

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JACKSON KRINSKI

**MODELAGEM E CONTROLE DE TEMPERATURA DO PROCESSO DE  
BRASSAGEM PARA A PRODUÇÃO DE CERVEJA**

CURITIBA

2018

JACKSON KRINSKI

**MODELAGEM E CONTROLE DE TEMPERATURA DO PROCESSO DE  
BRASSAGEM PARA A PRODUÇÃO DE CERVEJA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Sistemas Eletrônicos Embarcados da Universidade Federal do Paraná como requisito à obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo H. C. Oliveira

CURITIBA

2018

## RESUMO

Este trabalho apresenta a elaboração teórica para automação e controle eficiente de temperatura nos processos de cozimento (brassagem) de cereais maltados, fervura e resfriamento de mosto com a finalidade de produção de líquidos fermentados alcoólicos para consumo (cerveja e outros). Visando a repetitividade de receitas e melhor eficiência na extração de açúcares do malte com o intuito de padronizar a receita em todas as levas para que o consumidor ao adquirir o produto, ter a certeza de que sua análise gustativa, sensorial e suas harmonizações sejam as mesmas em todas ocasiões com o mesmo produto. O grande empecilho é o controle exato do processo de aquecimento para atuação correta das enzimas contidas no malte, seja ele de cevada, trigo, milho ou arroz e a transferência entre as panelas de forma automatizada durante o processo para que estejam no tempo certo e evitem oxidação do líquido aquecido.

Palavras-chaves: Cervejaria automatizada. Controle de temperatura. Brassagem.

## **ABSTRACT**

This work presents the theoretical elaboration for automation and efficient temperature control in the processes of cooking (brewing) malted cereals, boiling and cooling of wort for the purpose of producing alcoholic fermented liquids for consumption (beer and others). Aiming at the repetitiveness of recipes and better efficiency in the extraction of sugars from malt in order to standardize the recipe in all the levies so that the consumer when acquiring the product, make sure that their gustatory, sensorial analysis and their harmonizations are the same on all occasions with the same product. The great obstacle is the exact control of the heating process for the correct performance of the enzymes contained in the malt, be it barley, wheat, corn or rice and the transfer between the pans in an automated way during the process so that they are in the right time and avoid oxidation of the heated liquid.

Keywords: Automated brewery. Temperature control. Brewing.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Dados do setor cervejeiro em 2015. ....	10
Figura 2 - Redes de Petri: (a) pura; (b) impura.....	13
Figura 3 - Efeito da ação: (a) antes; (b) depois. ....	13
Figura 4 - Exemplo de redes de Petri. ....	14
Figura 5 - Rede de Petri modelando um sistema teleférico.....	14
Figura 6 - Histograma do processo de produção de cerveja.....	16
Figura 7 - Modelo redes de Petri do processo de fabricação de cerveja. ....	16
Figura 8 - Gráfico de atuação das enzimas.....	20
Figura 9 - Interface Beersmith .....	24
Figura 10 - Leitura da receita.....	25
Figura 11 - Receita importada por arquivo xml.....	25
Figura 12 - Processo de Brassagem. ....	26
Figura 13 - Redes de Petri do processo de Brassagem.....	27
Figura 14 - Diagrama do processo de clarificação. ....	27
Figura 15 - Diagrama do processo de lavagem.....	28
Figura 16 - Redes de Petri do processo de: (a) clarificação; (b) lavagem.....	28
Figura 17 - Diagrama do processo de fervura. ....	29
Figura 18 - Redes de Petri do processo de fervura.....	29
Figura 19 - Redes de Petri do processo de whirlpool.....	30
Figura 20 - Redes de Petri do processo de resfriamento. ....	30
Figura 21 - Redes de Petri do processo de resfriamento. ....	30
Figura 22 - Sensor de temperatura modelo DS18B20. ....	32
Figura 23 - Conector XLR modelo macho CED1202.....	32
Figura 24 - Conector XLR modelo fêmea CED1203 .....	32
Figura 25 - Poço para sensores .....	33
Figura 26 - Resistência Dernord DL-W01.....	34
Figura 27 - Resistência Dernord DT-WH22.....	34
Figura 28 - FOTEK SSR 40 DA.....	35
Figura 29 - Dissipador de calor para SSR .....	36
Figura 30 - Botão parada de emergência .....	36

Figura 31 - Bomba Chugger Pump CPSS-IN-1 .....	37
Figura 32 - válvula solenóide elétrica VITON STAINLESS 2S200-20.....	38
Figura 33 - Mangueira de silicone atóxico .....	39
Figura 34 - Sensor de nível de água. ....	39
Figura 35 - Diagrama de blocos do controle PID para controle de temperatura. .....	41
Figura 36 - Resposta do controle PID para entrada do degrau unitário. ....	41
Figura 37 - Protótipo com cotas.....	43
Figura 38 - Vista frontal .....	44
Figura 39 - Vista lateral.....	44
Figura 40 - Vista traseira .....	45
Figura 41 - Vista superior .....	45
Figura 42 – Protótipo .....	46
Figura 43 - Conectores de entrada na caixa preta .....	47
Figura 44 - Invólucro com tela para os SSRs .....	48
Figura 45 - Invólucro de tela com tampa para os SSRs .....	48
Figura 46 - Rodas com rodízios.....	49
Figura 47 - Chapa de alumínio para a proteção das bombas .....	49
Figura 48 - Vista superior da panela HLT.....	50
Figura 49 - Panela HLT .....	50
Figura 50 - Panela de fervura Kettle.....	51
Figura 51 - Botão de parada de emergência .....	51
Figura 52 - Diagrama elétrico ilustrativo .....	52
Figura 53 - Fluxograma de algoritmo de aquecimento .....	52
Figura 54 - Conexões com o Raspberry pi .....	53
Figura 55 - Projeto final .....	55
Figura 56 - Painel de comando.....	57
Figura 57 - Painel de controle Parte 1 .....	57
Figura 58 - Painel de controle Parte 2 .....	57
Figura 59 - Configuração de hardware em modo <i>negatoscópico</i> .....	58
Figura 60 - Utilização em smartphones .....	59
Figura 61 - Funcionamento em computadores e tablets .....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção global de cerveja por país em 2014 e 2015.....	9
Tabela 2 - Atuação enzimática .....	21
Tabela 3 - Relé de estado sólido .....	35

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	8
2	OBJETIVOS .....	11
2.1	OBJETIVO GERAL .....	11
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
2.3	JUSTIFICATIVA .....	11
3	FUNDAMENTOS BÁSICOS DE REDES DE PETRI.....	12
4	PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CERVEJA.....	15
4.1	INTRODUÇÃO .....	15
4.2	MODELO ALTO NÍVEL DA REDES DE PETRI.....	16
4.3	ESTADOS DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO.....	17
4.3.1	INGREDIENTES .....	17
4.3.2	MOAGEM.....	19
4.3.3	BRASSAGEM.....	19
4.3.4	CLARIFICAÇÃO .....	22
4.3.5	FERVURA.....	22
4.3.6	WHIRLPOOL .....	22
4.3.7	RESFRIAMENTO .....	23
4.3.8	FERMENTAÇÃO .....	23
4.4	SOFTWARE PARA CRIAÇÃO DE RECEITAS.....	23
4.4.1	BEERSMITH .....	24
5	IMPLEMENTAÇÃO .....	25
5.1	BRASSAGEM.....	26
5.2	CLARIFICAÇÃO.....	27
5.3	FERVURA .....	29
5.4	WHIRLPOOL E RESFRIAMENTO.....	30
6	CONSTRUÇÃO DO PROJETO.....	31

6.1	SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA.....	31
6.2	SISTEMA DE AQUECIMENTO.....	33
6.2.1	RESISTÊNCIA PARA AQUECIMENTO.....	33
6.2.2	RELÉ DE ESTADO SÓLIDO PARA ACIONAMENTO DA RESISTÊNCIA.....	34
6.3	SISTEMA DE TRANSFERÊNCIA DO LÍQUIDO.....	37
6.3.1	BOMBA DE DESLOCAMENTO.....	37
6.3.2	VÁLVULAS.....	38
6.3.3	MANGUEIRAS DE SILICONE.....	38
6.4	SENSOR DE NÍVEL DE ÁGUA.....	39
6.5	SISTEMA DE CONTROLE PID.....	40
6.5.1	CONTROLE PID.....	40
6.5.2	MICROCONTROLADOR.....	42
6.6	CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO.....	43
7	INTERFACE WEB.....	54
7.1	BOOTSTRAP.....	54
7.2	FLASK.....	54
7.3	ANGULAR JS.....	54
8	RESULTADOS E DISCUSÕES.....	55
8.1	PROTÓTIPO.....	55
8.2	INTERFACE COM USUÁRIO.....	56
9	CONCLUSÕES.....	60
9.1	TRABALHOS FUTUROS.....	61
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de produção de cerveja não possui uma data exata de sua iniciação, a datação remota envolvendo o ato de produzir cerveja tem no mínimo 6.000 anos, advindo da civilização Suméria, e se trata de um hino chamado de Hino para Ninkasi, tendo como parte da escrita “Ninkasi, você é o único que derrama cerveja filtrada do barril coletor” (Padden,2014).

De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, através da lei nº 8.918, de 14/07/1994, regularizada pelo decreto Nº 6.871, de 4 de junho de 2009, a cerveja pode ser definida como “a bebida obtida pela fermentação alcoólica do mosto cervejeiro, oriundo do malte de cevada e água potável, por ação de levedura, com adição de lúpulo”.

Segundo o Sindicato Nacional da Indústria da Cerveja (SINDICERV) a primeira cerveja fabricada no Brasil foi a Bohemia em 1853, foi uma cerveja de médio teor alcoólico, de cor clara e do tipo Pilsen.

O processo de fabricação da cerveja conforme Palmer (2006) é sucintamente:

- A cevada maltada é dissolvida em água quente formando açúcares;
- A solução de açúcar de malte é fervida com lúpulo;
- A solução fervida é resfriada e adicionado a levedura;
- Os açúcares são fermentados pela levedura, liberando CO<sub>2</sub>, álcool etílico e aromas;

- Após completar a fermentação, transfere-se para a etapa de maturação, decantando as partículas suspensas, posterior a cerveja é engarrafada adicionando um pouco de açúcar para ajustar a carbonatação para a classe “viva” refermentada na garrafa ou injetando CO<sub>2</sub> sob pressão ocasionando a carbonatação forçada.

A enorme aceitação e apreciação desta bebida à levou para fabricação em escalas industriais e ao desenvolvimento de vários tipos e estilos.

Na última década o mercado brasileiro tem-se destacado no mercado mundial cervejeiro, segundo a Associação Brasileira da Indústria da Cerveja (CERV BRASIL) o Brasil se manteve em 3º lugar no ranking mundial de produção de cerveja no anos de 2014 e 2015, perdendo apenas para China e Estados Unidos, porém a maior produção de cerveja a nível mundial é feita por uma empresa brasileira.

Tabela 1 apresenta os dados de produção global de cerveja por país durante os anos de 2014 e 2015.

**Tabela 1 - Produção global de cerveja por país em 2014 e 2015.**

		2015					2014	
2015 Rank	2014 Rank	Country	Production Volume (kl)	Growth from previous Year(%)	Global Market Share		Production Volume (kl)	Growth from previous Year(%)
					Incremental (%)	Cumulative (%)		
1	1	China	42.992.800	-4,3	22,8	22,8	44.933.300	-3,1
2	2	United States	22.286.900	-1,4	11,8	34,6	22.604.300	0,4
3	3	Brazil	13.857.500	-2,0	7,3	42,0	14.147.000	5,0
4	4	Germany	9.562.300	0,4	5,1	47,0	9.527.400	1,0
5	5	Mexico	7.450.000	-4,5	3,9	51,0	7.800.000	-4,9
6	6	Russia	7.303.100	-4,7	3,9	54,8	7.663.300	-7,9
7	7	Japan	5.464.300	-0,1	2,9	57,7	5.468.600	-1,1
8	10	Vietnam	4.670.000	20,1	2,5	60,2	3.890.000	9,0
9	8	United Kingdom	4.403.900	-0,7	2,3	62,5	4.433.600	5,7
10	9	Poland	3.980.000	0,7	2,1	64,7	3.952.000	-0,1

Fonte: Kirin Holdings Company (2016).

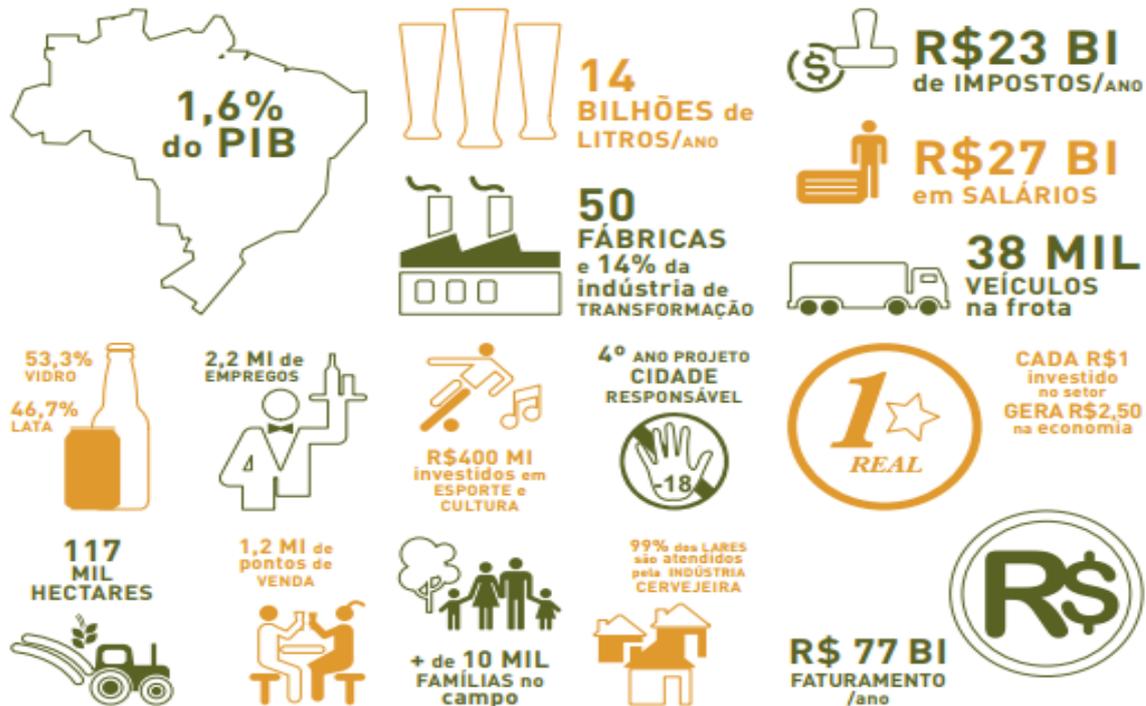
O processo de produção de cerveja no Brasil conta com a participação e integração de vários setores, dentre eles pode-se destacar os setores de agricultura, indústria de implementos agrícolas, logístico, construção civil, papel e celulose, alumínio, vidro e energia, gerando empregos e incentivando a inovação tecnológica visando o aumento de produtividade e qualidade.

Além do incentivo tecnológico, a indústria cervejeira também incentiva projetos de responsabilidades sociais e desenvolvimento sustentável.

As maiores fabricantes de cerveja já registram um índice de 90% de reciclagem de resíduos gerados durante a produção de cerveja de acordo com a CERVBASIL, animais são alimentados com o bagaço de cevada o que é fonte de fibras e nutrientes, principalmente vacas leiteiras e suínos.

De acordo com anuário de 2016 da Associação Brasileira da Indústria da Cerveja, é possível destacar fatores altamente relevantes para a economia brasileira durante o ano 2015, contribuindo anualmente com: R\$23 bilhões de impostos, R\$27

bilhões em salários, R\$77 bilhões de faturamento, 2,2 milhões de empregos, produção de 14 bilhões de litros de cerveja, participação de 1,6% do PIB, a cada R\$1,00 investido no setor gera R\$2,50 na economia, entre outros apresentados na Figura 1.



**Figura 1 - Dados do setor cervejeiro em 2015.**  
**Fonte: Associação Brasileira da Indústria Cervejeira (2016).**

De acordo com a Associação Brasileira de bebidas (Abrabe), as microcervejarias se caracterizam pela produção em menor escala (até 200 mil litros/mês), envolvendo ingredientes de alta qualidade e trazendo uma cerveja diferenciada para o consumidor. As nanocervejarias tem a capacidade de produção de até 2 mil litros mensais, podendo ser produzida de forma caseira e sem todas as licenças para atuar.

A cerveja industrial é produzida em grande escala e muitas vezes utiliza insumos de baixa qualidade ou ingredientes alternativos como milho e arroz, além de aditivos químicos como corantes, conservantes e estabilizantes. A cerveja artesanal possui maior atenção em sua produção, com escolha de ingredientes tradicionais selecionados e de alta qualidade como a cevada, trigo, centeio e aveia, além de ingredientes inovadores como frutas, sementes, madeiras nativas, ervas e especiarias.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Construir um protótipo de uma nanocervejaria para a produção de cerveja automatizada e melhorar o processo de produção através de sistemas a eventos discretos e controle do processo.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo do projeto com sucesso é necessário o planejamento e execução dos objetivos específicos a seguir.

- Modelar a nanocervejaria.
- Atuar no controle do processo de brassagem visando melhorar a qualidade do produto final.
- Construir o protótipo da nanocervejaria.

### 2.3 JUSTIFICATIVA

Apesar de ser considerado simples o processo de fabricação da cerveja, exige técnica e controle, especialmente o controle da temperatura do líquido utilizado durante o processo, onde a temperatura influencia na ação de enzimas e consequentemente no sabor do produto final, ou seja, sem o devido controle não existe padrão no sabor e qualidade do produto final e com a apreciação de harmonizações, os clientes estão mais exigentes, desta forma criando um nicho de mercado pujante no qual com este equipamento de custo reduzido e alta eficiência, os bares e restaurantes poderão atenderlos criando clientes cativos.

Esse trabalho traz a proposta de automatizar o processo de produzir cerveja, sendo o foco do trabalho a modelagem e controle de temperatura do processo de brassagem, sendo possível acompanhar e controlar o processo de forma mais segura e eficiente, aumentando a confiabilidade e qualidade do produto final.

### 3 FUNDAMENTOS BÁSICOS DE REDES DE PETRI

A rede de Petri foi apresentada por Carl Adam Petri em 1962, é uma técnica de modelagem que permite a representação de sistemas com base em matemática.

É uma ferramenta de alto nível utilizada para a modelagem gráfica, matemática e análise de sistemas de eventos discretos.

É possível através da redes de Petri estudar e identificar informações sobre o sistema aplicado, como concorrentes, assíncronos, paralelos, estocásticos e outros. É uma ferramenta que também auxilia na comunicação visual, com diagrama de blocos e redes do sistema a ser estudado (Marranghello, 2005).

Os elementos básicos que formam a topologia da redes de Petri são:

- Estados: são usados para modelar os componentes passivos dos sistemas, correspondendo às variáveis de estado.
- Ações: são usadas para modelar os componentes ativos dos sistemas, são os eventos de transição de um estado para outro.
- Fluxo: através das ações do sistema é especificado como é a transformação de um estado para outro.

A notação gráfica utilizada para a representação dos elementos são:

- Estados: representados por elipses ou círculos.
- Ações: representadas por retângulos ou barras.
- Fluxo: representado por setas.



Algumas definições são importantes na utilização da redes de Petri, sendo elas apresentadas a seguir.

- Estados e ações são noções concomitantemente interdependentes e distintas.
- Estados e ações são entidades distribuídas.
- Um caso é um subconjunto de estados, distribuídos pela rede e satisfeitos simultaneamente.
- Um passo é um subconjunto de ações, distribuídos pela rede e que podem ocorrer simultaneamente.

- As alterações provocadas por uma ação são fixas e independentes do caso no qual ela ocorre.

- A ocorrência de um estado é representada graficamente por uma marca (•) colocada dentro da elipse correspondente.

- Uma ação pode ocorrer em um determinado instante se e somente se as alterações provocadas pela ação são possíveis no caso considerado.

- Uma rede é dita pura se e somente não contiver laços.

A Figura 2 representa o conceito de rede pura e impura, ou seja, um sistema com ou sem laço.

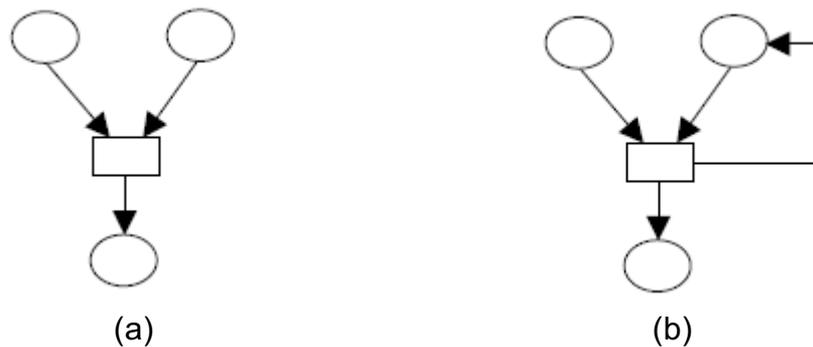


Figura 2 - Redes de Petri: (a) pura; (b) impura.  
Fonte: Marranghello, (2005).

A Figura 3 apresenta o efeito antes e depois da ocorrência de uma ação, a qual é representada pela (•).

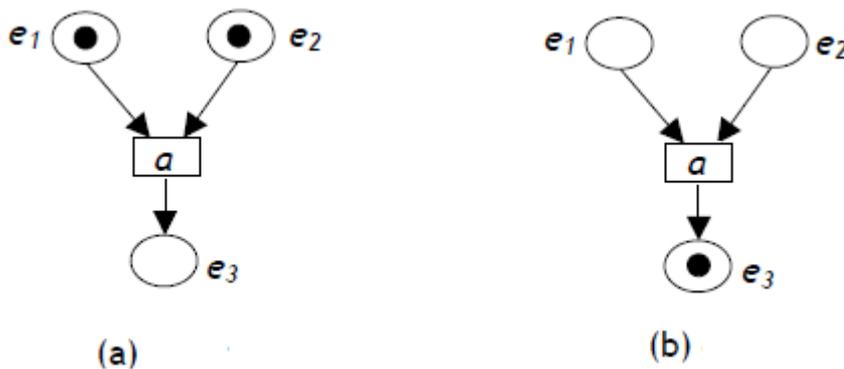


Figura 3 - Efeito da ação: (a) antes; (b) depois.  
Fonte: Marranghello, (2005).

Para um melhor entendimento a Figura 4 mostra um exemplo para a representação gráfica da redes de Petri para a representação algébrica a seguir.

- Estados: {e1, e2, e3, e4, e5}.
- Ações: {a1, a2, a3, a4}
- Fluxo: {(e1,a2), (e2,a2), (e3,a1), (e5,a4), (e4,a3),(a2,e3), (a3,e1), (a1,e2), (a4,e4), (a1,e5)}.

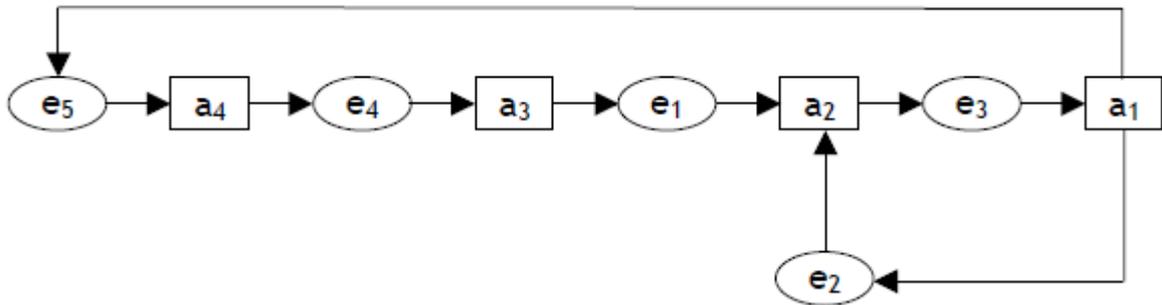


Figura 4 - Exemplo de redes de Petri.  
Fonte:Marranghello, (2005).

Um outro exemplo é apresentado na Figura 5 , cujo exemplo é aplicado a um teleférico em uma estação turística, onde existe apenas um vagão e ele só funciona em um sentido e os turistas o utilizam para subir uma montanha.

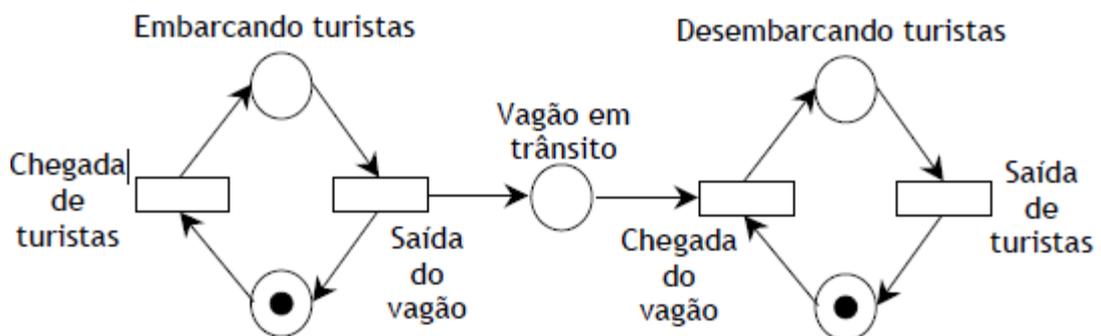


Figura 5 - Rede de Petri modelando um sistema teleférico.  
Fonte:Marranghello, (2005).

## 4 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CERVEJA

### 4.1 INTRODUÇÃO

O processo de fabricação da cerveja conforme Palmer (2006) é resumidamente:

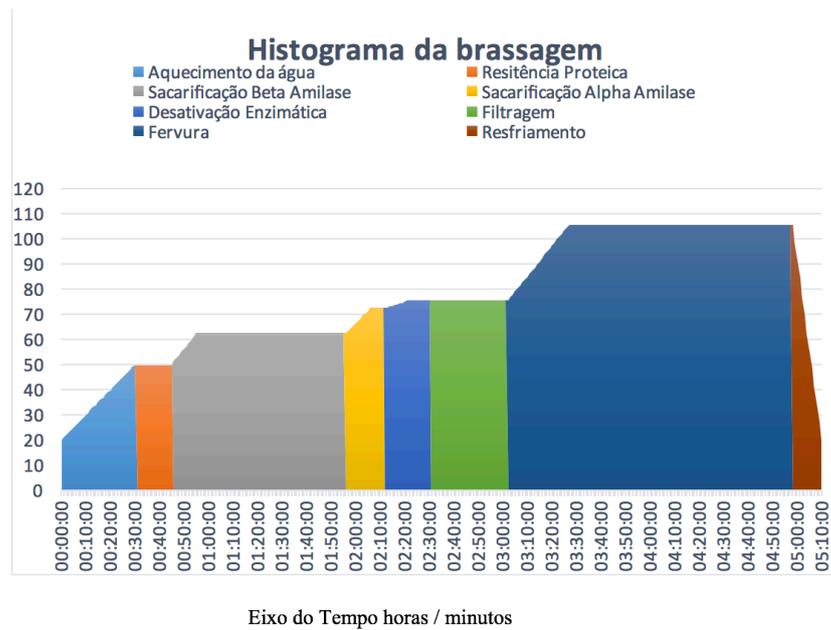
- A cevada maltada é dissolvida em água quente formando açúcares;
- A solução de açúcar de malte é fervida com lúpulo;
- A solução fervida é resfriada e adicionado levedura;
- Os açúcares são fermentados pela levedura, liberando CO<sub>2</sub>, álcool etílico e aromas;
- Após completar a fermentação, a cerveja é engarrafada adicionando um pouco de açúcar para ajustar a carbonatação ou por carbonatação forçada adicionando CO<sub>2</sub> sintético.

De acordo com processo resumido descrito por Palmer, o processo de produção segue uma sequência de processos bem definidos como a moagem, brassagem, clarificação, fervura, whirlpool, resfriamento e fermentação. Esses processos serão apresentados com maiores detalhes no capítulo 4.3.

O processo de fabricação de cerveja utiliza 3 painéis conforme a Figura 12, onde as painéis são definidas como:

- HLT (*Hot Liquor Tank*): reservatório destinado tanto como água para lavagem como para aquecer o mosto através da serpentina, a recirculação constante da água evita que haja pontos com temperaturas diferentes no tanque.
- MLT (*Mash/Lauter Tun*): reservatório destinado a mostura e filtragem dos maltes.
- KETTLE (Painel de fervura).

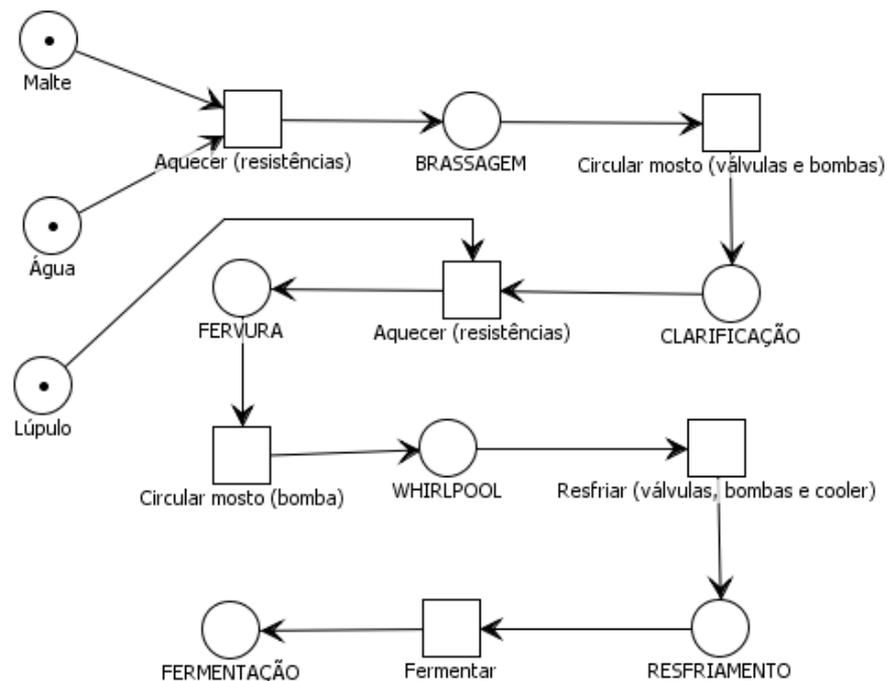
A Figura 6 ilustra o processo de cozimento do malte evidenciando os patamares e rampas de cozimento sendo peculiares para cada estilo de cerveja a ser produzido.



**Figura 6 - Histograma do processo de produção de cerveja.**  
**Fonte: Do Autor (2018).**

#### 4.2 MODELO ALTO NÍVEL DA REDES DE PETRI

A representação em alto nível do processo, utilizando a redes de Petri é apresentada na Figura 7, onde os círculos representam os estados do processo, os retângulos representam as ações e as setas representam o fluxo das ações.



**Figura 7 - Modelo redes de Petri do processo de fabricação de cerveja.**  
**Fonte: Do Autor.**

## 4.3 ESTADOS DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO

### 4.3.1 INGREDIENTES

Para a produção de cerveja é necessário basicamente o uso de três matérias-primas essenciais: a água, o malte e o lúpulo, podendo em alguns casos haver variações em sua composição.

Para se obter diferentes tipos de cerveja é utilizado dosagens diferentes das matérias-primas e variações no processo de produção, como o tempo e maneira em que são adicionadas e tratadas.

#### 4.3.1.1 ÁGUA

A água é a matéria-prima mais abundante na produção de cerveja. A análise da água para produção pode ser feita através do balanceamento de sais e da medição do valor do pH, dentro de uma escala considerando de 0 (ácido) até 14 (alcalino), o valor 7 é considerado como neutro.

O pH da água influencia na ação enzimática durante o processo, podendo variar conforme o tipo de cerveja desejada, um valor de pH ótimo na produção de cerveja está entre 6 e 7.

Para a fabricação de cerveja caseira o pH não é o parâmetro a ser controlado com maior importância, podendo ser usado a água da torneira fornecida pelo saneamento básico posteriormente a passagem por sistema de filtragem por carvão ativado.

Os sais são componentes muito importantes nas características finais da cerveja, podendo ser adicionados para se obter uma água de qualquer lugar do mundo, desta forma se enquadrando em um estilo catalogado e enaltecendo características peculiares como característica seca, tostados mais pronunciados ou equilíbrio com especiarias.

#### 4.3.1.2 MALTE DE CEVADA

O malte é produzido a partir da germinação parcial dos grãos de cereais, para a produção de cerveja normalmente é utilizada a cevada, devido o alto valor de amido, características gustativas peculiares e por contribuir amplamente com a formação de grande gama de açúcares fermentáveis (PALMER, 2006).

O processo de maltar, ou seja, elevar o conteúdo enzimático dos grãos de cevada, é feito da seguinte forma:

Umidificar o grão da cevada para iniciar o processo de germinação, e então ativar as enzimas que iniciam a conversão de suas reservas de amido e proteínas em açúcares e aminoácidos, utilizados para o desenvolvimento da planta e tem como objetivo liberar essas enzimas para a utilização do cervejeiro (PALMER, 2006).

#### 4.3.1.3 LÚPULO

Segundo Palmer (2006), lúpulo é a flor cônica de plantas trepadeiras nativas da América do Norte, Europa, Ásia e com variedades experimentais no Brasil. Apesar de sua grande variedade podem ser classificadas em duas categorias, sendo lúpulos de amargor e lúpulos de aroma, trazendo a identidade da cerveja através de sua contribuição para o amargor e aroma do líquido balanceando o adocicado do malte.

O equilíbrio do amargor, sabor e aroma pode ser feito adicionando diferentes tipos de lúpulos em diferentes momentos do processo de fervura, quanto maior o tempo de fervura do lúpulo, maior será o seu amargor desproporcionalmente ao aroma (PALMER, 2006).

O processo para produção cervejeira pode sofrer variações de acordo com o tipo de cerveja que se deseja a produzir e/ou a qualidade das matérias-primas utilizadas.

#### 4.3.2 MOAGEM

Após a escolha, quantidade do malte e o processo de malteação, o qual foi descrito no item 4.3.1, a moagem do malte pode ser realizada em 2 moinhos cilindros, porém é indicada o uso de 4 cilindros (TSCHOPE, 2001).

O ideal é remover a casca inteira e quebrar o interior do grão, porém deve-se tomar cuidado na moagem para que não seja muito fina nem muito grossa (HUGO, 2013).

A moagem influencia diretamente sobre a velocidade das transformações físico-químicas, clarificação e limpidez, influenciando na qualidade do produto final (TSCHOPE, 2001).

O mosto é filtrado através da própria casca da cevada, portanto preservá-la com maior área superfície é de suma importância, e quanto ao grão quanto menor o seu tamanho maior será a extração do seu amido.

#### 4.3.3 BRASSAGEM

O processo de brassagem segundo Tschope (2001), tem a função de formar uma solução a partir das hemiceluloses, gomas e parte das proteínas solubilizadas no processo de malteação, também tem a função de dissolver o amido, parte das proteínas e hemiceluloses através da ação enzimática, ou seja, transformar açúcares não fermentáveis em açúcares fermentáveis.

O mosto cervejeiro é composto geralmente por 75% de açúcares fermentáveis, sendo 10% de glicose, 45% maltose, 15% maltotriose e 5% sacarose. Os açúcares não fermentáveis que correspondem a 25% do mosto são divididos em 10% maltotetraose e 15% dextrinas (Barnes, 2004).

Enzimas são moléculas de proteína que atuam como catalisadores biológicos. As enzimas mais utilizadas na produção de cerveja são as enzimas Beta amilase e Alfa amilase para a quebra de moléculas menores e maiores respectivamente,

entretanto cada enzima possui uma faixa ideal de temperatura e pH como apresentado na Figura 8.

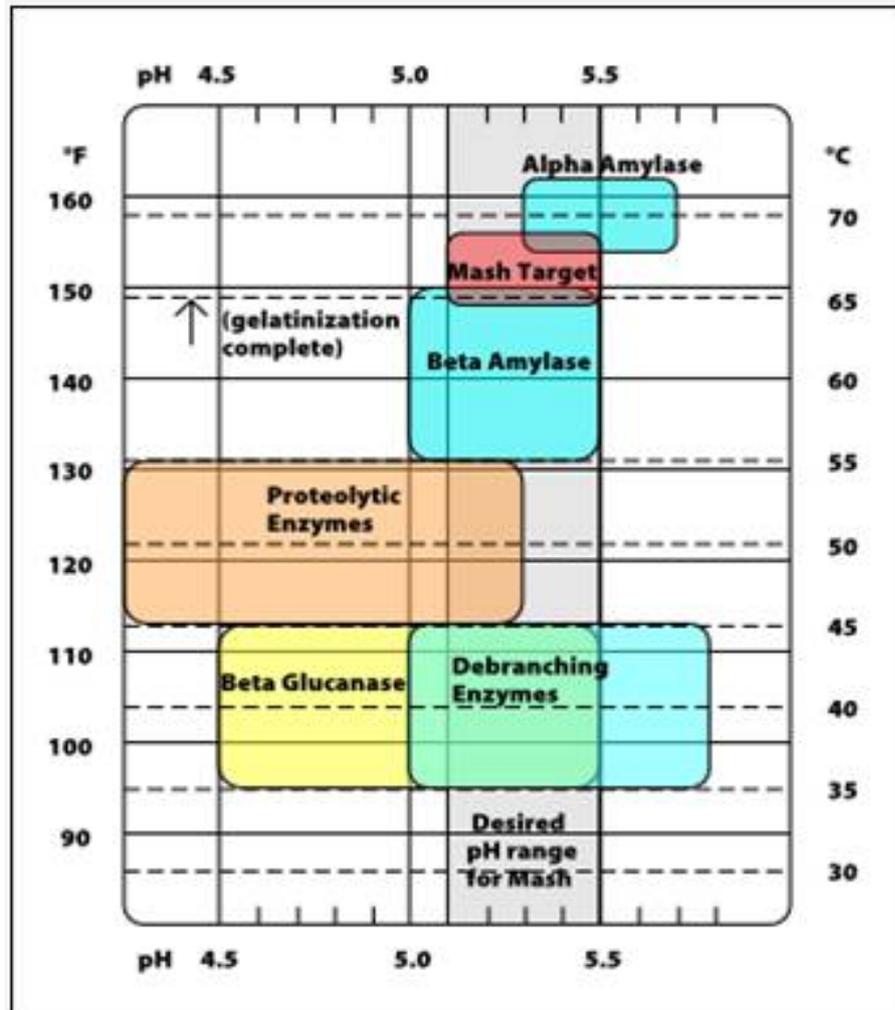


Figura 8 - Gráfico de atuação das enzimas.  
Fonte: Victor Hugo (2013).

As reações das enzimas utilizadas no processo são controladas através de rampas de aquecimento seguindo uma curva de temperatura e patamares adequados.

A Tabela 2 apresenta a atuação enzimática em condições ótimas de temperatura e pH.

Para que o produto final esteja adequado dentro do estilo desejado é necessário que estas temperaturas sejam rigorosamente seguidas.

**Tabela 2 - Atuação enzimática**

Enzima	Atuação	pH	Temperatura [°C]
Hemicelulase	Decomposição da hemicelulose para glucanos de baixa e média massa molar	4,5 a 4,7	40 a 45
Exo-Peptidade	Decomposição das proteínas de alta e média massa molar	5,2 a 8,2	40 a 50
Endo-Peptidase	Decomposição das proteínas para produtos intermediários de alta e média massa molar	5,0	50 a 60
Dextrinase	Desagregação do amido para maltose e maltotriose pela desagregação das combinações 1-6	5,1	55 a 60
$\beta$ - amilase	Decomposição do amido para maltose pela desagregação das combinações 1-4	5,4 e 5,6	60 a 65
$\alpha$ -amilase	Decomposição do amido para dextrinas inferiores pela desagregação das combinações 1-4	5,6 e 5,8	70 a 75

Fonte: Tschope, (2001).

É muito importante controlar de forma precisa e eficiente a temperatura do processo de brassagem, fazendo com que as enzimas atuem de forma eficiente, fornecendo ao cervejeiro as características esperadas para a cerveja.

A sacarificação com a Beta Amilase acontece mantendo a temperatura entre 60-65°C (ideal 62°C), resultando em uma cerveja mais alcoólica e menos encorpada e doce devido a quebra dos açúcares em cadeias menores facilitando para que as leveduras o consumam.

A sacarificação com a Alfa Amilase acontece mantendo a temperatura a 70°C, resultando em uma cerveja menos alcoólica e mais encorpada e doce, quebrando o amido em cadeias maiores, desta forma dificultando e impedindo seu consumo pelas leveduras

A inativação das enzimas também chamada de *Mash Out*, acontece com temperaturas acima de 72°C, sendo fixado pelo mestre cervejeiro em 76°C para a garantia da interrupção enzimática.

O sistema de aquecimento controlado permite ao cervejeiro manipular a composição da mostura de acordo com o tipo de cerveja a ser fabricado. Através das informações de ativação das enzimas é possível definir o tempo e temperatura das rampas do processo de brassagem.

#### 4.3.4 CLARIFICAÇÃO

A clarificação do mosto obtido pela mostura é o processo que realiza a obtenção do mosto primário e através da água quente é extraído o extrato retido na massa de bagaço (TSCHOPE, 2001).

Durante a clarificação, quando o mosto percorre entre as cascas do malte através da circulação e saindo do fundo da panela, impurezas presentes no mosto acabam ficando na casca, aumentando a extração de açúcar (HUGO, 2013).

Realizando posteriormente a lavagem do mosto com água mais açúcares que estavam presos nos grãos são extraídos (HUGO, 2013).

#### 4.3.5 FERVURA

Durante o processo de fervura acontece esterilização do líquido, a evaporação da água de extração excedente e a floculação protéica ou precipitação das proteínas. Também é o momento em que o lúpulo é adicionado e ocorre a transferência de seu aroma e amargor ao mosto (TSCHOPE, 2001).

Para evitar problemas com a qualidade da cerveja, as enzimas ficam inativadas quando o mosto chega a fervura. Por fim é o processo que tem a responsabilidade de fornecer características de paladar, aroma e coloração da cerveja (TSCHOPE, 2001).

#### 4.3.6 WHIRLPOOL

Processo em que as proteínas coaguladas durante a fervura e resíduos de lúpulo são depositadas no fundo na parte central da panela.

O *Whirlpool* pode ser definido como um tanque cilíndrico com entradas laterais tangenciais, para que o mosto quente se concentre no fundo do tanque e o mosto clarificado saia pelas saídas laterais (TSCHOPE, 2001).

#### 4.3.7 RESFRIAMENTO

O processo de resfriamento é responsável por resfriar o mosto rapidamente até a temperatura de inoculação da levedura, protegendo o mosto de contaminação, pois deixá-lo resfriar de forma natural exige um tempo maior para resfriamento, aumentando o risco de contaminação (HUGO, 2013).

O resfriamento é realizado através de trocadores de calor “radiadores”, “*chiller*” do modelo de placas, serpentina imersa ou serpentina revestida.

Após o resfriamento, a levedura (fermento) a ser utilizada é inoculada e a mistura é levada para a fermentação em temperatura controlada.

#### 4.3.8 FERMENTAÇÃO

A fermentação do mosto após seu resfriamento tem como objetivo principal a conversão de açúcares (extrato) em etanol e gás carbônico, onde os subprodutos da fermentação são o Diacetil, Álcoois superiores, Aldeídos, Ésteres e Ácidos carboxílicos (TSCHOPE, 2001).

O processo pode levar até 20 dias e uma temperatura controlada pode garantir que a fermentação seja homogênea e que substâncias indesejadas não sejam produzidas.

#### 4.4 SOFTWARE PARA CRIAÇÃO DE RECEITAS

Existem muitos softwares para o desenvolvimento de receitas de cerveja devido as suas características peculiares e suas variações minuciosas, portanto se põe necessários que o projeto consiga se comunicar com estes softwares para a leitura das receitas desenvolvidas e devido a grande versatilidade, fácil utilização e tradução em diversas línguas optou-se em utilizar o *Beersmith*®.

#### 4.4.1 BEERSMITH

O software *Beersmith* foi desenvolvido em colaboração por cervejeiros artesanais nos Estados Unidos da América e devido a grande complexidade dos ingredientes e suas propriedades, sendo vendido pelo valor simbólico de USD\$ 27,95 dólares sua interface é de fácil utilização e com simulações das receitas conforme ilustra a Figura 9, seu leiaute é intuitivo e com linguagem convencional utilizada pelo mundo cervejeiro,

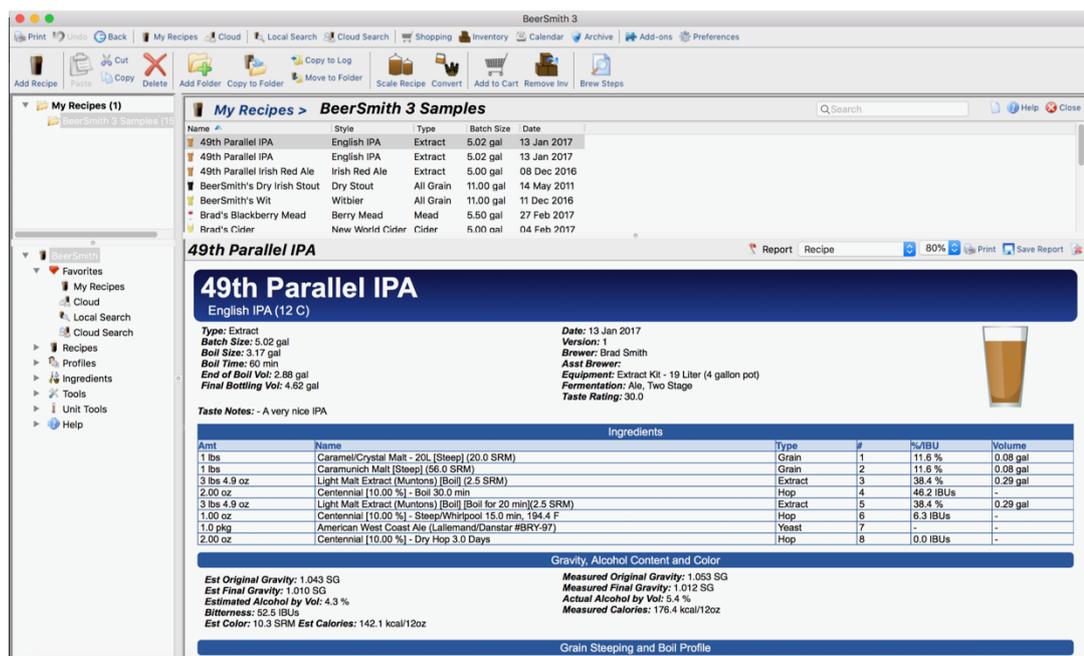
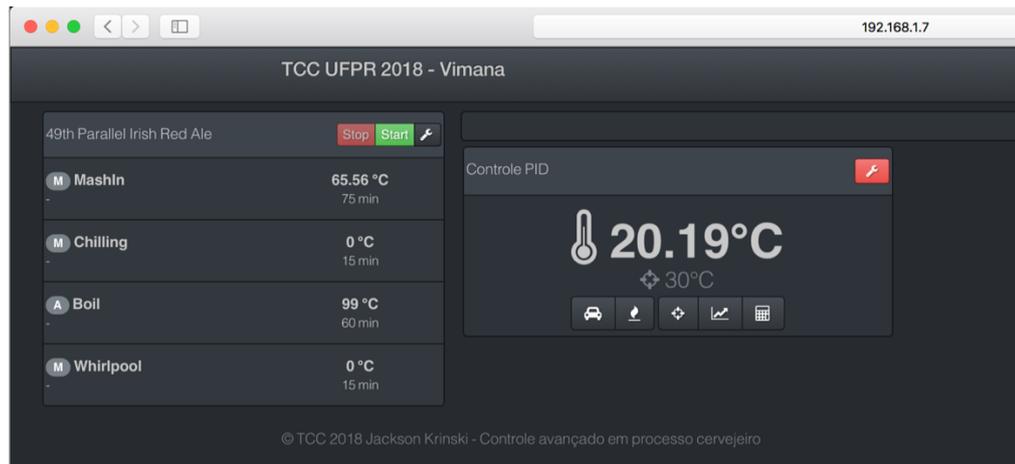


Figura 9 - Interface Beersmith  
Fonte: Do autor (2018).

Os menus são claros e intuitivos, sua versatilidade em formatos para a impressão de receitas e de arquivos facilitou a leitura da receita pois ao gerar um arquivo com extensão .xml possibilitou a leitura pela linguagem HTML utilizando o código aberto jQuery.

Na leitura são transferidos os parâmetros de cozimento e fervura conforme ilustra a Figura 10 e as etapas são geradas automaticamente restando ao cervejeiro somente selecionar as panelas e iniciar sua receita, essa versatilidade proporciona que sejam compartilhadas as receitas importando e exportando-as de forma ágil visualizado na Figura 11.



**Figura 10 - Leitura da receita**  
**Fonte: Do autor (2018).**

Nome da Etapa	Temperatura	Tempo	Equipamento
Einmaischen	30 °C	0 min	HLT
Maltoserast (60°-65°)	34 °C	10 min	HLT
Maltoserast (60°-65°)	63 °C	45 min	HLT
Verzuckerung (70°-75°)	72 °C	30 min	HLT
Laeuterruhe	0 °C	15 min	
Kochen	100 °C	70 min	KETTLE
Whirlpool	0 °C	15 min	KETTLE

**Figura 11 - Receita importada por arquivo xml**  
**Fonte: Do autor (2018).**

## 5 IMPLEMENTAÇÃO

Neste capítulo será apresentada a implementação automatizada dos processos utilizados para a fabricação de cerveja, o modelo de alto nível de redes de Petri será apresentado para cada processo, com a finalidade de facilitar e organizar a visualização e entendimento dos processos de fabricação.

Nas figuras que apresentam o processo com as painéis, deve-se considerar a cor verde como em funcionamento e a cor vermelho como parado para as bombas e válvulas utilizadas para a transferência do líquido.

## 5.1 BRASSAGEM

No processo de brassagem é necessário o controle das rampas de temperatura para as ações enzimáticas acontecerem, transformando os açúcares não fermentáveis em açúcares fermentáveis.

As rampas de temperatura são realizadas na panela HLT e é iniciada a circulação do mosto da panela MLT para o HLT através da serpentina, mantendo a água do HLT em recirculação para que a temperatura se mantenha constante na panela.

A Figura 12 representa o funcionamento planejado do processo de brassagem e o modelo de redes de Petri é apresentado na Figura 13.

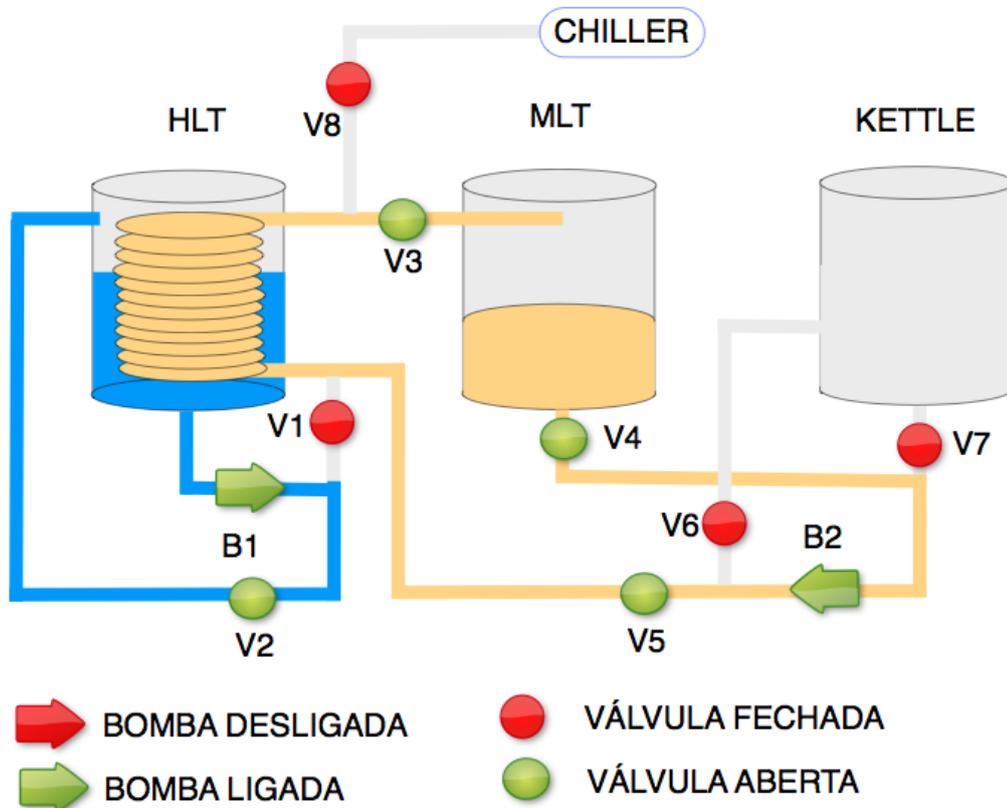


Figura 12 - Processo de Brassagem.  
Fonte: Do Autor.

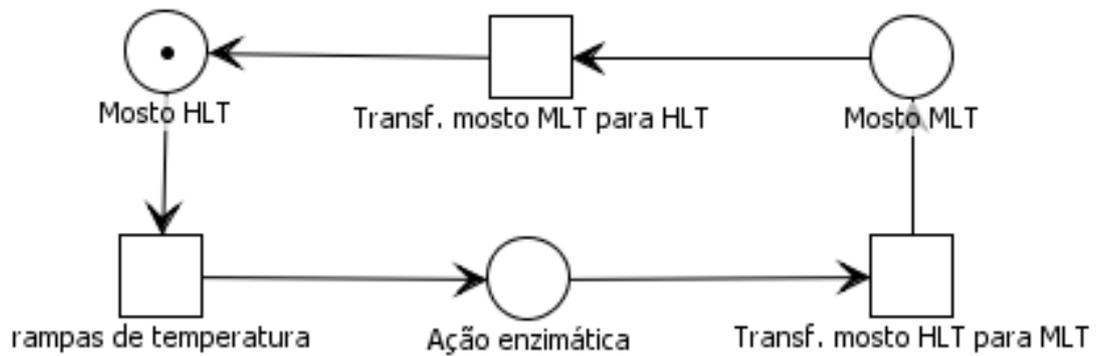


Figura 13 - Redes de Petri do processo de Brassagem  
Fonte: Do Autor.

## 5.2 CLARIFICAÇÃO

No processo de clarificação ou filtragem é necessário recircular o mosto entre as panelas MLT e HLT, ou seja, separar o mosto açucarado dos bagaços do malte, isso evita que partículas sólidas passem para o processo de fervura, esse processo é apresentado na Figura 14 e Figura 16.

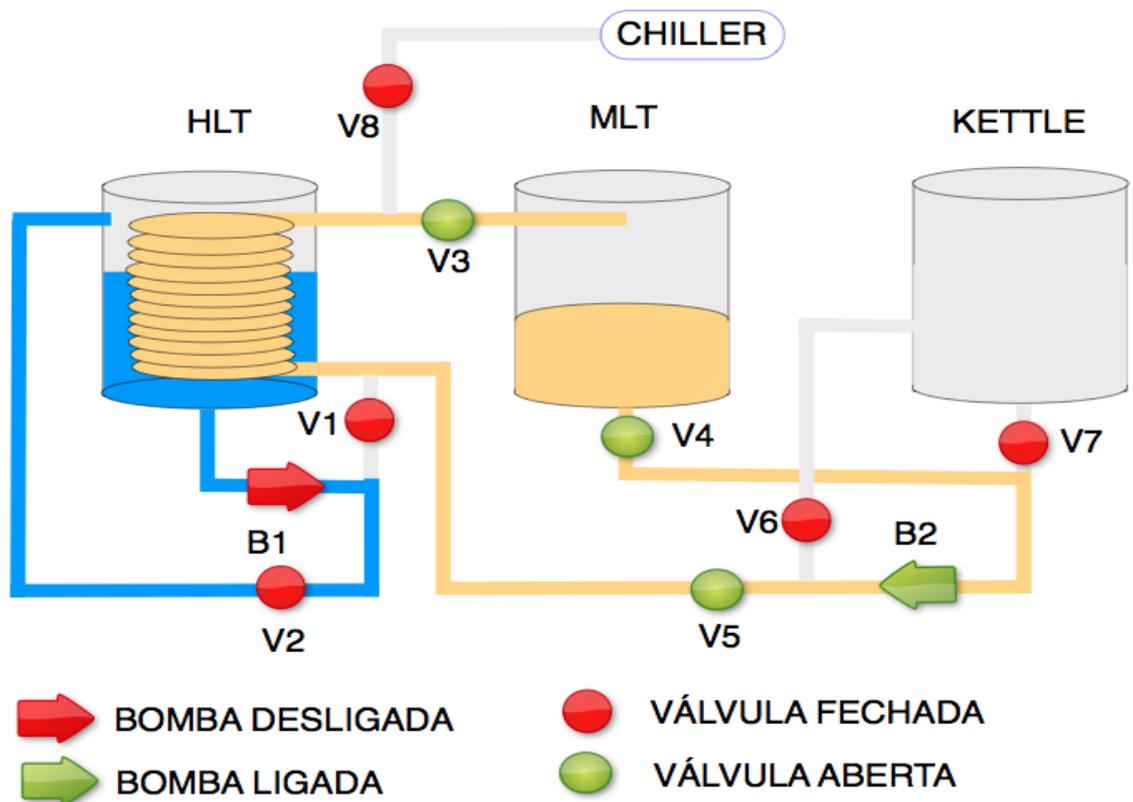


Figura 14 - Diagrama do processo de clarificação.  
Fonte: Do Autor.

Logo em seguida é realizado o processo de lavagem como é apresentado na Figura 15, levando o mosto do MLT para o KETTLE e lavando os grãos moídos do MLT com a água do HLT para a extração do mosto que ainda ficou na panela e nos grãos.

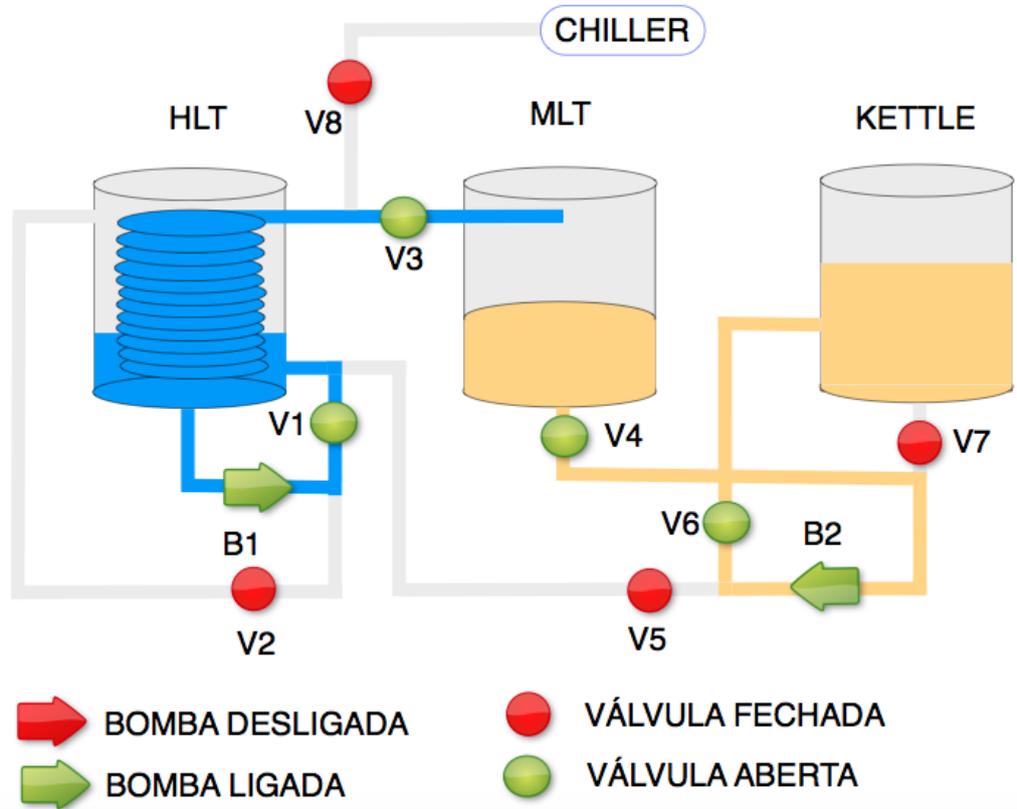


Figura 15 - Diagrama do processo de lavagem.  
Fonte: Do Autor.

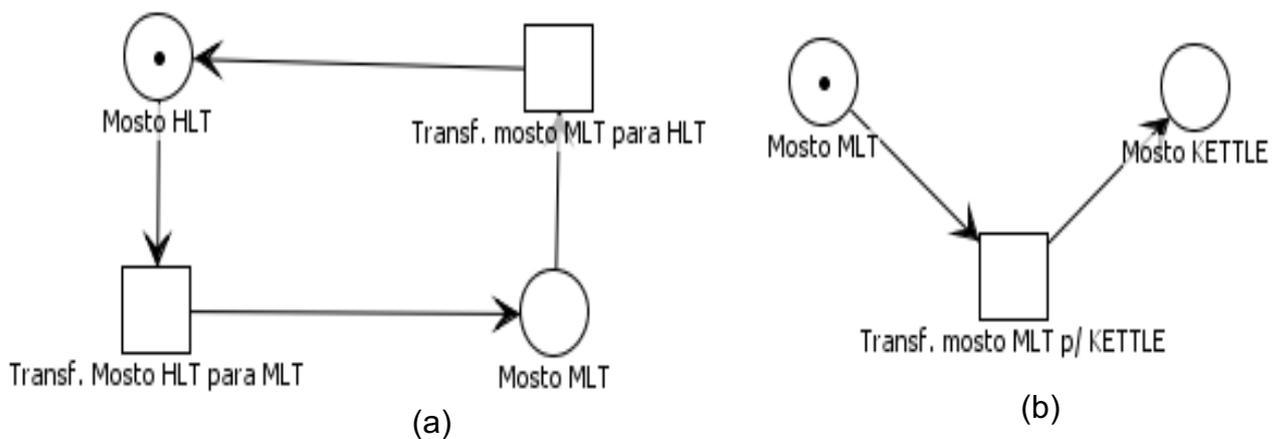


Figura 16 - Redes de Petri do processo de: (a) clarificação; (b) lavagem.  
Fonte: Do Autor.

### 5.3 FERVURA

No processo de fervura todas as válvulas e bombas estão desligadas, apenas a resistência da panela KETTLE é ligada como apresenta a Figura 17 e Figura 18.

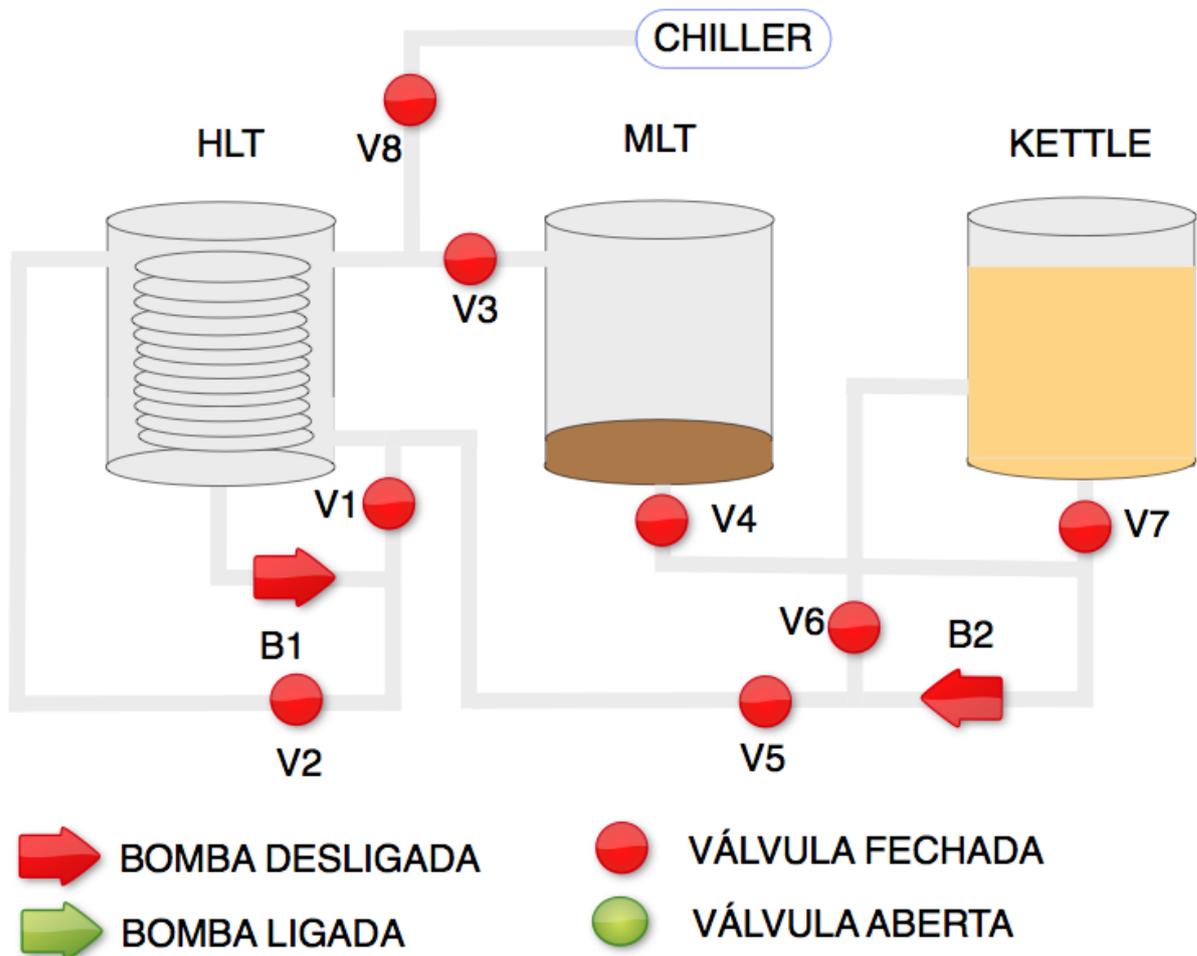


Figura 17 - Diagrama do processo de fervura.  
Fonte: Do Autor.

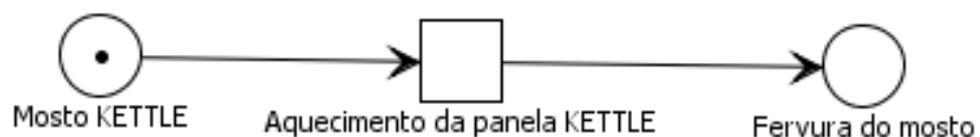


Figura 18 - Redes de Petri do processo de fervura.  
Fonte: Do Autor.

## 5.4 WHIRLPOOL E RESFRIAMENTO

O processo de *Whirlpool* é realizado quando gera-se um redemoinho no mosto da panela KETTLE para concentrar os resíduos do lúpulo no centro da panela, esse processo é apresentado na Figura 19.

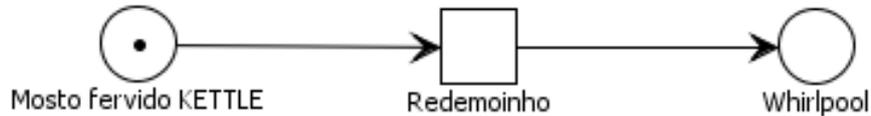


Figura 19 - Redes de Petri do processo de whirlpool.  
Fonte: Do Autor.

O processo de resfriamento é realizado passando o mosto por um chiller resfriador como é apresentado na Figura 20 e Figura 21.

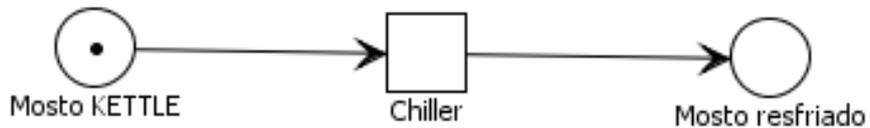


Figura 20 - Redes de Petri do processo de resfriamento.  
Fonte: Do Autor.

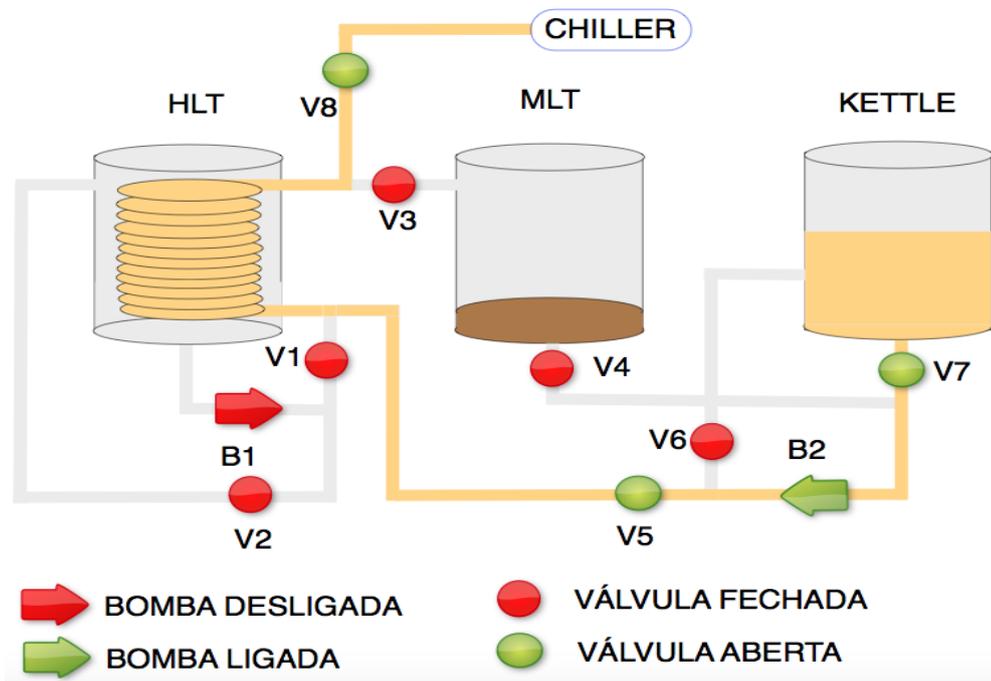


Figura 21 - Redes de Petri do processo de resfriamento.  
Fonte: Do Autor.

## 6 CONSTRUÇÃO DO PROJETO

### 6.1 SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

O sensor DS18B20 é um sensor digital de temperatura, que possui modelo com encapsulamento à prova d'água, produzido em aço inoxidável, com cabo em PVC, podendo ser usado em ambientes úmidos e submersos na água.

O sensor possui resolução entre 9 e 12-bit, possui interface de comunicação 1-*wire*, o qual possibilita a ligação de vários sensores em um mesmo pino de entrada/saída. Isso é possível devido cada sensor possuir um número de série único de 64-bit.

O sensor é apresentado na Figura 22 e suas especificações são apresentadas a seguir:

- Tensão de alimentação: 3.0 a 5.5VDC;
- Leitura de temperatura entre: -55°C a +125°C;
- Fios: Vermelho(VCC), Branco(DATA) e Preto(GND);
- Tempo de atualização: <750ms;
- Precisão:  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ;
- Resolução: 9 ou 12 bits;
- Interface 1 fio (1 Wire);
- ID único de 64 bits;
- Diâmetro: 6mm;
- Comprimento do fio: 90cm;
- Peso: 21g.



**Figura 22 - Sensor de temperatura modelo DS18B20.**  
Fonte: <http://blog.filipeflop.com>

Os sensores são conectados a caixa de controle através de conectores XLR com três polos niquelados marca Sindax, sendo conectado ao sensor o plugue modelo macho, ilustrado na Figura 23 e na caixa de controle o plugue modelo fêmea ilustrado na Figura 24,



**Figura 23 - Conector XLR modelo macho CED1202**  
Fonte: [www.submarino.com](http://www.submarino.com)



**Figura 24 - Conector XLR modelo fêmea CED1203**  
Fonte: [www.submarino.com](http://www.submarino.com)

Poço construído em aço inox com rosca de ½ polegada para instalação dos sensores (sondas), ilustrado na Figura 25.



**Figura 25 - Poço para sensores**  
Fonte: [www.willtec.com.br](http://www.willtec.com.br)

## 6.2 SISTEMA DE AQUECIMENTO

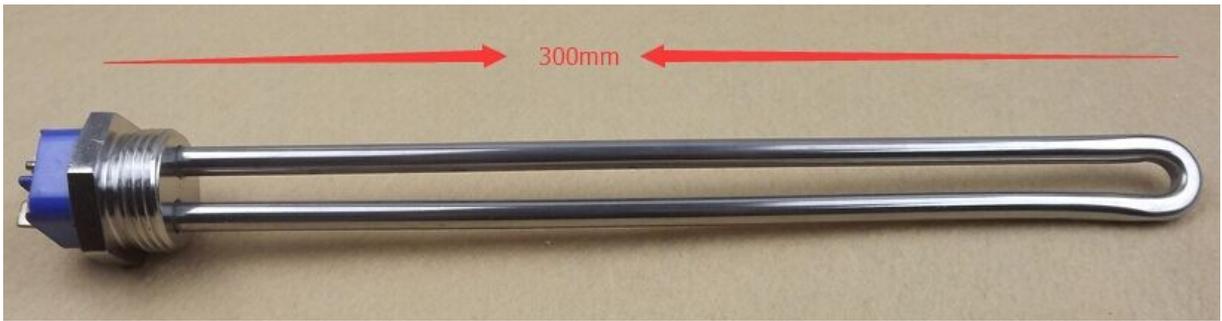
### 6.2.1 RESISTÊNCIA PARA AQUECIMENTO

Serão utilizadas 2 resistências, uma para o processo de brassagem instalada na panela HLT e a outra para o processo de fervura, instalada na panela KETTLE.

As resistências são feitas de aço inoxidável para evitar qualquer tipo de corrosão e podendo ser utilizada em reservatórios com água ou até mesmo a cerveja, são de modelo de baixa densidade, no qual possuem uma grande superfície de aquecimento.

A resistência para o processo de brassagem possui as especificações a seguir e pode ser visualizada na Figura 26.

- Fabricante: Dernord
- Modelo: DL-W01 tubular em “U”
- Alimentação: 220V
- Comprimento: 300mm
- Potência: 4500W



**Figura 26 - Resistência Dernord DL-W01**  
**Fonte: Dongguan dernord Electrical Appliance Co., Ltd**

A resistência utilizada no processo de fervura possui as especificações a seguir e pode ser visualizada na Figura 27.

- Fabricante: Dernord
- Modelo: DT-WH22 tubular
- Alimentação: 240V
- Diâmetro do tubo: 8mm
- Potência: 5500W



**Figura 27 - Resistência Dernord DT-WH22.**  
**Fonte: Dongguan dernord Electrical Appliance Co., Ltd**

## 6.2.2 RELÉ DE ESTADO SÓLIDO PARA ACIONAMENTO DA RESISTÊNCIA

Os SSRs (*Solid State Relay*) são dispositivos semicondutores que atuam como chaves estáticas, são substitutos dos relés eletromecânicos e aplicados no controle de potência CA e CC (HASHID, 1999).

O SSR utilizado neste trabalho é apresentado de acordo com as especificações da Tabela 3 e a Figura 28.

**Tabela 3 - Relé de estado sólido**

Marca	FOTEK
Modelo	SSR - 40 DA
Tensão de entrada	DC 3V até 32V
Corrente de entrada	4 até 20 Ma
Tensão de saída	24 até 380 V-AC
Corrente de saída	40 A

Fonte: Datasheet FOTEK SSR – 40DA



**Figura 28 - FOTEK SSR 40 DA**  
 Fonte: Datasheet FOTEK SSR 40 DA

As vantagens do SSR em relação aos relés eletromecânicos são:

- Não possui partes móveis;
- Não possui materiais que se desgastam com o uso;
- Não possui ruído acústico;
- Não possui problema de repique dos contactores (*bouncing*);
- Não existe ruído acústico;
- A velocidade de comutação é maior;
- Vida útil é maior;
- Possui faixa de tensões e correntes de operação maiores;
- Seu acionamento é feito por opto-acoplamento trazendo segurança para o micro-controlador na ocorrência de surtos elétricos.

O resfriamento do SSR é feito através de dissipadores de alumínio para a troca de calor ilustrado na Figura 29.



**Figura 29 - Dissipador de calor para SSR**  
Fonte: [www.directindustry.com](http://www.directindustry.com)

Botão para parada de emergência marca Renyu modelo cogumelo sendo seu funcionamento em estado normalmente aberto e ao pressionado interrompe o circuito e só poderá ser liberado com a rotação do mesmo no sentido horário, sua corrente máxima de 10A e sua tensão máxima de 500V, ilustrado na Figura 30.

Comumente utilizado em máquinas com o risco de lesão direta ao operador como eixos girantes, serras, líquidos em altas temperaturas e prensas.



**Figura 30 - Botão parada de emergência**  
Fonte: [www.direcindustry.com](http://www.direcindustry.com)

## 6.3 SISTEMA DE TRANSFERÊNCIA DO LÍQUIDO

### 6.3.1 BOMBA DE DESLOCAMENTO

As bombas de deslocamento não positivo são bombas utilizadas para o transporte de fluídos e podem ser classificadas em bomba centrífuga radial, centrífuga helicoidal, centrífuga diagonal e bomba axial (SANTOS, 2007).

A bomba centrífuga pura ou radial é o tipo de bomba hidráulica mais utilizada para o transporte de água.

Para aplicação na nanocervejaria, será necessário o uso de 2 bombas para transferência do líquido entre as painéis, as bombas magnéticas Chugger podem transferir fluídos quentes de até 121°C, atingindo 26 litros trafegados em um minuto, ideal para o processo de fabricação de cerveja. A especificação das bombas são apresentadas a seguir e pode ser visualizada na Figura 31.

- Fabricante: CHUGGER PUMP
- Modelo: CPSS-IN-1
- Alimentação: 115V
- Máxima temperatura do líquido transportado: 121°C
- Max. Fluxo: 7 GPM
- Max. Cabeça: 4,1 m.
- Potência: 1/20 HP
- Corrente em plena carga(motor e bomba): 1,9A



**Figura 31 - Bomba Chugger Pump CPSS-IN-1.  
Fonte: Datasheet Chugger Pump CPSS-IN-1.**

### 6.3.2 VÁLVULAS

As válvulas solenoides serão utilizadas para controle do tráfego do mosto entre as painelas, serão no total 8 válvulas solenoides elétricas feita em aço inoxidável para evitar corrosão, também possui Viton em sua composição de vedação, cujo material é um elastômero muito utilizado em processos industriais que envolvem temperatura elevada em ataques químicos.

A especificação das válvulas são descritas a seguir e pode ser visualizada na Figura 32.

- Fabricante: NYPF
- Modelo: 2S
- Material: aço inoxidável
- Alimentação: 12VDC, 24VDC, 110VAC, 220VAC
- Temperatura de trabalho: -20 a 120°C
- Pressão de trabalho (água/óleo): 0,5 Mpa
- Material de vedação: VITON



**Figura 32 - válvula solenóide elétrica VITON STAINLESS 2S200-20.**  
Fonte: <https://pt.aliexpress.com>

### 6.3.3 MANGUEIRAS DE SILICONE

Para a transferência do líquido sem alteração das características organolépticas será utilizado mangueiras de silicone com diâmetro de 22mm e parede do tubo com 3mm, é uma mangueira incolor, conforme visualizado na figura 33 com capacidade de transportar líquidos em temperaturas até 160 C°



**Figura 33 - Mangueira de silicone atóxico**  
Fonte: [www.extra.com.br](http://www.extra.com.br)

#### 6.4 SENSOR DE NÍVEL DE ÁGUA

Para auxiliar no controle da transferência do mosto durante o processo, será também utilizado 1 sensor de nível de água, o qual possui as especificações a seguir e pode ser visualizado na Figura 34.

- Fabricante: Eldoer
- Material: Plástico
- Faixa de temperatura: -20 a 80°C
- Comutação de corrente: AC 500mA
- Tensão de comutação: 110VAC
- Interruptor de alimentação: 10W



**Figura 34 - Sensor de nível de água.**  
Fonte: <https://pt.aliexpress.com/>

## 6.5 SISTEMA DE CONTROLE PID

### 6.5.1 CONTROLE PID

O controle PID é uma das técnicas de controle mais importantes na área de controle e automação, ela utiliza as ações proporcional, derivativa e integral para controlar o processo de forma estável, mesmo ela sofrendo variações ou distúrbios que poderiam comprometer sua estabilidade.

Cada ação contribui de forma diferente para que o controle se mantenha estável e o sistema controlado.

A ação proporcional é responsável por eliminar as oscilações do sinal de saída, porém existe o “offset”, que é o desvio entre o valor da variável de saída e o valor desejado chamado de setpoint. A ação proporcional multiplica o ganho proporcional pelo erro afim de corrigir o erro do sistema, agindo dessa forma com uma maior amplitude de correção (FREITAS, 2014).

A ação derivativa responde à taxa de erro atuante e pode produzir uma correção significativa antes do valor do erro atuante crescer rapidamente, nesse caso ele antecipa o erro atuante e uma ação corretiva, aumentando a estabilidade do sistema (OGATA, 2010).

A ação integral elimina o desvio *de off-set* causado pela ação proporcional, fazendo com que mesmo o sistema sofrendo alguma variação ou distúrbio, permaneça com sua variável próximo ao valor desejado (*setpoint*). Como a ação integral realiza a integração do erro no tempo, a amplitude da ação integral aumenta de acordo com o tempo de permanência do erro no sistema (FREITAS, 2014).

A ação de controle PID é dada pela equação (1).

$$u(t) = Kp \cdot e(t) + Ki \cdot \int_0^t e(t)dt + Kd \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Onde:

- $u(t)$ : saída ou variável manipulada;
- $K_p$ : ganho proporcional;
- $K_i$ : ganho integral;
- $K_d$ : ganho derivativo;
- $e(t)$ : erro ou desvio.

O diagrama do controle PID para um controle de temperatura é apresentado na Figura 35 e a resposta ao degrau unitário para um controle PID é apresentado na Figura 36.

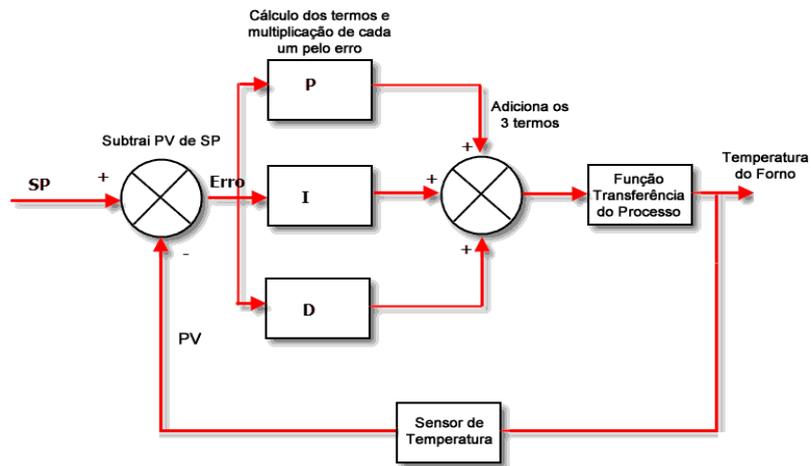


Figura 35 - Diagrama de blocos do controle PID para controle de temperatura.  
Fonte: SILVEIRA (2016).

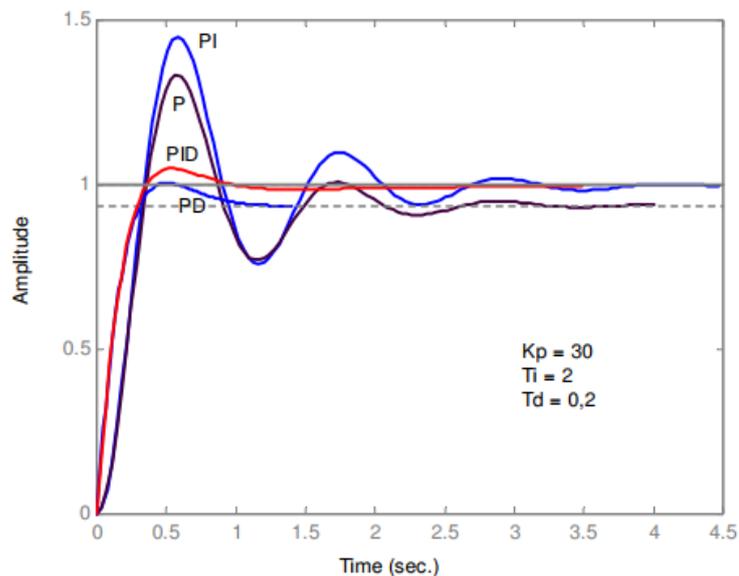


Figura 36 - Resposta do controle PID para entrada do degrau unitário.  
Fonte: MORGADO (2007).

## 6.5.2 MICROCONTROLADOR

Um microcontrolador pode ser definido como um *single-chip computer* (computador em um único chip), *microcomputer*, ou ainda como *embedded controller* (controlador embarcado). O termo MCU (*Micro Controller Unit*) também é bastante utilizado para se designar esse dispositivo. No mesmo chip estão integrados uma CPU, também chamada de core (núcleo), e circuitos auxiliares (periféricos) como memória de programa, memória de dados, circuito de clock, interface de comunicação serial, temporizadores/contadores, portas de I/O, etc (BORBA, 2015).

Esses diferentes recursos embutidos em um microcontrolador variam em função do modelo e do fabricante. É uma tarefa do desenvolvedor especificar o microcontrolador mais adequado para cada aplicação.

O microcontrolador pode ser programado e pode controlar um dispositivo para realizar tarefas específicas, sendo muito utilizado em projetos embarcados.

O que diferencia os diversos tipos de microcontroladores, são as quantidades de memória interna (programa e dados), velocidade de processamento, quantidade de pinos de entrada/saída (I/O), alimentação, periféricos, arquitetura e set de instruções.

Para medir parâmetros elétricos, acionar dispositivos elétricos e controlar o processo automatizado da sala de brassagem é necessário o uso de um microcontrolador, o modelo escolhido e proposto para esse trabalho é usado com o Raspberry Pi 3.

O Raspberry Pi 3 foi escolhido devido sua simplicidade de programação e hardware com recursos suficientes para o desenvolvimento do projeto.

As portas GPIO de entrada e saída serão utilizadas para controlar o processo, recebendo dados dos sensores de temperatura e acionando dispositivos como bomba centrífuga, válvulas e resistência.

O conector HDMI e saída de áudio disponíveis na placa do Raspberry Pi serão utilizados para visualização do processo em monitor HDMI e aviso sonoro de monitoramento.

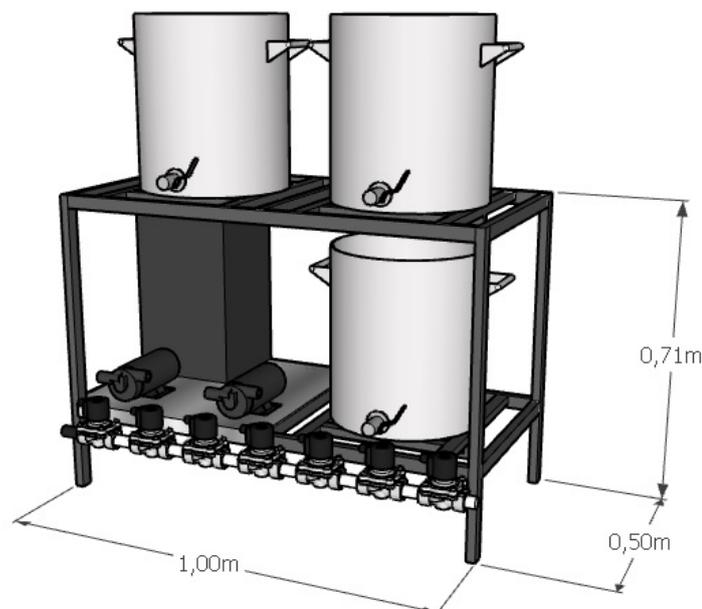
O conector de rede RJ45 também disponível na placa do *Raspberry Pi* será utilizado para comunicação via servidor e/ou internet e o bluetooth para comunicação entre outros dispositivos, como por exemplo smartphones.

As saídas USB disponíveis na placa do *Raspberry Pi* são utilizadas para comunicação com pen drives e outros dispositivos de armazenamento, bem como teclado e mouse para programação.

A linguagem de programação utilizada é o *Python*, *HTML* e *Javascript*.

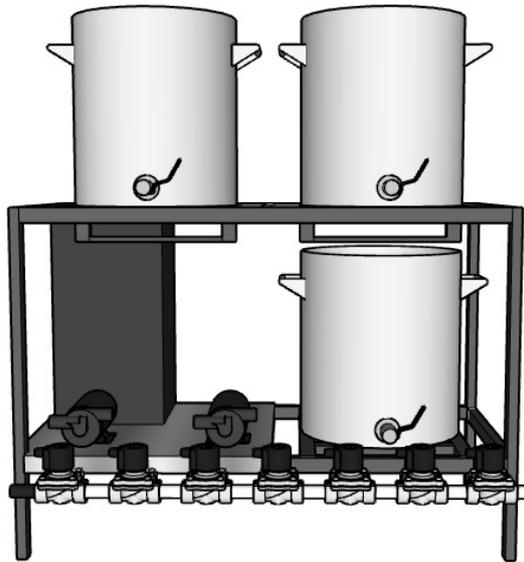
## 6.6 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

Inicialmente o protótipo foi idealizado em projeto 3d, ilustrado com medidas na Figura 37, desenvolvido no *software Sketchup®* desta forma promovendo o melhor agrupamento das painelas, válvulas, bombas e caixa de controle, construindo uma nanocervejaria compacta de fácil acomodação em pequenos ambientes, esta configuração permite uma praticidade maior para realização de reparos e substituição de peças.

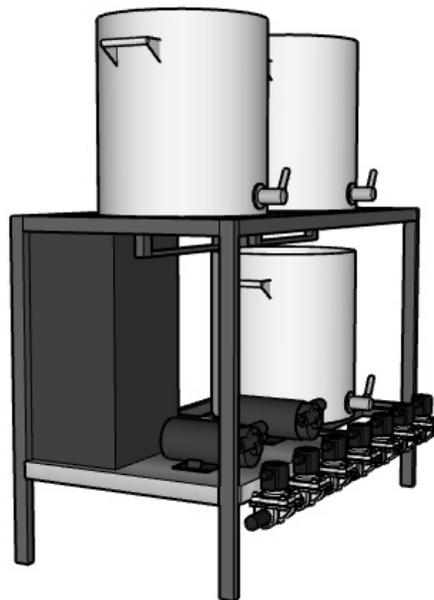


**Figura 37 - Protótipo com cotas**  
Fonte: Do autor (2018)

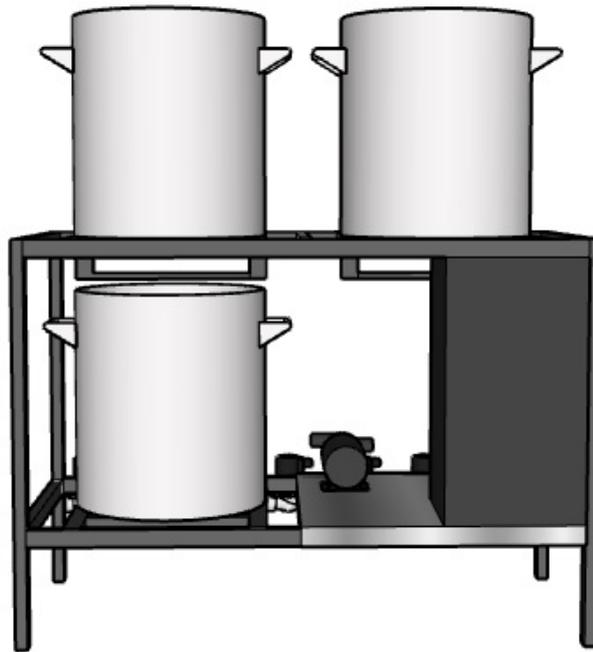
A vista em corte frontal expõe o posicionamento das válvulas e bombas, ilustrado na Figura 38, a vista em corte traseiro expõe a acomodação caixa de controle, ilustrado na Figura 40, a vista em corte lateral expõe a disposição linear das válvulas, ilustrado na Figura 39 e a vista em corte superior expõe as acomodações das painéis limitadas pela estrutura ilustrado na Figura 41.



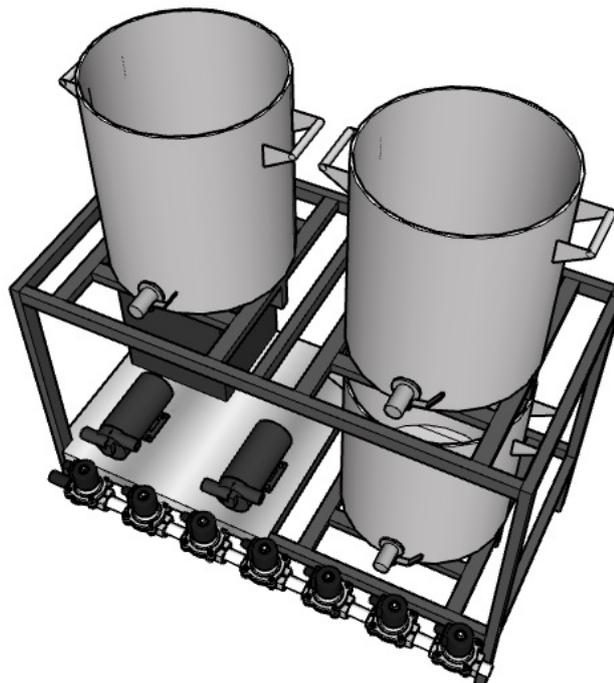
**Figura 38 - Vista frontal**  
Fonte: Do autor (2018)



**Figura 39 - Vista lateral**  
Fonte: Do autor (2018)



**Figura 40 - Vista traseira**  
**Fonte: Do autor (2018)**



**Figura 41 - Vista superior**  
**Fonte: Do autor (2018)**

A estrutura do protótipo foi construída em aço tubular e unida através de um sistema de solda a arco modelo mig/mag formando um sistema de estrutura monobloco, seu acabamento é em pintura líquida feito em tinta esmalte sintético e aplicado através de sistema de pulverização com aplicação de fundo especial para aço galvanizado.

A plataforma intermediária para a fixação das bombas, sistema de acionamento de resistências através de reles de estado sólido e caixa de controle foi confeccionada com chapa de aço galvanizada com bitola 16 conformada a frio e pintada conforme a estrutura, ilustrado na Figura 42 a acomodação dos equipamentos sobre esta plataforma.



**Figura 42 – Protótipo**  
**Fonte: Do autor (2018).**

Para a alocação dos dispositivos, fora utilizado uma caixa metálica com dimensões de (L x A x P): 360x470x370mm, possuindo alavanca para fechamento e abertura, porta cadeado e borracha de vedação sendo seu grau de proteção IP55.

Nesta caixa são armazenados o módulo de relé modelo SRD-05VDC-SL-C no qual são acionados as bombas e válvulas solenoides, *microcontrolador raspberry pi*, fontes de tensão e tomadas de ligação, a caixa possui tomadas de energia e conexões de sensores acoplados na parte externa com conectores XLR 3 polos, ilustrado na Figura 43.



**Figura 43 - Conectores de entrada na caixa preta**  
Fonte: Do autor (2018).

Um invólucro com telas em aço galvanizado produzido em chapa expandida e chapas de alumínio de 1,5mm de espessura conformadas a frio, foi construído para a acomodação dos relés de estado sólido, as telas proporcionam a circulação de ar para o resfriamento, ilustrado na Figura 44 e impedem o contato direto com a fiação elétrica conforme ilustra a Figura 45, sua base foi construída em compensado naval e fixada a plataforma com parafusos auto atarrachantes com cabeça trombeta.



Figura 44 - Invólucro com tela para os SSRs  
Fonte: Do autor (2018).



Figura 45 - Invólucro de tela com tampa para os SSRs  
Fonte: Do autor (2018)

Rodas industriais em PVC com rodízios e travas foram instalados aos 4 pontos de apoio da estrutura para sua locomoção conforme ilustrado na Figura 46



**Figura 46 - Rodas com rodízios**  
Fonte: Do autor (2018)

Uma chapa de alumínio foi instalada na parte frontal da estrutura para a proteção do motor das bombas, ilustrado na Figura 47.



**Figura 47 - Chapa de alumínio para a proteção das bombas**  
Fonte: Do autor (2018)

Vista superior da panela do HLT ilustrado na Figura 48, sendo possível a visualização da serpentina de cobre para a troca de calor com o meio, poço térmico para a inserção do sensor e resistência elétrica.



**Figura 48 - Vista superior da panela HLT**  
Fonte: Do autor (2018)

Vista superior da panela MLT contendo a mangueira de silicone, poço térmico e tela de inox para a recirculação do mosto, ilustrado na Figura 49.



**Figura 49 - Panela HLT**  
Fonte: Do Autor (2018)

Vista superior da panela de fervura (*KETTLE*), contendo a resistência elétrica e poço térmico, visualizado na Figura 50.



**Figura 50 - Panela de fervura Kettle**  
Fonte: Do autor (2018)

De acordo com a norma NBR 13759 foi instalado um dispositivo de parada de emergência desativando as válvulas, bombas e resistências de aquecimento, ilustrado na Figura 51.



**Figura 51 - Botão de parada de emergência**  
Fonte: Do autor (2018)

Diagrama elétrico ilustrativo de montagem do circuito de acionamento fora realizado no software Fritzing apresentado na Figura 52, sendo as válvulas e bombas

representadas por leds. O algoritmo de aquecimento esta representado no fluxograma da Figura 53.

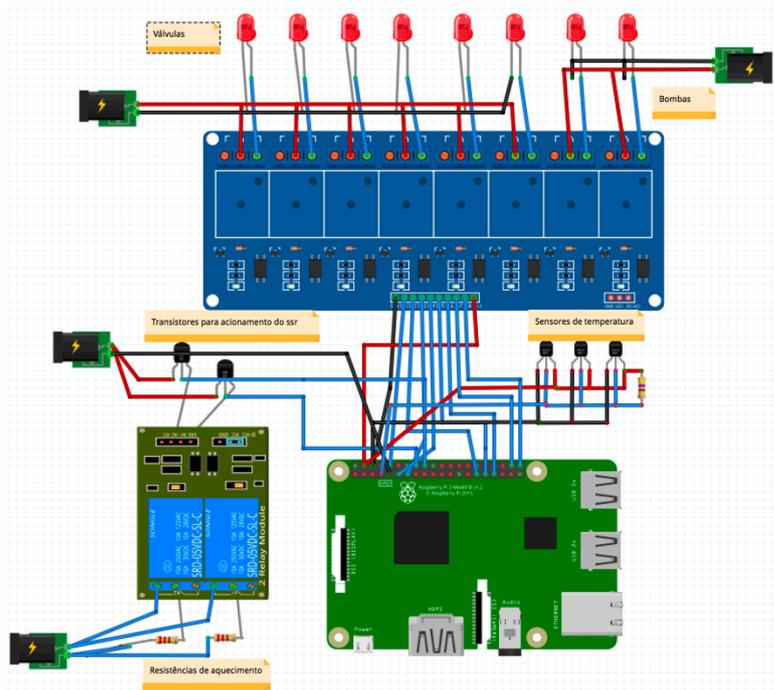


Figura 52 - Diagrama elétrico ilustrativo  
Fonte: Do autor (2018)

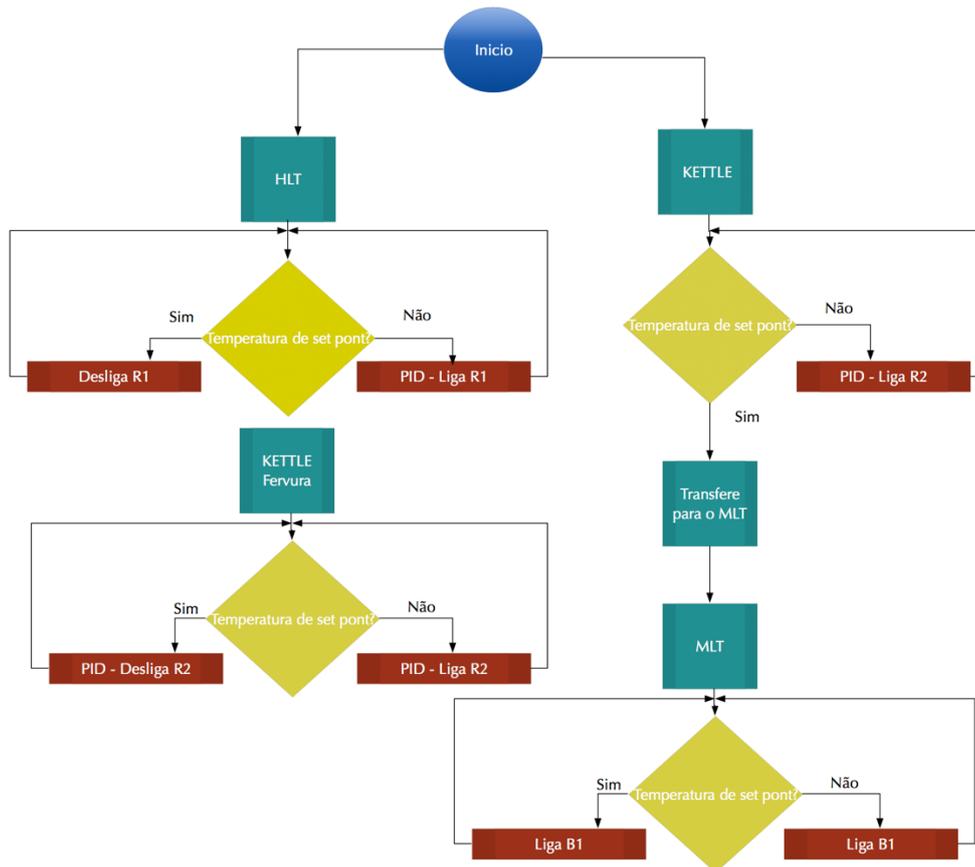
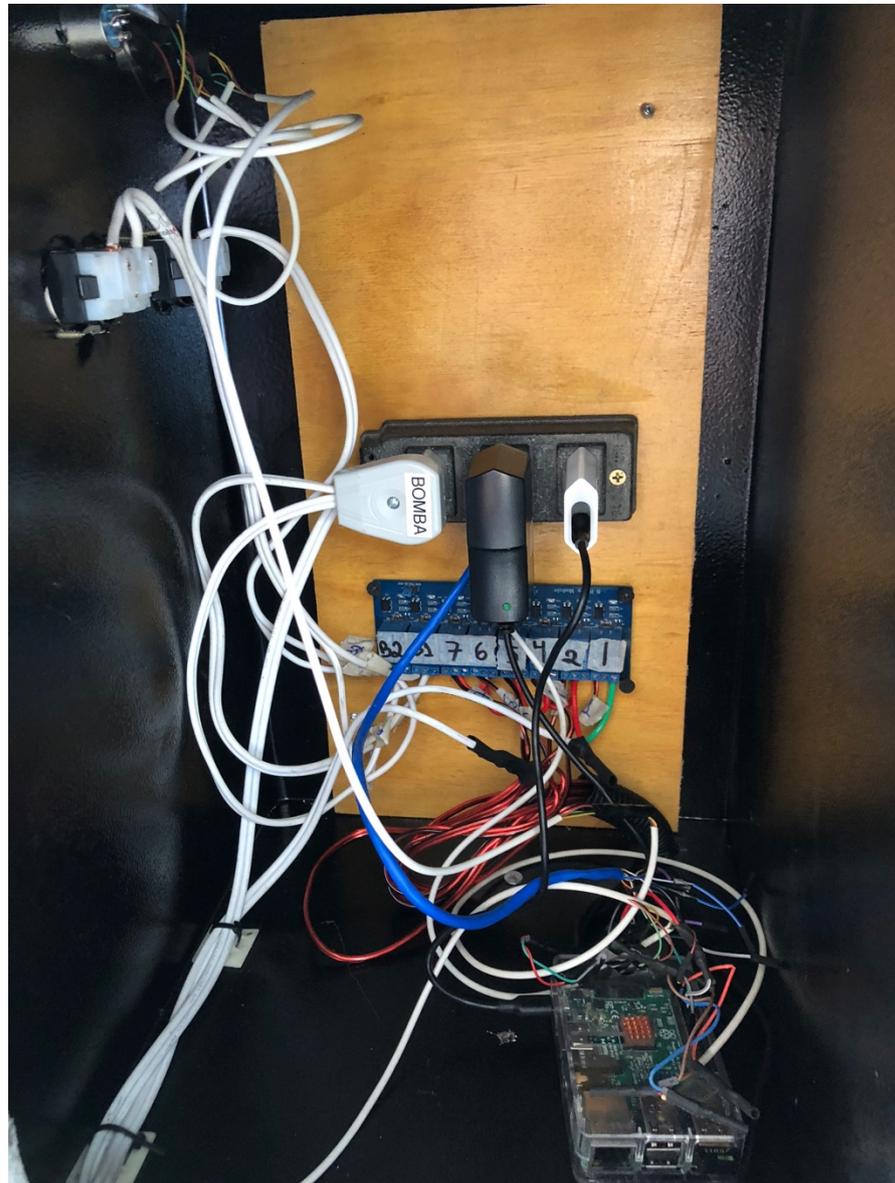


Figura 53 - Fluxograma de algoritmo de aquecimento  
Fonte: Do autor (2018)

As ligações elétricas de acoplamento do banco de relés ao microcontrolador foram dispostas na parte interna da caixa preta, ilustrado na Figura 54, contendo uma barra de tomadas para alimentação.



**Figura 54 - Conexões com o Raspberry pi**  
**Fonte: Do autor (2018)**

## 7 INTERFACE WEB

A implementação de comunicação para os comandos da cervejaria e seus controles, bancos de receitas e etapas sendo realizadas através de *frameworks*, que sintetizam e traduzem a linguagem HTML para Python, proporcionando uma aplicativo web amigável acessado por um endereço de IP determinado pela rede local.

*Bootstrap*, *flask* e *angular JS* são frameworks utilizados para o desenvolvimento e comunicação da interface web com o microcontrolador *raspberrypi* criando uma GUI (Grafical User Interface) com acesso através do endereço de IP da rede em outros dispositivos.

### 7.1 BOOTSTRAP

É uma ferramenta de trabalho gratuita para o desenvolvimento de HTML, CSS e JS de fácil implementação contendo temas prontos com ferramentas inclusas, criando paginas de controle para utilidades diversas.

### 7.2 FLASK

Este é um *microframework*, um webservidor implementado em linguagem Python com o objetivo de criação de aplicativos ele faz a conexão web no microcontrolador proporcionando a interação do usuário, através do endereço `http://<iplocal>:5000#ui#dashboard`, é possível o acesso do aplicativo cervejeiro.

### 7.3 ANGULAR JS

Para acesso as funcionalidades de muitos componentes do bootstrap é necessário uma ferramenta de linguagem java script, essas ferramentas formam os plug-ins de acionamento para a página web, Angular JS é uma ferramenta de código aberto, disponibilizada e mantida pela empresa Google, aquele abstrai a manipulação de objetos e para a representação e interação de documentos HTML, XHTML e XML, cria as diretivas para acesso do bootstrap.

## 8 RESULTADOS E DISCUSÕES

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos após o desenvolvimento do projeto.

### 8.1 PROTÓTIPO

O projeto foi idealizado para atender uma produção de 20 litros de cerveja em espaços reduzidos sendo sua concepção inicial feita em projeto de croqui e posteriormente validado em representação bidimensional ilustrado na Figura 37 sendo sua construção final ilustrada na Figura 55 foi desenvolvida pelo autor devido a sua profissão de metalúrgico, o que reduziu os custos de confecção, atendendo ao planejamento inicial, a disposição linear das válvulas na parte inferior inculuiu em uma boa dinâmica no processo e facilidade para quando houver necessidade de reparos, o leiaute desta configuração foi desenvolvido completamente pelo autor portanto a partir do projeto planejado começaram se os estudos para a adaptação das conexões.



Figura 55 - Projeto final  
Fonte: Do autor (2018).

As bombas alocadas na parte inferior apresentaram bom funcionamento, pois dada as características pontuais das bombas centrífugas de não exercerem sucção o líquido é direcionado por gravidade até a entrada, sem que exista ar nas mangueiras o que evita o funcionamento a vazio e uma possível constricção da tubulação flexível.

## 8.2 INTERFACE COM USUÁRIO

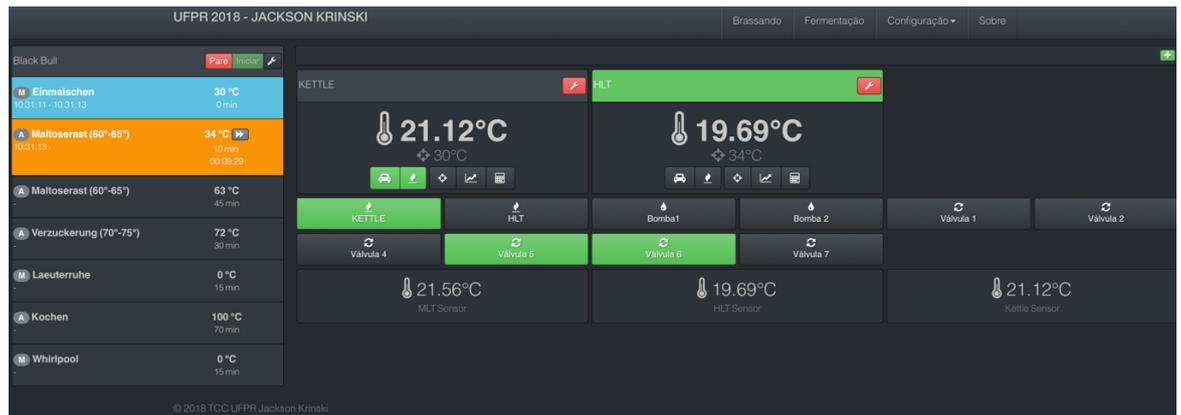
A Figura 56 ilustra o painel de comando que o usuários efetuara os acionamentos para a melhor visualização esta figura foi dividida em parte 1 e 2, visualizado nesta ordem Figura 57 e Figura 58, aquela expõe as etapas a serem efetuadas do processo e o controle da panela Kettle e MLT, esta expões o controle da panela HLT, válvulas e bombas. Os comandos de configuração das etapas são alocados no canto superior com o símbolo de uma chave de boca, o acréscimo de etapas é feito através do botão com o símbolo de soma no canto superior direito.

O menu principal foi disposto em barra horizontal, conforme o template disponível no site do Bootstrap, contendo:

- Brassagem: painel principal de comando.
- Fermentação: projeto futuro.
- Configuração: possui um submenu com a opção:
  - Hardware: adição de componentes como painelas, válvulas, bombas e sensores, ilustrado na Figura 59.
  - Software: mudança do plano de fundo e nome da cervejaria
- Sobre: contato do autor.

O acesso ao menu de receitas é feito através do botão com uma chave de boca ao lado do nome da receita.

As funcionalidades de cada menu são alocadas dentro do quadro de cada bloco de função como padrão nos *templates* do *Bootstrap*.



**Figura 56 - Painel de comando**  
**Fonte: Do autor (2018)**



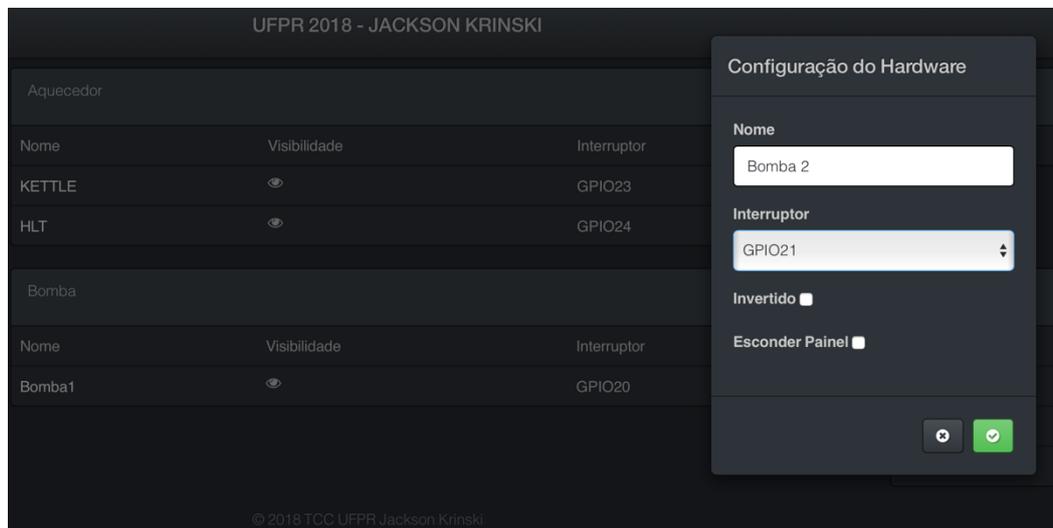
**Figura 57 - Painel de controle Parte 1**  
**Fonte: Do autor (2018)**



**Figura 58 - Painel de controle Parte 2**  
**Fonte: Do autor (2018)**

Dentro do bloco de cada panela existem 5 funcionalidades apresentada em menu com, contendo:

- O símbolo de um veículo é acionado a função drive, na qual a panela é regida com a configuração automática imposta pela receita,
- O símbolo com uma chama representa que a resistência elétrica foi acionada para o aquecimento.
- O símbolo com o alvo é para que o usuário escolha a temperatura fora do processo conduzido pela receita
- O símbolo com um gráfico expões os avanços da temperatura no decorrer do tempo sendo esta funcionalidade importada do site (highcharts.com) porem ela necessita ser melhor implementada pelo autor pois esta funcionando de forma parcial.



**Figura 59 - Configuração de hardware em modo *negatoscópico***  
**Fonte: Do autor (2018)**

O usuário possui uma facilidade de acesso devido a página em HTML com seu controle auto adaptativo possibilitando a utilização em diversas plataformas como mobile ilustrado na Figura 60, computador e tablet ilustrado na Figura 61.



**Figura 60 - Utilização em smartphones**  
Fonte: Do autor (2018).



**Figura 61 - Funcionamento em computadores e tablets**  
Fonte: Do autor (2018).

## 9 CONCLUSÕES

A realização deste trabalho foi uma motivação por parte do autor em conciliar a sua atividade recreativa com sua formação acadêmica devido ao vasto conhecimento do autor sobre o processo de fabricação de cerveja, conhecimento este que lhe rendeu o 3º colocado em 2012 no primeiro concurso de cerveja artesanal da associação de cervejeiros artesanais do estado do Paraná, sendo um projeto pessoal para construção efetiva em 2019 de uma microcervejaria homologada e certificada dentro dos padrões sanitários pelo Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA) na cidade de Quitandinha – PR.

Inicialmente foi feita identificação do sistema e testes no controle da temperatura através de algoritmo PID, posterior as etapas delineadas, começou a ser desenhado um esboço para a transferência dos líquidos, o objetivo era atender a todas as etapas para a concepção do mosto fermentável de cerveja sendo utilizado o mínimo possível de válvulas, que apresentam um alto custo para a compra, sendo de suma importância nesta etapa a utilização dos grafos de Petri do qual foi possível o mapeamento completo do sistema e uma visão macro e micro de todos os processos validando o poder desta ferramenta.

O processo de controle pelo usuário através de uma interface gráfica foi uma tarefa muito árdua devido ao não conhecimento em linguagem de programação Python e HTML e o que reduziu esta dificuldade foi a implementação de templates do bootstrap e suas ferramentas disponíveis gratuitamente e com grande flexibilidade para configurações como os botões sensores e outros frameworks comunicáveis como o servidor web Flask e o executor de rotas AngularJS, munido destas ferramentas também foi possível efetuar a leitura do arquivo de receitas gerado pelo programa BeerSmith, remetendo o projeto a um sistema versátil e com boa aceitação pelos cervejeiros artesanais.

O resultado final foi muito satisfatório, o projeto atendeu a todos os objetivos impostos sendo robusto para a produção de cerveja com uma abordagem única o que levou o autor, como um investimento futuro, a comercializar nanocervejarias para restaurantes, bares e pequenos cervejeiros, o custo total do projeto foi de R\$ 6.985,00 (Seis mil novecentos e oitenta e cinco reais).

## 9.1 TRABALHOS FUTUROS

O projeto se mostrou muito eficiente e de fácil manuseio porem com o intuito de comercializa-lo será necessário efetuar alguns ajustes para que pessoas com pouco conhecimento em eletrônica possam efetuar possíveis reparos no caso do equipamentos apresentar alguma falha e necessitar de assistência, sendo elas:

- Confecção de uma placa eletrônica conectada por fios modelo flat ao banco de reles e plugada unicamente no *raspberry pi*, possibilitando facilmente a substituição do microcontrolador ou do banco de relés e evitando também fios órfãos que venham a se desconectar sendo de difícil descoberta.
- Aumento da largura e altura da estrutura em 10 centímetros, possibilitando a instalação de painéis com o dobro da capacidade útil e ainda mantendo a flexível para a mobilidade da cervejaria por conseguir passar por portas com vão livre de 70 centímetros.
- Desenvolvimento de um aplicativo mobile para o acesso direto do usuários com login e senha sem a necessidade de digitar o numero da rede no navegador.
- Substituição do material da serpentina de cobre e conexões de PVC por aço inoxidável.
- Criação de uma plataforma para que os usuários possam trocar receitas e experiências com o equipamento e suas descobertas na utilização.
- Substituição de painéis de alumínio por painéis de aço inoxidável.

## 10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARNES, Z.C. **Brewing Process Control**. 2004.

BORBA, G. **Microcontroladores**: Disponível em :  
<[http://paginapessoal.utfpr.edu.br/gustavobborba/material/files/mc\\_nocoosGerais.pdf](http://paginapessoal.utfpr.edu.br/gustavobborba/material/files/mc_nocoosGerais.pdf)>, acesso em 10/07/2018.

BRASIL, A. **Hidráulica Básica e Máquinas de fluxo**. Disponível em: <  
<http://www.alexbrasil.com.br/upload/51a0bcc7437fce368e92a7c952d32204.pdf>,> acesso em 01/05/2018.

CERVBRASIL. Disponível em:  
<[http://www.cervbrasil.org.br/arquivos/ANUARIO\\_CB\\_2015\\_WEB.pdf](http://www.cervbrasil.org.br/arquivos/ANUARIO_CB_2015_WEB.pdf),> acesso em 21/06/2018.

DECRETO Nº 6.871. Disponível em:  
<[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/ato2007-2010/2009/decreto/d6871.html](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2009/decreto/d6871.html),> acesso em 26/06/2018.

FREITAS, C.M. **Controle PID em Sistemas Embarcados**. Disponível em:  
<<https://www.embarcados.com.br/controle-pid-em-sistemas-embarcados/>,> acesso em 01/06/2018.

HISTÓRIA DA CERVEJA. Disponível em:<<http://gizmodo.uol.com.br/uma-breve-historia-da-cerveja/>,> acesso em 20/08/2018.

HUGO, V. **Processo de produção de cerveja**. Disponível em:  
<<http://www.engenhariadacerveja.com.br/2013/processo-de-producao-de-cerveja/>,> acesso em 06/07/2018.

MARRANGHELLO, N. **Redes de Petri: Conceitos e Aplicações**. Disponível em :< <https://www.dcce.ibilce.unesp.br/~norian/cursos/mds/ApostilaRdP-CA.pdf> >, acesso em 10/06/2018.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. São Paulo: Pearson, 2010.

PALMER, J.J. **How to Brew**. EUA: Natl Book Network, 2006.

RASHID, M.H. **Eletrônica de Potência, Circuitos, Dispositivos e Aplicações**. São Paulo: Pearson, 1999.

SANTOS, S.L. **Bombas e Instalações Hidráulicas**. São Paulo: LCTE, 2007

SEBRAE. **Microcervejarias**. Disponível em :  
<[http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS\\_CHRONUS/bds/bd](http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bd)

[s.nsf/8818d2954be64fcda8628defef1f70f8/\\$File/7503.pdf](https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/S8818d2954be64fcda8628defef1f70f8/7503.pdf),> acesso em 10/06/2018.

SINDICERV. Disponível em:< <http://www.sindicerv.com.br/acerveja.php>,> acesso em 20/08/2018.

TSCHOPE, E.C. **Microcervejarias e Cervejarias**. São Paulo:Aden, 2001.

BOOTSTRAP. Disponível em: < <http://getbootstrap.com/2.3.2/index.html> > acesso em 14/09/2018

BOOTSTRAP TUTORIAL. Disponível em:  
<[https://www.w3schools.com/bootstrap/bootstrap\\_buttons.asp](https://www.w3schools.com/bootstrap/bootstrap_buttons.asp) > acesso em 15/09/2018

XML TUTORIAL. Disponível em:  
<[https://www.w3schools.com/xml/xml\\_usedfor.asp](https://www.w3schools.com/xml/xml_usedfor.asp) >, acesso em 15/09/2018.

ANGULAR JS TUTORIAL. Disponível em: <  
<https://www.w3schools.com/angular/default.asp> >, acesso em 15/09/2018.

GUIMARÃES, O. José. Redes de Petri. UFSCar. 2009.

WLADIMIR DE ANDRADE GUERRA: Implementação de Controle Proporcional, Integral e Derivativo em Controladores Lógicos Programáveis, 2009.

GUIMARÃES, V. A.; CANZIANI, J. F. “Dicas” para elaboração de monografia. Curso de pós-graduação em agronegócio. Universidade Federal do Paraná Departamento de Economia Rural e Extensão, 2003

DATASHEET FOTEK SSR 40A: Disponível em <<http://alldatasheet.com>>, acesso em 16/08/2018.

COELHO, S. Leandro. Identificação de sistemas lineares dinâmicos. Florianópolis, Editora da UFSC, 2004

RASPBERRYPI. Disponível em: < <https://www.raspberrypi.org> >, acesso em 14/07/2018.