



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

RODRIGO MISAILIDIS ANTONINI

Projeto de fermentador auto refrigerado de baixo-custo para cervejeiro  
caseiro com controle de temperatura monitorado por Arduino e  
refrigerado por placas de Peltier

Lorena

2020

RODRIGO MISAILIDIS ANTONINI

Projeto de fermentador auto refrigerado de baixo-custo para cervejeiro caseiro  
com controle de temperatura monitorado por Arduino e refrigerado por placas de  
Peltier

Monografia apresentada à Escola de Engenharia de  
Lorena da Universidade de São Paulo como requisito parcial  
à obtenção do título de Engenheiro Químico.

Orientador: Prof. Dr. Geronimo Virginio Tagliaferro

LORENA

2020

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado  
da Escola de Engenharia de Lorena,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Misailidis Antonini, Rodrigo  
Projeto de fermentador auto refrigerado de baixo custo para cervejeiro caseiro com controle de temperatura monitorado por Arduino e refrigerado por placas de Peltier / Rodrigo Misailidis Antonini; orientador Geronimo Virginio Tagliaferro. - Lorena, 2020.  
72 p.

Monografia apresentada como requisito parcial para a conclusão de Graduação do Curso de Engenharia Química - Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo. 2020

1. Cerveja. 2. Fermentação. 3. Arduino. 4. Peltier. 5. Controle de processos. I. Título. II. Virginio Tagliaferro, Geronimo , orient.

Aos meus avós, por me fazerem quem sou,  
por me inspirarem e por sempre acompanharem  
minha trajetória.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, ao meu irmão e a Laís, por todo suporte, incentivo, alento e formação. Sem vocês a jornada seria muito mais pesada.

À Universidade de São Paulo por todas experiências proporcionadas e pelo ilustre corpo docente, em especial ao Prof. Dr. Geronimo Virginio Tagliaferro pelo acompanhamento e orientação nesta monografia.

Aos grandes amigos que estiveram ao meu lado durante a trajetória e com quem aprendi muito.

## **RESUMO**

A presente monografia teve como objetivo propor a execução de um protótipo de fermentador auto refrigerado de 5L e de baixo custo para produtores caseiros de cerveja, utilizando um Arduino como controlador do processo e módulos Peltier como unidade de refrigeração do sistema, tendo em vista a importância da realização de um controle adequado da temperatura durante o processo fermentativo cervejeiro. A especificação a ser atingida foi a manutenção da temperatura dentro do espectro pertinente de atuação de leveduras para uma cerveja tipo *ale* ( $18,0^{\circ}\text{C}$ ) durante toda a etapa fermentativa. A condução da pesquisa foi feita por meio de método experimental com ensaios do protótipo em duas etapas principais, sendo a primeira o ensaio com água para determinação de constante de troca térmica e validação hidromecânica do projeto e a segunda o ensaio com mosto a ser fermentado, levando em consideração o calor gerado pela fermentação. O resultado obtido foi a construção de um reator dimensionado para aproximadamente 50W de potência de remoção térmica. Comprovou-se a viabilidade prática do projeto, pois em testes no reator foi possível manter a temperatura determinada de  $18,0^{\circ}\text{C}$  durante o processo fermentativo a um custo total de aproximadamente R\$450,00.

Palavras chave: cerveja, fermentação, Arduino, Peltier, controle de processos.

## **ABSTRACT**

The present monography aims to propose and execute a financially accessible 5L auto refrigerated fermenter prototype to home brewers, using an Arduino as a process controller and Peltier elements as refrigeration unit of the system owing to the great importance to have an adequate temperature control during the brewing fermentation process. The main goal of this project was to maintain the fermentation temperature within the range of a regular ale (18,0°C) during the hole fermentation process. The project was leaded by the experimental search method and evaluated by tests in two main steps. The first one consists in define prototype thermal exchange constants testing with water and validate the hydromechanical project assemblage. In the second step, the tests will be done with beer wort to define the heat from the fermentation to be considered in the calculations. The result obtained was a reactor dimensioned to remove approximately 50W of thermic energy. It was proved the practical feasibility of the project, in which the proposed temperature of 18,0°C was maintained during the whole fermentation process with a total cost of approximately R\$450,00.

Key words: beer, fermentation, Arduino, Peltier, process control

## **LISTA DE ILUSTRAÇÕES**

Figura 1 - Total de cervejarias por ano no Brasil.....	8
Figura 2 - Diagrama de blocos do processo cervejeiro .....	13
Figura 3 - Fases do processo de fermentação.....	17
Figura 4 – Diagrama de fluxo do processo (PFD) .....	25
Figura 5 - Arduino UNO R3.....	27
Figura 6 - Bomba 3,6W .....	28
Figura 7 – Pastilha de Peltier .....	29
Figura 8 – Fan.....	29
Figura 9 - Radiador de troca térmica.....	30
Figura 10 – Perfil de temperatura do fermentador D12L em função do tempo .....	34
Figura 11 - Perfil de temperatura do fermentador E12L em função do tempo .....	34
Figura 12 - Perfil de temperatura do fermentador D05L em função do tempo .....	34
Figura 13 - Perfil de temperatura do fermentador E05L em função do tempo .....	34
Figura 14 - Linearização dos ensaios do fermentador D12L.....	36
Figura 15 - Linearização dos ensaios do fermentador E12L.....	36
Figura 16 - Linearização dos ensaios do fermentador D05L.....	36
Figura 17 - Linearização dos ensaios do fermentador E05L.....	36
Figura 18 - Curvas de crescimento celular para as leveduras S-04 e S-33 .....	43
Figura 19 – Perfil teórico da temperatura do sistema ao longo do tempo .....	46
Figura 20 – Vista geral do sistema de controle de temperatura e fermentador....	47
Figura 21 – Sistema de refrigeração e bomba de recirculação .....	48
Figura 22- Desenvolvimento da fermentação .....	49
Figura 23 - Comparação dos ciclos de aquecimento da fase lag e da fase estacionária.....	50
Figura 24 – Comparação dos ciclos de aquecimento prático e teóricos .....	51
Figura 25 – Utilização da potência fornecida .....	54

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Equipamentos e especificações.....	26
---	----

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Resultado dos ensaios de troca térmica .....	37
Tabela 2 - Dimensões dos fermentadores .....	38
Tabela 3 - Propriedades físicas dos materiais utilizados .....	38
Tabela 4 - Propriedades físicas do fermentador de 12L .....	38
Tabela 5 - Propriedades físicas do fermentador de 5L .....	39
Tabela 6 – Cálculo do número de Biot .....	39
Tabela 7 – Dados de teste de troca térmica da serpentina .....	40

## **LISTA DE ANEXOS**

ANEXO A - Diagrama esquemático do circuito elétrico .....	60
ANEXO B - Lista de componentes utilizados no circuito de controle e refrigeração de temperatura.....	61
ANEXO C - Datasheet do módulo Peltier TEC1-12706 .....	62
ANEXO D – Custos do projeto em dezembro de 2019 .....	63

## **LISTA DE SIGLAS**

E12L	Fermentador encamisado de 12L
D12L	Fermentador desencamisado de 12L
E05L	Fermentador encamisado de 5L
D05L	Fermentador desencamisado de 5L
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
PID	Proporcional integral derivativo

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	6
1.1.	Objetivos .....	7
1.1.1.	Objetivo geral .....	7
1.1.2.	Objetivo específico .....	7
1.2.	Justificativa.....	7
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	9
2.1.	O que é cerveja .....	9
2.2.	Processo de fabricação .....	9
2.3.	Fermentação .....	13
2.3.1.	Importância.....	13
2.3.2.	Variáveis.....	14
2.4.	Controle de temperatura de fermentação.....	15
2.5.	Etapas da fermentação .....	17
2.6.	Cinética de fermentação.....	18
2.7.	Peltier .....	19
2.8.	Transferência de calor.....	19
2.8.1.	Condução .....	20
2.8.2.	Convecção .....	20
2.8.3.	Radiação .....	21
2.8.4.	Modelo de fluxo de calor transitório em corpos com resistência interna desprezível.....	21
2.9.	Trocadores de Calor.....	22
2.9.1.	Tipos de trocadores de calor .....	23
2.9.2.	Coeficiente global de transferência de calor.....	24
3.	METODOLOGIA.....	25
3.1.	Materiais .....	25

3.1.1.	Fermentador .....	26
3.1.2.	Arduino .....	27
3.1.3.	Sensores .....	27
3.1.4.	Atuadores .....	27
3.2.	Método .....	31
3.2.1.	Definição de coeficientes e taxas .....	31
3.2.2.	Dimensionamento e modelagem .....	32
3.2.3.	Validação do projeto .....	32
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	33
4.1.	Definição de coeficientes e taxas .....	33
4.1.1.	Determinação do coeficiente de troca térmica do fermentador .....	33
4.1.2.	Determinação da taxa de troca térmica do trocador de calor .....	40
4.2.	Dimensionamento e modelagem .....	41
4.2.1.	Balanço de energia .....	41
4.2.2.	Tempos teóricos .....	44
4.3.	Validação do projeto .....	47
4.4.	Fermentação .....	48
4.5.	Equilíbrio térmico .....	49
4.6.	Eficiência energética .....	52
4.7.	Custo .....	54
4.8.	Discussões .....	55
5.	CONCLUSÃO .....	56
6.	REFERÊNCIAS .....	57
	ANEXOS .....	60

## 1. INTRODUÇÃO

É possível afirmar que o Brasil vem se transformando no que diz respeito à cultura cervejeira. Cervejas com pouco sabor, baixo corpo e amargor praticamente imperceptível vêm perdendo espaço para uma infinidade de possibilidades de cores, sabores e texturas das chamadas “cervejas artesanais”, que nada mais são que estilos regionais que ficaram esquecidos na história com a massificação das cervejas comumente conhecidas por “tipo pilsen”, as *standard american lagers*. A notoriedade é tanta que hoje é possível encontrar até rotas turísticas dedicadas a este segmento no país (ABRABE, 2019).

Acompanhando esse movimento, também se destaca o aumento do número de cervejeiros caseiros pelo país afora. Lojas dedicadas à comercialização de insumos em pequenas quantidades têm crescido consideravelmente em quantidade, assim como as associações de cervejeiros artesanais, que nunca tiveram tantos associados (ARANHA, 2014).

O momento em que os açúcares são convertidos em álcool e gás carbônico é um dos mais importantes de todo o processo de fabricação da cerveja. Na etapa chamada de fermentação há também a síntese de outros inúmeros subprodutos responsáveis pela singularidade de cada cerveja. Dessa forma, torna-se imprescindível o controle preciso das variáveis influentes nesta fase para que o produto final tenha as características desejadas, sendo a mais importante a temperatura (WHITE; ZAINASHEFF, 2010).

Diante desse cenário é que vem a luz a proposta de realizar o projeto e construção de um fermentador de baixo custo, no qual foi avaliado as trocas de calor envolvidas buscando contornar variações térmicas e acuracidade da temperatura proposta de fermentação. Para isso fez-se necessário definir as taxas de troca térmica com o meio considerando o cenário nacional a fim de propor uma solução factível para o cervejeiro caseiro brasileiro.

## 1.1. Objetivos

### 1.1.1. *Objetivo geral*

Projetar e em seguida analisar a funcionalidade e o custo de um protótipo de fermentador de 5L para a refrigeração e controle de temperatura do processo fermentativo cervejeiro.

### 1.1.2. *Objetivo específico*

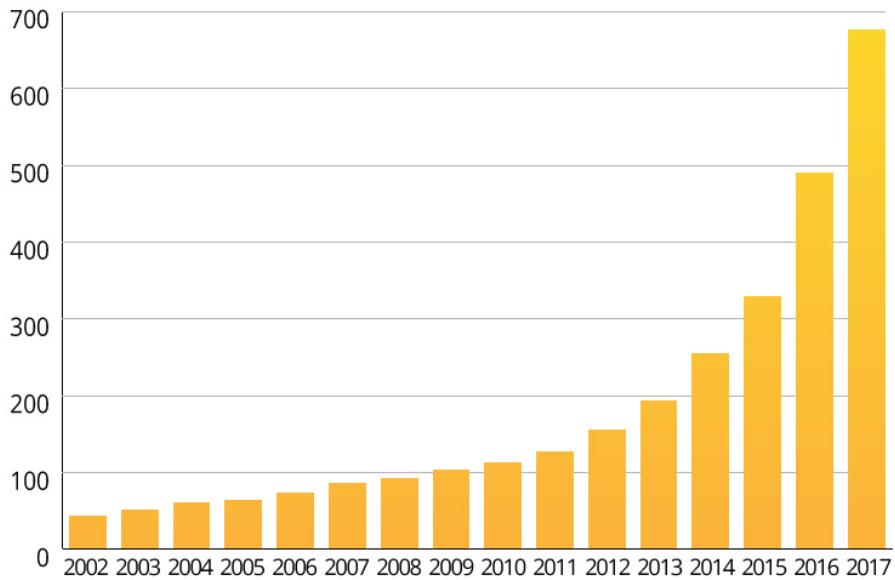
Utilizando um Arduino como controlador e módulos Peltier como unidade refrigerante do sistema, manter durante todo processo a temperatura definida de 18,0°C, típica para cervejas do tipo *ale*, com o menor custo possível, mas ainda assim com um bom controle de temperatura para que a qualidade fosse mantida.

## 1.2. Justificativa

O trabalho teve como principal pilar de sustentação a grande importância da condução correta do processo fermentativo na produção de cerveja, sendo o controle adequado da temperatura de fermentação uma das variáveis de maior impacto na qualidade do produto final.

O mercado da cerveja artesanal se mostra em grande ascensão no cenário nacional. Conforme consta na Figura 1, é possível observar um incremento de mais de 400% no número de cervejarias em território brasileiro na última metade da década com a criação de mais de 150 cervejarias por ano nos últimos 3 anos (BRASIL, 2018). Estes números trazem também como reflexo um aumento da disseminação e da demanda pelo conhecimento do processo de produção caseira de cerveja, o que acaba por justificar o dimensionamento do projeto pelo crescente número de adeptos, uma vez que comumente é realizado em lotes com volumes de 5L a 50L (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2019).

Figura 1 - Total de cervejarias por ano no Brasil



Fonte: (BRASIL, 2018).

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. O que é cerveja

A cerveja, pelas normas brasileiras, é uma bebida alcoólica fermentada a base de malte de cevada, água e lúpulo, podendo conter outros cereais, malteados ou não, desde que não ultrapasse o valor de 45% em relação ao extrato primitivo (BRASIL, 2009).

As cervejas podem ser classificadas quanto a inúmeros critérios, criando-se então os chamados estilos de cerveja. Um dos critérios que podem ser utilizados é quanto ao tipo de fermentação empregado na produção da cerveja (BELTRAMELLI, 2014).

Tradicionalmente os tipos de fermentação são divididos em 3 famílias, com base na levedura empregada: ales, lagers e selvagens (lambics). As cervejas tipo ale são aquelas que usam em seu processo fermentativo a levedura *saccharomyces cerevisiae* e, normalmente, fermentam a temperaturas mais elevadas em relação as cervejas lagers. As lagers, por sua vez, além de normalmente fermentarem em temperaturas inferiores, usam no processo fermentativo as leveduras do tipo *saccharomyces uvarum*. Nas cervejas chamadas lambics, habitualmente, os tanques de fermentação ficam expostos ao ar livre de forma com que haja a chamada fermentação espontânea – inoculam-se no mosto leveduras selvagens e bactérias diversas, presentes no ar (BELTRAMELLI, 2014).

### 2.2. História da cerveja

Os primeiros registros das bebidas fermentadas a base de cereais apontam para a Mesopotâmia, há 7 mil anos atrás, no período neolítico, conhecido como Idade da Pedra. Ao que tudo indica, o processo ocorreu de maneira acidental. Possivelmente um apanhado de grãos foi esquecido ao relento de forma com que se umidificassem e germinassem, desenvolvendo as enzimas necessárias para o processo que hoje conhecemos como hidrólise enzimática. Quando aquecidos em água esses grãos solubilizavam o amido que, convertidos em açúcar por estas enzimas, produziam um mosto açucarado fermentescível (HAMPSON, 2014).

O lúpulo foi introduzido à bebida posteriormente, só na Idade Média, no século XII por Hildegarda von Stein, com finalidade de substituir o *gruit*. O *gruit* era um combinado de ervas (zimbro, canela, gengibre, anis, alecrim, dentre outros) que tinha por finalidade conferir aromas à cerveja e torna-la mais palatável. A substituição foi um sucesso uma vez que, além das questões político-econômicas das da época, os estudos de Hildegarda von Stein levaram a conclusão de que, além de conferir o amargor e aroma característicos da cerveja moderna, o lúpulo é muito útil como conservante de bebidas, por sua propriedade bacteriostática como é sabido hoje (BELTRAMELLI, 2014)

Num momento em que a produção era majoritariamente familiar e as técnicas produtivas eram passadas de geração em geração, a preocupação com a qualidade e a criação de uma mínima uniformidade entre as cervejas produzidas e dispostas aos consumidores fez necessário o surgimento de normas regulatórias para o fabrico da bebida fermentada em questão. Desta maneira, em 1516, o duque da Baviera, Guilherme IV, instaura a chamada *Reinheitsgebot*, também conhecida como Lei Alemã da Pureza, que delimita os insumos cervejeiros a três itens, sabidos até o momento – água, malte e lúpulo. A lei previa punições para aqueles que descumprisem as normas e produzissem uma bebida de má qualidade. Posteriormente o malte de trigo pode ser incluso assim como a levedura, que foi descoberta como parte integrante da produção (OLIVER, 2012).

A conversão do açúcar em álcool foi atribuída à inúmeros fatores, desde ação divina até um processo espontâneo. Em função da presença do álcool na bebida e de suas propriedades psicoativas, a cerveja ganhou grande destaque nos primórdios de seu surgimento por ser considerada uma bebida sagrada e com poderes sobrenaturais. A fermentação foi em maior parte da história um mistério divino por não poder ser explicada (WHITE; ZAINASHEFF, 2010)

Em 1680, Anton van Leeuwenhoek foi o primeiro a ver por um microscópio que haviam leveduras na cerveja, no entanto a fermentação ainda não foi atribuída a elas, nem sequer foi percebido que eram células com vida. Em 1789, Antoine Lavoisier conseguiu definir a fermentação como a conversão do açúcar em álcool e apenas em 1876, Louis Pasteur pode estabelecer a levedura como microrganismo vivo como conhecemos hoje. (MÜLLER, 2002)

Motivado pela preservação do bem comum e sob a justificativa de afastar o homem da família, começou a ganhar força nos EUA na década de 1890 as primeiras organizações adeptas da Lei Seca, que buscavam a abolição do consumo de bebidas alcoólicas. O movimento ganhou força sob o pretexto de que o álcool era a fonte de todos os males sociais, além de questões políticas vinculadas a Primeira Guerra Mundial, na qual EUA se opunha a Alemanha, e em 1920 foi instaurada a Lei Volstead, que proibia a venda, produção, consumo ou transporte de qualquer tipo de bebida alcóolica. As cervejarias reduziram suas atividades a produção de extratos de malte destinados a suplementação alimentar, fabricação clandestina de cerveja caseira e impopulares cervejas sem álcool. Diante disso, popularizaram-se os refrigerantes e, após 13 anos de proibição, a venda voltou a ser permitida. As cervejarias se depararam então com um mercado desacostumado com os sabores fortes das cervejas tradicionais e se viram obrigados a produzir um produto aguado e insosso – também em virtude de regulamentações que limitavam o teor alcoólico por volume em 4% e baixo custo ao consumidor final. Como resultado surgiram cervejas com adjuntos como milho e arroz que tinham por finalidade reduzir o custo de produção e adequar a bebida às novas normas. Surgiram as propagandas diante da necessidade de alavancar as vendas resultando no que conhecemos hoje como *american standart lager* – ou cerveja tipo pilsen, como conhecemos no Brasil (OLIVER, 2012).

### 2.3. Processo de fabricação

Do ponto de vista industrial, o início da produção de cerveja se dá no processamento da cevada para obtenção do malte, no entanto, como o enfoque desta monografia é o produtor de cerveja caseiro, será utilizado para fins práticos as etapas que competem ao cervejeiro caseiro.

A fabricação de cerveja, segundo Palmer, pode ser dividida em três eventos principais, sendo eles a fabricação do mosto, o processo fermentativo e o envase (2006), sintetizados abaixo e resumidos na Figura 2. Esses 3 eventos principais podem ser destrinchados em sub-etapas e então tem-se:

1. *Brassagem: produção do mosto cervejeiro*

- 1.1. Moagem: os grãos do malte de cevada são rompidos a fim de expor o conteúdo interior rico em amido;
- 1.2. Mostura: hidrólise enzimática dos amidos do malte em açúcares fermentescíveis e não fermentescíveis;
- 1.3. Clarificação/Filtragem: mosto líquido é separado do bagaço de malte;
- 1.4. Fervura do mosto: reações diversas ocorrem, como caramelização dos açúcares, reação de Maillard e isomerização dos alfa-ácidos dos lúpulos que são adicionados;
- 1.5. Resfriamento: mosto é preparado termicamente para a inoculação da levedura e proteínas que geram turbidez coagulam (trub) e são retiradas da suspensão;

## 2. Fermentação

- 2.1. Fermentação primária: conversão dos açúcares fermentescíveis em álcool e dióxido de carbono. Subprodutos são gerados pelas leveduras durante conversão;
- 2.2. Fermentação secundária/maturação: compostos indesejados (subprodutos) são reabsorvidos pelas leveduras (HAMPSON, 2014);
- 2.3. Carbonatação.

Nesta etapa, segue-se por uma única opção das dispostas abaixo.

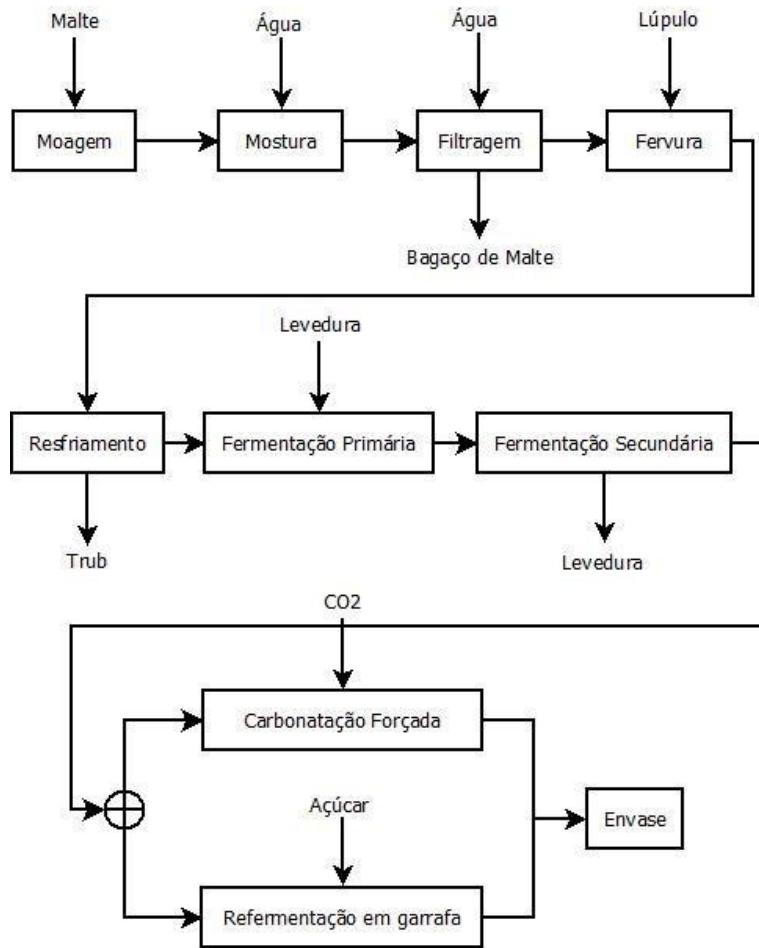
- 2.3.1. Refermentação em garrafa: adiciona-se açúcar a em quantidade definida a cerveja que é envasada em garrafa e arrolhada, de maneira que haja uma pequena fermentação com leveduras residuais, produzindo o dióxido de carbono que carbonatará a cerveja;
- 2.3.2. Carbonatação forçada: a cerveja é pressurizada em vaso de pressão com dióxido de carbono de maneira que haja dissolução do gás no líquido.

## 3. Envase

Nesta etapa, segue-se por uma única opção das dispostas abaixo.

- 3.1. Garrafa;
- 3.2. Barril.

Figura 2 - Diagrama de blocos do processo cervejeiro



Fonte: HAMPSON (2014).

## 2.4. Fermentação

### 2.4.1. Importância

Um ditado popular no universo cervejeiro diz que o homem faz o mosto, quem faz cerveja são as leveduras. Esta frase já evidencia a grande importância do processo fermentativo na qualidade final da cerveja, que é evidenciada por White e Zainasheff (2010, p.9, tradução própria) quando diz que

[...] o trabalho Karl Balling mostrou que a levedura converte 46,3% do extrato em dióxido de carbono, 48,4% em etanol e 5,3% em novas células. No entanto, mesmo que esses números correspondam a 100%, eles ignoram um aspecto muito importante da fermentação: enquanto metaboliza extrato, as células de levedura também

produzam centenas de outros compostos. Esses compostos existem em quantidades muito pequenas que totalizam menos de 1% da massa metabolizada de extrato, mas contribuem imensamente para o sabor e de fato contribuem para a essência da cerveja.

Estes elementos são imensamente importantes para a composição dos aromas e sabores da cerveja final e a forma como pode ser controlada a metabolização destes compostos pelas leveduras é determinante para a definição da qualidade do produto final (WHITE; ZAINASHEFF, 2010).

Não apenas uma, mas muitas variáveis podem definir o incremento ou decréscimo de determinados compostos, desejados ou não e ainda mais de acordo com um estilo previamente proposto. O acetato de isoamila, por exemplo, assim como o 4-vinil guaiacol, são compostos desejados nas cervejas do tipo *weiss* e devem ser favorecidos no processo fermentativo. Por outro lado, compostos como ácido octanóico e o 2,3-butadieno são muitas vezes indesejados e também podem ser evitados por uma boa condução do processo fermentativo.

#### 2.4.2. Variáveis

O processo fermentativo depende de uma série de variáveis as quais são necessárias ajustar de acordo com uma intenção ou interesse para que assim possa ser considerado controlado. Os açúcares disponíveis para metabolização das leveduras impactam, assim como os nutrientes, células saudáveis, temperatura controlada, pressão, dentre outros (WHITE; ZAINASHEFF, 2010).

- a) Fermento: deve ser dosado na quantidade correta para que não haja *underpitching* nem *overpitching*, além de estarem em condições saudáveis e viáveis. A seleção de cepas adequadas a cada estilo de cerveja também é relevante nos resultados obtidos, uma vez que foram selecionados em laboratório a fim de priorizar a formação de determinados ou mesmo sobreviver a altas concentrações de álcool.
- b) Açúcar: o tipo e concentração de açúcar disponível para metabolização pela levedura é relevante pois determinará se haverá esforço excessivo ou baixo demais por conta das leveduras, em cada qual situação gerando determinados compostos. A fonte do açúcar também pode impactar, uma

vez que cereais não maltados carecem de nutrientes vitais ao fermento, por exemplo, não proporcionando condições saudáveis para o processo fermentativo.

- c) Oxigênio: concentrações específicas de oxigênio também podem impactar nos sabores finais de uma cerveja. O oxigênio é muito importante para a primeira etapa da fermentação na qual ocorre a propagação das leveduras e o aumento de sua massa e população (laggin), no entanto, sendo a fermentação alcoólica um processo anaeróbico, ou seja, que ocorre na ausência de oxigênio, é necessário que não seja superdosado, existindo uma faixa ótima de concentração para que sejam atingidos bons resultados.
- d) Nutrientes: Além de açucares para serem metabolizados e oxigênio, as células de levedura carecem de outras substâncias para crescerem e executarem suas funções de forma saudável. Nitrogênio, minerais e vitaminas são necessários e muitas vezes o próprio mosto já contém quantidades necessárias dessas substâncias, todavia em algumas situações específicas é necessário suplementar o mosto para que a levedura se desenvolva de maneira saudável, especialmente ao reutilizar células.
- e) Monitoramento do processo fermentativo: o controle do processo para obtenção do resultado desejado é essencial. O livro Yeast traz como principais fatores a serem medidos e controlados, em ordem decrescente de importância a temperatura, a gravidade específica do mosto, pH, quantidade de oxigênio e por último quantidade de dióxido de carbono.

## 2.5. Controle de temperatura de fermentação

A temperatura afeta imensamente a qualidade final da cerveja. É responsável pela geração de muitos precursores de *off-flavors* e também pela capacidade das células de reabsorver alguns compostos no final da fermentação. O livro Yeast destaca em muitos momentos a massiva importância da temperatura e de um controle adequado dela (WHITE; ZAINASHEFF, 2010, tradução própria) quando diz que

[...] Uma das coisas mais críticas a ser tirada deste livro é a importância da temperatura de fermentação na qualidade da cerveja. Quando surge um problema e não é um problema relativo à contaminação, o primeiro ponto a ser verificado é a temperatura da cerveja durante todas as fases da fermentação, da inoculação até o acondicionamento final [...]. [...] Grandes e descontroladas variações de temperaturas produzem resultados ruins, especialmente quando o tamanho do lote é pequeno. Quanto menor o lote, mais rapidamente será afetado por variações da temperatura ambiente.

Há dois casos em que a temperatura pode afetar a fermentação: quando está acima da faixa nominal e quando estão abaixo da faixa nominal. Quando temos uma temperatura demasiadamente fria, a levedura pode vir a adormecer, temos problemas com o tempo de fermentação que pode ser muito lento, ocorre a inibição da formação de subprodutos que podem ser desejáveis a determinados estilos, entre outros pontos. No entanto, quando temos temperaturas demasiadamente altas, as consequências podem ser desastrosas e muitas vezes não podem ser corrigidas na etapa de maturação ou fermentação secundária, onde há a reabsorção de alguns subprodutos pelas leveduras (WHITE; ZAINASHEFF, 2010).

Dos subprodutos gerados em altas temperaturas, podemos ter a produção de álcoois superiores que muitas vezes nos remetem ao sabor de solventes. Embora muitos destes álcoois indesejáveis esterifiquem durante a fermentação secundária e dependendo do estilo se tornem desejáveis, a quantidade pode se tornar descontrolada e acabar dominando o sabor da cerveja, tornando-se inadequado ao estilo de cerveja proposto (WHITE; ZAINASHEFF, 2010).

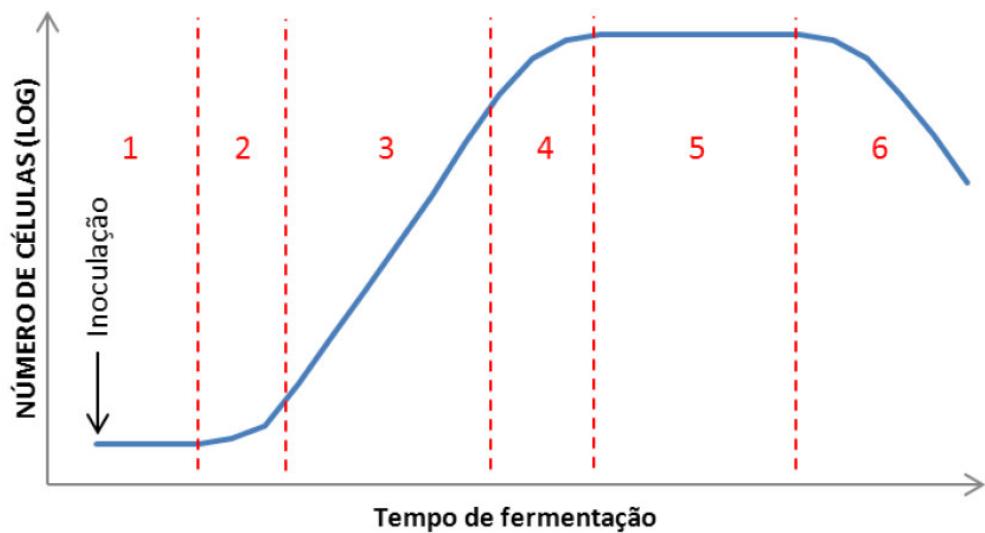
Outro subproduto comumente gerado por altas temperaturas é o diacetil. Sempre presente e até desejado em pequenas dosagens dependendo do estilo, pode produzir aromas ruins que remetem a manteiga rançosa. Quando a levedura é inoculada em mosto relativamente quente há um favorecimento na produção desse subproduto, tornando mais difícil que a levedura possa reabsorvê-lo durante o estágio secundário (WHITE; ZAINASHEFF, 2010).

Outro ponto de alerta ao controle de temperatura é que o processo fermentativo é naturalmente um processo exotérmico. A temperatura interna do fermentador pode chegar a 10°C acima da temperatura ambiente, apenas por conta da atividade da levedura, o que pode conduzir a todas as consequências exemplificadas acima. Se torna, então, fundamental que haja o devido aferimento da temperatura para que possa ser corrigida a medida do necessário. (PALMER, 2006)

## 2.6. Etapas da fermentação

O modelo cinético disposto na Figura 3 ilustra a atividade celular em função do tempo ao longo do processo de fermentativo. Em algumas etapas existe maior conversão de açúcares e serão discutidas a seguir.

Figura 3 - Fases do processo de fermentação

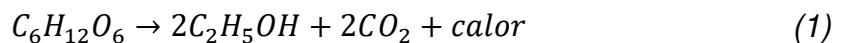


Fonte: Adaptado de Kunze, 2004.

A inoculação do fermento marca o início do processo fermentativo mesmo que num primeiro momento não haja conversão de açúcares. Esta primeira fase, chamada “lag” (1) é onde ocorre a adaptação metabólica ao meio fermentativo e ativação do metabolismo celular. Após esse primeiro momento de adaptação damos início às primeiras divisões celulares na fase de aceleração (2), onde se inicia um aumento contínuo da multiplicação celular atingindo o auge da aceleração em (3), onde temos uma taxa de crescimento celular constante na fase chamada exponencial. Em (4) temos a desaceleração onde dá-se início ao declínio da taxa

de crescimento celular promovida por diversos motivos, mas que tem como principal agente a falta de oxigênio disponível no meio para a multiplicação celular. É onde então começa a ocorrer de fato a fermentação alcoólica na ausência de oxigênio, chamada fase estacionária (5), onde temos taxa de crescimento nula e quantidade constante de células no meio. Ao final desta etapa vêm o declínio (6) e encerramento do processo (KUNZE, 2004).

É sabido que as células de levedura podem conseguir energia através do processo de respiração e da fermentação alcoólica. O consumo de oxigênio se dá num primeiro momento de reprodução celular que é o que observamos do início até a fase estacionária (5) e então começa de fato o consumo de glicose para obtenção de energia através da equação (1).



Para a quebra de cada mol de glicose ocorre a liberação de dois mols de etanol e dois de dióxido de carbono, além da liberação de calor numa grandeza de 169kJ/mol de  $C_6H_{12}O_6$ . O calor da fermentação é obtido pela equação (2).

$$\dot{q}_{fermentação} = 169 \frac{dC_6H_{12}O_6}{dt} \quad (2)$$

Sendo a constante que multiplica a taxa de consumo de glicose ao longo do tempo está na unidade kJ/mol $C_6H_{12}O_6$  (SGARBI, 2016).

## 2.7. Cinética de fermentação

Para avaliação do consumo de substrato, que aplicado à fermentação alcoólica é glicose, ao longo do tempo criou-se o parâmetro chamado velocidade instantânea de consumo de substrato a qual avalia a quantidade de glicose convertida num instante t do tempo.

$$r_s = -dS/dt \quad (3)$$

Na equação (3),  $r_s$  tem unidade g/[L·h], S é a concentração de substrato também em g/L e t é o tempo em horas.

No entanto, uma vez que a concentração celular X varia ao longo do tempo deve ser levado em conta a quantidade de células que estão consumindo o

substrato, surgindo então o parâmetro velocidade específica de consumo de substrato (HISS, 2001). A equação (4) representa a velocidade específica em função da quantidade de células, consumo de substrato e tempo.

$$\mu_s = (1/X)/(-dS/dt) \quad (4)$$

$\mu_s$  tem unidade  $h^{-1}$ , X é a concentração de células em g/L, S é a concentração de substrato também em g/L e t é o tempo em horas.

## 2.8. Peltier

O efeito Peltier é um fenômeno termoelétrico no qual um gradiente de temperatura é gerado ao passar uma corrente elétrica por dois condutores ou semicondutores distintos, no qual um lado esquenta e o outro esfria, dependendo do sentido da corrente. O efeito Peltier é o fenômeno oposto ao efeito Seebeck, no qual uma corrente é gerada ao criar um gradiente de temperatura entre dois condutores ou semicondutores distintos (FIALHO, 2008).

O calor de Peltier gerado pelas junções pode ser calculado conforme equação (5).

$$Q = (\pi A - \pi B) \times I \quad (5)$$

Na equação (5), Q é a taxa de transferência de calor de Peltier absorvida pela junção fria por unidade de tempo,  $\pi A$  e  $\pi B$  são respectivamente os coeficientes de Peltier dos materiais A e B e I é a corrente aplicada ao circuito, dada em amperes (FIALHO, 2008).

## 2.9. Transferência de calor

Segundo Holman (1999, p.17), a termodinâmica ensina que a transferência de energia que se dá entre corpos materiais como resultado de uma diferença de temperatura é definida como calor. Ou seja, é uma forma de energia que reflete o nível de agitação molecular e que sempre tende a se transferir de um local mais energético para um com menor potencial de energia, gerando um gradiente. Esse gradiente é o responsável pela transferência do calor, que de acordo com a equação fundamental da calorimetria pode ser calculado com base no calor específico, massa e diferença de temperatura de corpo, conforme equação (6).

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (6)$$

De acordo com a primeira lei da termodinâmica, o calor não pode ser criado, sendo sempre transferido ou gerado a partir de outra fonte de energia, com balanço nulo em um sistema fechado, como consta na equação (7).

$$\sum_i \frac{dQi}{dt} - \sum_J \frac{dWj}{dt} = \Delta E \quad (7)$$

A transferência de calor se manifesta de três diferentes maneiras no meio, muitas vezes até concomitantemente, as quais serão discutidas a seguir.

### 2.9.1. Condução

A transferência de calor por condução depende de um contato físico direto e íntimo entre o corpo de maior energia e o de menor energia. Havendo essa interface, o calor fluirá entre eles, atingindo, se o tempo e a taxa de troca permitirem, o equilíbrio térmico. Ocorre em qualquer meio (líquido, sólido e gasoso), no entanto vale ressaltar que é a única forma com que o calor pode ser transmitido entre corpos sólidos e opacos. A lei que rege a condução de calor é descrita conforme equação (8).

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx} \quad (8)$$

Na equação (8),  $k$  é a condutividade térmica do material,  $A$  é a área da seção de transferência, e  $dT/dx$  o gradiente de temperatura na seção. Por conta de se adotar o eixo  $x$  como fluxo positivo de calor e o calor fluir da região de maior para a de menor temperatura, adota-se o sinal negativo. O resultado é a taxa de transferência de calor  $q_k$ . (ÖZISIK, 1990)

### 2.9.2. Convecção

Este tipo de transferência se dá pela ação combinada da troca de calor por contato (condução) e mistura do fluido. A mistura do fluido ocorre pela criação de uma diferença de densidade no fluido em virtude do incremento ou decréscimo da temperatura, que gera contração ou expansão do volume. Quando assim ocorre, chama-se convecção livre. Caso haja movimentação por agentes externos, como

bombas e ventiladores, temos então a chamada convecção forçada. A equação (9) relaciona a convecção com a área, taxa de convecção e diferença de temperatura (ÖZISIK, 1990).

$$q_c = h_c A \Delta T \quad (9)$$

### 2.9.3. Radiação

Mesmo não havendo interação física de nenhum tipo entre corpos com diferentes temperaturas, é possível que haja troca térmica entre eles. Todo corpo com temperatura acima de 0K emitem calor radiante. É esse tipo de troca térmica que faz possível a transmissão do calor do sol para a Terra, por exemplo, uma vez que não há matéria que conduza esse calor no espaço. Fenomenologicamente, este processo se assemelha a radiação da luz, diferindo-se apenas no comprimento de onda (ÖZISIK, 1990).

### 2.9.4. Modelo de fluxo de calor transitório em corpos com resistência interna desprezível

Embora não haja nenhum material que de fato apresente resistência térmica interna com valor nulo, utiliza-se com precisão aceitável um modelo a fim de simplificar problemas de grande complexidade que tem por base essa premissa, desde que satisfeitas algumas condições que serão abordadas a seguir. O modelo se justifica por uma grande diferença entre a resistência térmica interna e externa do corpo em questão, o que faz com que a variação de temperatura interna seja praticamente instantânea e uniforme se comparado à mesma variação de temperatura no fluido externo. A constante que avalia a condição a ser satisfeita é o número de Biot, de grandeza adimensional, muitas vezes representado por Bi. A equação (10) compara os valores de resistência térmica interna com externa (ÖZISIK, 1990).

$$Bi = \frac{hL}{k_s} \quad (10)$$

Na equação (10),  $k_s$  é a condutividade térmica interna do sólido em questão e  $h$  é o coeficiente médio de transmissão de calor e  $L$  é simplificadamente a razão entre a área e o volume do corpo estudado, conforme equação (11).

$$L = \frac{V}{A_s} \quad (11)$$

. Quanto temos  $Bi < 0,1$  o modelo apresenta uma precisão aceitável (ÖZISIK, 1990).

Satisfeita essa condição, o modelo propõe um balanço de energia no qual se presume que o calor trocado do corpo sólido com o fluido circundante seja o mesmo em módulo, com sinais opostos, assim sendo:

$$\left( \begin{array}{l} \text{variação da energia interna} \\ \text{da barra durante } dt \end{array} \right) = \left( \begin{array}{l} \text{fluxo de calor líquido da barra} \\ \text{para o banho durante } dt \end{array} \right)$$

Ou em termos das grandezas físicas envolvidas, conforme equação (12).

$$-c\rho V dT = hA_s(T - T_\infty)dt \quad (12)$$

Na equação (12), c é o calor específico do corpo,  $\rho$  a densidade, V o volume, T a temperatura média,  $T_\infty$  a temperatura ambiente, h o coeficiente médio de transmissão de calor,  $A_s$  a área do corpo e  $dT$  a mudança de temperatura ao longo do tempo. Separando as variáveis T de t, obtemos a equação (13).

$$\frac{dT}{(T - T_\infty)} = -\frac{hA_s}{c\rho V} dt \quad (13)$$

Ao integrar a equação (13) ao longo dos limites de tempo e temperatura, obtém-se a equação (14).

$$\ln \frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = -\frac{hA_s}{c\rho V} t \quad (14)$$

## 2.10. Trocadores de Calor

Qualquer dispositivo que efetue a transmissão de calor de um fluido para outro é considerado um trocador de calor. O trocador de calor mais simples é aquele no qual dois fluidos são misturados em temperaturas distintas, um mais quente e outro mais frio, sem separação alguma entre eles, atingindo ao final a mesma temperatura, que se encontra entre as temperaturas iniciais quente e fria. No entanto, geralmente torna-se conveniente uma separação física entre os fluidos que estão realizando a troca térmica. Posto isso, podemos classificar os trocadores de

calor em diversos tipos de acordo com tema do qual julga-se necessário tomar perspectiva (ÖZISIK, 1990).

#### *2.10.1. Tipos de trocadores de calor*

##### **Classificação pelo processo de transferência**

Sob o aspecto do processo de transferência térmica podemos definir o contato com *direto* ou *indireto*. Os de contato indireto também podem ser chamados de trocadores de calor de superfície e possuem uma barreira física em fazendo com que não haja mistura entre os dois fluidos. Já o processo de transferência direta ocorre quando há interface direta entre os fluidos, como por exemplo em fluidos não miscíveis ou em fluidos que estão em fases distintas, como num sistema de aspersão de água para refrigeração do ar (ÖZISIK, 1990).

##### **Classificação pelo tipo de construção**

Trocadores tubulares possuem baixo custo relativo e são amplamente utilizados para os mais diversos fins, sendo produzidos em vários tamanhos diferentes, sendo um dos tipos mais tradicionais o casco tubo. Podem ser utilizados em trocas térmicas entre líquido para líquido, líquido para gás e gás para gás (ÖZISIK, 1990).

Já os trocadores de placa são construídos como o próprio nome já diz por placas que podem ser lisas ou onduladas e são dispostas juntas num bloco. Geralmente não suportam elevadas pressões e temperaturas (ÖZISIK, 1990).

Os trocadores de placa aletada muito se aproximam dos trocadores de placa comuns, no entanto podem ter sua eficiência aumentada consideravelmente adicionando aletas onduladas ou planas entre as placas do trocador, sendo mais comumente utilizados em trocas gás para gás (ÖZISIK, 1990).

Por fim, os trocadores regenerativos podem ser estáticos ou dinâmicos e o conceito utilizado é que a troca de calor ocorra de maneira indireta utilizando um corpo sólido como receptor ou fornecedor de calor. Um exemplo de regenerativo estático utiliza bolas, seixos ou pós e um exemplo de regenerativo dinâmico é o trocador de calor rotativo (ÖZISIK, 1990).

## Classificação segundo disposição das correntes

Os trocadores de calor ainda podem ser classificados quanto ao sentido em que correm as correntes dos fluidos quente e frio. Quando ambas seguem em mesmo sentido é dito que as correntes são paralelas. Ainda podem se apresentar dispostas em contracorrente, aumentando a eficiência de troca térmica ou ainda em corrente cruzada, onde temos as correntes operando em sentido perpendicular uma à outra (ÖZISIK, 1990).

### 2.10.2. Coeficiente global de transferência de calor

O coeficiente global de transferência de calor é comumente associado ao cálculo da energia transferida por trocadores de calor. É tido como a resistência específica do sistema à transferência térmica. O cálculo do calor trocado por uma serpentina, por exemplo, leva em conta o gradiente de temperatura e a capacidade unitária de transferência de calor, assim como a área de troca térmica da serpentina (ÖZISIK, 1990). A equação (15) relaciona o coeficiente global de troca térmica, a área e a diferença de temperatura.

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (15)$$

A fim de aumentar a precisão de cálculo do gradiente de temperatura do sistema, que não é linear ao longo de todo o trocador de calor, surge o conceito de diferença de temperatura média logarítmica, ou simplesmente DTML, que é dado conforme equação (16).

$$DTML = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln(\Delta T_a / \Delta T_b)} \quad (16)$$

Assim incluindo a diferença de temperatura aperfeiçoada na equação (15), obtém-se a equação (17).

$$Q = U \cdot A \cdot \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln(\Delta T_a / \Delta T_b)} \quad (17)$$

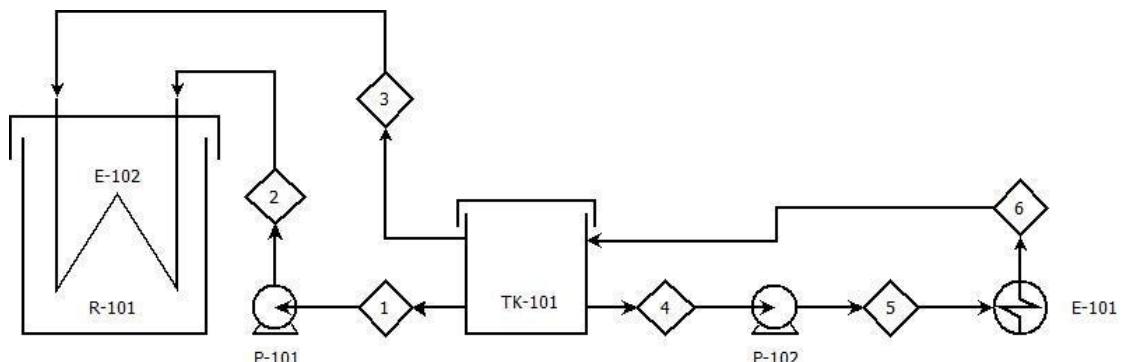
### 3. METODOLOGIA

A pesquisa em questão possui natureza aplicada e foi descritiva na correlação das variáveis envolvidas por meio de análise quantitativa dos dados colhidos. Consistiu na elaboração de um protótipo composto por itens que serão minuciosamente apresentados conforme categoria. Em sequência, foi descrito o processo de definição de variáveis e dimensionamento do projeto para execução do protótipo. O protótipo foi avaliado quanto ao custo de construção, potência e capacidade de manutenção de temperatura e eficiência energética.

#### 3.1. Materiais

O sistema montado foi composto por dois reservatórios: o fermentador, propriamente dito, e um banco de frio. Este sistema é monitorado e operado por um microcontrolador (Arduino) que realiza leitura das informações e toma as ações necessárias para manutenção da temperatura por meio da recirculação de fluido refrigerante. Na Figura 4 está presente o diagrama de fluxo do processo descrito com detalhes dos equipamentos citados na Quadro 1.

Figura 4 – Diagrama de fluxo do processo (PFD)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 1 - Equipamentos e especificações

Equipamento	Código	Área (m <sup>2</sup> )	Potência (W)	Vazão máx. (L/min)	Volum e (L)	Temperatura (°C)
Trocador de calor	E-101	-	N/A	N/A	N/A	N/A
Trocador de calor	E-102	0,2243	N/A	N/A	N/A	N/A
Bombas	P-101	N/A	20,0	15,0	N/A	N/A
Bombas	P-102	N/A	5,0	4,0	N/A	N/A
Reator	R-101	N/A	N/A	N/A	4,0	18,0
Tanque	TK-101	N/A	N/A	N/A	2,5	14,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

O fermentador hermético conta com um trocador de calor interno tipo serpentina. Foi utilizado como fluido refrigerante água, que tem sua recirculação no fermentador feita dentro da serpentina por uma bomba de 20W. A transferência de calor é feita por meio da convecção no líquido (mosto cervejeiro) dentro do fermentador.

O fluido refrigerante foi mantido na temperatura adequada no banco de frio, um compartimento com isolamento térmico e separado do sistema de fermentação, por meio de um sistema de refrigeração composto por um elemento refrigerante (pastilha de Peltier) e um radiador, que é a interface de troca térmica entre o líquido e a pastilha. O fluxo dentro do radiador é realizado por uma bomba de 5W, que gera a troca de calor por condução e convecção forçada.

### 3.1.1. Fermentador

Para este projeto foram utilizados baldes cilíndricos fabricados em polipropileno termoplástico alimentício atóxico de 5,0L. Também foi utilizado como revestimento isolante térmico uma manta de polietileno expandido de baixa densidade (PEBD) revestido com material refletivo de 8mm na tentativa de variar os dados coletados e otimizar o funcionamento do sistema. A face refletiva foi disposta para fora com o objetivo de evitar o incremento de calor do sistema por radiação.

### 3.1.2. Arduino

O Arduino é um microcontrolador de prototipação eletrônica *open-source* que recebe e envia sinais elétricos de sensores e atuadores, podendo controlar variáveis definidas. Neste projeto foi utilizado o Arduino UNO como o da Figura 5, que conta com um processador AtMega328. O Arduino foi programado por meio do software “Arduino IDE”, que aceita linguagem C/C++.

Figura 5 - Arduino UNO R3



Fonte: ARDUINO (2019).

### 3.1.3. Sensores

Sensores são dispositivos responsáveis por converter uma entrada do meio ambiente (como luz, temperatura, umidade, etc.) em uma saída eletrônica passível de leitura.

Neste projeto foram utilizados apenas sensores de temperatura a prova d’água modelo DS18B20.

### 3.1.4. Atuadores

Atuadores, ao contrário dos sensores, são dispositivos responsáveis por criar uma alteração no meio, ou seja, atuar nele. Atuadores podem interferir na temperatura, vazão de uma tubulação, entre outros. Os atuadores que foram utilizados no projeto serão descritos de forma detalhada a seguir:

### 3.1.4.1. Bombas

Para o sistema de bombeamento de água utilizou-se uma bomba de 3,6W como a da Figura 6 com capacidade de bombeamento de 4,0L/min que opera com 12V de tensão e corrente contínua com valor nominal máximo de 350mA. Esta bomba tem por finalidade realizar a recirculação do fluido refrigerante no trocador de calor onde estão associadas as placas de Peltier. Foi utilizado também uma outra bomba, esta última de 20W com capacidade de bombeamento de 15,0L/min que opera em corrente alternada a 127V. A bomba mais potente tem por finalidade realizar a recirculação do fluido refrigerante na serpentina imersa no mosto a ser fermentado, dentro do fermentador.

Figura 6 - Bomba 3,6W

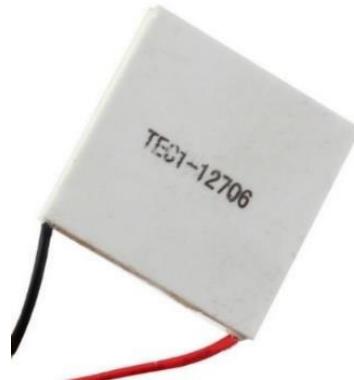


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.4.2. Pastilha de Peltier

São responsáveis pela criação de um gradiente térmico na unidade de troca de calor destinado ao resfriamento do líquido refrigerante. São de comum uso na refrigeração de pequenos bebedouros e purificadores de água e foram utilizadas duas pastilhas TEC1-12706 como a da Figura 7, uma em cada lado com a face fria voltada para o radiador.

Figura 7 – Pastilha de Peltier



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.4.3. Coolers/Fans

Os coolers operam em 12V, consomem 0,23A cada e são acionados simultaneamente às pastilhas de Peltier e ao sistema de recirculação do banco de gelo para que seja retirado calor por meio do dissipador e o maior gradiente de temperatura seja gerado nas pastilhas de Peltier, aumentando a eficiência de resfriamento. Foram utilizados dois coolers como o da Figura 8, um para cada dissipador.

Figura 8 – Fan



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.4.4. Trocadores de Calor

#### 3.1.4.4.1. Dissipadores

Tem por finalidade retirar calor do lado quente da pastilha de Peltier. No projeto foram utilizadas duas unidades de alumínio com dimensões de 25mm de

altura por 104mm de largura e 100mm de comprimento, uma para cada placa de Peltier.

#### 3.1.4.4.2. Chiller

É responsável por realizar a troca térmica do fluido refrigerante com o mosto a ser refrigerado maneira indireta e é classificado como trocador tubular quanto a sua forma de atuação. No projeto foi utilizado um chiller (ou serpentina) de alumínio com tubo de 3/8in de diâmetro externo e 7,5m de comprimento, resultando numa área de troca térmica calculada conforme equação (18), na qual substituindo as variáveis obtém-se pela equação (19) o valor de 0,2243m<sup>2</sup>.

$$A = 2\pi r \cdot L \quad (18)$$

$$A = 2 \cdot 3,1415 \cdot \frac{0,009525}{2} \cdot 7,5 = 0,2243m^2 \quad (19)$$

#### 3.1.4.4.3. Radiador

Unidade responsável pela troca térmica do fluido refrigerante com as pastilhas de Peltier. Feito em alumínio, pode ser considerado um trocador tubular de troca indireta.

Figura 9 - Radiador de troca térmica



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 3.1.4.5. Fonte de alimentação

Para alimentar o sistema elétrico foi utilizado uma fonte de computador do tipo ATX de 200W em razão de sua potência, versatilidade e baixo custo, uma vez

que foram utilizadas diferentes tensões no projeto, as quais se encontram todas disponíveis nesta fonte.

O sistema que foi utilizado para controlar a temperatura foi comandado pelo Arduino, que gerenciou dois núcleos de controle (mosto e banco de frio) fazendo o comparativo das temperaturas medidas pelos sensores com o *setpoint* definido. Um sensor de temperatura fez a leitura da temperatura ambiente para avaliação da influência desta variável no experimento. Um relé controlou a operação dos atuadores por meio da liberação da tensão da fonte de energia com base na decisão do Arduino ao gerir os núcleos descritos. Um diagrama esquemático do circuito elétrico proposto está disponível no Anexo A assim como o descriptivo completo dos componentes utilizados e especificações técnicas no Anexo B.

### 3.2. Método

#### 3.2.1. Definição de coeficientes e taxas

Para avaliação da eficiência do protótipo, previamente, para determinação de constantes de troca de calor, foram realizados ensaios de troca térmica com água partindo de uma temperatura definida de 10,0°C durante 300 minutos, realizando tomadas de dados do fermentador e da temperatura ambiente a cada 1 minuto, considerando a metodologia de pesquisa experimental para coleta de dados. Buscou-se com isso definir o melhor cenário entre volume de fermentadores e isolamento térmico, havendo a disposição as possibilidades de isolamento com manta de poliestireno expandido e fermentadores de 5 ou 12L.

Foram ensaiadas quatro situações distintas, para que fosse elegido o melhor cenário (menor dissipação térmica) para dar sequência ao projeto. Variou-se volume e revestimento do fermentador, obtendo-se então as seguintes situações: fermentador de 5 litros úteis sem revestimento térmico (D05L), fermentador de 5 litros úteis com revestimento térmico (E05L), fermentador de 12 litros úteis sem revestimento (D12L) e fermentador de 12 litros úteis com revestimento térmico (E12L). Os fermentadores de 12 litros úteis foram carregados com 6,5 litros de água e os de 5 litros úteis com 4 litros de água.

### *3.2.2. Dimensionamento e modelagem*

Com os valores dos coeficientes de troca térmica calculados e disponíveis, foram estimados tempos do ciclo de operação e os fluxos de energia envolvidos, assim como a potência necessária para atender à manutenção da temperatura estabelecida. Foi adotado como base para a modelagem do sistema o fluxo de calor transitório em sistemas com resistência interna desprezível, a fim de simplificar o entendimento do corpo de estudo.

### *3.2.3. Validação do projeto*

Numa seguinte etapa, foi realizado um ensaio com *setpoint* definido em 18,0°C, temperatura pertinente ao cenário de fermentação do mosto cervejeiro, característico de cervejas do tipo ale, com o objetivo de verificar como o sistema se comporta, com mosto e incluso o calor gerado pela fermentação. Foi analisado o desempenho de manutenção da temperatura estabelecida em relação a temperatura ambiente. O Arduino foi responsável por realizar o controle do sistema além de registrar a evolução da temperatura em relação ao tempo para criar o banco de dados que foi utilizado para realizar os cálculos. Com os cálculos feitos e conhecido o balanço de energia do sistema, foi possível validar o sistema e realizar as considerações pertinentes quanto proposta inicial de potência de refrigeração, a quantidade de calor gerado na fermentação e o ganho de calor do sistema por conta da temperatura ambiente.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Definição de coeficientes e taxas

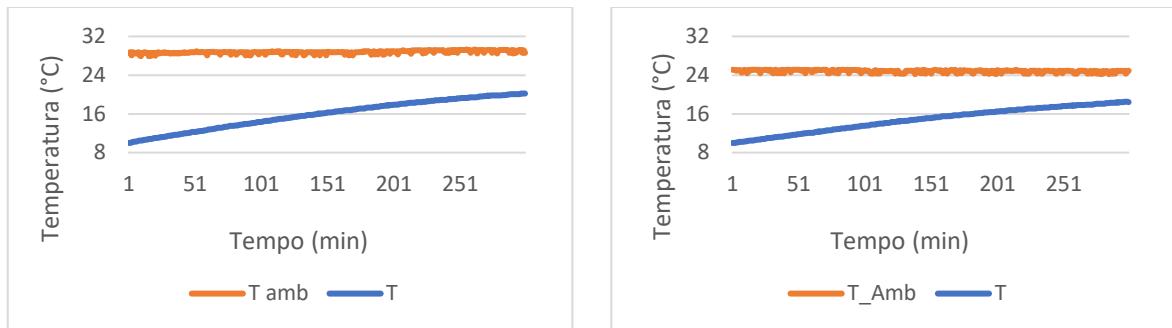
#### 4.1.1. Determinação do coeficiente de troca térmica do fermentador

Foram realizados ensaios de troca térmica com grandezas conhecidas a fim de definir a variável indefinida. Utilizou-se um Arduino Uno para realizar o monitoramento e registro dos dados obtidos ao longo do ensaio.

Cada um dos cenários resultantes da combinação de volume e isolamento apresentados na metodologia foi ensaiado em duplicata a fim de obter uma base de dados mais confiável, culminando nos resultados dispostos a seguir nas Figuras de 10, 11, 12 e 13.

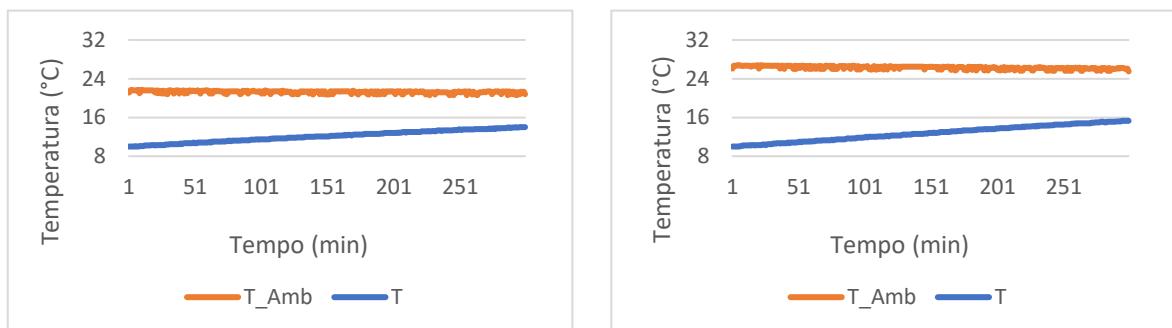
Em laranja consta o controle da temperatura ambiente obtido durante o ensaio para cálculo do gradiente de temperatura e efeito da transferência de calor externa para o meio de controle. Em azul, a variável de maior interesse, a temperatura interna do fermentador que estava sendo controlada em função do tempo.

Figura 10 – Perfil de temperatura do fermentador D12L em função do tempo



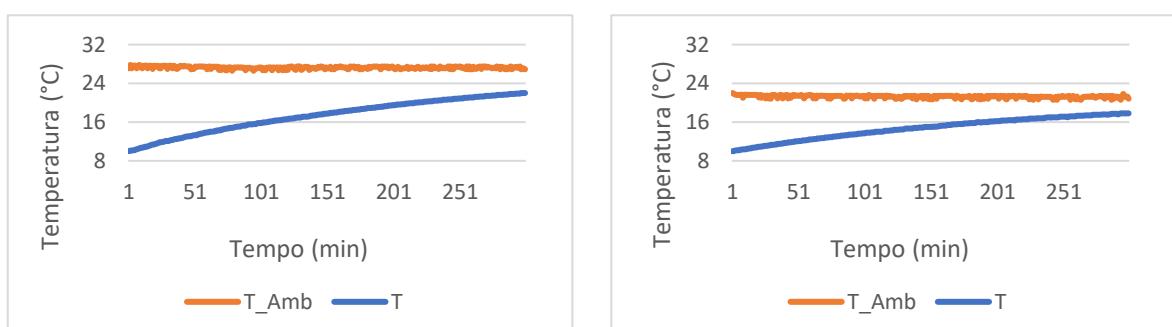
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 11 - Perfil de temperatura do fermentador E12L em função do tempo



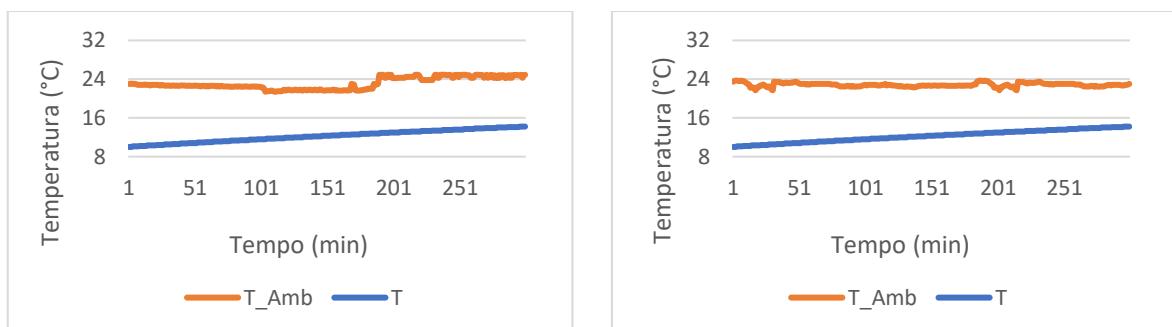
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 12 - Perfil de temperatura do fermentador D05L em função do tempo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 - Perfil de temperatura do fermentador E05L em função do tempo



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.1.1.1. Cálculo do coeficiente de troca térmica

Para o cálculo do coeficiente de troca térmica do sistema foi adotado o modelo de fluxo de calor transitório em sistemas com resistência interna desprezível por apresentar uma precisão adequada às necessidades do experimento e simplificar a modelagem.

A partir da equação (17), utilizou-se da propriedade logarítmica para remover o dividendo da função homônima, obtendo então a equação (20).

$$\ln(T - T_{\infty}) - \ln(T_0 - T_{\infty}) = -\frac{hA_s}{c\rho V} t \quad (20)$$

Isolando o termo contendo a variável T da equação (20) obtém-se a equação (21).

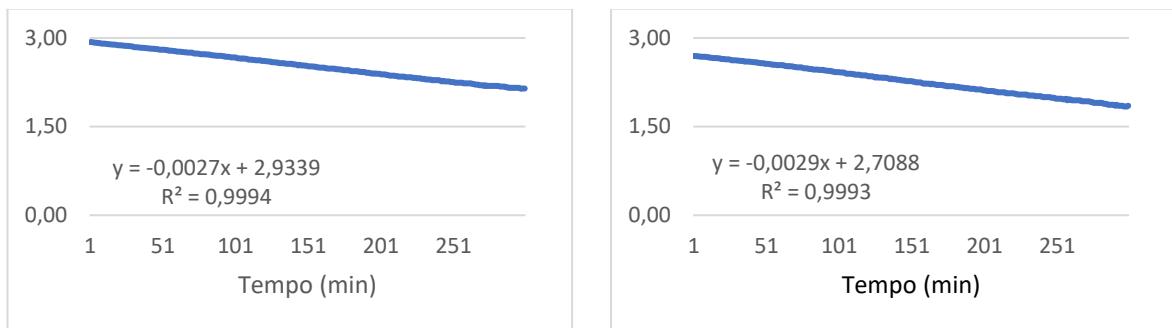
$$\ln(T - T_{\infty}) = -\frac{hA_s}{c\rho V} t + \ln(T_0 - T_{\infty}) \quad (21)$$

A partir da equação (21) torna-se possível a comparação com a equação (22), possibilitando a linearização dos dados coletados.

$$Y(t) = A \cdot t + B \quad (22)$$

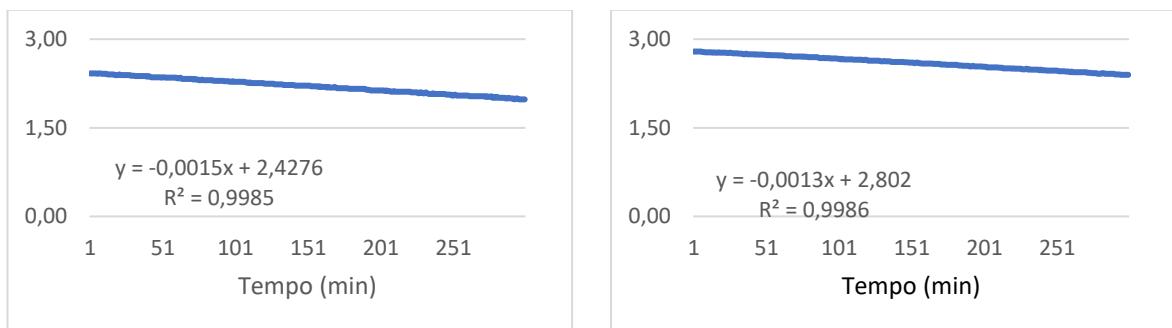
Os dados obtidos estão expressos nas Figuras 14, 15, 16 e 17, dispostas a seguir, conforme cada uma das quatro condições de fermentadores apresentadas no início dessa sessão.

Figura 14 - Linearização dos ensaios do fermentador D12L



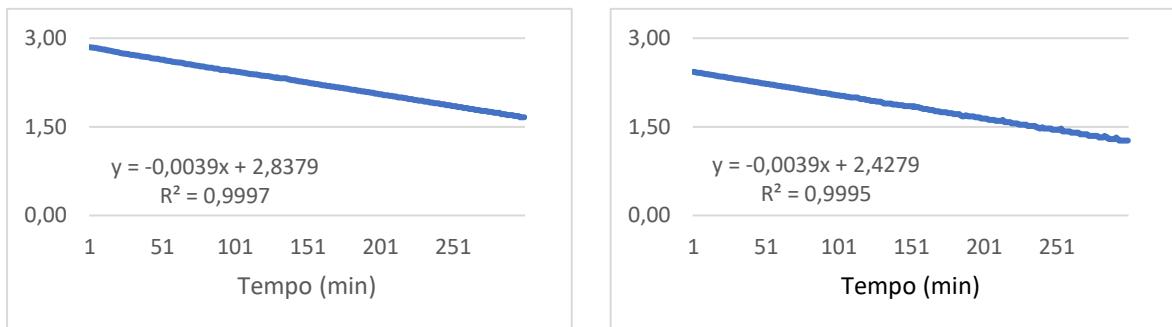
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15 - Linearização dos ensaios do fermentador E12L



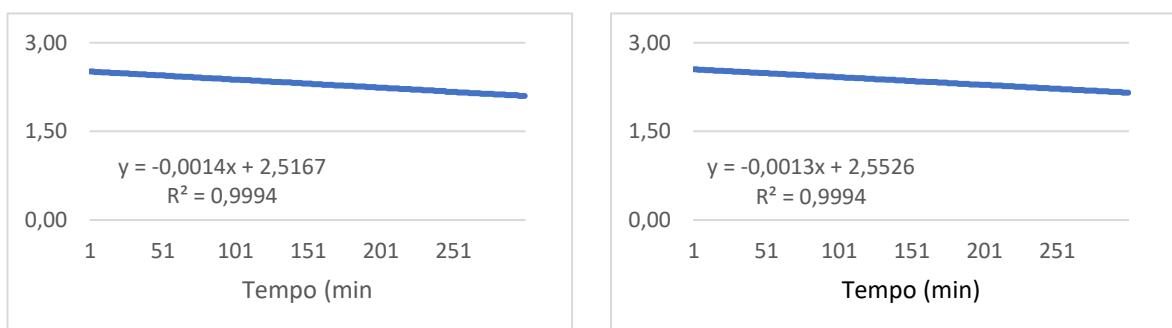
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 - Linearização dos ensaios do fermentador D05L



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17 - Linearização dos ensaios do fermentador E05L



Fonte: Elaborado pelo autor.

Cotejando os resultados obtidos a partir da linearização com a equação (21) temos que o valor da inclinação da reta possui módulo igual ao termo  $\frac{h \cdot A_s}{c \cdot \rho \cdot V}$

Para fins de comparação, os valores de linearização foram convertidos para segundos dividindo a inclinação por 60 para se obter o coeficiente de dissipação térmica ( $h$ ) em  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ . Feito isso, os dados foram dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultado dos ensaios de troca térmica

Ensaio	$\frac{h \cdot A_s}{c \cdot \rho \cdot V} \cdot 10^5$	$A_s$ $\text{m}^2$	$c$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\rho$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$V$ $\text{m}^3$	$h$ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
D12L#1	4,4963	0,1203	3,9836	990,35	0,0120	17,6896
D12L#2	4,8610	0,1203	3,9836	990,35	0,0120	19,1243
E12L#1	2,4606	0,1203	3,9836	990,35	0,0120	9,6805
E12L#2	2,2464	0,1203	3,9836	990,35	0,0120	8,8379
D05L#1	6,5370	0,0689	4,0256	992,15	0,0050	18,9377
D05L#2	6,5178	0,0689	4,0256	992,15	0,0050	18,8821
E05L#1	2,3062	0,0689	4,0256	992,15	0,0050	6,6811
E05L#2	2,2050	0,0689	4,0256	992,15	0,0050	6,3878

Fonte: Elaborado pelo autor.

As demais variáveis foram calculadas conforme a equação (23) e constam na Tabela 2, considerando o fermentador como um tronco de cone, como consta na equação (24), onde  $g$  é a geratriz que pode ser calculada conforme equação (25). As áreas da base do sólido foram calculadas conforme equação (26) e equação (27) para as bases maior e menor, respectivamente.

$$A_s = A_T + A_B + A_b \quad (23)$$

$$A_T = \pi \cdot (R - r) \cdot g \quad (24)$$

$$g = \sqrt{h^2 + (R - r)^2} \quad (25)$$

$$A_B = \pi R^2 \quad (26)$$

$$A_b = \pi r^2 \quad (27)$$

Tabela 2 - Dimensões dos fermentadores

<b>Fermentador</b>	<b>R</b> mm	<b>r</b> mm	<b>h</b> mm	<b><math>A_s \cdot 10^2</math></b> $m^2$
5L	102,5	85,0	240,0	6,8934
12L	137,5	120,0	285,0	12,0333

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 - Propriedades físicas dos materiais utilizados

<b>Material</b>	<b>c</b> kJ/kg°C	<b>p</b> kg/m³
Água	4,184	997
Ar	1,00416	1,201
Polipropileno	1,7	925

Fonte: INCOMPLAST POLÍMEROS E METAIS LTDA, (201?); Instituto de Física da Universidade de São Paulo (201?).

Diante das propriedades físicas dos materiais apresentados na Tabela 3, foi calculada uma média ponderada com base na contribuição proporcional em massa de cada componente a fim de tratar todo o conjunto como um objeto único, conforme a Tabela 4 e 5. Cada linha corresponde à influência de cada componente no total contido na última linha.

Tabela 4 - Propriedades físicas do fermentador de 12L

<b>Material</b>	<b>m</b> kg	<b>c</b> kJ/kg·K	<b>p</b> kg/m³	<b>V</b> m³
Água	6,481	3,8476	916,839	0,0065
Ar	0,007	0,0009	0,001	0,0055
Polipropileno	0,560	0,1351	73,505	-
<b>Total</b>	<b>7,047</b>	<b>3,9836</b>	<b>990,345</b>	<b>0,0120</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 - Propriedades físicas do fermentador de 5L

<b>Material</b>	<b>m</b> kg	<b>c</b> kJ/kg·K	<b>ρ</b> kg/m <sup>3</sup>	<b>V</b> m <sup>3</sup>
Água	3,988	3,9176	933,517	0,0040
Ar	0,001	0,0003	0,000	0,0010
Polipropileno	0,270	0,1078	58,638	-
<b>Total</b>	<b>4,259</b>	<b>4,0256</b>	<b>992,155</b>	<b>0,0050</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.1.1.2. Cálculo de Biot

Para que esse método possa ser adotado, validou-se as condições por meio do número de Biot conforme equação (10) para cada um dos quatro modelos de fermentadores apresentadas no início dessa sessão, constando os resultados obtidos na Tabela 6.

Tabela 6 – Cálculo do número de Biot

<b>Condição</b>	<b>h</b> W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup>	<b>A</b> m <sup>2</sup>	<b>V</b> L	<b>L</b> m	<b>k<sub>s</sub></b> W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	<b>Bi</b> -
D12L	18,4069	0,1203	0,0120	0,0997	0,6000	3,0593
E12L	9,2592	0,1203	0,0120	0,0997	0,6000	1,5389
D05L	18,9099	0,0689	0,0050	0,0725	0,6000	2,2860
E05L	6,5344	0,0689	0,0050	0,0725	0,6000	0,7899

Fonte: Elaborado pelo autor.

Utilizou-se como valor de condutividade térmica interna do sólido o  $k_s$  da água por ter valor muito próximo ao  $k_s$  da cerveja.

Embora os valores obtidos não tenham atingido valores muito inferiores à um, em que a precisão do equacionamento ganha grande exatidão, seguiu-se com esta modelagem por atender às necessidades de precisão do projeto.

Para sequência do projeto, definiu-se que o protótipo seria construído em fermentador encamisado de 5,0L por dois principais motivos: possuir o menor valor de Biot, o que significa que a modelagem teórica é a mais próxima à realidade e também por possuir o melhor isolamento térmico nas condições ensaiadas.

#### 4.1.2. Determinação da taxa de troca térmica do trocador de calor

Para determinação do coeficiente global da serpentina realizou-se um teste com o trocador tipo serpentina no qual o objetivo era aquecer 4,0L de água a temperatura de 24,9°C com 7,65L de água a 47,2°C passando pela serpentina imersa no volume a ser aquecido. O teste durou 130s para que todos o volume de 7,65L fosse bombeado pela serpentina, fazendo com que os 4,0L atingissem a temperatura final de 36,4°C e a água utilizada para aquecimento finalizasse a 39,4°C. Os valores apresentados estão compilados na Tabela 7. O cálculo do calor transferido foi realizado a partir da equação (6) e calculado conforme equação (28).

$$\Delta q_{ferm} = 4\text{kg} \cdot 4,184 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (36,4^\circ\text{C} - 24,9^\circ\text{C}) = 192,5\text{kJ} \quad (28)$$

Caso todo o calor fosse trocado sem perdas de forma ideal o equilíbrio térmico seria atingido quando ambas as massas de água estivessem a 39,5°C, o que se justifica pela redistribuição homogênea da energia existente no meio, exemplificado na equação (29) e conforme cálculos descritos na equação (30).

Tabela 7 – Dados de teste de troca térmica da serpentina

Variável	Valor	Unidade de medida
Vazão	3,5	L/min
Tempo	130	s
T <sub>qi</sub>	47,2	°C
T <sub>qf</sub>	39,4	°C
T <sub>f<sub>i</sub></sub>	24,9	°C
T <sub>f<sub>f</sub></sub>	36,4	°C

Fonte: Elaborado pelo autor.

$$q_{total} = m_1 \cdot c \cdot T_1 + m_2 \cdot c \cdot T_2 = m_{total} \cdot c \cdot T_{média} \quad (29)$$

$$T_{média} = \frac{4\text{kg} \cdot 24,9^\circ\text{C} + 7,65\text{kg} \cdot 47,2^\circ\text{C}}{4\text{kg} + 7,65\text{kg}} = 39,5^\circ\text{C} \quad (30)$$

Assim, podemos dizer que a quantidade máxima de calor que poderia ter sido transferida,  $\Delta q_{max}$ , pode ser calculada pela equação (31).

$$\Delta q_{max} = 7,65\text{kg} \cdot 4,184 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (39,5^\circ\text{C} - 47,2^\circ\text{C}) = -245,1\text{kJ} \quad (31)$$

Com isso podemos definir que o sistema teve uma eficiência de 78,5% em sua troca térmica, como calculado na equação (32), tendo em vista que  $\Delta q_{max}$  pode ser tido como valor total.

$$h = \frac{\Delta q_{ferm}}{\Delta q_{max}} = \frac{192,5\text{kJ}}{245,1\text{kJ}} = 0,785 \quad (32)$$

A partir dos resultados obtidos, pode-se afirmar que, em função da área de troca térmica e do coeficiente global de troca térmica que são constantes neste sistema, a taxa de troca da serpentina, com base na equação (15), foi 9,62UA W, calculado a partir da equação (33) e equação (34).

$$\Delta T_{MLDT} = \frac{(47,2 - 24,9) - (39,4 - 36,4)}{\ln[(47,2 - 24,9)/(39,4 - 36,4)]} = 9,62 \quad (33)$$

$$\dot{Q} = 9,62\text{UA W} \quad (34)$$

## 4.2. Dimensionamento e modelagem

Com os valores dos coeficientes de troca térmica calculados e disponíveis, foram estimados tempos do ciclo de operação e os fluxos de energia envolvidos, assim como a potência necessária para atender à manutenção da temperatura estabelecida. Foi adotado como base para a modelagem do sistema o fluxo de calor transitório em sistemas com resistência interna desprezível, a fim de simplificar o entendimento do corpo de estudo.

### 4.2.1. Balanço de energia

Uma vez sendo objetivo do projeto manter constante a temperatura de um compartimento definido, é necessário assegurar que o balanço de energia deste compartimento em questão seja o mais próximo possível de zero, evitando o acréscimo ou decréscimo de calor.

Por conta de um suposto de gradiente de temperatura do compartimento definido com o ambiente, prevê-se uma tendência de ganhar calor do ambiente. Outro ponto relevante a ser considerado é a geração de energia térmica a partir da fermentação, então podemos considerar o sistema como havendo geração de energia. Assim, o balanço global de energia é descrito conforme equação (35).

$$\dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{out} + \dot{Q}_g = 0 \quad (35)$$

Onde podemos resumir  $Q_{in}$  como a energia que tende a entrar no sistema por conta do gradiente de temperatura, ou seja, o calor trocado com o meio,  $Q_g$  a energia proveniente da atividade fermentativa e  $Q_{out}$  o calor retirado pelo sistema de trocadores de calor e refrigeração.

A energia que tende a entrar no sistema na forma de calor pode ser considerada constante ao longo do tempo, uma vez que o gradiente de temperatura é constante. Para tal, foi definido como temperatura ambiente o valor de 30°C, definido por ser um valor próximo ao médio das máximas das temperaturas brasileiras nos meses mais quentes do ano, de acordo com o INMET, ou seja, condições em que o sistema será mais exigido. Assim é possível garantir que mesmo em condições extremas o sistema opere normalmente.

Com base nos experimentos realizados considerou-se para o coeficiente de troca térmica o valor médio obtido do ensaio E05L em duplicata de 6,5 W/(m<sup>2</sup>K) para o fermentador de 5L totais com 4L úteis e *setpoint* de temperatura de fermentação em 18,0°C (média para *ales* comuns). Com base na equação (36) podemos calcular a quantidade de calor absorvido do meio por convecção, substituindo as variáveis na equação (37) e obtendo o resultado na equação (38).

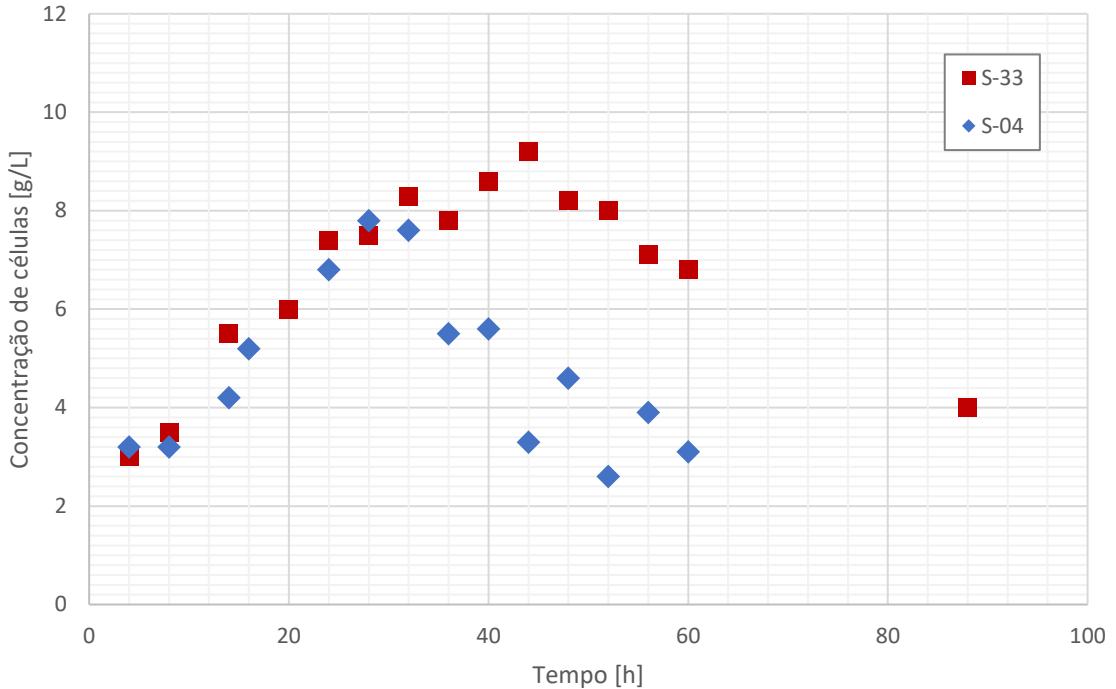
$$\dot{Q}_{in} = q_c = h_c \cdot A \cdot \Delta T \quad (36)$$

$$\Delta T = (30^\circ\text{C} - 18^\circ\text{C}) = 12^\circ\text{C} \quad (37)$$

$$\dot{Q}_{in} = 6,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 0,0689\text{m}^2 \cdot 12^\circ\text{C} = 5,4\text{W} \quad (38)$$

Para estimativa do calor produzido ao longo da fermentação utilizou-se como base a análise cinética da fermentação das leveduras comerciais S-04 e S-33 da espécie *Saccharomyces cerevisiae* fabricadas pela Fermentis®, realizado pela Revista Saúde & Ciência Online do Centro de Ciências Biológicas e da Saúde da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Os valores obtidos de concentração celular foram de acordo com a Figura 18.

Figura 18 - Curvas de crescimento celular para as leveduras S-04 e S-33



Fonte: SANTOS, et al. (2018).

Optou-se por utilizar a curva da levedura S-04 por ser uma cepa de ampla utilização na fabricação de cervejas do tipo *ale*. Levando-se em conta que o dimensionamento deve ser feito para suportar as piores condições de operação, foi utilizado o valor máximo de concentração para esta curva que é de aproximadamente 8g/L.

De acordo com o mesmo estudo, calculou-se que a velocidade específica  $\mu_s$  para a levedura S-04, obtendo o valor conforme equação (39).

$$\mu_s = 0,0248 h^{-1} \quad (39)$$

Assim, de acordo com a equação da velocidade específica (4) é obtido a equação (40).

$$0,0248 = (1/X)/(-dS/dt) \quad (40)$$

Se quando é atingido o máximo da concentração celular na fase estacionária o valor de X é de aproximadamente 8g/L, pode-se substituir a variável para cálculo do consumo instantâneo de substrato, como na equação (41).

$$(-dS/dt) = (1/8)/0,0248 = 5,0403 \frac{g}{L \cdot h} \quad (41)$$

A equação (42) apresenta o resultado em termos molares.

$$(-dS/dt) = (5,0403/46,07) = 0,1094 \frac{\text{mol}}{\text{L} \cdot \text{h}} \quad (42)$$

Trazendo à tona a equação (43) e considerando que toda massa celular já está formada e apenas utilizando energia para manutenção do metabolismo celular, é possível afirmar que praticamente toda a energia gerada será convertida em calor. Para fins de aproximação foi considerado que todo o substrato convertido é glicose, como descrito na equação (44), portanto é possível calcular o calor gerado por litro na equação (45) e de todo o sistema na equação (46).

$$\dot{q}_{\text{fermentação}} = 169 \frac{dC_6H_{12}O_6}{dt} \quad (43)$$

$$\frac{dC_6H_{12}O_6}{dt} \equiv \frac{-dS}{dt} \quad (44)$$

$$\dot{Q}_g = 169 \cdot 0,1094 = 18,4896 \frac{\text{kJ}}{\text{L} \cdot \text{h}} \quad (45)$$

$$\dot{Q}_g = \frac{18489,6 \text{ J}}{\text{L} \cdot \text{h}} \cdot \frac{\text{h}}{3600 \text{ s}} \cdot 4L = 20,5 \text{ W} \quad (46)$$

Como o sistema deverá manter uma temperatura constante, ou seja, sem que haja variação da energia térmica do fermentador, o calor a ser retirado é obtido pela equação (47) e quantificado pela equação (48).

$$\dot{Q}_{\text{out}} = \dot{Q}_{\text{in}} + \dot{Q}_g \quad (47)$$

$$\dot{Q}_{\text{out}} = 5,4 \text{ W} + 20,5 \text{ W} = 25,9 \text{ W} \quad (48)$$

Determinando este valor, é possível dimensionar o tamanho e potência do banco de frio. A potência do banco de frio deve atender, caso haja 100% de rendimento no projeto, ao valor calculado acima para  $\dot{Q}_{\text{out}}$  de 25,9W. No entanto, como é sabido que um rendimento de 100% é extremamente difícil de ser obtido na prática, o projeto foi dimensionado para fornecer o dobro da potência calculada como fator de segurança, ou seja, 51,8W. Para isso, foram utilizadas 2 unidades de placas de Peltier, sendo que cada uma delas fornece em média 40W para as condições operacionais propostas a uma corrente de 6,0A em cada módulo de acordo com o *datasheet* do fornecedor que se encontra no Anexo C.

#### 4.2.2. Tempos teóricos

O tempo para que o fermentador passe de 18,0°C para 18,5°C pode ser calculado utilizando a equação (14) na qual obtém-se o resultado calculado na equação (49) e o tempo necessário na equação (50).

$$\ln \frac{18,5 - 27,5}{18 - 27,5} = - \frac{6,5026 \cdot 0,0689}{4,0256 \cdot 992,15 \cdot 0,0050} t \quad (49)$$

$$t = \frac{-0,0541}{-2,2446 \cdot 10^{-5}} \cong 2.409s \cong 40\text{min} \quad (50)$$

Para determinar o tempo necessário para que seja restaurada a temperatura padrão, baseou-se nos resultados obtidos na determinação da taxa de troca de calor da serpentina e as condições foram projetadas às condições de operação do trocador no sistema de refrigeração da cerveja. Assim, temos que a energia necessária para realizar a refrigeração do mosto cervejeiro da temperatura de *setpoint* acrescido de histerese para a temperatura de *setpoint* pode ser calculada pela equação (51).

$$\Delta q_{ferm} = 4,259\text{kg} \cdot 4,0256 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (18,0^\circ\text{C} - 18,5^\circ\text{C}) = -8,574\text{kJ} \quad (51)$$

O tempo necessário para que esse calor seja transferido a partir do início da recirculação do sistema pode ser calculado em função das variáveis constantes de acordo com a equação (52) e equação (53) e obtido por comparação com o sistema teste apresentado na sessão 4.2, como feito na equação (54) e equação (55). Assim, obtém-se o tempo necessário conforme calculado na equação (57) a partir da equação (56).

$$\dot{Q}_{teórico} = U \cdot A \cdot \Delta T_{MLDT2} \quad (52)$$

$$\Delta T_{MLDT2} = \frac{(18,2 - 14,5) - (18 - 17,6)}{\ln[(18,2 - 14,5)/(18 - 17,6)]} = 1,56^\circ\text{C} \quad (53)$$

$$\frac{\dot{Q}_{teste}}{\dot{Q}_{teórico}} = \frac{U \cdot A \cdot \Delta T_{MLDT1}}{U \cdot A \cdot \Delta T_{MLDT2}} = \frac{9,62\text{ W}}{1,56\text{ W}} = 6,17 \quad (54)$$

$$\dot{Q}_{teórico} = \frac{\dot{Q}_{teste}}{\Delta T_{MLDT1}/\Delta T_{MLDT2}} = \frac{192464\text{ J}/130\text{s}}{6,17} = 240,1\text{W} \quad (55)$$

$$\dot{Q} = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (56)$$

$$\Delta t = \frac{8574\text{ J}}{240,1\text{ W}} = 36\text{s} \quad (57)$$

A temperatura final do banco de frio após a recirculação e a retirada de energia do sistema foi calculada com base na eficiência de 78,5% de troca térmica do trocador de calor obtida no teste na quantidade de calor necessária de 8,6kJ para resfriar o sistema. Assim, conforme calculado na equação (58) e equação (59)

considerou-se que haveria uma retirada de 10,9kJ do sistema, para que a energia necessária fosse transferida para o banco de frio.

$$h = \frac{\Delta q}{\Delta q_{max}} = 0,785 = \frac{8,6\text{kJ}}{\Delta q_{max}} \quad (58)$$

$$\Delta q_{max} = 10,9\text{kJ} \quad (59)$$

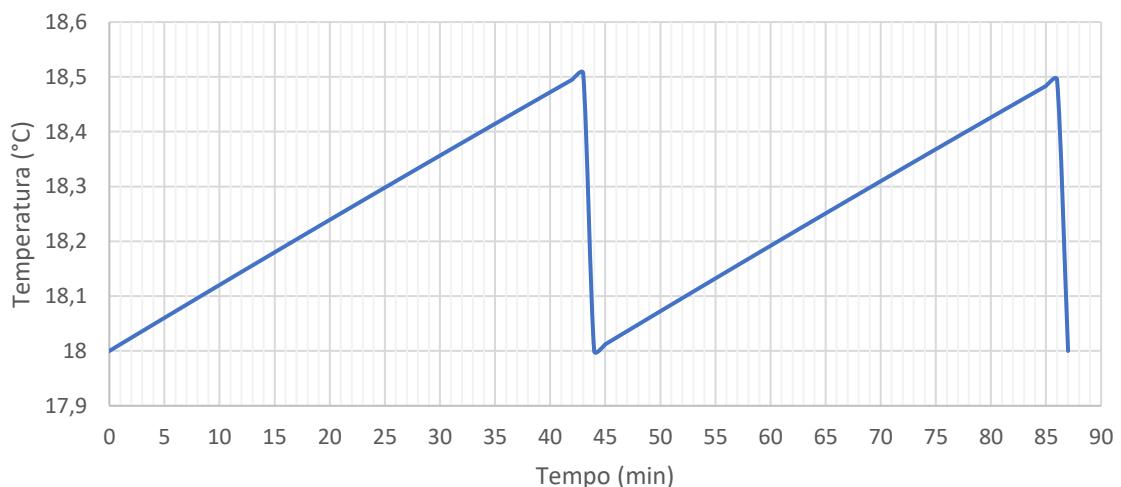
Para calcular a temperatura final do banco de frio após a recirculação e a retirada de energia do sistema apenas considerou-se o acréscimo de energia na equação (6), fundamental da calorimetria, com variáveis substituídas na equação (60) para se obter a temperatura final na equação (61).

$$\Delta q_{max} = 10,9\text{kJ} = 2,5\text{kg} \cdot 4,184 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (T_f - 14,5^\circ\text{C}) \quad (60)$$

$$T_f = 15,5^\circ\text{C} \quad (61)$$

Assim, com os tempos teóricos definidos pode-se traçar o ciclo de operação do sistema com início em  $t=0$ , onde a temperatura do fermentador é igual a  $18,0^\circ\text{C}$  e será aquecida pelo meio ambiente até a temperatura do *setpoint* acrescida da histerese, que possui valor igual a  $0,5^\circ\text{C}$ . Sendo assim, em aproximadamente 40 minutos e com a temperatura em  $18,5^\circ\text{C}$  o sistema de refrigeração começa a operar, diminuindo a temperatura do fermentador até atingir o valor do *setpoint* em cerca de 36s. O perfil de temperatura teórico está disposto na Figura 19.

Figura 19 – Perfil teórico da temperatura do sistema ao longo do tempo



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.3. Validação do projeto

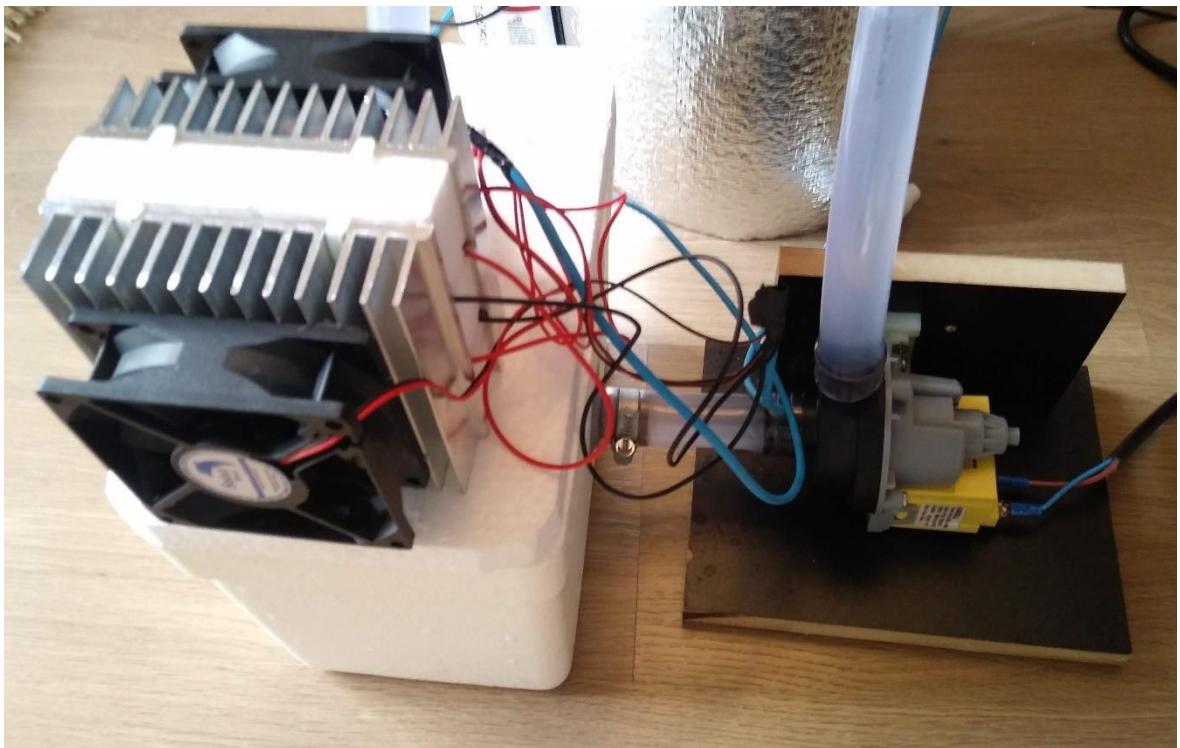
Numa seguinte etapa, foi realizado um ensaio com *setpoint* definido em 18,0°C, temperatura pertinente ao cenário de fermentação do mosto cervejeiro, característico de cervejas do tipo ale, com o objetivo de verificar como o sistema se comporta, com mosto e incluso o calor gerado pela fermentação. Foi analisado o desempenho de manutenção da temperatura estabelecida em relação a temperatura ambiente. O Arduino foi responsável por realizar o controle do sistema além de registrar a evolução da temperatura em relação ao tempo para criar o banco de dados que foi utilizado para realizar os cálculos. Com os cálculos feitos e conhecido o balanço de energia do sistema, foi possível validar o sistema, e realizar as considerações pertinentes quanto proposta inicial da potência de refrigeração, a quantidade de calor gerado na fermentação e o ganho de calor do sistema por conta da temperatura ambiente. Na Figura 20 observa-se o fermentador à direita, o sistema de refrigeração no canto superior esquerdo e a bomba de recirculação no inferior esquerdo. A Figura 21 ilustra o protótipo de outro ponto de vista.

Figura 20 – Vista geral do sistema de controle de temperatura e fermentador



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 – Sistema de refrigeração e bomba de recirculação



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.4. Fermentação

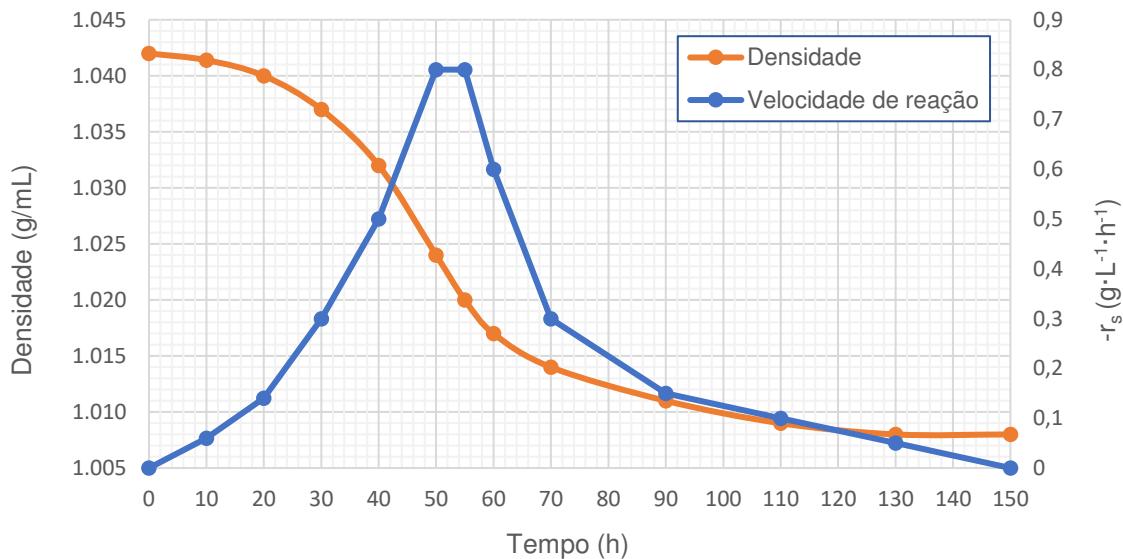
A fermentação ocorreu com o perfil condizente e conforme com o previsto na literatura, como consta na Figura 22. Tomaram-se 160h para que a densidade do mosto estabilizasse e a fermentação pudesse ser considerada concluída, tempo um pouco longo a julgar por ser uma cerveja não muito densa e de corpo médio. O mosto variou de 1,042g/mL até 1,008g/mL e a fermentação atingiu sua velocidade ( $-r_s$ ) máxima aproximadamente 50h após a inoculação da levedura, chegando no valor de  $0,8\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ .

A lentidão na evolução da fermentação pode ser explicada por um possível *underpitching* na inoculação da levedura, ou seja, um subdimensionamento da quantidade de células necessárias para uma fermentação saudável, o que levou a uma fase lag e de aceleração mais longas que foi terminar só após 40h de fermentação quando atingiu a fase exponencial.

O acompanhamento do desenvolvimento da atenuação é de grande importância para a avaliação do desempenho do sistema de refrigeração uma vez

que em seu estado de maior atividade fermentativa gera bastante calor que precisa ser removido.

Figura 22- Desenvolvimento da fermentação



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se claramente um aumento da conversão de açúcares entre a quadragésima e a septuagésima hora de fermentação, atingindo valores máximos entre a quinquagésima e a quinquagésima quinta hora. Nestes momentos foram evidentes a maior dificuldade do sistema na manutenção da temperatura.

#### 4.5. Equilíbrio térmico

Inicialmente o mosto foi inoculado a 20,1°C no fermentador e houve uma demora significativa para que o *setpoint* pudesse ser atingido. Foram 105 minutos para que o sistema pudesse condicionar o sistema em 18,0°C e a partir daí conduzisse uma rotina de manutenção de temperatura. Apesar do projeto não ter sido dimensionado para resfriar o mosto após a etapa quente da produção cervejeira (processos que antecede a fermentação), seria interessante que pequenos ajustes como esse de até 4°C pudessem ser feitos pelo próprio sistema de refrigeração.

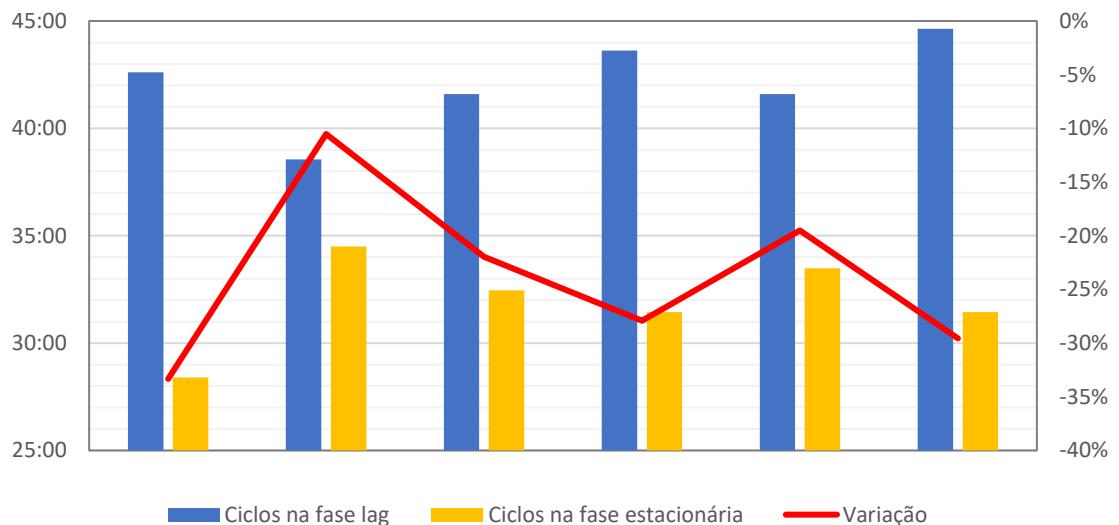
As primeiras etapas do processo fermentativo (lag, aceleração e exponencial) foram bastante consistentes e se aproximaram muito dos cálculos teóricos de predição do perfil térmico no que diz respeito à demanda de potência.

Ficou bastante evidente posteriormente, em comparação à fase estacionária, que estas primeiras fases requerem uma potência muito menor do sistema de refrigeração por conta de a fermentação ainda não gerar calor significativo. Os impactos dessa energia liberada são bastante relevantes e serão tratados mais adiante.

A fermentação atingiu seu auge 50h após a inoculação da levedura e foi quando se notou dificuldade para manter o banco de frio pronto para refrigerar o sistema. Apesar de a energia gerada pela fermentação teórica calculada ter sido muito maior do que a prática, os ciclos de refrigeração tiveram seus tempos reduzidos em cerca de 25% o que fez com que o sistema fosse acionado poucos minutos após o término da adequação de temperatura do banco de frio.

Na Figura 23 podem ser comparados os primeiros ciclos de aquecimento do sistema com os ciclos do auge do processo fermentativo.

Figura 23 - Comparação dos ciclos de aquecimento da fase lag e da fase estacionária



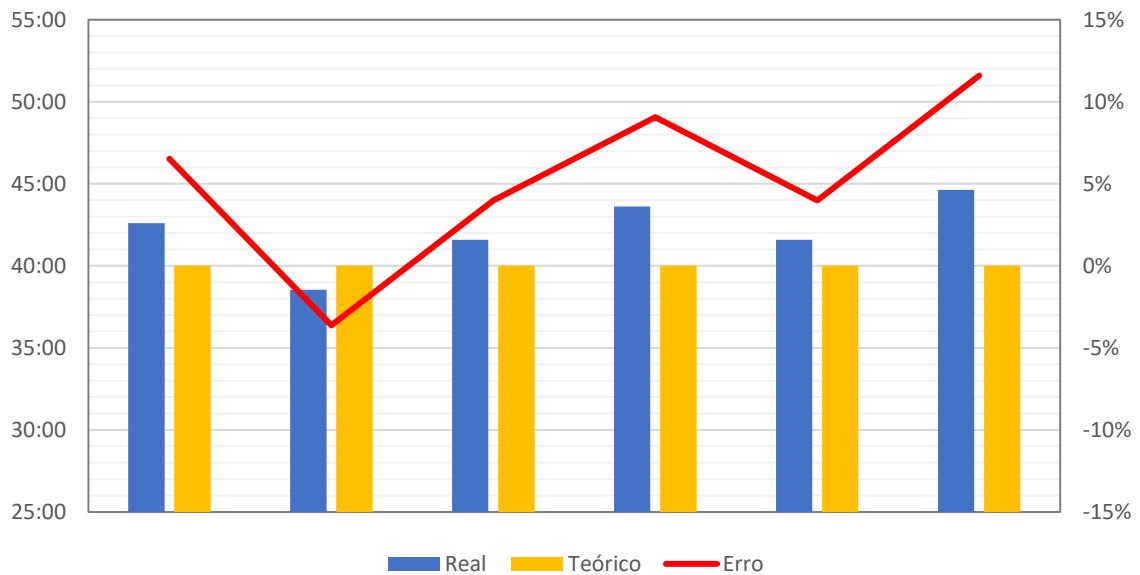
Fonte: Elaborado pelo autor.

O cálculo da energia gerada pela fermentação teórica levou em consideração uma fermentação muito mais vigorosa, uma vez que ocorreu em menor tempo e em maior temperatura do que a ocorrida na prática - 26h e 20°C contra 130h e 18,0°C, respectivamente. As consequências de uma temperatura mais alta durante a fermentação ficaram ilustradas pelo perfil térmico no ensaio

realizado. Em comparação às primeiras fases da fermentação, houve um incremento de cerca de 35% na potência requerida pelo sistema no auge da atividade fermentativa.

Os cálculos de tempo necessário para que o sistema adquirisse a energia requerida para atingir a temperatura de acréscimo da histerese foram razoavelmente precisos. Os tempos práticos máximos e mínimos de aquisição de energia foram de 47 minutos e 25 minutos respectivamente, em momentos pontuais. No entanto, a média de tempo para a variação de 0,5°C foi de 38 minutos, o que representa 5% de erro em relação aos 40 minutos calculados. Os primeiros tempos práticos onde a energia da fermentação pode ser considerada desprezível encontram-se na Figura 24 em azul em comparação ao tempo teórico calculado em verde. Em vermelho, a linha de erro percentual relativo.

Figura 24 – Comparaçao dos ciclos de aquecimento prático e teóricos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já o tempo de teórico de troca térmica mostrou-se pouco confiável, uma vez que na prática oscilou entre 8min e 2min, com média em 4min e 20s. A pífia estimativa de 36s subestimou o calor gerado pela bomba de recirculação que era bastante perceptível em seu corpo, o que fez com que, de alguma maneira, o gradiente de temperatura não tenha sido na prática conforme o projetado.

#### 4.6. Eficiência energética

Ao analisar o sistema do ponto de vista eletroeletrônico, o funcionamento qualitativo foi perfeito. Todos os componentes se comportaram bem e conforme o previsto, no entanto, ao medir a corrente que passava pelo relé de acionamento do sistema de refrigeração do banco de frio foi observado o valor de aproximadamente 4,85A, o que não condiz com a potência projetada. Se todos os componentes estão ligados em paralelo, temos a corrente total é a soma de todas as correntes, conforme equação (62). Substituindo-se pelos componentes, a soma consiste na equação (63) e por seus valores na equação (64). Assim, a corrente individual de cada pastilha é o resultado obtido na equação (65).

$$i_{total} = \sum i \quad (62)$$

$$i_{total} = 2 \cdot i_{fan} + i_{bomba} + 2 \cdot i_{pastilha} \quad (63)$$

$$4,85 = 2 \cdot 0,23 + 0,35 + 2 \cdot i_{pastilha} \quad (64)$$

$$i_{pastilha} = \frac{4,85 - 2 \cdot 0,23 - 0,35}{2} = 2,02A \quad (65)$$

Isso significa que, de acordo com o *datasheet* do componente que consta no Anexo C, cada pastilha estava operando com cerca de 6W de potência, portanto estava sendo subutilizada, uma vez que foi projetada pra operar com aproximadamente 6,0A e potência de 40W cada uma.

Diante da obtenção da potência fornecida ao sistema de 12W totais, analisaram-se os resultados sob a perspectiva da eficiência e demanda de energia de cada setor.

Caso fossem levados em conta as variáveis reais de operação e não condições extremas de máximas de temperatura ambiente, teríamos para os primeiros momentos da fermentação (fase *lag*) a condição descrita na equação (66).

$$-\dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{in} + \dot{Q}_g = 6,5 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \cdot 0,0689m^2 \cdot (26^\circ C - 18^\circ C) + 0W = 3,6W \quad (66)$$

Na prática, o resultado obtido foi o descrito na equação (67).

$$\dot{Q}_{in} = \frac{q}{t} = \frac{4,259 \text{ kg} \cdot 4,0256 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1} \cdot 0,5^\circ\text{C}}{38\text{min} \cdot 60\text{s}} = 3,4 \text{ W} \quad (67)$$

A diferença de 0,2W na potência requerida representa um erro de 5% entre o cálculo de projeto e a prática, o que mostra que nesta etapa os cálculos foram satisfatórios.

A margem de segurança ao incluir temperaturas de máximas nacionais nos cálculos de dimensionamento resultou numa potência requerida cerca de 60% maior que a necessária para o primeiro momento da fermentação, como calculado na equação (68).

$$\frac{5,4\text{W}}{3,4\text{W}} - 1 = 58,8\% \quad (68)$$

Já para a fase estacionária, onde há maior geração de energia e atividade celular, o resultado obtido consta na equação (69).

$$-\dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{in} + \dot{Q}_g = \frac{q}{t} = \frac{4,259 \text{ kg} \cdot 4,0256 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1} \cdot 0,5^\circ\text{C}}{38\text{min} \cdot 60\text{s}} = 4,4 \text{ W} \quad (69)$$

Este resultado significa que o incremento de dissipação térmica foi gerado pela atividade celular, portanto para o balanço energético prático da equação (70) foi calculado o calor gerado pela fermentação na equação (71).

$$\dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{out} + \dot{Q}_g = 0 \quad (70)$$

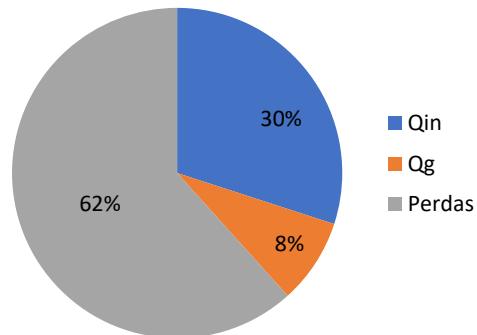
$$\dot{Q}_g = -3,4 - (-4,4) = 1\text{W} \quad (71)$$

A diferença comparativa entre o resultado calculado de 20,5W e o prático de 1W pode ter como uma das possíveis explicações a velocidade com que ocorreu a conversão de açúcar em etanol e gás carbônico pela levedura. O cálculo levou em conta uma velocidade de fermentação de  $5\text{g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ , enquanto na prática a velocidade foi de  $0,8\text{g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ , cerca de 15% do valor teórico. Um decréscimo da velocidade de fermentação faz com que o calor gerado se dilua num tempo maior, diminuindo a potência requerida

Em sumarização às informações discutidas acima, foi plotado um gráfico indicando a utilização da potência fornecida de 12W para cada item do balanço energético conforme consta na Figura 25, onde é evidenciado uma eficiência de utilização da potência fornecida de aproximadamente 40%, o que sugere que muita energia é perdida e má utilizada antes de ser devidamente direcionada. Isso se

deve por inúmeros fatores, entre eles a não inclusão do calor gerado pela bomba de recirculação, dissipação térmica do banco de frio e das tubulações.

Figura 25 – Utilização da potência fornecida



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerou-se também que possíveis falhas no equacionamento por conta da falta de precisão no número de Biot, além da falta de precisão e morosidade na estabilização da temperatura por parte do sensor utilizado foram fatores que podem ter agravado o resultado de baixa precisão do projeto.

#### 4.7. Custo

O projeto ficou em torno de R\$ 450,00, considerando valores aproximados de R\$220,00 para o sistema de refrigeração, R\$ 100,00 para o controle de temperatura e R\$130,00 para a adaptação do fermentador. O descriptivo de valores está disponível no Anexo D.

Dentre as alternativas simples de condução do processo fermentativo no cenário cervejeiro caseiro, pode-se destacar a fermentação em temperatura ambiente, a fermentação em recipiente com gelo e a fermentação em geladeira associada a um controlador de temperatura.

Considerando-se que a partir de R\$ 750,00 já é possível comprar um pequeno frigobar de aproximadamente 100L totais com um controlador de temperatura simples - que aumentam as possibilidades de variação do processo fermentativo e de maturação da cerveja por conseguir atingir temperaturas inferiores, por exemplo para fermentações em temperaturas típicas de leveduras *lager* e a possibilidade de maturações que levam a uma melhor clarificação a temperaturas próximas de zero - pode-se dizer que o custo do projeto foi elevado.

A condução da fermentação à temperatura ambiente com certeza é o mais em conta, mas expõe o mosto a grandes variações de temperatura ao longo do dia, principalmente no Brasil, onde chegamos a variações de 10°C no mesmo dia.

A possibilidade de fermentar em um recipiente com gelo (banho de gelo) se mostra mais eficiente que a fermentação à temperatura ambiente por manter relativamente estável a temperatura do mosto, no entanto não há precisão na temperatura de condução da fermentação, além de ser necessário realizar a manutenção do gelo no meio.

#### 4.8. Discussões

Alguns pontos que poderiam tornar o resultado final mais interessante por diversas perspectivas serão discutidos a seguir. Apesar de grande esforço, a maior dificuldade foi manter um isolamento térmico que minimizasse a potência do sistema de refrigeração. Embora tenham, o banco de frio e o fermentador, sido isolados, as mangueiras poderiam ter sido revestidas a fim de melhorar ainda mais a eficiência energética. A programação do controlador de temperatura poderia ter sido otimizada e a vida útil dos equipamentos aumentada caso fosse utilizado um sistema de controle do tipo PID (proporcional integral derivativo), uma vez que esse tipo de controle poupa esforços desnecessários por parte do equipamento.

Notou-se que nas condições ensaiadas o projeto trabalhou em seu limite. Fica nítido a inviabilidade com essa versão do projeto de fermentar cervejas do tipo *lager* em temperaturas em torno de 14°C e muito menos a realização do chamado *coldcrash* que trabalha em temperaturas próximas a 0°C. No entanto, além das melhorias propostas que não gerariam custo significativo, uma fonte de energia mais adequada poderia aumentar a potência dos módulos Peltier em até 4 vezes por meio do incremento da corrente de operação das pastilhas, tornando o sistema mais robusto e possivelmente permitindo ampliações consideráveis do volume a ser fermentado.

## 5. CONCLUSÃO

O projeto demonstrou ser viável quanto a funcionalidade hidromecânica e elétrica como um todo, mostrando-se vantajoso por ser eficiente em contornar os obstáculos de estabilidade e precisão da temperatura de fermentação, cumprindo a proposta de manter a temperatura estabilizada em 18,0°C com histerese de 0,5°C.

A determinação de coeficientes e taxas para dimensionamento e predição de trocas térmicas obteve a precisão necessária ao projeto, fazendo com que o resultado obtido fosse conforme o planejado.

Em comparação com os outros métodos de manutenção da temperatura citados na sessão 4.3.4, relativa ao custo, apresentou-se como um meio termo legítimo em relação à geladeira com controle de temperatura e uma fermentação sem controle de temperatura (banho de gelo ou temperatura ambiente), além de ocupar menos espaço. O custo total final foi de R\$450,00.

O resultado demonstrou a factibilidade do sistema de controle de temperatura com placas de Peltier e controlado por Arduino para fermentar pequenos volumes de cerveja em temperaturas típicas de cervejas tipo *ale*.

## 6. REFERÊNCIAS

ABRABE. **Novo ciclo no setor de bebidas:** Estudo inédito aponta para uma recente dinâmica do hábito de consumo do brasileiro. Valor Econômico, 7 nov. 2019. Disponível em:  
<https://valor.globo.com/patrocinado/abrabe/noticia/2019/11/07/novo-ciclo-no-setor-de-bebidas.ghml>. Acesso em: 19 jul. 2020.

ALMEIDA, Ayrton Gissoni. **Adega climatizada para vinhos utilizando a célula de Peltier.** 2013. 136 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia da Computação, Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2013.

ARANHA, Carla. **Com o copo cheio:** O consumo de cervejas especiais cresceu 36% nos últimos três anos no Brasil. Conheça quatro empresas emergentes que estão ganhando espaço nesse mercado. [S. l.]: Exame, 4 set. 2014. Disponível em: <<https://exame.com/pme/com-o-copo-cheio/>>. Acesso em: 19 jul. 2020.

ARDUINO UNO REV3. [S. l.], 2019. Disponível em:  
<https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>. Acesso em: 19 maio 2019.

BELTRAMELLI, Maurício. **Cervejas, brejas e birras:** Um guia completo para desmistificar a bebida mais popular do Brasil. 2. ed. São Paulo: Leya, 2014.

BRASIL. Decreto nº 6.871, 4 de junho de 2009. Dispõe sobre a padronização, a classificação, o registro, a inspeção, a produção e a fiscalização de bebidas. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2009/decreto/d6871.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/decreto/d6871.htm)>. Acesso em: 25 abr. 2019.

BRASIL - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **A cerveja no Brasil.** 4 jan. 2018. Disponível em:  
<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/inspecao/produtos-vegetal/a-cerveja-no-brasil>. Acesso em: 25 abr. 2019.

CAPELLI, Beatriz Midena. **Desenvolvimento de uma estufa controlada e monitorada remotamente.** 2014. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Computação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

FIALHO, A. B. **Automação Hidráulica:** Projeto, dimensionamento e análise de circuitos. 5. ed. São Paulo: Erica, 2008

**Graphical Symbols for Process Flow Diagrams**, ASA Y32.11, American Society of Mechanical Engineering. New York, 1961.

HAMPSON, Tim. **O grande livro da cerveja:** Informações atualizadas sobre cervejas e as grandes cervejarias em todo mundo. São Paulo: Publifolha, 2014.

HILL, H. Cinética de processos fermentativos Em: SCHMIDELL, W.; LIMA, U.A.; AQUARONE, E.; BORZANI, W.R (Coord.) Biotecnologia Industrial. São Paulo: Edgard Blücher, 2001. p.93-122.

HOLMAN, J. P. **Transferência de Calor.** Colonia San Juan: Compañía Editorial Continental, 1999.

INCOMPLAST POLÍMEROS E METAIS LTDA (Rio de Janeiro - RJ). **MAIS PROJETOS POLIPROPILENO (PP)**. [S. I.], 201?. Disponível em: <https://incomplast.com.br/polipropilenopp/>. Acesso em: 28 mar. 2020.

INSTITUTO DE FÍSICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (São Paulo - SP). ProFis. **Tabela de Calor Específico de Várias Substâncias**. [S. I.], 201?. Disponível em: <http://fep.if.usp.br/~profis/experimentando/diurno/downloads/Tabela%20de%20Calor%20Especifico%20de%20Varias%20Substancias.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2020.

KUNZE, W. **Technology Brewing and Malting**. 3 ed. Alemanha: VLB Berlin, 2004.

MOREIRA, Gustavo A. Zanco; MALAVAZI, Leonardo; MIYAZAKI, Yann Gonçalves. **CONDICIONADOR DE AR POR EFEITO PELTIER**. 2014. 73 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Automação e Sistemas, Universidade São Francisco, Campinas, 2014.

MÜLER, Arno. **Cerveja!**. Canoas: Editora ULBRA, 2002

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (Brasil). INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **NORMAIS CLIMATOLÓGICAS DO BRASIL**: Temperatura máxima. [S. I.], 2010. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acesso em: 3 abr. 2020.

OLIVER, Garret. **A mesa do mestre-cervejeiro**: Descobrindo os prazeres das cervejas e das comidas verdadeiras. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2012.

ÖZISIK, M.N., **Transferência de Calor**: Um Texto Básico. Rio de Janeiro: Editora LTC, 1990.

SANTOS, Sharline Florentino de Melo *et al.* ANÁLISE CINÉTICA DA FERMENTAÇÃO DAS LEVEDURAS COMERCIAIS S-04 E S-33. **REVISTA SAÚDE & CIÊNCIA ONLINE**, Campina Grande - PB, v. 7, n. 2, mai/ago. 2018. Disponível em: <http://www.ufcg.edu.br/revistasaudede.ciencia/index.php/RSC-UFCG/article/view/633>. Acesso em: 28 mar. 2020.

SGARBI, Willian Marchesi. **ANÁLISE TÉRMICA DO PROCESSO DE FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA NÃO ISOTÉRMICA EM FERMENTADORES CILÍNDRICOS DE FUNDO PLANO**. 2016. Trabalho acadêmico (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2016.

**SÍMBOLOS GRÁFICOS PARA FLUXOGRAMAS DE PROCESSO E DE ENGENHARIA**, Norma publica N-58, Petrobras, 2012

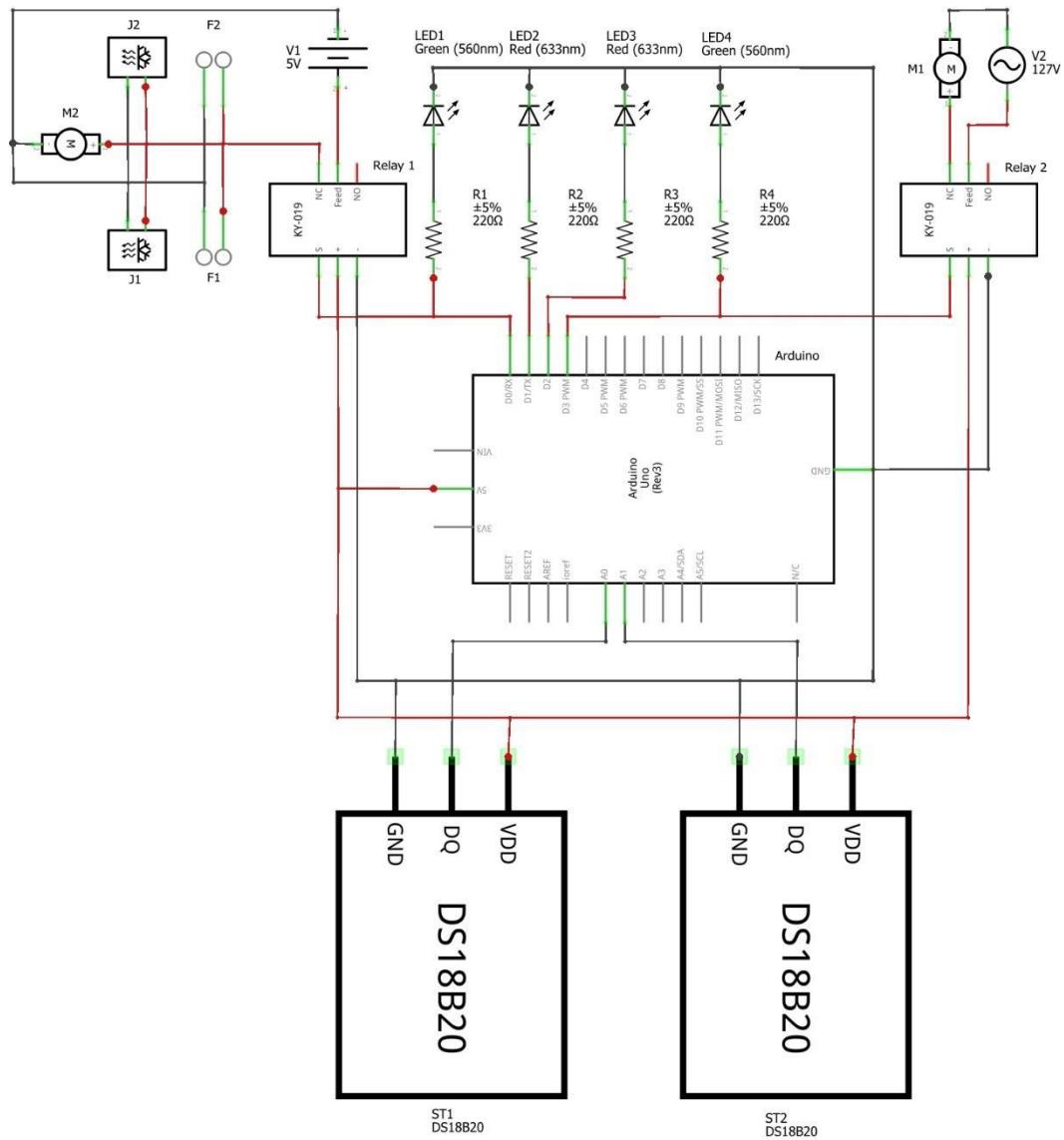
THERMONAMIC ELECTRONICS (China). **TEC Series thermoelectric modules for larger current and heat pumping applications**. [S. I.], 2020. Disponível em: [http://www.thermonamic.com/pro\\_view.asp?id=806](http://www.thermonamic.com/pro_view.asp?id=806). Acesso em: 3 abr. 2020.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Na USP São Carlos, curso ensina a produzir cerveja artesanal. **Jornal da USP**, São Paulo, 24 abr. 2019. Disponível em: <https://jornal.usp.br/universidade/na-usp-sao-carlos-curso-ensina-a-produzir-cerveja-artesanal/>. Acesso em: 14 maio 2019.

WHITE, Chris; ZAINASHEFF, Jamil. **Yeast**: The practical guide to beer fermentation. Boulder: Brewers Publications, 2010.

## ANEXOS

ANEXO A - Diagrama esquemático do circuito elétrico



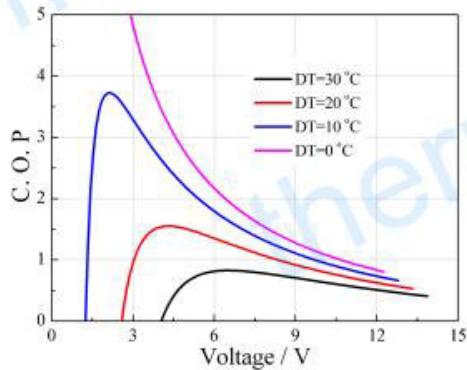
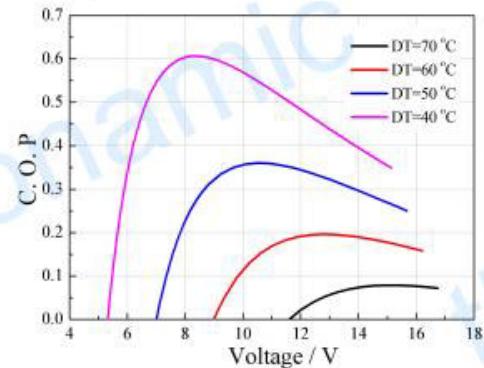
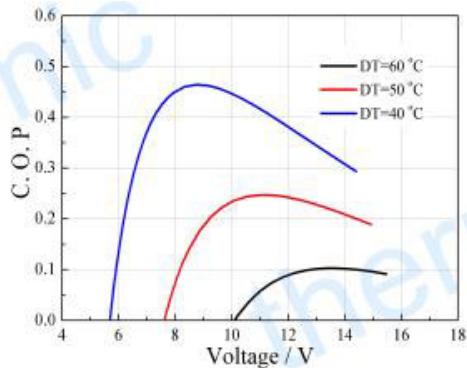
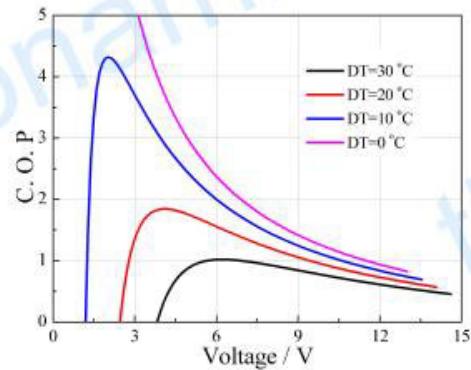
Fonte: Elaborado pelo autor.

**ANEXO B - Lista de componentes utilizados no circuito de controle e refrigeração de temperatura**

<b>Rótulo</b>	<b>Elemento</b>
ST1	Sensor de Temperatura DS18B20
ST2	Sensor de Temperatura DS18B20
Arduino	Arduino Uno (Rev3)
F1	Fan/Ventilador
F2	Fan/Ventilador
J1	Placa de Peltier
J2	Placa de Peltier
LED1	LED Verde
LED2	LED Vermelho
LED3	LED Verde
LED4	LED Vermelho
P-101	Bomba 20W
P-102	Bomba 5W
Relay 1	Modulo Relé 5V
Relay 2	Modulo Relé 5V
R1	Resistor 220Ω
R2	Resistor 220Ω
R3	Resistor 220Ω
R4	Resistor 220Ω
V1	DC Power Supply; 12V
V2	AC Power Supply; 60Hz; 127V

Fonte: Elaborado pelo autor.

## ANEXO C - Datasheet do módulo Peltier TEC1-12706

**TEC1-12706****Performance Curves at Th=27 °C**Standard Performance Graph  $COP = f(V)$  of  $\Delta T$  ranged from 0 to 30 °C**Performance Curves at Th=50 °C**Standard Performance Graph  $COP = f(V)$  of  $\Delta T$  ranged from 40 to 60/70 °CRemark: The coefficient of performance (COP) is the cooling power  $Q_c$ /Input power ( $V \times I$ ).

Fonte: Thermonamic Electronics (2020).

## ANEXO D – Custos do projeto em dezembro de 2019

Item	Qtde	Valor Unit.	Valor
<b>Banco de Frio</b>			
Módulo Peltier	2	R\$ 17,99	R\$ 35,98
Fan	2	R\$ 13,90	R\$ 27,80
Dissipador	2	R\$ 19,80	R\$ 39,60
Radiador	1	R\$ 15,00	R\$ 15,00
Bomba 5W	1	R\$ 28,03	R\$ 28,03
Mangueira Cristal 3/16	1	R\$ 0,60	R\$ 0,60
Isopor	1	R\$ 6,00	R\$ 6,00
Durepox	1	R\$ 3,80	R\$ 3,80
Tubo PVC 1/2	-	R\$ -	R\$ -
Bomba 20W	1	R\$ 64,41	R\$ 64,41
<i>Sub-total do banco de frio</i>	-	-	R\$ 221,22
<b>Controle de temperatura</b>			
Relé	1	R\$ 10,90	R\$ 10,90
Arduino	1	R\$ 54,90	R\$ 54,90
Sensor temperatura	2	R\$ 17,90	R\$ 35,80
<i>Sub-total do controle de temperatura</i>	-	-	R\$ 101,60
<b>Trocador e conexões do fermentador</b>			
Serpentina 7,5m	1	R\$ 66,54	R\$ 66,54
Mangueira Cristal 3/4	1	R\$ 3,50	R\$ 3,50
Engate rápido	2	R\$ 19,54	R\$ 39,08
Espigão 3/4 com rosca 1/2	2	R\$ 10,45	R\$ 20,90
<i>Sub-total do trocador e conexões do fermentador</i>	-	-	R\$ 130,02
<b>Custo total do projeto</b>			<b>R\$ 452,84</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.