38
Figura 20 – Vista lateral esquerda do quadro elétrico.....	38
Figura 21 – Vista inferior do quadro de comando.....	39
Figura 22 – Vista lateral direita do quadro de comando.....	39
Figura 23 – Esquemático da eletrônica de sinal	40
Figura 24 – Placa auxiliar.....	41
Figura 25 – IHM.....	42
Figura 26 - Criador de receitas.....	43
Figura 27 - Receita preenchida no criador de receitas.....	44
Figura 28 – Receita gerada pelo criador de receitas.....	45
Figura 29 – Controlador <i>simple_pid</i>	46
Figura 30 – Planta em malha aberta.....	48

Figura 31 – Teste controlador PI.....	49
Figura 32 – Parcela de logs do teste 1.....	51
Figura 33 – Gráfico de temperatura e setpoint do teste 2.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Temperatura de ativação das enzimas e suas funções.....	24
Tabela 2 - Lupulagem na fervura.....	25
Tabela 3 – Especificação das painéis utilizadas no projeto.....	30
Tabela 4- Lista de materiais da eletrônica de potência.....	37
Tabela 5 - Lista de materiais da eletrônica de sinal.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

LCD – Liquid Cristal Display – Tela de Cristal Líquido

IHM – Interface Homem Maquina

PWM – Pulse Width modulation - Modulação de Largura de Pulso

UDP – User Datagram Protocol - Protocolo de Internet

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Objetivos do trabalho.....	14
1.1.1 Objetivo Principal.....	14
1.1.2 Objetivos Específicos.....	14
1.2 Justificativa.....	14
1.3 Limites do Trabalho.....	15
1.4 Estrutura do Trabalho.....	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1 Produção de cerveja artesanal caseira.....	17
2.1.1 Método de produção utilizando um Kit	17
2.1.2 Método de produção utilizando extrato de malte	18
2.1.3 Método de produção utilizando grãos.....	19
2.2 Possíveis variações de receitas.....	22
2.3 Conceito de <i>single vessel</i>.....	22
2.4 Detalhamento da fase quente.....	23
2.5 Variáveis críticas da fase quente.....	25
2.6 Metodologia de controle.....	26
3. PROJETO DO PRODUTO.....	28
3.1 Requisitos do projeto.....	28
3.2 Projeto elaborado.....	28
3.3 Projeto do subsistema mecânico.....	30
3.4 Projeto do subsistema eletroeletrônico.....	35
3.4.1 Eletrônica de potência.....	35
3.4.2 Eletrônica de sinal.....	40
3.5 Explanação da programação.....	42
3.5.1 Aplicativo web.....	43
3.5.2 Software embarcado.....	45
3.6 Explanação Do Controle.....	47
4 APLICAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	50
5 CONCLUSÃO.....	53
REFERÊNCIAS.....	55
APÊNDICE A – DESENHO TECNICO DA ESTRUTURA METALICA.....	56

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o mercado de cervejas artesanais vem crescendo e junto dele a vontade de se fazer a própria cerveja em casa, expandindo o mercado de insumos e de equipamentos cervejeiros destinados à produção caseira (TOZETTO, 2017; GOOGLE TRENDS, 2019). Tal cenário abre as portas para um novo mercado de automatização dos processos de fabricação de cerveja caseira, criando espaço para novos produtos que visam trazer uma maior qualidade e facilidade para a produção da própria cerveja.

Contudo, a fabricação de cerveja artesanal, pelo próprio consumidor, é um processo demorado e exige experiência. Geralmente é feito com equipamentos rudimentares e necessita de constante atenção para o controle das variáveis como temperatura e tempo. Pequenas alterações nestas variáveis podem prejudicar a qualidade final do produto. Além desses aspectos, os usuários necessitam de várias painéis e acessórios, o que ocupa bastante espaço da residência durante um longo período de tempo (WE Consultoria, 2019).

Em face disso, surge a oportunidade de desenvolver um sistema automatizado destinado à fase quente do processo, pois esta impacta nas características finais da cerveja. A fase quente engloba a extração dos açúcares, aromas e sabores dos ingredientes. Tal etapa demanda muita atenção por parte do cervejeiro, tendo em vista que as variáveis tempo e temperatura são cruciais para a qualidade do produto e dependentes da receita escolhida. (BUSCH, 2019).

Portanto, esse trabalho busca projetar e desenvolver um sistema automatizado para a fase quente do processo de cerveja artesanal caseira. Para isso, será necessário o projeto e integração dos sistemas mecânico, eletroeletrônico e de controle por meio de *software* que facilite a interface com o usuário. No final do trabalho, espera-se que o usuário possa definir as variáveis de controle do processo de acordo com a receita de sua preferência, com o mínimo de intervenção humana e espaço utilizado, procurando manter o prazer de fazer a sua própria cerveja.

1.1 Objetivos do trabalho

Em face do exposto pode-se definir os objetivos que nortearão o trabalho. Os objetivos foram separados em objetivo principal e objetivos específicos que estão apresentados a seguir.

1.1.1 Objetivo Principal

O objetivo principal do trabalho é desenvolver um protótipo para automação e controle da fase quente do processo de fabricação de cerveja artesanal caseira, capaz de reproduzir uma gama de receitas simples.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Estabelecer os requisitos de projeto mais importantes para o usuário;
- b) Determinar as variáveis críticas da fase quente da produção de cerveja;
- c) Determinar o erro máximo das variáveis envolvidas no processo.

1.2 Justificativa

A garantia da qualidade final do produto depende de um controle preciso da temperatura e do tempo envolvidos nas etapas que compõem a fase quente do processo de produção de cerveja. No processo manual de fabricação, o pré aquecimento da água para a Brassagem é normalmente realizado com o uso de fogões à gás, cabendo ao operador realizar o controle da chama para que a temperatura final não ultrapasse o limite especificado na receita.

Mais crítico ainda, é a necessidade do operador em manter a temperatura da mistura constante durante um determinado período de tempo, enquanto executa a etapa de enxague dos grãos de cevada para retirada dos açúcares do malte. Neste ponto do processo é onde se verificam os maiores desvios de temperatura que vão

gerar uma variação da densidade do malte em função da quantidade de amido retirado do mosto.

Portanto, um sistema automatizado de controle do tempo e temperatura nestas etapas garantiria não só a precisão destas variáveis, mas também a repetibilidade do processo.

Outro aspecto que reforça a necessidade de incorporar um sistema automatizado de controle na fase quente de preparação da cerveja caseira é a flexibilidade que o sistema confere ao usuário, uma vez que o operador poderá explorar pequenas variações de receitas ajustando o tempo e temperatura de cada etapa, com a confiança de que estes parâmetros críticos serão mantidos dentro das faixas de precisão exigidas.

1.3 Limites do Trabalho

O protótipo a ser desenvolvido envolve o sistema de controle das variáveis tempo e temperatura, somente para a Fase quente do processo de produção de cerveja artesanal caseira.

O trabalho inclui também a adição de lúpulo durante o processo de fervura do mosto, permitindo variações de quantidades e tempos de adição diferenciados para três momentos de adição.

As demais fases do processo que compreendem a Fermentação e a Maturação, embora também exijam cuidados com as temperaturas e tempos envolvidos, não farão parte do escopo deste trabalho.

Também não fará parte deste trabalho a automação da etapa de preparação do malte, adição de fermento e especiarias, bem como o controle da densidade e açúcares extraídos do malte.

Para fins de teste do protótipo, este trabalho inclui apenas 2 rampas de aquecimento controladas, além da fervura, as quais são definidas pelo usuário, conforme a receita que o mesmo deseja processar.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho encontra-se estruturado em cinco capítulos. No capítulo 2 são apresentados os fundamentos básicos sobre as fases de fabricação de cerveja artesanal caseira, as variáveis críticas e os cuidados que devem ser tomados para garantir a qualidade do produto final.

O Capítulo 3 descreve a etapa de projeto do produto, envolvendo as partes mecânica, eletrônica e software, bem como os detalhes da construção do protótipo.

O quarto capítulo descreve a aplicação, teste do protótipo e análise dos resultados obtidos, enquanto que o Capítulo 5 é reservado para a conclusão e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Inicialmente será apresentado o processo de produção de cerveja artesanal caseira, dando maior ênfase para a fase quente do processo, a qual será automatizada. Por fim, são descritos os fundamentos sobre sistema de controle de processo a ser aplicado no projeto.

2.1 Produção de cerveja artesanal caseira

A primeira produção de cerveja é datada de 7000 a.C e, desde então, a fabricação vem sendo normalizada com a lei da pureza datada de 1516. O interesse pela cerveja fez com que seu processo de fabricação fosse sendo aprimorado com o passar do tempo (HUGHES, 2014).

No início, as melhorias no processo eram resultado de descobertas, como por exemplo, em 1857 quando Louis Pasteur descobriu que a levedura era responsável pela fermentação da cerveja, permitindo um maior controle desta etapa de fabricação (HUGHES, 2014).

Hoje em dia, os principais avanços se originam da necessidade de automação dos processos de produção industrial de cerveja. Durante todos esses anos foram elaboradas diversas maneiras de se produzir cerveja, entre as quais as mais utilizadas atualmente estão descritas a seguir.

2.1.1 Método de produção utilizando um Kit

O processo mais simples para fabricação de cerveja utiliza um kit que consiste de um mosto formado por água, açúcares de malte e lúpulo, previamente preparado e desidratado. Posteriormente, o usuário dilui uma certa quantidade deste composto em um volume de água determinado pela receita. Leveduras são adicionados à mistura e se dá início a fermentação.

Este método representa a maneira mais simples de se fazer cerveja, visto que não exige um conhecimento aprofundado das etapas de fabricação, utiliza poucos

equipamentos e é muito mais rápido de preparar, em comparação com os demais métodos.

Uma das desvantagens de utilizar um kit para preparação de cerveja artesanal caseira é que o usuário fica limitado ao preparo apenas daquelas receitas disponibilizadas pelo mercado. Além disso, pelo fato do mosto ser previamente produzido e desidratado, a cerveja perde em aromas e qualidade.

A Figura 1 apresenta uma imagem representativa do uso do Kit para produção de cerveja.



Fonte: Adaptada de Home Brewing (2019)

2.1.2 Método de produção utilizando extrato de malte

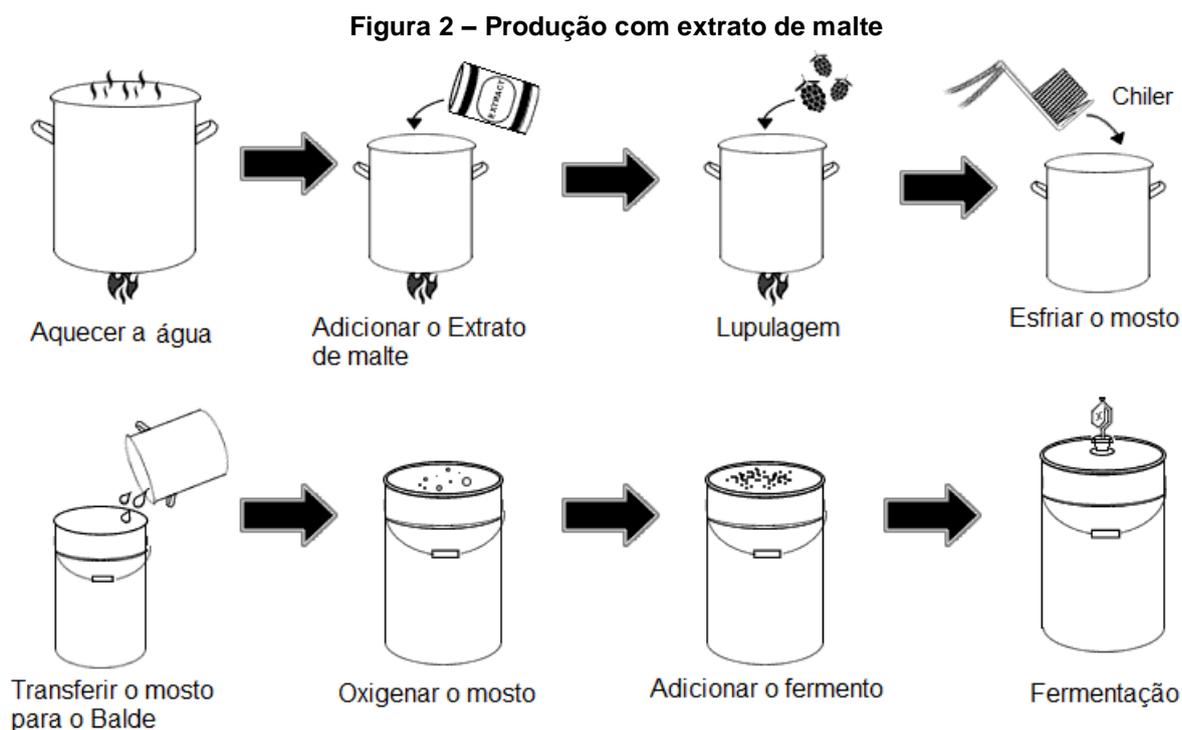
A fabricação de cerveja utilizando extrato de malte se dá pelos seguintes passos mostrados na Figura 2. Primeiramente, se faz a diluição de uma certa quantidade de extrato de malte em um volume de água determinado pela receita. Em seguida, leva-se a mistura para a fervura pelo tempo definido na receita, enquanto os lúpulos são adicionados.

Por fim, deve-se resfriar o mosto até uma dada temperatura para que a levedura possa ser futuramente adicionada. No passo seguinte, a mistura é transferida para o recipiente de fermentação onde as leveduras são adicionadas e se dá início a fase de fermentação.

Este método possibilita a produção de uma maior variedade e estilo de cervejas, pois permite a customização da receita.

Contudo, esta flexibilidade exige do usuário um conhecimento básico para o preparo da cerveja, com maior atenção às temperaturas e tempos de adição dos lúpulos e de resfriamento.

Como pontos negativos, cita-se, a necessidade de ter um maior número de equipamentos, não existir comercialmente disponíveis extratos para todos os tipos de malte e em comparação ao método anterior necessita de mais tempo para o preparo.



Fonte: Adaptada de Home Brewing (2019)

2.1.3 Método de produção utilizando grãos

O processo de fabricação de cerveja utilizando grãos está representado na Figura 3. Para aplicação deste método, parte-se do pressuposto de que o usuário dispõe previamente de uma receita e que as quantidades, tempos e temperaturas serão rigorosamente respeitadas.

Na primeira etapa do processo deve-se quebrar os grãos de malte. Paralelamente, deve-se aquecer um volume determinado de água até a uma temperatura especificada, quando então, neste instante, se despejam os grãos quebrados.

Recomenda-se agitar a água enquanto se colocam os grãos para homogeneizar a mistura. Em seguida, deve-se controlar a temperatura da mistura durante um tempo determinado pela receita.

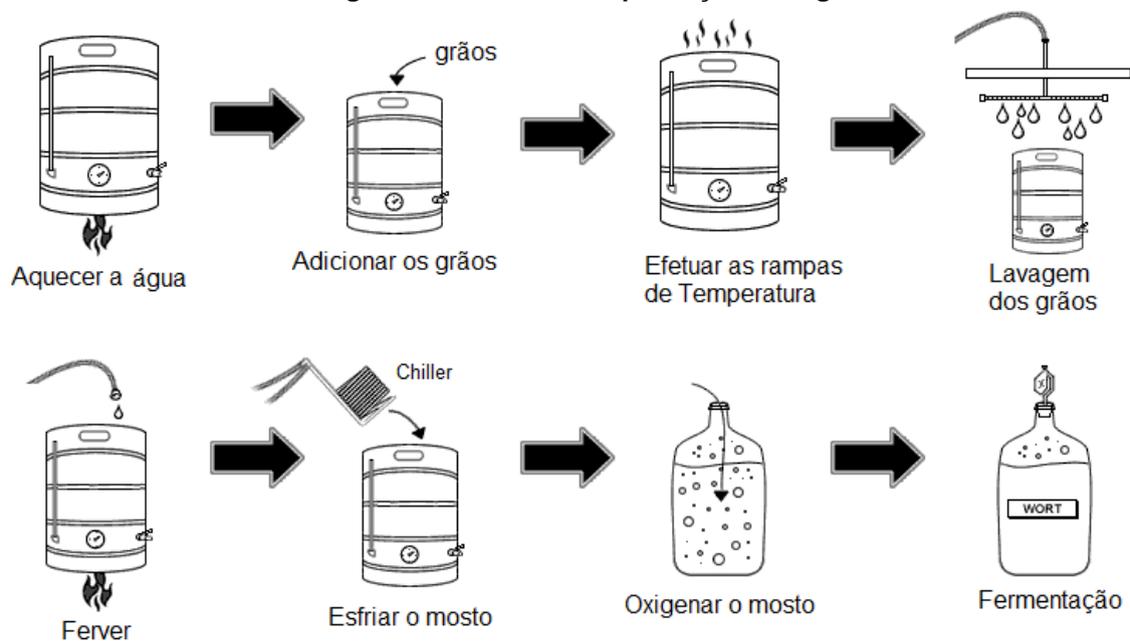
Toda vez que for necessário “ligar o fogo” para reaquecer a mistura, deve-se fazer a recirculação do líquido, por meio de uma bomba ou retirando o líquido da parte de baixo da panela e despejando de maneira suave e homogênea na parte superior.

Ao finalizar o tempo de brassagem deve-se aumentar a temperatura para dar início ao *mash out*, mantendo a recirculação do líquido.

Ao fim do *mash out* pode-se fazer a lavagem, que consiste em retirar o mosto e adicionar um certo volume de água na temperatura de *mash out* para conseguir extrair mais açúcares dos grãos.

Após este tempo, o mosto e o líquido da lavagem seguem para a panela de fervura onde o mosto será fervido e lupulado conforme a receita. Ao fim da fervura o mosto deve ser resfriado a uma temperatura em que as leveduras possam ser inoculadas, assim dando início a fase de fermentação.

Figura 3 – Processo de produção com grãos



Fonte: Adaptada de Home Brewing (2019)

O método de produção utilizando Grãos (*all-grain*) necessita de um conhecimento mais aprofundado do usuário sobre o processo de produção de cerveja.

Isto se deve ao fato de que a qualidade da cerveja está diretamente ligada ao controle preciso dos tempos e temperaturas envolvidos em cada etapa do processo. Conforme mostrado na Figura 4, este processo necessita de um número maior de equipamentos, o que pode ser visto como uma desvantagem, pois além do espaço utilizado exige maior trabalho de limpeza e preparação.

Também, é um método mais propenso a erros de operação e gera bastante rejeito e sujeira.

Apesar destas limitações, as vantagens de utilizar o método *all-grain*, pelos cervejeiros artesanais, supera os demais métodos apresentados, haja vista a infinidade de tipos de cervejas personalizadas que podem ser feitas e criadas. Além disso, este método permite a escolha detalhada dos insumos e o cervejeiro possui total controle dos processos envolvidos.

Figura 4 – Equipamentos para o método utilizando grãos



Fonte: Cerveja da casa (2019)

Embora se possa afirmar que o método *all-grain* é mais complexo que os demais, ele apresenta todas as características e os desafios mais interessantes para aquelas pessoas que desejam fazer da produção de cerveja um *hobby* especializado.

Neste sentido, a escolha do método *all-grain*, como objeto de automação para este trabalho, permitirá ao usuário se despreocupar com o controle e a precisão

das variáveis críticas que garantem a qualidade da preparação da cerveja durante a fase quente, liberando o cervejeiro para explorar todo seu potencial criativo.

Assim, nas próximas seções buscar-se-á descrever com maior profundidade a fase quente e suas variáveis críticas.

2.2 Possíveis variações de receitas

As receitas de cerveja podem variar em diversos aspectos para alcançar sabores, aromas, texturas e aparência diferenciados que a tornam única. Tais variações podem ocorrer desde o início até o fim da produção, por meio de uma seleção específica de grãos, especiarias, lúpulos e suas quantidades, características da água utilizada, temperatura e tempo de brassagem, tipo e quantidade de fermento, intervalo de tempo para adição de lúpulos e especiarias, fermentação, técnicas de maturação e até mesmo no tipo de gaseificação e armazenamento.

Também, podem alterar as características finais da cerveja as mais diversas imperfeições do processo de produção caseiro, levando assim duas levas da mesma receita a apresentar diferenças de sabor, teor de álcool, amargor, etc.

Além da gama de variações citadas, podem ocorrer diferenciações físicas do processo como o apresentado a seguir.

2.3 Conceito de *single vessel*

O método *Single Vessel* ou único recipiente, consiste em utilizar uma única panela tanto para a brassagem quanto para a fervura (Figura 5). Tal método faz com que a receita sofra pequenas adaptações em volume de água para ser possível a utilização de uma única panela. No método tradicional se utiliza uma panela para brassagem e outra panela para fervura. Após a etapa de brassagem é adicionado uma quantidade de água para compensar as perdas e dar início ao processo de fervura. No método *Single Vessel* toda a quantidade de água necessária para a fabricação já deve ser adicionada no início do processo, levando em consideração as perdas por evaporação, por absorção nos grãos e por volume morto no fundo da panela.

A utilização de um único recipiente parece ser uma solução atraente, quando se pensa em automatização do processo, pois quanto menos variáveis e processos paralelos são necessários, mais fácil e limpa se torna a automatização. Contudo, a utilização de uma única panela que centraliza todas as ações necessárias da fase quente, em um único lugar, apresenta algumas dificuldades para uma automatização completa, como por exemplo a retirada dos grãos após a brassagem que deve ser feita manualmente.

Figura 5 – Panela *Single Vessel*



Fonte: Home Brew Talk (2019)

2.4 Detalhamento da fase quente

A fase quente do processo de produção de cerveja consiste na brassagem e na fervura. A brassagem é o processo em que se retiram os açúcares do malte, transformando a água e grãos em mosto.

O malte possui um polissacarídeo chamado amido e diversas enzimas que, neste processo, são responsáveis por quebrar o amido em açúcares fermentáveis ou não. Para que o amido seja “quebrado” é preciso elevar a água até uma determinada

temperatura, (ver tabela 1), para ativar as enzimas desejadas que produzirão os açúcares que posteriormente serão fermentados.

Após a conversão do amido nos açúcares desejados precisa-se inativar as enzimas, fazendo o *mash out*, que consiste em elevar a temperatura para 76°C por aproximadamente 10 minutos, podendo variar o tempo dependendo da receita.

A fim de retirar mais açúcares pode-se ainda efetuar um processo de lavagem, que consiste em adicionar mais água a 76°C e deixar recirculando entre os grãos pelo tempo estipulado na receita. Por fim drena-se o mosto para a panela de fervura.

Tabela 1 - Temperatura de ativação das enzimas e suas funções

Enzima	Temperatura	Função
Fitase	30°C a 50°C	Abaixar o pH do mosto
Debranching	35°C a 45°C	Solubilização do amido
Beta Glucanase	37°C a 45°C	Quebra dos glucanos
Protease	55°C a 55°C	Quebra proteínas grandes formadoras de turvação
Beta Amilase	55°C a 65°C	Produz a maltose
Alfa Amilase	68°C a 72°C	Produz diversos açúcares, inclusive a maltose

Fonte: Rodrigo Louro (2012)

Após o fim da brassagem inicia a etapa de fervura que consiste em ferver vigorosamente o mosto para o higienizar e adicionar os aromas e sabores do lúpulo ou outras especiarias. A higienização do mosto consiste em eliminar possíveis bactérias indesejadas e fazer com que as proteínas sejam coaguladas e caiam no fundo da panela para evitar que elas sejam transferidas para o fermentador e causem turbidez na cerveja.

A adição das especiarias e lúpulos deve ser feita com uma determinada finalidade, seja para amargor, sabor ou aroma. Para cada finalidade existe uma determinada faixa de tempo para que tal ocorra (ver tabela 2).

Tabela 2 - Lupulagem na fervura

Finalidade	Tempo em minutos para o fim da fervura
Amargor	45 a 90
Sabor	20 a 40
Aroma	0 a 15

Fonte: How to brew

Após o entendimento do processo é possível levantar as variáveis críticas da fase quente.

2.5 Variáveis críticas da fase quente

Como visto anteriormente, a fase quente do processo de fabricação de cerveja artesanal caseira necessita do controle de algumas variáveis que se tornam essenciais para o sucesso de uma receita. As variáveis como temperatura e tempo são consideradas as variáveis críticas do processo já que os desvios das mesmas afetam diretamente a qualidade final da cerveja. As variáveis críticas são:

- a) temperatura da brassagem;
- b) tempo de brassagem;
- c) temperatura de *mash out*;
- d) tempo de *mash out*;
- e) tempo de Fervura;
- f) tempos de Lupulagem.

A partir deste levantamento pode-se definir como controlar cada tipo de variável. As variáveis de tempo podem ser facilmente controladas com um relógio em tempo real, mas as temperaturas precisam de um controle mais elaborado, pois é desejado que não haja erro, que o tempo de acomodação seja por volta dos 30 minutos e tenha um sobre sinal máximo de dois por cento da temperatura nominal.

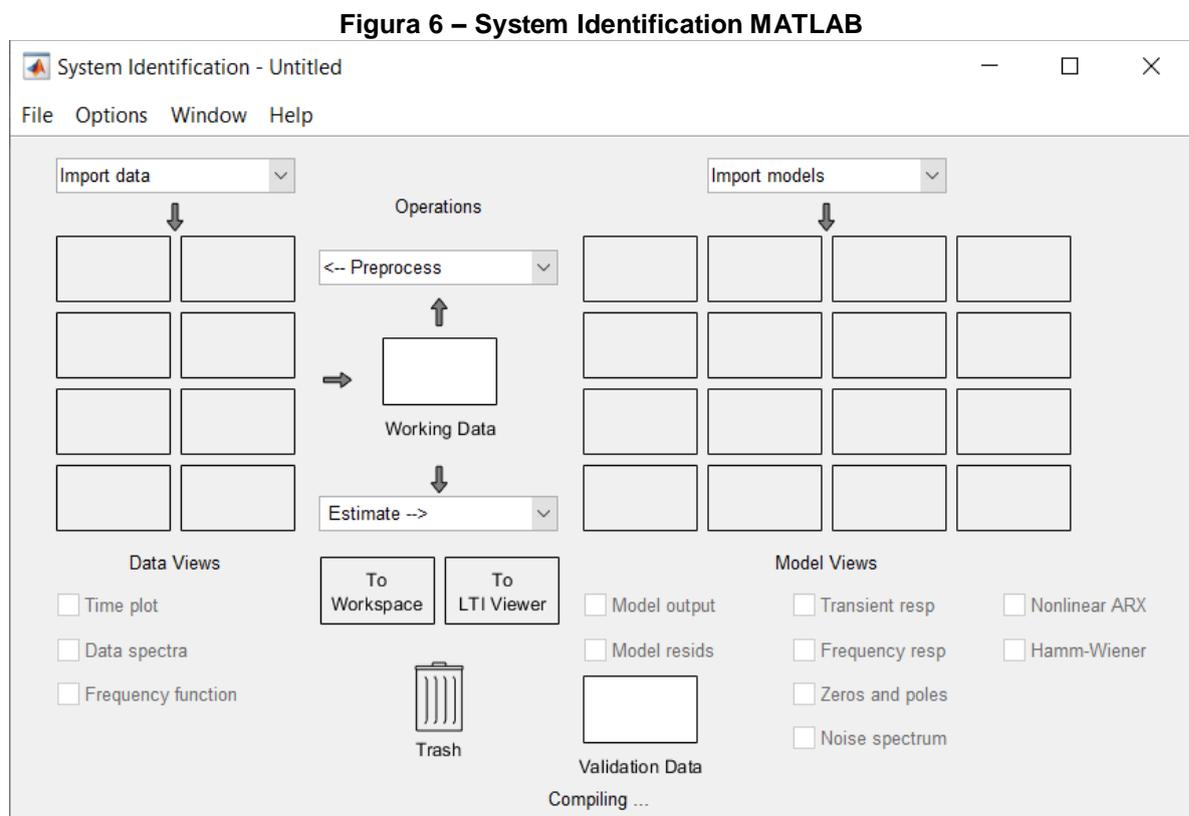
Para obter tal controle da temperatura pode-se ver a seguir como projetar o controlador que atenda às especificações citadas.

2.6 Metodologia de controle

Para o controle de temperatura será empregada a técnica de controle de processos clássico com o auxílio do programa MATLAB para identificação da função de transferência e ajustes dos ganhos do controlador.

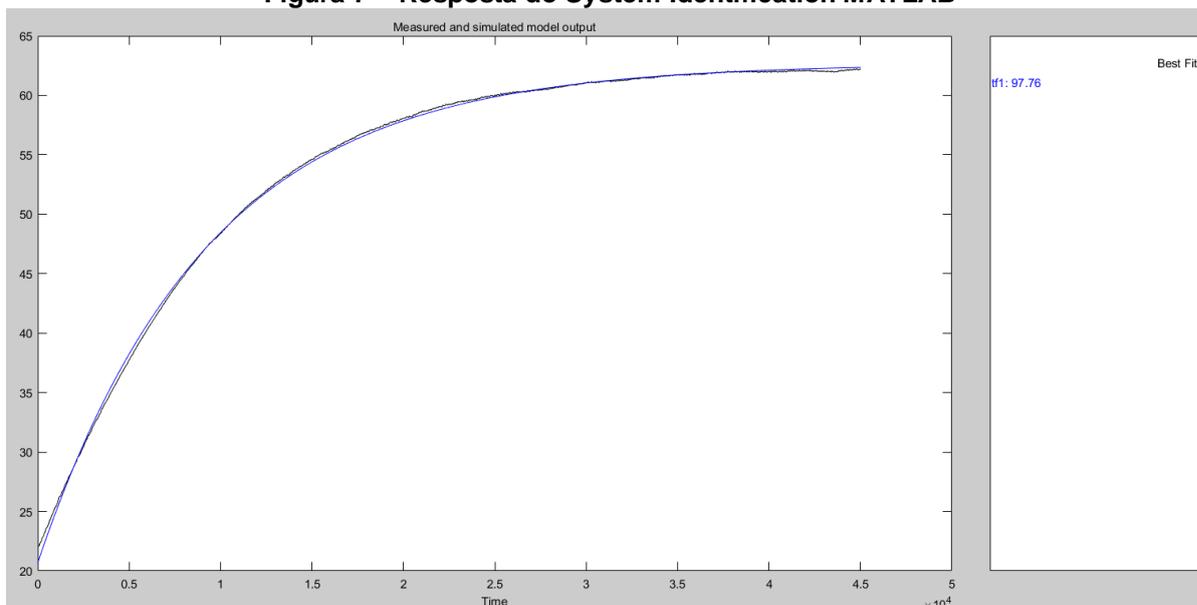
Primeiramente, deve-se levantar a planta em malha aberta, estipulando um valor de entrada e esperando a saída estabilizar sem nenhum tipo de controlador no processo.

A partir da curva de malha aberta pode-se identificar qual a função de transferência que representa o processo, utilizando a ferramenta *System Identification* (Figura 6) do MATLAB. Nesta ferramenta, ao entrar as curvas de entrada, de saída, possíveis quantidades de polos e zeros esperados na função de transferência, a resposta será uma função de transferência e uma porcentagem que representa o quão igual a malha aberta levantada é da função gerada (Figura 7).



Fonte: Fonte: Elaboração própria (2019).

Figura 7 – Resposta do System Identification MATLAB



Fonte: Fonte: Elaboração própria (2019).

Uma vez obtida a função de transferência é possível levantar o tipo de controlador, a partir dos requisitos do sistema. Para o caso da temperatura, uma primeira abordagem seria um controlador do tipo PI ou PID, por serem controladores que garantem erro zero. A primeira abordagem seria o cálculo do controlador PI por ser mais fácil de calcular e ser de menor ordem. Caso o PI não seja o suficiente para atender os requisitos parte-se para os cálculos do PID.

Os cálculos necessários para chegar aos ganhos do controlador envolvem adicionar um controlador genérico e observar quais são os valores possíveis dos ganhos para que a planta se mantenha estável. Isto pode ser feito através do critério de estabilidade Routh-Hurwitz, com a faixa de valores determinada, pode-se calcular os ganhos que atendam aos requisitos desejados.

Com os ganhos calculados faz-se os ajustes dos valores via simulação, visando evitar ao máximo a necessidade de grandes ajustes no caso real.

Com o controlador ajustado pelas simulações são necessários testes para ajustar o controlador na prática. Após os ajustes, o controlador está pronto para ser utilizado.

3 PROJETO DO PRODUTO

A partir dos conhecimentos levantados anteriormente sobre a fase quente da produção de cerveja artesanal caseira, pode-se entender melhor o processo o qual deverá ser automatizado e com isso, dar início ao levantamento dos requisitos que nortearão o desenvolvimento do projeto.

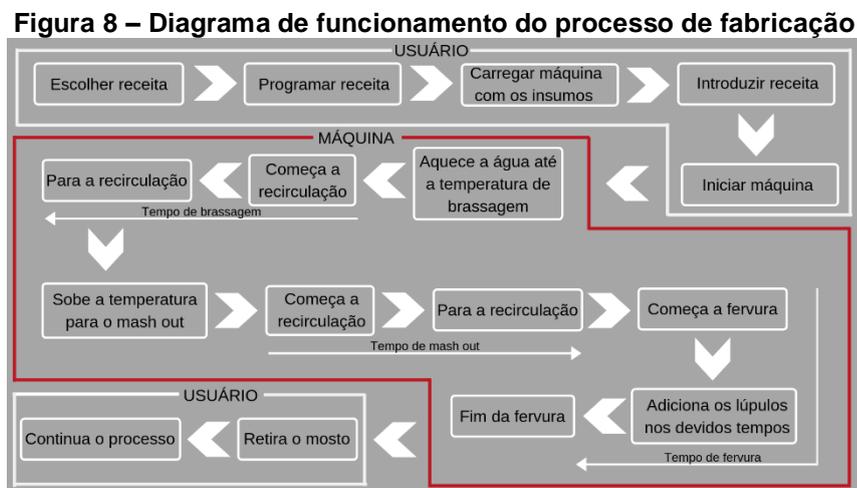
3.1 Requisitos do projeto

Os requisitos do projeto são:

- deve ocupar um espaço menor do que método manual;
- deve utilizar as ferramentas já conhecidas no método manual;
- erro de controle de temperatura de $\pm 1^\circ\text{C}$;
- fácil utilização;
- ser capaz de fazer/controlar receitas simples.

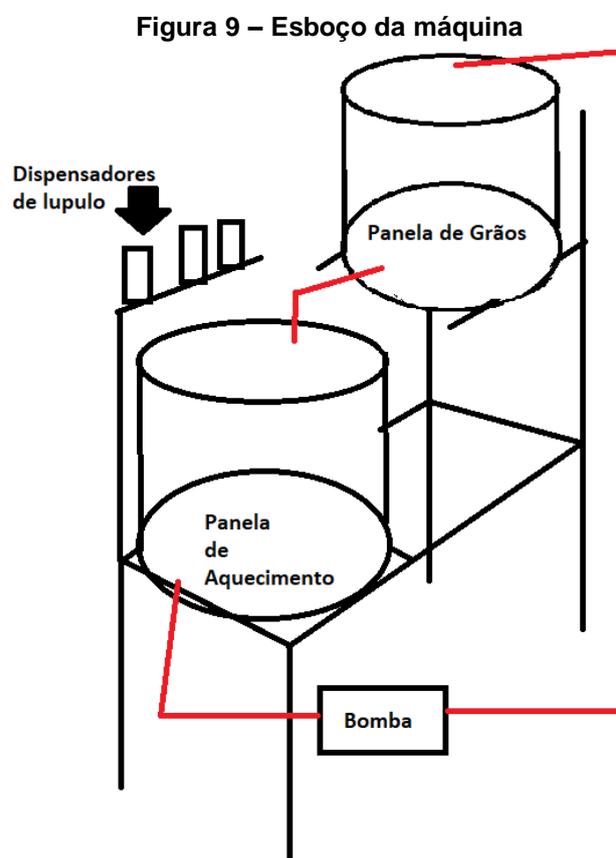
3.2 Projeto elaborado

A partir dos requisitos do projeto, definidos anteriormente, e do conhecimento levantado sobre a fase quente do processo, é possível elaborar um diagrama do funcionamento da máquina que servirá para nortear a mecânica, a eletroeletrônica, o software e o controle (Figura 8).



Fonte: Elaboração própria (2019).

A partir do diagrama da Figura 8 pode-se visualizar o processo que será feito e suas etapas, permitindo assim a elaboração de um esboço para visualizar o que deverá ser fabricado (Figura 9)



Fonte: Elaboração própria (2019).

A máquina consiste em duas panelas, uma panela inferior contendo água, e a outra superior contendo o malte moído.

Todo aquecimento se dá unicamente na panela inferior e o líquido é transportado para a panela superior através de uma bomba durante a etapa de brassagem e no *mash out*

A panela superior possui um furo no fundo que permite que o líquido retorne para a panela inferior. Localizado logo acima da panela inferior há três recipientes que servem para armazenar os lúpulos que serão despejados durante a etapa de fervura.

3.3 Projeto do subsistema mecânico

A partir do esboço visto anteriormente na Figura 9 foi possível elaborar a estrutura que irá suportar toda a máquina. Para a modelagem da estrutura foi utilizado o sistema CAD 3D SolidWorks.

Como base das dimensões da estrutura foram utilizadas as medidas das painéis.

Optou-se por utilizar os mesmos equipamentos utilizados na fabricação manual. Foi utilizada uma panela de fervura, identificada neste projeto como panela inferior ou panela de aquecimento, enquanto que a panela de brassagem, foi denominada como panela superior ou panela de grãos.

Ambas painéis e demais acessórios utilizados no projeto foram adquiridos de um kit de fabricação caseira com capacidade para 20L de cerveja. São eles:

- a) panela número 34 para Fervura;
- b) panela número 32 para Brassagem com tampa de recirculação;
- c) fundo falso para a panela de brassagem;
- d) bomba centrífuga para recirculação;
- e) mangueiras atóxicas;
- f) presilhas para fixação de mangueira.

A especificação das painéis está apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Especificação das painéis utilizadas no projeto

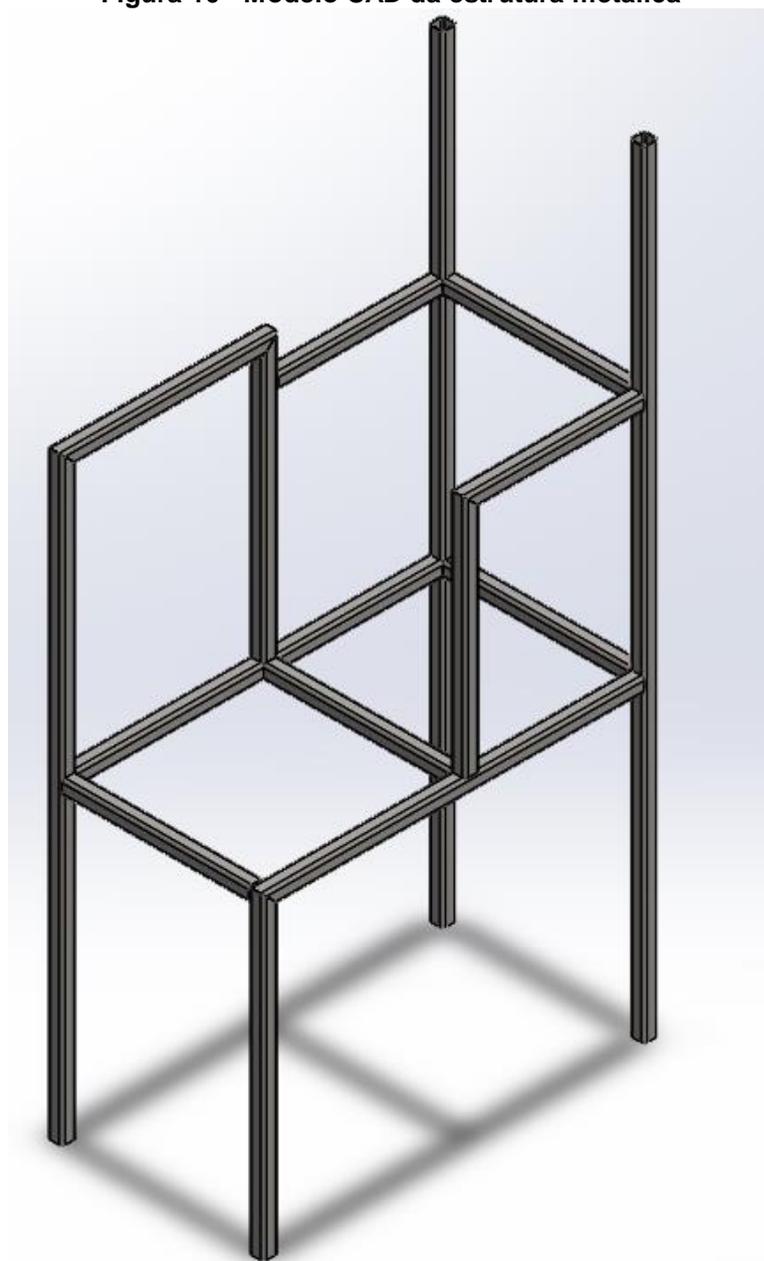
Identificação	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Capacidade (L)
Panela nº 34	34	30,5	27,2
Panela nº 32	32	28,5	22,5

Fonte: Fonte: Elaboração própria (2019).

Com as dimensões das painéis esclarecidas foi possível dar início à modelagem da estrutura.

O material base utilizado foi o perfil quadrado de aço galvanizado com dimensões de 20x20 milímetros e parede de 1,5mm, demais dimensões da estrutura são encontrados apêndice A. A partir da Figura 10 pode-se analisar a estrutura como um todo.

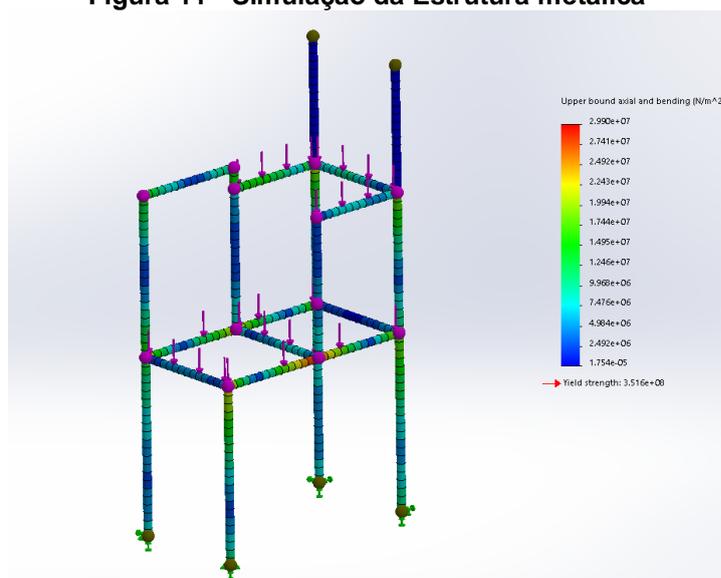
Figura 10 - Modelo CAD da estrutura metálica



Fonte: Elaboração própria (2019).

Com a estrutura elaborada necessitou-se de uma verificação para saber se a estrutura suportaria os pesos a serem carregados nas painéis. Portanto, através da ferramenta de simulações do SolidWorks foi possível efetuar um teste de carga o qual foi estipulado uma carga de 60kg em cada painel, buscando assim uma garantia de que a estrutura iria suportar o funcionamento normal da máquina. Na Figura 11 pode se observar os resultados obtidos na simulação da estrutura.

Figura 11 - Simulação da Estrutura metálica



Fonte: Elaboração própria (2019).

Ao analisar os resultados da simulação percebe-se que a estrutura poderia resistir a uma carga maior da que foi estipulado. Sendo assim, com a estrutura aprovada pôde se dar início à fabricação da mesma.

Para a instalação do quadro de comando foi utilizado uma barra de aço com perfil em “L” e fixação por parafusos, tanto na estrutura quanto na barra. A localização do quadro se dá logo abaixo da panela de brassagem e atrás da panela de aquecimento, local em que o quadro permanece a uma altura adequada para ser acessado pelo usuário. Pode-se visualizar melhor localização através da Figura 12.

Figura 12 - Fixação Do quadro de comando



Fonte: Elaboração própria (2019).

Para a fixação da bomba de recirculação foi utilizado uma chapa de aço inoxidável de 46 x 68mm com uma espessura de 1mm, a qual foi dobrada em “L”, para ser fixada na estrutura e na bomba (Figura 13).

Figura 13 - Fixação da bomba



Fonte: Elaboração própria (2019).

O mecanismo de lupulagem localizado logo acima da panela de aquecimento foi construído a partir dos seguintes materiais:

- a) perfil em L de alumínio;
- b) servos;
- c) recipientes cilíndricos de alumínio com 44 mm de diâmetro e 80mm de altura;
- d) 3 dobradiças pequenas;
- e) uma chapa de alumínio de 72x203 mm com 0,5 mm de espessura
- f) rebites.

A partir dos materiais citados foi possível fabricar o mecanismo, o qual pode ser visualizado na Figura 14.

Figura 14 - Mecanismo de lupulagem



Fonte: Elaboração própria (2019).

O funcionamento do mecanismo de lupulagem se dá a partir do movimento do servo, inclinando o recipiente cilíndrico para dentro da panela, fazendo assim seu conteúdo cair dentro da panela de aquecimento.

Uma vez todos os periféricos construídos e fixados na estrutura metálica, pode-se visualizar a máquina montada na Figura 15.

Figura 15 - Máquina montada

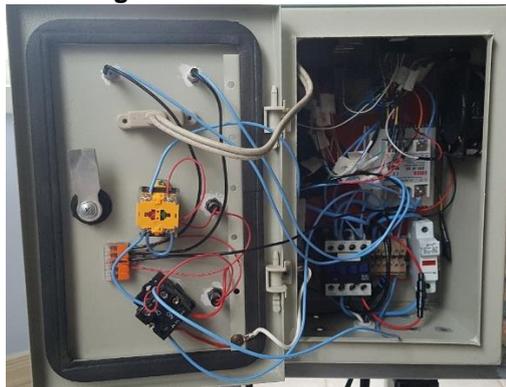


Fonte: Elaboração própria (2019).

3.4 Projeto do subsistema eletroeletrônico

A parte eletrônica foi separada em eletrônica de potência e eletrônica de sinal, visando um melhor detalhamento de cada segmento. Ambas as partes foram instaladas em um quadro elétrico com a finalidade de proteger e organizar o sistema eletroeletrônico da máquina, conforme mostra a Figura 16.

Figura 16 – Quadro elétrico

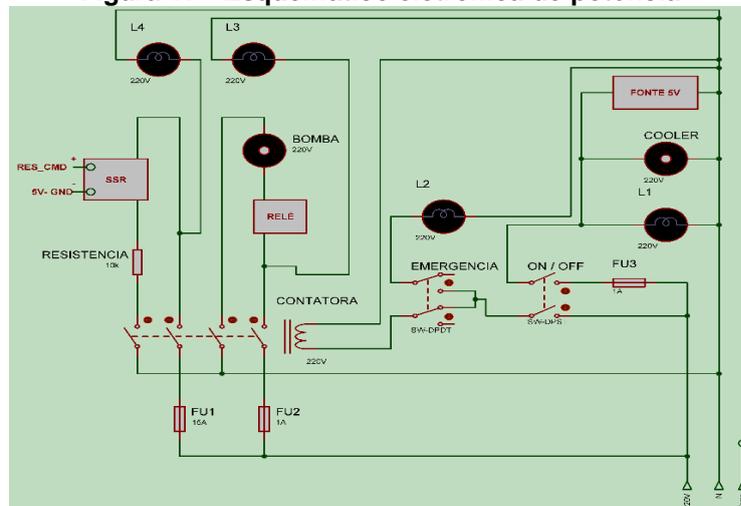


Fonte: Elaboração própria (2019).

3.4.1 Eletrônica de potência

A eletrônica de potência consiste em todo acionamento de potência e de tensão elevada existente no projeto e pode ser analisada através do esquemático a seguir detalhado na Figura 17.

Figura 17 - Esquemático eletrônica de potência



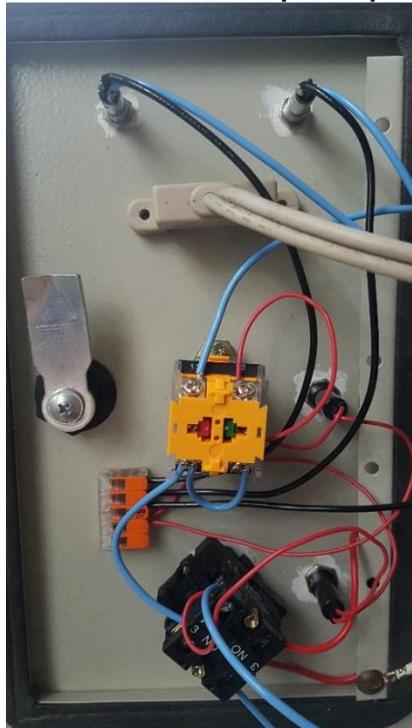
Fonte: Elaboração própria (2019).

A lâmpada de sinalização L1 informa ao usuário que a máquina está energizada, já a lâmpada L2 permanece acesa enquanto o botão de emergência permanecer pressionado. Por sua vez, as lâmpadas L3 e L4, quando ligadas, e o botão de emergência estiver liberado, informam respectivamente que os fusíveis da bomba, FU1, e da resistência, FU2, não estão rompidos.

O fusível FU3 protege contra eventuais curtos na fonte, cooler, contatora e lâmpadas L1 e L2.

O botão de emergência tem a função de desativar a contatora com o intuito de desabilitar a resistência de aquecimento e a bomba de recirculação. Tanto as lâmpadas de sinalização quanto o botão de emergência e chave ON/OFF foram colocadas na tampa do quadro de comando, de forma a facilitar a interação do usuário com a máquina (Figura 18).

Figura 18 – Vista interna da tampa do quadro elétrico



Fonte: Elaboração própria (2019).

A contatora corta tanto a fase quanto o neutro da rede, pois assim evita que inversões na ligação elétrica possam acarretar em choques elétricos ao usuário,

mesmo com as partes metálicas aterradas, visto que os cabos de potência da bomba e das resistências são externos ao quadro de comando.

Tanto a bomba quanto a resistência de aquecimento foram adquiridos tomando por base as especificações comumente utilizadas em equipamentos de produção de cerveja artesanal caseira com capacidade de 20L, mostrando assim serem qualificados para a utilização no projeto.

Os demais itens foram especificados especialmente para o projeto. Na tabela 4 apresenta-se a lista dos materiais utilizados para a confecção da eletrônica de potência da máquina.

Tabela 4- Lista de materiais da eletrônica de potência

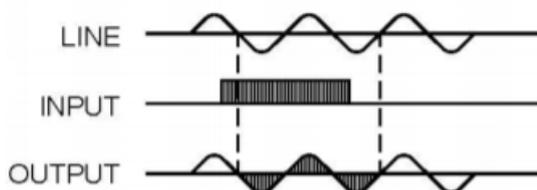
Material	Quantidade
SSR-40DA	1
Luzes de notificação 220V	4
Bomba Centrifuga 220V	1
Resistencia 2,5KW 220V	1
Fonte 5V 3A	1
Chave ON/OFF 2 contatos NA	1
Cooler 220V	1
Contatora 220V 18A	1
Fusivel	3
Botão de emergência 1 contato NF 1 contato NA	1
Trilho DIN	1
Porta fusivel	3
Prensa cabo	1
Dissipador de calor	1
Plug macho 20A ABNT	2
Tomada fêmea 20A ABNT	1
Plug fêmea 10A ABNT	1
Cabos elétricos	-

Fonte: Elaboração própria (2019).

A aquisição de uma contatora de 18A se deu, visto que a resistência requer aproximadamente 12A em potência total. Logo, optou-se por selecionar o valor mais próximo disponível no mercado. O mesmo procedimento foi aplicado aos fusíveis de proteção e de corrente nominal 16A.

Para o chaveamento da resistência foi escolhido o relé de estado sólido SSR-40DA da Fotek, pois possui o chaveamento ao passar pela tensão zero da senóide da corrente alternada, como exemplificado na Figura 19, sendo ideal para acionamento de cargas resistivas. Segundo o seu *datasheet*, para correntes entre 10A e 25A deve-se usar um dissipador HS-100H ou similar.

Figura 19 – Chaveamento do relé de estado sólido



Fonte: Fotek.

Para facilitar a retirada da panela de aquecimento foi adicionado uma tomada na face lateral esquerda do quadro de comando, formando um par com o cabo da resistência (Figura 20).

Figura 20 – Vista lateral esquerda do quadro elétrico

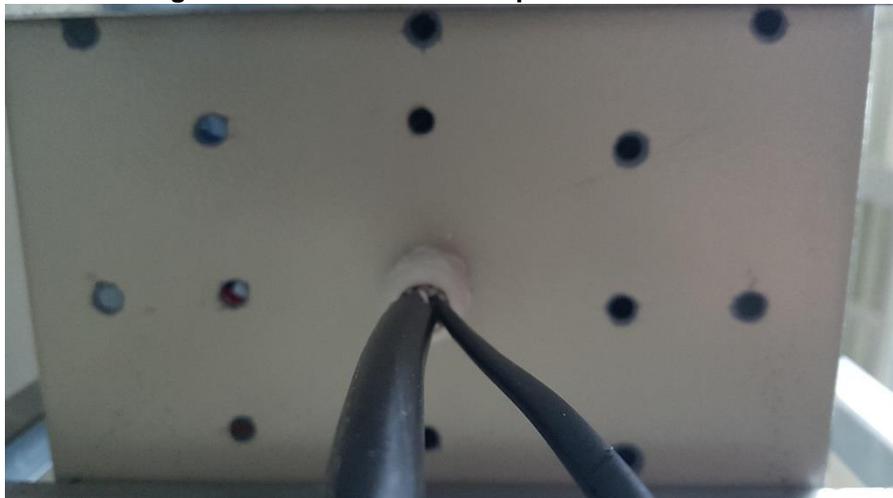


Fonte: Elaboração própria (2019).

O cabo de alimentação da máquina entra pela parte inferior do quadro, juntamente com a saída do cabo da bomba, ambos através de um prensa cabos para

dar rigidez e segurança. Também, na face inferior do quadro de comando foram realizados furos para entrada de ar frio utilizado no arrefecimento do sistema (Figura 21).

Figura 21 – Vista inferior do quadro de comando



Fonte: Elaboração própria (2019).

Foi utilizado um *cooler* para ajudar na retirada de calor do quadro de comando, evitando assim que os dispositivos sobreaqueçam durante o funcionamento da máquina (Figura 22).

Figura 22 – Vista lateral direita do quadro de comando



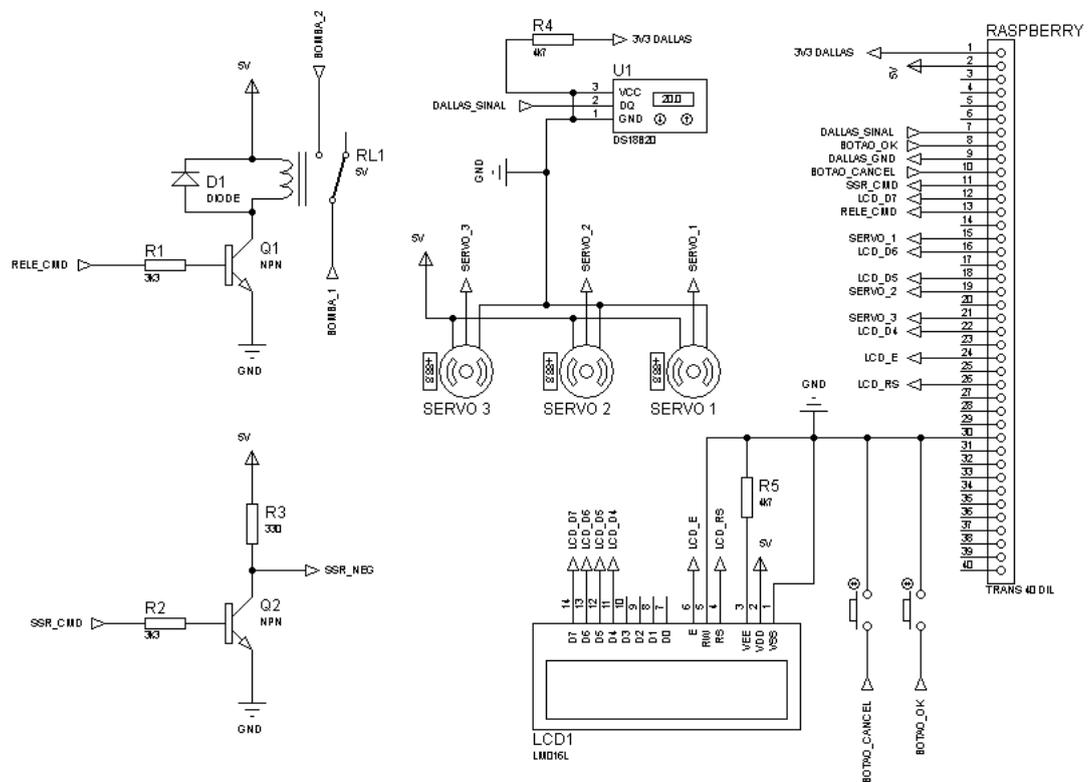
Fonte: Elaboração própria (2019).

Para acionamento da eletrônica de sinal, foi utilizado uma fonte de 5V e 3A, que por ser uma fonte de tomada foi necessário a utilização de um plug fêmea para adaptação ao circuito.

3.4.2 Eletrônica de sinal

A eletrônica de sinal consiste em todo comando e circuito de baixa tensão existente no projeto e pode ser analisada a partir do esquemático mostrado a seguir, na Figura 23.

Figura 23 – Esquemático da eletrônica de sinal

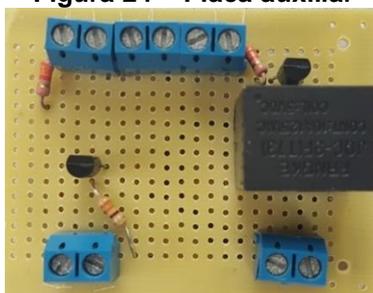


Fonte: Elaboração própria (2019).

Devido a utilização da Raspberry Pi como controladora da máquina, teve que se efetuar medidas de proteção dos pinos de comando da Raspberry, já que a tensão de saída dos pinos é 3,3V e 16mA de corrente máxima. Portanto, para o acionamento da do relé de da bomba, foi necessário fazer um circuito para elevar a tensão por meio de um um transistor. O mesmo procedimento foi empregado para o

acionamento do relé de estado sólido, o qual, segundo o seu *datasheet*, interpreta como valor alto uma tensão acima de 3,5V, com limite de 32V. Ambos os circuitos foram colocados inicialmente em uma placa de prototipação rápida, Figura 24.

Figura 24 – Placa auxiliar



Fonte: Elaboração própria (2019).

Na confecção da eletrônica de sinal foram utilizados os materiais listados na tabela 5 a seguir.

Tabela 5 - Lista de materiais da eletrônica de sinal

Material	Quantidade
Transistor	2
LCD	1
Raspberry PI	1
Sonda Dallas DS18B20 com poço	1
Botão OK contato NA	1
Botão Cancel contato NA	1
Resistores	3
Servo	3
Relé Bomba	1
Diodo 1n4001	1
Conector mike 8 vias macho	1
Prensa cabo	2
Extensão usb	1
Cabo manga 20 vias	-

Fonte: Elaboração própria (2019).

Para o acionamento dos servo motores não foi necessário nenhum tipo de circuito auxiliar, o mesmo vale para a comunicação com a tela LCD e os botões.

O LCD e os botões de "OK" e "Cancel" foram instalados em uma pequena caixa plástica para facilitar o manuseio melhorar a visibilidade (Figura 25) formando assim uma interface homem máquina mais amigável.

Figura 25 – IHM



Fonte: Elaboração própria (2019).

Tanto os servos como a caixa contendo o LCD estão posicionados externamente ao quadro de comando e por conta disto, o cabeamento foi colocado em um prensa cabo na lateral esquerda do quadro, (Figura 20). O mesmo foi feito para a saída do cabo de comando dos servos, que foi posicionado na lateral direita do quadro, (Figura 22).

Para a inserção do *pendrive* foi feita a fixação da extensão USB, (Figura 18), buscando assim uma maior praticidade no uso da máquina.

Devido a necessidade de remoção da panela de aquecimento, a qual contém uma sonda de temperatura, já montada com um conector mike de 8 vias fêmea, mostrou-se necessário a utilização de um conector compatível com o já instalado na sonda. O conector mike de 8 vias macho foi adicionado na lateral esquerda do quadro, conforme mostra a Figura 20.

3.5 Explicação da programação

Foram elaborados dois *softwares*: um aplicativo web com a função de auxiliar a criação da receita e outro embarcado na Raspberry Pi responsável por interpretar a receita e controlar a máquina.

Ambos os *softwares* foram desenvolvidos na linguagem de programação Python por ser uma linguagem de rápido desenvolvimento e de fácil programação. Apesar de ser uma linguagem interpretada e por isso ser relativamente mais lenta do

que a linguagem C, usualmente usada para desenvolvimento de sistemas embarcados, seu uso não afetará o desempenho da máquina, já que o aquecimento de água é um sistema naturalmente lento.

3.5.1 Aplicativo web

O aplicativo web foi desenvolvido utilizando o *framework* Django, responsável pelo gerenciamento e criação do servidor, além das linguagens web como HTML, CSS e Java Script. O *webapp* consiste em apenas uma página fácil de navegar (Figura 26). A partir dos dados inseridos pelo usuário a aplicação pode traduzi-los para uma linguagem que a máquina seja capaz de interpretar.

Figura 26 - Criador de receitas



The screenshot shows a web form titled "Criador de receitas" (Recipe Creator). The form is centered on a background image of beer ingredients. It contains the following fields and sections:

- Nome Da Receita**: A text input field.
- Mosturação**: A section header.
 - Temperatura em graus Celcius**: A text input field.
 - Duração em minutos**: A text input field.
- Mash Out**: A section header.
 - Temperatura em graus Celcius**: A text input field.
 - Duração em minutos**: A text input field.
- Fervura**: A section header.
 - Duração em minutos**: A text input field.
 - (tempo para o fim,Nº do recipiente):** A label for the first hop addition.
 - Lupulagem EX: 60,1**: A text input field.
 - (tempo para o fim,Nº do recipiente):** A label for the second hop addition.
 - Lupulagem EX: 40,2**: A text input field.
 - (tempo para o fim,Nº do recipiente):** A label for the third hop addition.
 - Lupulagem EX: 20,3**: A text input field.
- GENERATE**: A green button at the bottom.

Fonte: Elaboração própria (2019).

Os dados inseridos no aplicativo geram um objeto Json que é salvo em um arquivo e disponibilizado para download (Figura 27).

Figura 27 - Receita preenchida no criador de receitas

The image shows a mobile application interface for creating a recipe. The background features a collage of brewing ingredients: malted barley, hops, and malted wheat. The interface is a white card with the following fields and values:

- Recipe Name: Belgian Pale Ale
- Section: Mosturação
- Field 1: 68
- Field 2: 90
- Section: Mash Out
- Field 1: 75
- Field 2: 15
- Section: Fervura
- Field 1: 60
- Label: (tempo para o fim,Nº do recipiente):
- Field 2: 60,1
- Label: (tempo para o fim,Nº do recipiente):
- Field 3: 10,2
- Label: (tempo para o fim,Nº do recipiente):
- Field 4: Lupulagem EX: 20,3

At the bottom of the card are two green buttons: "GENERATE" and "DOWNLOAD".

Fonte: Elaboração própria (2019).

O formato Json utiliza texto legível para uma troca de dados simples e rápida, formatando um objeto em pares de chave, valor, tornando-o assim de fácil interpretação tanto para o homem quanto para a máquina.

Tal formato foi escolhido devido facilidade e simplicidade com que se pode criar e ler o arquivo, independente da linguagem de programação utilizada, como também pela liberdade proporcionada para o usuário. Assim, uma vez criada, se

consegue interpretar o arquivo e alterar os valores da receita sem ter que utilizar o site.

Na Figura 28 em A) é o Json da receita que foi gerada utilizando o site e em B) é o Json formatado para uma melhor legibilidade da receita.

Figura 28 – Receita gerada pelo criador de receitas

<pre>1 {"name":"Belgian Pale Ale","stages":[{"type":"mash","temperature":"68","duration":"90"} 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25</pre>	<pre>1 { 2 "name": "Belgian Pale Ale", 3 "stages": [4 { 5 "type": "mash", 6 "temperature": "68", 7 "duration": "90" 8 }, 9 { 10 "type": "mash", 11 "temperature": "75", 12 "duration": "15" 13 }, 14 { 15 "type": "boiling", 16 "temperature": "100", 17 "duration": "60", 18 "hopping": [19 "60,1", 20 "10,2", 21 "", 22 "", 23 "" 24] 25 } 26] 27 }</pre>
A)	B)

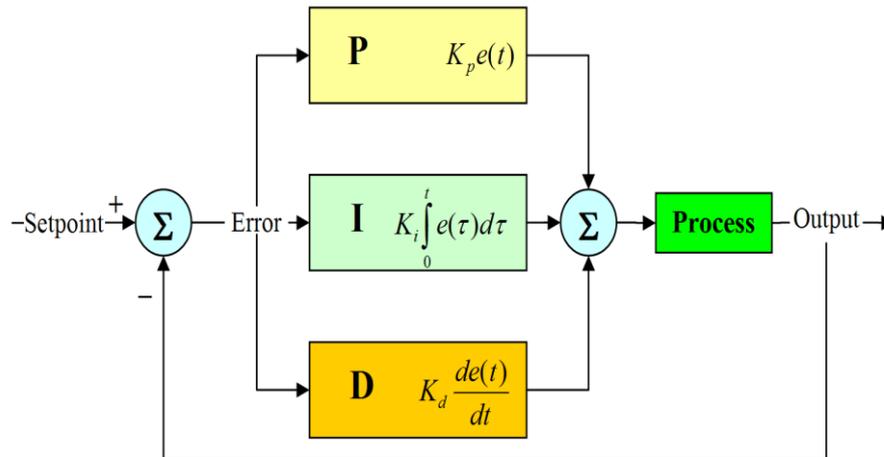
Fonte: Elaboração própria (2019).

A partir do Json gerado é possível elaborar o software que irá interpretá-lo e controlará a máquina, conforme a receita elaborada.

3.5.2 Software embarcado

Para a programação do software embarcado foram utilizadas as bibliotecas RPi.GPIO, w1thermsensors e simple_pid. A biblioteca RPi.GPIO tem a função de disponibilizar as GPIOs da Raspberry Pi para serem controladas pelo *software*. Já a biblioteca w1thermsensors tem a função de ler a sonda Dallas DS18B20 e disponibilizar a temperatura da sonda em graus Celsius. A biblioteca simple_pid disponibiliza um controlador simples, (Figura 29), que servirá para controlar as variáveis de temperatura.

Figura 29 – Controlador simple_pid



Fonte: simple_pid

Foram embarcados duas aplicações sendo um controlador da tela LCD e a aplicação principal. O software principal foi separado em classes, cada classe responsável por uma determinada função, elas são: controller, probeReader, containerController e udpClient.

A classe controller tem a função de efetuar o controle de temperatura, conforme o *set point* desejado. Esta classe roda em um *thread* separado para evitar problemas com temporização no controlador.

A classe probeReader tem a função de ler a sonda Dallas DS18B20 e a disponibiliza em graus Celsius e roda em um *thread* separado para evitar problemas de temporização na classe controller.

Por sua vez, a classe containerController é responsável por controlar os movimentos de um servo. Essa classe roda em um *thread* separado, devido às temporizações necessárias para o controle do servo.

A classe udpClient tem a função de efetuar a comunicação entre a aplicação principal e controlador da tela LCD. O controlador do LCD é um programa separado, o qual possui um servidor UDP que recebe textos para serem colocados na tela. A escrita no LCD é um processo lento e delicado, pois depende de temporizações precisas, sendo que cada letra a ser enviada é separada em 2 pacotes de 4 bits.

Por sua vez, a parte principal do software é responsável por ler a receita de um arquivo do *pendrive* e controlar cada classe adjunta durante a fase quente.

Para a leitura do *pendrive* foi utilizado um artifício do kernel Linux do Raspbian, sistema operacional da Raspberry Pi o qual executa um script bash quando um *pendrive* é inserido. O script monta corretamente o *pendrive* e executa outro script para iniciar o software principal, o qual lê o primeiro arquivo encontrado com a terminação “.brew”, terminação da receita criada pelo aplicativo web, na pasta em que o *pendrive* foi montado. Com o arquivo legível pelo software, a receita em Json é transformada em um objeto, o qual pode ser extraído todos os valores necessários.

A partir do objeto é requisitado ao usuário para verificar se o nome da receita corresponde ao que deseja ser feito, com a confirmação da receita é perguntado se todos os ingredientes estão colocados na máquina e ao ser confirmado as demais variáveis são inicializadas e se dá início ao processo.

Em caso de ser recusado alguma das perguntas feitas ao usuário o software se desliga e fica pronto para receber uma receita.

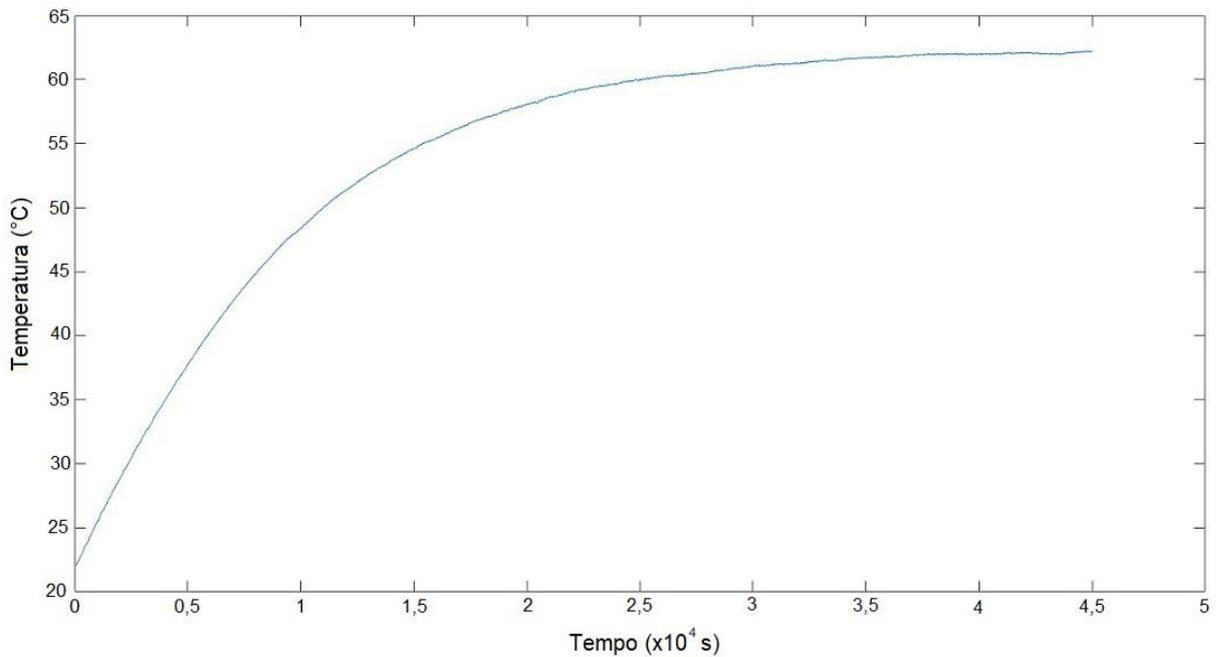
Após iniciada a receita, em períodos de aquecimento, o usuário é informado pela tela qual processo está sendo iniciado e a temperatura atual do líquido. Além disso, durante um determinado processo, é informado na tela o estágio em que se encontra o tempo e a temperatura colocado na receita, além do tempo que falta para ser completado o processo e a temperatura corrente.

Com todos os estágios da receita finalizados o programa finaliza e a máquina está pronta para receber uma nova receita.

3.6 Explicação do Controle

Para calcular os valores de ganho do controlador foi levantada a planta para saber como é o comportamento da mesma. A planta foi levantada utilizando um sinal degrau PWM com amplitude inicial de 0% e final de 15% do duty cycle. O levantamento demorou aproximadamente 12h para estabilizar em 62 graus Celsius (Figura 30).

Figura 30 – Planta em malha aberta



Fonte: Elaboração própria (2019).

A partir da planta levantada foi possível processá-la no software MATLAB e retirar a função de transferência, (ver equação 1), com 97,76% de igualdade com a planta original.

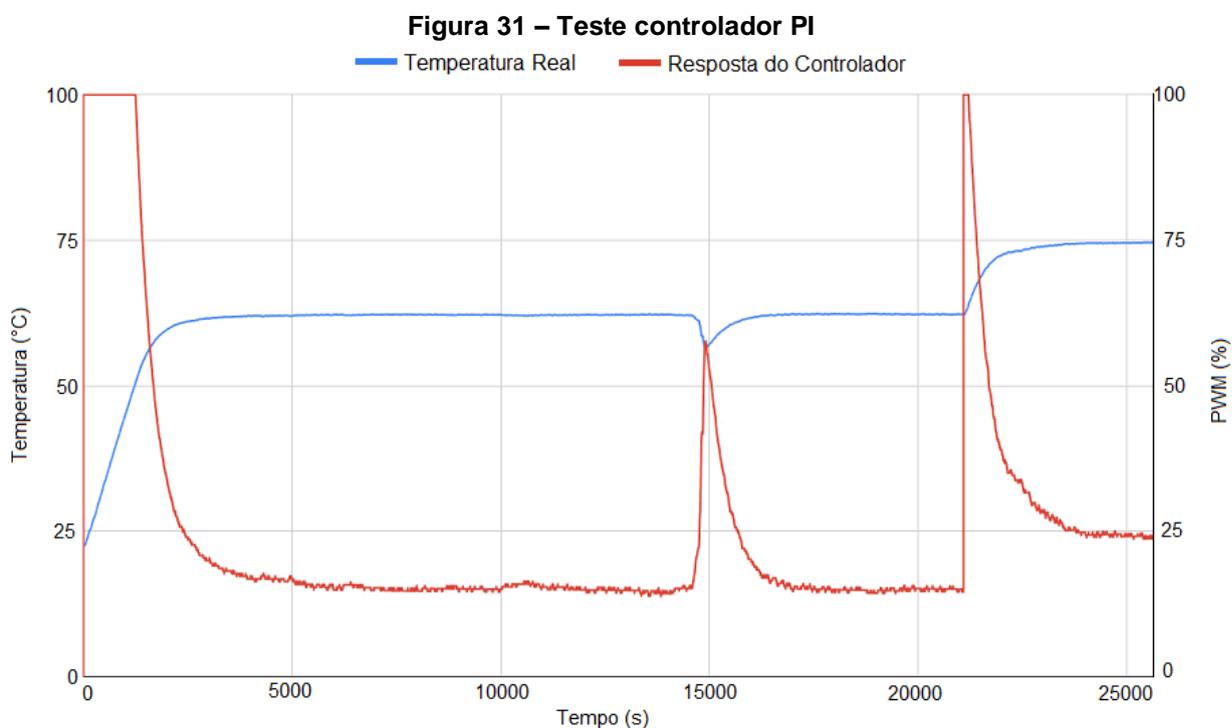
$$f_t(s) = \frac{0,0004525}{s + 0,0001083} \quad (1)$$

Com a equação da planta foi possível dar início ao cálculo do dos ganhos de um controlador PI. Ao aplicar o controlador genérico e calculado os possíveis valores dos ganhos, tem-se que o ganho integral deve ser maior que zero e o ganho proporcional deve ser maior que 0,239.

Com as faixas calculadas, deu se início ao cálculo dos ganhos com base nos seguintes requisitos: tempo de acomodação ser de aproximadamente 30 minutos, sobre sinal máximo de 2%, idealmente zero, e erro em regime nulo.

Os valores obtidos foram de 0,01091 para o ganho integral e 9,583 para o ganho proporcional, após ajustes no simulador os ganhos foram alterados, 0.00076407 para o integral e 7,1208 para o proporcional. Nos testes de controle no caso real foi ajustado novamente os valores dos ganhos para os seguintes valores,

0.00043446 para integral e 7.4085 para o proporcional. Com o controlador devidamente ajustado foi feito um teste e levantado o gráfico, Figura 31.



Fonte: Elaboração própria (2019).

Ao analisar o gráfico da Figura 31, verifica-se que o tempo de acomodação para a temperatura de referência, no início do ciclo, foi de 2335 segundos, sendo considerado aceitável conforme as especificações do controlador.

Após, no tempo 14616 segundos observa-se a resposta do controlador a uma perturbação propositalmente imposta durante o teste, quando foram retirados 2 litros de água aquecida da panela e imediatamente adicionado a mesma quantidade de água a temperatura ambiente (22°C). O tempo de acomodação após o início da perturbação foi de 1448 segundos, evidenciando que o controlador ficou robusto para perturbações e respondeu bem para alterações bruscas de temperatura.

No caso da mudança de setpoint de 62°C para 75°C, conforme observa-se a partir do tempo de 21089 segundos, o tempo de acomodação após o início da alteração foi de 1583 segundos, demonstrando que o controlador respondeu bem para alterações de setpoint dentro dos limites esperados para uma receita.

Em todos os casos observados, a temperatura final após a acomodação ficou abaixo do erro máximo de $\pm 1^{\circ}\text{C}$, conforme os requisitos do projeto.

4 APLICAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Com a máquina finalizada foi possível iniciar os seguintes testes:

- a) teste de vazão panela->bomba->panela e panela->panela;
- b) teste de receita genérica sem grãos;
- c) teste de receita genérica com grãos;
- d) teste final.

O teste a) de vazão “panela->bomba->panela” foi realizado colocando-se 25 litros de água na panela de aquecimento (inferior), acionando-se em seguida a bomba e verificando se a vazão era adequada para não causar o transbordamento do líquido na panela superior. O teste “panela->panela” avaliou se a vazão de retorno do líquido da panela superior para a inferior era suficiente para manter o nível de água acima da sonda de temperatura. O teste de vazão mostrou que o sistema para retirar o máximo de líquido da panela superior funcionou e que a mesma não apresentou elevações de nível, confirmando a previsão de que não iria transbordar com a vazão máxima da bomba em caso de haver grãos.

No teste b) de receita genérica sem grãos, foi adicionado 25 litros de água na panela inferior e inserido na máquina uma receita genérica. O equipamento foi inicializado e aguardou-se a máquina executar o processo por completo. Neste teste o software conseguiu seguir a receita sem problemas e não demonstrou inconsistências ou travamentos.

Ao testar a máquina com uma receita genérica e com grãos (teste c), foi adicionado 25 litros de água na panela inferior, 5 kg de malte Pilsen previamente moído, adicionado 2 tipos de lúpulo nos reservatórios específicos e inserido na máquina uma receita genérica. Em seguida, inicializou-se o equipamento e esperou-se em torno de 4 horas até o mesmo completar todo o processo. Neste teste foi colocado, por precaução, a vazão da bomba em 60% o que mostrou ser ideal para o funcionamento normal da máquina. Ao final do processo foi inspecionado os grãos para verificar se a água conseguiu atingir 100% do malte, sendo que o resultado foi satisfatório.

O teste final (d) foi realizado duas vezes para confirmar o funcionamento da máquina e extrair os dados de densidade que foram comparados com a densidade obtida através do método de fabricação manual. Ambos os testes seguiram o mesmo procedimento de preparo realizado para o teste (c). Neste caso, foram tomados os devidos cuidados para utilizar a mesma receita que foi feita previamente de forma exclusivamente manual, Belgian Pale Ale. Foram registrados os instantes de início e os finais dos diversos estágios do processo, gravando também os valores de temperatura desejada, temperatura real e saída do controlador (Figura 32).

Figura 32 – Parcela de logs do teste 1

```

Mon Jun 17 15:31:24 -03 2019 - 67 - 67.0 - 25.9178580956
Mon Jun 17 15:31:25 -03 2019 - 67 - 67.0 - 25.9178580956
Mon Jun 17 15:31:27 -03 2019 - 67 - 67.0 - 25.9178580956
Mon Jun 17 15:31:28 -03 2019 - 67 - 67.062 - 25.4584932292
Mon Jun 17 15:31:29 -03 2019 - 67 - 67.062 - 25.4584621773
Mon Jun 17 15:31:31 -03 2019 - 67 - 67.062 - 25.4584294918
Mon Jun 17 15:31:32 -03 2019 - 67 - 67.062 - 25.4583988233
Mon Jun 17 15:31:33 -03 2019 - 67 - 67.062 - 25.4583631619
Mon Jun 17 15:31:34 -03 2019 - 67 - 67.062 - 25.4583342063
Mon Jun 17 15:31:36 -03 2019 - 67 - 67.0 - 25.9176612063
Mon Jun 17 15:31:37 -03 2019 - 67 - 67.0 - 25.9176612063
Mon Jun 17 15:31:38 -03 2019 - 67 - 67.0 - 25.9176612063
Mon Jun 17 15:31:39 -03 2019 - 67 - 67.0 - 25.9176612063
Mon Jun 17 15:31:41 -03 2019 - 67 - 67.0 - 25.9176612063
Mon Jun 17 15:31:42 -03 2019 - 67 - 67.0 - 25.9176612063
Mon Jun 17 15:31:43 -03 2019 - 67 - 67.0 - 25.9176612063
Mon Jun 17 15:31:44 -03 2019 - 67 - 67.0 - 25.9176612063
Mon Jun 17 15:31:45 -03 2019 - 67 - 67.0 - 25.9176612063
Mon Jun 17 15:31:47 -03 2019 - 67 - 67.0 - 25.9176612063
Mon Jun 17 15:31:49 -03 2019 - 67 - 67.062 - 25.4582755471
Mon Jun 17 15:31:50 -03 2019 - 67 - 67.062 - 25.4582434623
Mon Jun 17 15:31:51 -03 2019 - 67 - 67.062 - 25.4582107346
Mon Jun 17 15:31:52 -03 2019 - 67 - 67.062 - 25.4581762424
Mon Jun 17 15:31:54 -03 2019 - 67 - 67.062 - 25.458144125
Mon Jun 17 15:31:55 -03 2019 - 67 - 67.062 - 25.4581107121
Mon Jun 17 15:31:56 -03 2019 - 67 - 67.062 - 25.4580805348
Mon Jun 17 15:31:57 -03 2019 - 67 - 67.062 - 25.4580506396
Mon Jun 17 15:31:58 -03 2019 - 67 - 67.062 - 25.458015411
Mon Jun 17 15:32:00 -03 2019 - 67 - 67.062 - 25.4579847559
Mon Jun 17 15:32:01 -03 2019 - 67 - 67.062 - 25.4579577837
gabriel@CoolBreeze-Ubuntu:~/Desktop$ █
Mon Jun 17 14:06:09 -03 2019 - Mash Starting - Heating 24.13
Mon Jun 17 14:55:49 -03 2019 Mash Started - BOMBA ON
Mon Jun 17 16:25:58 -03 2019Mash Finished - BOMBA OFF
Mon Jun 17 16:25:59 -03 2019 - Mash Starting - Heating 67.56
Mon Jun 17 16:39:31 -03 2019 Mash Started - BOMBA ON
Mon Jun 17 16:54:37 -03 2019Mash Finished - BOMBA OFF
Mon Jun 17 16:54:39 -03 2019 - Boiling Starting - Heating 75.562
Mon Jun 17 17:26:35 -03 2019 - Boiling Starting - Heating 98.625
Mon Jun 17 17:26:36 -03 2019 - Boiling Started
Mon Jun 17 17:36:36 -03 2019 - Open Container C1
Mon Jun 17 18:16:36 -03 2019 - Open Container C2
Mon Jun 17 18:21:36 -03 2019 - Open Container C3
Mon Jun 17 18:26:36 -03 2019 - Boiling Finished
gabriel@CoolBreeze-Ubuntu:~/Desktop$ █

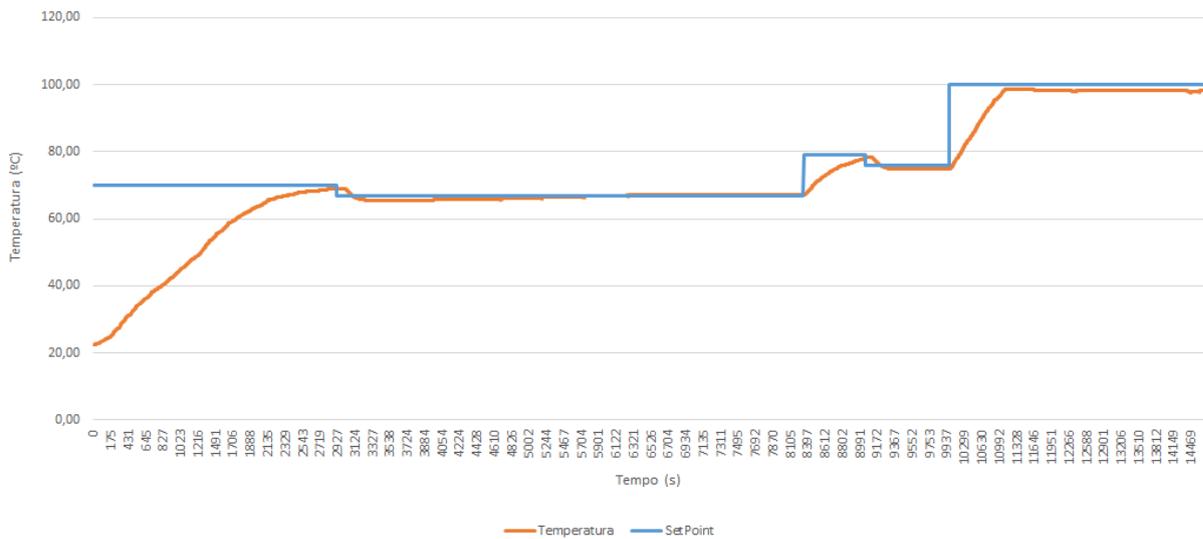
```

Fonte: Elaboração própria (2019).

Ao analisar os dados obtidos com o protótipo, no teste 1, constatou-se que o resultado foi satisfatório e se mostrou muito mais estável que o método manual.

A Figura 33 apresenta a curva de temperatura obtida no segundo teste final, na qual pode-se verificar que a temperatura durante todo processo permaneceu dentro da faixa de erro máximo (+-1°C), determinado nos requisitos do projeto. Este fato demonstra, pela segunda vez, que que a máquina manteve uma variação de temperatura, tanto do processo de brassagem como de *mash out*, bem inferior à variação de 5°C obtidos durante a fabricação utilizando o método manual.

Figura 33 – Gráfico de temperatura e setpoint do teste 2
 Gráfico do Teste 2



Fonte: Elaboração própria (2019).

No estágio de fervura não houve grandes diferenças em relação ao método manual a não ser o fato de que no método manual o usuário precisa estar atento aos momentos de adição dos lúpulos, enquanto que com a máquina o usuário está livre desta atividade.

Ao final do processo de fervura foi medida a densidade do mosto com o intuito de comparar com a densidade obtida no método manual, sendo que a densidade obtida no método manual foi de 1.045 g/cm³, enquanto que no mosto produzido pela máquina no teste 1 foi de 1.048 g/cm³ e no teste 2 a densidade foi de 1.044 g/cm³. Estes valores de densidade do mosto foram relativamente próximos, demonstrando que o processo feito pela máquina apresenta uma retirada equivalente de açúcares do malte, quando comparado ao método manual.

Uma análise global do desempenho da máquina, permite concluir que os resultados obtidos foram muito bons, demonstrando baixa sensibilidade de ações humanas durante o processo.

5 CONCLUSÃO

O método de produção de cerveja caseira *all-grain* é preferido por aqueles usuários mais experientes, pois possibilita grande flexibilidade na execução de receitas e *blends* de insumos.

Entretanto, o controle manual da fase quente no processo *all-grain* não garante a precisão necessária das variáveis mais críticas para assegurar a qualidade do produto final, como tempo e temperatura.

Para contornar o problema, este trabalho se propôs a desenvolver um sistema de controle automatizado para a fase quente da produção de cerveja caseira. Além de facilitar o trabalho do usuário, os testes realizados no protótipo demonstraram a viabilidade técnica do projeto, proporcionando economia de espaço, redução de esforço, e a garantia de que a receita foi executada dentro das especificações originais.

Para tanto, a pesquisa bibliográfica realizada no capítulo dois possibilitou uma definição clara dos requisitos de projeto considerados mais importantes para o usuário, alcançando-se assim, o primeiro objetivo específico do trabalho.

Outro ponto importante do trabalho foi a determinação das variáveis que mais influenciam na qualidade da cerveja, durante os processos de brassagem e fervura. Para tanto, detalharam-se no item 2.5 da fundamentação teórica as influências causadas pela variação de tempo e de temperatura, bem como os erros máximos permitidos para as diversas etapas da fase quente, alcançando-se assim o segundo e o terceiro objetivos específicos do trabalho.

A especificação técnica das partes mecânica e eletroeletrônicas do protótipo exigiu mais tempo do que o previsto inicialmente, pois o desenvolvimento deste produto não encontrou similares no mercado brasileiro para ser usado como referência de projeto. Em face disto, houve a necessidade de testar em separado cada um dos subsistemas individualmente para validar seu funcionamento e somente então, conseguir validar a eficiência do conjunto montado.

Os resultados apresentados no quarto capítulo, envolvendo a densidade final do mosto, curvas de temperatura e tempo das etapas, atestaram o bom funcionamento do protótipo e mostraram que o mesmo está apto para uso em campo, comprovando assim que o objetivo geral do trabalho foi plenamente alcançado.

Durante a execução do trabalho foram observados algumas oportunidades de melhorias que servem como sugestão para trabalhos futuros. São elas:

- a) desenvolvimento de uma interface homem máquina mais ampla que permita ao usuário a criação e edição de suas próprias receitas para teste;
- b) desenvolvimento de um sistema automático para limpeza do equipamento, após o término do processo;
- c) desenvolver um sistema adaptativo para as variáveis tempo e temperatura, visando obter como meta valores alvo de densidade do mosto.

REFERÊNCIAS

BUSCH, J. More Beer. **Advanced Mashing Techniques**, 2019. Disponível em: <https://www.morebeer.com/articles/advancedmashing>. Acesso em: 10 Jan. 2019.

GOOGLE TRENDS. Como fazer Cerveja. 2019. Disponível em: https://trends.google.com.br/trends/explore?date=all_2008&geo=BR&gprop=youtube&q=como%20fazer%20cerveja. Acesso em: 05 Fev. 2019.

GOOGLE TRENDS. Cerveja Artesanal Como fazer. 2019. Disponível em: <https://trends.google.com.br/trends/explore?date=all&geo=BR&q=cerveja%20artesanal%20como%20fazer>. Acesso em: 05 Fev. 2019.

GOOGLE TRENDS. Cerveja Artesanal. 2019. Disponível em: <https://trends.google.com.br/trends/explore?date=all&geo=BR&q=cerveja%20artesanal>. Acesso em: 05 Fev. 2019.

TOZETTO, L.M. **Produção e Caracterização de Cerveja Artesanal Adicionada de Gengibre** (Zingiber officinale). 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

WE Consultoria. Como fazer Cerveja. **Equipamentos**, 2019. Disponível em: <http://www.comofazercerveja.com.br/equipamentos-para-fazer-cerveja>. Acesso em: 15 Jan. 2019.

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

PALMER, John J. **How to Brew**: Everything you need to know to brew beer right the first time. 3rd ed. Colorado. Brewers Publication. 2006.

APÊNDICE A – DESENHO TECNICO DA ESTRUTURA METALICA

