

FRANCO C. PICARELLI

RAFAEL S. SOUZA

<PROJETO DE SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE
BRASSAGEM>

Texto apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo como requisito
para a conclusão do curso de graduação
em Engenharia de Mecatrônica, junto ao
Departamento de Engenharia Mecatrô-
nica.

<São Paulo>
<2014>

Catálogo-na-publicação

Souza, Rafael Sanchez

**Projeto de sistema de automação de brassagem / R.S. Souza; F.C. Picarelli. – São Paulo, 2014.
107 p.**

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.Cerveja (Fabricação) 2.Indústria de bebidas 3.Indústria arte-sanal 4.Tanques (Automação) I.Picarelli, Franco Chiaradia II.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos III.t.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos em primeiro lugar aos nossos pais, nossa família e nossos amigos pelo apoio incondicional e motivacional ao longo de toda a graduação. Agradecemos também ao professor Newton Maruyama pelo apoio e orientação na execução do projeto, pelo professor Guenther Krieger pela ajuda na modelagem térmica, ao professor Thiago de Castro Martins pela consultoria constante e ao técnico Adilson Félix pela amizade e pelo apoio e atuação direta na construção do protótipo.

RESUMO

Por Brassagem, denomina-se o conjunto de etapas da fabricação de cerveja que compreende basicamente a extração de açúcares do malte necessários para posterior fermentação, filtração do mosto (mistura de grãos moídos e água) e fervura, na qual ocorre a adição de lúpulos. O Tanque para Brassagem Automática vai automatizar e prover maior precisão a este processo, afim de suprir uma carência tecnológica para este mercado de crescente demanda, com objetivo de desenvolver um protótipo de baixo custo de equipamento que seja capaz de produzir cerca de 50 litros de cerveja de forma simples. Tal equipamento é ideal para testes de receitas em cervejarias, ou para pessoas que produzem cerveja como hobby. A execução deste Trabalho de Conclusão de Curso pode ser simplificado em duas etapas que realimentam-se iterativamente: projeto e prototipagem. O escopo da primeira fase é a modelagem térmica do equipamento, o projeto do controlador de temperaturas, projeto hidráulico, projeto do software, hardware e IHM do equipamento, sequenciamento e controle programável das etapas envolvidas no processo de Brassagem, dimensionamento de componentes periféricos, entre outros. Em seguida, monta-se o protótipo do equipamento para testar, validar e/ou reconsiderar as soluções adotadas anteriormente. Existem no mercado hoje soluções tecnológicas que atendem a estes requisitos, e através deste projeto busca-se uma familiaridade com estas tecnologias, compreender seus limites e estudar possibilidades de inovação no setor.

ABSTRACT

Brewing is a set of different steps included in the process of making beer, in which one extracts the sugars from the malt grist that are required for later fermentation, filtration of the wort (mixture of grains and water) and boil, in which the hops are added. The Automated Brewing Tank will automate and provide higher precision to this process, in order to meet the technology needs of this market of growing demand, aiming to develop a low-cost equipment prototype capable of producing about 50 liters of beer in a simple way. Such equipment is ideal for recipe testing in breweries, or for people who produce beer as a hobby. The development of this work could be simplified between two stages linked in a feedback loop: designing and prototyping. The scope of the first stage is the thermal modeling of the equipment, the temperature controller design, hydraulic system, software, hardware and UI design, programmable steps control and sequencing and peripherals design. Followed by prototyping to evaluate, validate and/or reconsider some of the previously adopted solutions. Today in the market, there are some technological solutions that fulfill this requirements, this project is expected to be a research over this technologies, its limits and possibilities of innovation.

SUMÁRIO

Lista de Ilustrações

Lista de Tabelas

1	Introdução	16
1.1	Contexto	17
1.2	História da Cerveja	17
1.3	O ressurgimento da Artesanal	18
1.4	O Processo Cervejeiro	20
1.4.1	Brassagem	21
2	Metodologia de Projeto	23
2.1	Definição dos Requisitos	24
2.2	Estado da Arte	25
2.3	Escolha da Solução	28
2.4	Descrição da Solução Geral	30
3	Desenvolvimento	34
3.1	Subsistemas	34
3.2	Modelagem Térmica	35
3.2.1	Transferência de Calor	36

3.2.2	Hipóteses	38
3.3	Análise Térmica	39
3.4	Dimensionamento das Resistências	41
3.4.1	Dimensionamento da Resistência do Tanque de Mostura . .	42
3.4.2	Dimensionamento da Resistência do Tanque de Fervura . .	43
3.5	Sistema Hidráulico	44
3.5.1	Dimensões relevantes	45
3.5.2	Pressão Hidráulica	45
3.5.3	Pressão de Trabalho Máxima	45
3.5.4	Válvulas e Conexões	45
3.5.5	Dimensionamento da Bomba	46
	Tipos	46
	Requisitos	46
	Curva do Sistema	46
	Determinação de f	47
	Determinação de K_L	48
	Tubulação	48
	Curva do Sistema	48
	Escolha da Bomba	48
3.5.6	Conexões	49
	Requisitos	49
3.5.7	Tanques	50

	Requisitos	50
	Material	50
	Dimensões/Peso	51
	Fabricação/Montagem	51
3.6	Mecânico	51
3.6.1	Estrutura para suporte equipamento	51
	Requisitos	52
	Material	52
	Dimensões e Peso	52
	Fabricação/Montagem	52
	Análise de esforços	53
3.7	Modelagem dos Processos	54
3.7.1	Casos de Uso	54
3.7.2	Listagem dos Componentes do Sistema	55
3.7.3	Modelagem do Funcionamento do Sistema	56
3.8	Modelagem Discreta do Processo de Brassagem	57
4	Protótipo BRAU#1	60
4.1	Relatório de Compras	60
4.1.1	Resistências	60
	Requisitos	60
	Solução adotada	61

4.1.2	Driver Resistências	62
	Requisitos	62
	Solução adotada	62
4.1.3	Sensores de Temperatura	62
	Requisitos	62
	Solução adotada	63
4.1.4	Bomba	64
	Requisitos	64
	Bomba Solar Project	65
4.1.5	Driver Bomba	65
	Requisitos	65
	Solução adotada	66
4.1.6	Tubos e Conexões	67
	Requisitos	67
	Solução Adotada	67
4.1.7	Tanques	67
	Requisitos	67
	Solução Adotada	68
4.1.8	Estrutura para suporte equipamento	71
	Requisitos	71
	Material	72
	Dimensões e Peso	72

	Análise de esforços	72
4.1.9	Válvulas Solenóides	74
	Requisitos	74
	Solução adotada	74
4.1.10	Microcontrolador	75
	Requisitos	75
	Solução adotada	76
4.1.11	IHM	76
	Requisitos	76
	Solução adotada	77
5	Resultados	78
5.1	Brassagem Piloto	78
5.1.1	Sensor de Temperatura	78
5.1.2	Receita	79
5.1.3	Brassagem	79
5.2	Análise	82
5.2.1	Dos componentes	82
	Estrutura	83
	Resistências	83
	Driver das Resistências	83
	Hidráulico	83

Válvulas Solenóides	84
Filtro	84
Tanques	85
.	85
Outros	85
5.3 Análise do Processo	85
6 Conclusão	88
6.1 Cronograma	88
6.2 Subsistemas	88
6.2.1 Mecânico	89
6.2.2 Hidráulico	90
6.3 Considerações Finais	90
Referências	92
Apêndice A – Metodologia de Revisão Bibliográfica	93
A.1 Professores da USP no sistema SIBI	93
A.2 Micro-ervejeiros e mestre-ervejeiros	94
A.3 Artigos nas base de dados conhecidas	95
A.4 Descrição dos resultados encontrados	97
A.5 Resultados Encontrados	98
Apêndice B – Desenhos de Fabricação	101

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1	Esquema de tecnologia “Single Vessel”. Fonte: Operating/Brewing Instructions for Spiedels Braumeister	27
2	Esquema de tecnologia HERMS. Fonte: Warehouse Brewery . . .	28
3	Esquema com duas painelas em vista frontal	31
4	Esquemático para modelagem de transferência de calor	37
5	Esquemático para modelagem de transferência de calor simplificado	39
6	Esquema de válvulas e conexões	44
7	Gráfico da Curva do Sistema	49
8	Gráfico de Performance da Bomba GP-100. Fonte: Manual do Fabricante	50
9	Vista em perspectiva da estrutura de suporte para o equipamento	51
10	Modelo de suporte simples	53
11	Diagrama dos Casos de Uso	54
12	Modelagem do Funcionamento Geral do Sistema	56
13	Modelagem do Ciclo de Produção do Sistema	57
14	Diagrama Funcional Sequencial	59
15	Protótipo BRAU#1 no dia da Brassagem Piloto	60
16	Resistencia Adquirida	61
17	Solid State Relay	63

18	Controle de Ciclos Inteiros	64
19	Sensor de Temperatura para Fervura	64
20	Montagem do Sensor de Temperatura para Mostura	65
21	Bomba Solar Project	66
22	Módulo Ponte H	66
23	Diagrama de conexões hidráulicas do sistema	68
24	Conexões	69
25	Vista em Corte do Conjunto	70
26	Elemento filtrante, de alumínio	70
27	CAD em perspectiva da estrutura de suporte para o equipamento	71
28	Foto em perspectiva da estrutura de suporte para o equipamento	72
29	Modelo de suporte simples	73
30	Válvula Solenóide	74
31	Driver Solenóide	75
32	Arduino Mega 2560	76
33	Buzzer	77
34	Printscreen do software Brewsmith	80
35	Acréscimo do Malte	81
36	Montagem para medição de temperatura	82
37	Filtro danificado após brassagem	84
38	Fermentadores no refrigerador	87
39	Cronograma estabelecido no início do projeto	89

40	Cronograma observado ao final do projeto	89
41	Foto da montagem elétrica	107

LISTA DE TABELAS

1	Lista de components e estimativa de custo das soluções	28
2	Dimensionamento da resistência do tanque de mostura	42
3	Dimensionamento da resistência do tanque de fervura	44
4	Dimensões de corte das cantoneiras para montagem	52
5	Tabela de Dispositivos Periféricos	56
6	Lista de componentes hidráulicos	69
7	Dimensões de corte das cantoneiras para montagem	73

1 INTRODUÇÃO

Por Brassagem, denomina-se o conjunto de etapas da fabricação de cerveja que compreende basicamente a extração de açúcares do malte necessários para a posterior fermentação, a filtração do mosto e a fervura, na qual ocorre a adição de lúpulos (KUNZE, 2010). Com o projeto Sistema para Automação de Brassagem nos propomos automatizar e prover maior precisão a este processo, afim de compreender melhor os desafios da produção cervejeira e, eventualmente, suprir uma carência tecnológica neste mercado de crescente demanda. Segundo a Associação dos Cervejeiros Artesanais Paulistas, o número de microcervejarias no Brasil cresceu de 70 para 250 de 2010 para 2013.

Assim, nosso objetivo é construir um protótipo de um equipamento que capaz de automatizar uma brassagem de forma eficiente, com resultado final de excelência e baixo custo. Pretendemos obter tais resultados através de pesquisa bibliográfica, consulta a cervejeiros caseiros e mestre cervejeiros, além da análise das soluções já existentes.

Este documento diz respeito às atividades realizadas para a disciplina PMR2500 - Projeto de Conclusão de Curso da Escola Politécnica da USP. Ao longo do semestre, o trabalho se deu no sentido de compreender o problema sob um viés de engenheiro para que fosse possível solucioná-lo como tal.

Ao longo dos capítulos deste relatório relata-se detalhadamente os procedimentos e considerações adotados.

1.1 Contexto

1.2 História da Cerveja

Os seguintes parágrafos resumem a História da Cerveja, com ênfase em seu processo de produção, segundo informações contidas em (MORADO, 2009). Há registros de que na época da construção das primeiras cidades, por volta de 6000 a.C., a produção de bebidas fermentadas a base de cereais já era bem estabelecida. Isto implica que o surgimento das bebidas precursoras da cerveja pode ser colocado entre os milênios 6 e 9 a.C., já que este último marca o início da cultura de cereais. Este surgimento se deu entre o Oriente Médio e o Egito, provavelmente por acaso. Estes ancestrais da cerveja mantinham poucas semelhanças com a bebida que conhecemos atualmente, uma vez que eram utilizados outros grãos, o fenômeno da fermentação era desconhecido, ocorrendo de forma espontânea através de micro-organismos presentes no ar, e o lúpulo não era utilizado, dando lugar às mais diversas especiarias. A cerveja esteve presente em grande parte dos povos da Antiguidade, tendo-se registros de sua existência entre os Egípcios, Mesopotâmios, Gregos, Romanos, entre outros. Com o passar do tempo, os ingredientes e processos evoluíram, e a produção da bebida expandiu-se para o mundo, principalmente para a Europa. A partir da Idade Média, a produção de cerveja deixou de ser uma atividade familiar, incluída entre os afazeres domésticos, para se tornar um ofício. Os mosteiros tiveram grande importância no desenvolvimento e documentação de técnicas de produção, como, por exemplo, a conservação a frio da bebida. Durante a Renascença, a introdução de conceitos do capitalismo e a crescente urbanização afetou as técnicas de produção, trazendo principalmente um aumento do volume produzido. Por volta do ano 1400, o lúpulo passou a ser mais amplamente utilizado, devido a suas propriedades conservativas. Durante os séculos seguintes, a produção de cerveja passou por modificações oriundas de di-

versas mudanças comportamentais e avanços tecnológicos. O desenvolvimento de instrumentação de medição de temperatura, entre outros, trouxe grande melhoria ao processo. Tradicionalmente, a etapa de Mosturação era realizada através da técnica de Decocção, que consiste na separação e fervura de parte do Mosto, e posterior mistura com o restante do líquido, de forma a elevar a temperatura deste. Dependendo da proporção de mosto que era fervido, um diferente patamar de temperatura de sacarificação era obtido. A utilização de termômetros permitiu que o Mosto passasse a ser aquecido uniformemente até que o patamar de sacarificação desejado fosse atingido, simplificando consideravelmente este processo. Outro avanço tecnológico que teve grande impacto na produção cervejeira foi o isolamento da primeira cultura pura de leveduras, em 1883. Isso permitiu melhor controlar a fermentação e prevenir contaminações e mutações genéticas, muito típicas em versões anteriores da bebida. Através destes e outros avanços, a produção de cerveja em escala industrial se consolidou e teve forte crescimento até o início do século XX, quando movimentos de repressão ao consumo do álcool ganharam força. Em 1918, entrou em vigor nos Estados Unidos uma emenda que proibia o consumo e a produção de bebidas alcoólicas em todo o território deste país. Esta proibição, denominada “Lei Seca”, durou até 1933 e teve impacto devastador na indústria de bebidas alcoólicas norte americana. Por herança deste período, a produção caseira de cerveja manteve-se proibida nos Estados Unidos até 1979. Após a liberação, houve grande crescimento desta atividade, que se popularizou rapidamente como hobby no Canadá e nos Estados Unidos.

1.3 O ressurgimento da Artesanal

Durante principalmente a primeira metade do século XX, a indústria cervejeira sofreu grandes reduções devido a “Lei Seca” e as duas Grandes Guerras. Neste período, o número de cervejarias ativas na Bélgica caiu 76%, e quedas semelhan-

tes foram observadas por todo mundo (MORADO, 2009). Isto, aliado a uma posterior globalização de mercados, ocasionou numa crescente massificação dos produtos. Estilos tradicionais deixaram de ser produzidos, dando lugar às chamadas American Standart Lagers, muitas vezes equivocadamente classificadas como Pilsen. Na segunda metade deste século, a permissão da produção caseira de cerveja nos Estados Unidos e a criação de movimentos como o CAMRA (Campaign for Real Ale), no Reino Unido, impulsionaram uma revitalização da cultura cervejeira, proporcionando a retomada de estilos tradicionais e a criação de produtos novos (MORADO, 2009). Desde então, pequenas indústrias (Micro-Cervejarias) tem produzido cervejas que podem ser classificadas como Artesanais, ou seja, produtos mais diversificados e que valorizam uma mais rica experiência degustativa. Esta produção vem crescendo em todo mundo, e, apesar da classificação de “artesanais”, empregam equipamentos modernos e matéria-prima de alta qualidade (MORADO, 2009). Paralelamente, o hobby de produção caseira de cerveja tem crescido em grandes proporções nos últimos anos, inclusive no Brasil. Apesar de compartilhar o mesmo valor pela experiência degustativa, o processo de produção caseira é relativamente mais simples. Equipamentos são improvisados, etapas do processo são eliminadas e um controle adequado das etapas é negligenciado, visando viabilizar este tipo de produção, sem fins lucrativos, dentro do ambiente doméstico. Basicamente, o processo caseiro consiste em: Moagem do Malte; Brassagem; Fermentação; Maturação; Envase e Carbonatação. A Brassagem (do francês “Brassage” - ato de produzir cerveja) é a etapa que mais exige tempo e recursos do produtor, além de ter enorme influência no produto final. Assim, a medida que o usuário ganha experiência com o hobby, este, naturalmente, busca aprimorar sua técnica e equipamento, de forma a produzir cervejas melhores com maior facilidade, muitas vezes através de melhorias no processo de Brassagem. Desta situação, nasce um nicho de equipamentos automatizados para a produção caseira de cerveja.

1.4 O Processo Cervejeiro

O processo de produção de cerveja artesanal é relativamente simples: suas etapas são bem definidas e, com algum equipamento básico e conhecimento das receitas consegue-se produzir de forma segura uma grande gama de estilos cervejeiros (ALCARDE; OETTERER, 2006; KUNZE, 2010).

A produção artesanal de cerveja dura pelo menos três semanas, podendo se prolongar por meses. Os ingredientes e técnicas variam consideravelmente dependendo da origem das receitas, porém, há uma série de etapas que podem ser consideradas presentes na grande maioria dos processos:

- **Malteação:** Dá-se início à germinação dos grãos, visando desenvolver as enzimas necessárias na quebra do amido e conferir à cerveja diferentes perfis de aroma, sabor e cor.
- **Moagem:** Quebra dos grãos com intento de facilitar a extração de açúcares. As cascas devem ser preservadas para auxiliar na filtragem.
- **Brassagem:** Reúne diversos processos cuja função é a formação de um líquido rico em açúcares (Mosto) que apresente as condições ideais para dar início à fermentação.
- **Fermentação:** Uma cultura de leveduras se desenvolve no mosto e passa a consumir os açúcares para a produção de álcool e gás carbônico. Ocorre em ambiente fechado, com temperatura controlada.
- **Maturação:** Ainda em ambiente fechado, reduz-se a temperatura para estimular reações secundárias promovidas pelas leveduras que eliminam compostos indesejados da cerveja. Também promove desativação e decantação da levedura e outras partículas em suspensão.

- Envase/Carbonatação: A cerveja é transferida para o recipiente final, onde ocorre a carbonatação, adicionando-se CO₂ puro ou através de uma segunda fermentação.

Outros processos, como a pasteurização e filtragem posterior à fermentação, podem ser incluídos, porém estes não são recomendados na produção artesanal, uma vez que prejudicam o aroma e o sabor da cerveja.

1.4.1 Brassagem

O sistema que pretende-se desenvolver ao longo deste Trabalho de Conclusão do Curso visa automatizar os processos contidos na etapa de Brassagem. Esta etapa dura de 6 a 10 horas dependendo do equipamento utilizado e da receita em questão, e um controle eficiente das durações, temperaturas e fluxos em diversos momentos agrega qualidade considerável ao produto final. Os processos contidos na Brassagem são:

1. Mostura: O malte moído é adicionado a água quente em um recipiente com um elemento filtrante. Condições ótimas de temperatura e pH são fornecidas para ativar as enzimas que convertem o amido dos grãos em açúcares fermentáveis.
2. Mash-Out: A temperatura é elevada, com o intento de interromper a ação enzimática.
3. Recirculação (Filtragem): O mosto é recirculado pela panela, mantendo-se fluxo num sentido principal, de forma que o bagaço do malte se compacte, formando uma cama de grãos que atua como elemento filtrante. A recirculação garante uma maior extração dos açúcares e o clareamento do mosto.
4. Lavagem: O fluxo é mantido, porém o mosto agora é extraído e água quente

é despejada sobre o aglomerado de cascas de malte, para garantir novamente maior extração de açúcares.

5. Fervura: O mosto, livre do bagaço dos grãos, é fervido por cerca de uma hora, com o intuito de esterilizá-lo e favorecer a reação de Maillard, que confere o sabor e aroma caramelado. Durante a fervura também ocorre a adição dos lúpulos, os quais fornecem amargor, aroma e sabor a cerveja.
6. Resfriamento e Inoculação da levedura: A temperatura do mosto é reduzida até e cerca de 25°C para interromper a isomeração dos compostos provenientes do lúpulo e possibilitar a inoculação da levedura.

O equipamento que será desenvolvido compreende a automação e o controle de diversos aspectos dos processos descritos acima, através de uma interface com o usuário, facilitando sua execução e garantindo maior precisão e repetibilidade.

2 METODOLOGIA DE PROJETO

O processo de brassagem tem essência multidisciplinar, e o desenvolvimento de um equipamento que o automatize depende da sintonia de uma série de subsistemas, cada um deles demandando conhecimentos específicos de diversas áreas da engenharia.

Para elaboração do projeto, foi adotada uma metodologia de projeto recorrente ao longo da graduação, baseada na geração de requisitos: partindo-se dos processos necessários à Brassagem, elaboraram-se requisitos de alto nível visando, na sequência, a obtenção de requisitos de baixo nível. A partir destes, foram realizados modelagens e dimensionamentos de cada subsistema, para que uma solução otimizada fosse implementada.

Após a implementação destas soluções, foram realizados testes com cada sistema, separadamente e integrados, para a validação das soluções adotadas. Caso o desempenho se revelasse insatisfatório, os requisitos, a modelagem e a solução escolhida eram revisados, em um processo iterativo que pode ser denominado prototipagem.

Para gerenciamento das tarefas e do cronograma diversas plataformas de gestão de projeto foram avaliadas: Asana, Podio, RedMine, Microsoft Project, Bitrix24, Gantter, entre outras. Inicialmente, optamos pela plataforma Bitrix24, por ser uma opção gratuita, de simples usabilidade, boa curva de aprendizado, de fácil atribuição e possibilidade de acompanhamento de tarefas online. No en-

tanto, o investimento de tempo necessário à utilização destas ferramentas não justificava o retorno. Por fim, nos utilizamos de e-mail para comunicação a distância e reuniões regulares - semanais - entre nós e quinzenais com o orientador.

Utilizando-nos do cronograma que estabelecemos, dividimos as tarefas de acordo com a disponibilidade e competência de cada um. A cada nova reunião estas tarefas eram revistas até que fossem concluídas.

2.1 Definição dos Requisitos

O sistema deve completar todas as etapas relativas ao processo de brassagem:

1. Mostura
2. Recirculação
3. Lavagem
4. Fervura
5. Resfriamento

O projeto tecnológico do equipamento, dimensionado para produção de 50L de mosto cervejeiro, deve contemplar os seguintes requisitos:

1. Suportar um peso aproximado de 60kg, 45L de água mais 15kg de malte a uma temperatura de trabalho variando de 15°C a 100°C
2. Ser capaz de misturar o mosto a fim de garantir temperatura homogênea, melhor conversão enzimática e, eventualmente, separá-lo dos grãos
3. Obter leituras em tempo real do volume do líquido
4. Obter leituras em tempo real da temperatura do líquido

5. Controlar os degraus de temperatura com precisão de 0.5°C sem sobressinal, no menor tempo possível.
6. Microcontrolador que atenda à demanda de processamento e memória a serem determinados
7. Bomba hidráulica com capacidade para suportar temperaturas de até 100°C e, possivelmente, ser capaz de trabalhar com resíduos sólidos
8. Circuito de potência que atenda à demanda necessária a ser calculada
9. Prover ao usuário interface amigável que permita adaptação do processo e monitoramento de variáveis de interesse
10. Garantir segurança na sua utilização

2.2 Estado da Arte

Antes de dar início ao projeto, foi realizada uma pesquisa para uma familiarização com os equipamentos de brassagem existentes no mercado. Esta pesquisa foi importante como exercício para avaliar criticamente as soluções já existentes e aproveitar as características positivas de cada uma. Após este processo, foi adotada uma solução geral para o equipamento que combina características de cada equipamento abaixo descrito.

Com a natural evolução dentro de seu hobby, o cervejeiro caseiro muitas vezes recorre a equipamentos de brassagem com algum grau de automação. No geral estes equipamentos podem apresentar algumas vantagens em relação ao processo mais simples, entre elas:

- Maior precisão no controle de temperatura;
- Maior facilidade na execução do processo;

- Redução na duração do processo;
- Maior eficiência energética;
- Possibilidade de execução remota do processo.

Existem diversas tecnologias que oferecem uma ou mais das melhorias acima, algumas delas vendidas comercialmente. Dentre elas, observa-se hoje no mercado brasileiro algumas soluções para automação do processo de brassagem:

- Braumeister: precursora, alemã
- Masterbier: produto nacional similar a Braumeister
- Mec Bier Hobby: alternativa nacional à Masterbier
- Picobrew: sistema altamente automatizado

A mais popular delas, por sua simplicidade, é o sistema desenvolvido pela Spiedel, a Braumeister: este sistema, muitas vezes referenciado como semi-automático, consegue realizar as etapas da brassagem com apenas um recipiente e intervenção do usuário. Neste caso, tecnologia empregada é conhecida como “Single Vessel”, ou “Recipiente Único”.

As principais vantagens desta solução são redução do custo investimento inicial - visto que é necessário o mínimo de material para o equipamento - e de espaço necessário para sua instalação. Esta tecnologia, no entanto, não permite ao usuário uma automatização total do processo pois, devido a sua simplicidade, algumas etapas necessitam intervenção humana.

Uma solução mais elaborada, porém mais cara e espaçosa consiste no sistema HERMS (Heat Exchange Recirculating Mash System) (THEELECTRIC-BREWERY, 2014), em que são utilizados três recipientes e que possibilita que

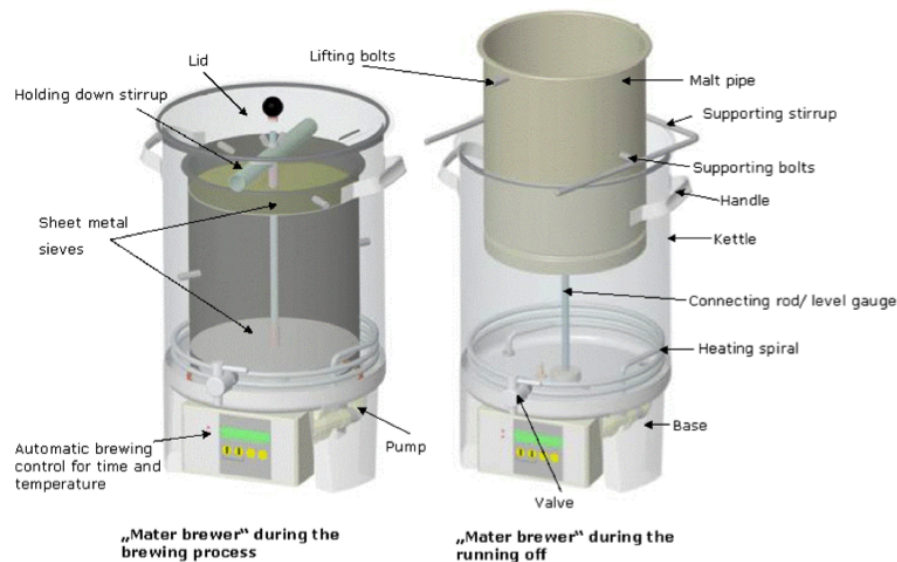


Figura 1: Esquema de tecnologia “Single Vessel”. Fonte: Operating/Brewing Instructions for Spiedels Braumeister

todas as etapas sejam concluídas sem a intervenção do usuário, sua essência se aproxima muito dos sistemas industriais. Neste equipamento, os recipientes são divididos de acordo com suas funções:

- Tanque de Aquecimento da Água
- Tanque de Mostura
- Tanque de Fervura

Este sistema, no entanto, não possui versão comercial para produções de baixa escala.

Uma solução bem menos ortodoxa é o sistema desenvolvido pela PicoBrew. Este sistema abre mão de alguns conceitos tradicionais da produção de cerveja, como a fervura do mosto, visando simplificar o processo e possivelmente atingir um novo nicho de consumidores. Este produto é frequentemente comparado à cafeteira Nespresso, devido ao fato de ter quebrado paradigmas tradicionais do

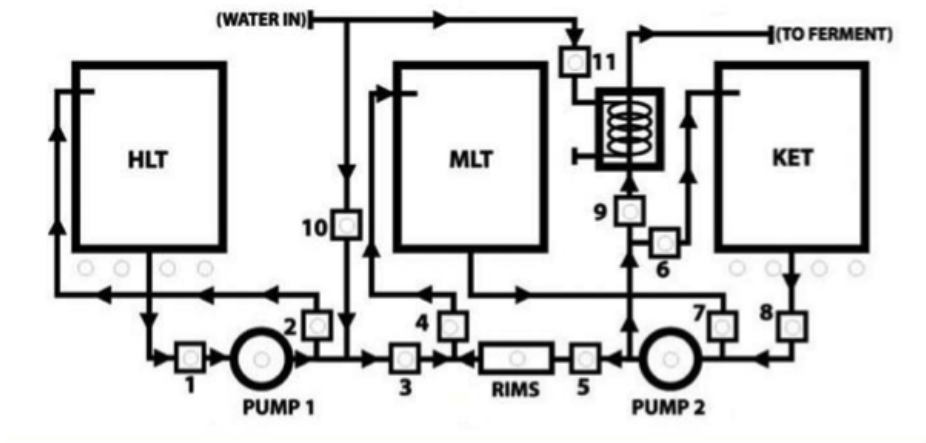


Figura 2: Esquema de tecnologia HERMS. Fonte: Warehouse Brewery

processo e se utilizar de novas tecnologias, proporcionando maior facilidade ao usuário. Porém é um produto relativamente novo, e pouco se sabe sobre as implicações dessa quebra de paradigma.

2.3 Escolha da Solução

Após estudo das possíveis soluções, foi elaborada uma tabela visando auxiliar na decisão:

	Solucoes	1	2	3	4	5	6
	Dificuldade de Implementação	6º	1º	5º	3º	4º	2º
	Benefício	6º	1º	3º	5º	2º	4º
Parte	Preço Estimado	R\$2.33	R\$3.44	R\$2.76	R\$3.27	R\$3.26	R\$3.82
Panela 50L Alumínio	R\$ 250,00	1	1	2	2	3	3
Tubo Alumínio	R\$ 200,00	1	1	0	0	0	0
Fundo Falso (Elemento Filtrante)	R\$ 120,00	2	2	1	1	1	1
Bomba INOX	R\$ 600,00	2	2	2	2	2	2
Resistência (Fonte Calor)	R\$ 150,00	1	1	2	2	2	2
Sensor de Temperatura	R\$ 50,00	1	1	2	2	3	3
Circuito Potência	R\$ 100,00	1	1	2	2	2	2
Válvula	R\$ 30,00	1	1	7	2	10	3
Tubo (m)	R\$ 10,00	0	1	2	2	3	3
Filtro Carvão Ativo	R\$ 100,00	0	0	0	1	0	1
Válvula solenóide	R\$ 50,00	0	0	0	6	0	8
Microprocessador	R\$ 60,00	1	1	1	1	1	1
LCD	R\$ 50,00	1	1	1	1	1	1
Sensor Presença	R\$ 30,00	0	0	0	2	0	3
Sensor de Nível	R\$ 100,00	0	1	0	2	0	3
Densímetro tempo real	R\$ 1.000,00	0	1	0	0	0	0
Serpentina Cobre	R\$ 100,00	0	0	0	0	1	1

Tabela 1: Lista de components e estimativa de custo das soluções

Na tabela foi incluída uma lista de componentes, bem como o preço estimado destes, possibilitando uma previsão do custo de cada uma das soluções. Estes preços foram estimados em busca preliminar de fornecedores, previamente à definição de todos os requisitos de cada um dos componentes, de forma que a previsão de custos é meramente comparativa. Adicionalmente, as soluções foram ordenadas em relação a Dificuldade de Implementação e ao Benefício trazido, sendo que a 1ª posição significa maior dificuldade de implementação ou maior benefício.

Após analisar as características de cada uma das soluções propostas, nos decidimos pela implementação da número três, na qual o sistema de dois recipientes permite um funcionamento automatizado de grande parte das etapas envolvidas, com interação mínima do usuário. Soluções mais complexas como as que envolvem sistemas do tipo HERMS apresentam algumas vantagens em relação a solução escolhida, como um maior grau de automação e a redução da duração total do processo, porém estas vantagens não nos pareceram justificar a maior dificuldade de implementação e o maior custo final destes sistemas. Analisando soluções do tipo single vessel, ficaram claras as vantagens da redução de espaço e custos que este sistema oferece, principalmente em termos comerciais, porém seu funcionamento apresenta baixo nível de automação. A solução que previa o desenvolvimento de um sistema de medição de densidade em tempo real apresentou grande interesse por parte de profissionais da área, porém, após estudo mais detalhado do problema, este se revelou de grande complexidade, visto que a tecnologia envolvida não está completamente desenvolvida e o processo de produção cervejeiro necessita de precisão alta nas medições de densidade (0,1%). O desenvolvimento deste sistema de medição, portanto, não será abordado no presente trabalho, porém o protótipo a ser construído pode vir a ser utilizado como plataforma de desenvolvimento deste sistema.

2.4 Descrição da Solução Geral

A solução adotada, conforme a figura 3 é composta pelos seguintes elementos:

1. Um Tanque de Mostura, equipado com um elemento filtrante (a), uma resistência elétrica para aquecimento (b), uma válvula extratora (c) e um retorno de mosto(d);
2. Um Tanque de Fervura, equipado com uma resistência elétrica para aquecimento (e), uma válvula extratora (f) e um retorno de mosto excêntrico para realização do Whirlpool (g);
3. Uma bomba, sua entrada conectada a uma válvula seletora entre as saídas dos dois tanques (h), e sua saída conectada a uma válvula seletora entre as entradas dos dois tanques (i);
4. Uma serpentina imersa no Tanque de Fervura no momento do Resfriamento;
5. Um painel de monitoramento e controle do sistema;
6. Uma estrutura mecânica de suporte dos componentes do sistema.

Os tanques ainda serão equipados com sensores de temperatura para a realização do controle, e possivelmente sensores de nível para estimar o volume do conteúdo de cada recipiente. As funcionalidades do painel serão abordadas nos próximos tópicos, bem como as características do suporte mecânico do sistema. A serpentina será percorrida por água fria visando ampliar a transferência de calor durante o Resfriamento, seu funcionamento será especificado futuramente

O sistema executará etapas do processo de maneira autônoma, porém em diversos momentos o aval do usuário será necessário, de maneira a garantir funcionamento seguro. O processo previsto seguirá a seguinte linha:

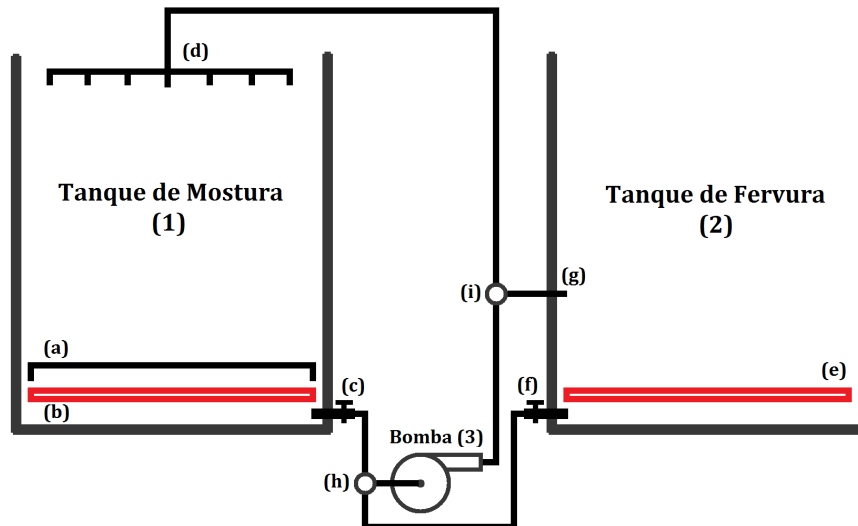


Figura 3: Esquema com duas painelas em vista frontal

1. O usuário aciona o sistema e configura os parâmetros do ciclo de produção a ser executado através do painel;
2. Após acrescentar o malte (previamente moído) ao Tanque de Mostura e a água ao Tanque de Fervura, o usuário aciona o início da produção;
3. A resistência (e) do Tanque de Fervura é acionada, dando início ao aquecimento da água;
4. Quando a temperatura de infusão desejada é atingida, a água é bombeada para o Tanque de Mostura, onde se mistura com o malte;
5. Inicia-se a primeira etapa da Mostura, na qual o mosto é constantemente recirculado pelo Tanque de Mostura, e sua temperatura é controlada no patamar desejado, durante o intervalo de tempo previamente configurado pelo usuário;
6. As etapas seguintes da Mostura são iniciadas automaticamente ao fim da etapa anterior, e ocorrem da mesma forma;

7. A recirculação constante através do elemento filtrante (a) forma gradualmente uma camada de grãos acima deste, que contribuem na filtragem e clareamento do mosto;
8. Ao fim da Mostura, o usuário dá início a transferência do mosto para o Tanque de Fervura, na qual a válvula (i) é comutada, de forma que o líquido é bombeado para a entrada (g) do segundo tanque;
9. Durante esta transferência, o usuário pode optar por realizar a Lavagem, ao despejar água previamente aquecida pela parte superior do Tanque de Mostura;
10. Ao fim da transferência, com o aval do usuário, o aquecimento do mosto é iniciado, durante o qual a temperatura é monitorada;
11. Ao atingir a Fervura, o cronômetro do tempo desta etapa é acionado;
12. Durante a Fervura, o painel avisará o usuário no momento das adições de lúpulo programadas;
13. Ao fim da Fervura, a bomba é acionada automaticamente de forma a recircular o mosto no Tanque de Fervura, dando início ao Whirlpool;
14. O usuário acrescenta a serpentina no Tanque de Fervura e aciona o escoamento de água fria pelo seu interior, de forma a facilitar o Resfriamento;
15. Quando a temperatura atinge o patamar desejado, o usuário interrompe o Whirlpool/Resfriamento, e o sistema entra em estado de espera;
16. Após o repouso, a transferência para o Fermentador é iniciada;
17. Ao fim da transferência, o usuário faz a medição de densidade do mosto (Gravidade Original), inocula a levedura e sela o Fermentador;

18. Fim do ciclo de Produção, o ciclo de Limpeza do equipamento pode ser iniciado.

Nota-se que o processo descrito acima requer interação mínima do usuário, que fica basicamente responsável pelo sequenciamento das etapas e verificação do funcionamento correto do sistema. Ao mesmo tempo, permite que usuários mais exigentes executem certas tarefas, como por exemplo a Lavagem. A não execução dessa, porém, não causa nenhum malefício ao produto final, levando apenas a uma perda de eficiência de extração de açúcares dos grãos. Adicionalmente, a disposição proposta do sistema permite implementação de modificações que permitam uma maior automatização do processo. Por exemplo, a adição de válvulas solenóides e sensores de nível nos tanques possibilitaria a automação completa das etapas de 3 a 9 (excluindo-se a Lavagem), de forma que o sistema funcionaria independente do usuário por cerca de duas horas e meia. A viabilidade desta abordagem será estudada e os elementos necessários serão considerados como opcionais durante o presente relatório.

3 DESENVOLVIMENTO

Uma vez definidos os requisitos de sistema e a solução geral, iniciou-se a fase de projeto de cada subsistema. De maneira geral, define-se o pré-requisito do subsistema, faz-se um dimensionamento crítico e adota-se uma a solução.

3.1 Subsistemas

O processo de brassagem tem essência multidisciplinar, e depende de diversos sub-processos. Independente da solução escolhida, o projeto contempla uma série de subsistemas, cada um deles demandando conhecimentos específicos de diversas áreas da engenharia:

- Sistema de Controle Térmico
 - Modelagem da transferência de calor do sistema
 - Dimensionamento da fonte de calor
 - Dimensionamento do elemento refrigerador
 - Escolha e calibração das sondas térmicas
 - Projeto do controlador térmico
- Sistema Hidráulico
 - Dimensionamento e escolha de bombas

- Possivelmente, controle de servo-válvulas
 - Possivelmente, controle de nível de líquido
- Sistema Mecânico
 - Escolha da solução mecânica
 - Dimensionamento estrutural
 - Construção do equipamento
- Sistema Elétrico/Eletrônico
 - Dimensionamento do circuito de potência
 - Projeto e implementação do hardware
- Sistema de Controle de Processos
 - Modelagem discreta dos processos
 - Escolha do microprocessador e do sistema operacional
 - Programação do microprocessador
- IHM
 - Definição dos requisitos do sistema
 - Escolha dos dispositivos de monitoramento e controle
 - Integração com o microprocessador

3.2 Modelagem Térmica

Uma das funcionalidades críticas do sistema é a realização de controle de temperatura preciso durante a etapa de Mostura. A ação enzimática de quebra de

amido que ocorre durante esta etapa é fortemente influenciada pela temperatura, de forma que uma variação de apenas 2°C é suficiente para alterar o perfil de açúcares desejado na cerveja. Assim, uma modelagem da transferência de calor desta etapa é essencial para o projeto do controlador térmico e para posterior dimensionamento das resistências elétricas e do microprocessador.

3.2.1 Transferência de Calor

Desejamos, através de um controlador implementado no microprocessador, manter a temperatura do Mosto numa faixa de 1°C em relação a temperatura setada para a etapa de Mostura vigente. Os elementos a serem analisados nesta etapa do processo, do ponto de vista do problema da transferência de calor, consistem em:

- Mosto (água + grãos)
- Resistência elétrica
- Bomba
- Tanque de Mostura
- Tubulação de recirculação
- Ambiente

O Mosto é constantemente recirculado, recebe calor da Resistência Elétrica (atuador do controle) e da Bomba, e perde calor para o Tanque e para a Tubulação. Estes, por sua vez, perdem calor para o Ambiente. Pode haver também perda de calor por evaporação. A figura 4 exemplifica o problema:

Nota-se que o problema da transferência de calor é bastante complexo, envolvendo o escoamento de uma substância heterogênea (Mosto), diversos coeficientes

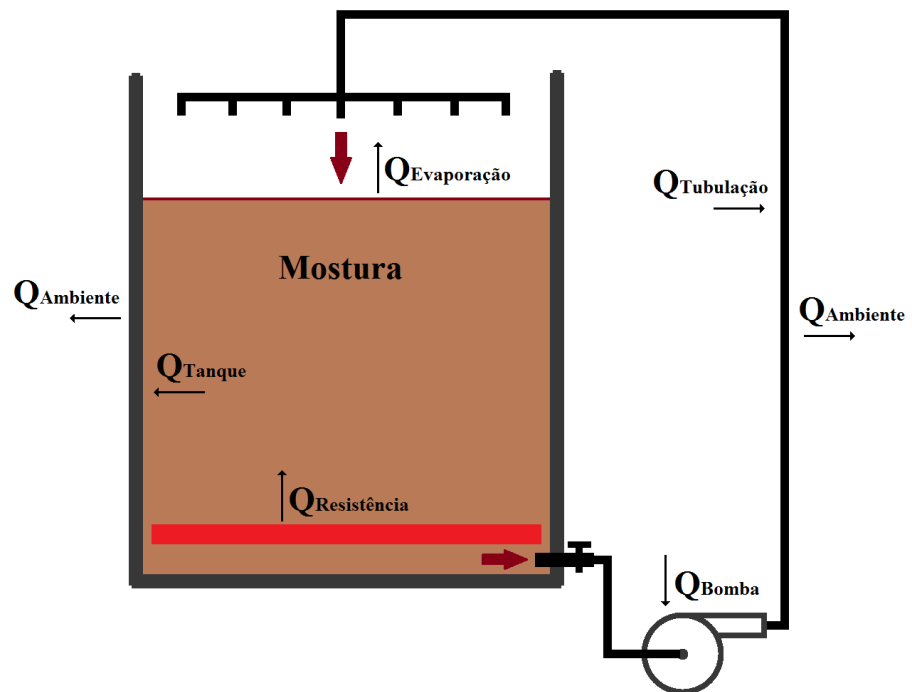


Figura 4: Esquemático para modelagem de transferência de calor

térmicos desconhecidos, e uma perda de calor por evaporação, relacionada a um problema de transferência de massa.

3.2.2 Hipóteses

Visando simplificar o problema térmico de forma a viabilizar uma modelagem preliminar da transferência de calor, as seguintes hipóteses foram adotadas:

1. O gradiente de temperatura no interior do Mosto é desprezível;
2. Os coeficientes de troca de calor por convecção entre o Mosto e o Tanque e entre o Mosto e a Tubulação são elevados o bastante para que não sejam observadas diferenças de temperatura entre esses elementos;
3. O calor fornecido pela Bomba é desprezível;
4. A perda de calor por evaporação é desprezível;
5. A potência fornecida pela Resistência Elétrica é instantaneamente transmitida para o Mosto.

As hipóteses 1, 2 e 5 foram levantadas devido a recirculação constante no interior do Tanque, que promove homogeneização do Mosto e caracteriza condições de transferência de calor por convecção forçada (elevados coeficientes h) entre os elementos citados. A hipótese 3 nos parece razoável uma vez que a potência nominal da bomba (55W) é cerca de duas ordens de grandeza inferior a potência das Resistências Elétricas de equipamentos existentes no mercado (5kW). A hipótese 4 deve ser aceitável se o Tanque de Mostura for mantido fechado durante o processo.

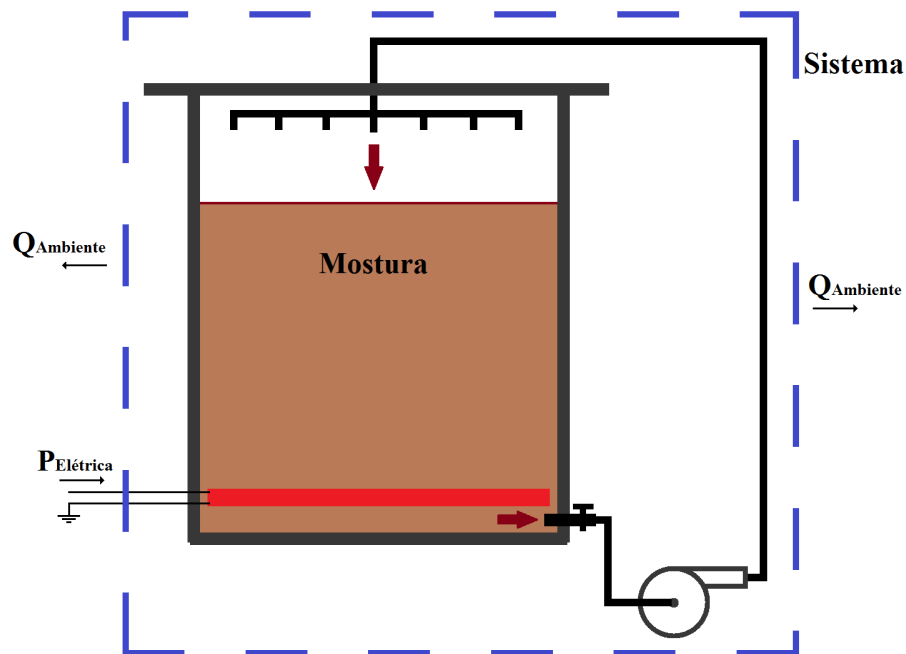


Figura 5: Esquemático para modelagem de transferência de calor simplificado

3.3 Análise Térmica

As hipóteses acima nos permitem adotar uma nova abordagem do problema térmico. Um novo sistema, composto pelo Mosto, Tanque de Mostura e Tubulação, pode ser considerado, uma vez que a hipótese 1 garante que estes três elementos estão sempre na mesma temperatura. Este problema simplificado consiste então em relacionar a variação da temperatura do sistema no tempo com a potência fornecida pela Resistência Térmica e a potência perdida para o Ambiente por convecção natural.

Segundo a Primeira Lei da Termodinâmica, descrita, por exemplo, em (BORGNAKKE; SONNTAG, 2009), a taxa de variação da energia térmica de um sistema é igual a potência térmica líquida que entra neste sistema menos a

potência fornecida em forma de trabalho pelo sistema:

$$\frac{dE_T}{dt} = \Delta\dot{Q} - \dot{\tau}_{fornecido} \quad (3.1)$$

O sistema não realiza trabalho externo, e a potência térmica líquida que nele entra é igual a diferença entre a potência elétrica fornecida e a potência perdida por convecção natural:

$$\frac{dE_T}{dt} = P_{el} - \dot{Q}_{conv,natural} \quad (3.2)$$

Segundo (INCROPERA et al., 2014), os termos referêntes a taxa de variação da energia térmica do sistema e a potência perdida por convecção natural podem ser escritos:

$$\frac{dE_T}{dt} = m_{sistema} \times c_{sistema} \times \frac{dT_{sistema}}{dt} \quad (3.3)$$

$$\dot{Q}_{conv,natural} = h_{conv,natural} \times A_{externa}(T_{sis} - T_{amb}) \quad (3.4)$$

Nas quais os termos massa e área externa do sistema são:

$$m_{sistema} = m_{mosto} + m_{tanque} + m_{tub} \quad (3.5)$$

$$A_{externa} = A_{externatanque} + A_{externatubulao} \quad (3.6)$$

O calor específico do sistema é aproximado por uma média dos valores espe-

cíficos dos seus elementos, ponderado por suas massas:

$$C_{sistema} = \frac{m_{mosto}C_{mosto} + m_{tanque}C_{tanque} + m_{tub}C_{tub}}{m_{sistema}} \quad (3.7)$$

A equação 3.2 pode ser reescrita:

$$m_{sistema}C_{sistema} \frac{dT_{sist}}{dt} = P_{el} - h_{conv,natural} \times A_{externa}(T_{sis} - T_{amb}) \quad (3.8)$$

Reorganizando, obtemos a equação diferencial que rege o comportamento térmico do sistema durante a mostura:

$$P_{el} = m_{sistema}C_{sistema} \frac{dT_{sist}}{dt} + h_{conv,natural} \times A_{externa}(T_{sis} - T_{amb}) \quad (3.9)$$

3.4 Dimensionamento das Resistências

As resistências são elementos eletricamente resistivos cuja função é fornecer calor através da dissipação Ôhmica. No sistema em questão, elas são os dispositivos de atuação do controle de temperatura dos tanques. As potências das resistências devem ser dimensionadas segundo o funcionamento crítico de cada recipiente. A duração total do processo de brassagem é em geral bastante longa, durando até 8 horas com equipamentos simples, e um dos intuitos da sua automação é a redução deste período. Em vários momentos do processo o sistema deve transitar entre duas temperaturas, o que consome um intervalo de tempo considerável. Quanto mais potência as resistências fornecerem ao sistema, menores são esses intervalos de tempo. Assim, determinamos como requisito do equipamento que as resistências sejam capazes de fornecer a potência necessária para que a

taxa média de variação da temperatura seja ao menos $1^\circ\text{C}/\text{min}$.

$$\frac{d\bar{T}}{dt} \cong 1^\circ\text{C}/\text{min} \quad (3.10)$$

3.4.1 Dimensionamento da Resistência do Tanque de Mostura

Dentre os processos executados no Tanque de Mostura, o que mais exige potência da Resistência é a subida da temperatura do sistema entre dois patamares. A Mostura é um processo de ação enzimática, e diferentes patamares de temperatura estimulam a atividade de diferentes enzimas. O mais baixo desses patamares se localiza por volta dos 50°C , e o mais alto em 75°C . Assim, o maior degrau de temperatura exigido no Tanque de Mostura é de 25°C , sendo esse o funcionamento crítico considerado no dimensionamento da resistência. A dinâmica térmica do Tanque de Mostura é descrita pela Equação 3.9, que, visando o presente dimensionamento, pode ser aproximada por:

$$P_{el} = m_{sis}c_{cis}\frac{d\bar{T}}{dt} + h_{conv,natural}A_{ext}(\bar{T} - T_{amb}) \quad (3.11)$$

Onde T_m é a temperatura média no intervalo em que a variação de temperatura ocorre. Os valores das variáveis desta equação foram estimados, e constam na seguinte tabela:

	Massa kg	Calor Específico ($\frac{J}{kgK}$)	Área (m^2)	$h_{conv,natural}$ ($\frac{W}{m^2K}$)	T_m ($^\circ\text{C}$)	T_{amb} ($^\circ\text{C}$)
Tanque	5	900	1	10	-	-
Tubulação	1	900	0.01	10	-	-
Mosto	80	4200	-	-	-	-
Sistema	86	3970	1.01	10	62.5	20

Tabela 2: Dimensionamento da resistência do tanque de mostura

Estes valores foram estimados a partir de uma produção de 50L de cerveja com 5% de teor alcoólico por volume, com auxílio do software BeerSmith. Este software auxilia no planejamento de receitas de cerveja, e fornece, por exemplo,

a quantidade total de água e malte utilizados no processo, bem como o volume necessário para a realização de cada etapa. Um estudo mais aprofundado deste problema será realizado na ocasião do dimensionamento dos Tanques. Os valores de massa e área externa do tanque de mostura foram estimados a partir de opções comerciais de caldeirões de alumínio com volume superior a 80L. Os tanques e a tubulação foram aproximados por alumínio puro em relação ao calor específico. O calor específico do mosto foi aproximado pelo da água. O valor padrão de $10 \frac{W}{m^2 K}$ foi adotado para o coeficiente de convecção natural. A partir dos valores estimados acima e do requisito de operação definido pela Equação 3.10, podemos resolver a Equação 3.11, de forma a obter a Potência fornecida pela Resistência do Tanque de Mostura:

$$P_{mostura} = 6,1kW \quad (3.12)$$

3.4.2 Dimensionamento da Resistência do Tanque de Fervura

Considerando que o aquecimento anterior a fervura é o funcionamento crítico do Tanque de Fervura em relação ao dimensionamento da potência fornecida, podemos executar uma análise semelhante a do item anterior. A temperatura mais baixa com a qual o mosto atinge o Tanque de Fervura é 50°C, e este deve ser aquecido até atingir 100°C. Assim, o maior degrau de temperatura exigido no funcionamento do Tanque de Fervura é de 50°C, e a temperatura média neste caso é 75°C. O problema térmico relativo ao funcionamento descrito acima é muito semelhante ao representado pela Equação 3.11, com a exceção de que não há recirculação, portanto os termos relativos a Tubulação são ignorados. Para este caso, os valores das variáveis da Equação 3.11 foram estimados seguindo a mesma metodologia do dimensionamento da Resistência do Tanque de Mostura, e constam na tabela a seguir:

	Massa kg	Calor Específico ($\frac{J}{kgK}$)	Área (m^2)	$h_{conv,natural}$ ($\frac{W}{m^2K}$)	T_m ($^{\circ}C$)	T_{amb} ($^{\circ}C$)
Tanque	5	900	1	10	-	-
Mosto	70	4200	-	-	-	-
Sistema	75	3980	1	10	75	20

Tabela 3: Dimensionamento da resistência do tanque de fervura

A partir dos valores estimados acima e do requisito de operação definido pela Equação 3.10, podemos resolver a Equação 3.11, de forma a obter a Potência fornecida pela Resistência do Tanque de Fervura:

$$P_{fervura} = 5,5kW \quad (3.13)$$

3.5 Sistema Hidráulico

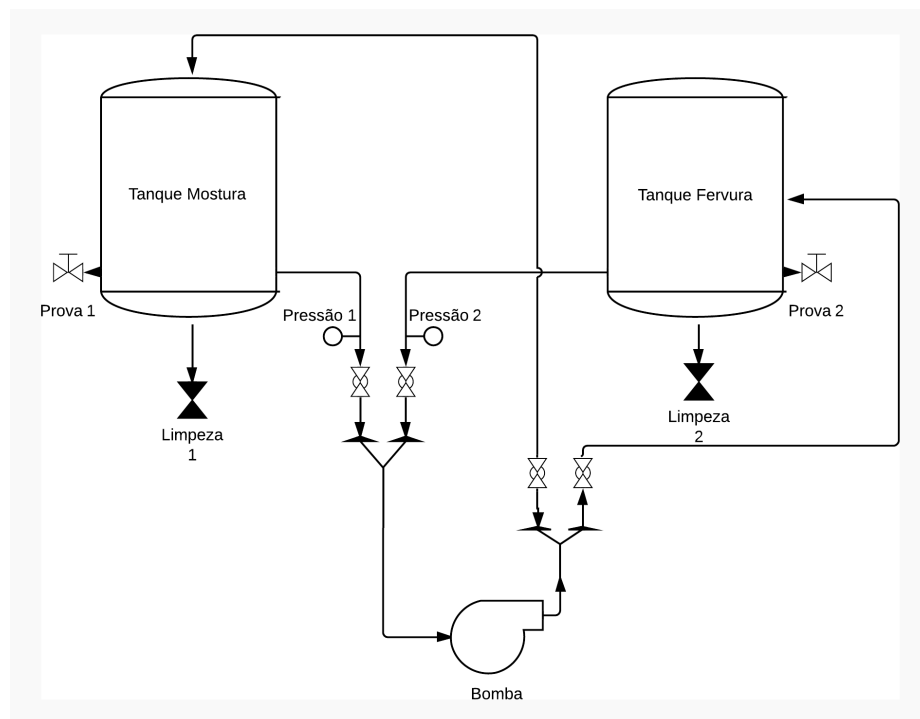


Figura 6: Esquema de válvulas e conexões

3.5.1 Dimensões relevantes

Altura do Tanque(h_{tanque}): 47,00cm

Desnível da bomba(h_{bomba}): 25,00cm

Diâmetro: 48,50cm

3.5.2 Pressão Hidráulica

$$P_H = \mu_{gua} g h_T = 1000 kg/m^3 \times 10 m/s^2 \times 0,72 m$$

$$P_H = 7200 Pa = 0,072 atm$$

Onde $h_T = h_{tanque} + h_{bomba}$

3.5.3 Pressão de Trabalho Máxima

$$P_{MAX} = P_H + P_{ATM} \approx 1,1 atm$$

3.5.4 Válvulas e Conexões

Segundo o esquema apresentado na figura 6, o sistema hidráulico será composto por uma bomba hidráulica, quatro válvulas de vias simples, dois manômetros para medir a pressão na válvula de entrada da bomba e 4 válvulas de acionamento manual: duas para prova e duas para drenagem dos tanques.

3.5.5 Dimensionamento da Bomba

Tipos

São três os principais tipos de bombas hidráulicas utilizadas para fabricação de cerveja:

- Centrífuga
- Peristáltica
- Diafragma

Requisitos

1. Temperatura de trabalho. A bomba será utilizada para homogeneização da temperatura do mosto durante as etapas da brassagem. Durante a Fervura, tem-se temperatura máxima de trabalho que é de 100°C .
2. Bomba alimentícia
3. Vazão: Para uma altura de aproximadamente 1 metro, a vazão típica para bombas em processos de fabricação de cerveja está em torno de 3 GPM (Galões por Minuto) ou 11,3 LPM (Litros por Minuto) (FOSTER, 2012).
4. Comprimento da tubulação: Menor comprimento possível com reduzido número de curvas e conexões para reduzir perda de carga e reduzir risco de cavitação.
5. Frequência de trabalho 60 Hz

Curva do Sistema

$$\Delta h_t = \frac{8}{\pi g} \left[\frac{k_s}{D_s^4} + \frac{fL}{D_r^5} \right] Q^2$$

A curva característica do sistema avalia as perdas energéticas do sistema em função das perdas locais e distribuídas pela tubulação. Para sua aplicação, admitem-se as seguintes hipóteses:

- Regime de Escoamento Permanente
- Perdas locais no duto de sucção
- Fluido Incompressível
- Cálculos realizados considerando-se para o mosto as mesmas propriedades da água

Onde:

D_s : Diâmetro do tubo de sucção

D_r : Diâmetro do tubo de recalque

f : Coeficiente de perda de carga distribuída

Δh_r : Perda de carga total

Determinação de f

Para o mosto foram consideradas suas propriedades como equivalentes à da água, portanto:

Densidade

$$\rho_{100^\circ C} = 958 \text{ kg/m}^3$$

Viscosidade

$$\mu_{100^\circ C} = 0,0003 \text{ N/m}^2$$

Diâmetro da Tubulação

$$D = \frac{1''}{2} = 12,7 \text{ mm}$$

Reynolds

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{4 \rho Q}{\mu \pi D}$$

$$Re_{1/2'', 100^\circ C} = 22700$$

Rugosidade do Aço Inox

$$\varepsilon = 0,015 mm$$

Pelo Diagrama de Moody

$$f_{1/2'', 100^\circ C} = 0,025$$

Determinação de K_L

$$K_L = 5 \quad cotovelos + 2 \quad válvulas = 13,5$$

Tubulação

$$L = 3m$$

$$D = \frac{1}{2}''$$

Curva do Sistema

Após os cálculos descritos acima, obtém-se a curva característica do sistema

$$\Delta h_t = 0,171 Q^2$$

Escolha da Bomba

Dentre os tipos de bombas considerados, optou-se pela bomba centrífuga que apresenta um bom custo-benefício, trabalha com fluido em altas temperaturas

com a desvantagem de que o conjunto motor-bomba deve permanecer em afogamento. A bomba GP-100 da fabricante INOVA, foi utilizada como referência para este dimensionamento.

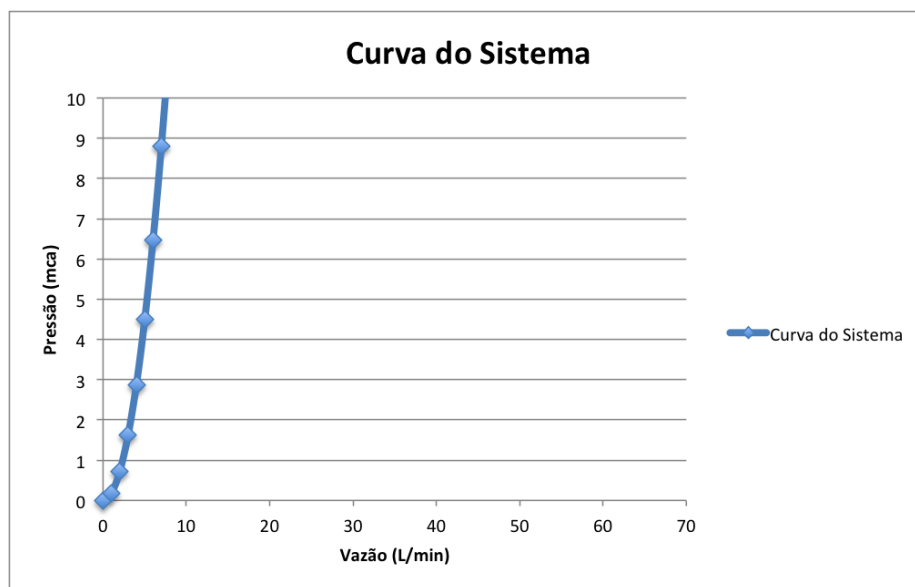


Figura 7: Gráfico da Curva do Sistema

Comparando-se a curva do sistema com a curva de desempenho da bomba fornecida pelo fabricante chega-se a uma vazão de aproximadamente $4L/min$.

Como a vazão não bate com a estimativa inicial, faz-se necessária uma iteração na qual confirma-se a vazão de $4L/min$.

3.5.6 Conexões

Requisitos

1. Temperatura de trabalho: $100^{\circ} C$
2. Reduzir as perdas localizadas e distribuídas na tubulação
3. Evitar vazamentos
4. Garantir a circulação do mosto durante os processos de mostura

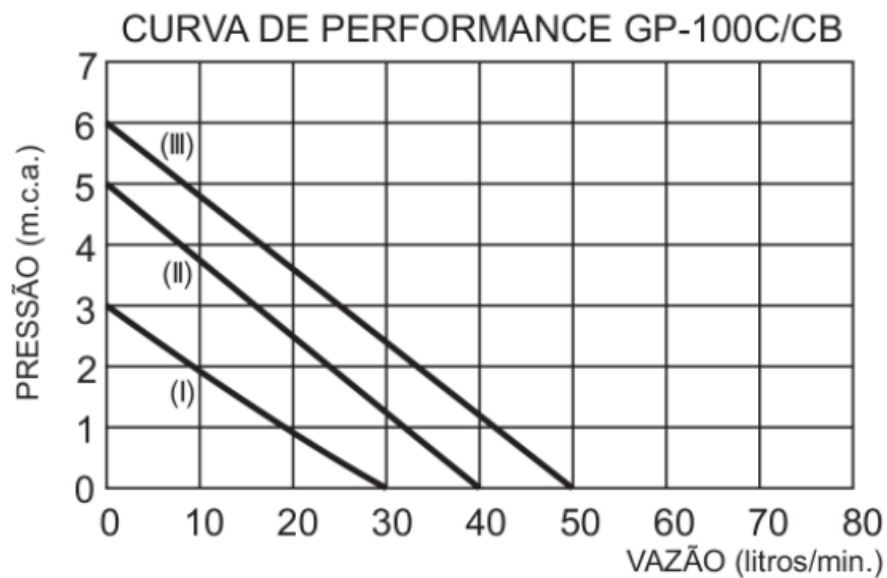


Figura 8: Gráfico de Performance da Bomba GP-100. Fonte: Manual do Fabricante

5. Transferência do mosto entre os tanques de mostura e fervura

3.5.7 Tanques

Requisitos

1. Volume de trabalho para 80 L
2. Material não oxidável
3. Permitir acoplamento de válvulas e conexões hidráulicas
4. Dois reservatórios: para fervura e para mostura.

Material

Alumínio Fornecedor: Eirilar Densidade: 2700 kg/m^3

Dimensões/Peso

Diâmetro Externo: 495 *mm* Espessura: 2 *mm* Peso: Pesar?

Fabricação/Montagem

Para a adequação dos caldeirões às necessidades do projeto, faz-se necessário furá-lo para fixação dos elementos hidráulicos.

3.6 Mecânico

3.6.1 Estrutura para suporte equipamento

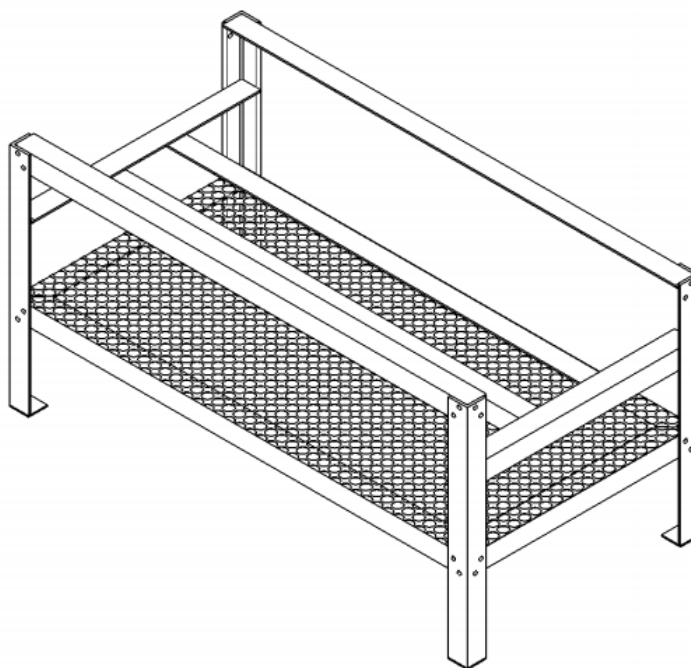


Figura 9: Vista em perspectiva da estrutura de suporte para o equipamento

Requisitos

1. Suportar 100 *Kg* em equipamento.
2. Ser funcional: servir de apoio para ferramentas de trabalho, entre outras necessidades.
3. Oferecer conforto durante operação.
4. Servir de suporte para a bomba, que deve trabalhar abaixo do nível dos reservatórios.

Material

Cantoneiras de aço *SAE1010/20*

Tensão admissível: 300 *MPa*

Densidade: 7850 *kg/m*³

Dimensões e Peso

Cantoneiras de abas iguais, de 2" e espessura 1/8".

Quantidade	Comprimento
4	1200
2	600
2	602
4	600
2	1187
Comprimento Total	11978
Peso Estimado	30 kg

Tabela 4: Dimensões de corte das cantoneiras para montagem

Fabricação/Montagem

Para facilitar o transporte do equipamento e para simplificar o processo de fabricação, foi utilizada fixação por parafusos no lugar de solda sempre que pos-

sível. Somente dois pontos utilizam solda por necessitarem de maior resistência mecânica devido ao peso dos tanques (ver figura).

Análise de esforços

Estimativa da espessura mínima dos perfis, utilizando um modelo de viga engastada, considerando uma cantoneira de abas iguais, de comprimento 2" e espessura 1/8", sujeita a uma carga de 1000 *N* no centro.

Considerando o perfil como uma viga do tipo 5 (Figura 29), da Tabela A-9 do livro Shigley's Mechanical Engineering Design (Referência (??)).

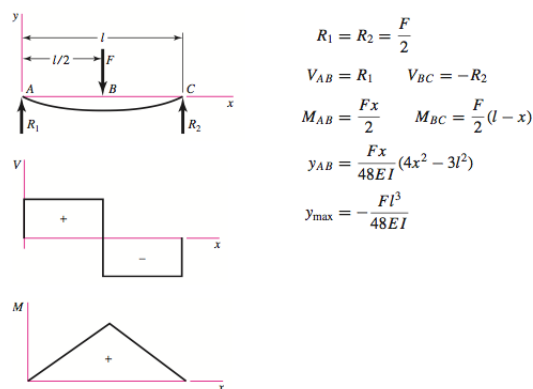


Figura 10: Modelo de suporte simples

Momento máximo é em B, o comprimento $x = 0.6 \text{ m}$:

$$M_B = \frac{Fx}{2} = \frac{1000 \times 0.3}{2} = 150 \text{ Nm}$$

Utilizando-se os valores de *I* e *c*₁ presentes na tabela em anexo, obtemos uma tensão máxima de trabalho menor que a tensão admissível do material.

$$\sigma = \frac{Mc_1}{I} = \frac{150 \times 0.546 \times 10^{-2}}{0.484 \times 10^{-8}} = 169 \text{ MPa}$$

3.7 Modelagem dos Processos

Após definição do sistema e seu funcionamento, uma série de abordagens de modelagem foram adotadas, visando melhor entender o processo e facilitar o desenvolvimento do software de controle.

3.7.1 Casos de Uso

Os casos de uso definem as ações que o usuário consegue executar através do sistema. O diagrama de casos de uso do sistema segue abaixo:

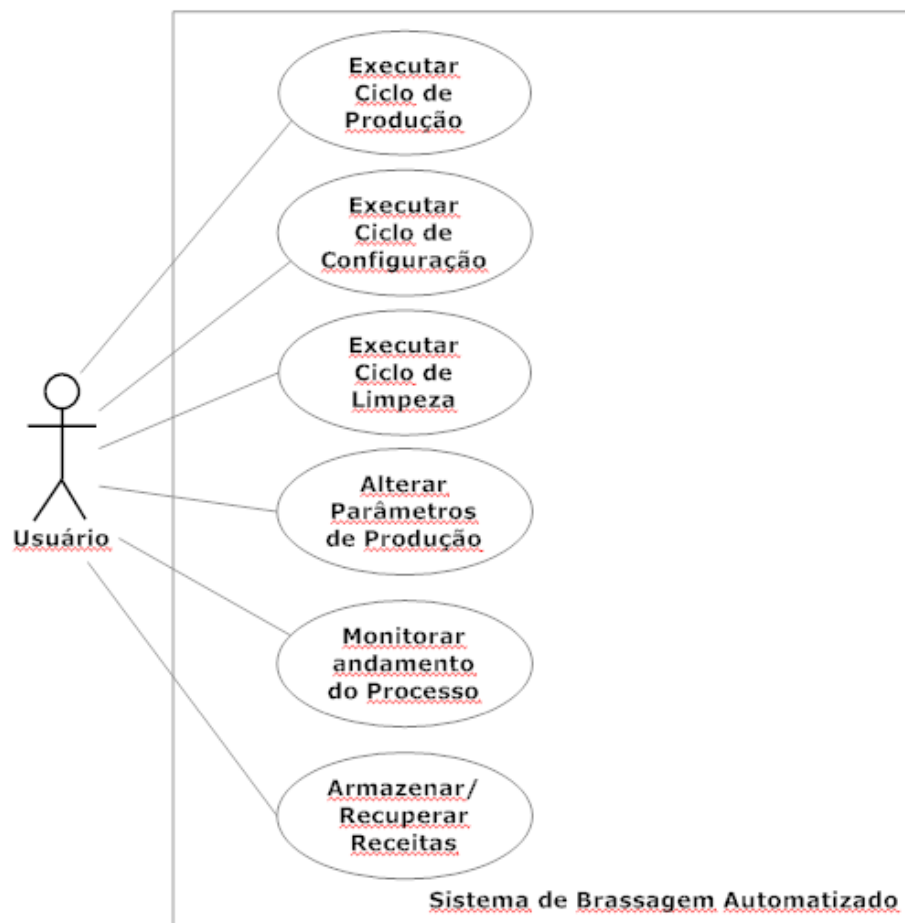


Figura 11: Diagrama dos Casos de Uso

Detalhamento dos casos de uso:

1. Executar ciclo de Produção: O usuário deve ser capaz, através do sistema, de executar um ciclo de produção de cerveja, contendo todas as etapas anteriormente descritas;
2. Executar ciclo de Configuração: Modificar parâmetros que regem o funcionamento do sistema;
3. Executar ciclo de Limpeza: Executar uma série de atividades que auxiliem na limpeza dos componentes do sistema;
4. Alterar Parâmetros de Produção: Alterar parâmetros do processo durante a execução do ciclo de Produção;
5. Monitorar andamento do Processo: obter informações sobre a etapa em andamento no ciclo de Produção, como tempo restante e temperaturas, além do estado de atividade dos componentes do sistema (Bomba, resistências, válvulas, etc);
6. Armazenar Receitas: Armazenar uma edição do conjunto de parâmetros do processo;
7. Recuperar Receitas Armazenadas: Recuperar uma edição do conjunto de parâmetros do processo armazenada anteriormente, de forma a facilitar a reprodução de receitas

3.7.2 Listagem dos Componentes do Sistema

Do ponto de vista do software embarcado, o sistema é composto por um microcontrolador e uma série de dispositivos periféricos, descritos a seguir:

	Classificação	Qtde	Função	Sinal Recebido do Processador	Sinal Enviado ao Processador
Painel LCD	Monitoramento	1	Interface Homem - Máquina	Dados a serem exibidos	-
LED	Monitoramento	5	Monitoramento dos dispositivos periféricos	Estado de acionamento do periférico	-
Buzzer	Monitoramento	1	Alertar o usuário	Sinal de acionamento do Buzzer	-
Botão	Controle	5	Interação do usuário	-	Navegação/seleção no Menu do Painel
Driver Bomba	Atuador	1	Controla o funcionamento da Bomba	Sinal de acionamento da Bomba	-
Driver Resistência	Atuador	2	Controla o funcionamento das Resistências	Sinal de acionamento da Resistência	-
Sensor Térmico	Sensor	2	Monitoramento da temperatura	-	Medição de Temperatura
Válvula Solenóide	Atuador	2	Direcionamento do fluxo da Bomba	Sinal de acionamento da Válvula	-
Sensor de Nível	Sensor	2	Monitoramento de volume	-	Medição de Nível

Tabela 5: Tabela de Dispositivos Periféricos

3.7.3 Modelagem do Funcionamento do Sistema

Com intuito de documentar e organizar o software, realizamos uma modelagem geral do funcionamento do sistema, composta por cinco estados básicos, segundo o diagrama:

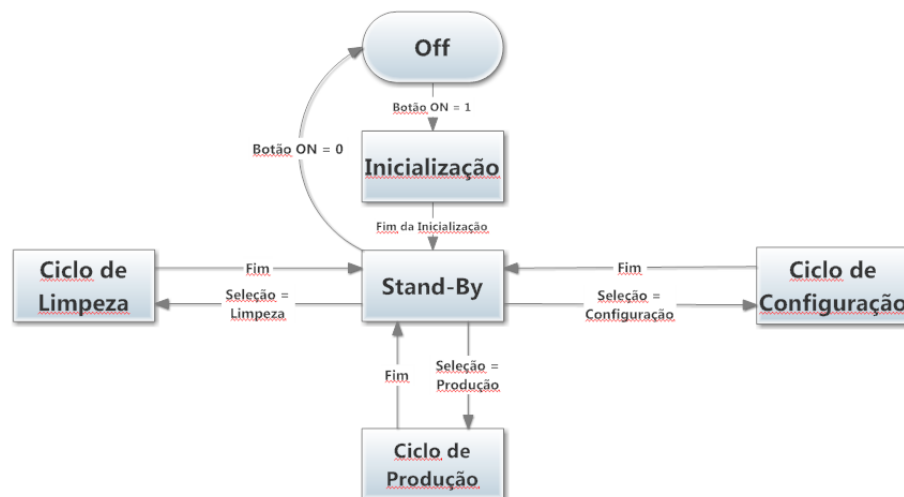


Figura 12: Modelagem do Funcionamento Geral do Sistema

Ao ligar-se o sistema, este entra no estado Inicialização, no qual as variáveis e as sub-rotinas do sistema são inicializadas. Ao fim desta etapa, o sistema transita automaticamente para o estado Stand-By, no qual espera o usuário selecionar a próxima atividade. O usuário tem quatro opções: desligar o sistema, realizar um Ciclo de Limpeza, Ciclo de Configuração ou Ciclo de Produção. No presente documento apenas este último ciclo será descrito, por ser a funcionalidade primária do sistema.

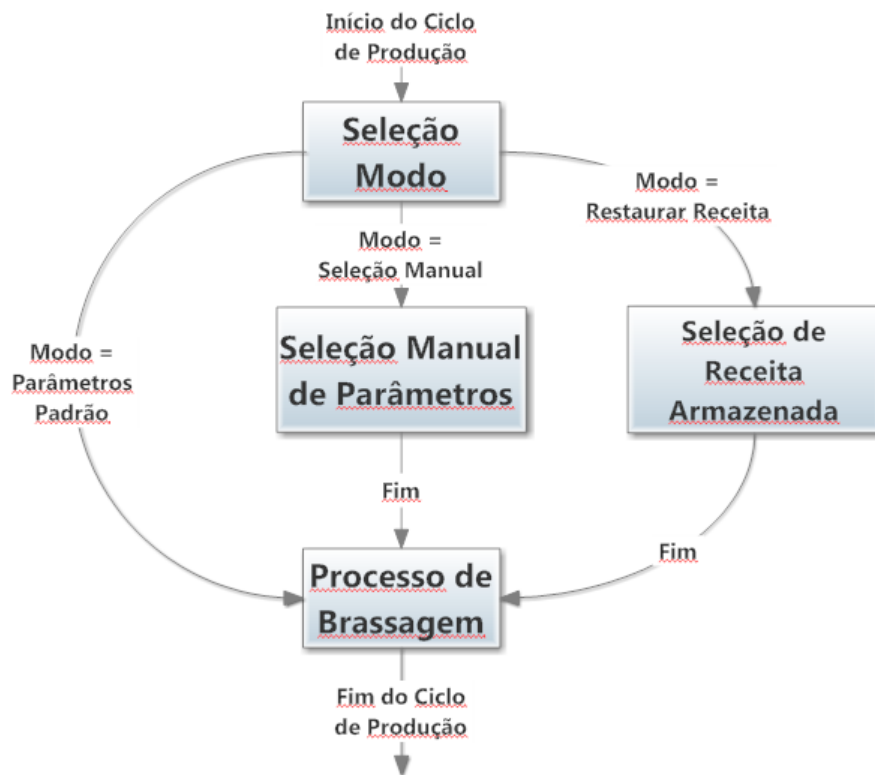


Figura 13: Modelagem do Ciclo de Produção do Sistema

Assim que o Ciclo de Produção é acionado, o sistema entra num estado de Seleção de Modo, no qual o usuário deve escolher entre restaurar os parâmetros de uma receita armazenada, selecionar manualmente os parâmetros, ou utilizar os parâmetros padrão. Estes parâmetros são uma série de variáveis globais que regem o funcionamento do sistema, como por exemplo a duração de uma etapa de Mostura, e o patamar de temperatura relacionado. Uma vez determinados estes parâmetros, o processo de Brassagem é inicializado.

3.8 Modelagem Discreta do Processo de Brassagem

O processo de Brassagem é composto por diversas etapas, cada uma delas caracterizada por um diferente funcionamento dos dispositivos periféricos do sis-

tema. O encadeamento correto dessas etapas é de fundamental importância não só no produto final, mas também no funcionamento seguro do sistema. Assim, uma modelagem discreta das etapas e transições envolvidos se faz necessária. Essa modelagem auxiliará no desenvolvimento do software e permitirá prever e evitar funcionamentos indesejados do sistema. Para modelar o processo, escolhemos a notação SFC (Sequential Function Chart) devido a sua simplicidade. As etapas são representadas por retângulos e as transições por retas cortadas. Entre duas etapas deve sempre haver uma transição. A cada etapa pode ser relacionada uma série de ações, que são executadas enquanto a etapa estiver ativa. A transição entre duas etapas se dá quando as condições relativas a esta transição são atingidas. A notação tem direção fixa, de cima para baixo. Na figura a seguir as etapas previamente descritas do processo de Brassagem são modeladas através da notação SFC. Parte do seu formalismo foi deixado de lado por não ser necessário.

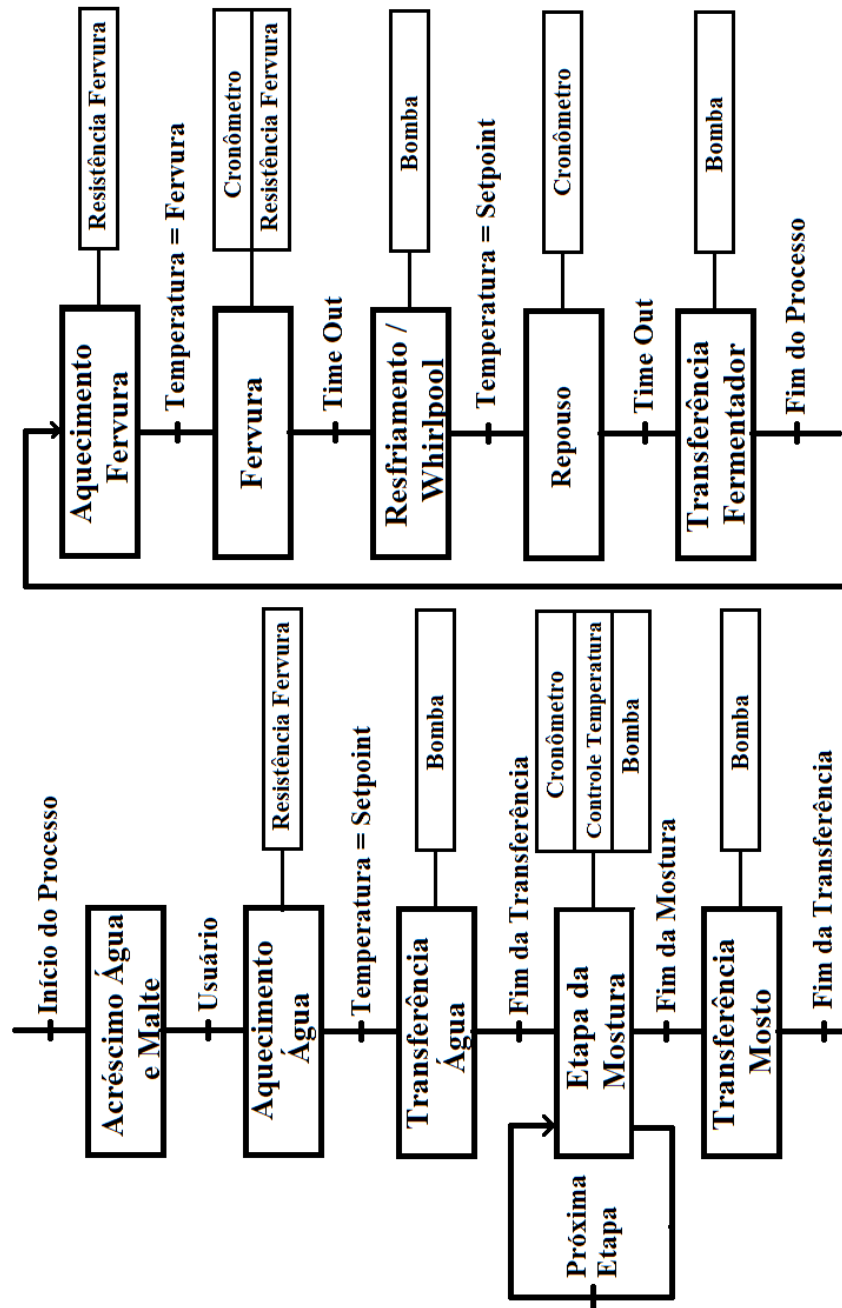


Figura 14: Diagrama Funcional Sequencial

4 PROTÓTIPO BRAU#1

O primeiro protótipo BRAU#1 foi elaborado para testar o funcionamento de cada subsistema.



Figura 15: Protótipo BRAU#1 no dia da Brassagem Piloto

A seguir descreve-se a compra dos componentes necessários para sua construção e a Brassagem Piloto, realizada no dia 29/10.

4.1 Relatório de Compras

4.1.1 Resistências

Requisitos

- Alimentação: 220 V AC

- Potência: $6,1\text{ kW}$
- Baixa relação Potência/Comprimento (“Densidade de Potência”), para evitar caramelização indesejada de mosto
- Possibilitar a fixação na parte inferior dos tanques
- Material com grau alimentício

Solução adotada

Serão utilizadas duas resistências elétricas em aço INOX, 220 V , 5 kW de potência e 1750 mm de comprimento, resultando em densidade linear de potência de $2,9\text{ W/mm}$. As resistências têm formato próprio pra fixação nas paredes de tanques cilíndricos.



Figura 16: Resistencia Adquirida

A potência nominal das resistências é inferior aos valores obtidos no dimensionamento ($6,1\text{ kW}$ para o Tanque de Mostura e $5,5\text{ kW}$ para o Tanque de Fervura). Esta escolha de projeto levou em consideração o tempo e o custo adicionais relativos a fabricação sob encomenda de resistências de maior potência compatíveis com as necessidades do sistema, e provavelmente implicará num aumento da duração total do processo.

4.1.2 Driver Resistências

Requisitos

As resistências utilizadas têm tensão de alimentação de 220 V AC e consomem cerca de 23 A , logo não pode ser implementada diretamente via microcontrolador.

Um elemento de acionamento deve ser utilizado, com os seguintes requisitos:

- Suprir o fornecimento de potência
- Possibilitar a implementação de malha de controle de temperatura
- Ter sinais de controle compatíveis com o microcontrolador

Solução adotada

Serão utilizados Relés de Estado Sólido (SSR) do modelo MGR-1D4840 produzidos pela Carlo Gavazzi. Estes dispositivos possuem método de chaveamento Zero-Crossing Switch (o que reduz a geração de interferência eletromagnética), trabalham em tensões alternadas de saída de até 400 V , podem alimentar cargas de até 40 A , são acionados por sinais de $4 - 32\text{ V}$ e 12 mA e apresentam tempo de resposta de 10 ms , assim sendo compatíveis a aplicação em questão.

A estratégia de controle térmico adotada consiste num controlador PID discreto implementado através do método de “Ciclos Inteiros”. Nele o período da ação de controle é fixo num múltiplo do período de oscilação da rede elétrica e o Relé alimenta a resistência apenas numa porcentagem deste período, baseado na ação de controle calculada.

4.1.3 Sensores de Temperatura

Requisitos

- Precisão: $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$



Figura 17: Solid State Relay

- Faixa de temperatura: 0 – 100 °C
- Nível alimentício
- Montagem adequada aos Tanques

Solução adotada

Serão utilizados sensores RTD (Resistance Temperature Detectors) na configuração de três cabos, de fabricação em INOX da Auber Instruments. O modelo PT100-L401/2NPT será utilizado no tanque de mostura, e o modelo PT100-L50M14 será utilizado no tanque de fervura. Ambos apresentam precisão Classe A ($\pm 0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ em temperatura de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) e suportam até $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. O sensor do tanque de fervura será fixado na parede deste, a uma altura de 100mm do fundo, através de rosca e contra-porca M14, e a vedação será garantida com um anel de silicone. A ponta de prova tem 500mm de comprimento e 4mm de diâmetro.

O sensor do tanque de mostura é mais curto (20mm) e sua rosca de fixação é

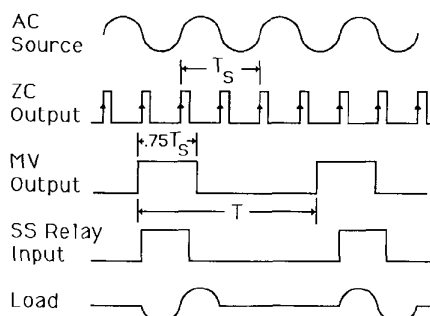


Figura 18: Controle de Ciclos Inteiros



Figura 19: Sensor de Temperatura para Fervura

cônica, para garantir vedação ao ser acoplado num conector hidráulico de $\frac{1}{2}$ polegada do tipo “T”. Este conector será fixo na válvula de saída do tanque para a bomba. Esta localização foi escolhida para obter uma leitura mais significativa da temperatura média do mosto, uma vez que a presença dos grãos de malte podem causar gradientes térmicos no tanque.

4.1.4 Bomba

Requisitos

1. Temperatura de trabalho. A bomba será utilizada para homogeneização da temperatura do mosto durante as etapas da brassagem. Durante a Fervura, tem-se temperatura máxima de trabalho que é de 100°C .
2. Bomba alimentícia



Figura 20: Montagem do Sensor de Temperatura para Mostura

3. Vazão: Para uma altura de aproximadamente 1 metro, a vazão típica para bombas em processos de fabricação de cerveja está em torno de 3 GPM (Galões por Minuto) ou 11,3 LPM (Litros por Minuto) (FOSTER, 2012).
4. Comprimento da tubulação: Menor comprimento possível com reduzido número de curvas e conexões para reduzir perda de carga e reduzir risco de cavitação.
5. Frequência de trabalho 60 Hz

Bomba Solar Project

Fornecedor: Solar Project Conexões: plástico de nível alimentício Temperatura de trabalho: -40oC a 105oC Voltagem: 9V a 14V Potência: 14W Vazão Teórica: de 1LPM a 11LPM Vazão Medida: 5LPM

4.1.5 Driver Bomba

Requisitos

A bomba Solar Pump que será utilizada exige tensão de alimentação de 7 a 14V DC e consome até 1A, logo não pode ser implementada diretamente via mi-

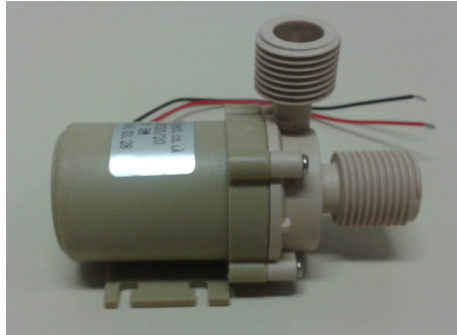


Figura 21: Bomba Solar Project

crocontrolador. Um elemento de acionamento deve ser utilizado, com os seguintes requisitos:

- Alimentar a bomba de forma a permitir o controle de fluxo, através de sinal analógico ou PWM
- Ser acionado através do microcontrolador (5 V, 40 mA)

Solução adotada

Será adotado um módulo Ponte H baseado no CI LN298N para alimentar e controlar a vazão da bomba. Este módulo é controlado via PWM (5 V) e pode alimentar até dois motores DC com até 35 V e 2 A.

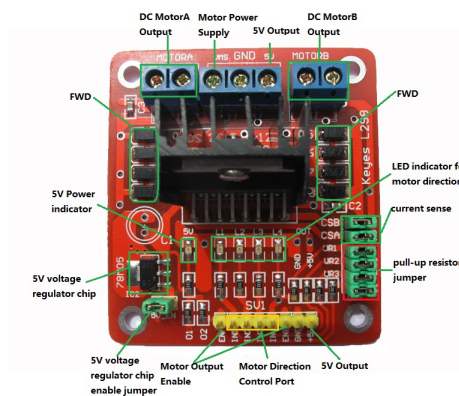


Figura 22: Módulo Ponte H

4.1.6 Tubos e Conexões

Requisitos

1. Temperatura de trabalho. A bomba será utilizada para homogeneização da temperatura do mosto durante as etapas da brassagem. Durante a Fervura, tem-se temperatura máxima de trabalho que é de 100°C .
2. Nível alimentício
3. Comprimento da tubulação: Menor comprimento possível com reduzido número de curvas e conexões para reduzir perda de carga e reduzir risco de cavitação.
4. Evitar vazamentos
5. Garantir a circulação do mosto durante os processos de mostura
6. Transferência do mosto entre os tanques de mostura e fervura

Solução Adotada

Foram adquiridos os componentes necessários em latão, que pode ser utilizado para aplicações alimentícias e resiste à temperatura especificada. Na ausência de válvulas 3 por 2 vias, utilizamos uma conexão T e duas válvulas solenoides simples.

Ver tabela 6

4.1.7 Tanques

Requisitos

1. Possuir volume útil para produção de 50 L de mosto (80L no tanque de mostura e 70 L no tanque de fervura, considerando processo com etapa de

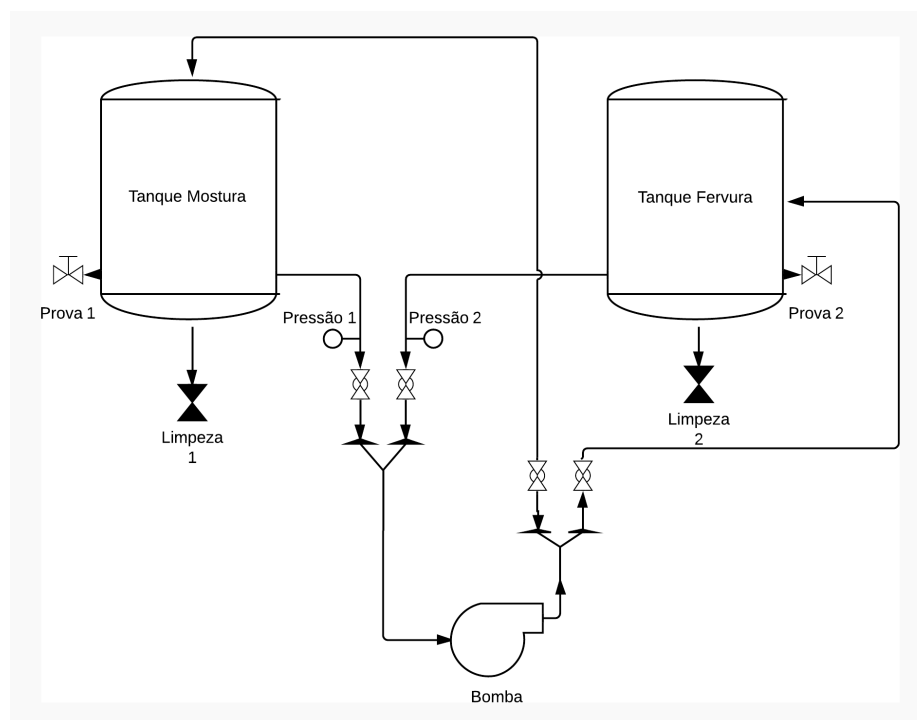


Figura 23: Diagrama de conexões hidráulicas do sistema

Lavagem, 70% eficiência de extração de açúcares e limitando as receitas em até 17 *kg* de malte)

2. Minimizar perdas térmicas
3. Permitir acoplamento de válvulas e conexões hidráulicas
4. No tanque de mostura, um sistema de contenção dos grãos e filtragem do mosto deve ser implementado (“Fundo Falso”)

Solução Adotada

Serão utilizados dois caldeirões “linha hotel” n°50 de alumínio da marca Ei-rilar, ambos com 85 *L* de volume útil. Estes têm 480 *mm* de diâmetro interno, 2,3 *mm* de espessura e 500 *mm* de altura.



Figura 24: Conexões

Componentes	Quantidade
Válvula Esférica Manual	6
Válvula Esférica Solenóide	4
Nipple Liso	2
Nipple Hexa	7
Contra Porca	7
Arruelas	11
oring	4
Tee	5
Cotovelo Femea Femea	2
Espigao	8

Tabela 6: Lista de componentes hidráulicos

Após estudo preliminar do problema da transferência de calor durante a mostura, conclui-se que a perda de calor para o meio não prejudica criticamente o processo. Uma vez implementado o protótipo, uma análise será realizada e, caso necessário, soluções de isolamento térmico serão estudadas. Os tanques serão equipados com:

- Uma válvula de saída para a bomba
- Uma válvula de saída para retirada de amostras de mosto
- Uma conexão de retorno da bomba
- Uma resistência de aquecimento
- Um sensor de temperatura

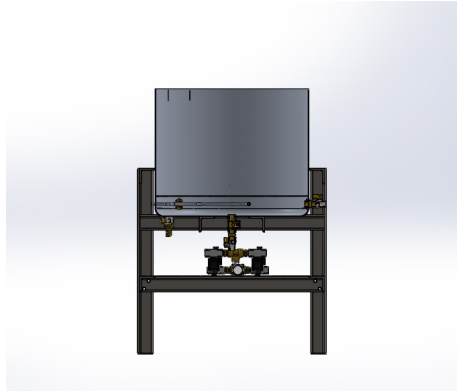


Figura 25: Vista em Corte do Conjunto

Além disso, no tanque de mostura será instalado um elemento filtrante acima do nível das válvulas de saída e da resistência, de forma a evitar o contato dos grãos com a fonte de calor e a bomba. Este elemento é conhecido como Fundo Falso, e consistirá em uma chapa de alumínio circular com diversas furações de 1mm de diâmetro.

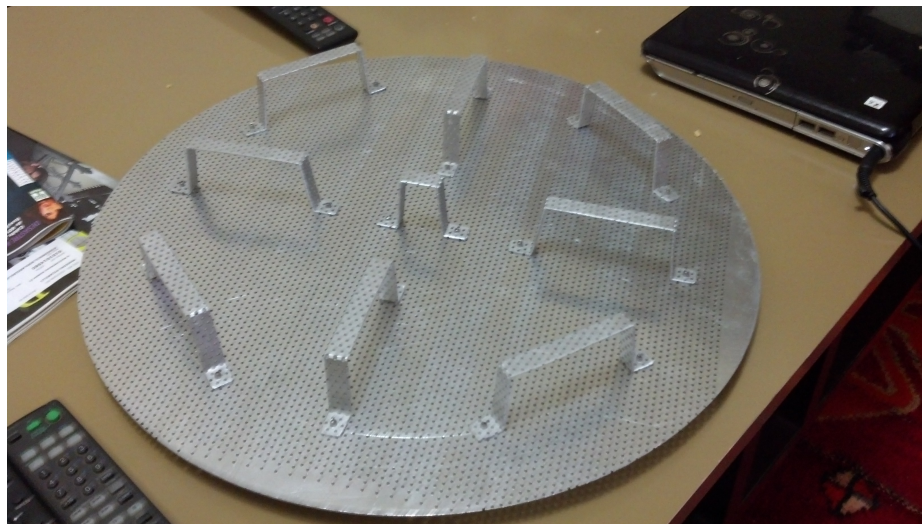


Figura 26: Elemento filtrante, de alumínio

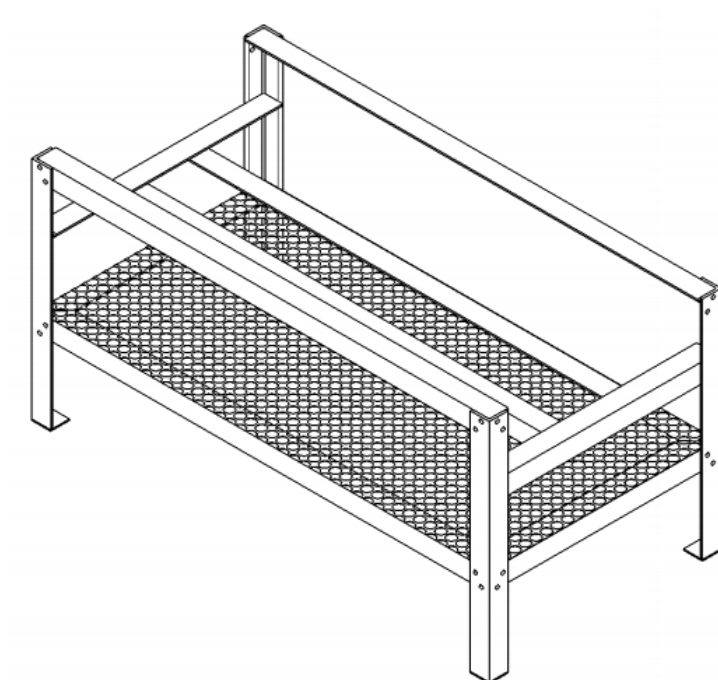


Figura 27: CAD em perspectiva da estrutura de suporte para o equipamento

4.1.8 Estrutura para suporte equipamento

Requisitos

1. Suportar 100 *Kg* em equipamento.
2. Ser funcional: servir de apoio para ferramentas de trabalho, entre outras necessidades.
3. Oferecer conforto durante operação.
4. Servir de suporte para a bomba, que deve trabalhar abaixo do nível dos reservatórios.



Figura 28: Foto em perspectiva da estrutura de suporte para o equipamento

Material

Cantoneiras de aço *SAE1010/20*

Tensão admissível: 300 MPa

Densidade: 7850 kg/m^3

Dimensões e Peso

Cantoneiras de abas iguais, de 2" e espessura $1/8"$.

Análise de esforços

Estimativa da espessura mínima dos perfis, utilizando um modelo de viga engastada, considerando uma cantoneira de abas iguais, de comprimento 2" e espessura $1/8"$, sujeita a uma carga de 1000 N no centro.

Quantidade	Comprimento
4	1200
2	600
2	602
4	600
2	1187
Comprimento Total	11978
Peso Estimado	30 kg

Tabela 7: Dimensões de corte das cantoneiras para montagem

Considerando o perfil como uma viga do tipo 5 (Figura 29), da Tabela A-9 do livro Shigley's Mechanical Engineering Design (Referência (??)).

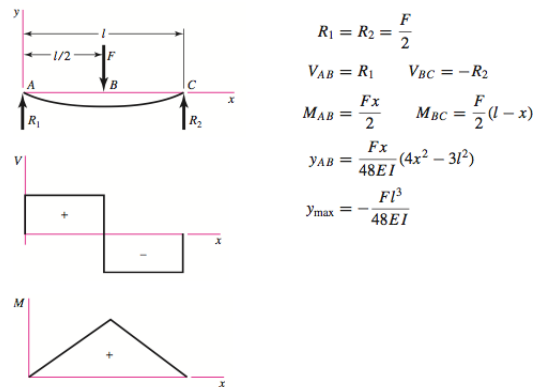


Figura 29: Modelo de suporte simples

Momento máximo é em B, o comprimento $x = 0.6 \text{ m}$:

$$M_B = \frac{Fx}{2} = \frac{1000 \times 0.3}{2} = 150 \text{ Nm}$$

Utilizando-se os valores de I e c_1 presentes na tabela em anexo, obtemos uma tensão máxima de trabalho menor que a tensão admissível do material.

$$\sigma = \frac{Mc_1}{I} = \frac{150 \times 0.546 \times 10^{-2}}{0.484 \times 10^{-8}} = 169 \text{ MPa}$$

4.1.9 Válvulas Solenóides

Requisitos

- Viabilizar o direcionamento do fluxo de líquido entre os dois tanques
- Suportar temperaturas de até 100°C
- Ser compatível com os sinais de controle do microprocessador
- Possuir grau alimentício

Solução adotada

Serão utilizadas quatro válvulas solenóides de duas vias $\frac{1}{2}''$, de fabricação em polipropileno, adquiridas na Open Source Control Systems (modelo não especificado). Duas válvulas serão acopladas na entrada da bomba para selecionar o tanque de origem, e as outras duas serão acopladas na saída da bomba, para determinar o destino do fluxo de líquido.

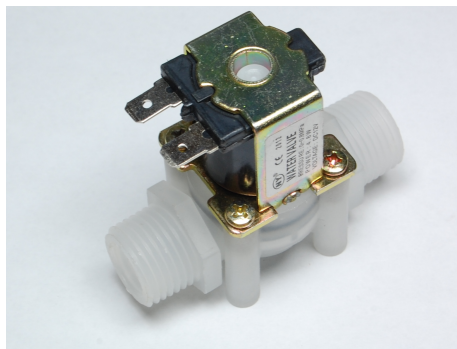


Figura 30: Válvula Solenóide

As válvulas escolhidas tem tensão operacional de 12 V , portanto um circuito de acionamento se faz necessário. Utilizaremos uma placa “Driver” de produção da Open Source Control System, modelo SKU18032, específica para este fim. Esta placa pode acionar até oito válvulas através de FETs.

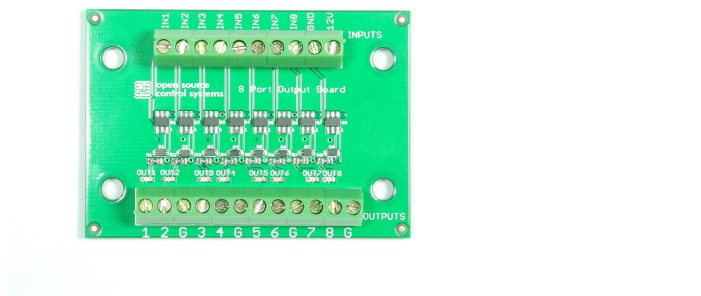


Figura 31: Driver Solenóide

4.1.10 Microcontrolador

Requisitos

- Possuir 4 portas analógicas e 22 digitais, 3 das quais programáveis como PWM
- Permitir gravação de dados em memória flash
- Baixo poder de processamento, devido ao alto tempo de resposta térmica do sistema em sua funcionalidade crítica (controle de temperatura durante a Mostura)

Dispositivo	Quantidade	Portas totais em relação ao processador			
		AI	AO	DI	DO
LED	6	0	0	0	1
IHM	1	0	0	1	1
Buzzer	1	0	0	0	1
Driver Bomba	1	0	0	0	2
Driver Resistência	2	0	0	0	1
Sensor Térmico	2	1	0	0	1
Válvula Solenóide	4	0	0	0	1
Sensor de Nível	2	1	0	0	1
	TOTAL	4	0	1	21
	26	A =	4	D =	22

Solução adotada

Adotamos a placa Arduino Mega 2560 (Revisão 3), baseada no microcontrolador Atmega2560. Ele possui 54 pinos digitais (15 dos quais podem ser configurados como saídas PWM), 16 entradas analógicas de 10 bits e 4 portas seriais. Suas portas digitais trabalham em tensão de 5 V e corrente de até 40 mA, ele possui um cristal oscilador de 16 MHz e 256 kB de memória flash para armazenamento de código. Essa solução atende aos requisitos de projeto, com exceção ao armazenamento de dados do processo. Esse armazenamento será realizado em arquivos de texto salvos em computador, uma vez que a comunicação com este será necessária na implementação da Interface Homem-Máquina, como será explicado adiante.

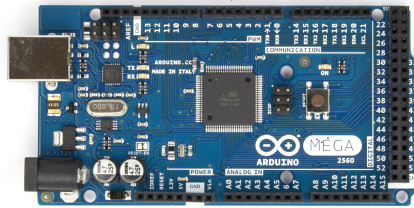


Figura 32: Arduino Mega 2560

4.1.11 IHM

Requisitos

- Informar a etapa do processo em vigência e o tempo para seu término
- Informar variáveis de interesse do sistema, como temperatura e volume nos tanques, em tempo real
- Informar ações esperadas do usuário, como as adições de lúpulo
- Permitir ao usuário configurar o sistema

- Permitir ao usuário controlar o sequenciamento do processo

Solução adotada

A Interface Homem-Máquina será implementada em computador pessoal, através de software desenvolvido no Visual Studio, que utiliza linguagem C Sharp. Comunicação serial com o microcontrolador será implementada via cabo USB-Serial (Protocolo RS-232). Uma vez que a troca de dados com um computador será estabelecida, esta também será utilizada para armazenamento de Receitas (pré-configurações do processo). Assim um requisito adicional da IHM é salvar e carregar arquivos de texto no PC que contenham informações de processo relativas as Receitas. Além da interface virtual, serão implementados LEDs que informem o estado de dispositivos periféricos e avisos sonoros para informar o usuário de avanços no processo, através de um módulo Buzzer contínuo de 5 V.

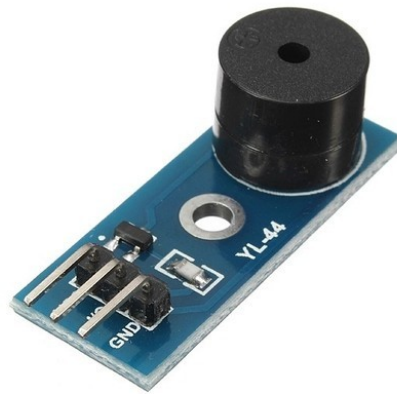


Figura 33: Buzzer

5 RESULTADOS

5.1 Brassagem Piloto

Em 25/10/2014 foi realizada a primeira brassagem do equipamento. Nesta data o equipamento se encontrava completamente montado, porém alguns componentes não se apresentavam em estado operacional e o sequenciamento dos processos foi acionado manualmente através de um painel de controle.

5.1.1 Sensor de Temperatura

Em especial, problemas no tratamento dos sinais dos sensores de temperatura inviabilizaram a implementação de controle de temperatura nos tanques. Os sensores utilizados foram dois PT100 que trabalham na faixa de 0 a 600°C. Após testes iniciais destes, notou-se a necessidade de implementação de condicionadores de sinais para obter a precisão desejada (0.5°C). Estes circuitos contêm uma ponte de wheatstone (para eliminar erros relativos aos cabos dos sensores), alimentam o sensor com correntes controladas em torno de 1mA (o que garante maior precisão e evita problemas de auto-aquecimento), amplificam e filtram adequadamente os sinais dentro de uma faixa de interesse (no caso, 0 a 100°C). Foi adquirido hardware de condicionamento de sinal de sensores PT100 compatível com nosso microcontrolador, baseado no CI MAX31865, porém este ainda não foi entregue. Para contornar este problema, as resistências de aquecimento dos taques foram acionadas manualmente, baseado na leitura off-line de sensores de temperatura.

Além disso, os sensores de pressão que seriam utilizados para medição do volume dos tanques não foram implementados. Isso não impede a realização da brassagem, uma vez que a medição de volume seria realizada principalmente para determinar o sequenciamento de processos e como intertravamento de segurança no acionamento das resistências, funções que ficaram a cargo do usuário. Para efeito dos cálculos de eficiência de extração de açúcares e das perdas do sistema, cálculos de volume foram realizadas através da medição da altura da superfície livre do líquido em relação ao fundo dos tanques.

5.1.2 Receita

O estilo de cerveja escolhido para esta brassagem foi American Pale Ale, um estilo americano de cerveja clara de alta fermentação, corpo médio-baixo e amargor moderado. A receita desenvolvida leva três tipos de malte de cevada (totalizando 9.65kg), três tipos de lúpulo (160g), levedura do tipo Ale liofilizada (44g) e água mineral (72L). Esta receita foi planejada, através do software BeerSmith 2, para produção de 40L de mosto a uma densidade de 1.045g/mL (o que resultaria numa cerveja com aproximadamente 4.5% de álcool), adotando perdas previamente calculadas em testes com água, e uma eficiência de extração de açúcares de 60%. No processo adotado, a mostura e a filtração ocorreriam simultaneamente, e a etapa de Lavagem não seria realizada.

5.1.3 Brassagem

Os preparativos para a brassagem iniciaram com a limpeza de todos os equipamentos, com água abundante e sabão neutro. Com os elementos do equipamento já montados sobre a base, toda a água da brassagem foi adicionada ao tanque de mostura, e o aquecimento foi iniciado. O malte foi moído e adicionado ao tanque de mostura quando a temperatura set-point foi atingida, dando-se início

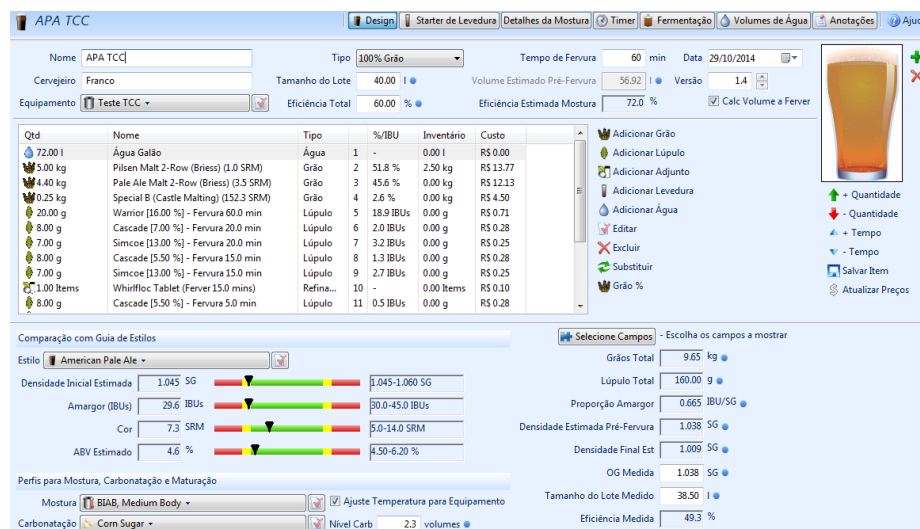


Figura 34: Printscreen do software BrewSmith

à mostura.

Durante esta etapa a temperatura foi controlada em torno de 67°C por 60 minutos. Além disso, iniciamos a recirculação do mosto, para homogenizar a temperatura e realizar a filtração. Esta, porém, teve que ser interrompida, uma vez que as válvulas sonenóides entupiram, devido a partículas de malte que atravessaram o elemento filtrante. A solução encontrada foi excluir as válvulas e executar o direcionamento do fluxo das bombas manualmente.

Ao término da mostura, iniciamos a subida de temperatura para o Mash-Out, porém novamente o equipamento apresentou problemas na recirculação. A medida que os grãos se acumularam acima do filtro ("cama de grãos"), o aumento resultante de perda de carga diminuiu significativamente o fluxo de mosto. Para preservar as bombas, interrompemos seu funcionamento. Logo percebeu-se que a porção de mosto abaixo do filtro atingiu a fervura, apesar de a temperatura medida no centro do tanque estar consideravelmente mais baixa (70°C). Isso indica a importância da recirculação durante a mostura, porém tornou-se impossível continuar o aquecimento homogêneo do mosto. A solução adotada foi desfazer a



Figura 35: Acréscimo do Malte

cama de grãos, e portanto a filtragem, com o auxílio de uma pá culinária. Prosseguimos com o Mash-Out, e em seguida reiniciamos a filtração, com a resistência desligada. Após cerca de 45 minutos, interrompemos a filtração e iniciamos a transferência do mosto para o tanque de fervura.

Iniciamos o aquecimento do mosto no tanque de fervura assim que este se elevou acima do nível da resistência elétrica. O aquecimento durou cerca de uma hora, porém a fervura atingiu intensidade satisfatória. Durante a fervura, cinco adições de lúpulo foram realizadas nos instantes 0, 40, 45, 55 e 60 minutos após o início. Ao fim desta, realizamos o Whirlpool manualmente, rotacionando a pá culinária de forma a induzir um fluxo circular de mosto no tanque de fervura por cerca de 10 minutos, uma vez que as bombas não supriram o fluxo necessário. Após vários minutos de atraso (devido a falta de água no prédio da Engenharia Mecânica da USP), iniciamos o resfriamento do mosto através de um chiller de placas. Este foi extraído lentamente da válvula inferior do tanque de fervura e



Figura 36: Montagem para medição de temperatura

direcionado para o chiller, que é constantemente resfriado por água corrente. Os 38,5L finais de mosto foram resfriados até 35°C e divididos entre dois fermentadores, os quais foram fechados herméticamente após a levedura ser inoculada. Todos recipientes e equipamentos que entrariam em contato com o mosto após a fervura foram devidamente sanitizados com uma solução de Iodophor, de concentração de 0.8mL/L de água. Foi executada a medição de densidade do mosto pré-fermentação (Gravidade Original), e obtivemos o valor de 1.038mL/g, 0.007mL/g abaixo do esperado, o que resultará em uma cerveja levemente menos alcoólica, com cerca de 3.9% ABV. A eficiência de extração de açúcares foi calculada em 49.3%, 10.7% abaixo do valor adotado nos cálculos da receita. O processo teve duração total de oito horas, além de cerca de três horas para limpezas anterior e posterior a brassagem.

5.2 Análise

5.2.1 Dos componentes

Apesar de o equipamento ter funcionalidades ainda não implementadas, os testes realizados nos permitiram analisar o desempenho de alguns sub-sistemas e componentes. De forma geral, o sub-sistema mecânico se mostrou satisfatório.

Estrutura

A estrutura do equipamento facilitou a fixação dos componentes e a utilização do equipamento. Suas dimensões foram adequadas e suportou os esforços relativos ao peso dos equipamentos e ingredientes durante a execução da brassagem sem deformações aparentes.

Resistências

Os aquecedores resistivos também se mostraram apropriados. Sua potência (5kW) tem valor inferior ao que havíamos dimensionado, e de fato as etapas de aquecimento do mosto se prolongaram por mais tempo do que havíamos estipulado, porém a fervura foi executada de forma satisfatória. Não ocorreu caramelização do mosto no entorno das resistências, o que indica que sua área de dissipação da potência é suficientemente grande.

Driver das Resistências

Seu acionamento através dos relés de estado sólido adotados se mostrou viável, porém o chaveamento destas a frequências mais altas (na implementação do controle em malha fechada) ainda não foi testado. Os dissipadores escolhidos para os relés foram sub-dimensionados, e devem ser trocados por outros mais adequados. Segundo a documentação dos relés, estes dissipam cerca de 50W na condição de trabalho (Chaveamento de 24A).

Hidráulico

Dentre os sub-sistemas que puderam ser avaliados, o hidráulico foi o que apresentou pior desempenho. A potência da bomba escolhida foi insatisfatória, de forma que acrescentamos uma segunda unidade, ligada em série. Essa medida viabilizou a realização da brassagem, porém a potência resultante ainda não se

mostrou adequada, principalmente na etapa de filtração, na qual a perda de carga aumenta consideravelmente. Além disso, para a realização do Whirlpool, que exigiria uma bomba ainda mais potente, os requisitos adotados no dimensionamento da bomba devem ser re-estudados. Recomenda-se também uma bomba que não necessite trabalhar em afogamento.



Figura 37: Filtro danificado após brassagem

Válvulas Solenóides

Em testes com água, as válvulas solenóides funcionaram de acordo com o esperado, porém estas foram obstruídas durante a brassagem.

Filtro

O filtro do tanque de mostura se revelou inadequado, uma vez que por ele passaram diversas partículas de malte, que causaram o entupimento do sistema hidráulico. O filtro, de alumínio, também demonstrou baixa resistência mecânica e ao final do processo estava danificado. Para reduzir a perda de carga durante a recirculação, recomenda-se um filtro que permita maior vazão. É sugerido um filtro com o máximo de furos possível e diâmetro reduzido. Além disto, a fixação do filtro nos tanques não foi bem sucedida: havia uma grande folga entre as paredes dos tanques e o limite do filtro.

Tanques

Os tanques, por outro lado, executaram suas funções sem grandes problemas. Seus volumes são suficientemente grandes para produção de levas de 50L de cerveja, se a etapa da Lavagem for executada, ou até 40L caso contrário, como foi constatado na primeira brassagem-teste. Devido a sua geometria, o tanque apresentou uma quantia considerável de volume morto: cerca de 10L. Para compensar este problema seria necessário rever a geometria do tanque ou o posicionamento das válvulas.

O posicionamento dos componentes dentro dos tanques foi adequado, porém, deve ser estudada a possibilidade de serem afixados no fundo dos tanques para redução de volume morto. A utilização de arruelas e O'rings garantiu a vedação. As conexões e válvulas manuais também não apresentaram problemas.

Outros

Por ainda não terem sido implementados satisfatoriamente, os sensores de temperatura, sensores de pressão, o chiller de imersão, o microcontrolador e a Interface-Homem-Máquina não foram avaliados. Suas implementações estão em andamento e análises futuras serão executadas.

5.3 Análise do Processo

O processo adotado também pôde ser avaliado. A Mostura apresentou resultados satisfatórios, porém as análises futuras também devem ser realizadas, uma vez que o controle de temperatura for implementado. A Filtração, por outro lado, deve ser re-estudada. Sua realização simultânea a Mostura não pôde

ser executada, e talvez não seja possível com os componentes adotados. Separar os dois processos resulta em um aumento de aproximadamente uma hora na duração total da brassagem, porém é uma solução que está sendo considerada. A implementação de um segundo elemento filtrante também está sendo estudada. A Fervura e o aquecimento prévio ocorreram de forma satisfatória. O aquecimento teve subida de aproximadamente $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, compatível com o valor adotado no dimensionamento das resistências, apesar da potência implementada ser inferior ao valor calculado. Isso pode indicar um super-dimensionamento das resistências, porém uma análise satisfatória só pode ser executada em posse da curva de aquecimento do sistema, que será obtida assim que o controle em malha fechada for implementado. O aquecimento foi realizado não com o chiller de imersão previsto, mas com um chiller de placas. Essa solução resfriou o mosto de forma adequada, porém sua sanitização e utilização são consideravelmente mais complexas. Devido a falta de água no momento da realização do resfriamento, este foi atrasado em cerca de 20 minutos, o que provavelmente adicionará amargor a cerveja, uma vez que os compostos do lúpulo que conferem esta propriedade permaneceram em altas temperaturas por mais tempo que o previsto na receita.



Figura 38: Fermentadores no refrigerador

6 CONCLUSÃO

6.1 Cronograma

Dos aprendizados ao longo deste Trabalho de Conclusão de Curso, uma elaboração criteriosa do cronograma é sem dúvida um dos mais importantes. Desde o início, nos preocupamos em seguir os prazos estabelecidos que, inclusive o haviam sido feitos com uma certa folga, considerando eventuais imprevistos. As tarefas contidas no cronograma, no entanto, não estavam detalhadas o suficiente, de forma que acumularam-se funções para o final do projeto.

Observa-se nas figuras 39 e 40 que a compra dos equipamentos mostrou-se como uma atividade crítica no projeto: é o momento em que mais se depende do trabalho dos outros. Nós já havíamos antecipado esta dificuldade, colocando a compra dos equipamentos dentre as primeiras tarefas. No entanto, não haviam sido estabelecidos critérios de compra adequados e esta etapa acabou sendo postergada.

6.2 Subsistemas

Dadas as análises realizadas, algumas conclusões sucintas relativas aos subsistemas merecem destaque as seguir.

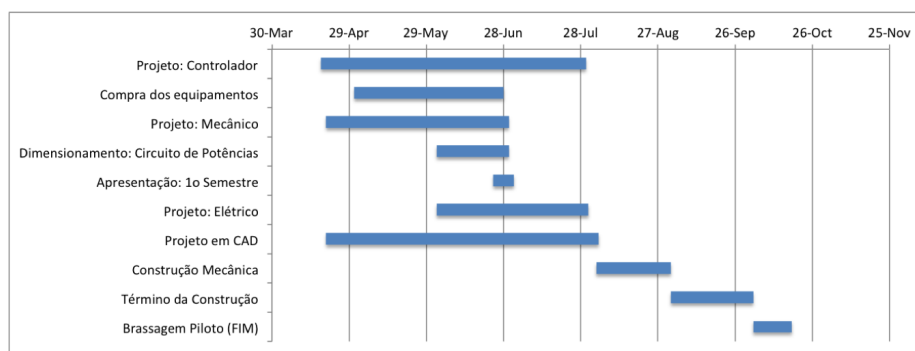


Figura 39: Cronograma estabelecido no início do projeto

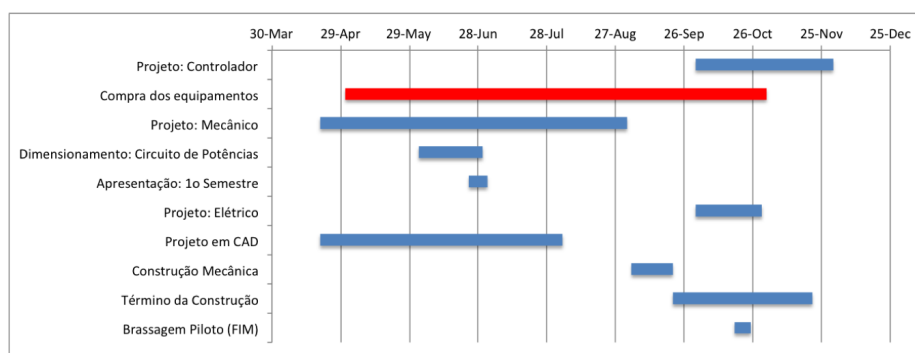


Figura 40: Cronograma observado ao final do projeto

6.2.1 Mecânico

- Os caldeirões adquiridos devem possuir espessura maior do que 2mm, objetivando maior resistência mecânica.
- O raio do fundo dos caldeirões deve ser reduzido, para que a fixação das válvulas possa ser realizada mais próxima ao fundo.
- A solução de fundo falso deve ser reconsiderada.
 1. O diâmetro dos furos deve ser menor, para que o particulado seja melhor filtrado.
 2. O filtro deve possuir maior resistência mecânica.
 3. A fixação do filtro nos tanques de ser melhorada, de forma a permitir

maior vedação nas laterais.

6.2.2 Hidráulico

- As bombas devem ser mais potentes.
- O diâmetro da tubulação deve ser maior.

6.3 Considerações Finais

Ao longo do desenvolvimento do presente trabalho, ficaram claras as dificuldades de projeto e integração de componentes de um sistema produtivo. Não só um profundo conhecimento das etapas do processo se faz necessário, como também amplo conhecimento das possíveis soluções tecnológicas. Esta última afirmação se provou verdadeira principalmente na etapa de dimensionamento e compra dos componentes do sistema, que se prolongou por quase um mês a mais que o planejado. Muito do conhecimento necessário na seleção de componentes é adquirido somente na sua implementação, o que pode resultar em dimensionamentos e seleções imprecisas. A prototipagem e as iterações de projeto, assim, se fazem extremamente importantes, principalmente na idealização de um sistema por um projetista sem experiência prévia no assunto. Além disso, sistemas produtivos apresentam nuances interessantes. O projeto e implementação do sistema podem ser realizados conforme o planejado, com todos os requisitos sendo atingidos, e ainda resultar num equipamento inadequado para a produção em questão. Um estudo profundo do processo e do produto contemplados é de fundamental importância, e deve ser a primeira etapa do desenvolvimento de qualquer equipamento desta classe. De forma geral, a realização do presente trabalho representou uma experiência bastante enriquecedora na formação dos envolvidos. A abordagem de prototipagem adotada por nós permitiu a fixação de conceitos importantíssimos para carreiras ligadas a Engenharia. Não só adquirimos conhecimentos sobre di-

versas tecnologias e suas implementações, como também pudemos nos aproximar de conceitos de projeto de sistemas produtivos e desenvolvimento de produtos.

REFERÊNCIAS

- ALCARDE, A. R.; OETTERER, M. Tecnologia da Produção de Cerveja. 2006.
- BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E. Fundamentos da Termodinâmica. 7th. ed. [S.l.: s.n.], 2009.
- FOSTER, T. Using homebrew pumps: Techniques. Brew Your Own, November 2012.
- INCROPERA, F. P. et al. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. 7th. ed. [S.l.: s.n.], 2014.
- KUNZE, W. Technology Brewing and Malting. 4th. ed. [S.l.]: VLB Berlin, 2010.
- MORADO, R. Larousse da Cerveja. [S.l.: s.n.], 2009.
- THEELECTRICBREWERY. The complete guide to building your brewery. 2014.

APÊNDICE A – METODOLOGIA DE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este apêndice tem como objetivo ilustrar a Metodologia de Revisão Bibliográfica adotada pelos autores. Para nossa pesquisa buscamos três fontes de informação:

- Professores da USP no sistema SIBI
- Profissionais da área de produção cervejeira
- Artigos nas bases de dados conhecidas (<http://www.teses.usp.br/>, IEEE Xplore, Science Direct, Google Scholar)

A.1 Professores da USP no sistema SIBI

A partir da pergunta: “Como acessar o conhecimento sobre produção cervejeira produzido na USP?”, foram procurados os professores especialistas no assunto no site da USP:

Banco de Dados: <https://uspdigital.usp.br/especialistas/especialistaBuscar>
Keywords: cerveja
Resultados: 53

Após uma avaliação das especialidades dos resultados, chegou-se a uma lista de oito nomes: Deniol Tanaka, Masazi Maeda, João Batista Almeida, André Ricardo Alcarde, Úrsula Lanfer Marquez, Arnaldo Ramalho Prata, Pedro Kiyohara

e Gil Anderi. Destes nomes, avaliou-se o Curriculum Lattes, procurando os trabalhos orientados, teses, dissertações e demais produções técnicas realizadas.

Os nomes João Batista Almeida (USP Lorena) e André Ricardo Alcarde (ESALQ) mostraram-se mais relevantes ao assunto e estes professores foram contactados por telefone e e-mail. Os professores Deniol Tanaka (PME) e Masazi Maeda (PQI) também foram contactados por sua proximidade - ambos trabalham no Campus da Capital - e com estes tivemos reuniões.

As conversas foram muito produtivas, onde foram obtidos catálogos de fabricantes, nomes de livros, publicações e apostilas de cursos, os mais relevantes dos quais foram selecionados e constam na nossa lista de referências com números de [1] a [4].

Em busca informações sobre equipamentos de medição on-line de densidade de líquidos, foram encontrados os artigos [15] e [16], de autoria de Adamowski, J.C. e Buiochi, F., ambos professores da EPUSP. Adamowski, J.C. foi contactado sobre o assunto.

A.2 Micro-ervejeiros e mestre-ervejeiros

Encarando o projeto como um potencial produto, optou-se por entrevistar pessoas do ramo ervejeiro a fim de obter impressões, ideias, críticas, fabricantes e mais referências.

Foram conduzidas entrevistas presenciais com seis mestres-ervejeiros, três dos quais são também proprietários de micro-ervejarias (instaladas nos estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio Grande do Sul), dois produtores de equipamentos para ervejarias, três membros da ACervA Catarinense (Associação dos Cervejeiros Artesanais de Santa Catarina), dois membros da ACervA Paulista e um membro da ACervA Paranaense. Além disso, uma pesquisa de opinião foi conduzida no grupo de emails da ACervA Paulista

(<https://groups.google.com/forum/?hl=pt-BR#!forum/ervejaartesanalsp>), na qual a opinião de vinte uma pessoas que produzem cerveja de forma artesanal foi expressa através de dezenas de emails.

Apesar destas trocas de experiências terem sido conduzidas de maneira informal e não apresentarem grande valor estatístico, através dela foi possível compreender melhor as necessidades do mercado brasileiro, e o atual nível tecnológico, além de possibilitar a caracterização de possíveis produtos e clientes. Alguns pontos que surgiram com frequência foram a redução de custos para alcançar maior competitividade, a ausência de equipamentos adequados para produções em baixa escala e a carência de tecnologias de medição de densidade do mosto cervejeiro em tempo real.

Além disso, foram indicadas as referências de [5] a [7].

A.3 Artigos nas base de dados conhecidas

Na área de controle de temperatura no processo cervejeiro, foram realizadas as seguintes buscas:

Banco de Dados: Science Direct
Keywords: thermal control brewery
Resultados: 67
Nenhum relevante

Banco de Dados: IEEEExplore
Keywords: thermal control brewery
Resultados: 18612
Nenhum relevante dentre os 25 primeiros resultados

Banco de Dados: Science Direct
Keywords: temperature control brewery
Resultados: 4389
Nenhum relevante dentre os 25 primeiros resultados

Banco de Dados: IEEEExplore

Keywords: temperature control brewery
 Resultados: 3
 Um artigo relevante, referência número [8].

Banco de Dados: Science Direct
 Keywords: saccharification temperature control
 Resultados: 3423
 Nenhum relevante dentre os 25 primeiros resultados

Banco de Dados: IEEEExplore
 Keywords: saccharification temperature control
 Resultados: 8
 Dois artigos relevantes, referências [9] e [10].

Banco de Dados: Science Direct
 Keywords: electric heating system brewery
 Resultados: 597
 Um relevante dentre os 25 primeiros resultados, referência [11].

Banco de Dados: IEEEExplore
 Keywords: electric heating system brewery
 Nenhum resultado encontrado

Em relação ao problema de medição em tempo real da densidade do mosto, realizou-se as seguintes buscas:

Banco de Dados: Google Scholar
 Keywords: ultrasound sensor beer
 Resultados: 8800
 Três arquivos relevantes, referências [12], [13] e [14].

Banco de Dados: IEEEExplore
 Keywords: density ultrasonic
 Resultados: 1350
 Cinco arquivos relevantes, referências de [15] a [19].

Sobre o processo industrial de produção cervejeira, foram realizadas as seguintes buscas:

Banco de Dados: IEEEExplore

Keywords: beer plant
 Resultados: 45
 Um arquivo relevante, referência [20].

Banco de Dados: Science Direct
 Keywords: beer plant
 Nenhum resultado encontrado.

A.4 Descrição dos resultados encontrados

Em [1], caracteriza-se o produto cerveja, suas variações, seus processos de fabricação e os equipamentos utilizados em escala industrial.

Em [2], um equipamento de quantificação dos diferentes açúcares presentes no mosto cervejeiro é desenvolvido e testado.

Em [3], os aspectos físico-químicos da fermentação de cerveja são estudados.

Em [4], o controle de diversos processos e equipamentos industriais é estudado.

Em [5], os processos e os equipamentos de produção artesanal de cerveja são abordados de forma consisa.

Em [6], todos os aspectos da produção industrial de cervejas são abordados. Este livro foi desenvolvido pela VLB Berlin (Versuchs- und Lehranstalt fuer Brauerei, em inglês Research and Teaching Institute for Brewing) para server de base didática em diversos dos seus cursos de especialização e pós graduação nas ciências e processos cervejeiros. O instituto é um dos mais antigos e renomados do mundo.

Em [7], os processos e os equipamentos de produção artesanal de cerveja são abordados de forma mais aprofundada que em [5].

Os artigos de [8] a [11] tratam do controle de temperature dos processos cervejeiros, suas nuances individuais ainda serão estudadas mais profundamente.

Os artigos de [12] a [14] tratam da tecnologia ultrassônica em processos cervejeiros, suas nuances individuais ainda serão estudadas mais profundamente.

Em [15], apresenta-se uma solução para medição de densidade em fluídos: análise com ultrassom com utilização de elementos piezoelétricos.

Em [16], caracteriza-se experimentalmente a implementação de um sensor ultrassônico para medição de densidade. Valores de precisão e faixas de temperatura de trabalho são informados.

Em [17], descreve-se de maneira concisa o princípio de funcionamento de um densímetro ultrassônico, seu projeto básico de hardware e controle.

Em [18], sugere-se soluções para aumentar a precisão de medida de densidade ultrassônica através de análise de sinais e modelagem dos sensores.

Em [19], estabelece-se uma relação entre a medição de densidade e a impedância acústica do meio.

Em [20], trata-se da implementação de um controlador PLC para produção em larga escala. Não se aplica ao escopo do projeto.

A.5 Resultados Encontrados

[1] ALCARDE, A. R. ; OETTERER, M. . “Tecnologia da produção de cervejas”. 2006. (Desenvolvimento de material didático ou instrucional - Apostila)

[2] ESTRACANHOLLI, E. S. “Quantificação óptica de carboidratos e etanol em mosto cervejeiro”. São Carlos : Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012. Tese de Doutorado em Física Aplicada.

[3] MIRANDA, F. C. “A fermentação alcoólica em cervejas”. São Paulo: Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica de São Paulo, Trabalho de Conclusão de Curso, 2012.

- [4] CAMPOS, M. C. M. M.; TEIXEIRA, H. C. G. “Controle Típico de Equipamentos e Processos Industriais.” ed. Edgard Blücher: São Paulo, 2007.
- [5] VIEIRA, A. W. “Apostila de Produção de Cervejas Artesanais”. Associação dos Cervejeiros Artesanais Paulista. São Paulo, 2009. (Desenvolvimento de material didático ou instrucional - Apostila)
- [6] KUNZE, W. “Technology Brewing and Malting”. 4th edition. Berlin: VLB, 2010.
- [7] PALMER, J. J. “How to Brew”. 3rd edition. Brewers Publications, 2006.
- [8] Jiliang Shang, “The saccharification temperature control of brewage based on DMC-PID,” Information Networking and Automation (ICINA), 2010 International Conference on , vol.1, no., pp.V1-188,V1-191, 18-19 Oct. 2010
- [9] Shang Jiliang; Yu Wei; Gao Dexin, “Study of Compound Optimal Control for Beer Saccharification Temperature,” Control Conference, 2007. CCC 2007. Chinese , vol., no., pp.356,359, July 26 2007-June 31 2007
- [10] Shang Ji-liang; Dou Xiu-hua; Yu Wei, “Application study of optimal control for beer saccharification temperature”, Automation and Logistics, 2008. ICAL 2008. IEEE International Conference on , vol., no., pp.1750,1753, 1-3 Sept. 2008
- [11] Bettina Muster-Slawitscha, Werner Weiss, Hans Schnitzer, Christoph Brunner, “The Green Brewery Concept - Energy efficiency and the use of renewable energy sources in breweries”Applied Thermal Engineering 31, 2011
- [12] Becker, T., Mitzscherling, M., Delgado, A., “Ultrasonic velocity - a noninvasive method for the determination of density during beer fermentation.” Eng. Life Sci. 2001, 1, 61-67
- [13] Schöck, T., Becker, T., “Sensor array for the combined analysis of water-sugar-ethanol mixtures in ethanol fermentations by ultrasound”. Food Control

2010, 21, 362-369

[14] Balan, V., Graur, I., Balan, G. M., "The sonic technology in the beer industry," SISO M 2012 and Session of the Commission of Acoustics

[15] Adamowski, J.C.; Buiochi, F.; Sigelmann, R.A., "Ultrasonic measurement of density of liquids flowing in tubes," *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, IEEE Transactions on , vol.45, no.1, pp.48,56, Jan. 1998

[16] Higuti, R.T.; Galindo, B.S.; Kitano, C.; Buiochi, F.; Cezar Adamowski, J., "Thermal Characterization of an Ultrasonic Density-Measurement Cell," *Instrumentation and Measurement*, IEEE Transactions on , vol.56, no.3, pp.924,930, June 2007

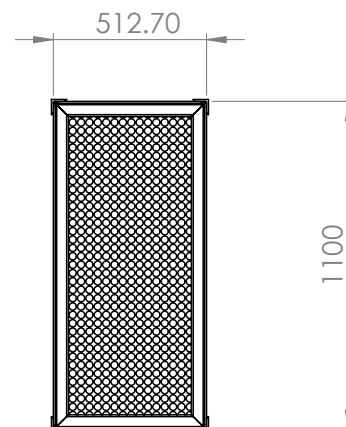
[17] Wang Haiqun; Cao Yi; Zhang Yugui; Chen Zhikun, "The Design of the Ultrasonic Liquid Density Measuring Instrument," *Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA)*, 2011 Third International Conference on , vol.3, no., pp.758,760, 6-7 Jan. 2011

[18] Hoppe, N.; Schonfelder, G.; Puttmer, A.; Hauptmann, P., "Ultrasonic density sensor - higher accuracy by minimizing error influences," *Ultrasonics Symposium*, 2001 IEEE , vol.1, no., pp.361,364 vol.1, 2001

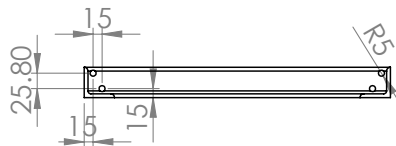
[19] Swaneveldt, P.; Hancke, G.P., "On-line measurement of fluid density using ultrasonic techniques," *Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 1993. IMTC/93. Conference Record., IEEE , vol., no., pp.341,344, 18-20 May 1993

[20] Ogawa, M.; Henmi, Y., "Recent Developments on PC+PLC based Control Systems for Beer Brewery Process Automation Applications," *SICE-ICASE*, 2006. International Joint Conference , vol., no., pp.1053,1056, 18-21 Oct. 2006

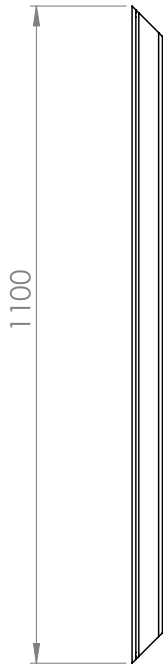
APÊNDICE B – DESENHOS DE FABRICAÇÃO



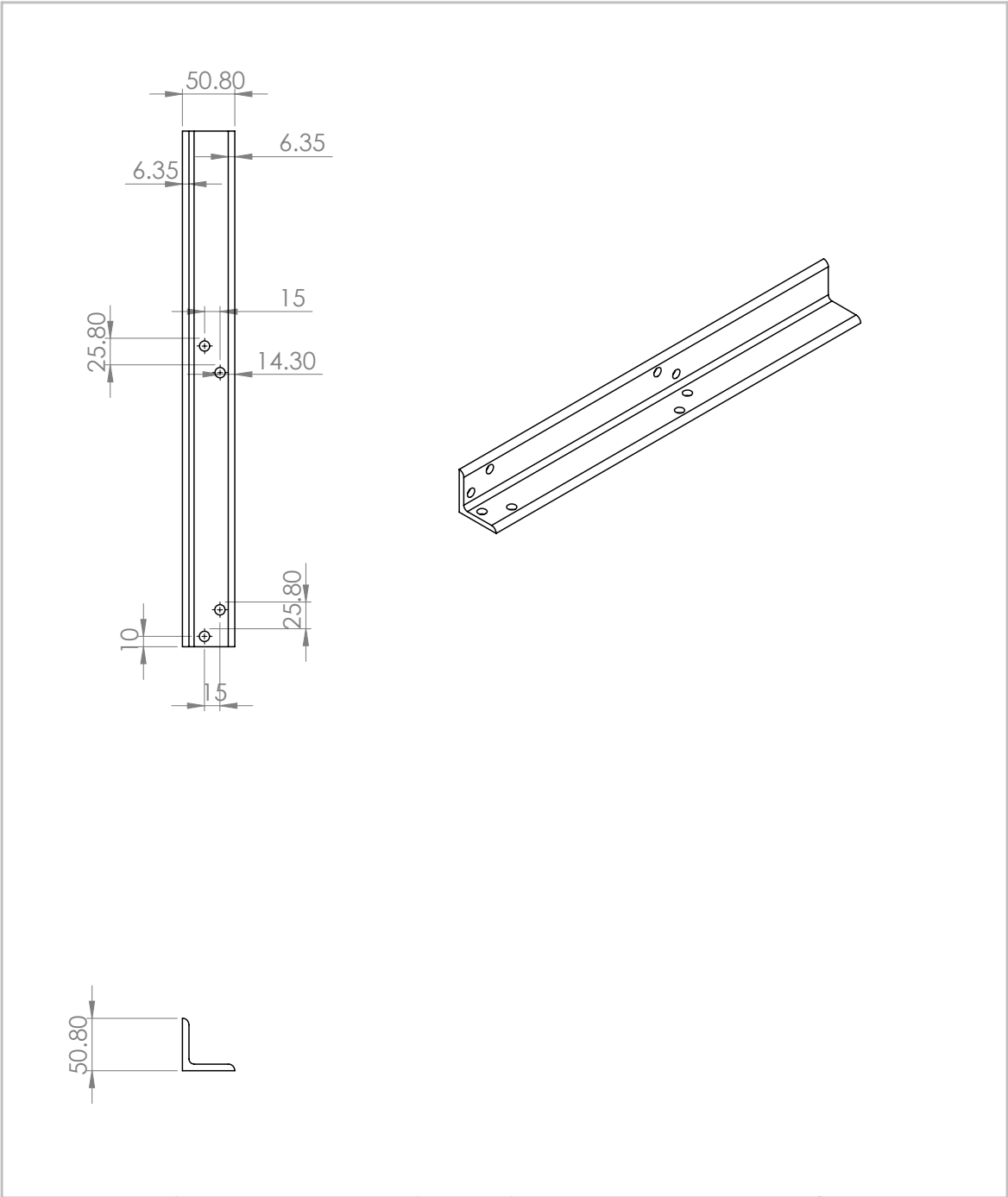
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME		SIGNATURE		DATE				TITLE:			
DRAWN											
CHK'D											
APP'VD											
MFG											
Q.A						MATERIAL:		DWG NO.		Frame Conjunto	
										A4	
								SCALE:1:20		SHEET 1 OF 1	
						WEIGHT:					



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
								TITLE:			
DRAWN											
CHK'D											
APPV'D											
MFG											
Q.A						MATERIAL:		DWG NO. L_500_45			
								A4			
						WEIGHT:		SCALE:1:10			
								SHEET 1 OF 1			

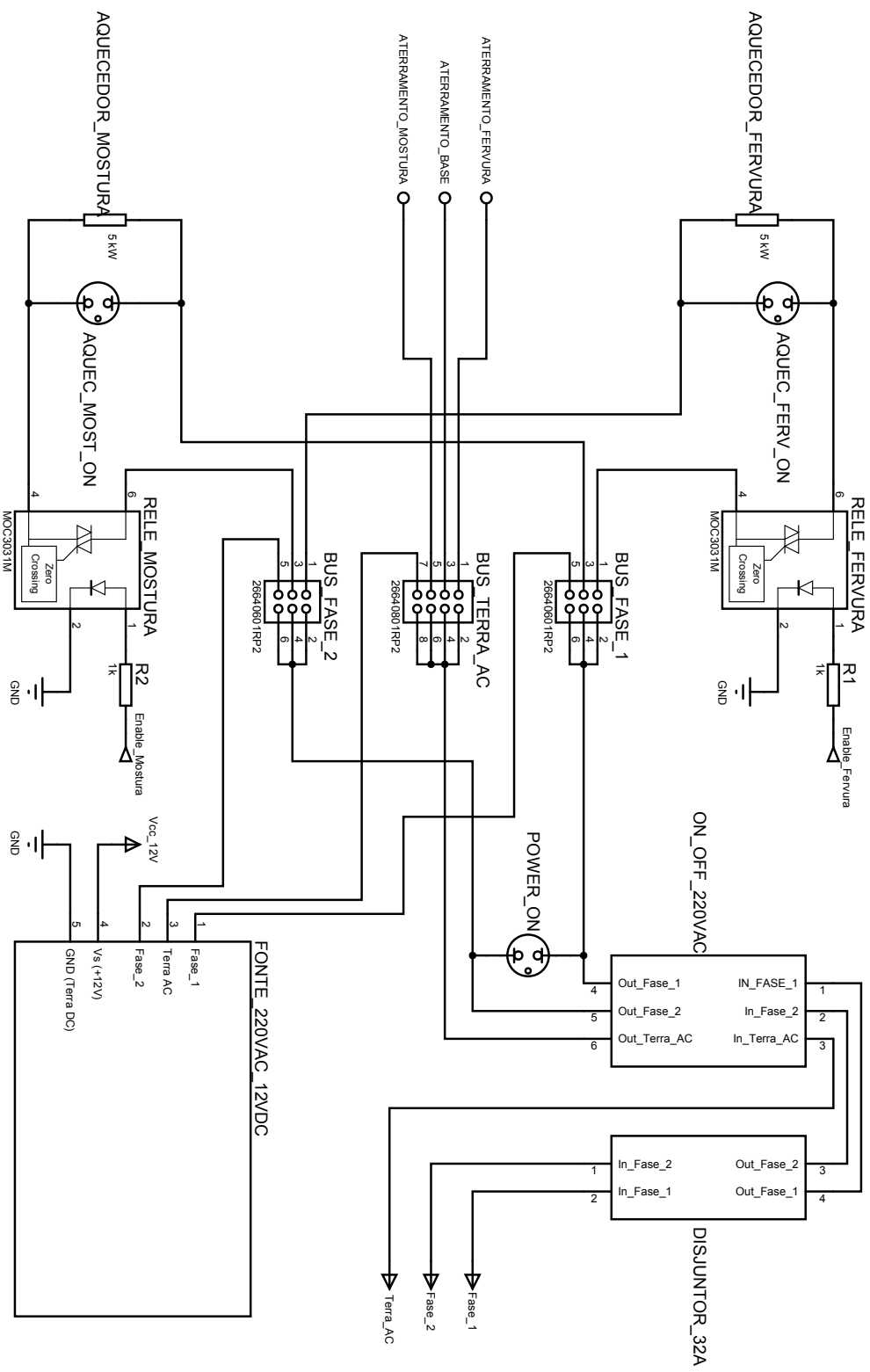


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:				DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
	NAME	SIGNATURE	DATE					TITLE:			
DRAWN											
CHK'D											
APPV'D											
MFG											
Q.A						MATERIAL:		DWG NO.		L_1100_45	
										A4	
						WEIGHT:		SCALE:1:20		SHEET 1 OF 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
DRAWN									
CHK'D									
APPV'D									
MFG									
Q.A						DWG NO.		pernas	
								A4	
						WEIGHT:		SCALE:1:10	
								SHEET 1 OF 1	

APÊNDICE C – DIAGRAMA DA MONTAGEM ELÉTRICA



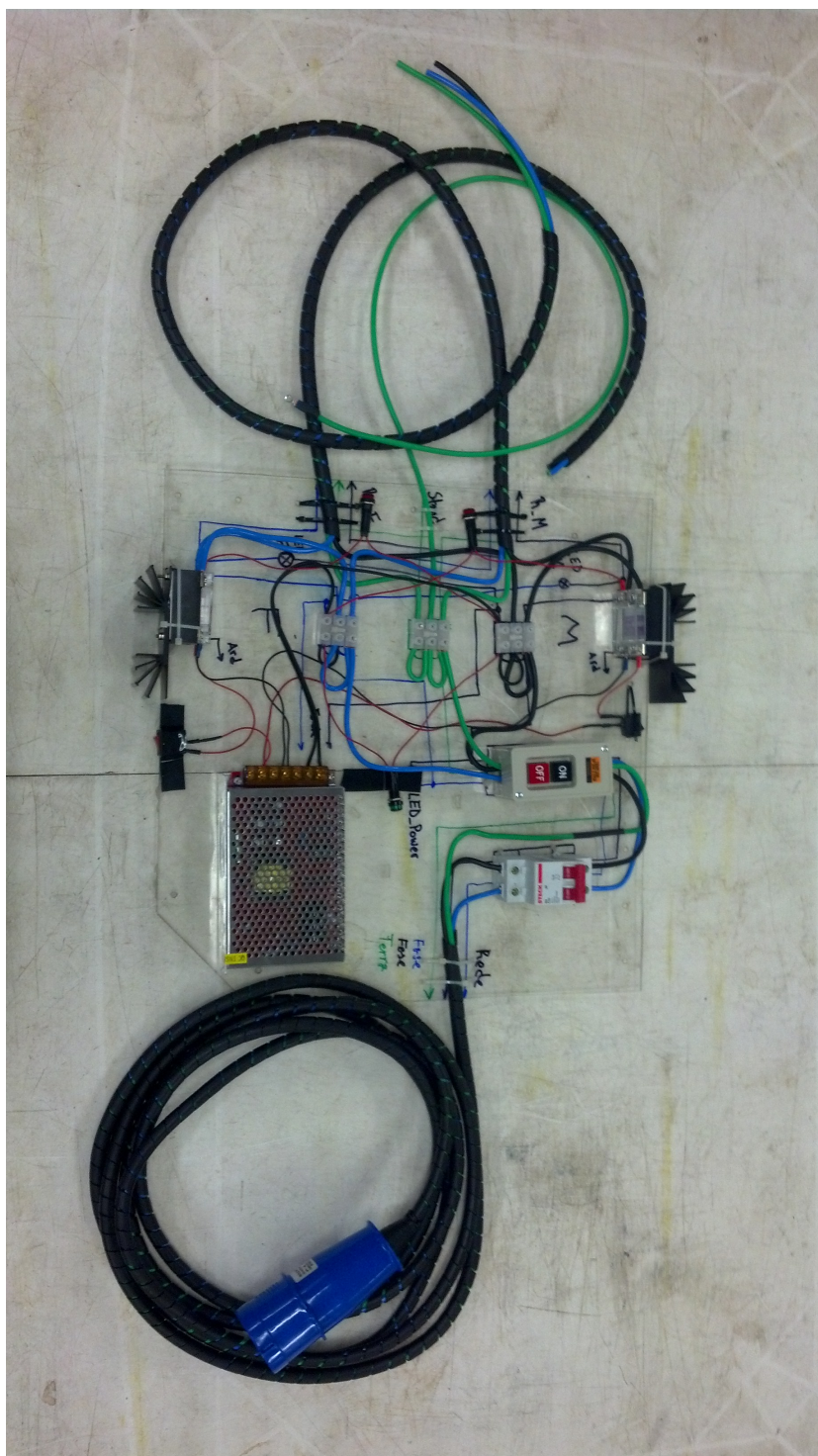


Figura 41: Foto da montagem elétrica