

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MÁQUINA PARA PRODUÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL

ARNALDO SUGUI FILHO
EDUARDO NAPOLITANO FERNANDES

SÃO PAULO
2017

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MÁQUINA PARA PRODUÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Mecânica
da Escola Politécnica da USP para obtenção
do título de Graduação em Engenharia
Mecânica.

Arnaldo Sugui Filho
Eduardo Napolitano Fernandes

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Massarani

SÃO PAULO
2017

Catálogo-na-publicação

Filho, Arnaldo

Máquina para a Produção de Cerveja Artesanal / A. Filho, E. Fernandes -
São Paulo, 2017.
123 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Cerveja Artesanal 2.Máquina de Cerveja 3.Automação do Processo de
Fabricação de Cerveja Artesanal I.Universidade de São Paulo. Escola
Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t. III.Fernandes, Eduardo

AGRADECIMENTOS

Agradeço e dedico este trabalho aos meus pais, Eduardo e Rosangela e a minha irmã, Mariana, por todo o apoio e compreensão durante o período da graduação.

Eduardo Napolitano Fernandes

Dedico este trabalho a minha família, a qual sou grato por todo apoio e sacrifício.

Arnaldo Sugui Filho

RESUMO

Projeto de uma máquina para fabricação de cerveja artesanal, com capacidade de produção abaixo de 20 litros. O equipamento será capaz de automatizar os processos de brassagem, clarificação e fervura, através de controles de temperatura e sistemas hidráulicos comandados por um micro controlador. O objetivo principal é tornar mais atrativa e prática a produção de cerveja artesanal, demandando menor esforço e tempo do usuário. Para tanto, o projeto tem caráter inovador quanto à forma construtiva da máquina: somente um recipiente será utilizado para os processos de brassagem, clarificação e fervura, e não será necessária a intervenção do usuário do início ao fim dessas etapas.

ABSTRACT

Project of machine that crafts beer, with capacity below 20 liters. The equipment will be able to automate the processes of Mashing, Lautering and Boiling, through temperature controls and hydraulic systems, both controlled by a microcontroller. The main goal is to make more attractive and handy the craft of beer at home, consuming less time and effort from producers. To achieve that, the project aim innovations for the construction of the machine: only one recipient will be used for the processes of Mashing, Lautering and Boiling, and it will not require the intervention of the producer from the beginning until the end of production.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Evidências de Produção de Cerveja na Antiguidade	15
Figura 2 - Cerveja na Idade Média	16
Figura 3 - Cerveja Beck's	17
Figura 4 - Influência da cor do malte na cor da cerveja.....	18
Figura 5 - Temperatura e pH ótimos para as enzimas	20
Figura 6 - Dispositivo Air Lock	22
Figura 7 - Picobrew Zymatic	25
Figura 8 - Máquina Masterbier®	25
Figura 9 - Representação Esquemática da Solução	28
Figura 10 - Preparação	29
Figura 11 - Montagem	30
Figura 12 - Aquecimento	30
Figura 13 - Brassagem e Clarificação	31
Figura 14 - Fervura.....	32
Figura 15 - Resfriamento.....	33
Figura 16 - Volumes de Controle Estudados.....	37
Figura 17 - Modelagem Térmica - Trocas de Calor.....	40
Figura 18 - Parâmetros Geométricos Utilizados no Cálculo das Trocas de Calor	41
Figura 19 - Resistência Térmica.....	45
Figura 20 - Diagrama de Blocos para o Subsistema Térmico - Simulink	52
Figura 21 - Temperatura do Mosto x Tempo.....	53
Figura 22 - Taxa de Variação da Temperatura do Mosto x Tempo	54
Figura 23 - Arduino UNO.....	55
Figura 24 - Sensor de Temperatura DS18B20	55
Figura 25 - Resisitências Elétricas	56
Figura 26 - Shield LCD para Arduino com Teclado Acoplado	57
Figura 27 - Solução para o Sistema Hidráulico	58
Figura 28 - Esquema Utilizado para o Dimensionamento da Bomba	60
Figura 29 - Circuito de Controle	65
Figura 30 - Visualização do LCD – Temperatura	67

Figura 31 - Visualização do LCD - Temporizador.....	67
Figura 32 - Visualização do LCD - Status da Bomba	68
Figura 33 - Painel de Controle.....	69
Figura 34 - Soldagem dos Tubos	70
Figura 35 - Soldagem da Base da Máquina	71
Figura 36 - Soldagem dos Tubos na Base	71
Figura 37 - Posicionamento dos Tubos para Solda.....	72
Figura 38 - Vista Diagonal do Primeiro Protótipo	72
Figura 39 - Vista Inferior do Protótipo.....	73
Figura 40 - Vista Superior do Protótipo	73
Figura 41 - Vista Frontal do Protótipo.....	74
Figura 42 - Bomba Alimentícia	75
Figura 43 - Tela de Aço Inox	75
Figura 44 - Montagem I	76
Figura 45 - Montagem II	76
Figura 46 - Moagem dos Grãos.....	77
Figura 47 - Posicionamento dos Grãos	77
Figura 48 - Posicionamento do Copo no Interior da Máquina	78
Figura 49 - Preenchimento do Volume Externo com Água	78
Figura 50 - Acionamento da Bomba e das Resistências I.....	79
Figura 51 - Acionamento da Bomba e das Resistências II.....	79
Figura 52 - Preenchimento do <i>Chiller</i>	80
Figura 53 - Retirada da Tela Metálica	81
Figura 54 - Protótipo Montado I.....	82
Figura 55 - Protótipo Montado II.....	82
Figura 56 - Protótipo Montado III.....	83
Figura 57 - Protótipo Montado IV	83
Figura 58 - Vista Superior do Protótipo Montado	84
Figura 59 - Painel de Controle Instalado	84
Figura 60 - Tela Metálica e Tampa.....	85
Figura 61 - Teste de lodo e de Clarificação	88
Figura 62 - Construção da Tela Metálica	89
Figura 63 - Representação Esquemática da Solução	111
Figura 64 - Montagem	112

Figura 65 - Aquecimento	113
Figura 66 - Brassagem e Clarificação	114
Figura 67 - Fervura.....	115
Figura 68 - Resfriamento.....	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Componentes do Subsistema Térmico	36
Tabela 2 - Temperaturas de Operação	49
Tabela 3 - Propriedades Termofísicas	49
Tabela 4 - Parâmetros.....	50
Tabela 5 - Propriedades dos Volumes de Controle.....	50
Tabela 6 - Parâmetros do Modelo Hidráulico	63
Tabela 7 - Componentes do Subsistema Elétrico	64

LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{S\ Grão}$	Área superficial de troca de calor por convecção natural de $\forall C_{Grão}$.
$A_{S\ Mosto}$	Área superficial de troca de calor por convecção natural de $\forall C_{Mosto}$.
c_{Ar}	Calor específico do ar na temperatura média.
$c_{Grão}$	Calor específico do grão na temperatura média.
c_{Mosto}	Calor específico do mosto na temperatura média.
d_1	Diâmetro do $\forall C_{Grão}$.
d_2	Diâmetro do compartimento do mosto
d_3	Diâmetro do compartimento mais externo da máquina.
E_{Ar}	Energia do $\forall C_{Ar}$.
$E_{Grão}$	Energia do $\forall C_{Grão}$.
E_{Mosto}	Energia do $\forall C_{Mosto}$.
e	Espessura da parede da máquina.
g	Aceleração da gravidade.
H	Altura da máquina e dos volumes de controle.
$\overline{h_{Grão}}$	Coeficiente convectivo médio do grão para convecção natural.
$\overline{h_{Lateral}}$	Coeficiente convectivo médio para convecção natural lateral.
$\overline{h_{Mosto}}$	Coeficiente convectivo médio do mosto para convecção natural.
k	Condutividade térmica do ar na temperatura de filme.
k_{Inox}	Condutividade térmica do Aço Inox na temperatura média.
$L_{Grão}$	Comprimento característico da superfície do grão para convecção.
L_{Mosto}	Comprimento característico da superfície do mosto para convecção.
m_{Ar}	Massa de ar da câmara de resfriamento.
$m_{Grão}$	Massa dos grãos de malte.
m_{Mosto}	Massa do mosto.
$\overline{Nu_{Grão}}$	Número de Nusselt médio para convecção natural dos grãos.
$\overline{Nu_{Lateral}}$	Número de Nusselt médio para convecção natural lateral.
$\overline{Nu_{Mosto}}$	Número de Nusselt médio para convecção natural do mosto.
$P_{Grão}$	Perímetro da superfície de troca por convecção dos grãos.
P_{Mosto}	Perímetro da superfície de troca por convecção do mosto.

Pr	Número de Prandtl do ar.
\dot{q}_{Ar}	Transferência de calor entre ΨC_{Mosto} e ΨC_{Ar} .
$\dot{q}_{Conv,nat\ grão}$	Transferência de calor por convecção natural sofrida por $\Psi C_{Grão}$.
$\dot{q}_{Conv,nat\ mosto}$	Transferência de calor por convecção natural sofrida por ΨC_{Mosto} .
$\dot{q}_{Grão}$	Transferência de calor entre ΨC_{Mosto} e $\Psi C_{Grão}$.
$\dot{q}_{Lateral}$	Transferência de calor por condução e convecção sofrida por ΨC_{Ar} .
\dot{q}_P	Potência fornecida pela resistência elétrica.
r_1	Raio do $\Psi C_{Grão}$.
r_2	Raio do compartimento do mosto
r_3	Raio do compartimento mais externo da máquina.
$Ra_{L\ Grão}$	Número de Rayleigh para a convecção natural dos grãos.
$Ra_{L\ Lateral}$	Número de Rayleigh para a convecção natural lateral.
$Ra_{L\ Mosto}$	Número de Rayleigh para a convecção natural do mosto.
R_{Cond}	Resistência térmica devida a condução.
$R_{Conv,nat}$	Resistência térmica devida a convecção natural.
R_{Total}	Resistência térmica total.
\bar{T}	Temperatura média de operação.
T_E^*	Temperatura máxima possível da superfície externa da máquina.
$T_{Grão}^*$	Temperatura máxima possível dos grãos.
T_{Mosto}^*	Temperatura máxima possível do mosto.
T_f	Temperatura de filme.
$T_{Ar}(t)$	Temperatura do ar na câmara de resfriamento.
$T_E(t)$	Temperatura da superfície externa.
$T_{Grão}(t)$	Temperatura dos grãos.
$T_{Mosto}(t)$	Temperatura do mosto.
V_1	Volume que conterá o malte.
V_2	Volume que conterá o mosto e a água inicial.
$V_{Grão}$	Volume de grãos de malte.
$V_{Água\ inicial}$	Volume de água inicial.
ΨC_{Ar}	Volume de controle do ar.
$\Psi C_{Grão}$	Volume de controle do grão.
ΨC_{Mosto}	Volume de controle do mosto.
α	Taxa de difusão térmica do ar.

β	Coeficiente de expansão térmica.
ν	Taxa de difusão viscosa do ar.
ρ_{Ar}	Massa específica do ar na câmara de resfriamento (em \bar{T}).
$\rho_{Grão}$	Massa específica dos grãos.
ρ_{Mosto}	Massa específica do mosto.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	HISTÓRIA DA CERVEJA	15
1.2	O PROCESSO DE FABRICAÇÃO	17
1.2.1	Malteação dos Grãos.....	18
1.2.2	Moagem dos Grãos	18
1.2.3	Brassagem	19
1.2.4	Recirculação ou Clarificação	20
1.2.5	Fervura	21
1.2.6	Resfriamento	21
1.2.7	Fermentação.....	21
1.2.8	Envase.....	22
1.3	SANITIZAÇÃO.....	22
1.4	EQUIPAMENTOS PRESENTES NO MERCADO ATUAL.....	23
2	OBJETIVO.....	26
3	METODOLOGIA DO PROJETO	27
3.1	DESCRIÇÃO DA SOLUÇÃO ENCONTRADA	28
3.2	DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA FÍSICA.....	33
3.2.1	Cálculos para o Dimensionamento da Estrutura Física	34
3.3	SUBSISTEMAS	35
3.4.1	Modelagem Térmica	36
3.4.2	Dimensionamento dos Componentes.....	48
3.4.3	Controle Térmico	54
3.5	SUBSISTEMA HIDRÁULICO (BOMBAS E VÁLVULAS)	57
3.5.1	Projeto do Sistema Hidráulico	58
3.5.2	Dimensionamento da Bomba	59
3.6	SUBSISTEMA ELÉTRICO.....	63
3.6.1	Componentes do Subsistema Elétrico	64
3.6.2	Sistema de Controle	64
3.6.3	Painel de Controle	69
4	RESULTADOS	70
4.1	PROTÓTIPO	70
4.2	DESENHOS TÉCNICOS.....	86
5	ANÁLISES.....	87

5.1	PROTÓTIPO	87
5.2	DESENHOS TÉCNICOS.....	88
5.3	SISTEMA DE CONTROLE	89
5.4	SUGESTÕES DE MELHORIAS E OTIMIZAÇÕES	89
6	CONCLUSÃO.....	92
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	94
	ANEXO A.....	96
	ANEXO B.....	98
	ANEXO C.....	99
	ANEXO D.....	102
	ANEXO E.....	111
	ANEXO F.....	117
	ANEXO G.....	118
	ANEXO H.....	119
	ANEXO I.....	120
	ANEXO J.....	121
	ANEXO K.....	122
	ANEXO L.....	123
	ANEXO M.....	124
	ANEXO N.....	125

1 INTRODUÇÃO

1.1 HISTÓRIA DA CERVEJA

O surgimento das primeiras bebidas precursoras da cerveja, de que se tem informações, data de cerca de 9.000 a.C. [1]. Nessa época, o conhecimento a respeito da fermentação era escasso, ocorrendo de forma espontânea por meio de micro-organismos presentes no ar, os grãos utilizados eram outros e mesmo o lúpulo, não era utilizado, dando espaço para especiarias e temperos da época.

Constata-se a presença da cerveja em grande parte dos povos da Antiguidade, como egípcios, mesopotâmios, gregos, romanos etc. Dentre eles, o de maior destaque e com provas arqueológicas mais concretas a respeito da produção de cerveja é proveniente da Mesopotâmia, mas especificamente da Suméria. Foram encontradas inscrições em uma pedra suméria, relativas a um cereal que se utilizava em algo similar a produção de cerveja, além de uma placa de barro onde se vêem duas figuras que bebem possivelmente cerveja de um pote, utilizando para isso longas palhas, tradicionalmente usada para aspirar o líquido e evitar a ingestão de resíduos de cereal. A Figura 1 mostra algumas referências à produção de cerveja na Antiguidade [2].



Figura 1- Evidências de Produção de Cerveja na Antiguidade [2]

Ao longo dos anos a produção de cerveja deixou de ser uma atividade familiar e ganhou o comércio e a economia da época ao passo que foi se expandindo para outros locais como a Europa, por exemplo. Nessa época, o

grande avanço nas técnicas de produção se devem, principalmente, a atuação dos mosteiros, locais onde a cerveja era produzida e vendida. Mesmo com a expansão do comércio da cerveja, ainda se manteve o hábito da produção caseira, tarefa dada, majoritariamente, às mulheres.

Em certas localizações a cerveja chegou a ser mais popular que água, já que na época as práticas sanitárias eram muito escassas, o que tornava o consumo da cerveja realmente mais seguro, devido ao seu processo apresentar uma etapa de fervura. A Figura 2 mostra uma taverna na qual viajantes consomem cerveja [2].

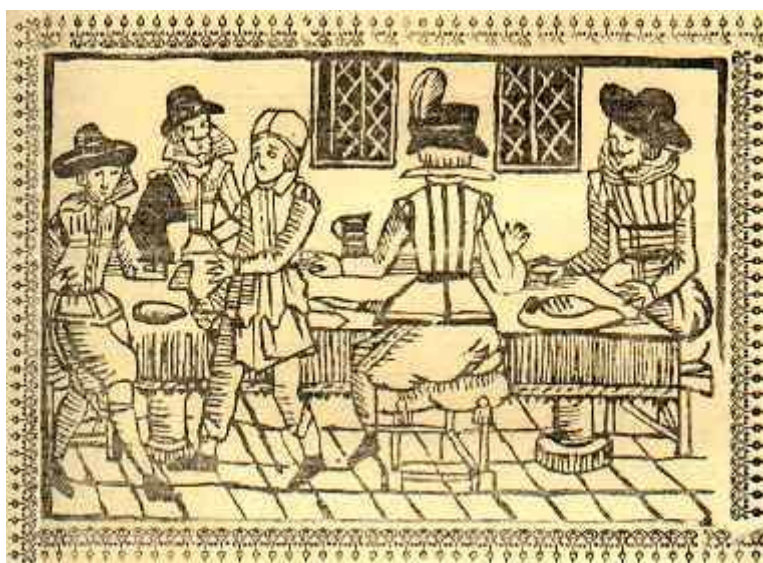


Figura 2 - Cerveja na Idade Média [2]

Até meados do fim da Idade Média a cerveja distinguia-se entre si devido ao emprego de aromatizantes distintos. Já no século VIII o lúpulo passa a dar sinais de existência na Alemanha e em aproximadamente no século XIV o imperador da Alemanha adota um novo método legal de brassagem, com recurso ao lúpulo, tornando esse componente amplamente utilizado na produção de cervejas. Em 1516 a Baviera na Alemanha, adota a Lei da Pureza (*Reinheitsgebot*), que tornou ilegal o uso de outros ingredientes que não fossem água, cevada e lúpulo no fabrico de cerveja (na época não se conhecia com clareza a função da levedura). Nessa época o crescimento das exportações tornou famosas, cidades alemãs como Bremen, Hamburgo, Braunschweig e Einbeck, grandes centros de produção de cerveja. Deste período, destacam-se

a criação de grandes marcas como a Beck's (1553) mostrada na Figura 3, Spaten-Franziskaner-Brau (1397) e Hacker-Pschorr-Brau (1417) que são produzidas até hoje [2].



Figura 3 - Cerveja Beck's [2]

Uma grande melhoria técnica para o processo de produção de cerveja foi o avanço tecnológico relacionado ao isolamento da primeira cultura de leveduras, em 1883 [3]. Esse acontecimento permitiu melhor controle da fermentação e maior prevenção contra contaminações e mutações genéticas indesejáveis, o que era muito comum nas cervejas desenvolvidas até então.

Com esse e outros avanços tecnológicos a produção de cerveja alcançou a escala industrial até o início do século XX. Entretanto, em 1918, nos Estados Unidos, entrou em vigor a Lei Seca, que durou até 1933, proibindo o consumo e a produção de bebidas alcóolicas por todo o território deste país [2].

Atualmente, a produção de cerveja artesanal tem crescido e se tornado cada vez mais popular, sendo encarada como um hobby entre os amantes dessa prática.

1.2 O PROCESSO DE FABRICAÇÃO

O processo de fabricação de cervejas artesanais abrange, independente da receita, basicamente as seguintes etapas: malteação dos grãos, moagem do

malte, brassagem, recirculação ou clarificação, fervura, resfriamento, fermentação e envase [4]. Os processos serão melhor detalhados nos subtópicos que seguem.

1.2.1 MALTEAÇÃO DOS GRÃOS

A etapa de malteação consiste na germinação dos grãos dos cereais. Para isso, estes são umedecidos e quando o processo de germinação se inicia, os grãos são secos e torrados.

Este processo define a diferenciação de um tipo de malte para outro com relação ao sabor, ao aroma e, principalmente, a cor da cerveja. No caso, um malte mais torrado deixará a cerveja mais escura, enquanto que um malte menos torrado deixará a cerveja mais clara. A Figura 4 mostra essa diferenciação.



Figura 4 - Influência da cor do malte na cor da cerveja [4]

1.2.2 MOAGEM DOS GRÃOS

A moagem dos grãos deve ser feita de modo que a casca do malte seja quebrada liberando o endosperma e o grão em seu interior seja partido. Entretanto, deve-se ter cautela durante este processo, pois se a moagem for muito fina (grãos muito moídos), pode-se encontrar problemas durante o processo de brassagem e filtração, e se a moagem for muito grossa (grãos pouco moídos), obtêm-se um baixo rendimento durante o processo, reduzindo a produção de cerveja por kg de malte utilizado.

1.2.3 BRASSAGEM

O processo de brassagem consiste em tornar os açúcares não fermentáveis presentes nos grãos de malte (já abertos) em açúcares fermentáveis. O amido presente no malte é composto por diversas moléculas de diversos tipos de açúcares arranjados de formas diferentes. Na produção de cerveja, trabalha-se basicamente com as enzimas Beta Amilase e Alfa Amilase. Essas enzimas, quando ativas, são responsáveis por quebrar as ligações das moléculas de carboidratos que formam o amido, transformando-o em moléculas de sacarídeos (açúcares) [5].

A Beta Amilase e a Alfa Amilase agem sobre as ligações 1-4 (quando duas moléculas de glicose se ligam pelo 1º e 4º átomos de carbono) das moléculas de amido e de carboidrato presentes no malte. Já as ligações 1-6 são quebradas pelas enzimas carboidrases (*limit dextrinase*), formadas na etapa de malteação.

A partir disso, é relevante saber para o processo de brassagem, que para cada uma dessas enzimas existem temperaturas e índices de pH que favorecem sua atuação. A Figura 5 mostra as condições ótimas de temperatura e pH que favorecem a atuação das enzimas citadas.

Observa-se na figura três regiões bem definidas:

- 60°C à 65°C: as três enzimas são ativas;
- 65°C à 67°C: somente Alfa e Carboidrase são ativas;
- 68°C à 70°C: somente Alfa está ativa.

Desse modo, para se obter uma cerveja mais leve (um mosto mais fermentável), deve-se manter a temperatura entre 60 e 65°C, tomando cuidado para a temperatura não passar dos 65°C, o que desnaturaria a enzima Beta Amilase. Já para uma cerveja um pouco mais encorpada, deve-se manter a temperatura entre 65 e 67°C. E por fim, para se obter uma cerveja bastante encorpada (mosto pouco fermentável), mantém-se a temperatura acima de 67°C.

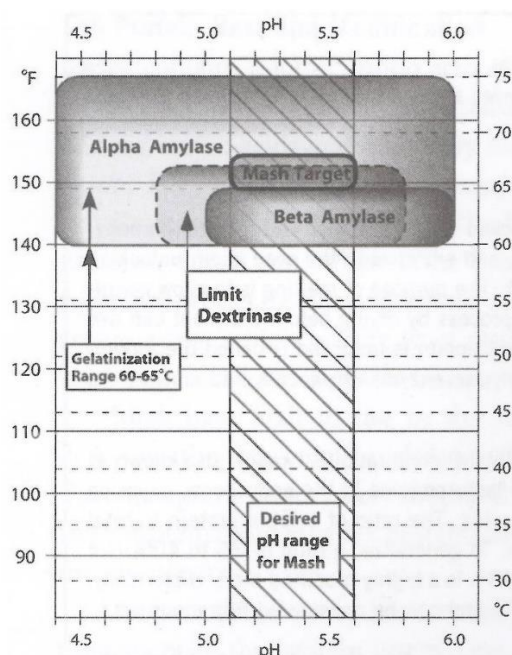


Figura 5 - Temperatura e pH ótimos para as enzimas [5]

Dessa forma, a etapa de brassagem consiste em aquecer a água juntamente com o malte até uma determinada temperatura, mantendo-se a mistura nesta temperatura até que ocorra toda a transformação dos amidos em açúcares. Vale ressaltar, que para cada receita podem haver diferentes degraus de temperatura, tornando a cerveja mais ou menos encorpada [6].

1.2.4 RECIRCULAÇÃO OU CLARIFICAÇÃO

Esta etapa consiste na circulação do mosto (água cervejeira formada pela mistura do malte com a água), tirando-o do fundo do recipiente e fazendo-o passar novamente pelas cascas de malte presentes na mistura.

Durante esse processo as cascas de malte retêm as impurezas presentes no mosto, funcionando como um filtro, daí a importância de não se triturar muito o malte durante o processo de moagem. Além disso, a recirculação do mosto ajuda a extrair açúcares que ainda não foram extraídos da mistura.

Nesta etapa também pode ser realizado a “lavagem do mosto”, ou seja, passagem de apenas água pelas cascas do malte extraíndo mais açúcares presos nos grãos [5].

1.2.5 FERVURA

Após a recirculação do mosto, este é separado das cascas do malte e é fervido. Durante este processo ocorre a evaporação de substâncias indesejadas e além disso, elimina-se qualquer bactéria ou micro-organismo que possa estar presente na cerveja.

Durante esta etapa ocorre a adição do lúpulo, que serve para conferir o amargor da cerveja e também conservá-la naturalmente. Cada receita leva um tipo e quantidade diferente de lúpulo.

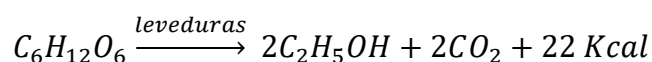
1.2.6 RESFRIAMENTO

Nesta etapa do processo o mosto deve ser resfriado até a temperatura de inoculação das leveduras, temperatura na qual se deve adicionar o fermento ao mosto. No caso da produção de cervejas temos como fermento, principalmente, as leveduras [7]. Essa temperatura varia de acordo com o tipo de cerveja que se está produzindo e com a receita que se está se utilizando.

O que de fato é relevante nesta etapa do processo é a velocidade com que se atinge essa temperatura. Deve-se resfriar o mosto rapidamente de modo a evitar que ele fique em contato com o ambiente por muito tempo, com o intuito de diminuir o risco de contaminá-lo. Dessa forma, utiliza-se, geralmente, nos processos de fabricação de cervejas artesanais *chillers* ou serpentinas de resfriamento de modo a garantir uma maior troca de calor e, conseqüentemente, menor tempo de resfriamento [5].

1.2.7 FERMENTAÇÃO

Após o resfriamento, o mosto é inserido em um recipiente fermentador e a levedura é adequadamente inoculada. A levedura irá consumir os açúcares, produzindo gás carbônico (CO_2) e etanol (C_2H_6O) de acordo com a seguinte reação [8]:



O processo de fermentação é anaeróbico, portanto o recipiente fermentador deve ser fechado. Entretanto, como o processo produz gás carbônico, para evitar problemas com o aumento de pressão, utiliza-se um recurso denominado *air lock*, que permite que os gases em excesso sejam expelidos do recipiente de fermentação ao mesmo tempo que impede que as bactérias e micro-organismos presentes no ar entrem em contato com a cerveja. A Figura 6 mostra um tipo de *air lock* [5].



Figura 6 - Dispositivo Air Lock [5]

O processo de fermentação pode levar aproximadamente de 7 a 20 dias dependendo da receita utilizada.

1.2.8 ENVASE

Após a cerveja ser fermentada ocorre o envase. Tal etapa consiste no armazenamento da cerveja, o que pode ser feito em latas, barris ou garrafas de vidro, sendo este recipiente o mais comumente utilizado para cervejas artesanais.

1.3 SANITIZAÇÃO

A sanitização dos equipamentos durante o processo de fabricação de cerveja é um dever do fabricante. Deve-se atentar à diferença entre limpeza e sanitização. Entende-se por limpeza, a retirada de impurezas e sujeiras à escala macroscópica, o que pode ser feito por meio de uma lavagem com água e sabão.

Entretanto, a sanitização leva em conta a descontaminação na escala microscópica, tendo como objetivo a redução da quantidade de bactérias e outros contaminantes à níveis insignificantes. Existem diversas formas de sanitizar os equipamentos, os mais comuns são:

- Sanitização por Cloro: A utilização de cloro como substância sanitizante é um dos métodos de menor complexidade. Isso se deve ao fato de o cloro ser facilmente encontrado e adquirido. Embora o cloro apresente um poder bactericida excelente, pode causar corrosão e escurecimento de alguns metais e, conseqüentemente, a danificação dos equipamentos a logo prazo.
- Calor: Temperaturas elevadas são capazes de eliminar a vida microbótica. Dessa forma, este método pode ser utilizado sempre que conveniente, como por exemplo, na esterilização de pequenos equipamentos como colheres, *air locks*, vasilhas etc.
- Ácido Peracético: O ácido peracético é uma das substâncias mais utilizadas como sanitizante no processo de produção de cerveja pelos produtores mais experientes. Essa substância, dependendo da concentração, não necessita ser enxaguada, o que facilita bastante o processo.

Dessa forma, deve-se atentar para que todo equipamento que entrar em contato com o mosto após a etapa de fervura, ou seja, na etapa fria do processo, deve estar devidamente sanitizado para evitar que toda a produção seja perdida por contaminação de bactérias ou leveduras indesejadas [9].

1.4 EQUIPAMENTOS PRESENTES NO MERCADO ATUAL

Após a familiarização com as etapas necessárias para a fabricação da cerveja artesanal, torna-se necessário conhecer os equipamentos que atualmente são utilizados, para que então se defina a melhor solução para construção da máquina.

O que mais difere a construção de cada equipamento é a quantidade de recipientes utilizados. Serão apresentadas a seguir algumas das formas construtivas encontradas nos equipamentos presentes no mercado atual, classificadas quanto a esta característica:

- **Três Recipientes:** Os processos de brassagem e clarificação são feitos no mesmo recipiente, sendo que a fervura e a fermentação são realizadas em reservatórios diferentes. A construção é geralmente mais simples, porém demanda mais espaço.
Neste tipo equipamento é possível utilizar uma fonte de calor (mais barata, porém requer mais intervenção do usuário), ou duas fontes de calor.
- **Dois Recipientes:** Os processos de brassagem, clarificação e fervura são realizados no mesmo lugar, mas é necessário que, depois da clarificação, o usuário retire os grãos e faça a limpeza do reservatório antes de prosseguir com a fervura. O segundo recipiente é utilizado para armazenar o mosto enquanto o primeiro é lavado, e posteriormente, é usado no processo de fermentação. É feito de forma mais simples requerendo maior intervenção do usuário. Necessita de apenas uma fonte de calor.

Existem também outras formas de construção, próprias de alguns fabricantes e que merecem ser citadas:

- **Picobrew[®]:** Mostrada na Figura 7, a Picobrew talvez seja a máquina mais automática do mercado. Necessita de apenas 2 recipientes e permite várias configurações e receitas.



Figura 7 - Picobrew Zymatic [10]

- Braumeister[®], Mec Bier Hobby[®] e Masterbier 50[®]: As três utilizam uma técnica similar, na qual é utilizado um recipiente contido dentro do outro, e nessa configuração são realizadas as etapas de brassagem, clarificação e fervura. O processo é interessante, pois demanda pouco espaço, porém torna-se necessária a intervenção do usuário na realização de algumas dessas etapas, como, por exemplo, a retirada dos grãos após o processo de brassagem. A Figura 8 mostra um modelo da máquina Masterbier[®]



Figura 8 - Máquina Masterbier[®] [11]

2 OBJETIVO

O objetivo do projeto é a construção de um protótipo de máquina para produção de cerveja artesanal, que seja capaz de produzir até 20 litros de cerveja, abrangendo diferentes tipos de receitas. O intuito principal é a automação das etapas de brassagem, clarificação e fervura do mosto por meio de um micro controlador capaz de gerenciar os subsistemas envolvidos no processo.

3 METODOLOGIA DO PROJETO

O conceito de *Design Thinking* é atualmente muito forte entre inovadores e criadores de produtos, sendo utilizado por praticamente todas as empresas *Start up* do mercado. O principal motivo para esse sucesso é a abordagem com a qual trata a metodologia de projetos, cuja ideia principal é usar métodos e processos, que antes eram utilizados apenas por designers, para resolver problemas complexos [12]. O projeto da máquina de cerveja será guiado por esse conceito.

Um processo de *Design Thinking* pode ser dividido, mas não sequenciado, em:

- Imersão: aproximação de um problema, a partir das mais diversas perspectivas e pontos de vistas [13].
- Análise e síntese: os dados coletados na fase de imersão, organizados em cartões de insights, devem ser submetidos a uma fase de análise e síntese, de forma a serem organizadas e criar padrões identificáveis, dentro de uma lógica que permita a compreensão do problema em questão [13].
- Ideação: é a fase onde o perfil de um público alvo é definido [13].
- Prototipagem: é o momento que ideias abstratas ganham conteúdo formal e material, de forma a representar a realidade capturada e propiciar a validação de todo o conteúdo apreendido [13].

No projeto da máquina de cerveja será priorizada a produção de um protótipo logo nas fases iniciais de trabalho, pois acredita-se que para um bom resultado final, serão necessárias várias etapas de aprimoramento até a obtenção de um produto final.

3.1 DESCRIÇÃO DA SOLUÇÃO ENCONTRADA

A solução para o projeto da máquina foi encontrada visando trazer inovação e automatização em relação aos produtos já existentes no mercado. Dessa forma, optou-se por utilizar apenas um recipiente de mostagem, agregando maior compatibilidade ao protótipo final.

É importante notar que pelo caráter inovador da máquina ocorreram diversas iterações até a definição da solução apresentada abaixo. Uma versão preliminar pode ser encontrada no Anexo E.

A Figura 9 mostra um esquema da solução. O recipiente externo, indicado por (5), será responsável tanto pelo aquecimento inicial da água de brassagem, quanto pela fervura do mosto no processo de fervura propriamente dito. A resistência (12) age esquentando apenas o conteúdo presente no recipiente externo. O recipiente interno (6) será utilizado para o posicionamento da tela de aprisionamento (1), na qual os grãos de malte ficarão aprisionados durante todo o processo de produção da cerveja.

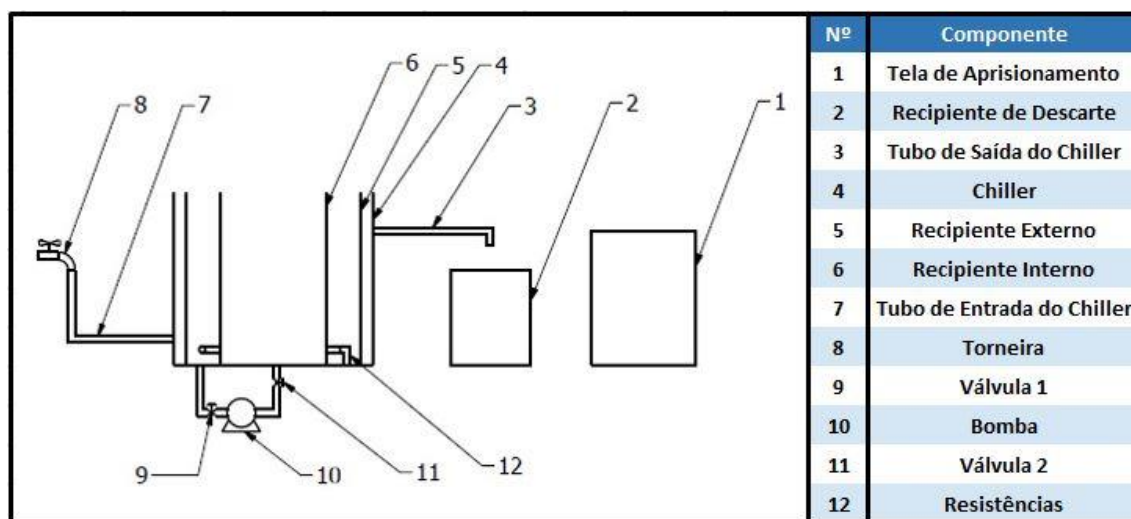


Figura 9 - Representação Esquemática da Solução

O processo de clarificação ocorrerá juntamente com o processo de brassagem e será realizado pela bomba (10) responsável por levar a água cervejeira do recipiente externo até o recipiente interno pela parte inferior da

máquina. As válvula 1 (9) e 2 (11) permitem a passagem do líquido durante o processo de clarificação.

A seguir serão descritos a montagem inicial e todas as etapas realizadas pela máquina durante a fabricação da cerveja, detalhadamente:

- **Preparação**

Inicialmente, antes do início da operação, o usuário deve fazer a moagem dos grãos e inseri-los na tela de aprisionamento conforme mostrado na Figura 10.

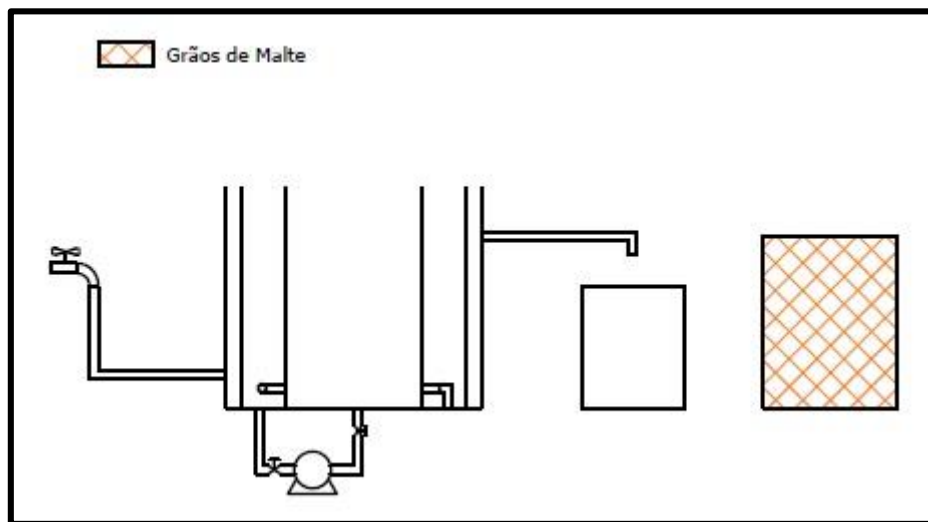


Figura 10 - Preparação

- **Montagem**

A quantidade de água requerida pela receita deve ser colocada no recipiente externo. Em seguida, a tela de aprisionamento deve ser posicionada no recipiente interno. Essa fase pode ser vista na Figura 11.

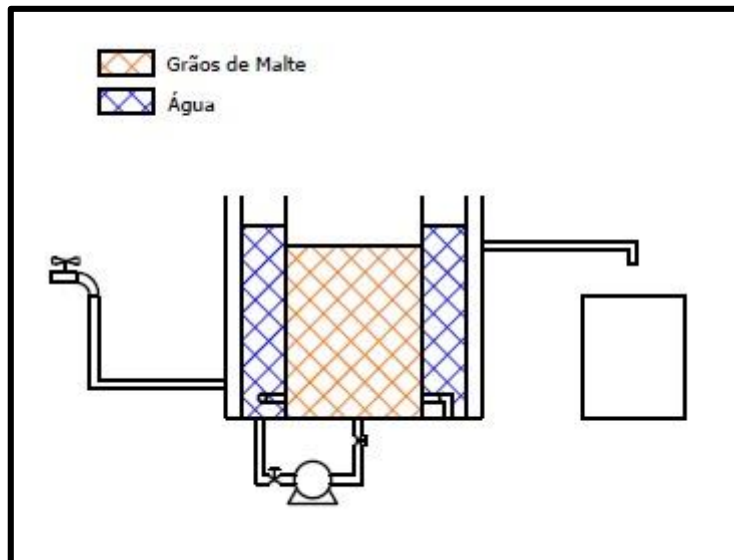


Figura 11 - Montagem

- **Aquecimento**

Após a preparação da máquina, inicia-se o processo de produção da cerveja. Inicialmente a água que está no recipiente externo deve ser aquecida até a temperatura de brassagem proposta pela receita. Isso ocorre pelo acionamento da resistência elétrica representada na Figura 12. Nessa etapa, a temperatura de brassagem, após atingida, deverá ser mantida constante para que o processo de brassagem seja realizado corretamente.

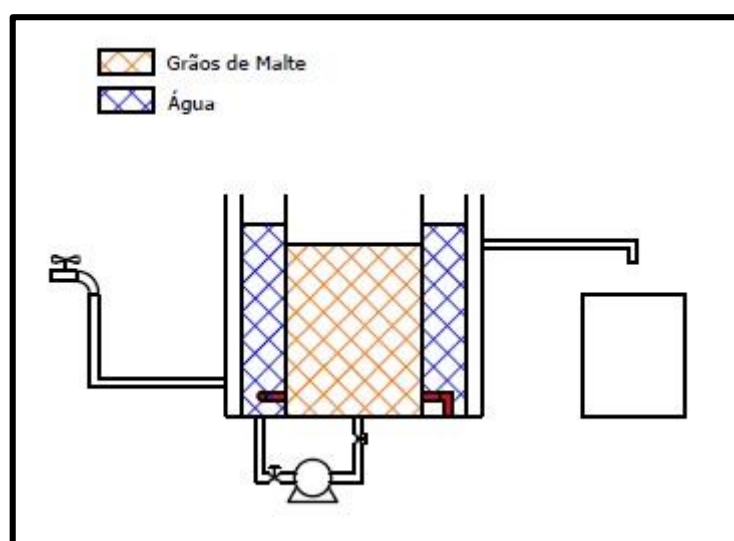


Figura 12 - Aquecimento

- **Brassagem e Clarificação**

A proposição do projeto com relação as etapas de brassagem e clarificação é que essas duas etapas sejam realizadas ao mesmo tempo.

Após o aquecimento da água, que ocorre no recipiente externo, até a temperatura proposta pela receita, o processo de brassagem e de clarificação começam simultaneamente. Isso é feito pelo acionamento da bomba, mostrada na Figura 13, que faz com que a água cervejeira presente no recipiente externo escoe para o recipiente interno por meio dos dutos abaixo da máquina.

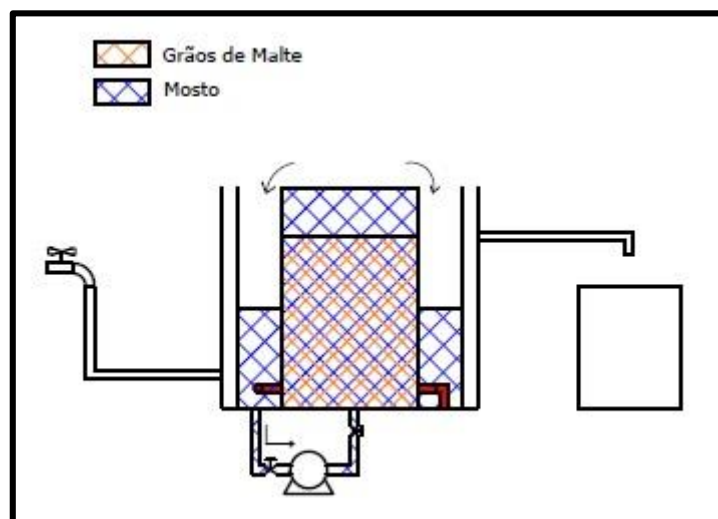


Figura 13 - Brassagem e Clarificação

O líquido entra pela parte inferior do recipiente interno, passando pelo meio dos grãos, aprisionados na tela metálica, até ultrapassar a altura do mesmo, transbordando novamente para o recipiente externo. Este movimento ocorre ininterruptamente como um ciclo, durante todo o tempo de brassagem proposto pela receita.

Por meio desse processo, a brassagem pode ser realizada devido ao movimento do mosto imposto pelo ciclo, bem como o contato do líquido com os grãos. Da mesma forma, a clarificação é efetuada por meio da filtração do mosto, que utiliza as próprias cascas do malte como filtro, como explicado na seção 1.2.4.

Vale ressaltar que durante toda essa etapa, a resistência elétrica deve manter a temperatura do mosto de acordo com o(s) degrau(s) de temperatura exigidos pela receita.

- **Fervura**

Após o término do tempo de brassagem proposto pela receita, a tela de aprisionamento é retirada junto com os grãos, e então inicia-se o processo de fervura como mostra a Figura 14. A resistência aquece até que o mosto entre em ebulição, mantendo-se ligada pelo período de tempo exigido pela receita.

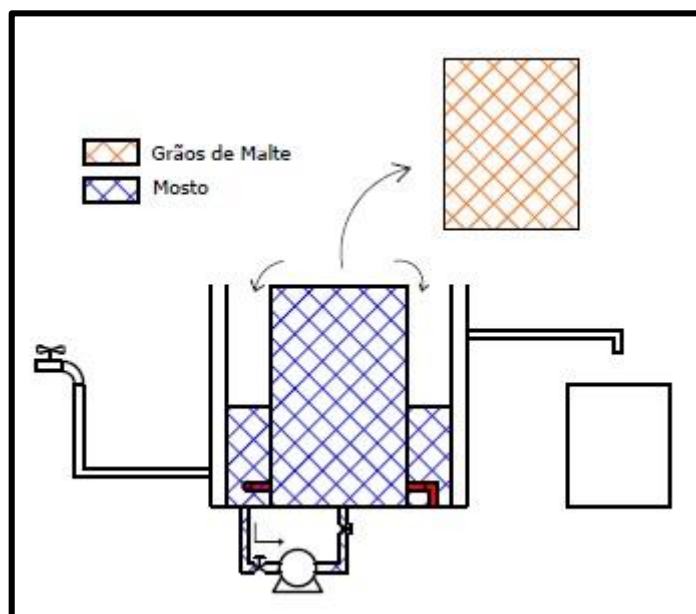


Figura 14 – Fervura

- **Resfriamento**

Após o processo de fervura, a cerveja deve ser resfriada rapidamente de modo a evitar possíveis contaminações. Para isso, é acionado o *chiller* representado na Figura 15. Água à temperatura ambiente, da rede doméstica, entra no *chiller*, trocando calor com a cerveja, e saindo a uma temperatura mais elevada.

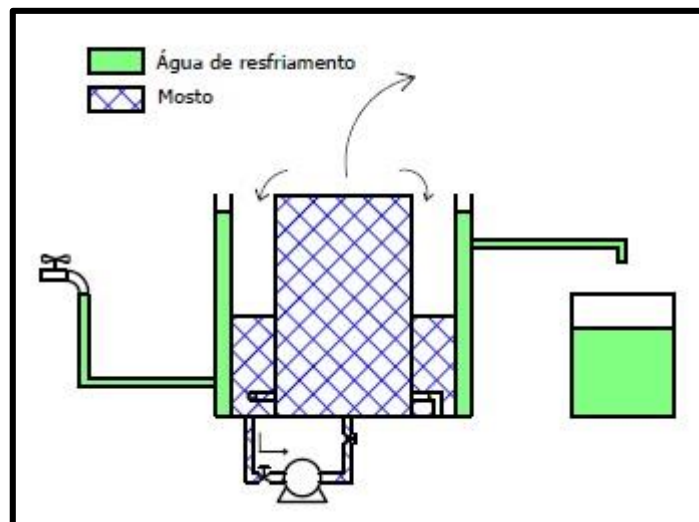


Figura 15 - Resfriamento

O resfriamento deve ocorrer até que a cerveja se encontre a temperatura de inoculação das leveduras utilizadas na receita.

- **Fermentação**

Após o resfriamento a cerveja está pronta para ser fermentada. A fermentação deve ser feita em um recipiente à parte, o que permitiria a fabricação de uma nova receita enquanto acontece a fermentação da receita anterior.

3.2 DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA FÍSICA

Para o dimensionamento da máquina, foi utilizada como base uma média entre receitas para fabricação de cervejas. A receita média obtida e utilizada pode ser observada a seguir:

- Quantidade de cerveja final: 20L
- Quantidade de malte: 5 kg
- Quantidade de lúpulo: 20 g
- Quantidade de fermento: 12 g

Através da quantidade de água inicial e da quantidade de malte é possível estabelecer uma proporção de aproximadamente 4 litros de água para cada quilograma de malte. Dessa proporção são derivadas as dimensões da máquina.

Para o funcionamento correto da máquina também é necessário adotar algumas condições de contorno:

- O Volume externo deve ser grande o suficiente para conter toda a quantidade inicial de água
- O Volume interno quando subtraído do volume do malte deve ser menor que a quantidade de água inicial

3.2.1 CÁLCULOS PARA O DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA FÍSICA

De receitas para fabricação de cerveja artesanal é possível inferir que em média:

$$4 \text{ L de cerveja fabricada} = 1 \text{ kg de malte } (m_{Grão}) \quad (Eq. 1)$$

E utilizando a densidade do malte, é possível determinar a o volume necessário de malte:

$$V_{Grão} = \frac{m_{Grão}}{\rho_{Grão}} \quad (Eq. 2)$$

Será chamado de V_1 o volume que conterà o malte. Para este volume foi adotada uma folga de 40%, devido a existência de receitas que demandam mais malte do que a proporção 4:1 acima mencionada, e também para evitar que a máquina opere em capacidade máxima.

$$V_1 = 1,4 \times V_{Grão} \quad (Eq. 3)$$

Será denominado V_2 o volume que conterà a água no início do processo, e, portanto, o seu valor estará diretamente relacionado a quantidade inicial necessária de água. Para o volume externo será adotada uma folga de 30% para evitar que a máquina opere em capacidade máxima.

$$V_2 = 1,2 \times V_{água \text{ inicial}} \quad (Eq. 4)$$

Através dos volumes é possível determinar os diâmetros necessários:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 V_1}{\pi H}} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 V_2}{\pi H} + d_1^2} \quad (\text{Eq. 6})$$

Para o diâmetro do *chiller* foi determinado uma espessura mínima de 10mm, baseada nas máquinas presentes no mercado atualmente.

Especificando a capacidade da máquina para fabricação de 20 L de cerveja, e adotando [14]:

$$\rho_{Grão} = 0,5 \text{ kg} / \text{L} \quad (\text{Eq. 7})$$

$$H = 360 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 8})$$

Determina-se que:

$$d_1 \cong 220 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 9})$$

$$d_2 \cong 370 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 10})$$

3.3 SUBSISTEMAS

O protótipo final da máquina é composto por subsistemas, que ao serem integrados entre si, formam o sistema final. O sistema de controle do protótipo será responsável por integrar todos os subsistemas e por fazê-los atuarem em sintonia durante a execução de todas as atividades de fabricação da cerveja.

Ao todo, o projeto é constituído pelos seguintes subsistemas:

- Sistema Térmico;
- Sistema Hidráulico;
- Sistema Elétrico.

3.4 SUBSISTEMA TÉRMICO

O subsistema térmico talvez seja o mais complexo de todo o projeto, pois abrange o controle de temperatura do mosto a cada instante de tempo durante todo o processo de fabricação.

Como abordado anteriormente, a quebra do amido, presente nos grãos de malte, em açúcares ocorre durante o processo de brassagem e é fortemente influenciada pela temperatura. Uma variação de apenas 2 °C é suficiente para alterar de forma significativa o perfil de açúcares que serão produzidos, modificando a receita que se deseja produzir.

A complexidade do subsistema térmico vem da necessidade dessa precisão. No entanto, além do controle da temperatura na brassagem, o subsistema térmico será responsável pelo pré-aquecimento da água até a temperatura requisitada pela receita e também pelo aquecimento do mosto até a temperatura de fervura (100 °C), a qual deverá ser mantida também de acordo com a receita.

Os principais componentes do subsistema térmico são apresentados na Tabela 1 abaixo:

Tabela 1 - Componentes do Subsistema Térmico

Componentes do Subsistema Térmico
Resistência Elétrica
Medidor de Temperatura

3.4.1 MODELAGEM TÉRMICA

O subsistema térmico apresenta duas situações que teriam de ser modeladas separadamente. A primeira situação se refere aos momentos em que a máquina estiver realizando tanto o processo de pré-aquecimento da água até a temperatura de brassagem, quanto o processo de fervura do mosto. Nestes dois casos não há circulação de fluido entre os compartimentos externo e interno (grãos).

A segunda situação se refere ao processo de brassagem, no qual ocorrem fluxos de fluido entre os compartimentos externo e interno.

No entanto, há elevação de temperatura somente na primeira situação descrita (ocorrem elevações de temperatura na segunda situação apenas quando a receita se utiliza de mais de um degrau de temperatura, no entanto essas elevações são menores quando comparadas à fervura ou ao pré-aquecimento). Como é desejado o dimensionamento dos componentes térmicos, principalmente a resistência elétrica, o subsistema será modelado para as etapas de pré-aquecimento da água ou fervura, ou seja, para a primeira situação descrita no parágrafo anterior, pois durante essas etapas há maior transferência de calor entre a resistência e o mosto (momentos em que a resistência elétrica é mais requisitada).

Tendo isso colocado, o subsistema pode ser dividido em três volumes de controle como mostrado no esquema simplificado (sem bombas, válvulas, etc) do corte da máquina pela Figura 16.

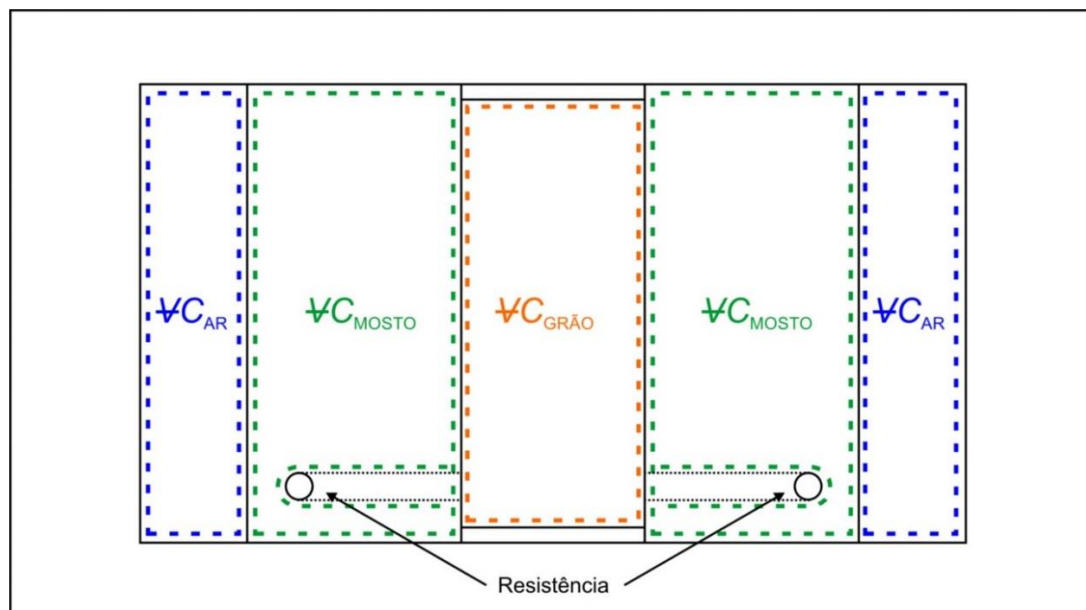


Figura 16 - Volumes de Controle Estudados

VC_{AR} é o volume de controle que representa o compartimento por onde passará a água de resfriamento, no entanto durante os processos de pré-aquecimento ou de fervura, esse compartimento ainda não estará preenchido com água, mas sim ar. O volume de controle VC_{MOSTO} engloba apenas a água

cervejeira, sem incluir a resistência elétrica. Para a etapa de pré-aquecimento da água, esse volume de controle é composto apenas pela água, entretanto na etapa de fervura ele é composto pelo mosto. Já $\forall C_{GR\tilde{A}OS}$ é o volume de controle que engloba apenas os grãos que estão aprisionados no compartimento interno.

- **Hipóteses Simplificadoras**

As seguintes hipóteses simplificadoras foram adotadas durante a modelagem do subsistema térmico:

- I. Não há perdas de massa por evaporação durante o tempo de operação representado pelo modelo.
- II. Os gradientes de temperatura no interior dos volumes de controle são desprezíveis.
- III. Não há convecção entre os volumes de controle e as paredes da máquina.
- IV. As trocas de calor entre o $\forall C_{AR}$ e o fundo e a parte superior da máquina são desprezíveis.
- V. A potência fornecida pela resistência elétrica é instantaneamente transferida para o $\forall C_{MOSTO}$.
- VI. A etapa onde a resistência elétrica é mais requisitada (maior potência deve ser inserida no sistema) é durante o aquecimento do mosto entre a temperatura de brassagem e a temperatura de fervura (100 °C).

A hipótese I é adequada, pois embora haja evaporação durante todo o processo de fabricação da cerveja, não há evaporação significativa durante o pré-aquecimento e nem durante a elevação de temperatura até a temperatura de fervura, situações para as quais o modelo será aplicado. Como consequência da hipótese II, todos os volumes de controle apresentam uma temperatura única para cada instante de tempo, sendo assim, o subsistema está em regime transiente [16].

Da hipótese III, pode-se inferir que as temperaturas superficiais das paredes da máquina são iguais as temperaturas dos volumes de controle com os quais elas estão em contato.

A hipótese IV é adequada, pois a área superficial do fundo e da parte superior são desprezíveis em comparação com a lateral da máquina.

A hipótese VI é muito importante para a modelagem do subsistema térmico e por isso deve ser melhor detalhada. Como se deseja descobrir a potência adequada que a resistência elétrica deve ter para que a máquina se comporte de modo correto, é crucial a modelagem para a situação em que haja maior requerimento de energia pelo sistema. Nesse caso, como dito anteriormente, essa situação ocorre tanto no pré-aquecimento da água para a brassagem, onde há uma elevação de temperatura de 20 °C (ambiente) para cerca de 60 °C (temperatura de brassagem), e no aquecimento do mosto para a fervura, onde há elevação de temperatura de cerca de 60 °C para 100 °C. Desse modo, a modelagem do subsistema térmico será feita para esse segundo caso, pois embora nas duas etapas citadas haja uma variação de temperatura de aproximadamente 40 °C, na etapa de aquecimento do mosto para a fervura a faixa de operação abrange temperaturas mais elevadas e, conseqüentemente, maiores perdas de calor, ou seja, é nesta situação que há maior transferência de calor por parte da resistência para o sistema.

- **Modelo Físico**

Definidas as hipóteses simplificadoras, o modelo físico apresentando as trocas de calor e as temperaturas de cada componente é apresentado na Figura 17, onde é mostrada a apenas $\frac{1}{4}$ da máquina em corte para uma melhor visualização.

A figura mostra as trocas de calor e as temperaturas dos objetos de estudo do sistema ao longo do tempo para o aquecimento do mosto até a temperatura de fervura, a partir da temperatura final de brassagem.

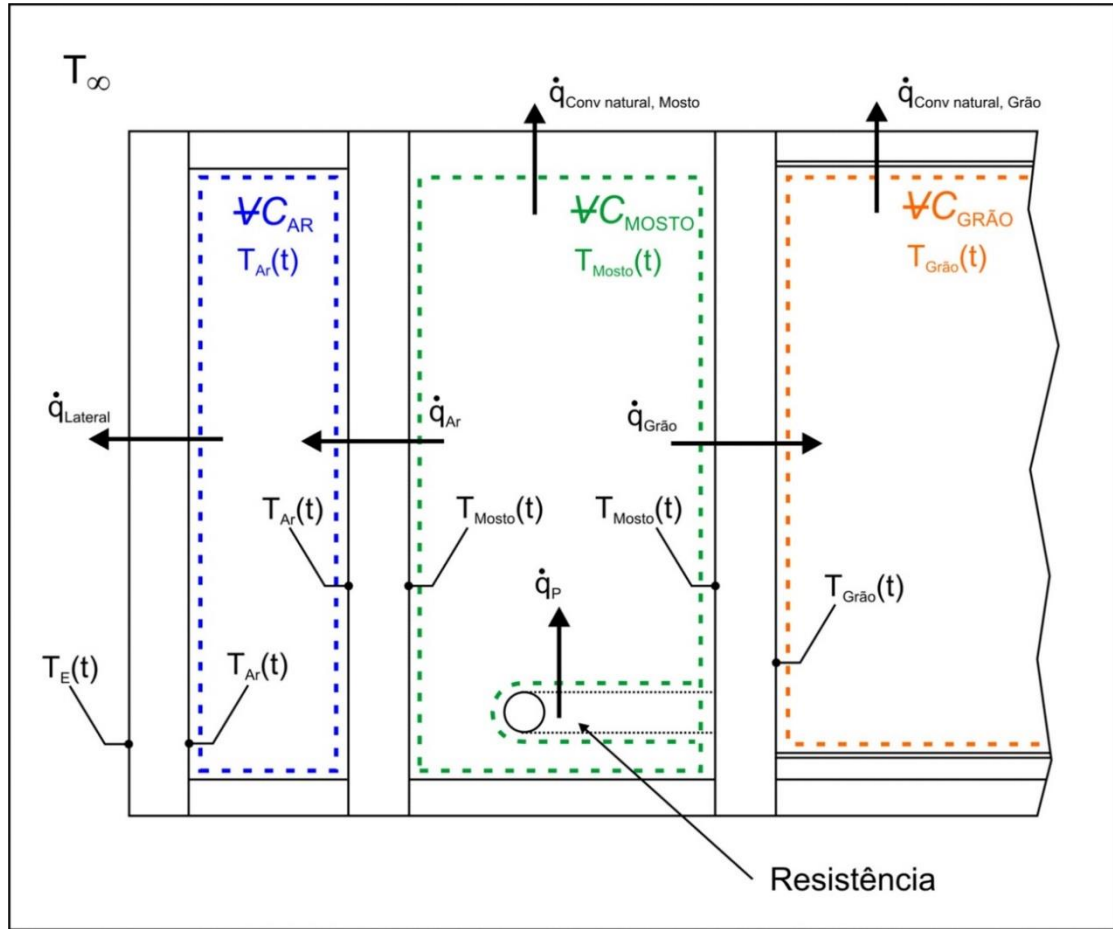


Figura 17 - Modelagem Térmica - Trocas de Calor

- **Modelagem Matemática**

A partir do modelo físico apresentado pode-se escrever a equação da energia para os três volumes de controle [15]:

$$\frac{dE_{Ar}}{dt} = \dot{Q}_P - \dot{W}_{Ar} \quad (Eq. 11)$$

$$\frac{dE_{Mosto}}{dt} = \dot{Q}_{Mosto} - \dot{W}_{Mosto} \quad (Eq. 12)$$

$$\frac{dE_{Grão}}{dt} = \dot{Q}_{Grão} - \dot{W}_{Grão} \quad (Eq. 13)$$

Sabe-se que nenhum dos três volumes de controle sofre ou realiza trabalho durante o processo estudado, logo $\dot{W}_{Ar} = \dot{W}_{Mosto} = \dot{W}_{Grãos} = 0$. Dessa

forma, pode-se detalhar as equações, incluindo as transferências de calor e explicitando os termos da energia:

$$m_{Ar} c_{Ar} \frac{dT_{Ar}(t)}{dt} = \dot{q}_{Ar} - \dot{q}_{Lateral} \quad (Eq. 14)$$

$$m_{Mosto} c_{Mosto} \frac{dT_{Mosto}(t)}{dt} = \dot{q}_P - \dot{q}_{Ar} - \dot{q}_{Grão} - \dot{q}_{Conv\ natural, Mosto} \quad (Eq. 15)$$

$$m_{Grão} c_{Grão} \frac{dT_{Grão}(t)}{dt} = \dot{q}_{Grão} - \dot{q}_{Conv\ natural, Grão} \quad (Eq. 16)$$

Os termos referentes as trocas de calor presentes nas (Eq. 14), (Eq. 15), (Eq. 16) podem ser explicitados, entretanto para melhor compreensão das equações que se seguem a Figura 18 mostra os parâmetros geométricos utilizados.

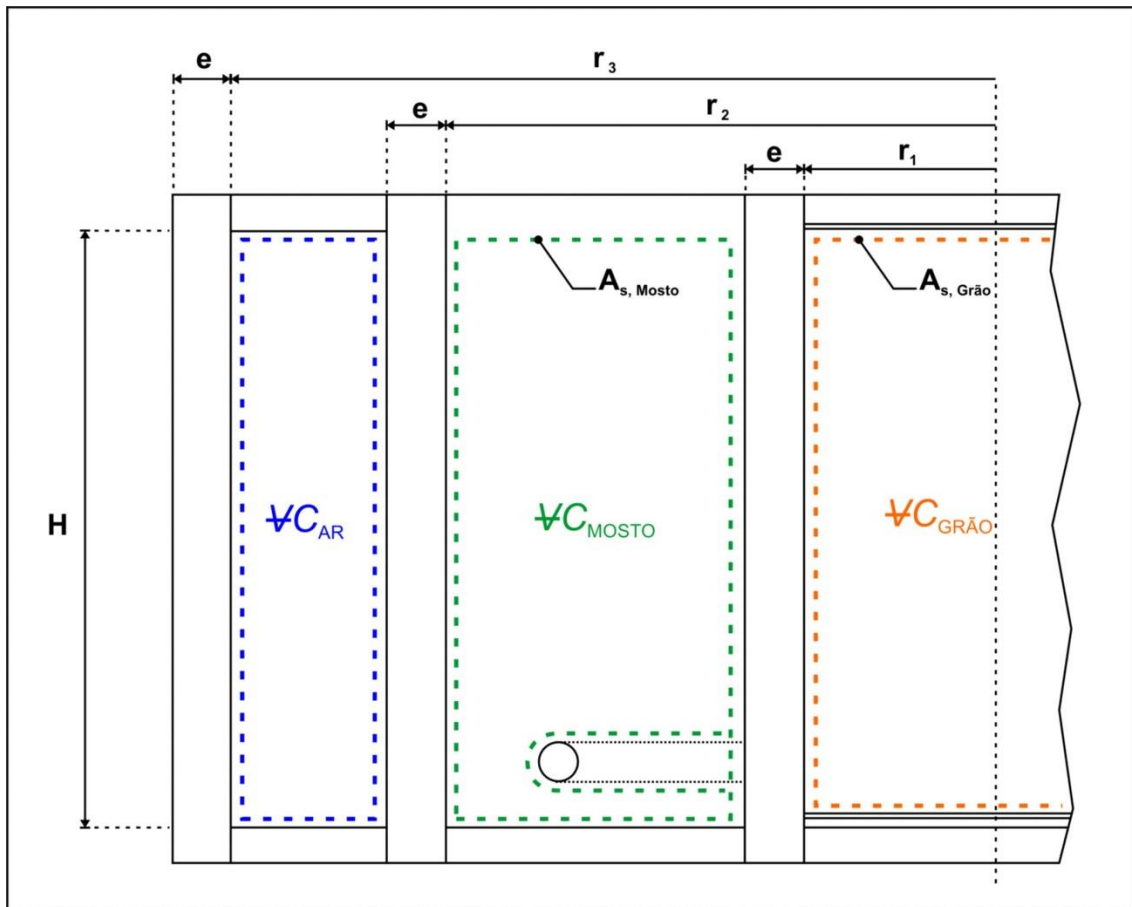


Figura 18 - Parâmetros Geométricos Utilizados no Cálculo das Trocas de Calor

Como pode ser observado, e é a espessura da parede, r_1 , r_2 e r_3 são os raios referentes aos compartimentos indicados, H é a altura da máquina (será considerada igual à altura dos volumes de controle indicados), $A_{s,Mosto}$ e $A_{s,Grão}$ são as áreas superficiais de troca por convecção natural do $\forall C_{Mosto}$ e $\forall C_{Grão}$, respectivamente.

A seguir, serão explicitadas as parcelas referentes as transferências de calor presentes nas equações anteriores.

Os dois primeiros termos a serem tratados serão $\dot{q}_{Grão}$ e \dot{q}_{Ar} . Em ambos os casos a transferência de calor é dada apenas pela condução através da parede da máquina. Utilizando as coordenadas cilíndricas, têm-se [16]

$$\dot{q}_{Grão} = \frac{2\pi H k_{Inox}}{\ln\left(\frac{r_1 + e}{r_1}\right)} [T_{Mosto}(t) - T_{Grão}(t)] \quad (Eq. 17)$$

$$\dot{q}_{Ar} = \frac{2\pi H k_{Inox}}{\ln\left(\frac{r_2 + e}{r_2}\right)} [T_{Mosto}(t) - T_{Ar}(t)] \quad (Eq. 18)$$

em que k_{Inox} é a condutividade térmica do Aço Inox.

Os próximos termos analisados são $\dot{q}_{Conv\ natural, Mosto}$ e $\dot{q}_{Conv\ natural, Grão}$. Já nesse caso, a transferência de calor ocorre por meio da convecção natural entre a superfície superior do mosto e o ambiente, e entre a superfície superior dos grãos e o ambiente. Dessa forma, utilizando o modelo de troca de calor por convecção natural para placas horizontais [16], pode-se escrever que

$$\dot{q}_{Conv\ natural, Mosto} = \overline{h_{Mosto}} A_{s, Mosto} [T_{Mosto}(t) - T_{\infty}] \quad (Eq. 19)$$

onde $\overline{h_{Mosto}}$ é o coeficiente convectivo médio associado ao mosto e é dado por

$$\overline{h_{Mosto}} = \frac{\overline{Nu_{Mosto}} k}{L_{Mosto}} \quad (Eq. 20)$$

sendo $\overline{Nu_{Mosto}}$ o número de Nusselt médio, k a condutividade térmica do ar e L_{Mosto} o comprimento característico da superfície de troca do mosto, que é calculado por

$$L_{Mosto} = \frac{A_{s, Mosto}}{P_{Mosto}} = \frac{\pi[r_2^2 - (r_1 + e)^2]}{2\pi[r_2 + (r_1 + e)]} \Leftrightarrow L_{Mosto} = \frac{r_2 - r_1 - e}{2} \quad (Eq. 21)$$

Analogamente, para a convecção natural sofrida pelos grãos através de sua superfície superior, tem-se que

$$\dot{q}_{Conv\ natural, Grão} = \overline{h_{Grão}} A_{s, Grão} [T_{Grão}(t) - T_{\infty}] \quad (Eq. 22)$$

onde $\overline{h_{Grão}}$ é o coeficiente convectivo médio associado aos grãos de malte e é dado por

$$\overline{h_{Grão}} = \frac{\overline{Nu_{Grão}} k}{L_{Grão}} \quad (Eq. 23)$$

sendo $\overline{Nu_{Grão}}$ o número de Nusselt médio, k a condutividade térmica do ar e $L_{Grão}$ o comprimento característico da superfície de troca dos grãos, também calculado por

$$L_{Grão} = \frac{A_{s, Grão}}{P_{Grão}} = \frac{\pi r_1^2}{2\pi r_1} \Leftrightarrow L_{Grão} = \frac{r_1}{2} \quad (Eq. 24)$$

Dessa forma, aplicando o modelo para convecção natural em placas planas horizontais, têm-se para ambas as trocas de calor que o número de Nusselt médio ($\overline{Nu_{Mosto}}$ e $\overline{Nu_{Grão}}$) é dado por [16]

$$\left[\begin{array}{l} \overline{Nu} = 0,54 Ra_L^{1/4} \quad \text{para} \quad (10^4 \leq Ra_L \leq 10^7 ; Pr \geq 0,7) \\ \overline{Nu} = 0,15 Ra_L^{1/4} \quad \text{para} \quad (10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11}) \end{array} \right. \quad (Eq. 25)$$

onde Ra_L é o número de Rayleigh e Pr é o número de Prandtl para o ar na temperatura de filme. Além disso, o número de Rayleigh é calculado por

$$Ra_{L_{Mosto}} = \frac{g\beta(T_{Mosto}^* - T_{\infty})L_{Mosto}^3}{\nu\alpha} \quad (Eq. 26)$$

$$Ra_{L_{Grão}} = \frac{g\beta(T_{Grão}^* - T_{\infty})L_{Grão}^3}{\nu\alpha} \quad (Eq. 27)$$

onde g é a aceleração da gravidade, ν é a viscosidade cinemática do ar, α é a difusividade térmica do ar e β é o coeficiente de expansão térmica, dado por

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (Eq. 28)$$

onde T_f é a temperatura de filme.

Nota-se que tanto em (Eq. 26) como em (Eq. 27), as temperaturas do mosto e dos grãos não foram escritas como uma função do tempo. Isso foi feito com o intuito de indicar que será utilizado no cálculo do número de Rayleigh uma única temperatura para as temperaturas do mosto e dos grãos. No caso, essas temperaturas, representadas por T_{Mosto}^* e $T_{Grão}^*$, serão de 100 °C (temperatura máxima do processo). Fazendo isso, adota-se o maior número de Rayleigh possível e, conseqüentemente, as maiores perdas de calor possíveis, evitando-se o risco de o cálculo da resistência de aquecimento apresentar um valor menor do que realmente é necessário para atender as condições de operação. Caso essa simplificação não tivesse sido adotada, os números de Rayleigh seriam variantes no tempo, o que tornaria o sistema de equações diferenciais, muito difícil de ser resolvido.

Dessa forma, utilizando as equações de (Eq. 19) à (Eq. 28), determina-se as trocas de calor por convecção natural entre o mosto e o ar, e entre os grãos e o ar em função das temperaturas.

O próximo e último termo de troca de calor a ser explicitado é a troca de calor lateral, $\dot{q}_{Lateral}$. Nesse caso, a transferência de calor se dá tanto por condução (através da parede externa da máquina) como por convecção natural

(entre a parede externa e o ambiente). Dessa forma, foi utilizado o conceito de resistência térmica [16] para abordar a questão, como mostra a Figura 19.

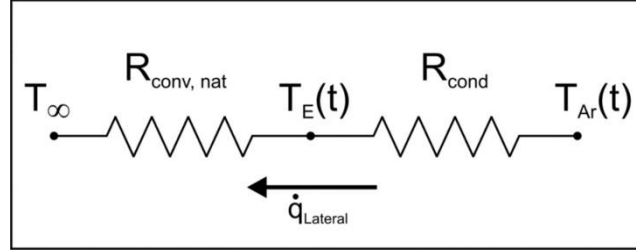


Figura 19 - Resistência Térmica

Utilizando os conceitos de transferência de calor por convecção natural para parede vertical e por condução em geometria cilíndrica, pode-se escrever que

$$R_{conv,nat} = \frac{1}{2\pi(r_3 + e)H \overline{h}_{Lateral}} \quad (Eq. 29)$$

$$R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_3 + e}{r_3}\right)}{2\pi H k_{Inox}} \quad (Eq. 30)$$

sendo $\overline{h}_{conv,lateral}$, o coeficiente convectivo médio associado a troca de calor por convecção natural lateral da máquina.

Dessa forma, a resistência total da troca de calor pode ser escrita como

$$R_{Total} = R_{conv,nat} + R_{cond} \quad (Eq. 31)$$

e, portanto, a troca de calculada da seguinte maneira:

$$\dot{q}_{Lateral} = \frac{T_{Ar(t)} - T_{\infty}}{R_{Total}} \quad (Eq. 32)$$

Substituindo (Eq. 29) e (Eq. 30) em (Eq. 31) e, em seguida, em (Eq. 32), tem-se que:

$$\dot{q}_{Lateral} = \frac{T_{Ar}(t) - T_{\infty}}{\frac{1}{2\pi(r_3 + e)H \overline{h}_{Lateral}} + \frac{\ln\left(\frac{r_3 + e}{r_3}\right)}{2\pi H k_{Inox}}} \quad (Eq. 33)$$

Com relação ao coeficiente convectivo médio presente em (Eq. 33), será utilizado como aproximação o modelo para troca de calor por convecção natural para placa plana vertical. Dessa forma, tem-se as seguintes relações [16]:

$$\overline{h}_{Lateral} = \frac{\overline{Nu}_{Lateral} k}{H} \quad (Eq. 34)$$

$$\overline{Nu}_{Lateral} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 Ra_{LLateral}^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (Eq. 35)$$

$$Ra_{LLateral} = \frac{g\beta(T_E^* - T_{\infty})H^3}{\nu\alpha} \quad (Eq. 36)$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (Eq. 37)$$

onde $\overline{Nu}_{Lateral}$ é o número de Nusselt médio para a troca de calor em questão e $Ra_{LLateral}$ é o número de Rayleigh para a convecção lateral. Os demais parâmetros são os mesmos utilizados para $\dot{q}_{Conv\ natural, Mosto}$ e $\dot{q}_{Conv\ natural, Grão}$. Analogamente, também, em relação a essas duas trocas de calor já tratadas, utiliza-se aqui a temperatura máxima possível para $T_E(t)$, representada por T_E^* (100 °C), desse modo simplifica-se o fato de que o número de Rayleigh seria variante com o tempo, como já citado anteriormente.

Tendo todas as transferências de calor definidas e explicitadas, pode-se escrever (Eq. 14), (Eq. 15) e (Eq. 16) da seguinte maneira:

$$m_{Ar}c_{Ar} \frac{dT_{Ar}(t)}{dt} = \frac{2\pi Hk_{Inox}}{\ln\left(\frac{r_2 + e}{r_2}\right)} [T_{Mosto}(t) - T_{Ar}(t)] - \frac{[T_{Ar}(t) - T_{\infty}]}{\frac{1}{2\pi(r_3 + e)H \overline{h_{Lateral}}} + \frac{\ln\left(\frac{r_3 + e}{r_3}\right)}{2\pi Hk_{Inox}}} \quad (Eq. 38)$$

$$m_{Mosto}c_{Mosto} \frac{dT_{Mosto}(t)}{dt} = \dot{q}_P - \frac{2\pi Hk_{Inox}}{\ln\left(\frac{r_2 + e}{r_2}\right)} [T_{Mosto}(t) - T_{Ar}(t)] + \quad (Eq. 39)$$

$$- \frac{2\pi Hk_{Inox}}{\ln\left(\frac{r_1 + e}{r_1}\right)} [T_{Mosto}(t) - T_{Grão}(t)] - \overline{h_{Mosto}} A_{s, Mosto} [T_{Mosto}(t) - T_{\infty}]$$

$$m_{Grão}c_{Grão} \frac{dT_{Grão}(t)}{dt} = \frac{2\pi Hk_{Inox}}{\ln\left(\frac{r_1 + e}{r_1}\right)} [T_{Mosto}(t) - T_{Grão}(t)] - \overline{h_{Grão}} A_{s, Grão} [T_{Grão}(t) - T_{\infty}] \quad (Eq. 40)$$

Dessa forma, obtêm-se então, o sistema de equações diferenciais que descrevem o comportamento térmico da máquina durante a etapa de elevação de temperatura entre o fim da brassagem/clarificação (60°C) e a etapa de fervura (100°C).

3.4.2 DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES

- **Temperaturas de Operação**

Para que seja possível o dimensionamento dos componentes que integram o subsistema térmico (basicamente a resistência térmica), deve-se primeiro definir todos os parâmetros e constantes que compõem (Eq. 38), (Eq. 39) e (Eq. 40). Como a maioria deles é totalmente dependente da temperatura, os primeiros parâmetros a serem abordados são a temperatura média e a temperatura de filme.

Como o objeto de estudo é a etapa crítica do processo, ou seja, elevação de temperatura do mosto de um patamar de 60 °C para um patamar de 100 °C a temperatura média será

$$\bar{T} = \frac{60 + 100}{2} = 80^{\circ}\text{C} = 353,15\text{ K} \quad (\text{Eq. 41})$$

É na temperatura média que as propriedades envolvendo as trocas de calor por condução serão calculadas, no caso, apenas k_{inox} .

Já para as trocas de calor por convecção, todas as propriedades como α , ν , Pr serão utilizadas na chamada temperatura de filme, que é dada pela média entre a temperatura da superfície que sofre a convecção e a temperatura do ambiente. \bar{T}

$$T_f = \frac{T_s + T_{\infty}}{2} \quad (\text{Eq. 42})$$

Para o projeto em questão será adotado $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ e $T_s = 100^{\circ}\text{C}$ (máxima temperatura que a superfície de troca pode atingir). Dessa forma, tem-se que:

$$T_f = \frac{20 + 100}{2} = 60^{\circ}\text{C} = 333,15\text{ K} \quad (\text{Eq. 43})$$

Como já mencionado, para o cálculo do número de Rayleigh, serão utilizadas as temperaturas máximas das superfícies, representadas por T_{Mosto}^* , $T_{Grão}^*$ e T_E^* , que no caso serão adotadas como sendo de 100 °C.

A Tabela 2 traz todas as temperaturas de operação utilizadas, para as quais serão definidas as propriedades e os adimensionais utilizados.

Tabela 2 - Temperaturas de Operação

Temperaturas	°C	K	Descrição	Aplicação
T_{∞}	100	293,15	Temperatura Ambiente	Convecção
T_{Mosto}^*	100	373,15	Temperatura Máxima do Mosto	$Ra_{L Mosto}$
$T_{Grão}^*$	100	373,15	Temperatura Máxima dos Grãos	$Ra_{L Grão}$
T_E^*	100	373,15	Temperatura Máxima da Lateral	$Ra_{L Lateral}$
\bar{T}	80	353,15	Temperatura Média	k_{Inox}
T_f	60	333,15	Temperatura de Filme	$\alpha, \nu, Pr, k, \beta$

- **Propriedades e Adimensionais**

A Tabela 3 traz os valores das propriedades utilizadas de acordo com as temperaturas já descritas anteriormente, para cada volume de controle e material correspondente

Tabela 3 - Propriedades Termofísicas [16]

Propriedade		Temperatura (K)	Valor	Unidade
k_{Inox}	\bar{T}	353,15	15,7	$W/(m.K)$
α	T_f	333,15	2,737E-05	m^2/s
ν	T_f	333,15	1,922E-05	m^2/s
k	T_f	333,15	2,88E-02	$W/(m.K)$
Pr	T_f	333,15	0,702	-
β	T_f	333,15	0,003002	K^{-1}

Dessa forma, utilizando as equações já descritas na seção anterior, juntamente com as propriedades da Tabela 3 e as temperatura da Tabela 2, pode-se calcular os demais parâmetros que compõem as (Eq. 38), (Eq. 39) e (Eq. 40). A Tabela 4 mostra os valores desses parâmetros.

Tabela 4 - Parâmetros

Parâmetros	Valor	Unidade
r_1	110	mm
r_2	185	mm
r_3	190	mm
H	360	mm
e	1	mm
$A_s \text{ Mosto}$	0,0688	m^2
$\text{Perímetro}_{\text{Mosto}}$	1,860	m
L_{mosto}	0,037	m
$A_s \text{ Grão}$	0,0380	m^2
$\text{Perímetro}_{\text{Grão}}$	0,691	m
$L_{\text{Grão}}$	0,055	m
g	9,8	m/s^2
$Ra_{L \text{ Mosto}}$	2,27E+05	-
$Ra_{L \text{ Grão}}$	7,44E+05	-
$Ra_{L \text{ Lateral}}$	2,09E+08	-
$\overline{Nu}_{\text{Mosto}}$	11,781	-
$\overline{Nu}_{\text{Grão}}$	15,860	-
$\overline{Nu}_{\text{Lateral}}$	76,030	-
$\overline{h}_{\text{Mosto}}$	9,15	(W/m ² .K)
$\overline{h}_{\text{Grão}}$	8,29	(W/m ² .K)
$\overline{h}_{\text{Lateral}}$	6,07	(W/m ² .K)

Dessa forma, restam apenas as propriedades referentes a densidade (ou massa) e calor específico. Para esses parâmetros serão utilizados os valores da Tabela 5 (adotou-se a densidade do mosto igual a densidade da água):

Tabela 5 - Propriedades dos Volumes de Controle

Propriedade	Valor	Unidade
ρ_{Mosto}	1000	kg/m ³
$\rho_{\text{Grão}}$	500	kg/m ³
ρ_{Ar}	0,987	kg/m ³
c_{Mosto}	4,18	kJ/(Kg.K)
$c_{\text{Grão}}$	2,1	kJ/(Kg.K)
c_{Ar}	1,008	kJ/(Kg.K)

- **Sistema de Equações Diferenciais**

Tendo todas as propriedades e parâmetros definidos, percebe-se que as (Eq. 38), (Eq. 39) e (Eq. 40) podem ser escritas no seguinte formato:

$$\left[\begin{array}{l} \frac{dT_{Ar}(t)}{dt} + AT_{Ar}(t) + BT_{Mosto}(t) + C = 0 \\ \frac{dT_{Mosto}(t)}{dt} + DT_{Ar}(t) + ET_{Mosto}(t) + FT_{Grão}(t) = G \\ \frac{dT_{Grão}(t)}{dt} + HT_{Mosto}(t) + IT_{Grão}(t) + J = 0 \end{array} \right. \quad (Eq. 44)$$

onde os coeficientes A, B, C, D, E, F, G, H, I e J são explicitados no Anexo A. É interessante notar que o coeficiente G é dependente da potência da resistência, \dot{q}_P e que, dessa forma, para encontrar o valor de \dot{q}_P mais adequado para o projeto, o sistema de equações diferenciais será resolvido para diferentes valores de potência afim de se observar o comportamento das temperaturas $T_{Ar}(t)$, $T_{Mosto}(t)$ e $T_{Grão}(t)$ ao longo do tempo.

- **Resolução do Sistema e Simulações**

Para a resolução do sistema de equações diferenciais foi utilizado o software Matlab[®], juntamente com o Simulink[®], uma de suas ferramentas integradas.

O Anexo C apresenta o código de programação utilizado no Matlab[®] para definição dos parâmetro, propriedades e coeficientes abordados no modelo apresentado no tópico 3.4.1.

Já o diagrama de blocos construído no Simulink[®], que representa o sistema de equações (Eq. 44), é mostrado na Figura 20, abaixo

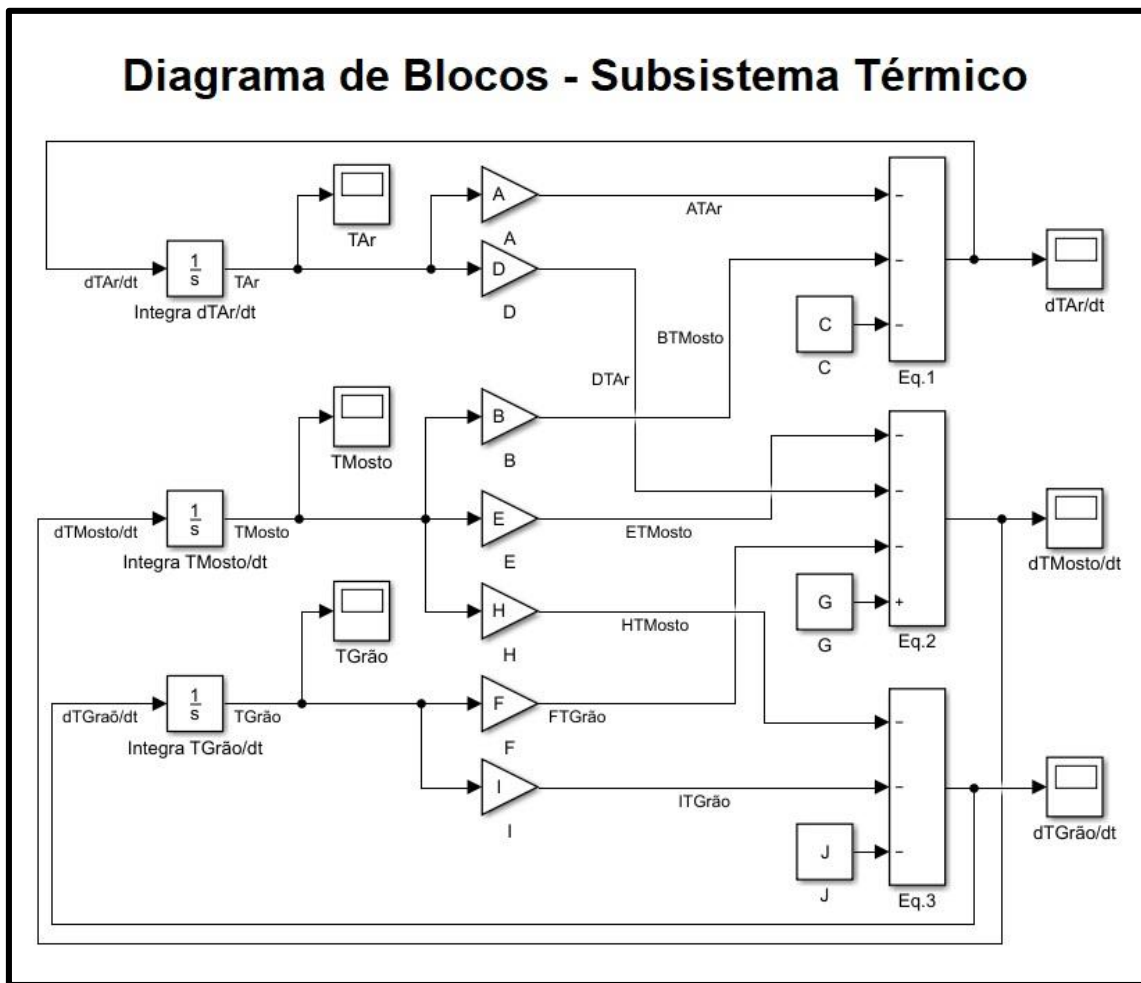


Figura 20 - Diagrama de Blocos para o Subsistema Térmico - Simulink®

Para a resolução do sistema, foram utilizados diversos valores de \dot{q}_P , sendo que três deles são mostrados em detalhes a seguir. É importante ressaltar que as simulações foram realizadas para 1 hora (3600 segundos) de operação.

A Figura 21 mostra o comportamento de $T_{Mosto}(t)$ para valores de 1000 W, 2000 W e 3000 W de potência para a resistência de aquecimento. É possível notar que para 1000 W de potência, há uma variação de apenas 20 K para o volume de controle do mosto para 1 hora de aquecimento, o que se mostra pouco efetivo para o protótipo da máquina, uma vez que se pretende obter uma variação de temperatura de 50 à 70 K em aproximadamente 35 minutos. O mesmo pode ser observado para 2000 W de potência na resistência, ou seja, uma variação de temperatura inferior a desejada (apenas 40 K), para o tempo de aquecimento de uma hora.

Entretanto, quando se observa o comportamento de $T_{Mosto}(t)$ para uma resistência de 3000 W de potência, percebe-se que o mosto apresenta uma variação de temperatura de aproximadamente 90 K em uma hora de operação, o que se mostra adequado para as finalidades do projeto.

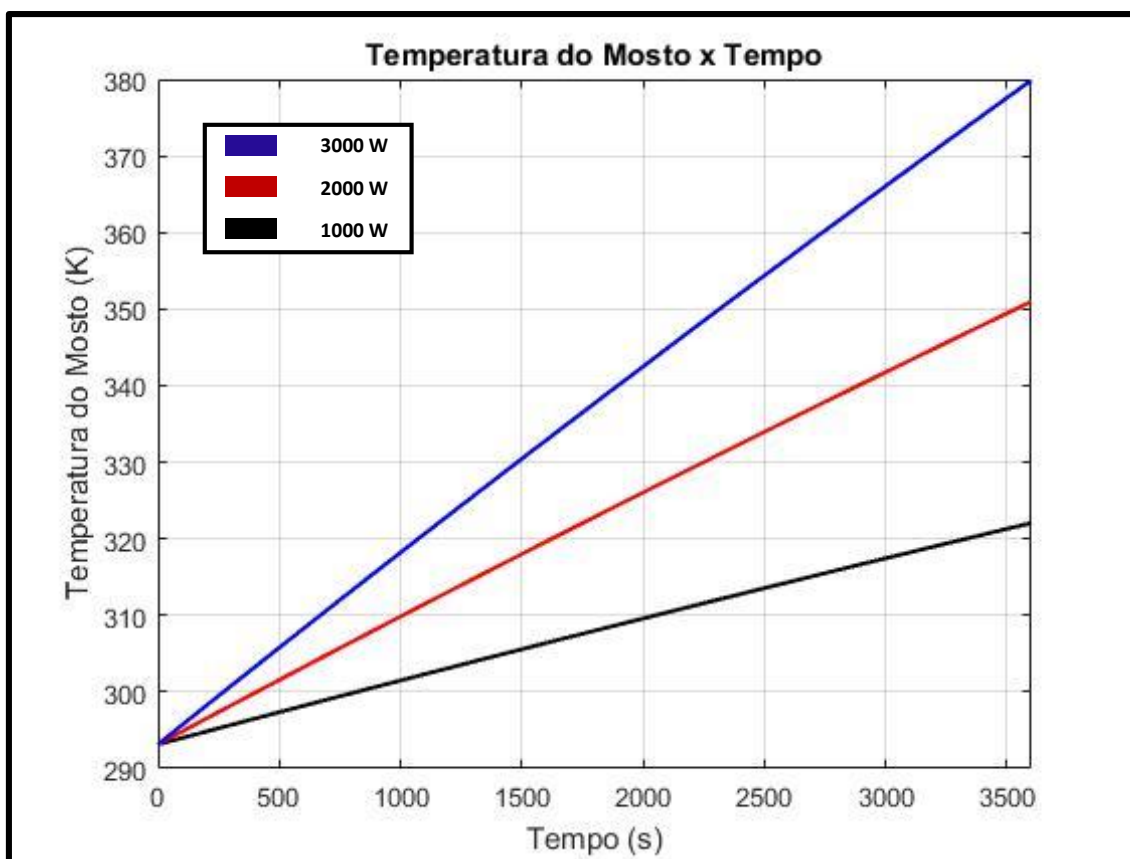


Figura 21 - Temperatura do Mosto x Tempo

A Figura 22 mostra o comportamento da derivada de $T_{Mosto}(t)$ em relação ao tempo, ao longo do tempo de operação. Nota-se que para resistências de potências 1000 W e 2000 W, essa grandeza apresenta valores médios aproximados de 0,54 K/min (0,009 K/s) e 1,02 K/min (0,017 K/s), ou seja, bem inferiores aos 2 K/min desejados para o projeto.

Já para uma resistência de 3000 W de potência, observa-se um valor médio de aproximadamente 0,025 K/s, ou seja, 1,5 K/min. Dessa forma, considerando-se a taxa de variação de temperatura do mosto, percebe-se que a resistência de 3000 W de potência se mostra mais adequada para a construção do projeto.

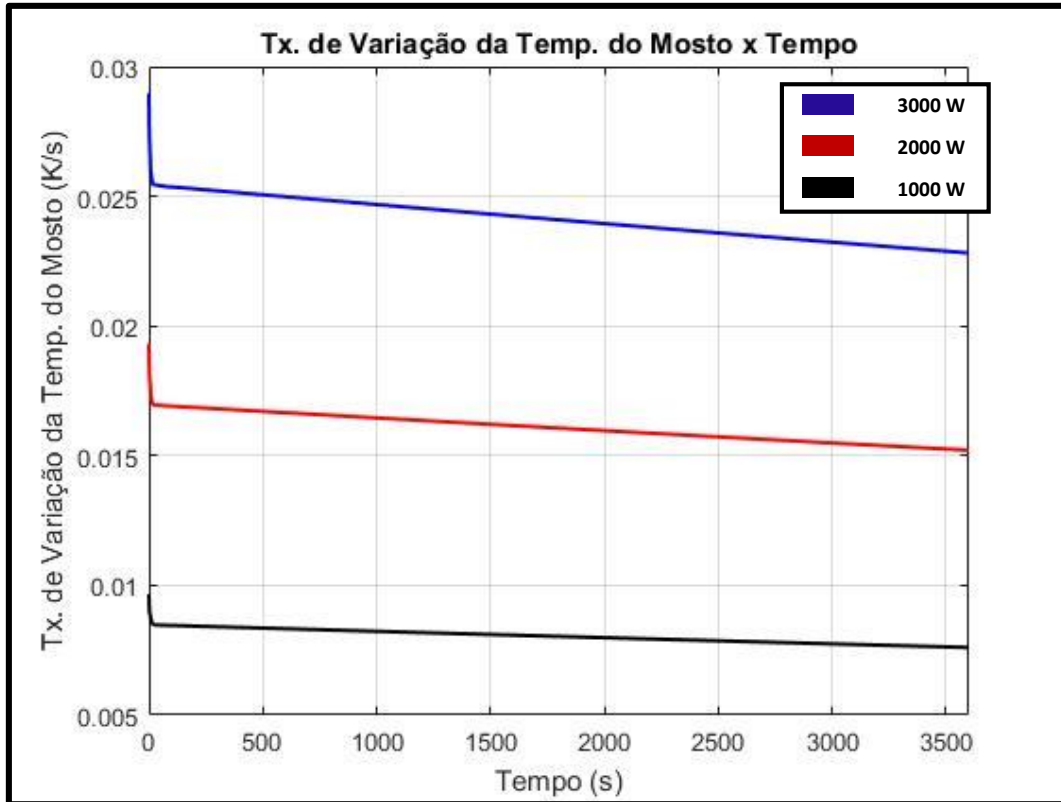


Figura 22 - Taxa de Variação da Temperatura do Mosto x Tempo

Dessa forma, pela constatação das Figura 21 e Figura 22, percebe-se que dentre os valores de potência estudados, o que proporciona um comportamento para $T_{Mosto}(t)$ mais aproximado do desejado, é 3000 W. Por isso, esse será o valor de potência utilizado nas resistências de aquecimento, logo:

$$\dot{q}_p = 3000 \text{ W} \quad (Eq. 45)$$

3.4.3 CONTROLE TÉRMICO

Para o controle de temperatura, pensou-se, inicialmente, na utilização de um controlador PID com o intuito de obter maior precisão para o projeto. Entretanto, testes realizados utilizando um controlador “liga-desliga” se mostraram bastante precisos, além disso, a utilização de um controlador PID exigiria componentes eletrônicos específicos como *dimmers*, triacs, e detectores *zero-cross* (detectores do momento da passagem por zero da corrente elétrica),

sendo que os componentes disponíveis no mercado se mostraram incapazes de suportar altas correntes, como no caso do projeto (correntes na ordem de 10 A). Por esses motivos, para o projeto final, optou-se pela utilização de um controlador do tipo “liga-desliga” controlado por meio de um Arduino UNO®, mostrado na Figura 23 juntamente com o sensor de temperatura digital DS18B20, mostrado na Figura 24.

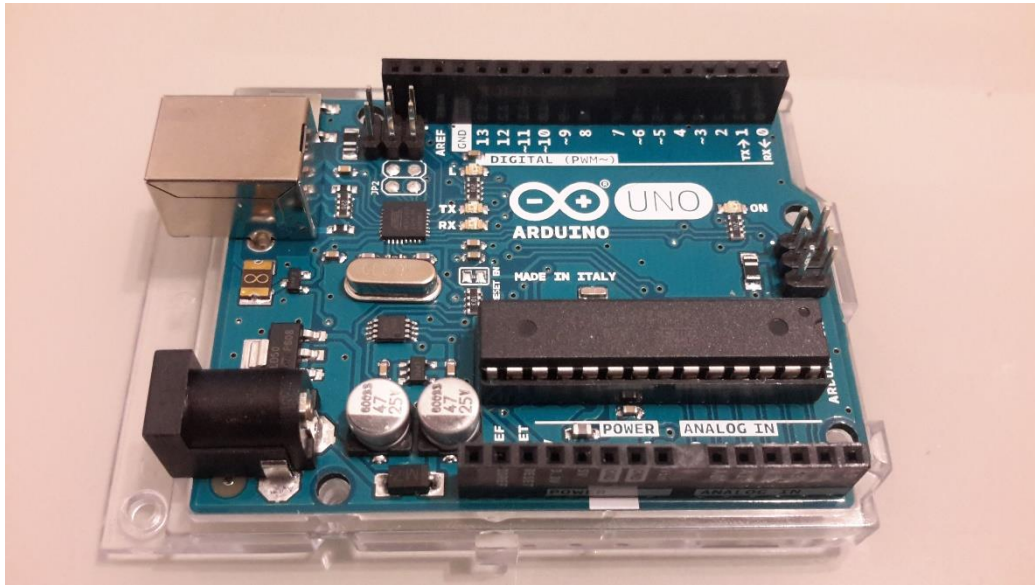


Figura 23 - Arduino UNO



Figura 24 - Sensor de Temperatura DS18B20

Como atuadores do subsistema térmico foram utilizadas duas resistências elétricas como a mostrada Figura 25 na de 220V, sendo uma de 1500 W e outra de 1300 W, valor de potência próximo ao obtido pelo modelo construído no item 3.4.1 e solucionado no item 3.4.2. Embora a simulação do modelo apontasse para uma potência ideal de 1500 W em cada uma das resistências (3000 W no total), utilizou-se uma potência de apenas 1300 W em uma das resistências devido ao fato de que ambas as resistências são de baixa densidade, o que não permite a caramelização do mosto pelo aquecimento, entretanto, essa característica adiciona uma limitação dimensional a resistência, de modo que para o diâmetro exigido pelo projeto, a máxima potência possível é de 1300 W. As duas resistências são circulares de 26 mm e 32 mm de diâmetro, com saída a 90° e são montadas de forma concêntrica no fundo do volume externo da máquina.



Figura 25 - Resistências Elétricas

Para que o usuário insira a temperatura de *setpoint* (temperatura na qual se deseja manter o sistema) foi utilizado como interface um *shield* LCD com teclado integrado compatível com o Arduino, mostrado na Figura 26. Dessa forma, o usuário pode inserir a temperatura que deseja manter o mosto, com a possibilidade de alteração para diferentes degraus de temperatura, de acordo com a receita que esteja confeccionando.

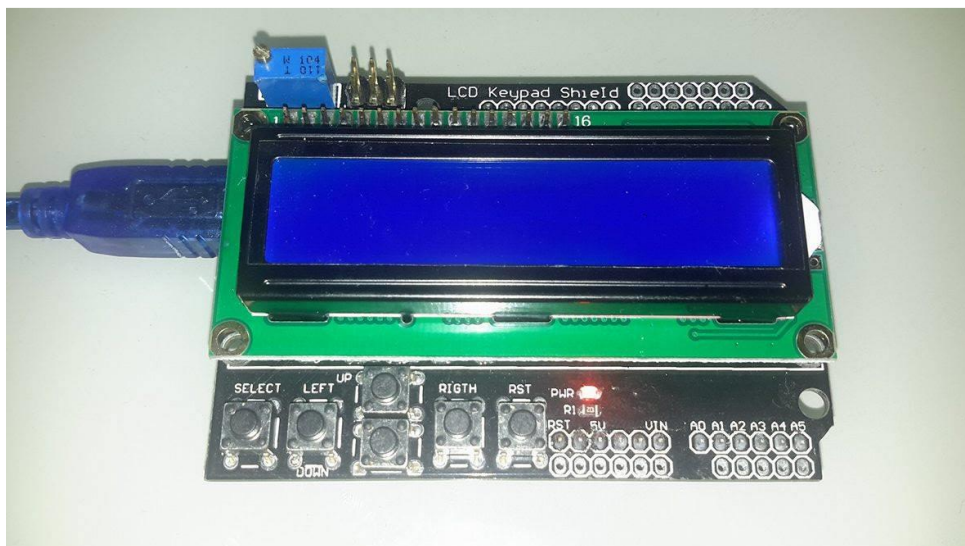


Figura 26 - Shield LCD para Arduino com Teclado Acoplado

Assim, o fluxo do sistema de controle de temperatura acontece da seguinte forma: Dado o *setpoint* de temperatura pelo usuário, o sensor lê a temperatura do mosto e transfere tal informação para o Arduino por meio de uma porta digital. Ao ser recebido, esse dado é tratado por meio de um controlador que verifica a temperatura medida e compara com a temperatura de *setpoint*. Caso a temperatura medida seja menor que a temperatura de *setpoint* as resistências são ligadas, caso contrário as resistências são desligadas. Esse processo é realizado a cada 5 segundos, de modo a evitar que as resistências sejam ligas e desligadas continuamente em intervalos de tempo muito curtos, o que poderia provocar danos tanto às resistências quanto aos componentes eletrônicos que as acionam. Embora simples, o controlador se mostrou bastante adequado para o projeto, uma vez que, testes realizados apresentaram precisão de cerca de 1°C no controle da temperatura.

Maiores detalhes a respeito dos componentes eletrônicos e elétricos utilizados para a realização do controle térmico serão explicados no item 3.6.

3.5 SUBSISTEMA HIDRÁULICO (BOMBAS E VÁLVULAS)

O sistema hidráulico torna possível uma das principais características da máquina, a autonomia em relação ao usuário, uma vez que comandado por

micro controladores, realizará funções as quais caberiam ao usuário em máquinas menos independentes.

Devido a função alimentícia da máquina os componentes hidráulicos deverão ser fabricados em aço inoxidável.

3.5.1 PROJETO DO SISTEMA HIDRÁULICO

O sistema hidráulico será responsável por bombear fluido do volume interno para o externo e permitir a retirada da água cervejeira da máquina para realização da fermentação. Para suprir essas necessidades foi encontrada a solução apresentada na Figura 27.

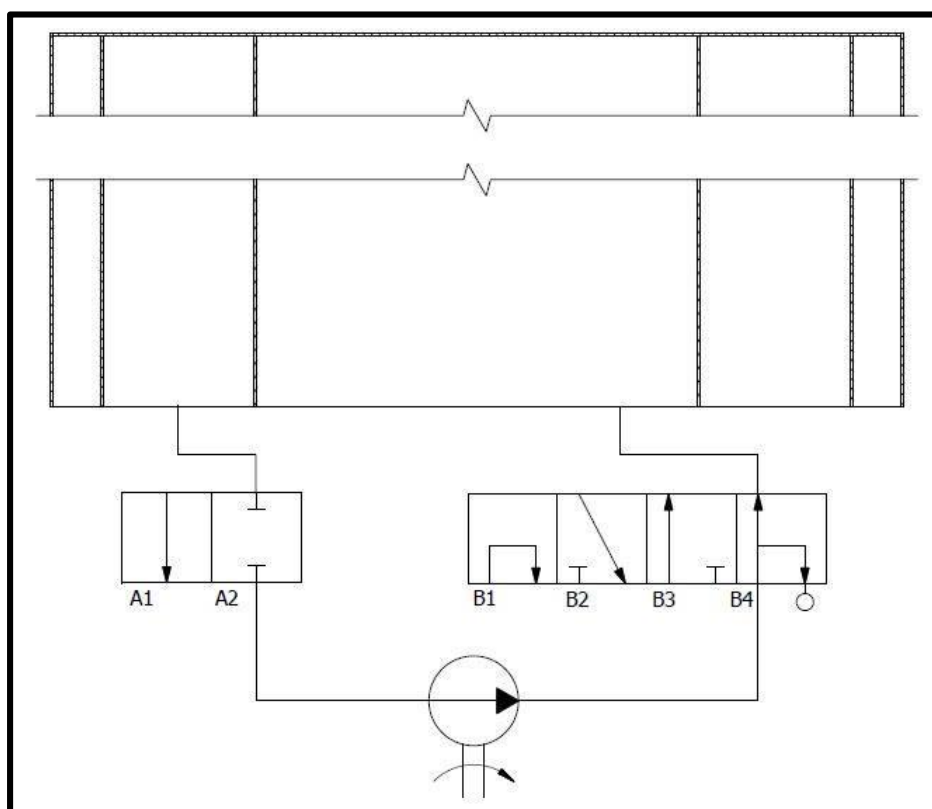


Figura 27 - Solução para o Sistema Hidráulico

Nesta solução serão utilizadas duas válvulas, uma simples de esfera nomeada pela letra A e um válvula T nomeada pela letra B.

Para simplificar a explicação da solução, serão nomeadas as posições das duas válvulas:

- A1: posição aberta da válvula A;

- A2: posição fechada da válvula A;
- B1: posição da válvula B em que o líquido sai da bomba para o reservatório externo;
- B2: posição da válvula B em que o líquido sai do recipiente interno para o reservatório externo;
- B3: posição da válvula B em que o líquido sai da bomba para o recipiente interno;
- B4: posição da válvula B em que o líquido sai da bomba para o recipiente interno e reservatório externo.

Durante o processo de preparação, montagem e aquecimento, apresentados na seção 3.1, as válvulas ficam nas posições A2 e B3 respectivamente. No processo de brassagem, clarificação e fervura as válvulas ficam nas posições A1 e B3. Finalizada fervura, o esvaziamento da máquina, para a posterior fermentação do líquido, é feita em duas etapas. Com as válvulas nas posições A1 e B1 esvazia-se primeiro o recipiente externo da máquina com a bomba ainda ligada, e depois com as válvulas nas posições A2 e B3 e a bomba desligada esvazia-se o recipiente externo.

3.5.2 DIMENSIONAMENTO DA BOMBA

A seleção da bomba foi feita de acordo com alguns requisitos:

- Operar em temperaturas elevadas (100° C);
- Ser de material adequado (como por exemplo aço inoxidável);
- Ter potência necessária para criar uma vazão de aproximadamente 20 litros por minuto.

Para o cálculo da potência da bomba é preciso primeiramente calcular sua altura manométrica. Para tanto será utilizado o esquema representado na Figura 28.

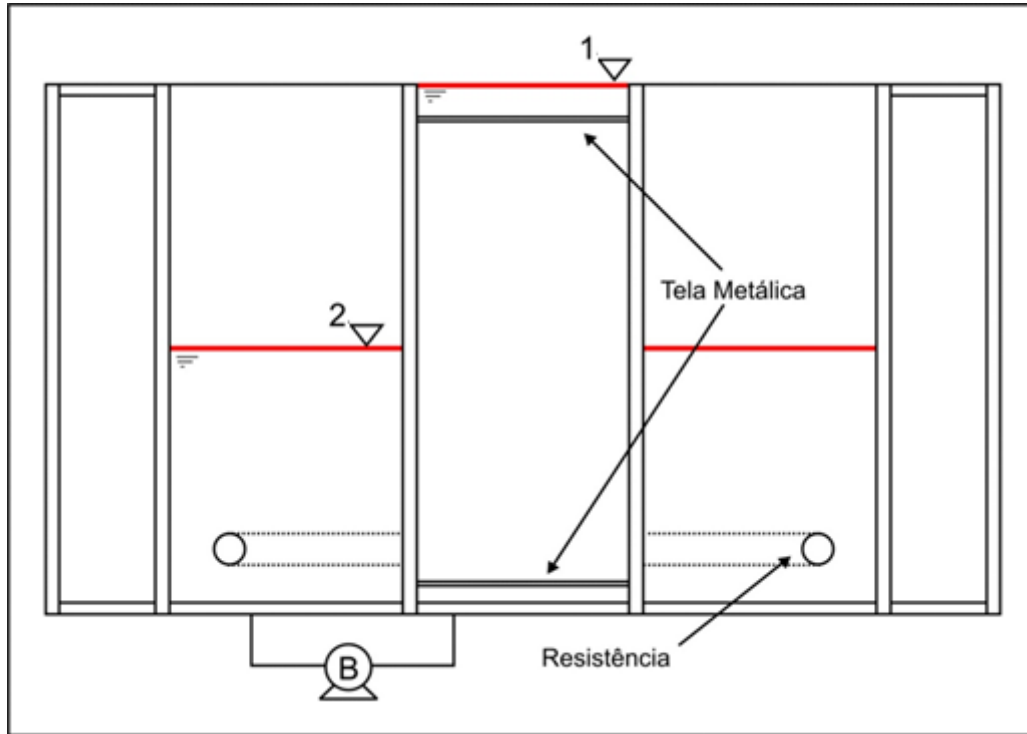


Figura 28 - Esquema Utilizado para o Dimensionamento da Bomba

Através da equação de energia, sabe-se que:

$$H_2 + H_{bomba} = H_{grãos} + H_1 \quad (Eq. 46)$$

Na qual H_1 é a altura manométrica na seção 1, H_2 é a altura manométrica na seção 2, H_{bomba} é a altura manométrica da bomba, e $H_{grãos}$ é a altura manométrica que representa a perda de carga causada pelos grãos.

A altura manométrica dos grãos pode ser encontrada utilizando a equação geral de Ergun, a qual define a perda de carga em escoamentos através de leito particulado fixo:

$$\Delta P_{bomba} = \frac{150\mu_f v_1 L_{leito}}{\phi_p^2 D_p^2} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + \frac{1,75\rho_f v_1^2 L_{leito}}{\phi_p D_p} \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (Eq. 47)$$

Nessa equação μ_f é a viscosidade dinâmica do fluido, v_1 é a velocidade do escoamento, L_{leito} é o comprimento do leito, ϕ_p é a esfericidade do

particulado (grãos), D_p é o diâmetro das partículas, ρ_f é a densidade do fluido, e ε é a porosidade do particulado.

A porosidade é definida como:

$$\varepsilon = \frac{\text{Volume vazio}}{\text{Volume total do leito}} \quad (\text{Eq. 48})$$

A velocidade do escoamento pode ser encontrada através de:

$$Q_1 = v_1 A_1 \quad (\text{Eq. 49})$$

$$v_1 = \frac{4Q_1}{\pi d_1^2} \quad (\text{Eq. 50})$$

Definida a perda de carga nos grãos, tem-se que:

$$H_{Gr\tilde{a}o} = \frac{\Delta P}{\gamma_{mosto}} \quad (\text{Eq. 51})$$

Na qual γ_{mosto} é o peso específico do mosto.

Das (Eq. 46) e (Eq. 51)

$$\frac{p_2}{\gamma_{mosto}} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + H_{bomba} = \frac{\Delta P}{\gamma_{mosto}} + \frac{p_1}{\gamma_{mosto}} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 \quad (\text{Eq. 52})$$

Onde p_1 e p_2 são as pressões das seções 1 e 2.

Através equação da continuidade:

$$Q_1 = Q_2 \quad (\text{Eq. 53})$$

$$v_2 = \frac{4Q_1}{\pi d_2^2} \quad (\text{Eq. 54})$$

Logo, simplificando a (Eq. 52), tem-se que:

$$H_{bomba} = \frac{\Delta P}{\gamma_{mosto}} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} + z_1 - z_2 \quad (Eq. 55)$$

$$H_{bomba} = \frac{\Delta P}{\gamma_{mosto}} + \frac{8Q_1^2}{g\pi^2} \left(\frac{1}{d_1^4} - \frac{1}{d_2^4} \right) + z_1 - z_2 \quad (Eq. 56)$$

Durante o funcionamento da máquina o recipiente interno (V_1) estará sempre completamente preenchido pelo mosto, logo a diferença de cotas z_1 e z_2 pode ser determinada através das relações de volume:

$$V_{Cerv} = V_{Cerv1} + V_{Cerv2} \quad (Eq. 57)$$

Na qual V_{Cerv} é o volume total de cerveja produzida pela máquina, V_{Cerv1} é o volume de cerveja contido no recipiente interno (V_1), e V_{Cerv2} é o volume de cerveja contido no recipiente externo (V_2).

$$V_{Cerv} = 20L = 20 \times 10^6 \text{ mm}^3 \quad (Eq. 58)$$

$$V_{Cerv2} = \frac{h_2 \pi (d_2^2 - d_1^2)}{4} = V_{Cerv} - V_{Cerv1} \quad (Eq. 59)$$

$$h_2 \cong 90 \text{ mm} \quad (Eq. 60)$$

$$z_1 - z_2 = H - h_2 \cong 270 \text{ mm} \quad (Eq. 61)$$

Onde h_2 é a altura da cerveja no recipiente externo, medindo-se a partir do fundo da panela.

Logo de (Eq. 56) e (Eq. 61):

$$H_{bomba} = \frac{\Delta P}{\gamma_{mosto}} + \frac{8Q_1^2}{g\pi^2} \left(\frac{1}{d_1^4} - \frac{1}{d_2^4} \right) + 0,27 \quad (Eq. 62)$$

Finalmente, definida a altura manométrica da bomba é possível calcular sua potência a partir da equação (Eq. 63).

$$N_{bomba} = \gamma_{mosto} Q_1 H_{bomba} \quad (Eq. 63)$$

Para a resolução das equações anteriores foram utilizados os parâmetro apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros do Modelo Hidráulico

Parâmetro	Valor	Unidade
μ_f	0,000404	$N.s/m^2$
ρ_f	10000	kg/m^3
D_p	0,003	m
ε	0,15	-
φ_p	0,85	-
L_{leito}	0,257142857	m
Q	0,000333333	m^3/s
d_2	0,366602656	m
d_1	0,222519373	m
A_1	0,038888889	m^2
V_1	0,008571429	m/s

Utilizando os parâmetros mencionados, a (Eq. 63) resulta em uma potência para bomba de:

$$N_{bomba} = 12,44 W \quad (Eq. 64)$$

3.6 SUBSISTEMA ELÉTRICO

O subsistema elétrico do projeto engloba o controle dos demais subsistemas e também é responsável pela alimentação de todos os componentes da máquina. A seguir, sua confecção será explicada em detalhes quanto a alimentação e quanto aos componentes eletrônicos utilizados.

3.6.1 COMPONENTES DO SUBSISTEMA ELÉTRICO

Os componentes utilizados para todo o controle e alimentação do protótipo são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Componentes do Subsistema Elétrico

Componentes	Características	Observações
Arduino UNO R3		Arduino Master
Arduino UNO R3		Arduino Slave
Módulo Relé 2 Canais	10 A, 110/220V	Acionador das Resistências
Módulo Relé 2 Canais	10 A, 110/220V	Acionador da Bomba
Protoboard		
Bomba Hidráulica CPSS-CI-1	110V, 38 W	
Resistência 1	220 V, 1500 W	
Resistência 2	220 V, 1300 W	
Shield LCD com Teclado		Painel de Controle
Sensor DS18B20	Precisão de 0,5 °C	Sensor de Temperatura
jumpers		
Pilhas	6 pilhas de 1,5 V	Acionamento dos Relés
Leds	2 Leds	Identificação do Estado das Resistências
Resistor	2 Resitores de 1 kΩ	Proteção dos Leds
Resistor	10 kΩ	Acionamento do Sensor de Temperatura
Fontes de Alimentação	2 Fontes, 9V	Alimentação dos dois Arduinos
Plugues Macho	3 Plugues Machos	Ligação das Resistências e da Bomba
Plugues Fêmeas	3 Plugues Fêmeas	Ligação das Resistências e da Bomba

3.6.2 SISTEMA DE CONTROLE

Para o sistema de controle geral da máquina foram utilizados dois controladores Arduino UNO R3 conectados por meio de uma comunicação Master/Slave realizada por meio das portas analógicas A5 e A5 de ambos os controladores. Os dois Arduinos foram necessários devido ao fato de o controle de temperatura executar seu processo a cada 5 segundos e não de forma ininterrupta, o que impossibilita que o controle do LCD e, conseqüentemente o controle dos demais componentes sejam acionados simultaneamente. Dessa forma, o Arduino Master fica dedicado exclusivamente ao sistema de controle da temperatura, enquanto que o Arduino Slave é responsável por controlar o LCD

de interface com o usuário, por realizar o controle do status (ligada ou desligada) da bomba e também por enviar para o Master o *setpoint* de temperatura inserido pelo usuário. Além de enviar a informação do *setpoint* para o Master, o Arduino Slave também recebe a informação da temperatura atual medida pelo sensor através do Master, o que possibilita que essa temperatura seja mostrada para o usuário no visor LCD com atualização de 5 em 5 segundos. Dessa forma, o usuário pode acompanhar quase em tempo real a temperatura durante todo o processo da fabricação da cerveja. O circuito descrito é mostrado na Figura 29.

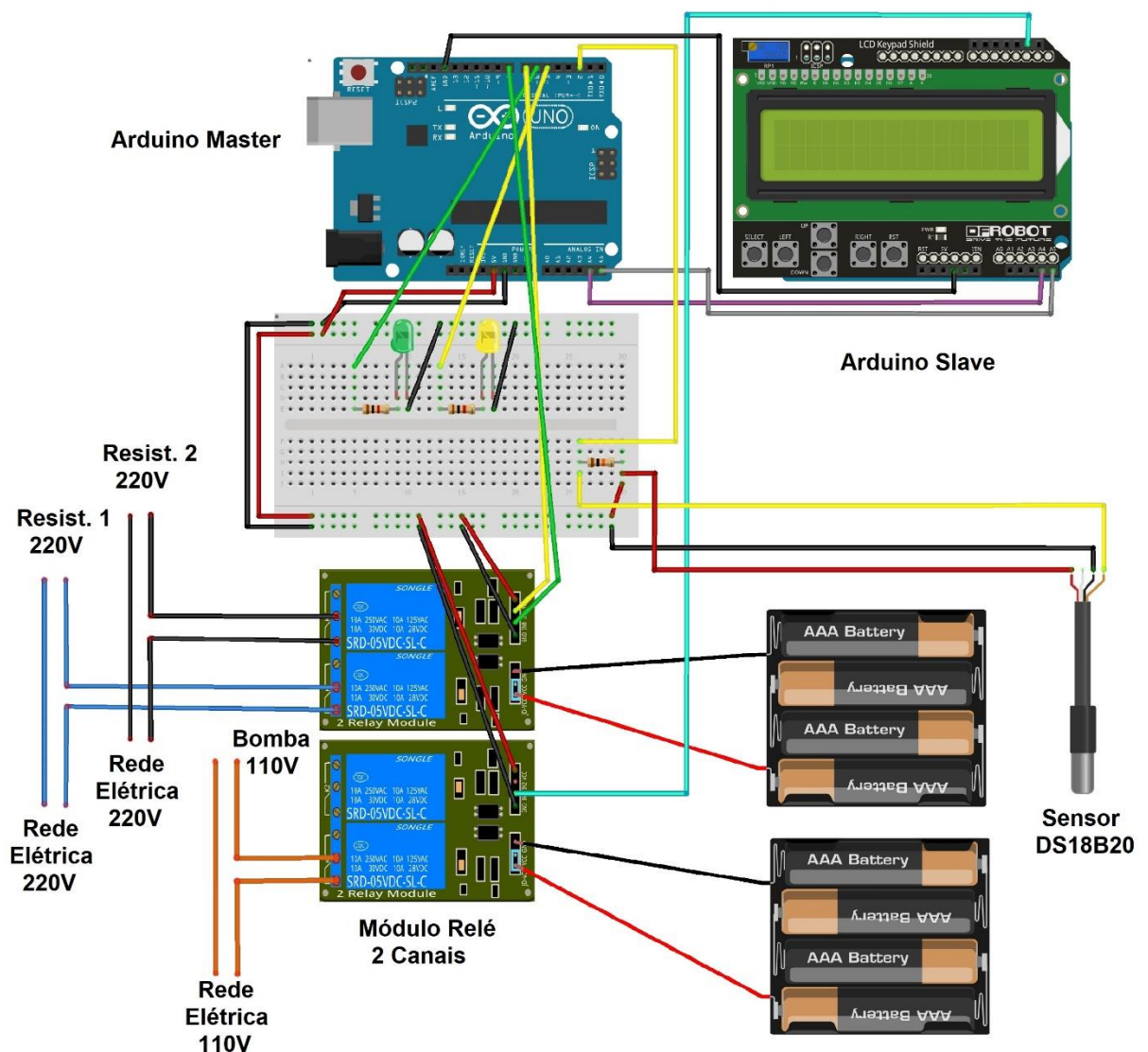


Figura 29 - Circuito de Controle

Como já mencionado, o acionamento das resistências, é realizado por meio do Master, e para isso, foi utilizado um módulo Relé de 2 canais com 5V de alimentação e carga nominal de 10 A, 220V, o que possibilita o acionamento de cargas de alta voltagem por meio de sinais de 5V de tensão. Na Figura 29, os leds amarelo e vermelho, acionados pelos pinos 5 e 6 do Arduino Master, servem para indicar o status das duas resistências, que são acionadas por meio dos pinos 7 e 8.

O LCD foi acoplado diretamente sobre o Arduino UNO Slave, como pode ser visto na figura anterior, tornando a ligação compacta e diminuindo, assim, a utilização de fiação. Como pode ser visto na figura, o Arduino Slave aciona a bomba por meio de seu pino 2. O acionamento é realizado por meio de um módulo Relé de 2 canais, similar ao utilizado para as resistências, no entanto, neste caso é utilizado apenas um dos canais, uma vez que apenas um equipamento está sendo acionado. É interessante notar a presença das pilhas na alimentação dos dois módulos relés de 2 canais. Essa alimentação é necessária para isolar o o circuito de alta tensão do circuito de baixa tensão do Arduino, dessa forma os dois circuitos não apresentam nenhuma conexão física, tornando o circuito mais seguro.

O Arduino Slave também controla o LCD, que foi programado para apresentar três modos distintos de visualização, que podem ser alternados por meio da tecla “SELECT” de seu teclado. O primeiro modo, definido como padrão assim que todo o circuito é alimentado e ligado, apresenta as informações com relação ao controle de temperatura, como mostrado na Figura 30. Durante esse modo o usuário pode conferir a temperatura atual do mosto (lado esquerdo) e a a temperatura de *setpoint* (lado direito). Além disso, é possível ajustar o *setpoint* por meio das teclas UP e DOWN. Assim que a temperatura de *setpoint* é ajustada o controle térmico começa a agir automaticamente, sem a necessidade do pressionamento de nenhum outro botão de confirmação, o que torna o processo mais dinâmico.

O segundo modo de visualização pode ser ativado por meio da tecla SELECT quando o primeiro modo está ativado. No segundo modo há a visualização de um temporizador para auxiliar o usuário durante o processo de fabricação quanto ao tempo de permanência em cada etapa. A Figura 31 mostra esse modo de visualização do LCD.

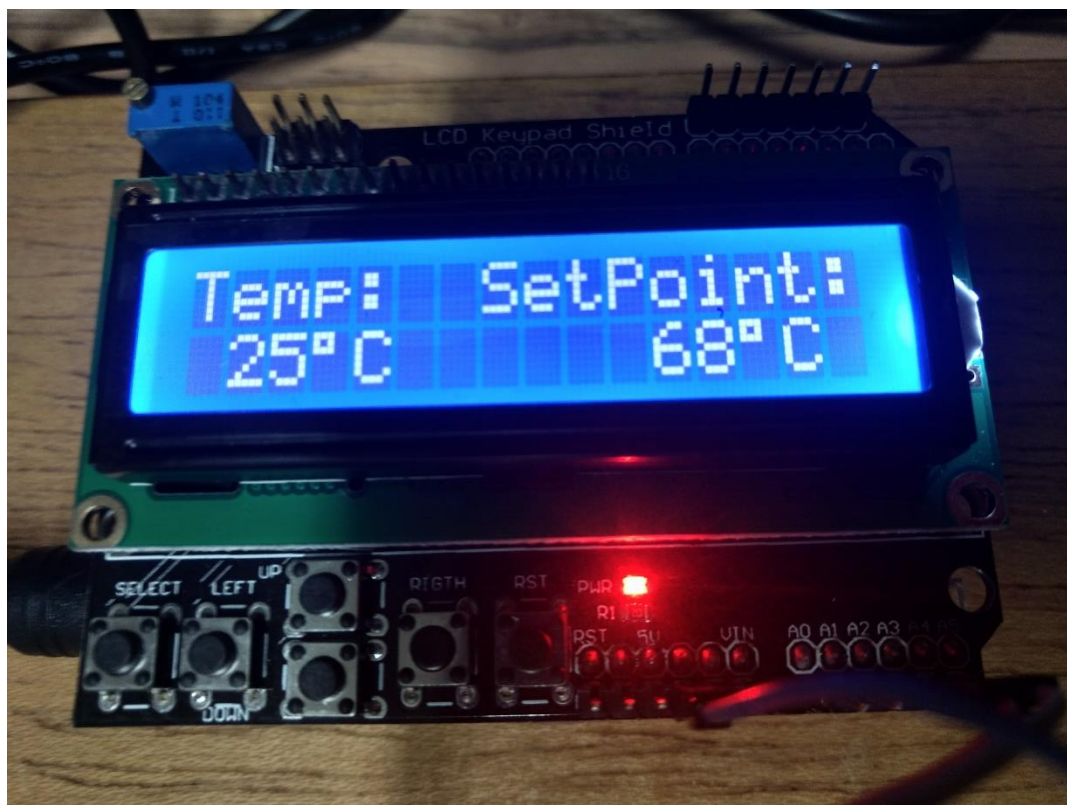


Figura 30 - Visualização do LCD – Temperatura

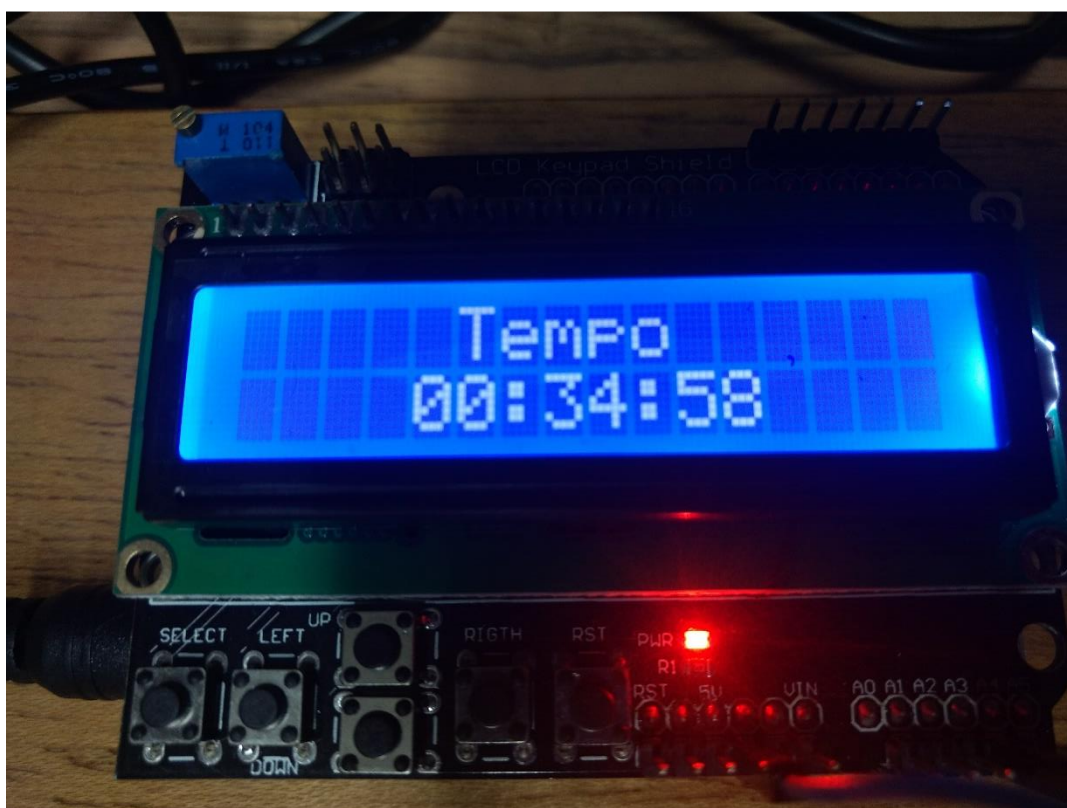


Figura 31 - Visualização do LCD - Temporizador

Durando esse modo o usuário pode interagir por meio das teclas LEFT, que zera o temporizador, UP, que adiciona uma hora ao tempo já percorrido, DOWN, que adiciona dez minutos ao tempo percorrido ou RIGHT, que adiciona um minuto ao tempo já percorrido. A tecla SELECT passa para o terceiro e último modo de visualização, que é mostrado na Figura 32.

Nesse modo, o usuário é capaz de visualizar e controlar o status da bomba. É possível interagir com as teclas UP e DOWN, para ligar ou desligar a bomba, respectivamente, o que faz com que seu status mude entre “LIGADA” e “DESLIGADA” na visualização do visor.



Figura 32 - Visualização do LCD - Status da Bomba

Dessa forma, o controle de acionamento de todos os subsistemas da máquina é realizado diretamente pelo visor de LCD conectado ao Arduino Slave, possibilitando menor atuação por parte do usuário.

Os códigos fonte para os Arduinos Master e Slave podem ser encontrados no Anexo D.

Com relação a alimentação por meio da rede elétrica, devido as resistências, que apresentam tensão de operação a 220V e a bomba, que apresenta tensão de operação a 110V, a máquina requer ligação nas duas voltagens (110V e 220V), para que ocorra funcionamento de forma correta.

3.6.3 PAINEL DE CONTROLE

Para melhor organização dos circuitos e componentes eletrônicos, todos os elementos foram dispostos em um painel de controle de modo que basta apenas que o usuário da máquina ligue as tomadas de 220V e 110V a rede elétrica para que a máquina comece sua operação. A Figura 33 mostra o painel de controle construído para o protótipo.

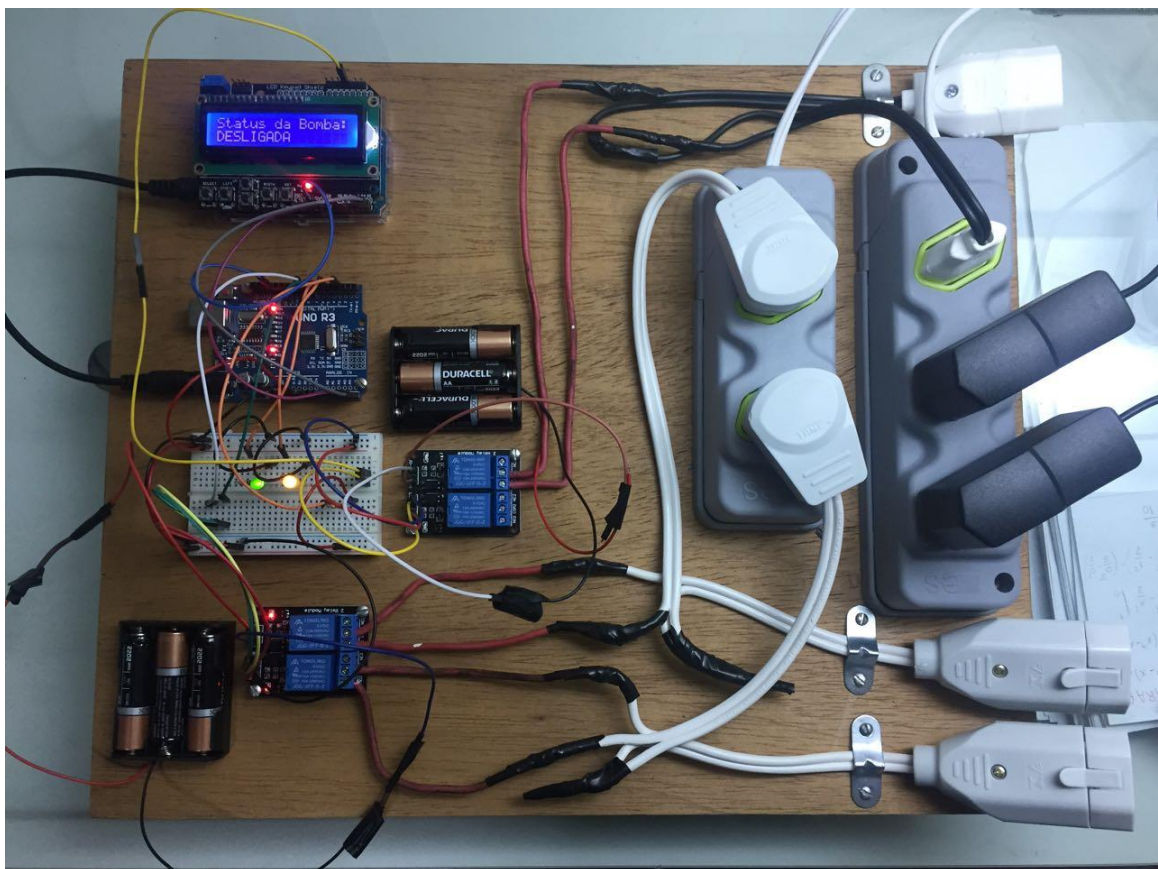


Figura 33 - Painel de Controle

4 RESULTADOS

4.1 PROTÓTIPO

A partir da análise preliminar das dimensões da máquina foi criada a primeira versão de desenho técnico da máquina, que pode ser visto no Anexo B. As versões finais dos desenhos técnicos podem ser encontradas nos Anexos G e H, ao final deste relatório.

O desenho técnico, por sua vez, possibilitou a produção do primeiro protótipo. Neste protótipo foram utilizadas chapas de ferro 1,2 mm, cortadas nas dimensões necessárias através de uma guilhotina e calandradas, quando necessária a forma tubular. Depois de devidamente cortadas e calandradas, a peças foram soldadas para dar forma ao primeiro protótipo. As figuras abaixo mostram o processo de solda.

Na Figura 34 é possível ver a soldagem das chapas já calandradas, para criação dos tubos. Ao todo foram produzidos 3 tubos, formando os 3 recipientes da máquina.



Figura 34 - Soldagem dos Tubos

A seguir, na Figura 35 é mostrada a soldagem da base máquina.



Figura 35 - Soldagem da Base da Máquina

Finalmente são soldados os tubos na base, como mostrado pela Figura 36 e pela Figura 37.



Figura 36 - Soldagem dos Tubos na Base



Figura 37 - Posicionamento dos Tubos para Solda

O resultado final é apresentado pelas quatro próximas figuras:



Figura 38 - Vista Diagonal do Primeiro Protótipo

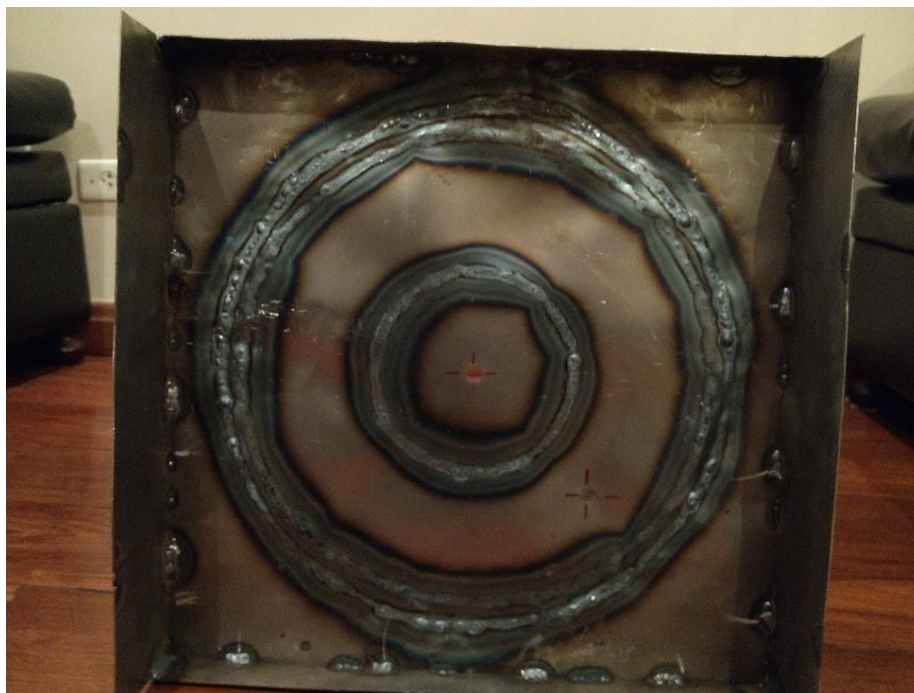


Figura 39 - Vista Inferior do Protótipo



Figura 40 - Vista Superior do Protótipo



Figura 41 - Vista Frontal do Protótipo

Com a fabricação do primeiro protótipo finalizada foi possível realizar os testes necessários para verificar e estudar o funcionamento da máquina. Esses testes serão apresentados a seguir. Vale ressaltar que o subsistema térmico não foi implementado ao protótipo neste primeiro momento, mas que para fins de teste foram utilizadas duas resistências elétricas instaladas de forma externa à máquina, possibilitando uma pré-análise quanto ao comportamento térmico do projeto.

Primeiramente, foi montada a configuração da máquina utilizando o protótipo fabricado e os equipamentos a seguir listados:

- Bomba alimentícia (Figura 42)
 - Modelo: Chugger SS-C
 - Material: aço inox
 - Fluxo máximo 22.7 litros por minuto
 - Potência 0,04 HP/ 0,029 KW
 - Voltagem 115V 50/60HZ
 - Entrada: ½ polegada
 - Saída: ¾ polegada
- Válvulas de esfera
 - Material: aço inox
 - Diâmetro: ½ polegada
- Mangueiras

- Material: aço inox
 - Diâmetro: ½ polegada
- Resistências elétricas
 - Potencia: 1000 W cada
- Mangueiras de borracha
- Tela de aço inox



Figura 42 - Bomba Alimentícia

A tela de aço inox foi utilizada para fabricação do copo interno para o aprisionamento dos grãos. O resultado final é apresentado a seguir na Figura 43.



Figura 43 - Tela de Aço Inox

Depois da finalização da montagem mostrada nas Figura 44 e Figura 45, o teste foi feito através das seguintes etapas:



Figura 44 - Montagem I



Figura 45 - Montagem II

1. Moagem do malte utilizando o moedor de grãos (Figura 46);



Figura 46 - Moagem dos Grãos

2. Posicionamento dos grãos dentro do copo (Figura 47);



Figura 47 - Posicionamento dos Grãos

3. Posicionamento do copo na máquina e fechamento do copo (Figura 48);



Figura 48 - Posicionamento do Copo no Interior da Máquina

4. Preenchimento do volume externo com água (Figura 49);



Figura 49 - Preenchimento do Volume Externo com Água

5. Acionamento da bomba e das resistências (Figura 50 e Figura 51);



Figura 50 - Acionamento da Bomba e das Resistências I



Figura 51 - Acionamento da Bomba e das Resistências II

6. Preenchimento do *Chiller* (Figura 52).



Figura 52 - Preenchimento do *Chiller*

O teste realizado foi de suma importância, pois através dele foi possível validar algumas características e notar outras a serem aprimoradas para o protótipo final. Entre os principais pontos notados durante o teste estão:

- A validação do sistema hidráulico: o bombeamento de líquido pela parte inferior da máquina funciona de forma satisfatória, sem nenhum tipo de entupimento e passando por todos os grãos de forma homogênea (os grãos na periferia da tela são “lavados” pela mesma quantidade de líquido do que os grãos no centro ou em qualquer outra parte da tela)
- O funcionamento adequado da tela metálica: a tela metálica consegue filtrar bem o mosto enquanto aprisiona os grãos, é leve, de baixo custo e de fácil montagem. O fato da sua parte superior não aquecer de forma significativa durante o funcionamento da máquina permite que o usuário a retire de dentro do recipiente interior com a mãos, sem a necessidade de qualquer acessório, como pode ser visto na Figura 53.

- Aumento do volume interno: a primeira estimativa do espaço ocupado pelos grãos era inferior ao espaço real ocupado
- Aumento da potência das resistências: no teste foram utilizadas duas resistências de 1000W cada, e percebeu-se que o tempo para o aquecimento da água era muito longo, aproximadamente 40 minutos para esquentar a água da temperatura ambiente até 60° C
- Aumento do diâmetro de saída do *chiller*: a capacidade de troca de calor do *chiller* ficou limitada pela vazão de água dentro dele, que por sua vez ficou restringida pelo diâmetro de saída



Figura 53 - Retirada da Tela Metálica

Levando em consideração os resultados obtidos devido ao primeiro protótipo, foi criada uma segunda versão que, diferentemente da primeira, utiliza o controle de temperatura e que foi feita em aço inoxidável 304, material muito utilizado na indústria alimentícia. Além disso, todos os pontos de atenção do primeiro teste foram corrigidos, o recipiente interno foi redimensionado para caber os grãos, as novas resistências utilizadas somam 2800W diminuindo o tempo de aquecimento da água e o diâmetro de saída do *chiller* foi aumentado. O resultado é apresentado a seguir através da Figura 54, Figura 55, Figura 56, Figura 57, Figura 58 e Figura 59.



Figura 54 - Protótipo Montado I



Figura 55 - Protótipo Montado II



Figura 56 - Protótipo Montado III



Figura 57 - Protótipo Montado IV



Figura 58 - Vista Superior do Protótipo Montado

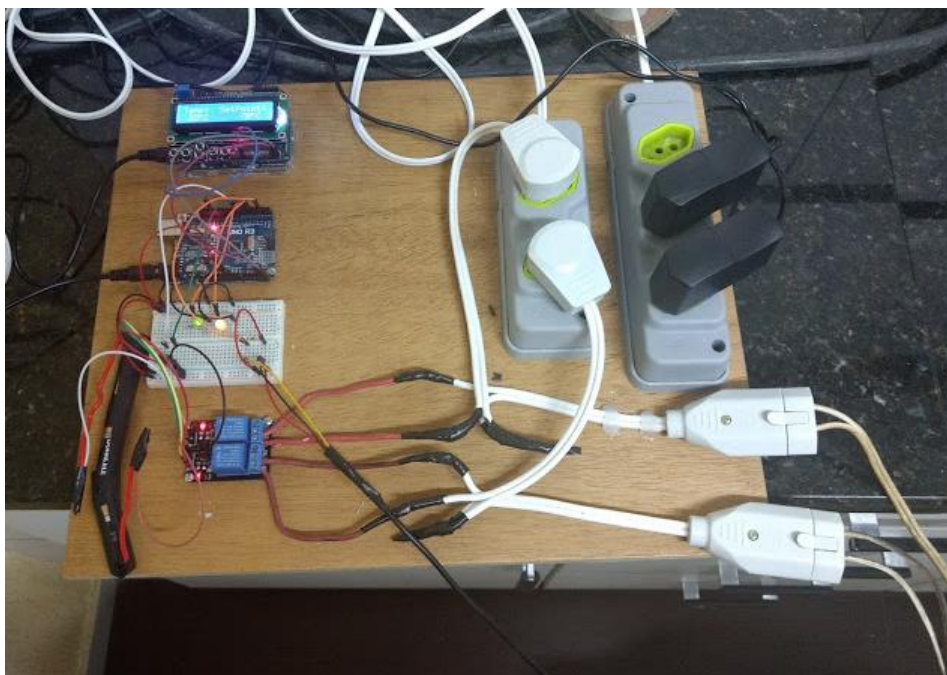


Figura 59 - Painel de Controle Instalado

Utilizando o segundo protótipo foram realizados outros testes, novamente com o intuito de aprimorar a máquina e aproximá-la a um produto final. Os principais pontos notados durante esses testes foram:

- O funcionamento adequado do controle térmico: o sistema térmico desempenha bem o seu papel, obedecendo os limites de 1°C das faixas de temperatura
- Potência suficiente das resistências: os 2800W de potência foram capazes de aquecer água de 24°C a 73°C em apenas 22min,
- As novas dimensões da tela metálica foram suficientes para o aprisionamento dos grãos
- Durante os testes a tampa superior da tela metálica foi removida do projeto, pois foi constatado que ela não era necessária para aprisionar os grãos. A Figura 60 mostra a tela ainda com a tampa.
- A forma de construção da tampa inferior da tela metálica dificulta a lavagem: alguns grãos ficaram presos na borda da tampa tornando a limpeza menos prática
- O diâmetro de saída do *chiller* continua sendo um limitante para a quantidade de troca de calor no resfriamento, que não ocorreu de forma satisfatória



Figura 60 - Tela Metálica e Tampa

De forma geral os testes dos protótipos mostraram que o projeto da máquina atendeu as expectativas e não apresentou nenhum problema grave. Os funcionamentos das partes hidráulicas e térmicas ocorreram conforme foram previstos, sem nenhum entupimento e dentro da tolerância de temperatura.

4.2 DESENHOS TÉCNICOS

Os desenhos técnicos são fundamentais para criação de um produto final, pois permitem a visualização prévia do resultado antes da fabricação, o que pode ser útil na previsão de erros de projeto e até mesmo na melhora do design.

Os desenhos técnicos foram criados refletindo os resultados obtidos durante o projeto, e eles descrevem a forma de fabricação e montagem da máquina desenvolvida. É importante notar que foram desenhadas a máquina e uma base para acomodação da máquina, da bomba, do controle de temperatura e dos demais componentes.

Os desenhos de fabricação podem ser vistos nos Anexos F, G, H e I, os desenhos de conjunto, por sua vez, nos Anexos J, K e L, e por último as vistas explodidas nos Anexos M e N.

5 ANÁLISES

5.1 PROTÓTIPO

Os testes dos protótipos foram de muita importância para o desenvolvimento do projeto, através deles os pontos de atenção puderam ser notados e corrigidos. Através do primeiro protótipo foram observados problemas quanto ao tamanho do recipiente interno, a potência da resistência e o diâmetro de saída do *chiller*, os quais foram corrigidos no segundo protótipo, com exceção do diâmetro do *chiller*. No segundo protótipo foi percebido que a tampa da tela metálica não era necessária, que a forma de construção da tela dificultava a limpeza e que o problema do *chiller* ainda não havia sido corrigido, mesmo após o aumento do diâmetro.

Além dos pontos notados de forma mais objetiva, os protótipos foram importantes por evidenciar outros aspectos do projeto, como a necessidade de uma base específica para a panela devido as conexões na parte inferior dela, e a forma de construção dos componentes. Mais especificamente, a construção da panela é de grande dificuldade devido a utilização de solda em uma chapa fina de aço, a qual devido ao seu aquecimento acaba deformando e dificultando a fabricação.

Apesar dos problemas citados acima, é importante notar que o desenvolvimento de um produto é um processo iterativo e dificilmente é obtido um resultado final satisfatório sem a realização de diversos testes e modificações. Posto isto, é preciso notar também que a máquina desempenha de forma adequada a sua função principal, e que as mudanças que viessem a ocorrer seriam em pontos específicos, sem alterar o seu modo de funcionamento principal.

Durante o teste do segundo protótipo foram realizadas duas medições, comuns na fabricação de cerveja artesanal, para a validação do funcionamento da máquina. A primeira delas foi o teste de iodo que confirma a conversão do amido em açúcares menores, quando o mosto para de reagir com o iodo e a mistura de ambos fica com a cor do próprio iodo. A segunda foi um teste simples

para testar a clarificação da cerveja. Ambas as medições, que podem ser vistas na Figura 61, confirmam o funcionamento correto da máquina.



Figura 61 - Teste de lodo e de Clarificação

5.2 DESENHOS TÉCNICOS

Os desenhos técnicos da máquina foram criados pensando no produto final, e eles mostram de forma completa como ela deve ser construída e montada. A construção da tela metálica é facilitada com informações adicionais as contidas nos desenhos, devido ao método de sua confecção. Como pode ser visto na Figura 62, ela foi construída através da dobra de uma tela de aço e apertada nas extremidades através de duas chapas finas o que proporcionou uma rigidez adequada e eficiência no aprisionamento dos grãos de malte durante todo o processo de fabricação da cerveja.



Figura 62 - Construção da Tela Metálica

5.3 SISTEMA DE CONTROLE

O sistema de controle da máquina se mostrou bastante satisfatório, atendendo totalmente as necessidades demandadas pelo projeto. A utilização de dois micros controladores Arduino UNO conectados via uma comunicação do tipo Master / Slave forneceu liberdade para que o usuário pudesse navegar entre os diferentes modos de visualização do visor LCD, alterando, se assim desejasse, a temperatura de *setpoint* e o status de acionamento da bomba em tempo real, enquanto que o Arduino Master se dedica ao controle exclusivo da temperatura, uma vez que sua atualização é realizada de 5 em 5 segundos.

5.4 SUGESTÕES DE MELHORIAS E OTIMIZAÇÕES

Apesar do bom funcionamento e do cumprimento dos objetivos a que o protótipo se propôs, algumas melhorias e otimizações puderam ser pensadas, durante os testes realizados, para uma versão definitiva do protótipo. Entre as melhorias, têm-se:

- Tampa: Observou-se que durante o processo de fabricação da cerveja, seria interessante a existência de uma tampa confeccionada por tela metálica e de fácil encaixe, o que evitaria que partículas indesejadas caíssem no mosto. Pensou-se em uma tampa confeccionada a partir de uma tela metálica, pois caso fosse inteiramente fechada, a tampa provocaria aumento de pressão no interior da máquina durante o processo, o que seria indesejado;
- Maior nível de automatização: Percebeu-se que seria interessante incorporar à programação um maior nível de automatização para a máquina. Uma proposta seria a possibilidade de o usuário, ao inicializar a máquina, pudesse inserir todas as rampas de temperatura utilizadas na receita que está fabricando, bem como o tempo em cada degrau de temperatura. Além disso, outra funcionalidade interessante seria a possibilidade de armazenamento de receitas na memória da máquina, de modo que o usuário pudesse simplesmente escolher o número da receita e a partir de então os valores das rampas e intervalos de tempo de cada etapa seriam inicializados automaticamente pela máquina. Apesar dessas mudanças, deve-se manter a opção de utilização manual, para que o usuário tenha a liberdade de alterar tanto tempo como intensidade dos degraus de temperatura;
- Voltagem unificada: Como pode ser constatado, o protótipo requer ligação tanto na rede 220 V, por conta das resistências, como na rede 110 V, por conta dos demais componentes. Para uma versão final seria interessante a utilização de apenas uma voltagem para todos os componentes, de forma a facilitar a alimentação e as ligações elétricas do protótipo;
- Prevenção de oxidação: Durante a realização dos testes da máquina, mais precisamente durante a etapa de fervura e resfriamento, a bomba permaneceu ligada, recirculando a água cervejeira. Porém na fabricação de uma cerveja não é interessante que o líquido fique em contato com o oxigênio enquanto quente, devido a oxidação. A oxidação prejudica o sabor da cerveja, e por isso é desejável que nos próximos testes e protótipos seja desenvolvida uma maneira de

realizar as etapas de fervura e resfriamento sem a recirculação da água cervejeira;

- *Whirlpool*: Durante a etapa de resfriamento pode-se realizar um processo em paralelo chamado de *whirlpool*. O primeiro benefício que se tem ao realizar o *whirlpool* é uma maior clarificação do mosto, pois o processo ajuda da sedimentação das partículas em suspensão, resultando em uma cerveja mais límpida. Além disso o *whirlpool* acelera o resfriamento do mosto, e previne o DMS, o dimetilsulfureto, que é um o composto prejudica o sabor da cerveja. A forma de construção da máquina não permite a realização do *whirlpool*, por causa da parede do recipiente interno, que impede a migração das partículas para o centro da panela. Por isso é importante que numa próxima iteração do projeto fosse desenvolvida uma maneira de se realizar o *whirlpool*, ou um processo análogo que proporcionasse o mesmo resultado final para a cerveja.

6 CONCLUSÃO

O objetivo primordial deste trabalho foi o desenvolvimento de uma máquina para facilitar a produção de cerveja artesanal, por meio da automação e do desenvolvimento de métodos alternativos aos já existentes.

A metodologia utilizada foi, primeiramente, o estudo do processo de fabricação de cerveja para, posteriormente, estudar as máquinas presentes no mercado. Somente após estes estudos, iniciou-se o desenvolvimento do projeto, sendo o primeiro passo a divisão da máquina em subsistemas.

O primeiro dos sistemas desenvolvidos foi o sistema térmico. Seu funcionamento adequado é vital para a operação da máquina, uma vez que praticamente todas as etapas de fabricação de cerveja são sensíveis a temperatura. Desta forma, foi desenvolvido um modelo matemático que descrevesse de forma precisa a operação, além de fornecer suporte para a seleção da potência da resistência.

O segundo sistema desenvolvido foi o subsistema hidráulico, que conferiu a máquina um caráter inovador, em função do bombeamento do fluido pela parte inferior da máquina e da circulação contínua, possibilitando a brassagem e a clarificação ocorrerem ao mesmo tempo. O desenvolvimento deste sistema também auxiliou na seleção da bomba alimentícia que faria parte da máquina.

O último sistema desenvolvido foi o sistema elétrico, que tornou possível a automatização dos processos através de micro controladores, responsável pelo controle de temperatura e pelo acionamento da bomba.

O resultado dos três subsistemas foi o desenvolvimento dos primeiros desenhos de fabricação, que por sua vez deram origem ao primeiro protótipo. Este foi fundamental, pois evidenciou uma série de problemas, tais quais a potência insuficiente. Todavia, o principal benefício da elaboração deste protótipo foi a validação do funcionamento da máquina.

Posteriormente, na elaboração do segundo protótipo, os problemas observados no primeiro protótipo foram corrigidos, mantendo-se os pontos de desempenho satisfatório, como, por exemplo, a tela metálica., que funcionou de maneira eficiente. Ainda, a partir deste protótipo foram realizados novos testes,

completando-se mais uma iteração do projeto, antes da obtenção do produto final.

Utilizando todo o conhecimento levantado e obtido durante o projeto, foram desenvolvidos os desenhos técnicos (Anexos F a N), que descrevem a forma de fabricação e montagem da máquina. Além disso, neles está representado também o projeto de uma base para a panela, que abrigaria todos os componentes do projeto.

O resultado obtido deve passar por alguns testes e alterações antes de configurar um produto final, o que é natural no desenvolvimento de um produto desta natureza. Durante o teste do segundo protótipo, por exemplo, foram levantados alguns pontos a serem corrigidos como, o diâmetro de saída do *chiller*.

Contudo, de maneira geral máquina desenvolvida por esse trabalho teve desempenho muito satisfatório, pois a fabricação de cerveja foi de fato mais fácil e demandou menos tempo e esforço para o usuário. Além disso os sistemas hidráulico, térmico e elétrico atuaram dentro de suas especificações, e foram responsáveis por compor um bom conjunto.

Concluímos, desta forma, que os processos e elementos empregados na fabricação de cerveja, nos termos propostos neste projeto, tem aplicação prática na produção e manufatura de cervejas artesanais, contribuindo para a uma produção em um tempo reduzido, mantendo-se a qualidade do produto final.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MORADO, R. - *Larousse da Cerveja*. [S.l.: s.n.], 2009
- [2] http://www.cervejasdomundo.com/Na_antiguidade.htm - Acessado em 16/10/2016
- [3] SOUZA, S. R; PICARELLI, C. F. – *Projeto de Sistema de Automação de Brassagem* – Trabalho de Conclusão de Curso, Escola Politécnica da USP, 2014
- [4] <https://www.badenbaden.com.br/microcervejaria/processo-de-fabricacao/> Acessado em 12/10/2016
- [5] <http://www.engenhariadacerveja.com.br/2013/processo-de-producao-de-cerveja/> – Acessado em 14/10/2016
- [6] <https://rotenfussbier.wordpress.com/2012/09/24/alfa-e-beta-amilase/> Acessado em 16/10/2016
- [7] http://www.acervacarioca.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=62:fermentos&catid=3:insumos&Itemid=2 – Acessado em 16/10/2016
- [8] SHREVE, N. R. BRINK, J. A. Jr. *Indústrias de Processos Químicos*, 4th Ed. 1997. Cap. 31 – *Indústrias de Fermentação*.
- [9] <http://cervejaartesanalonline.blogspot.com.br/2011/06/sanitizacao-de-equipamentos.html> – Acessado em 17/10/2016
- [10] <http://www.vibe.com/2015/05/picobrew-zymatic/> - Acessado em 17/10/16

- [11] <http://masterbier.com.br/produtos/> 17/10/16 14:34 – Acessado em 17/10/2016
- [12] Cross, N. – *Design Thinking: Understanding How Designers Think and Work* – Berg, Oxford and New York, 2011
- [13] ADLER, Isabel; LUCENA, Brenda; RUSSO, Beatriz, VIANNA, Maurício; VIANNA, Ysmar - *Design Thinking: Inovações nos Negócio*, 2011, MJV Press
- [14] <http://www.homebrewtalk.com.br/h1showthread.php?t=403677> – Acessado em 24/04/2017
- [15] WYLEN, Van; BORHNAKKE; SONNTAG – Fundamentos da Termodinâmica, 2013 – 8ª ed., BLUCHER
- [16] INCROPERA, F. Frank; DEWITT David; BERGMAN Theodore; LAVINE Adrienne – *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*, 2011 – 7ª ed., LTC.

ANEXO A

Esse anexo traz os coeficientes das equações diferenciais em função de todos os parâmetros e propriedades explicitados durante o projeto

$$A = \frac{\left[\frac{2\pi H k_{Inox}}{\ln\left(\frac{r_2 + e}{r_2}\right)} + \frac{1}{\frac{1}{2\pi(r_3 + e)Hh_{conv, lateral}} + \frac{\ln\left(\frac{r_3 + e}{r_3}\right)}{2\pi H k_{Inox}}} \right]}{m_{Ar} c_{Ar}} \quad (Eq. 65)$$

$$B = - \frac{\left[\frac{2\pi H k_{Inox}}{\ln\left(\frac{r_2 + e}{r_2}\right)} \right]}{m_{Ar} c_{Ar}} \quad (Eq. 66)$$

$$C = - \frac{\left[\frac{T_{\infty}}{\frac{1}{2\pi(r_3 + e)Hh_{conv, lateral}} + \frac{\ln\left(\frac{r_3 + e}{r_3}\right)}{2\pi H k_{Inox}}} \right]}{m_{Ar} c_{Ar}} \quad (Eq. 67)$$

$$D = - \frac{\left[\frac{2\pi H k_{Inox}}{\ln\left(\frac{r_2 + e}{r_2}\right)} \right]}{m_{Mosto} c_{Mosto}} \quad (Eq. 68)$$

$$E = \left[2\pi H k_{Inox} \left(\frac{1}{\ln\left(\frac{r_2 + e}{r_2}\right)} + \frac{1}{\ln\left(\frac{r_1 + e}{r_1}\right)} \right) + \overline{h_{Mosto}} A_{s\ Mosto} \right] / m_{Mosto} c_{Mosto} \quad (Eq. 69)$$

$$F = - \left[\frac{2\pi H k_{Inox}}{\ln\left(\frac{r_1 + e}{r_1}\right)} \right] / m_{Mosto} c_{Mosto} \quad (Eq. 70)$$

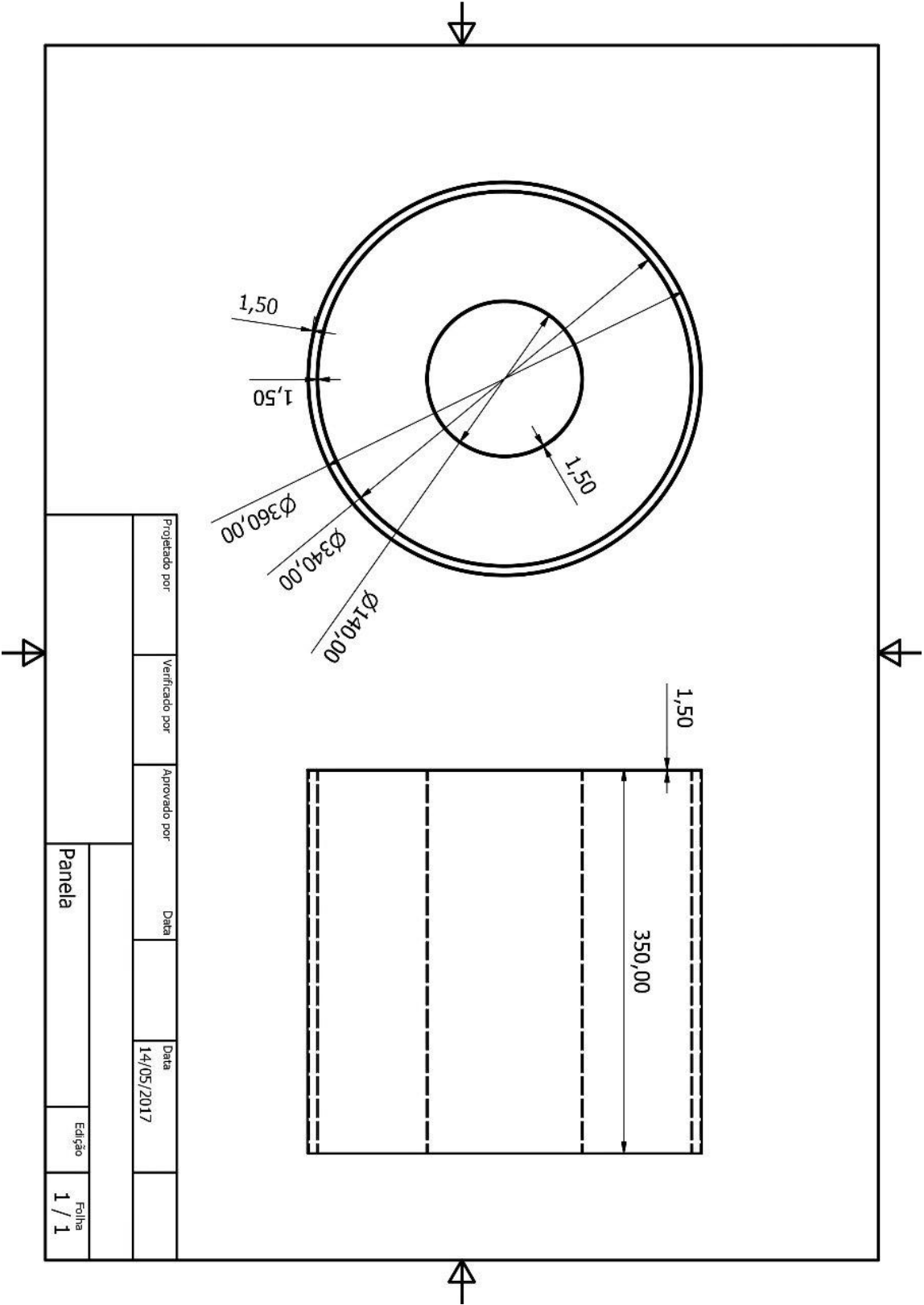
$$G = \frac{[\overline{h_{Mosto}} A_{s\ Mosto} T_{\infty} + \dot{q}_P]}{m_{Mosto} c_{Mosto}} \quad (Eq. 71)$$

$$H = - \left[\frac{2\pi H k_{Inox}}{\ln\left(\frac{r_1 + e}{r_1}\right)} \right] / m_{Grão} c_{Grão} \quad (Eq. 72)$$

$$I = \left[\frac{2\pi H k_{Inox}}{\ln\left(\frac{r_1 + e}{r_1}\right)} + \overline{h_{Grão}} A_{s\ Grão} \right] / m_{Grão} c_{Grão} \quad (Eq. 73)$$

$$J = - \frac{[\overline{h_{Grão}} A_{s\ Grão} T_{\infty}]}{m_{Grão} c_{Grão}} \quad (Eq. 74)$$

ANEXO B



ANEXO C

```
% DECLARA VARIÁVEIS

%Temperaturas em K
Tinf=293.15;
TasteriscoMosto=373.15;
TasteriscoGrao=373.15;
TasteriscoE=373.15;
Tmedia=353.15;

%Propriedades
kinox=15.7; %W/(m.K) em 353,15 K
alpha=2.737*10^(-5); %m²/s em 333,15 K
ni=1.922*10^(-5); %m²/s em 333,15 K
k=2.88*10^(-2); %W/(m.K) em 333,15 K
Pr=0.702; %em 333,15 K
beta=0.003002; % 1/K em 333,15 K

roMosto=1000; %kg/m³
roGrao=500; %kg/m³
roAr=0.987; %kg/m³

cMosto=4180; %KJ/(kg.K) 4.18
cGrao=2100; %KJ/(kg.K) 2.1
cAr=1008; %KJ/(kg.K) 1.008

g=9.8; %m/s²

%Medidas
r1=0.11; %m
r2=0.185; %m
r3=0.19; %m
H=0.36; %m
e=0.001; %m

%CALCULOS DA AREAS, PERÍMETRO E COMPRIMENTOS CARACTERÍSTICOS
AsMosto=pi*(r2²-(r1+e)²);
AsGrao=pi*r1²;
PMosto=2*pi*(r1+r2+e);
PGrao=2*pi*r1;
LMosto=AsMosto/PMosto;
LGrao=AsGrao/PGrao;

%CÁLCULO DOS NÚMEROS DE RAYLEIGH
RaLMosto=g*beta*(TasteriscoMosto-Tinf)*LMosto³/(ni*alpha);
RaLGrao=g*beta*(TasteriscoGrao-Tinf)*LGrao³/(ni*alpha);
RaLlateral=g*beta*(TasteriscoE-Tinf)*H³/(ni*alpha);

%CÁLCULO DOS NÚMEROS DE NUSSELT
if RaLMosto < 10⁷
    NuMosto=0.54*RaLMosto^(1/4);
else
    NuMosto=0.15*RaLMosto^(1/3);
end
```

```

if RaLGrao < 10^7
    NuGrao=0.54*RaLGrao^(1/4);
else
    NuGrao=0.15*RaLGrao^(1/3);
end

NuLateral=
(0.825+(0.387*RaLLateral^(1/6))/(1+(0.492/Pr)^(9/16))^(8/27))^2;

%CÁLCULO DOS COEFICIENTES DE CONVECÇÃO NATURAL

hMosto=NuMosto*k/LMosto;
hGrao=NuGrao*k/LGrao;
hLateral=NuLateral*k/H;

%CÁLCULO DOS COEFICIENTES DAS EQUAÇÕES DIFERENCIAIS
%cálculo das massas dos volumes de controle

VAr=pi*(r3^2-(r2+e)^2)*H;
VMosto=pi*(r2^2-(r1+e)^2)*H;
VGrao=pi*r1^2*H;

mAr=roAr*VAr;
mMosto=roMosto*VMosto;
mGrao=roGrao*VGrao;

%definição de qP

qP=3000; %Watts

Z=2*pi*H*kinox/log((r2+e)/r2);
Y=1/(1/(2*pi*(r3+e)*H*hLateral)+log((r3+e)/r3)/(2*pi*H*kinox));
W=2*pi*H*kinox/log((r1+e)/r1);

A=(Z+Y)/(mAr*cAr);
B=-Z/(mAr*cAr);
C=-Tinf*Y/(mAr*cAr);

D=-Z/(mMosto*cMosto);
E=(Z+W+hMosto*AsMosto)/(mMosto*cMosto);
F=-W/(mMosto*cMosto);
G=(hMosto*AsMosto*Tinf+qP)/(mMosto*cMosto);

H=-W/(mGrao*cGrao);
I=(W+hGrao*AsGrao)/(mGrao*cGrao);
J=-(Tinf*hGrao*AsGrao)/(mGrao*cGrao);

%coeficientes

A1= -
(2*pi*H*kinox/log((r2+e)/r2)+1/(1/(2*pi*(r3+e)*H*hLateral)+log((r3+e)/
r3)/(2*pi*H*kinox)))/(mAr*cAr);

B1=-(2*pi*H*kinox/log((r2+e)/r2))/(mAr*cAr);

```

```

C1=-
(Tinf/(1/(2*pi*(r3+e)*H*hLateral)+log((r3+e)/r3)/(2*pi*H*kinox)))/(mAr
*cAr);

D1=(2*pi*H*kinox*(1/log((r2+e)/r2)+1/log((r1+e)/r1))+hMosto*AsMosto)/(
mMosto*cMosto);

E1=-(2*pi*H*kinox/log((r1+e)/r1))/(mMosto*cMosto);

F1=-(2*pi*H*kinox/log((r2+e)/r2))/(mMosto*cMosto);

%Coeficiente que relaciona a potencia da resistência elétrica
G1=(hMosto*AsMosto*Tinf+qP)/(mMosto*cMosto);

H1=(2*pi*H*kinox/log((r1+e)/r1)+hGrao*AsGrao)/(mGrao*cGrao);

I1=-(2*pi*H*kinox/log((r1+e)/r1))/(mGrao*cGrao);

J1=-(hGrao*AsGrao*Tinf)/(mGrao*cGrao);

%CONDIÇÕES INICIAIS
TAr0=293.15;
TMosto0=293.15;
TGrao0=293.15;

```

ANEXO D

- **CÓDIGO FONTE ARDUINO MASTER**

```
#include <Wire.h>
#define SLAVE01 0x1

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <Wire.h>

//PINO DE LEITURA DO SENSOR
#define ONE_WIRE_BUS 2

//INSTANCIA O OBJETO ONE WIRE E SETA O PINO DO SENSOR
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);

//REPASSA AS REFERÊNCIAS DO ONEWIRE PARA O SENSOR DALLAS (DS18B20)
DallasTemperature sensor(&oneWire);

#define pSENSOR 2

#define pRES1 7
#define pRES2 8

#define pLED1 5
#define pLED2 6

int temperatura = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  //INICIALIZA O ARDUINO MASTER
  Wire.begin();

  pinMode(pSENSOR, INPUT);

  pinMode(pRES1, OUTPUT);
  pinMode(pRES2, OUTPUT);

  pinMode(pLED1, OUTPUT);
  pinMode(pLED2, OUTPUT);

  Serial.println("TEMPERATURAS");

  //INICIA O OBJETO DO SENSOR
  sensor.begin();
}

void loop() {

  //SENSOR
  //ENVIA O COMANDO PARA OBTER A TEMPERAURA
  sensor.requestTemperatures();
  // A temperatura em Celsius para o dispositivo 1 no índice 0 (é
  possível ligar varios sensores usando a mesma porta do arduino)
```

```

//SALVA A TEMPERATURA NUM VARIÁVEL FLOAT
float leitura=sensor.getTempCByIndex(0);
//IMPRIME A TEMPERATURA NA PORTA SERIAL
Serial.print("TEMPERATURA MEDIDA: ");
Serial.println(leitura);
//-----
//COMUNICAÇÃO COM OUTRO ARDUINO
//ENVIA A INFORMAÇÃO
temperatura=leitura;
Wire.beginTransmission(SLAVE01);
Wire.write(temperatura);
Wire.endTransmission();
Serial.print("TEMPERATURA ENVIADA PARA O LCD: ");
Serial.println(temperatura);
//RECEBE INFORMAÇÃO
Wire.requestFrom(SLAVE01,2);
int set_point= Wire.read() << 8 | Wire.read();
Serial.print("TEMPERATURA DE SET POINT: ");
Serial.println(set_point);
Serial.println(" ");
//-----

//DEFINE O SET POINT DE TEMPERATURA
float SetPointTemperatura=set_point;

//CONDIÇÕES PARA LIGAR OU DESLIGAR
if(leitura<SetPointTemperatura){
    digitalWrite(pRES1, LOW);
    digitalWrite(pRES2, LOW);
}
else if(leitura>=SetPointTemperatura){
    digitalWrite(pRES1, HIGH);
    digitalWrite(pRES2, HIGH);
}
//ACENDO OS LEDS DE VERIFICAÇÃO
if(digitalRead(pRES1)==LOW){
    digitalWrite(pLED1, HIGH);
}else if(digitalRead(pRES1)==HIGH){
    digitalWrite(pLED1, LOW);
}
if(digitalRead(pRES2)==LOW){
    digitalWrite(pLED2, HIGH);
}else if(digitalRead(pRES2)==HIGH){
    digitalWrite(pLED2, LOW);
}

delay(5000);

}

```

• CÓDIGO FONTE ARDUINO SLAVE

```

#include <Wire.h>
#define i2c_address 0x1

//Biblioteca para o display LCD
#include <LiquidCrystal.h>

#define pBOMBA      2

```



```

//VARIÁVEIS QUE CAPTURA A TEMPERATURA MEDIDA DO ARDUINO MASTER
char temp;

//FUNÇÕES AUXILIARES
void keyboardRead();
void relógio();

//VARIÁVEIS GLOBAIS
int adc_value = 0x00;
int segundos = 0, minutos = 0, horas = 0;
char auxOVF = 0x00;

boolean right = 0x00, butt01 = 0x00,
           up = 0x00, butt02 = 0x00,
           down = 0x00, butt03 = 0x00,
           left = 0x00, butt04 = 0x00,
           select = 0x00, butt05 = 0x00;

int MODO=1;
//se MODO=1 -> Temperatura, se MODO=2 -> Relógio, se MODO=3 -> bomba

//VARIÁVEIS DE TEMPERATURA MEDIDA E SET_POINT MOSTRADOS NO LCD
int temperatura,
    set_point = 20;

//HARDWARE DO LCD
LiquidCrystal disp(8, //RS no digital 8
                  9, //EN no digital 9
                  4, //D4 no digital 4
                  5, //D5 no digital 5
                  6, //D6 no digital 6
                  7); //D7 no digital 7

LiquidCrystal lcd(8, //RS no digital 8
                 9, //EN no digital 9
                 4, //D4 no digital 4
                 5, //D5 no digital 5
                 6, //D6 no digital 6
                 7); //D7 no digital 7

//ROTINA DE INTERRUPTÃO
ISR(TIMER2_OVF_vect)
{
    TCNT2 = 0x64; // Reinicializa o registrador do Timer2
    auxOVF++; //incrementa auxOVF

    if(auxOVF == 0x64) //auxOVF igual a 100d?
    {
        //sim...
        auxOVF = 0x00; //volta a ser zero
        segundos++; //incrementa segundos
        digitalWrite(13, !digitalRead(13)); //Inverte o estado da
saída
    }
}

//-----

//SETUP
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    Wire.begin(i2c_address);
}

```

```

Wire.onReceive(receivEvent);
Wire.onRequest(respondEvent);

//RELÓGIO
pinMode(13, OUTPUT);

TCCR2A = 0x00;    //Timer operando em modo normal
TCCR2B = 0x07;    //Prescaler 1:1024
TCNT2  = 0x64;    //Inicia conteúdo do Timer2 em 100d
TIMSK2 = 0x01;    //Habilita interrupção do Timer2
//-----
//BOMBA
pinMode(pBOMBA, OUTPUT);
digitalWrite(pBOMBA, HIGH);

disp.begin(16,2);          //Inicializa LCD 16 x 2
disp.setCursor(0,0);       //Posiciona cursor na coluna 2, linha 1
disp.print("Temp:  SetPoint:");
}
//-----

//LOOP
void loop(){

//INICIALIZA O TECLADO
keyboardRead();

relogio();

//TECLA RIGHT PRESSIONADA
if(right == 0x01)
{
    right = 0x00;
    //MOD0 1 PARA RIGHT
    if(MODO==1){

        //MOD0 2 PARA RIGHT
    }else if(MODO==2){
        minutos++;
        if(minutos > 59) minutos = 0x00;
        //MOD0 3 PARA RIGHT
    }else if(MODO==3){

    }

} //END IF RIGHT

//TECLA UP PRESSIONADA
if(up == 0x01)
{
    up = 0x00;
    //MOD0 1 PARA UP
    if(MODO==1){
        set_point=set_point+1;
        //MOD0 2 PARA UP
    }else if(MODO==2){
        horas++;
        if(horas > 23) horas = 0x00;
        //MOD0 3 PARA UP
    }else if(MODO==3){
        //LIGA A BOMBA
    }
}
}

```

```

        digitalWrite(pBOMBA, LOW);

    }

} //END IF UP

//TECLA DOWN PRESSIONADA
if(down == 0x01)
{
    down = 0x00;
    //MODO 1 PARA DOWN
    if(MODO==1){
        set_point=set_point-1;
    //MODO 2 PARA DOWN
    }else if(MODO==2){
        minutos = minutos + 10;
        if(minutos > 59) minutos = 0x00;
    //MODO 3 PARA DOWN
    }else if(MODO==3){
        //DESLIGA A BOMBA
        digitalWrite(pBOMBA, HIGH);
    }

}

} //END IF DOWN

//TECLA LEFT PRESSIONADA
if(left == 0x01)
{
    left = 0x00;
    //MODO 1 PARA LEFT
    if(MODO==1){

        //MODO 2 PARA LEFT
    }else if(MODO==2){
        segundos = 0;
        minutos = 0;
        horas = 0;
    //MODO 3 PARA LEFT
    }else if(MODO==3){

    }

}

} // END IF LEFT

//TECLA SELECT PRESSIONADA
if(select == 0x01)
{
    select = 0x00;
    if(MODO==1){
        MODO=2;
    }else if (MODO==2){
        MODO=3;
    }else if(MODO==3){
        MODO=1;
    }
}
} //END IF SELECT

//IMPRESSÃO
//IMPRESSÃO MODO 1
if(MODO==1){

```

```

//IMPRIME A PRIMEIRA LINHA
disp.setCursor(0,0);
//Posiciona cursor na coluna 2, linha 1
disp.print("Temp: SetPoint:");
//IMPRIME A TEMPERATURA
temperatura=temp;

if(temperatura<10){
    disp.setCursor(0,1);
    disp.print(" ");
    disp.setCursor(2,1);
}else if(temperatura<100){
    disp.setCursor(0,1);
    disp.print(" ");
    disp.setCursor(1,1);
}else if(temperatura=100){
    disp.setCursor(0,1);
}
disp.print(temperatura);
//-----
//IMPRIME O °C
disp.setCursor(3,1);
lcd.print((char)223);
disp.setCursor(4,1);
lcd.print("C");
disp.setCursor(5,1);
lcd.print(" ");
//-----
//IMPRIME O SET POINT
if(set_point<10){
    disp.setCursor(10,1);
    disp.print(" ");
    disp.setCursor(12,1);
}else if(set_point<100){
    disp.setCursor(10,1);
    disp.print(" ");
    disp.setCursor(11,1);
}else if(set_point=100){
    disp.setCursor(10,1);
}
disp.print(set_point);
//-----
//IMPRIME O °C
disp.setCursor(13,1);
lcd.print((char)223);
disp.setCursor(14,1);
lcd.print("C");
//-----
}
//IMPRESSÃO MODO 2
else if(MODO==2){
    disp.setCursor(0,0);
    disp.print("      Tempo      ");
    disp.setCursor(0,1);
    disp.print(" ");
    disp.setCursor(4,1);
    if(horas<10) disp.print("0");
    disp.print(horas);
    disp.print(":");
    if(minutos<10) disp.print("0");

```

```

        disp.print(minutos);
        disp.print(":");
        if(segundos<10) disp.print("0");
        disp.print(segundos);
        disp.setCursor(12,1);
        disp.print("    ");
    }
    //IMPRESSÃO MODO 3
    else if(MODO==3){
        disp.setCursor(0,0);
        disp.print("Status da Bomba:");
        disp.setCursor(0,1);
        if(digitalRead(pBOMBA)==LOW){
            disp.print("LIGADA    ");
        }else if(digitalRead(pBOMBA)==HIGH){
            disp.print("DESLIGADA    ");
        }
    }
}
//-----
//FUNÇÃO QUE RECEBE OS DADOS DO ARDUINO MASTER
void receivEvent(int x){
    temp=Wire.read();
}
//-----
//FUNÇÃO QUE ENVIA OS DADOS PARA O ARDUINO MASTER
void respondEvent(){
    uint8_t buffer[2];
    buffer[0] = set_point >> 8;
    buffer[1] = set_point & 0xff;
    Wire.write(buffer, 2);
}
//-----
//FUNÇÃO QUE AJUSTA O RELÓGIO
void relógio()
{
    if(segundos > 59)
    {
        segundos = 0x00;
        minutos++;

        if(minutos > 59)
        {
            minutos = 0x00;
            horas++;

            if(horas > 23) horas = 0x00;
        }
    }
}
//-----
/*****

```

FUNÇÃO PARA LEITURA DO TECLADO ANALÓGICO

Leu-se as respectivas tensões geradas na saída do teclado, para cada botão obtendo-se a seguinte tabela:

VALORES AD REPRESENTADOS PELAS TECLAS:

num	Nome	Tensão (V)	Digital
01	right	0,0000	0
02	up	0,7083	145
03	down	1,6102	330
04	left	2,4683	505
05	select	3,6205	741

Os valores da última coluna (Digital) são pertinentes à resolução ADC de 10 bits

Tensão Máxima = 5V
 Valor Máximo ADC = 1024

Constante de Conversão = $1024/5 = 204,8$

Multiplicou-se os valores da coluna Tensão (V) pela constante de conversão
 e arredondou-se para o inteiro mais próximo, obtendo-se assim os limites
 de cada uma das 15 teclas.

```

*****//
// FUNÇÃO DO TECLADO
void keyboardRead()
{
    adc_value = analogRead(A0);
    // TESTA OS BOTÕES SE FORAM OU NÃO PRESSIONADOS
    // SE FOI PRESSIONADO, SETA A RESPECTIVA FLAG
    if (adc_value < 50) butt01 = 0x01;
    else if (adc_value > 103 && adc_value < 200) butt02 = 0x01;
    else if (adc_value > 250 && adc_value < 380) butt03 = 0x01;
    else if (adc_value > 450 && adc_value < 550) butt04 = 0x01;
    else if (adc_value > 700 && adc_value < 800) butt05 = 0x01;

    // TESTA SE OS BOTÕES FORAM LIBERADOS
    //
    if (adc_value > 50 && butt01)
    {
        butt01 = 0x00;
        right = 0x01;
    }
    if (adc_value > 200 && butt02)
    {
        butt02 = 0x00;
        up = 0x01;
    }
    if (adc_value > 380 && butt03)
    {
        butt03 = 0x00;
        down = 0x01;
    }
    if (adc_value > 550 && butt04)
    {
        butt04 = 0x00;

```

```
        left    = 0x01;

    }
    if (adc_value > 800 && butt05)
    {
        butt05 = 0x00;
        select  = 0x01;

    }

} //END KEYBOARDREAD
//-----
```

ANEXO E

Este anexo tem como objetivo apresentar uma solução previamente considerada, mas que com o desenvolvimento do projeto se mostrou pouco adequada. Os motivos principais para não utilização desta solução são:

- Utilização de duas bombas, o que aumentaria consideravelmente o custo do protótipo;
- Não necessidade de reversão do fluxo.

Para melhor entendimento desses itens, os parágrafos que se seguem explicam em detalhes o funcionamento dessa solução.

A Figura 63 mostra um esquema da solução. O recipiente externo, indicado por (12), será responsável tanto pelo aquecimento inicial da água de brassagem, quanto pela fervura do mosto no processo de fervura propriamente dito. A resistência (6) age esquentando apenas o conteúdo presente no recipiente externo. O recipiente interno (3) será utilizado como forma de aprisionamento dos grãos de malte, estes que ficarão aprisionados durante todo o processo de produção da cerveja.

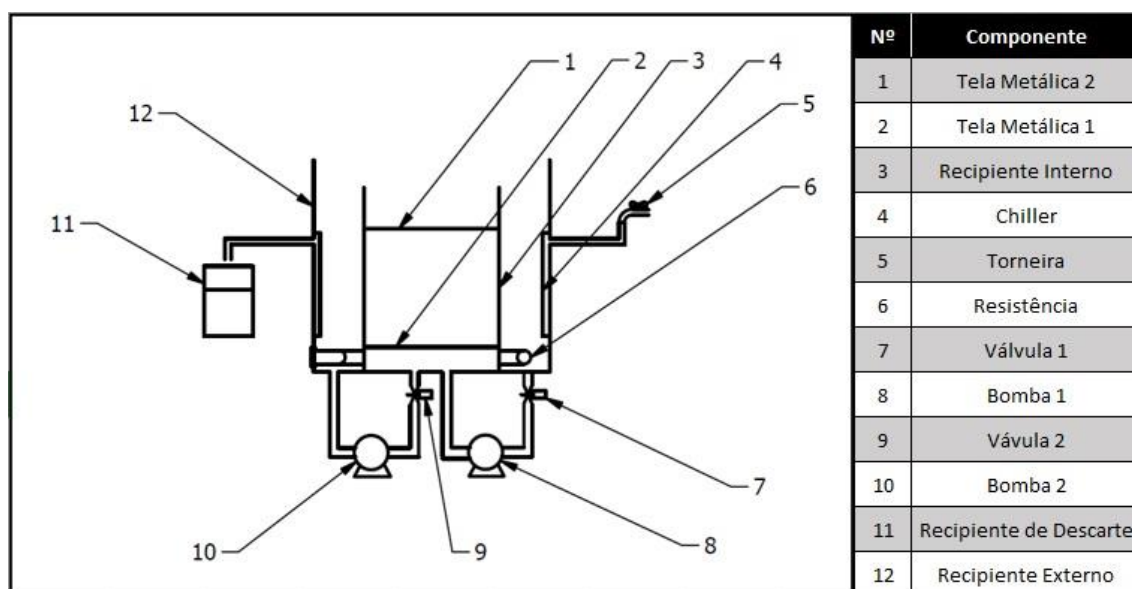


Figura 63 - Representação Esquemática da Solução

O processo de clarificação ocorrerá juntamente com o processo de brassagem e será realizado pela bomba 1 (8) responsável por levar a água

cervejeira do recipiente externo até o recipiente interno pela parte inferior da máquina. A válvula 1 (7) permite a passagem do líquido durante o processo de clarificação. A bomba 2 (10) é responsável por deslocar todo o líquido remanescente dentro do recipiente interno para o recipiente externo, após o processo de clarificação.

A seguir serão descritos a montagem inicial e todas as etapas realizadas pela máquina, detalhadamente:

- **Montagem**

Inicialmente, antes de a máquina operar automaticamente, o usuário deve inserir os ingredientes nos locais determinados. A quantidade de água requerida pela receita deve ser colocada no recipiente externo. Em seguida, deve ser colocada a tela metálica 1. O malte moído é então inserido no recipiente interno, acima da tela metálica 1, como mostrado na Figura 64.

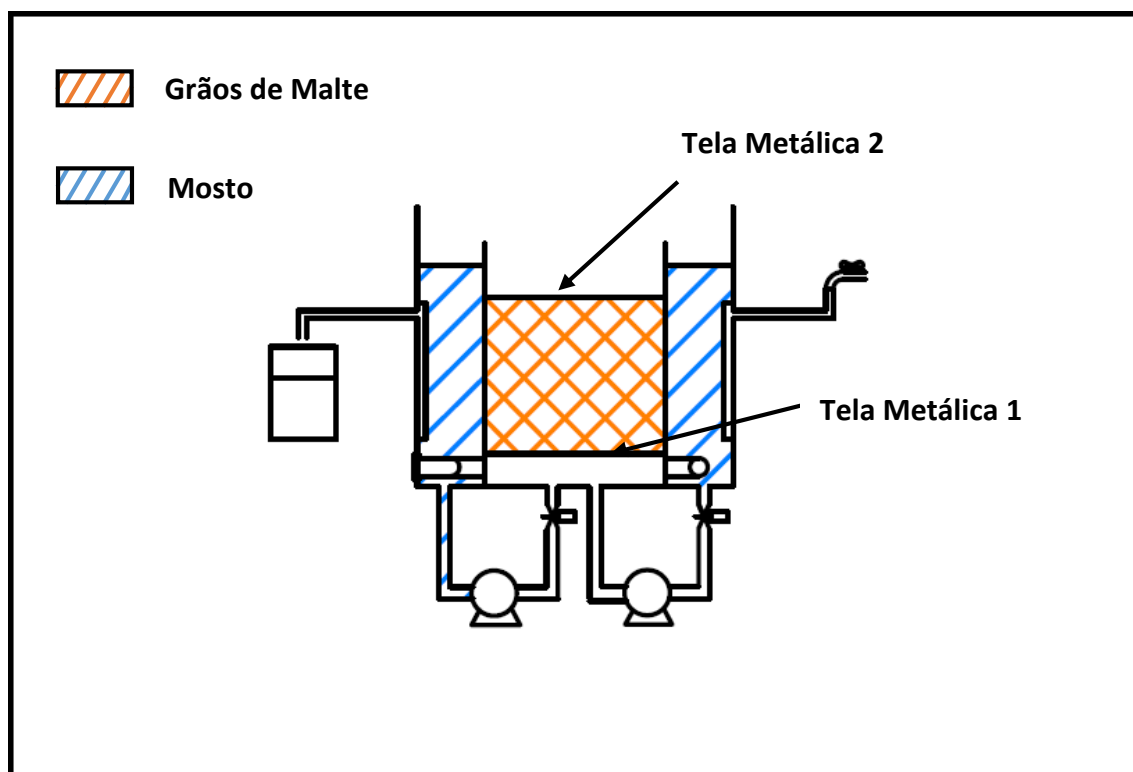


Figura 64 - Montagem

Após os grãos estarem posicionados, a tela metálica 2 é inserida no suporte superior do recipiente interno, de modo que o malte fique aprisionado entre as duas telas.

Após essas considerações, basta programar a máquina em seu painel de controle, com relação aos tempos e temperaturas de acordo com a receita utilizada.

- **Aquecimento**

Após a preparação da máquina, inicia-se o processo de produção da cerveja. Inicialmente a água que está no recipiente externo deve ser aquecida até a temperatura de brassagem proposta pela receita. Isso ocorre pelo acionamento da resistência elétrica representada na Figura 65. Nessa etapa, o a temperatura de brassagem, após atingida, deverá ser mantida constante para que o processo de brassagem seja realizado corretamente.

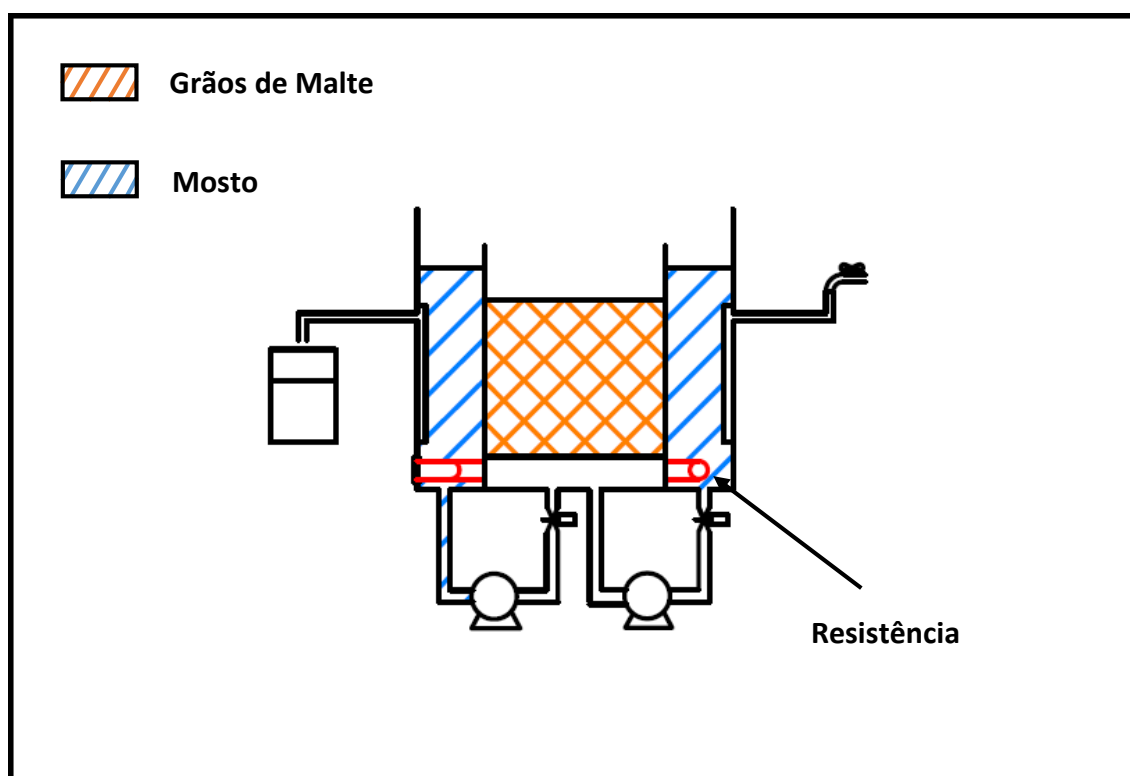


Figura 65 - Aquecimento

- **Brassagem e Clarificação**

A proposição do projeto com relação as etapas de brassagem e clarificação é que essas duas etapas sejam realizadas ao mesmo tempo.

Após o aquecimento da água, que ocorre no recipiente externo, até a temperatura proposta pela receita, o processo de brassagem e de clarificação começam simultaneamente. Isso ocorre pelo acionamento da bomba 1, mostrada na Figura 66, que faz com que a água cervejeira presente no recipiente externo escoe para o recipiente interno por meio do duto 1.

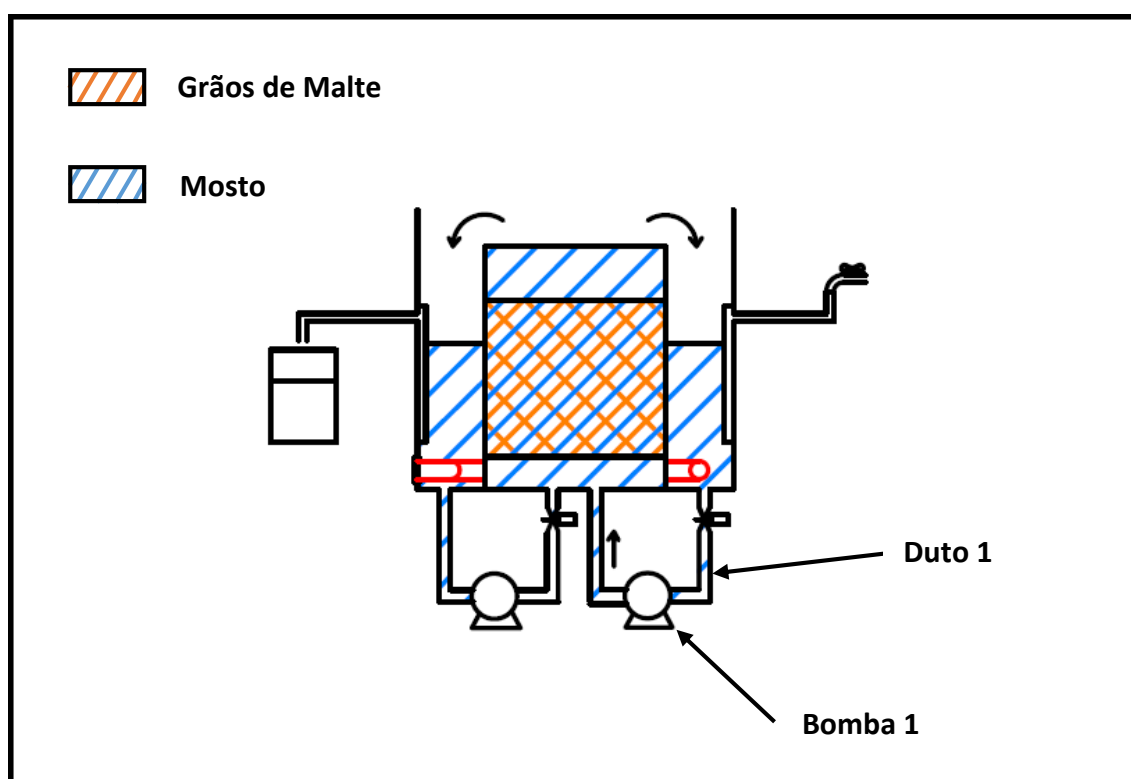


Figura 66 - Brassagem e Clarificação

O líquido entra pela parte inferior do recipiente interno, passando pelo meio dos grãos, aprisionados entre as telas metálicas, até ultrapassar a altura do mesmo, transbordando novamente para o recipiente externo. Este movimento ocorre ininterruptamente como um ciclo, durante todo o tempo de brassagem proposto pela receita. Por meio desse processo, a brassagem pode ser realizada devido ao movimento do mosto imposto pelo ciclo, bem como o contato do líquido com os grãos. Da mesma forma, a clarificação é efetuada por meio da filtração do mosto, que utiliza as próprias cascas do malte como filtro, como

explicado na seção 1.2.4. Vale ressaltar que durante toda essa etapa, a resistência elétrica deve manter a temperatura do mosto de acordo com o(s) degrau(s) de temperatura exigidos pela receita.

- **Fervura**

Após o término do tempo de brassagem proposto pela receita, parte da água cervejeira já se encontrará no recipiente externo, onde ocorrerá a fervura, entretanto uma parcela ainda estará no recipiente interno, entre os grãos de malte. Essa parcela é então bombeada para o recipiente externo pela bomba 2, através do duto 2. Esse processo tem o intuito de otimizar a produção, minimizando a parcela do líquido que fica presa entre os grãos de malte no recipiente interno.

Após o mosto ser transferido para o recipiente externo, inicia-se o processo de fervura como mostra a Figura 67. A resistência aquece até que o mosto entre em ebulição, mantendo-se ligada pelo período de tempo exigido pela receita.

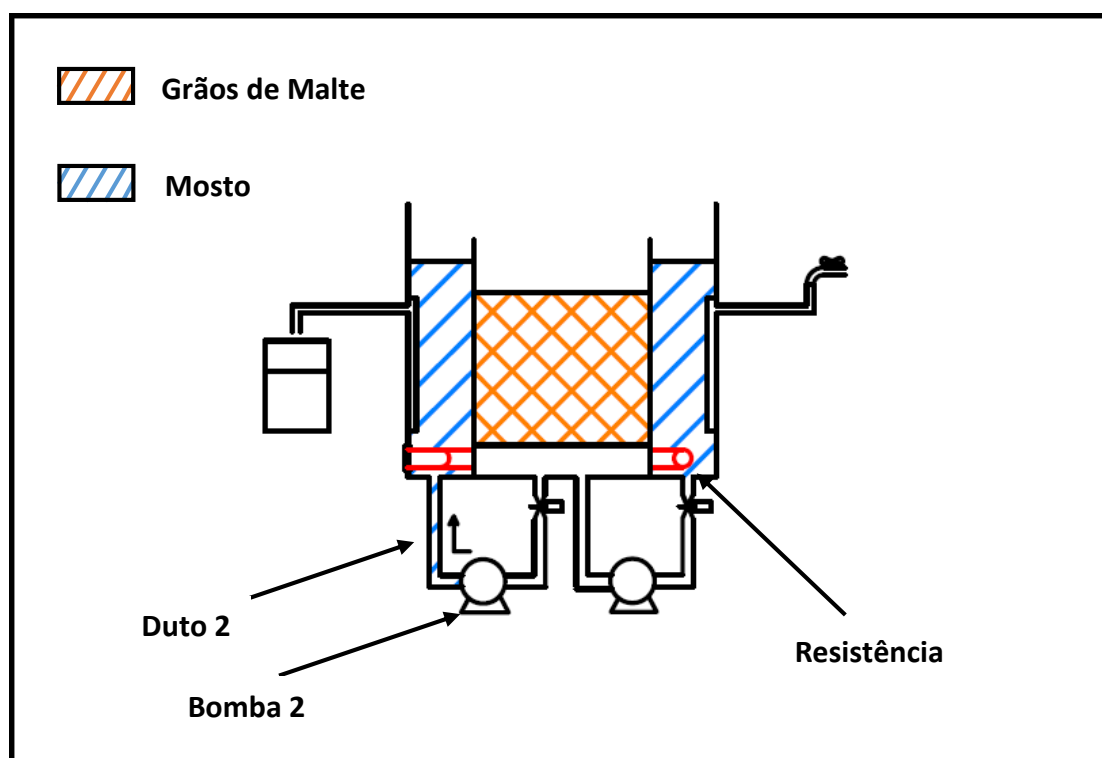


Figura 67 - Fervura

- **Resfriamento**

Após o processo de fervura, a cerveja deve ser resfriada rapidamente de modo a evitar possíveis contaminações. Para isso, é acionado o *chiller* representado na Figura 68. Água à temperatura ambiente, da rede doméstica, entra no *chiller*, trocando calor com a cerveja, e saindo a uma temperatura mais elevada.

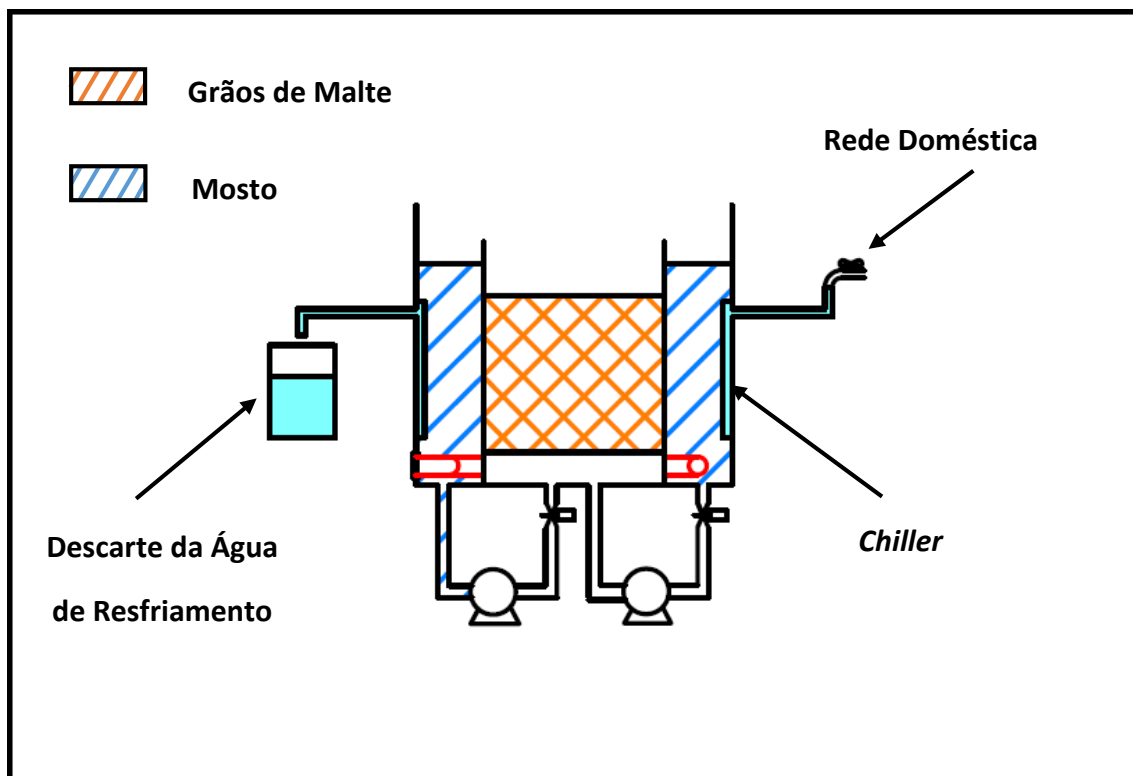
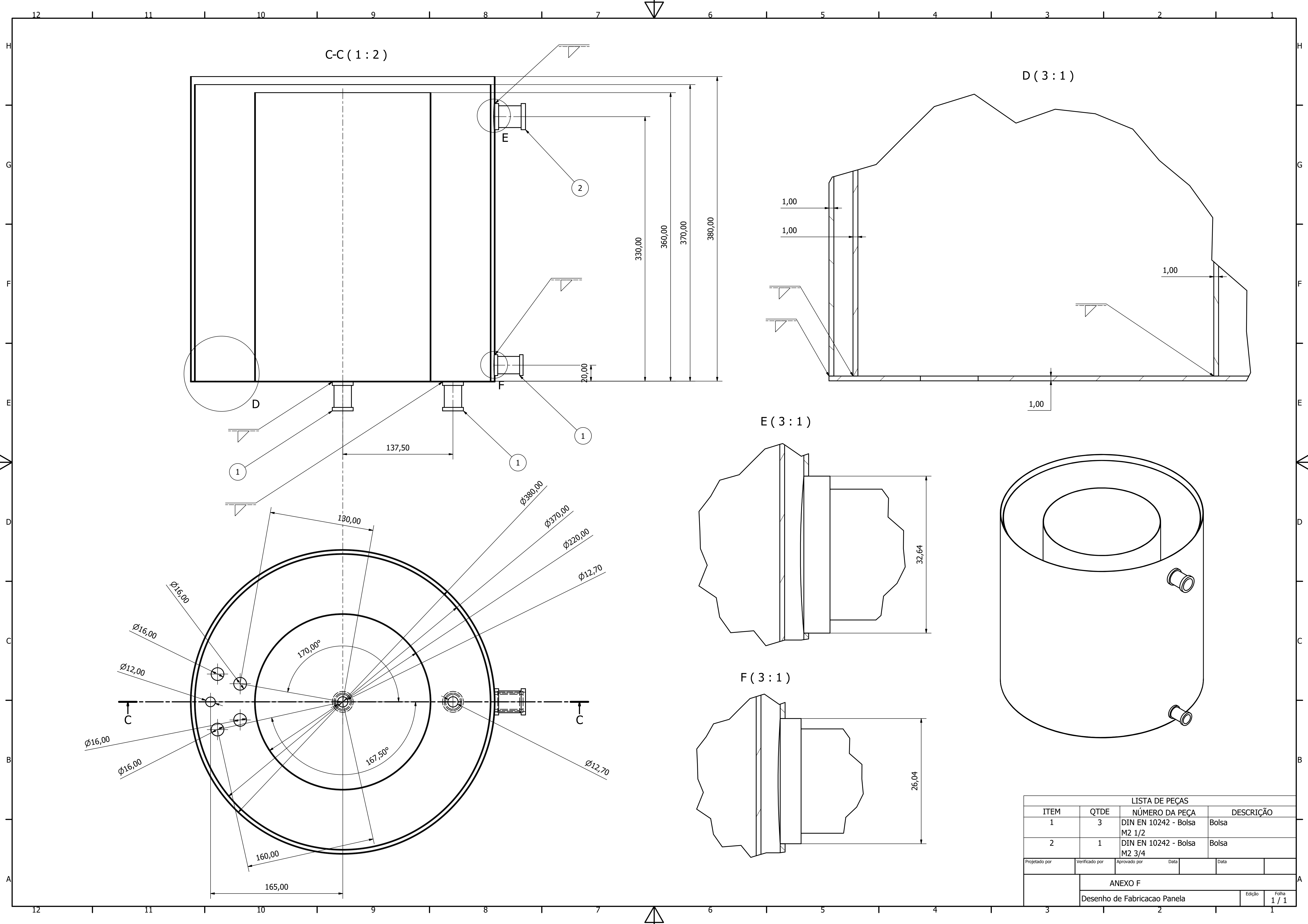


Figura 68 - Resfriamento

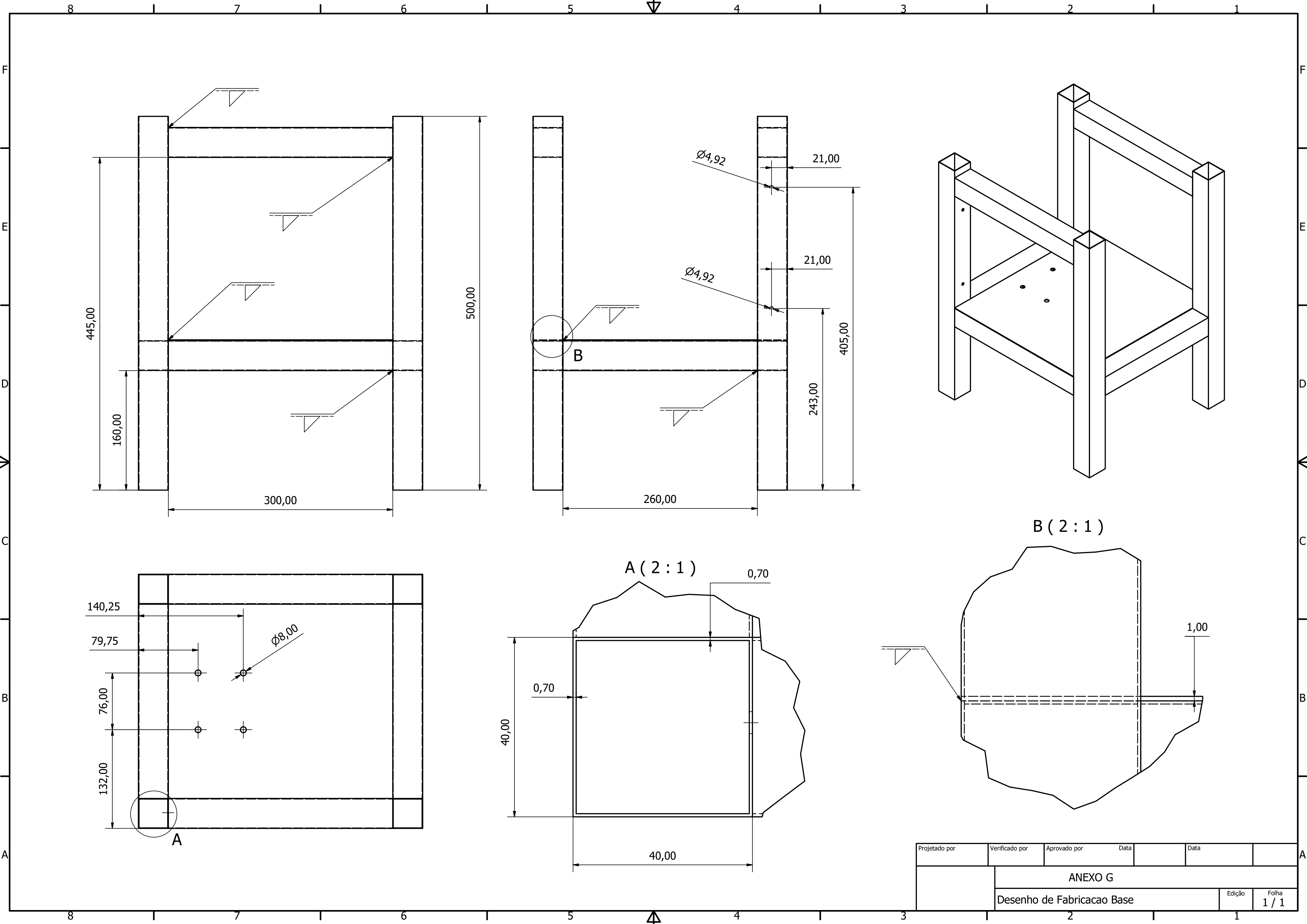
O resfriamento deve ocorrer até que a cerveja se encontre a temperatura de inoculação das leveduras utilizadas na receita.

- **Fermentação**

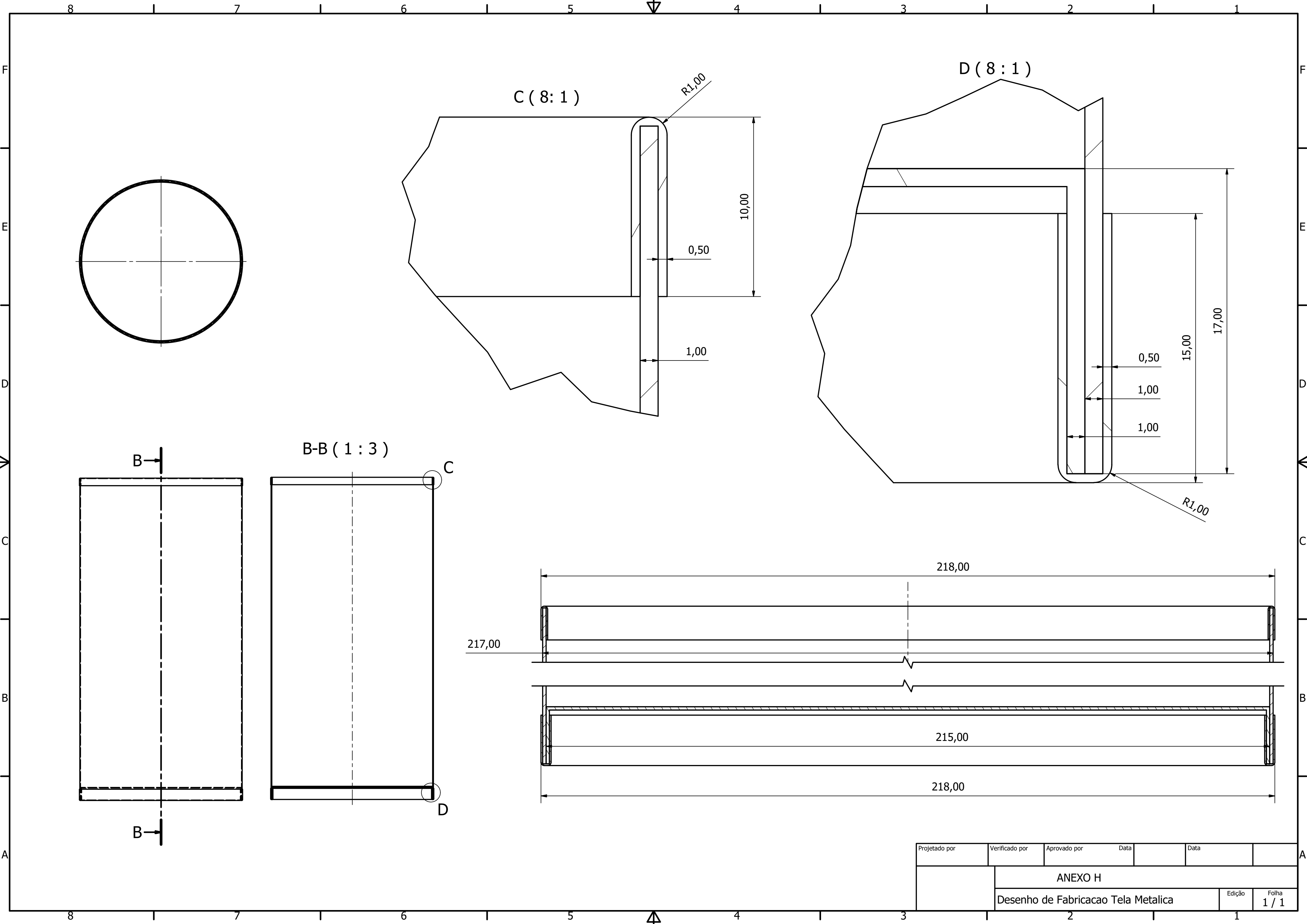
Após o resfriamento a cerveja está pronta para ser fermentada. Como inovação frente aos outros produtos presentes no mercado, o projeto pretende incluir um recipiente fermentador desacoplável, o que permitiria a fabricação de uma nova receita enquanto acontece a fermentação da receita anterior.



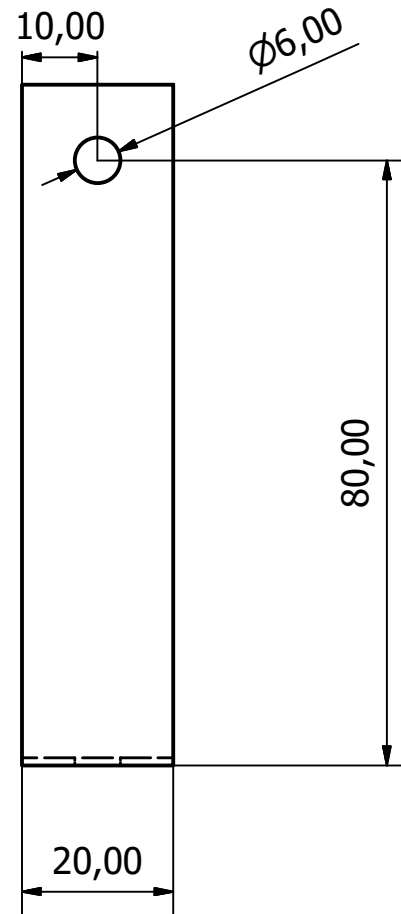
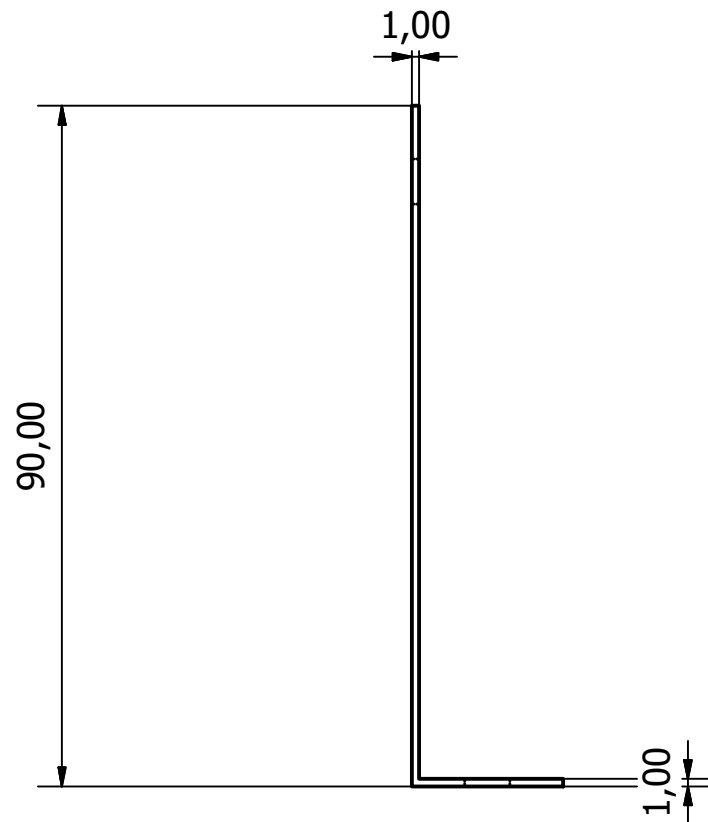
LISTA DE PEÇAS					
ITEM	QTDE	NÚMERO DA PEÇA		DESCRIÇÃO	
1	3	DIN EN 10242 - Bolsa M2 1/2		Bolsa	
2	1	DIN EN 10242 - Bolsa M2 3/4		Bolsa	
Projetado por		Verificado por	Aprovado por	Data	Data
ANEXO F					
Desenho de Fabricacao Painela				Edição	Folha
					1 / 1



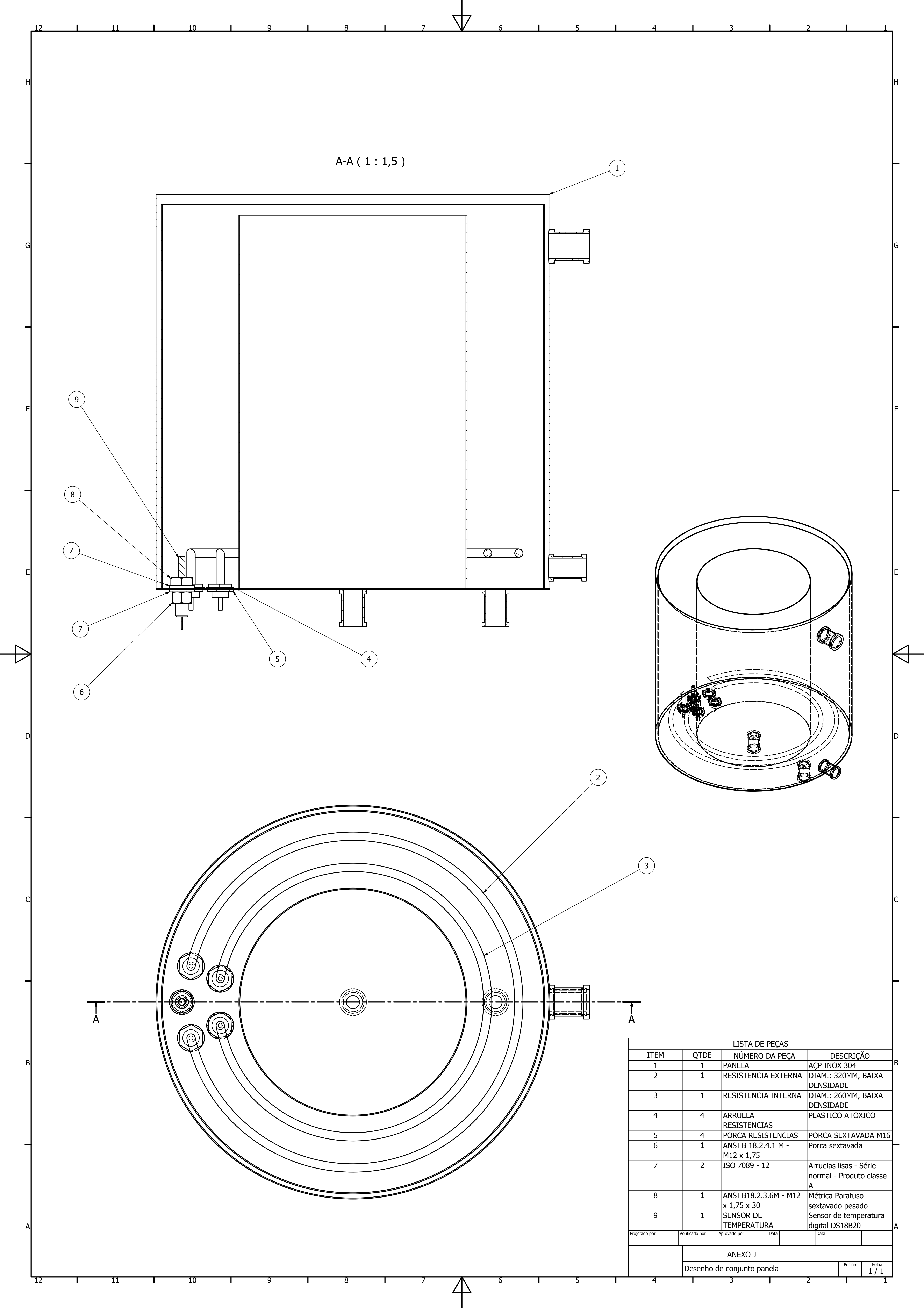
Projeto por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
ANEXO G					
Desenho de Fabricacao Base				Edição	Folha
				1 / 1	1 / 1



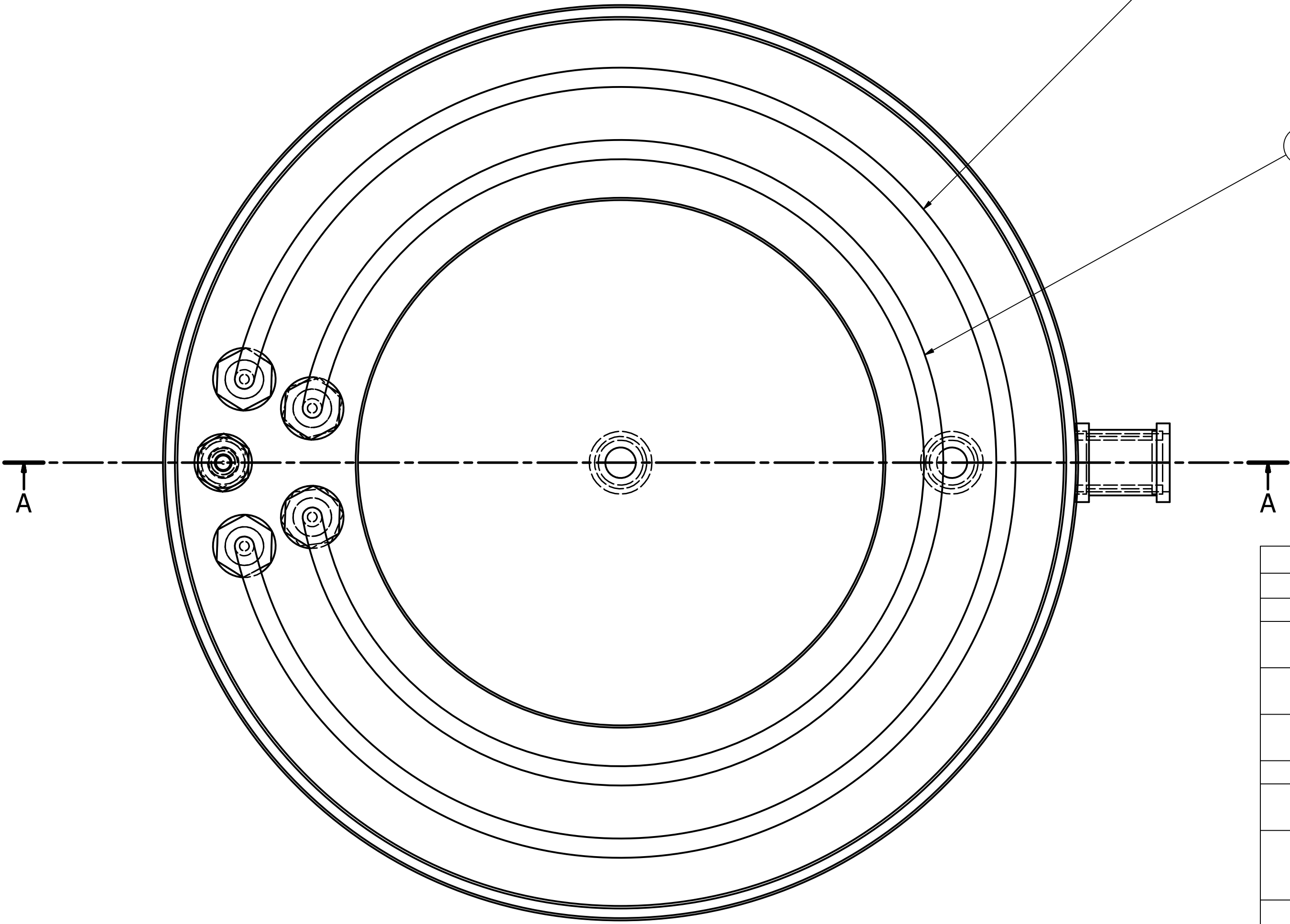
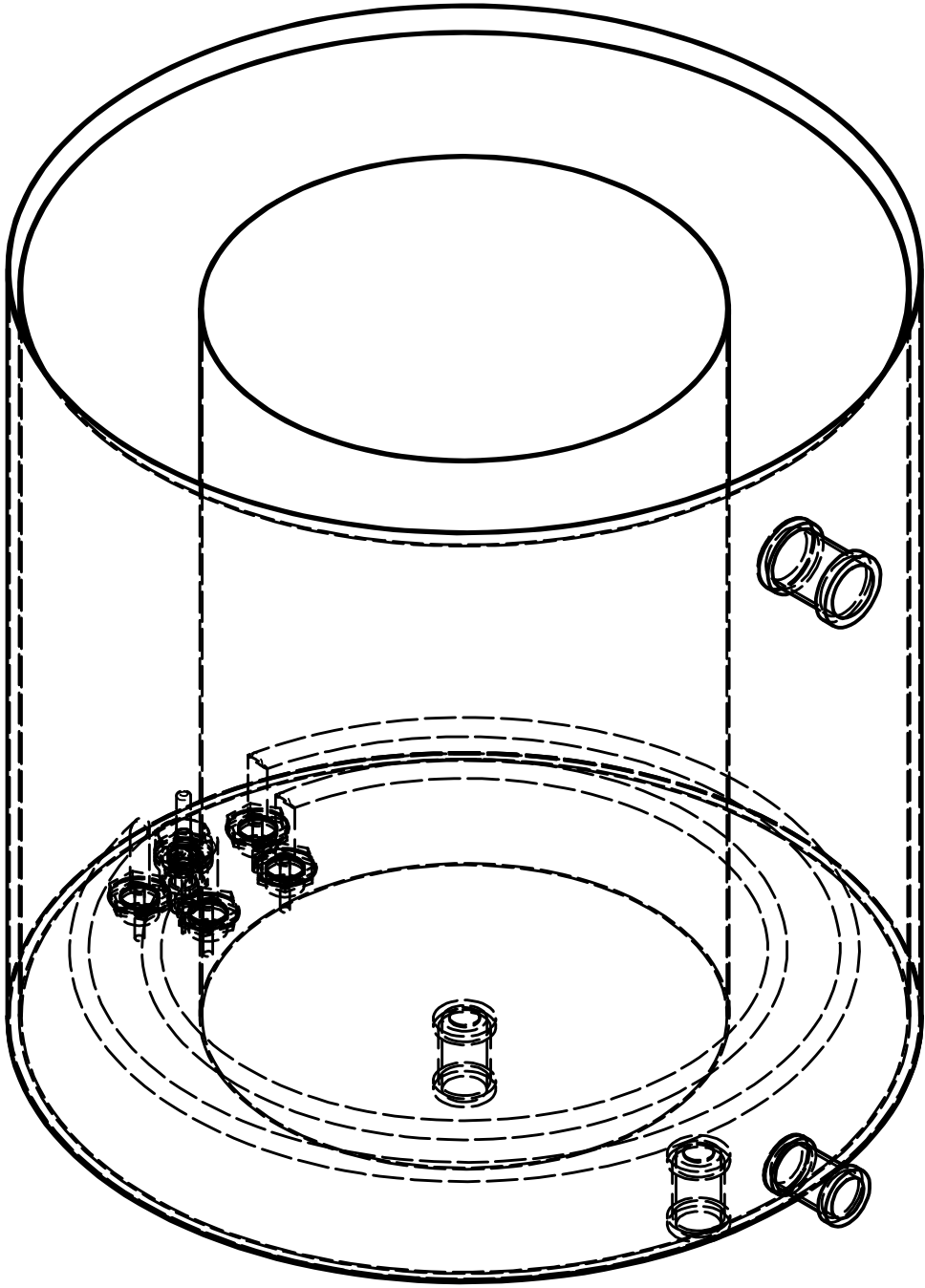
Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data		Data	
ANEXO H						
Desenho de Fabricacao Tela Metalica					Edição	Folha
					1 / 1	1 / 1



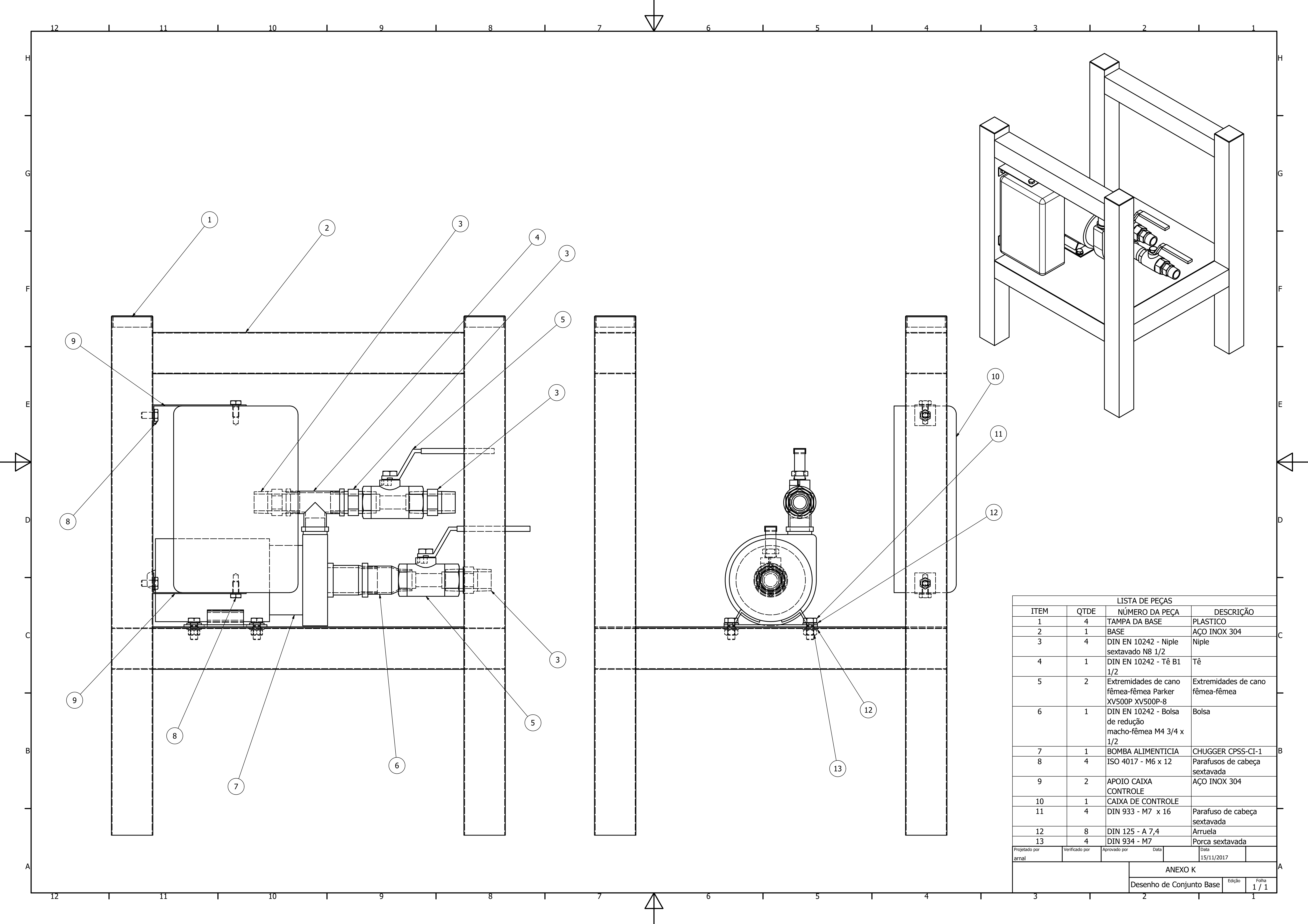
Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data		Data	
	ANEXO I					
	Desenho de Fabricacao Apoio Caixa de Controle				Edição	Folha 1 / 1

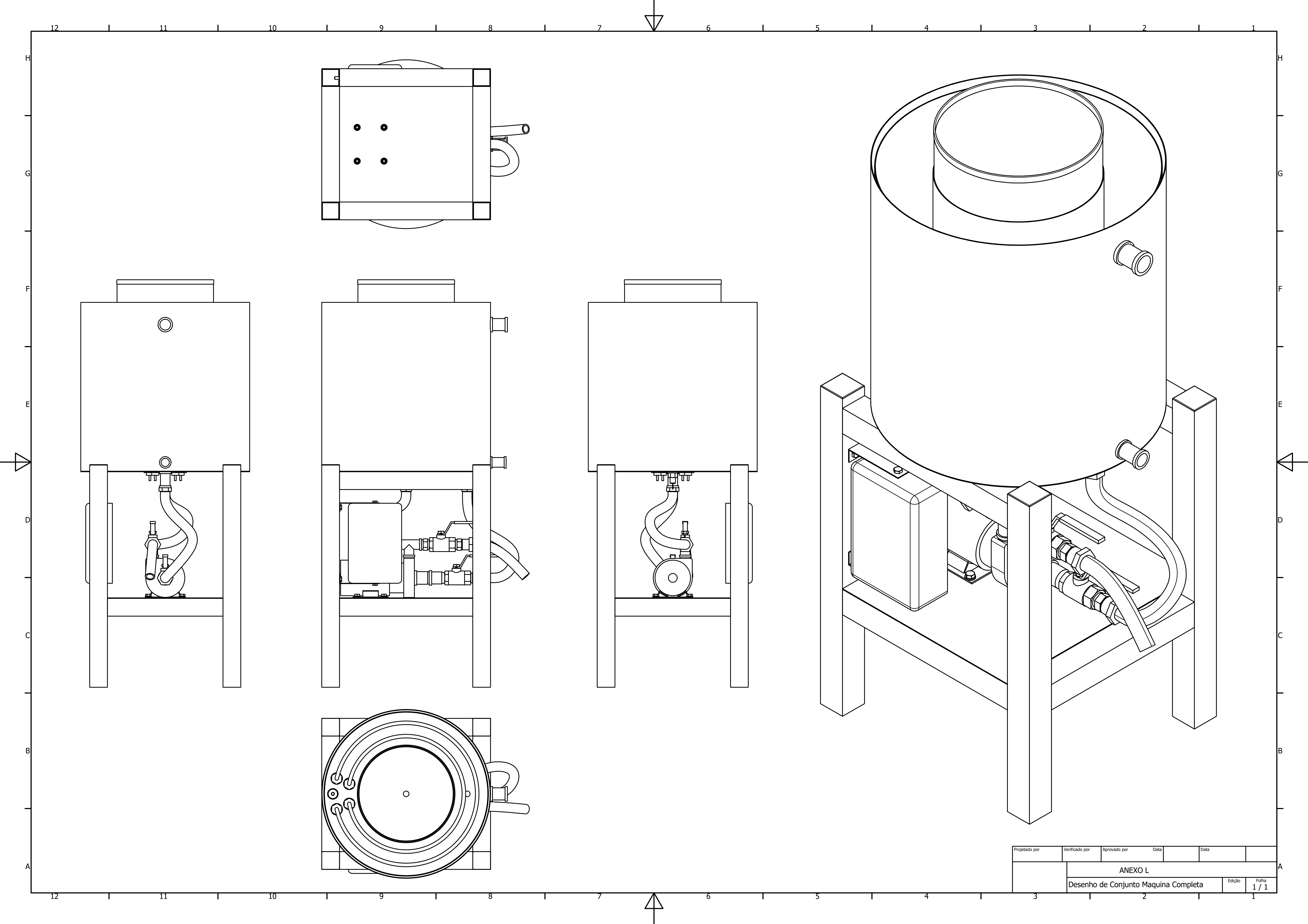


A-A (1 : 1,5)

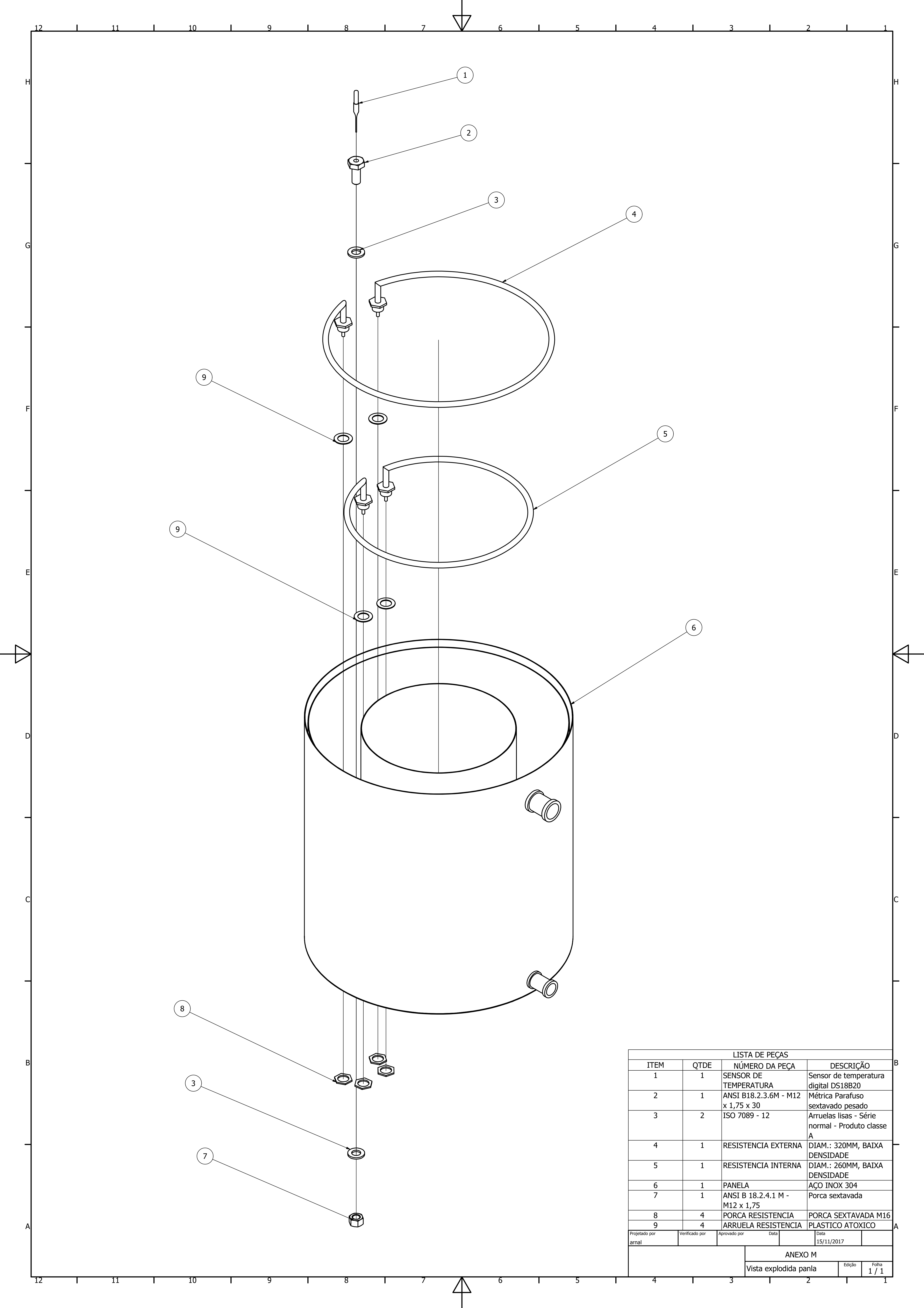


LISTA DE PEÇAS					
ITEM	QTDE	NÚMERO DA PEÇA	DESCRIÇÃO		
1	1	PANELA	AÇP INOX 304		
2	1	RESISTENCIA EXTERNA	DIAM.: 320MM, BAIXA DENSIDADE		
3	1	RESISTENCIA INTERNA	DIAM.: 260MM, BAIXA DENSIDADE		
4	4	ARRUELA RESISTENCIAS	PLASTICO ATOXICO		
5	4	PORCA RESISTENCIAS	PORCA SEXTAVADA M16		
6	1	ANSI B 18.2.4.1 M - M12 x 1,75	Porca sextavada		
7	2	ISO 7089 - 12	Arruelas lisas - Série normal - Produto classe A		
8	1	ANSI B18.2.3.6M - M12 x 1,75 x 30	Métrica Parafuso sextavado pesado		
9	1	SENSOR DE TEMPERATURA	Sensor de temperatura digital DS18B20		
Projetado por		Verificado por	Aprovado por	Data	Data
		ANEXO J			
		Desenho de conjunto panela			Edição 1 / 1

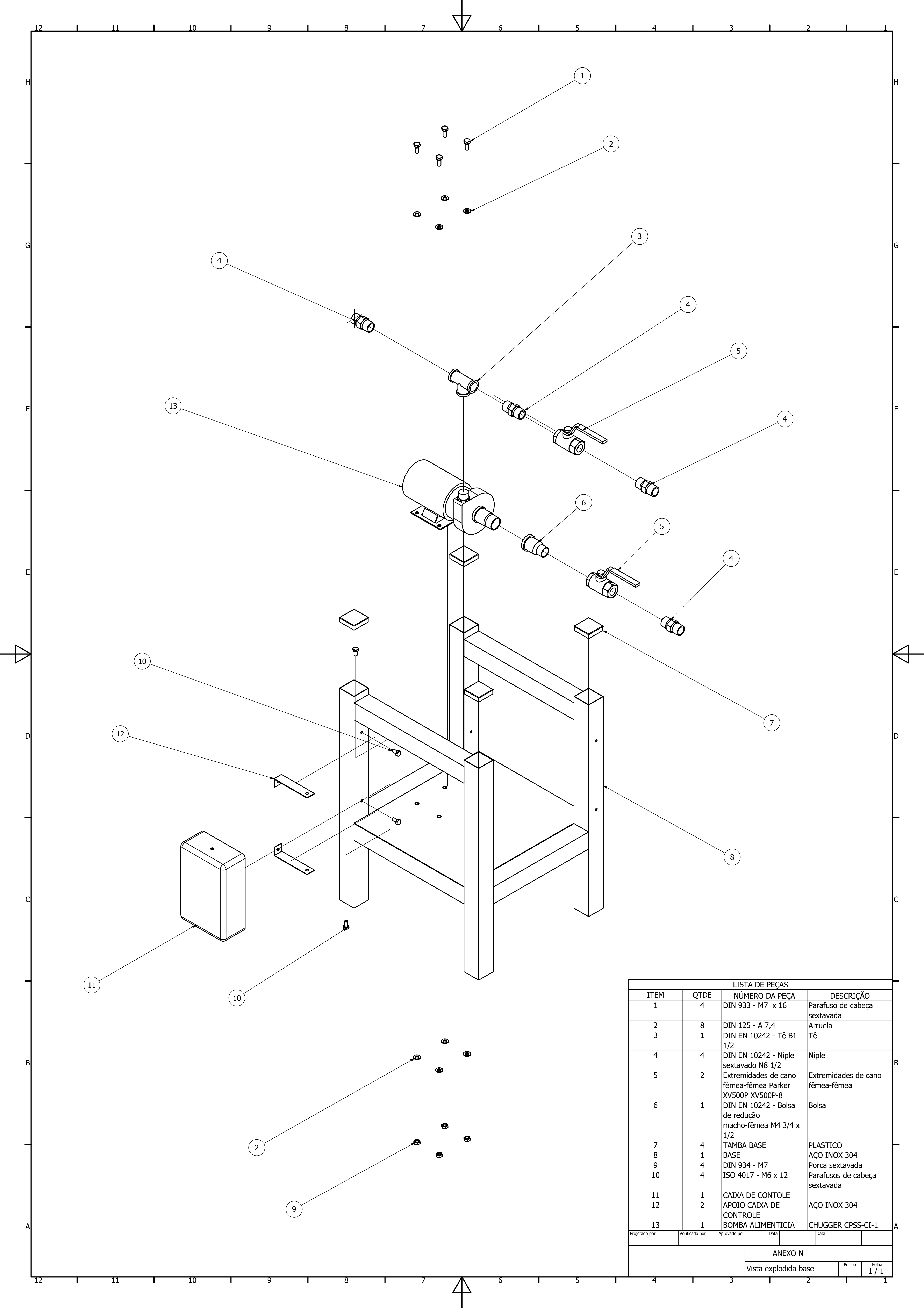




Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
ANEXO L					
Desenho de Conjunto Maquina Completa					Edição
					Folha
					1 / 1



LISTA DE PEÇAS					
ITEM	QTDE	NÚMERO DA PEÇA	DESCRIÇÃO		
1	1	SENSOR DE TEMPERATURA	Sensor de temperatura digital DS18B20		
2	1	ANSI B18.2.3.6M - M12 x 1,75 x 30	Métrica Parafuso sextavado pesado		
3	2	ISO 7089 - 12	Arruelas lisas - Série normal - Produto classe A		
4	1	RESISTENCIA EXTERNA	DIAM.: 320MM, BAIXA DENSIDADE		
5	1	RESISTENCIA INTERNA	DIAM.: 260MM, BAIXA DENSIDADE		
6	1	PANELA	AÇO INOX 304		
7	1	ANSI B 18.2.4.1 M - M12 x 1,75	Porca sextavada		
8	4	PORCA RESISTENCIA	PORCA SEXTAVADA M16		
9	4	ARRUELA RESISTENCIA	PLASTICO ATOXICO		
Projetado por arnal		Verificado por	Aprovado por	Data 15/11/2017	
			ANEXO M		
			Vista explodida panla	Edição 1 / 1	Folha



LISTA DE PEÇAS					
ITEM	QTDE	NÚMERO DA PEÇA	DESCRIÇÃO		
1	4	DIN 933 - M7 x 16	Parafuso de cabeça sextavada		
2	8	DIN 125 - A 7,4	Arruela		
3	1	DIN EN 10242 - Tê B1 1/2	Tê		
4	4	DIN EN 10242 - Niple sextavado N8 1/2	Niple		
5	2	Extremidades de cano fêmea-fêmea Parker XV500P XV500P-8	Extremidades de cano fêmea-fêmea		
6	1	DIN EN 10242 - Bolsa de redução macho-fêmea M4 3/4 x 1/2	Bolsa		
7	4	TAMBA BASE	PLASTICO		
8	1	BASE	AÇO INOX 304		
9	4	DIN 934 - M7	Porca sextavada		
10	4	ISO 4017 - M6 x 12	Parafusos de cabeça sextavada		
11	1	CAIXA DE CONTOLE			
12	2	APOIO CAIXA DE CONTOLE	AÇO INOX 304		
13	1	BOMBA ALIMENTICIA	CHUGGER CPSS-CI-1		
Projetado por		Verificado por	Aprovado por	Data	Data
			ANEXO N		
			Vista explodida base		Edição
					Folha
					1 / 1