



Cervejaria Artesanal – Um protótipo de fermentador com refrigeração

**Lucas Maia Bittencourt
Gabriel Alcantara Caetano Motta**

Projeto de Final de Curso

Orientadora

Profa. Andrea Valdman, D.Sc.

Outubro de 2021

CERVEJARIA ARTESANAL – UMA PROPOSTA DE FERMENTADOR COM REFRIGERAÇÃO

Lucas Maia Bittencourt

Gabriel Alcantara Caetano Motta

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenharia Química.

Aprovado por:

Rossana Odette Mattos Folly, D.Sc.

Eliezer Menezes Pereira, D.Sc.

Orientado por:

Andrea Valdman, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Outubro de 2021

Bittencourt, Lucas Maia; Motta, Gabriel Alcantara Caetano.

Cervejaria Artesanal – Uma proposta de fermentador com refrigeração / Lucas Maia Bittencourt; Gabriel Alcantara Caetano Motta. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2021.

viii, 73 p.; il.

(Projeto de Final de Curso) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2021. Orientadora: Andrea Valdman

1. Cerveja. 2. Fermentador. 3. Artesanal. 4. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Andrea Valdman. I. Título.

Aos nossos pais, que sempre estiveram conosco em toda a jornada, aos nossos irmãos, que a nós zelam e nos dão apoio, e às nossas companheiras, que dividem conosco todas as alegrias, sofrimentos, angústias e conquistas da vida.

“O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano.”

- Sir Isaac Newton

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenharia Química.

CERVEJARIA ARTESANAL – UMA PROPOSTA DE FERMENTADOR COM REFRIGERAÇÃO

Lucas Maia Bittencourt
Gabriel Alcantara Caetano Motta

Outubro, 2021

Orientadora: Profa. Andrea Valdman, D.Sc.

O mercado de cerveja artesanal ganhou muito destaque a partir da década de 2010, com aumento considerável no número de marcas e volume consumido. Diante de um cenário promissor, produtores de cerveja de pequeno porte sofrem quando precisam realizar um aumento de escala, sobretudo devido aos preços elevados de equipamentos comerciais. Além disso, métodos caseiros tradicionais demandam a aquisição de um grande número de equipamentos de refrigeração e conseqüentemente ocupam muito espaço. O presente trabalho propõe e analisa a viabilidade técnica de um sistema caseiro de fermentação com refrigeração de baixo custo, utilizando um Tanque Frio para armazenamento e regeneração de um fluido refrigerante. O sistema de instrumentação desenvolvido, incluindo a utilização de uma bomba, permite o monitoramento e controle da temperatura durante o processo fermentativo e o acoplamento de múltiplos fermentadores em paralelo, reduzindo o espaço físico necessário.

A análise da viabilidade técnica foi realizada através de testes experimentais com um fermentador único em diferentes condições de temperatura e vazão de circulação do fluido de refrigeração. O sistema mostrou-se viável para processos de fermentação cuja diferença entre a temperatura ambiente e a de fermentação seja próxima de 5 °C. Além disso, o sistema mostra-se promissor para condições de fermentação cuja essa mesma diferença seja próxima de 10 °C, desde que a diferença entre a temperatura do fermentador e temperatura do Tanque Frio seja de aproximadamente 10 °C. O presente trabalho apresenta indicadores de viabilidade inovadores para sistemas de fermentação com refrigeração, utilizando a eficiência do sistema de controle da temperatura de fermentação e a regeneração do Tanque Frio como parâmetros de análise.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	01
1.I. Objetivos	03
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
2.I. O Processo de Produção de Cerveja	05
2.I.I. <i>Matérias-primas mais comuns</i>	06
2.I.II. <i>Principais etapas, equipamentos e reações</i>	09
2.II. O Mercado Cervejeiro	11
2.II.I. <i>Produção e consumo mundial</i>	13
2.II.II. <i>Produção e consumo no Brasil</i>	16
2.II.III. <i>Produção de Cerveja Artesanal</i>	17
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA	20
3.I. Elaboração do Fluxograma do Processo de Fermentação com Refrigeração	20
3.I.I. <i>Sistema de monitoramento e controle</i>	22
3.II. Construção do Sistema de Fermentação com Refrigeração	25
3.II.I. <i>Montagem do sistema de fermentação</i>	25
3.III. Construção do Sistema de Controle	31
3.III.I. <i>Montagem do sistema de controle</i>	31
3.III.II. <i>Programação do controlador</i>	34
3.III.III. <i>Calibração do sensor de vazão</i>	35
3.III.IV. <i>Calibração dos sensores de temperatura</i>	37
3.IV. Condições de Realização dos Experimentos e da Coleta de Dados	37
3.V. Tratamento de Dados	38
3.VI. Indicador de Viabilidade	41
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS	42
4.I. Teste Experimental 1 – Avaliação do Comportamento do Equipamento de Refrigeração	42
4.II. Teste Experimental 2 – Respostas à Temperatura Ambiente	46
4.II.I. <i>Análise a – das temperaturas dos interiores do fermentador e do Tanque Frio</i>	46
4.II.II. <i>Análise b – das temperaturas de Entrada, Saída e Próxima ao Fermentador</i>	47
4.III. Teste Experimental 3 – Respostas ao Acionamento da Bomba Hidráulica	49
4.IV. Teste Experimental 4 – Avaliação do Comportamento da Operação Completa da Planta	50
4.IV.I. <i>Operação completa a – SPF 20, TTF 5, PVC 100 e MOF G</i>	51
4.IV.II. <i>Operação completa b – SPF 15, TTF 10, PVC 100 e MOF G</i>	53
4.IV.III. <i>Operação completa c – SPF 10, TTF 5, PVC 100 e MOF G</i>	55
4.IV.IV. <i>Operação completa d – SPF 10, TTF 0, PVC 100 e MOF G</i>	56
4.IV.V. <i>Operação completa e – SPF 15, TTF 0, PVC 50 e MOF F</i>	57
4.IV.VI. <i>Operação completa F – SPF 15, TTF 0, PVC 25 e MOF F</i>	59
4.V. Análise Comparativa dos Resultados	60
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
5.I. Conclusões	63
5.II. Sugestões para projetos futuros	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
Apêndice – Código do Controlador do sistema de fermentação com refrigeração	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Processo genérico de produção de cerveja	06
Figura 2.2 – Processo de produção de cerveja (Ambev)	09
Figura 2.3 – Crescimento da produção ao longo dos anos	13
Figura 2.4 – Produção de cerveja no Brasil ao longo dos anos	16
Figura 2.5 – <i>Marketshare</i> de cervejas no Brasil	17
Figura 2.6 – Crescimento do número de cervejarias no Brasil	18
Figura 3.1 – Fluxograma do processo de refrigeração proposto	21
Figura 3.2 – Diagrama P&ID da planta desenvolvida	23
Figura 3.3 – Diagrama elétrico do sistema de instrumentação	24
Figura 3.4 – Fermentador caseiro para a produção de cerveja	26
Figura 3.5 – Tanque Frio	27
Figura 3.6 – Sistema hidráulico e adjacentes	28
Figura 3.7 – Vista superior do fermentador	28
Figura 3.8 – Entrada das serpentinas com sensor de temperatura no interior	29
Figura 3.9 – Fermentador e freezer com tubulações	30
Figura 3.10 – Freezer e sistema hidráulico com tubulações	30
Figura 3.11 – Conexão dos sensores de temperatura ao conector borne	31
Figura 3.12 – Posicionamento do sensor de vazão	32
Figura 3.13 – Posicionamento dos sensores de temperatura	32
Figura 3.14 – Montagem do sistema de monitoramento e controle	33
Figura 3.15 – Sistemas de Fermentação e Controle montados e conectados	33
Figura 3.16 – Comparação entre a vazão equivalente e a vazão real	36
Figura 3.17 – Outliers detectados no Tratamento de Dados	40
Figura 3.18 – Resultado gráfico do Tratamento de Dados	40
Figura 4.1 – Comportamento das temperaturas do interior do freezer	43
Figura 4.2 – Ajuste da resposta da temperatura do interior do freezer	45
Figura 4.3 – Temperaturas dos interiores do fermentador e do Tanque Frio em relação à ambiente	47
Figura 4.4 – Temperaturas de entrada, saída e próxima ao fermentador em relação à ambiente	48
Figura 4.5 – Respostas ao acionamento da bomba hidráulica	49
Figura 4.6 – Dados do experimento SPF 20°C, TTF 5°C, PVC 100% e MOF G	52
Figura 4.7 – Dados do experimento SPF 15°C, TTF 10°C, PVC 100% e MOF G	54
Figura 4.8 – Dados do experimento SPF 10°C, TTF 5°C, PVC 100% e MOF G	55
Figura 4.9 – Dados do experimento SPF 10°C, TTF 0°C, PVC 100% e MOF G	56
Figura 4.10 – Dados do experimento SPF 15°C, TTF 0°C, PVC 50% e MOF F	58
Figura 4.11 – Dados do experimento SPF 15°C, TTF 0°C, PVC 25% e MOF F	59

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 – Principais marcas de cerveja do ano de 2020	01
Tabela 2.1 – Especiarias e suas características	08
Tabela 2.2 – Classificação das cervejas	12
Tabela 2.3 – Produção mundial de cerveja por país em 2018 e 2017	14
Tabela 2.4 – Consumo mundial de cerveja por país em 2018 e 2017	14
Tabela 2.5 – Maiores produtores de cerveja por marca em 2018	15
Tabela 3.1 – Lista de instrumentos utilizados	22
Tabela 3.2 – Calibração do sensor de vazão	35
Tabela 3.3 – Verificação do sensor de temperatura	37
Tabela 3.4 – Faixa de operação dos sensores	38
Tabela 4.1 – Relação dos testes realizados e principais variáveis de processo	42
Tabela 4.2 – Codificação dos parâmetros dos experimentos	51
Tabela 4.3 – Experimentos e parâmetros utilizados	51
Tabela 4.4 – Resumo dos resultados obtidos	60

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

A produção de cerveja, apesar de complexa, é bem disseminada em diversos países. Pode-se atribuir isso a sua antiga história, importância cultural e, principalmente, por ser um produto de alta aceitabilidade no mercado. A forma de consumir cerveja mudou com as Revoluções Industriais. A partir do século XVIII, a automação das grandes cervejarias permitiu uma redução significativa no custo de produção e venda. Dessa forma, as pequenas fábricas de cerveja, que juntas tinham maior parte do mercado europeu, fecharam as portas. A partir desse ponto, as *lagers*, cervejas de fermentação em baixas temperaturas, dominaram as prateleiras dos comércios e, atualmente, ainda são as famílias de cerveja mais vendidas, como pode-se observar na tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Principais marcas de cerveja do ano de 2020

Posição	Marca	Produção (Bilhões de Litros)	País	Tipo
1°	Snow	10314	China	<i>lager</i>
2°	Tsingtao	5348	China	<i>lager</i>
3°	Bud Light	4775	EUA	<i>lager</i>
4°	Budweiser	4393	EUA	<i>lager</i>
5°	Skol	4202	Dinamarca	<i>lager</i>
6°	Yanjing	3629	China	<i>lager</i>
7°	Heineken	2865	Holanda	<i>lager</i>
8°	Harbin	2865	China	<i>lager</i>
9°	Brahma	2865	Brasil	<i>lager</i>
10°	Coors Light	2483	EUA	<i>lager</i>

Fonte: Diário do Estado, 2020 (adaptada)

Na década de 2010, houve um grande aumento no número de produtores artesanais de cerveja. Seja pela facilidade no acesso a recursos e informação, seja pela situação econômica e

contexto social brasileiro, fato é que muitos estudantes e entusiastas veem na produção caseira de cerveja sua fonte de renda ou seu *hobby*.

O processo industrial de produção de cerveja deve atender a requisitos de uma produção em larga escala, o que inclui: produzir cervejas de composição simples; tempo de prateleira elevado; e custos baixos; tornando possível o aumento da reprodutibilidade do processo. A política de segurança de alimentos deve ser rigorosa a fim de não prejudicar a produção, já que qualquer erro pode acarretar na perda da batelada, ou seja, milhares de litros de produto, ou prejudicar a saúde de muitos consumidores em casos mais extremos. Dessa forma, é comum o uso de antioxidantes, corantes e estabilizantes, garantindo um melhor aspecto para o consumidor final e maior durabilidade. Por fim, outros fatores comerciais podem ser destacados, como a padronização da produção, a qualidade (ou confiabilidade) do produto e o emprego de maior quantidade de investimentos em *marketing* e embalagens.

Com foco na obtenção de renda e trabalhando em margens muito pequenas de lucro, indústrias produtoras de cerveja adotam medidas de minimização de perdas em diversas etapas, como a automatização e o reaproveitamento de correntes e a integração da cadeia produtiva. Em indústrias muito competitivas, é importante obter uma economia de escala, estando apenas limitada pela atividade biológica das leveduras e sua relação com o tamanho dos tanques de fermentação. A padronização do produto industrial é indispensável, contando inclusive com especificações para as matérias-primas, equipamentos e outros. Cervejarias artesanais, por sua vez, possuem um público mais específico e disposto a pagar mais caro por um produto diferenciado.

Devido ao caráter diferenciado da produção artesanal de cerveja, a atividade é considerada uma forma de arte. A diversidade de combinações possíveis (tempo de maturação, grau de filtração, tipo de levedura, condições de fermentação) garante um maior valor agregado ao produto, possibilitando sua competitividade e sobrevivência no mercado mesmo com concorrentes mais baratos.

Na década de 2020, o mercado cervejeiro encontra-se bastante diversificado, com regulamentações diversas em cada parte do mundo e grandes representantes multinacionais convivendo com pequenos empreendimentos e garantindo uma oferta constante e diversificada. Os fermentadores disponíveis no mercado destinados à produção de cerveja com escala de produção de centenas de litros ao mês possuem custos de investimento elevados para produtores de pequeno porte. O preço elevado é devido ao sistema de refrigeração acoplado e os custos totais são aumentados pela necessidade de utilização de muitos equipamentos ao mesmo tempo, com o objetivo de ganhar escala. Somado a isso, as atuais soluções caseiras não possuem produtividade satisfatória, além de ocuparem muito espaço físico.

Diante disso, busca-se elucidar o questionamento se é possível desenvolver um sistema de fermentação caseiro que seja mais acessível se comparado à aquisição de fermentadores novos e que seja mais produtivo se comparado ao processo alternativo de fermentação caseira mais difundido, alocando reatores no interior de equipamentos de refrigeração convencionais como *freezers* e geladeiras.

1.1. Objetivos

Como objetivo principal, o presente trabalho propõe um sistema de fermentação caseiro para produção de cerveja que possibilite o escalonamento da produção sem a necessidade de aumentar a quantidade de equipamentos de refrigeração necessários e avaliar a sua viabilidade técnica.

Os objetivos secundários são:

- Propor um sistema de fermentação com refrigeração para produção de cerveja artesanal;
- Desenvolver a planta, conectando o Sistema de Fermentação com o Sistema de Refrigeração;
- Desenvolver o sistema de automação para monitorar e controlar as variáveis de interesse;
- Verificar a viabilidade técnica do sistema desenvolvido;

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A cerveja é uma bebida produzida a partir da fermentação de cereais maltados utilizando leveduras, sendo a bebida alcoólica mais consumida no mundo e a terceira no geral, atrás apenas da água e do chá (NELSON, 2004). O registro mais antigo sobre seu consumo e produção data de 6000 a.C., na região da Babilônia, atual Mesopotâmia. Neste local, em 1700 a.C., o Código de Hamurabi, famoso pela lógica da punição proporcional (Lei de Talião), já mencionava uma remuneração diária de cerveja para as classes trabalhadoras (YOUNG, s.d.). Com o passar dos séculos, seu consumo foi se espalhando pelo mundo, integrando-se a diversas culturas e sofrendo adaptações de acordo com as características dos locais onde eram produzidas. Aos poucos, ganhou complexidade e requinte, passando de uma simples mistura fermentada ao produto de um importante e complexo processo industrial.

O processo rudimentar de produção de cerveja baseava-se em uma simples mistura de água, cevada e trigo, que era deixada em repouso até que adquirisse as propriedades adequadas. Com o passar dos anos, a atividade de produção cervejeira passou a ser cada vez mais profissional, com a criação das primeiras companhias comerciais, como a Weihenstephaner, fundada em 1014 d.C. em um mosteiro na região de Freising, Alemanha (DE SOUZA, s.d.). Aos poucos, novos ingredientes começaram a ser testados e passaram a compor as diversas receitas que surgiam nas companhias. Por volta de 1400, começou-se a utilizar o lúpulo, uma planta aromática comum na Europa, que auxilia na conservação e confere um amargor característico. Ervas, frutas, essências e outros adjacentes passaram a compor o cardápio, criando novas linhas de cerveja e possibilitando que, com o passar do tempo, a variedade de cervejas disponíveis se tornasse enorme.

Um dos mais importantes marcos na história da produção de cerveja ocorreu no século XVI, na região da Baviera, quando a conhecida Lei da Pureza Alemã foi instaurada, sendo ela a junção de duas leis anteriores que discorriam sobre a composição legal da cerveja (PALMER, 2006). Ela regulava que apenas lúpulo, cevada e água podiam ser utilizados durante o processo produtivo.

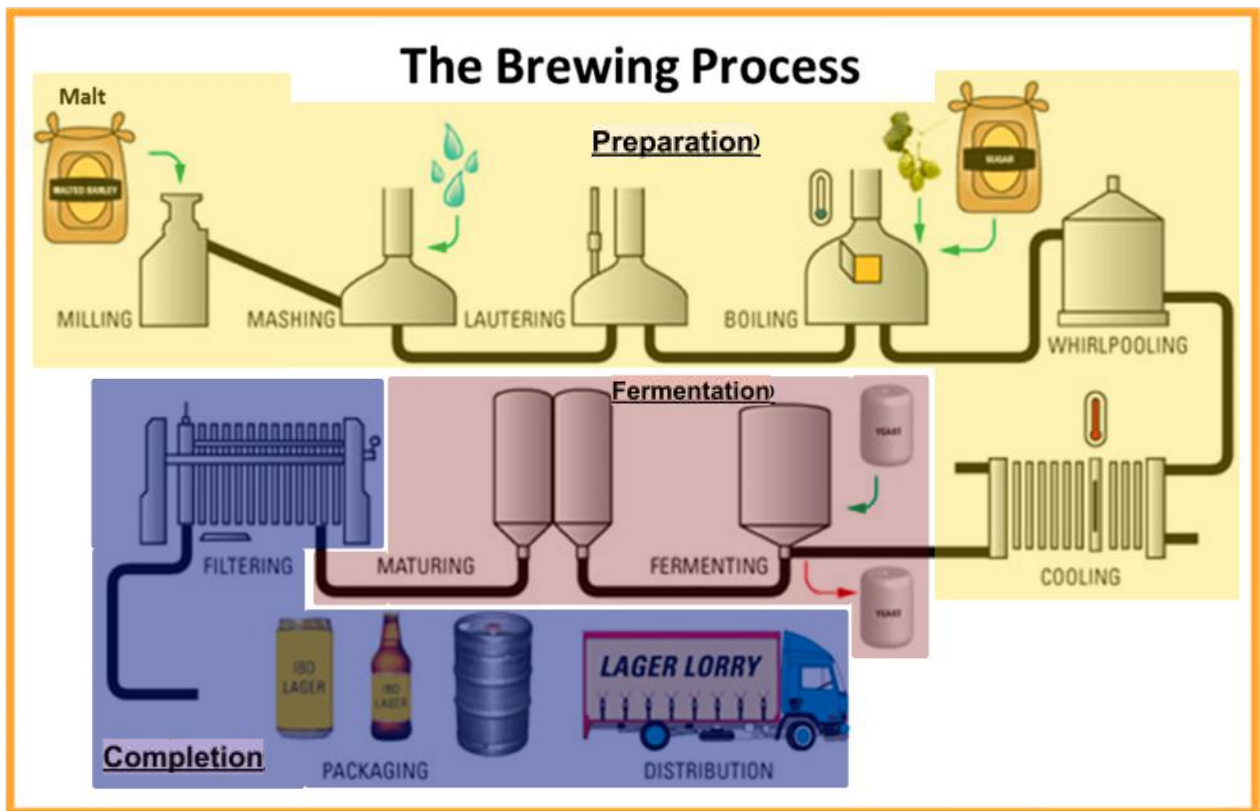
Essa mesma lei, em 1857, sofreu modificações para permitir a introdução de leveduras no processo, os microrganismos responsáveis pela fermentação e desconhecidos até então. Com a disseminação de fábricas no pós-Revolução Industrial, a integração dos países e o aumento de consumo em todo o mundo após o fim da Segunda Guerra Mundial, novas flexibilizações passaram a ser adotadas, como a adição de quantidades limitadas de açúcares, corantes e maltes de outros cereais, principalmente nas cervejas exportadas da Europa.

2.1. O Processo de Produção de Cerveja

A cerveja consiste na fermentação de cereais em uma mistura contendo água e leveduras. A etapa central do processo, portanto, é a fermentação, precedida de etapas de preparação e sucedida por processos de finalização, variando conforme o tipo de produção, escala, as especificidades do produto e outros fatores. O principal objetivo da etapa de preparação envolve tornar os açúcares dos cereais mais disponíveis para a fermentação, enquanto que as etapas pós-reação devem prevenir que qualquer componente prejudicial ao sabor seja formado e, quando isso não for possível, devem garantir a sua retirada, além de assegurar a estabilidade e longevidade do produto final através de métodos de envase e esterilização (ESBER *et al.*, s.d.).

Na Figura 2.1, pode-se observar a representação de um processo genérico de produção de cerveja, no qual destacou-se suas três grandes áreas. São elas: Preparação (em amarelo), Fermentação (em vermelho) e Finalização (em azul).

Figura 2.1 – Processo genérico de produção de cerveja



Fonte: GOUS & FOX, 2017 (adaptada)

2.1.1. Matérias-primas mais comuns

Devido ao seu caráter diverso, o processo de produção de cervejas possui diferentes especificidades. Os ingredientes recorrentes são o lúpulo, o malte, a água, as leveduras, os adjuntos e os clarificantes (DIAS, s.d.)

O lúpulo é uma inflorescência da espécie *Humulus lupulus*, que confere gosto amargo, aroma cítrico e floral ao produto. Possui propriedades antibióticas, auxiliando na preservação da cerveja e aumentando sua acidez. É utilizado para equilibrar a doçura do malte (BURGESS, 1964).

O malte é o resultado de uma germinação interrompida de um cereal. Tal processo libera enzimas que transformam o amido presente no interior das sementes em açúcares

fermentescíveis, tornando os cereais mais adequados para a produção de cerveja. Pode ser produzido a partir da cevada (mais comum) ou a partir de qualquer outra fonte de amido.

A água é necessária para formar o meio reacional, capaz de criar as condições ideais para a fermentação, além de possibilitar o consumo do produto como bebida. As diferentes composições químicas de cada fonte de água podem gerar cervejas com diferentes propriedades. Entretanto, com a padronização das plantas industriais de produção de cerveja, as propriedades podem ser ajustadas, entregando produtos com as mesmas características organolépticas, independente da região na qual se está produzindo.

As Leveduras são microrganismos capazes de transformar o malte em álcool e outros metabólitos. São as responsáveis pelo processo bioquímico de fermentação da cerveja, peça central de toda a cadeia produtiva. Possuem diversas espécies que podem ser utilizadas na produção de cerveja, cada uma com uma condição ideal de reação

Cereais diversos podem ser adicionados ao cereal principal, sendo chamados de adjuntos. Utiliza-se arroz e milho para um resultado mais refrescante e outros cereais não-maltados para sabores mais encorpados (DANIELS, 1998).

Clarificantes são agentes responsáveis pela deposição de sólidos suspensos, como as proteínas, resultando em um produto mais brilhante e límpido. Este ingrediente é opcional, sendo utilizado de acordo com o tipo de cerveja que se quer obter;

Além dos componentes básicos para produção de cerveja, diversas cervejarias destacam-se por trazerem em suas composições especiarias como ervas, frutas, raízes, sementes, entre outros, como destacado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Especiarias e suas características

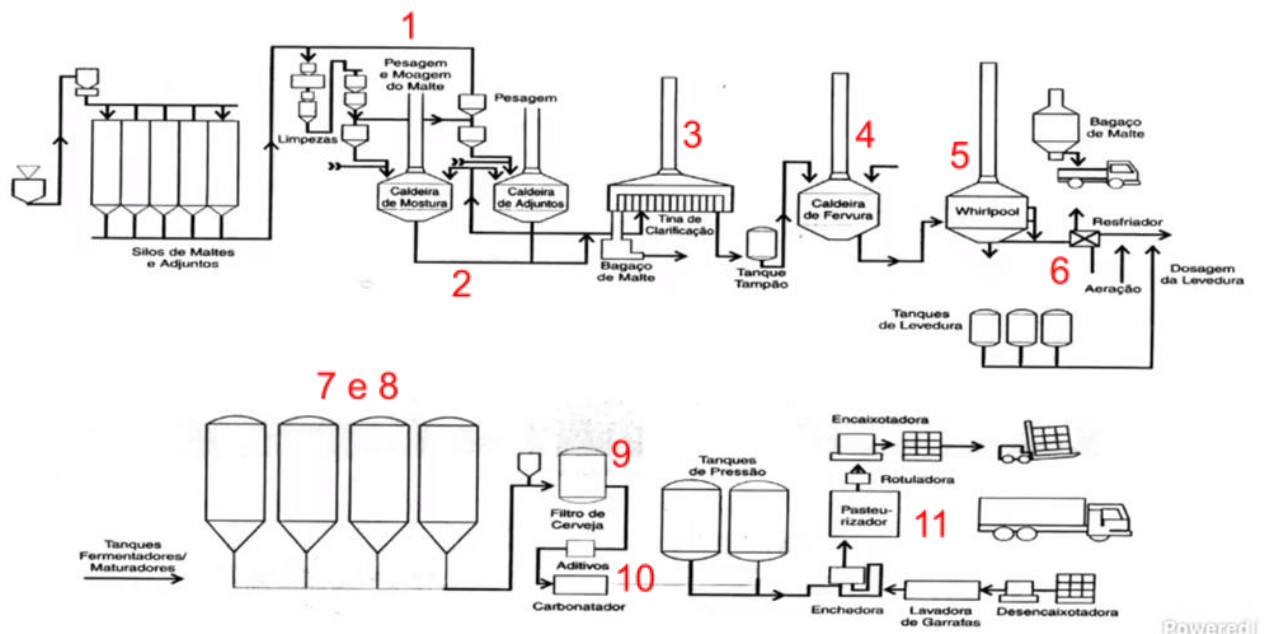
Especiaria	Tipo	Característica
Aloe Vera	Extrato	sabor e aroma amargos
Limão	Extrato	aroma e amargor característicos
Laranja	Casca	sabor amargo e aroma frutado
Canela	Casca	sabor doce e aroma característico
Amora	Fruta	sabor e aroma frutados
Urtiga	Folha	acidez e adstringência
Erva Cidreira	Folha	toque cítrico
Hortelã	Folha	sabor refrescante
Alecrim	Folha	sabor amargo e odor azedo
Tomilho	Folha	sabor adstringente
Camomila	Flor	sabor amargo e aroma característico
Cravo	Flor	aroma forte
Cardamomo	Semente	sabor picante e aroma forte
Zimbro	Semente	aroma picante e agridoce
Cominho	Semente	sabor picante e aroma forte
Mostarda	Semente	sabor picante
Noz Moscada	Semente	sabor e aroma doces
Galanta	Raiz	sabor e aroma refrescantes
Gengibre	Raiz	sabor picante
<i>Wasabi</i>	Raiz	sabor picante e amargo

Fonte: STRONG, 2008 (adaptada)

2.1.II. Principais etapas, equipamentos e reações

Como mencionado anteriormente, o processo de produção de cerveja é milenar e passou por diversas transformações ao longo do tempo, variando de acordo com o local. Ao mesmo tempo, é importante notar que há algumas etapas similares entre as diferentes formas de produção. Uma exemplificação do processo de produção de cerveja (cervejaria Ambev) pode ser visto na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Processo de produção de cerveja (Ambev)



Fonte: ESBER, 2020

De modo geral, a produção industrial de cerveja pode ser dividida em Moagem, Brassagem, Separação, Fervura, Whirlpool, Resfriamento, Fermentação, Maturação, Filtração, Pós-processamento e Envase (HUI, 2006), representados, respectivamente, pelos números de (1) a (11).

Na Moagem, os cereais maltados são enviados para um equipamento de moagem, que provoca o rompimento das cascas e liberação do endosperma do grão, possibilitando o acesso da água de processo para a realização de reações de hidrólise em fases futuras do processo. É uma

etapa imprescindível, pois a camada de lignina que recobre os cereais não permite que as enzimas acessem os substratos. Já na Brassagem, os cereais moídos são misturados com água em um processo de maceração aquecida. Dessa forma, as enzimas do malte quebram o amido e o transformam em açúcares fermentescíveis, em um processo de germinação artificial controlada conhecido como malteação. Por sua vez, na Separação, a mistura de açúcares fermentescíveis e água é separada do bagaço resultante da brassagem. A parte líquida segue para as próximas etapas do processo, enquanto a parte sólida é lavada para recuperação de açúcares residuais e, depois, descartada.

Durante a Fervura, o mosto (parte líquida resultante da etapa anterior) é aquecido até a sua fervura, destruindo os microrganismos indesejados no processo. Em geral, é nessa etapa que o lúpulo é adicionado ao processo. No processo de *Whirlpool*, do inglês “turbilhão”, os resíduos sólidos são retirados utilizando-se um processo de formação de vórtex na mistura líquida. O mosto segue para etapas posteriores e o resíduo é encaminhado para tratamento. Na parte do Resfriamento, o mosto é resfriado até atingir a temperatura adequada de fermentação, que depende do tipo de levedura utilizada.

Na Fermentação, são adicionados os microrganismos responsáveis pela fermentação dos açúcares do mosto, convertendo os carboidratos em dióxido de carbono e álcool. Também é possível que ocorra geração de ácidos orgânicos e ésteres, conferindo aromas característicos. A depender do tipo de microrganismo utilizado, a fermentação ocorrerá em uma determinada temperatura (entre 5 °C e 20 °C), demorando, em geral, cerca de uma semana. Caso o tempo de fermentação seja muito prolongado, são gerados aldeídos e outros metabólitos que conferem sabor desagradável ao produto e devem ser evitados. Já na Maturação, após o período adequado de fermentação, o mosto fermentado é separado dos microrganismos mortos e rejeitos e transferido para um novo reator. Ele, então, é deixado em repouso, sob refrigeração (em torno de 0 °C), o que permite a conversão dos açúcares residuais, evita a formação de compostos indesejáveis e garante a obtenção de um produto límpido e de maior qualidade.

Durante a Filtração, o mosto maturado passa por um sistema de filtros, separando os sólidos residuais do produto final. Dessa forma, a cerveja adquire um aspecto mais claro. Algumas linhas de cerveja não aplicam essa etapa do processo, obtendo um produto mais opaco. Já no Pós-processamento, são realizadas etapas adicionais que visam a melhoria na qualidade final do produto, como filtração adicional, resfriamento, processos de clarificação, esterilização avançada, entre outros. Por fim, no Envase, quando o produto já está finalizado, ele segue para ser pasteurizado, adicionado ao recipiente final e selado, obtendo o produto pronto para consumo, que seguirá para distribuição nos mercados consumidores.

2.II. O Mercado Cervejeiro

Atualmente, no mercado cervejeiro, as cervejas são separadas em grupos, de acordo com uma característica específica a ser avaliada. As principais classificações são: quanto ao tipo de fermentação, quanto ao teor de extrato primitivo, quanto à cor e quanto ao teor alcoólico.

A principal classificação para cervejas diz respeito à forma como a sua fermentação ocorre, a depender do tipo de levedura utilizada. Leveduras de alta fermentação necessitam de temperaturas mais elevadas, em torno de 25 °C, com a reação ocorrendo na parte superior do reator. Costuma ser um processo mais acelerado, gerando um maior teor de ésteres, que conferem sabor frutado ao produto final. A essas cervejas é dado o nome de *ale*. Por outro lado, leveduras de baixa fermentação necessitam de temperaturas mais reduzidas, em torno de 10 °C, ocorrendo na parte inferior do fermentador e resultando em um processo mais lento de fermentação. Como resultado, o produto final possui aroma floral e, em geral, são mais refrescantes e gasosas. A essas cervejas é dado o nome *lager*. Por fim, é possível realizar um processo fermentativo sem a seleção de linhagens específicas de microrganismos, utilizando uma microbiota natural selvagem, o que resulta em produtos com características únicas e, em geral, mais ácidas. A essas cervejas é dado o nome *Lambic* (Escola de Química, 2018).

As demais classificações seguem propriedades físicas do produto. Quanto ao extrato primitivo, diz respeito à quantidade de substâncias dissolvidas no mosto utilizado na produção da cerveja, segundo a Instrução Normativa nº 65, de 10 de dezembro de 2019 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Quanto ao teor alcoólico, diz respeito à concentração de álcool, em %_{v/v}, medida em 20°C. Quanto à cor, a classificação é feita pelo índice EBC (*European Brewing Convention*), no qual é realizada uma análise comparativa entre a cor da cerveja e uma tabela de cores pré estabelecida. Todas essas informações estão resumidas, reunidas e exemplificadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Classificação das cervejas

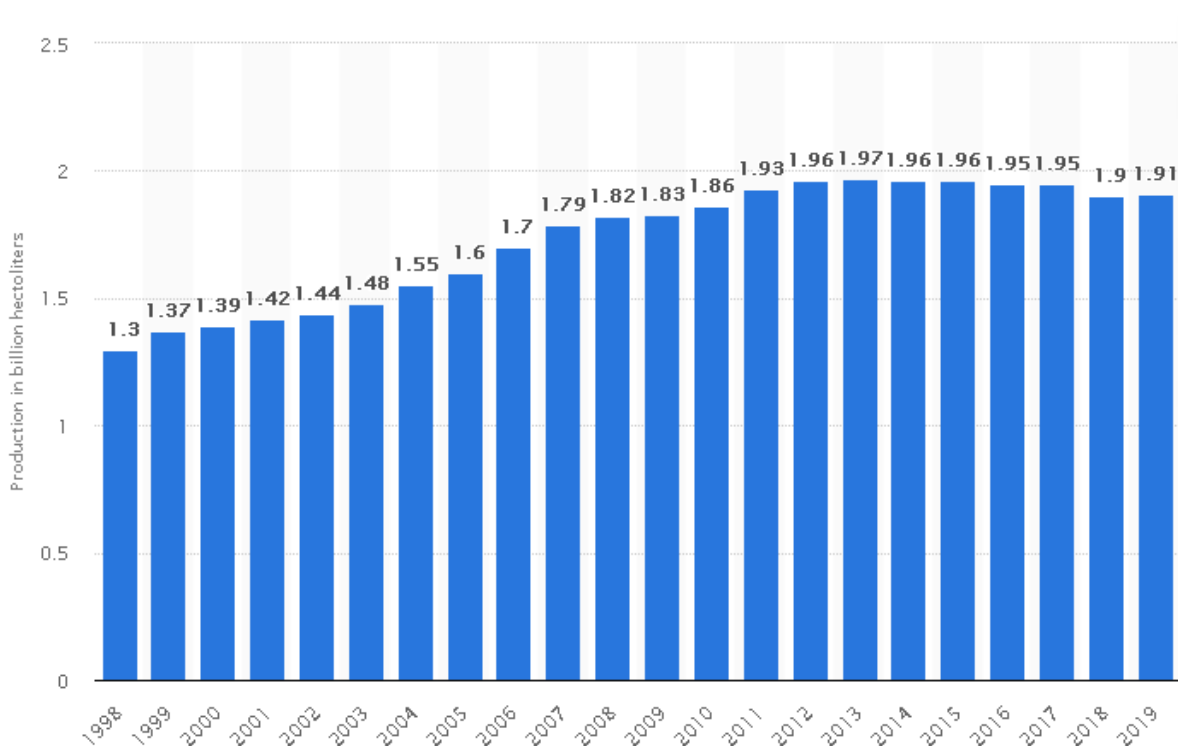
		Características	Exemplos
F E R M E N T A Ç Ã O	Alta	utilização de leveduras que, durante a fase de fermentação tumultuosa, emergem à superfície	<i>Ale, Porter, Barley Wine, Stout, Altbier, Kölsch, Trappiste, Abbey, Saison, Weizenbier.</i>
	Baixa	utilização de leveduras que, durante a fase de fermentação tumultuosa, depositam-se ao fundo	<i>Lager, Pilsener, Dortmunder, Malzbier, Wiener, Märzen, Münchener, Bock, Doppelbock, Rauchbier.</i>
	Lambic	não há seleção de leveduras, permitindo uma fermentação natural da microbiota local	<i>Straight Lambic, Gueuze, Faro.</i>
E X T R A T O	Fraca	produzida com mosto com teor de extrato primitivo entre 7 % e 11 % em peso	-
	Normal	produzida com mosto com teor de extrato primitivo entre 11 % e 12,5 % em peso	<i>Pilsen, Dortmunder, Weissbier.</i>
	Extra	produzida com mosto com teor de extrato primitivo entre 12,5 % e 14 % em peso	<i>Munche, Ale.</i>
	Forte	produzida com mosto com teor de extrato primitivo acima de 14 %	<i>Bock, Stout, Porter.</i>
C O R	Clara	possui índice de EBC inferior a 15	<i>Pilsen, Dortmunder, Weissbier, Ale, Ice.</i>
	Escura	possui índice de EBC superior a 15	<i>Stout, Porter, München, Bock, Malzbier.</i>
Á L C O O L	Zero	teor alcoólico inferior a 0,5 % em peso	-
	Baixo	teor alcoólico entre 0,5 % e 2,0 % em peso	-
	Médio	teor alcoólico entre 2,0 % e 4,5 % em peso	<i>Pilsen, Dortmunder, Weißbier, München, Ale.</i>
	Alto	teor alcoólico entre 4,5 % e 7 % em peso	<i>Stout, Porter, Bock, Malzbier, Ice.</i>

Fonte: STRONG, 2008 (adaptado)

2.II.I. Produção e consumo mundial

O mercado cervejeiro mundial, tem como produto principal e quase absoluto as cervejas *lagers*, mesmo com toda a diversidade que a cerveja pode apresentar. Tal fato está intimamente ligado ao crescimento dos mercados tropicais, pois, devido ao calor e às altas temperaturas dessas regiões, há uma maior procura por cervejas mais leves e refrescantes. A Figura 2.3 exemplifica tal crescimento, já que há um acréscimo médio de 3 % ao ano na produção de cerveja até 2012, coincidindo com o aumento do consumo nos países orientais, principalmente a China.

Figura 2.3 – Crescimento da produção ao longo dos anos



Fonte: CONWAY, s.d.

A produção de cerveja está diretamente ligada ao consumo. Por conta dessa ligação, os índices de crescimento possuem taxas muito semelhantes, e os mercados consumidores e produtores mantêm-se em posições coincidentes nos *rankings* de produção e consumo de cerveja, conforme mostrado nas Tabelas 2.3 e 2.4:

Tabela 2.3 – Produção mundial de cerveja por país em 2018 e 2017

2018							2017	
2018 Rank	2017 Rank	Country	Production Volume (kl)	Growth from Previous Year	Global Market Share		Production Volume (kl)	Growth from Previous Year
					Incremental (%)	Cumulative (%)		
1	1	China	38,927,200	-2.2%	20.4%	20.4%	39,786,600	-3.9%
2	2	United States	21,460,700	-1.7%	11.2%	31.6%	21,833,600	-2.3%
3	3	Brazil	14,137,900	1.0%	7.4%	39.0%	14,000,000	5.0%
4	4	Mexico	11,980,000	8.8%	6.3%	45.3%	11,010,000	4.9%
5	5	Germany	9,365,200	0.7%	4.9%	50.2%	9,301,300	-2.0%
6	6	Russia	7,747,000	4.1%	4.1%	54.2%	7,440,000	-4.9%
7	7	Japan	5,108,300	-2.7%	2.7%	56.9%	5,247,800	-2.1%
8	8	Vietnam	4,300,000	-1.7%	2.3%	59.2%	4,375,000	15.4%
9	9	United Kingdom	4,228,200	4.5%	2.2%	61.4%	4,046,100	-7.5%
10	10	Poland	4,093,000	1.4%	2.1%	63.5%	4,038,200	-2.4%

Fonte: Kirin Holdings Company, s.d.

Tabela 2.4 – Consumo mundial de cerveja por país em 2018 e 2017

2018 Ranking	2017 Ranking	Country	2018			2017	
			Total Consumption (thousand kl)	Global Market Share	Growth Rate 2017-2018	Total Consumption (thousand kl)	Global Market Share
1	1	China	39,362	20.9%	-2.0%	40,166	21.4%
2	2	United States	24,029	12.7%	-0.4%	24,137	12.9%
3	3	Brazil	12,662	6.7%	0.8%	12,565	6.7%
4	4	México	8,982	4.8%	5.3%	8,532	4.6%
5	5	Germany	8,321	4.4%	1.3%	8,218	4.4%
6	6	Rússia	7,819	4.1%	-2.4%	8,008	4.3%
7	7	Japan	5,108	2.7%	-0.1%	5,116	2.7%
8	8	United Kingdom	4,856	2.6%	5.7%	4,594	2.5%
9	9	Vietnam	4,667	2.5%	7.1%	4,356	2.3%
10	10	Spain	4,051	2.1%	0.0%	4,050	2.2%

Fonte: Kirin Holdings Company, s.d.

Pode-se destacar o domínio do mercado chinês frente ao mundial, mesmo com taxas de crescimento negativas nos anos em destaque. Essa hegemonia é explicada pelo crescimento

rápido da produção de cervejas no país, que durou até 2012, fazendo com que algumas marcas do país entrassem no *rank* de maiores produtores (ver Tabela 2.5).

Tabela 2.5 – Maiores produtores de cerveja por marca em 2018

2018 Rank	Marcas	Produção(10 ⁶ hl)
1	Ab Inbev	567
2	Heineken	233,8
3	China Res. Snow	121
4	Carlsberg	112,3
5	Molson Coors	96,6
6	Tsingtap Brewery	80,3
7	Asahi	57,9
8	BGI/Group Castel	40,5
9	Yanjing	38
10	Efes Group	31,8
11	Petropolis	30

Fonte: FREITAS, s.d.

O México apresenta a maior taxa de crescimento na produção entre os anos analisados. Isso pode ser explicado tanto pelo próprio aumento do consumo de cervejas no país, quanto pela exportação da sua principal marca de cerveja para outros países, como os EUA e países sul-americanos. A Corona Extra, em associação com o grupo AB InBev, teve, a partir do ano de 2012, um aumento significativo no número de exportações (BLACK), fruto da grande infraestrutura e *market share* da *holding* de bebidas.

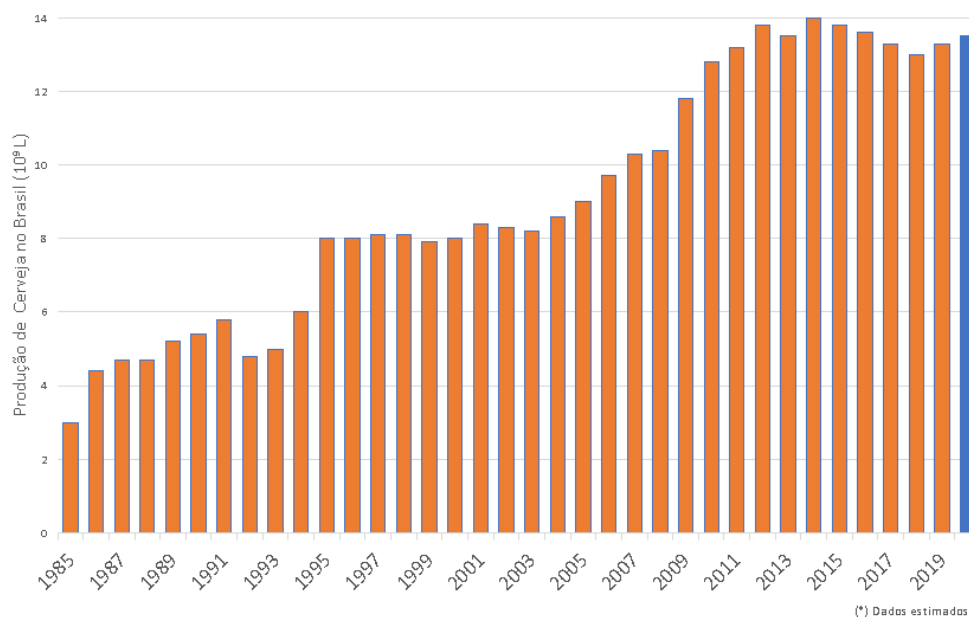
O grupo AB InBev é uma multinacional formada pela união entre a empresa brasileira Ambev e a belga Interbrew. A mesma passou por uma rápida expansão, adquirindo e se associando com outras marcas durante sua trajetória de crescimento, como o grupo Modelo da Corona Extra, citado anteriormente. Devido a isso, a produção desta multinacional é significativamente superior ao segundo lugar no *ranking*.

2.II.II. Produção e consumo no Brasil

A primeira produção de cerveja no Brasil foi realizada em 1654, entretanto só com a chegada da família real ao país em 1808 que a bebida foi disseminada na cultura local. A partir desse ano, a produção de cerveja nacional aumentou vagarosamente até os frutos da revolução industrial chegarem ao país por volta de 1930, quando o crescimento foi ampliado significativamente (*Instituto da Cerveja, s.d.*).

O consumo de cerveja no Brasil cresceu continuamente até 2014 e, desde então, o mercado consumidor nacional estabilizou-se em torno de 13,5 bilhões de litros (ver Figura 2.4). Nesse contexto, as cervejarias intensificaram a produção de cervejas artesanais, principalmente as que já buscavam produtos alternativos.

Figura 2.4 – Produção de cerveja no Brasil ao longo dos anos

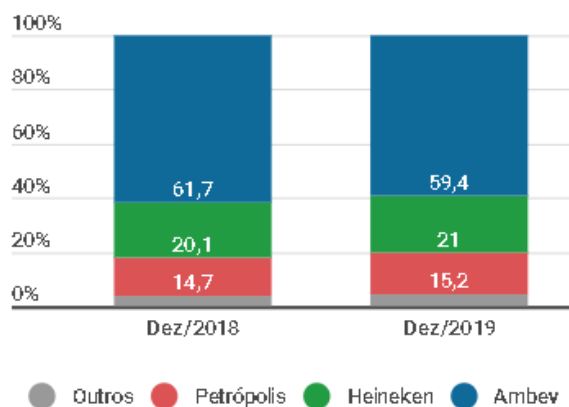


Fonte: MARTINS *et al.* & BOUÇAS, s.d. (adaptado)

A Figura 2.5 mostra que o mercado brasileiro é liderado pelas duas empresas que dominam o mercado mundial. Isso porque a AB-Inbev teve como uma de suas empresas de origem a

brasileira Ambev, que já dominava o mercado nacional nos anos 2000. Já a Heineken, mesmo não sendo nacional, conquistou parte do mercado brasileiro devido a sua estratégia de expansão.

Figura 2.5 – Marketshare de cervejas no Brasil



Fonte: FREITAS, s.d.

2.II.III. Produção de Cerveja Artesanal

Em geral, as cervejas artesanais são comercializadas em mercados consumidores de nicho e próximos geograficamente da produção. Devido à menor escala de produção, tendem a ter um preço superior às cervejas de produção industrial. Por outro lado, elas adotam estratégias de diferenciação, como adjuntos exóticos (ervas, frutas, aromas, harmonizações), sendo muitas vezes reconhecidas pelos sabores e aromas ímpares. Não há, também, um rigor extremo nos tempos das etapas do processo, permitindo pequenas alterações e garantindo lotes únicos.

Antes da industrialização do processo de produção de cerveja, as mesmas eram comumente feitas de forma manual, similar ao que se tem presente nos processos artesanais. Entretanto, os equipamentos, insumos e técnicas atuais são mais acessíveis e adaptados às novas tecnologias. Os equipamentos são feitos de aço inox, os insumos vegetais podem ser adquiridos em regiões de climas diversos e as técnicas de processo são amplamente disponibilizadas na internet.

O mercado artesanal de cerveja cresce rapidamente. Isso porque, mesmo com o preço superior aos produtos industriais, além dos aspectos referentes à estratégia de diferenciação da

gourmetização em si, vê-se também que cada vez mais consumidores buscam alimentos mais orgânicos e sem conservantes (*Revista Empreendedor*, s.d.).

O crescimento acontece de forma mais expressiva a partir do ano de 2010, quando as cervejarias artesanais ganham força no país, como mostrado na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Crescimento do número de cervejarias no Brasil



Fonte: *Beer Art*, s.d.

As cervejarias artesanais ainda têm pouca participação no mercado brasileiro, apenas 2,5%, principalmente se comparado ao mercado dos EUA, com 13%. Dessa forma, pode-se observar um potencial de crescimento significativo nesse meio. Logo, a tendência de crescimento apresentada na Figura 2.6 deve se manter por mais alguns anos (*BODAS*, s.d.).

A produção de cerveja artesanal muitas vezes inicia-se como um *hobby*, já que, para isso, o investimento inicial é relativamente baixo (na faixa de R\$ 500,00). Em contrapartida, quando o objetivo é criar uma microcervejaria, é necessário muito esforço, tempo e dinheiro (*Cerveja da Casa*, s.d.).

A primeira barreira que o microcervejeiro enfrenta, mesmo antes de começar a sua produção, é a legislação do país. No caso do Brasil, após o registro como microempreendedor, é obrigatório

o cadastro e a regulamentação no MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento). Esse processo é longo e custoso, além de serem necessárias diversas inspeções de insumos e condições sanitárias do futuro ambiente de produção (MATOSO, s.d.). Outro problema comum é o gasto com equipamentos de capacidade elevada (batelada superior a 100 litros), principalmente com fermentadores.

A batelada passa primeiramente pela etapa quente, que dura algumas horas, e, em seguida, pela etapa fria, no fermentador, que dura de 15 a 30 dias. São necessários diversos fermentadores para um único conjunto de equipamentos da etapa quente, já que os equipamentos têm aproximadamente o mesmo volume útil e tempos de batelada diferentes para que a produção não se limite ao número de fermentadores.

Uma das maiores dificuldades operacionais que surgem para os produtores de cerveja artesanal que buscam aumentar o volume de produção é o controle da temperatura de fermentação sem o gasto com equipamentos que possuam um sistema avançado de controle de temperatura. A fermentação, assim como outros processos bioquímicos, é sensível a uma faixa de temperatura. Por conta da atividade biológica das leveduras, essa etapa é prejudicada quando a faixa de operação determinada não é alcançada, mesmo que por curtos períodos de tempo, podendo até mesmo decorrer na perda de bateladas inteiras.

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

A primeira etapa da metodologia utilizada no presente trabalho foi a confecção de um fluxograma de processo, seguindo uma ordem de prioridade para atender os objetivos principais de um sistema de fermentação caseiro. Ao longo desta etapa, foram identificados o que necessariamente deve-se ter no sistema e o que não poderia ter no mesmo. Em seguida, foram implementadas ideias adicionais que poderiam contribuir para a utilização do sistema por pequenos cervejeiros.

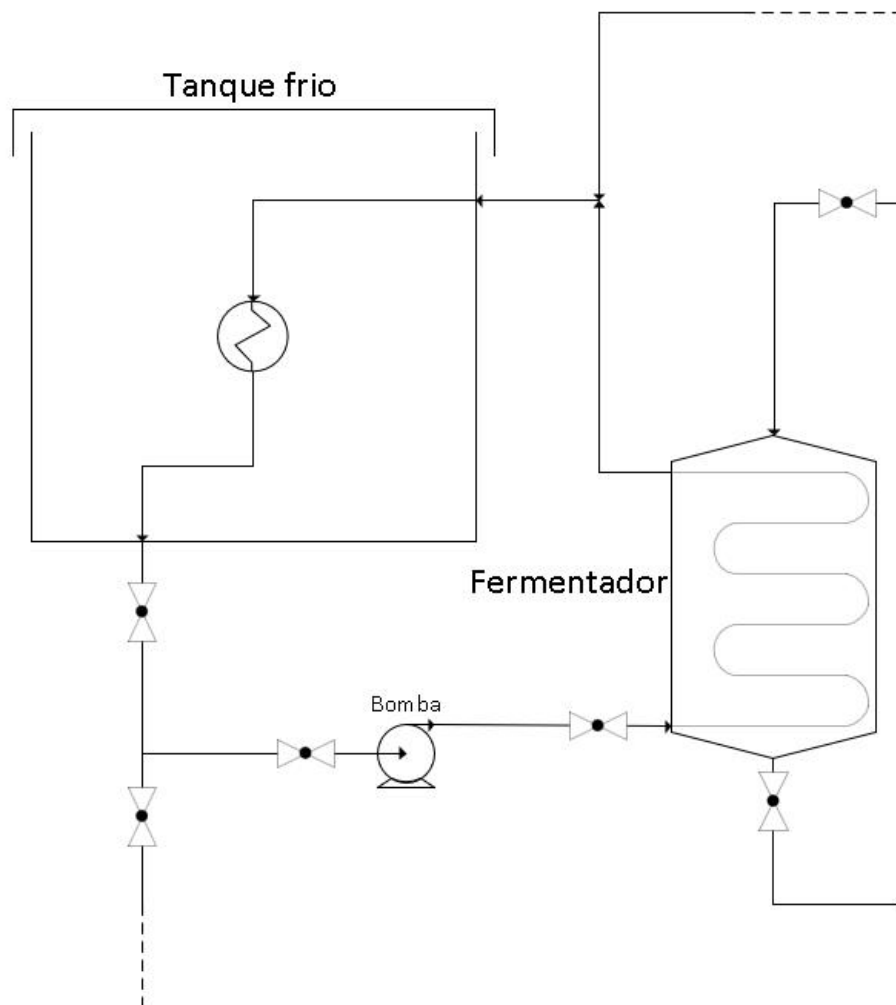
3.1. Elaboração do Fluxograma do Processo de Fermentação com Refrigeração

O fluxograma preliminar definiu os equipamentos mínimos necessários para o processo de fermentação. Identificou-se como essencial o fermentador e a forma de retirar calor do mesmo, já que a fermentação é a principal etapa de produção da cerveja e os microrganismos responsáveis pela mesma possuem uma atividade ótima em uma determinada temperatura, a depender da espécie. Como diferencial do projeto, optou-se por utilizar um sistema indireto de refrigeração no qual um líquido refrigerante é resfriado no interior de um equipamento e enviado a serpentinas acopladas dentro de fermentadores independentes. Após a troca térmica com os fermentadores, o fluido refrigerante aquecido é recirculado de volta ao equipamento refrigerador. Dessa forma, a quantidade de fermentadores utilizados não mais se limita ao espaço físico interno do equipamento de refrigeração, mas sim da potência do próprio.

O fermentador escolhido deve ser destinado ao processo de batelada, já que tanto operações artesanais quanto industriais utilizam esse método para produção de cerveja. Já para o sistema de refrigeração, optou-se por um recipiente para armazenamento do fluido refrigerante, bem como um trocador de calor para o resfriamento do mesmo. O conjunto recipiente e fluido foi denominado Tanque Frio. Em seguida, acrescentou-se ao fluxograma as tubulações, conexões, válvulas e bombas que são necessárias para circular o líquido refrigerante por entre os dois

equipamentos e, ao mesmo tempo, permitir um acoplamento de mais fermentadores em paralelo. A Figura 3.1 apresenta o fluxograma de processos preliminar desenvolvido para a planta.

Figura 3.1 – Fluxograma do processo de refrigeração proposto



Por se tratar de um produto alimentício, a fiscalização quanto a possíveis contaminantes do mosto no interior do fermentador é uma das restrições mais significativas do processo. A escolha do material interno do fermentador e do material externo da serpentina tornou-se mais restrita, já

que ambos entram em contato diretamente com o mosto cervejeiro. Devido a isso, escolheu-se como material para o fermentador o aço inox e para a serpentina, o alumínio.

3.1.1. Sistema de monitoramento e controle

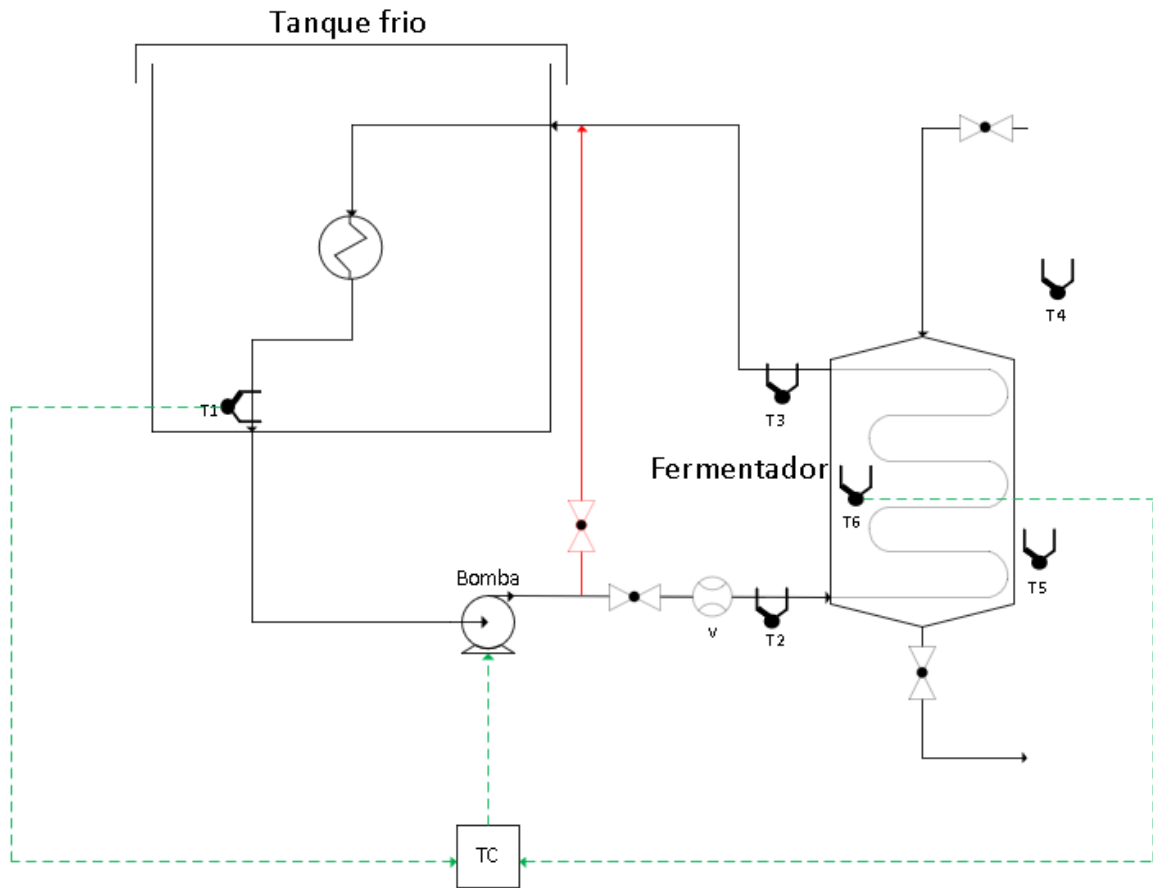
A Tabela 3.1 resume todos os equipamentos utilizados para o monitoramento e controle.

Tabela 3.1 – Lista de instrumentos utilizados

Código	Tipo	Atributo	Descrição
V	Sensor	Vazão	vazão de circulação do líquido de refrigeração na serpentina
T1	Sensor	Temperatura	temperatura do interior do Tanque Frio
T2	Sensor	Temperatura	temperatura de entrada na serpentina do fermentador
T3	Sensor	Temperatura	temperatura de saída da serpentina do fermentador
T4	Sensor	Temperatura	temperatura ambiente
T5	Sensor	Temperatura	temperatura próxima ao fermentador
T6	Sensor	Temperatura	temperatura do interior do fermentador
C	Controlador	Dados	Arduino responsável pelo controle de todo o sistema
P	Protoboard	Dados	placa para as conexões elétricas do sistema
R	Relé	Corrente	interruptor elétrico de acionamento da bomba
USB	Cabo	Dados	cabo USB responsável pela conexão do Arduino com o computador

Para determinar a viabilidade técnica da planta proposta foi desenvolvido um fluxograma de instrumentação com um único fermentador para acompanhar o comportamento térmico do sistema ao longo dos testes experimentais, contido na Figura 3.2.

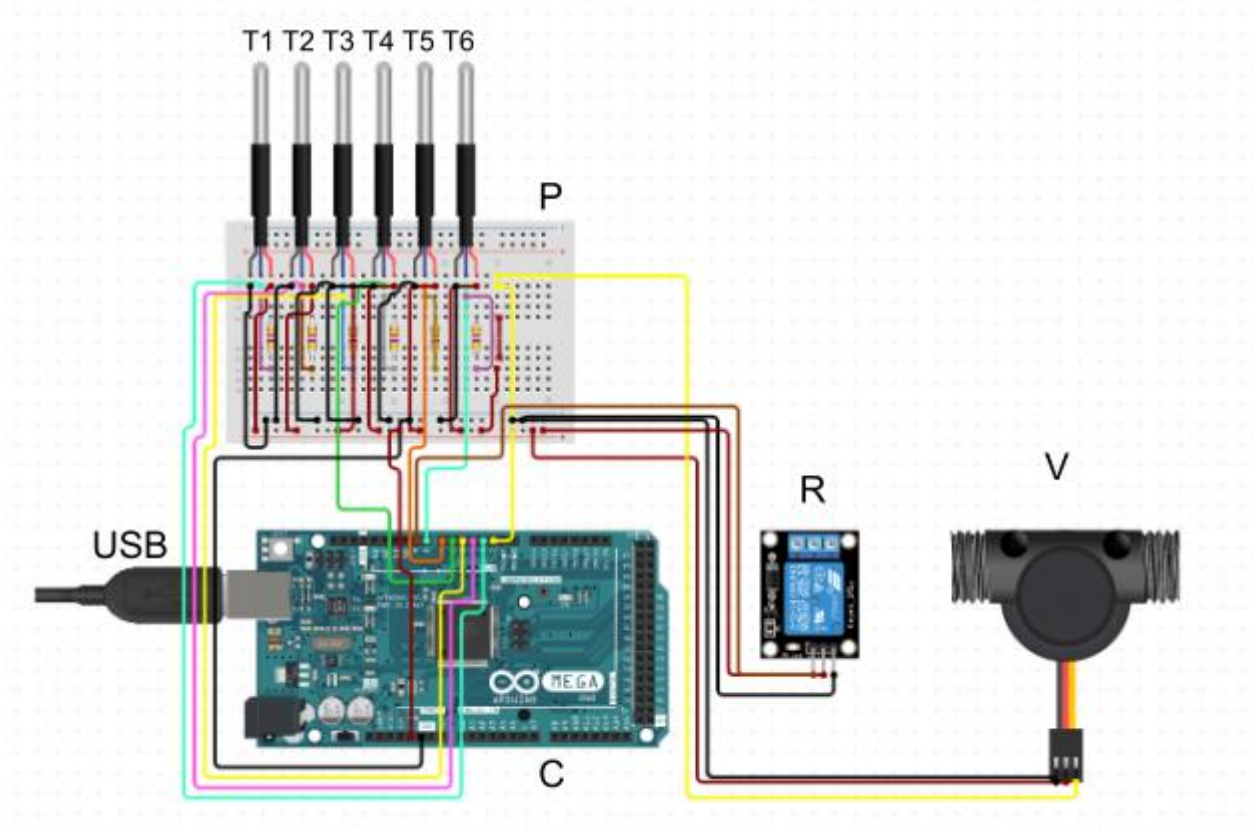
Figura 3.2 – Diagrama P&ID da planta desenvolvida



Adicionou-se um sistema de reciclo após a bomba para simular a presença de outros fermentadores e avaliar a resposta do sistema a diferentes vazões de fluido refrigerante na serpentina. Conforme apresentado na Figura 3.2, foram acrescentados sensores de temperatura e vazão, controlador, e transmissão de dados (linha tracejada).

A plataforma do sistema de monitoramento utilizada está baseada na tecnologia Arduino e instrumentos compatíveis. A Figura 3.3 apresenta o esquema de ligação elétrica desenvolvido e implementado na planta.

Figura 3.3 – Diagrama elétrico do sistema de instrumentação



O sistema de instrumentação foi baseado em trabalhos anteriores (DO NASCIMENTO, 2018) e apresenta a seguinte estrutura de troca de informações: os sensores de temperatura (T1, T2, T3, T4, T5 e T6) geram uma corrente elétrica com voltagem variável, proporcional à temperatura da parte metálica do sensor; o sensor de vazão (V) gera uma corrente elétrica também com voltagem variável, porém a vazão é proporcional ao somatório das voltagens em um intervalo de tempo fixo, correspondentes ao número de giros de uma hélice interna; o relé (R) é uma chave elétrica que pode ser acionada por um sinal de baixa voltagem (12 V), controlando a passagem de uma corrente de alta voltagem (127 V); o controlador (C) do sistema recebe e manda sinais elétricos de baixa voltagem, além de armazenar e rodar a programação definida pelo usuário; o cabo (USB) é a ligação do sistema com o computador, por onde ocorre a transferência de energia e dados; a *protoboard* (P) é uma placa que permite que o sistema elétrico seja

interligado sem a utilização de soldagem; também são mostrados alguns jumpers e resistores que fazem as ligações elétricas do sistema.

3.II. Construção do Sistema de Fermentação com Refrigeração

Os materiais utilizados para a confecção do sistema de fermentação do presente trabalho foram: um fermentador cilíndrico de 38 L em aço inox; um tubo em silicone de 2,5 m de comprimento e 1/2" de diâmetro; um tubo em silicone de 1,5 m de comprimento e 1/2" de diâmetro; dois tubos em silicone de 1,0 m de comprimento e 1/2" de diâmetro; duas luvas em latão de 1/2" de diâmetro; dois niples em latão de 1/2" de diâmetro; um conector T em latão de 1/2" de diâmetro; quatro espigões em aço inox de 1/2" de diâmetro; três válvulas em aço inox de 1/2" de diâmetro; uma bomba hidráulica modelo YF-S201; um *freezer* modelo Philco H200L; um recipiente em plástico de 50 L; três serpentinas com diâmetro interno de 5 mm e comprimento de 9,2 m; 86 L de água; fita isolante; fita teflon; silicone vedante; jornal; um extensor em latão de 1/2" de diâmetro; um anel vedante em silicone com 1/2" de diâmetro; duas porcas em latão de 1/2" de diâmetro; um interruptor físico.

3.II.I. Montagem do sistema de fermentação

Foi reaproveitada uma panela de aço inox de 38 L, usada no processo de brassagem artesanal apresentada na Figura 3.4. Tal equipamento possui uma válvula de saída para retirada do mosto do reator durante a brassagem. Como os experimentos realizados não possuem tal etapa, a válvula foi mantida fechada durante todo o processo.

Figura 3.4 – Fermentador caseiro para a produção de cerveja



Para a montagem do Tanque Frio, alocou-se o recipiente em plástico no interior do *freezer*, conforme mostrado na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Tanque Frio



A Figura 3.6 apresenta o sistema hidráulico de circulação do líquido de refrigeração, no qual a bomba e as peças adjacentes foram conectadas com fita teflon para evitar vazamentos. Junto ao sistema hidráulico, está presente o interruptor manual da bomba e o sensor de vazão.

Figura 3.6 – Sistema hidráulico e adjacentes



Foram reaproveitadas 3 serpentinas de alumínio trançadas, utilizadas também no processo de brassagem artesanal, unidas em formato espiral, dentro do fermentador, conforme apresentado na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Vista superior do fermentador



As entradas das três serpentinas e o sensor de temperatura foram conectadas a uma única mangueira de silicone de 1 m de comprimento. Repetiu-se o procedimento com as saídas das serpentinas, como mostra a foto da Figura 3.8.

Figura 3.8 – Entrada das serpentinas com sensor de temperatura no interior

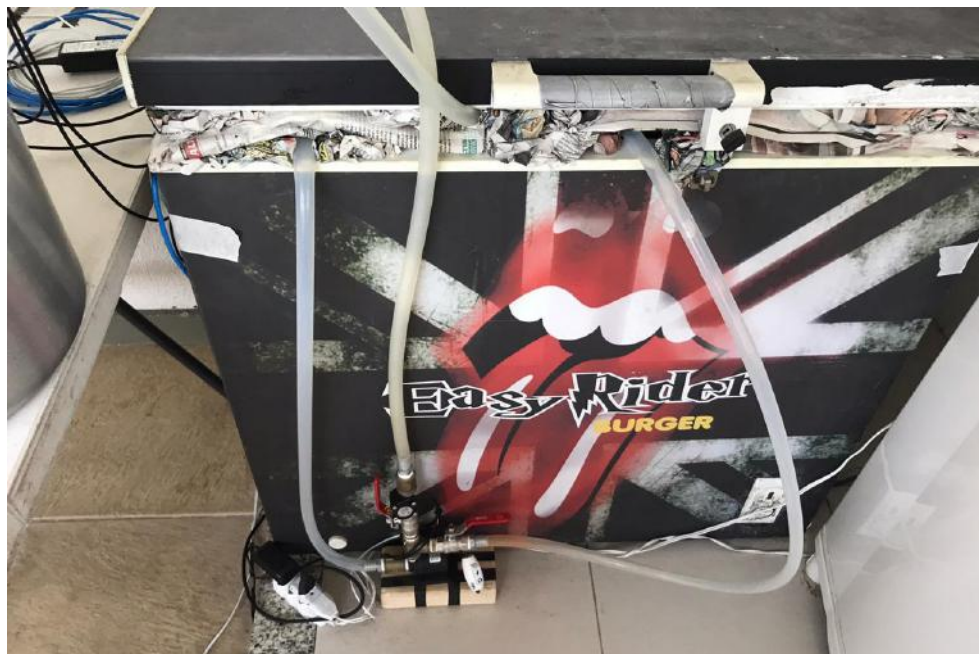


A mangueira de saída da serpentina foi inserida no Tanque Frio e a mangueira de entrada da serpentina foi conectada à saída principal do sistema hidráulico. A mangueira de 2,5 m de comprimento foi conectada à entrada da bomba, enquanto a de 1,5 m foi conectada no reciclo e ambas foram inseridas no Tanque Frio (ver Figura 3.9). Então, a tampa do *freezer* foi fechada e as brechas dessa tampa foram tapadas com jornal (ver Figura 3.10).

Figura 3.9 – Fermentador e freezer com tubulações



Figura 3.10 – Freezer e sistema hidráulico com tubulações



3.III. Construção do Sistema de Controle

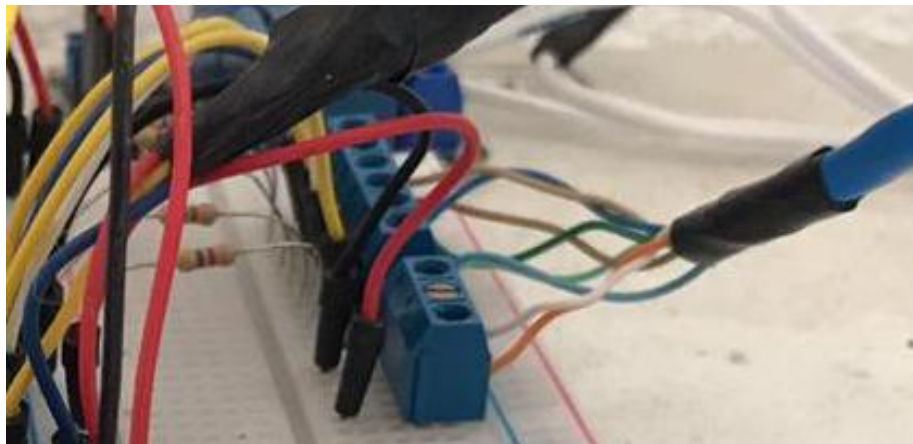
Define-se como Sistema de Controle o sistema formado por todos os sensores de temperatura, pelo sensor de vazão e pelo relé conectados à *protoboard* e esta, por sua vez, conectada ao computador de aquisição de dados.

Foram utilizados para a confecção do sistema de controle e monitoramento para o experimento: um Arduino MEGA como controlador; um cabo de dados de USB-A para USB-B; três conectores tipo *borne* de 3 vias; 16 *jumper*s tipo macho-macho; três *jumper*s tipo macho-fêmea; um módulo relé de duas portas; uma *protoboard* com 830 pinos; 6 resistores de $4,7\text{ k}\Omega$; um sensor de vazão para conexões de $\frac{1}{2}$ " de diâmetro; 6 sensores de temperatura modelo DS18B20 com $1,0\text{ m}$ de comprimento; um cabo de rede de 8 fios com $4,0\text{ m}$ de comprimento; um cabo de alarme de 4 fios com $4,0\text{ m}$ de comprimento; um computador Samsung modelo RV-415.

3.III.I. Montagem do sistema de controle

Os sensores de temperatura foram ligados no cabo de rede com o auxílio de fita isolante, e esse foi conectado aos 3 conectores *borne* (ver Figura 3.11).

Figura 3.11 – Conexão dos sensores de temperatura ao conector *borne*

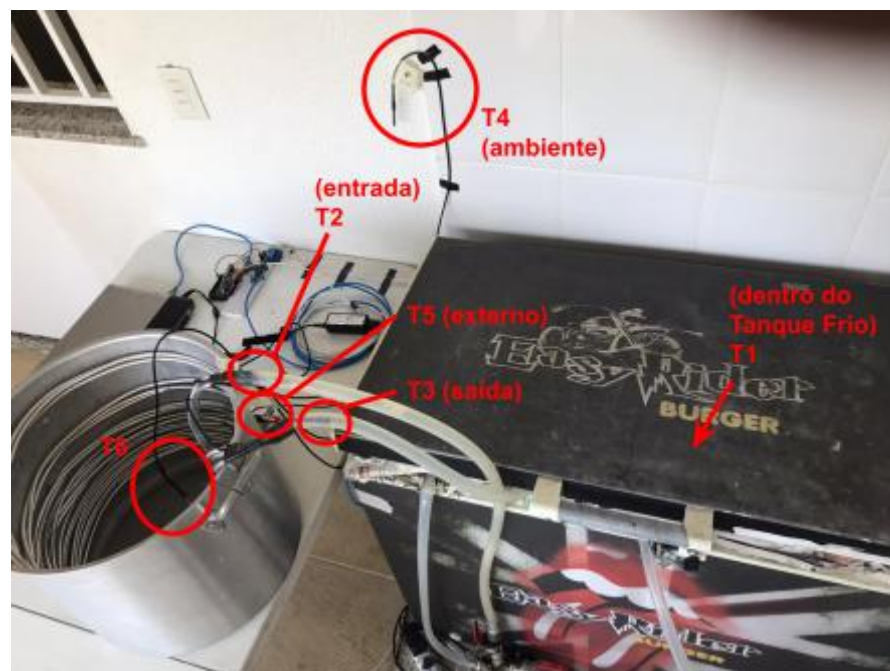


O sensor de vazão também teve seu cabo estendido, dessa vez utilizando o cabo de alarme e 6 *jumpers*, três em cada extremidade desse cabo. Os sensores de temperatura foram devidamente posicionados (ver Figura 3.13) e o de vazão foi montado na posição adjunto à saída principal da bomba (ver Figura 3.12).

Figura 3.12 – Posicionamento do sensor de vazão

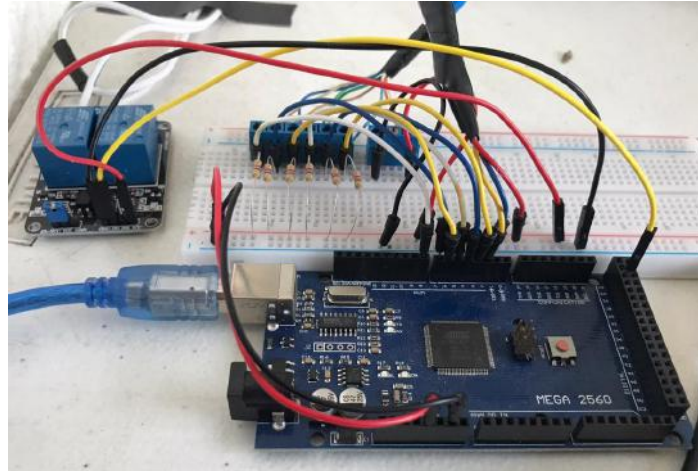


Figura 3.13 – Posicionamento dos sensores de temperatura



A Figura 3.14 apresenta as conexões elétricas no conjunto *Arduino/protoboard*, conforme o diagrama elétrico desenvolvido anteriormente. Por fim, por meio do cabo USB, o Arduino MEGA foi conectado ao computador, com o objetivo de obter os dados gerados pelos sensores e interpretá-los fisicamente.

Figura 3.14 – Montagem do sistema de monitoramento e controle



Uma visão superior do Sistema de Controle com o Sistema de Fermentação com Refrigeração é apresentada na Figura 3.15.

Figura 3.15 – Sistemas de Fermentação e Controle montados e conectados



3.III.II. Programação do controlador

O código desenvolvido para o controlador (Arduino MEGA) foi escrito em C++, baseado em bibliotecas abertas de códigos de comunicação entre o controlador e os sensores e atuadores, visando atender às necessidades do projeto.

Para o monitoramento dos sensores de temperatura, utilizou-se a biblioteca DS18B20, em sua íntegra. Como resultado da introdução desse código na programação, os sinais emitidos pelos sensores são convertidos na respectiva temperatura, em °C, com precisão de 0,06 °C.

Para o sensor de vazão, utilizou-se como base a programação contida em HAREENDRAN (s.d.), que utiliza-se da frequência do sinal emitido, acumulada ao longo do tempo, e retorna o valor de vazão correspondente a tal período de tempo, em L/h. Para esse código, a modificação realizada foi o aumento do intervalo de acúmulo de dados de frequência de 1.000 ms para 8.000 ms, de modo a aumentar a precisão mínima da medida para 0,83 L/h. Ao mesmo tempo, a mudança do intervalo entre cada rodada de aquisição de dados aumenta as chances de que todas as medições sejam registradas.

Para realizar a comunicação entre o Arduino e o computador, utilizou-se um programa em VBA denominado PLX-DAQ-v2.11 (HAFFNER, s.d.), capaz de receber as informações do Arduino e dispor em colunas em uma planilha no Excel. Para aprimoramento da aquisição de dados, a planilha foi adaptada para gerar o gráfico de coleta de dados em tempo real, permitindo ter uma melhor visualização dos resultados.

Para o controle de acionamentos e desligamentos do sistema hidráulico, utilizou-se o código disponível em THOMSEN (2013), com alterações para o controle de temperatura, utilizando como variável manipulada o acionamento da bomba de circulação do líquido de refrigeração e como variável controlada a temperatura do interior do fermentador (T6). O controle é do tipo on-off: quando o valor da temperatura interna está abaixo de 0,5 °C do setpoint, a bomba é acionada; quando o valor da temperatura está acima de 0,5 °C do setpoint, a bomba é desligada.

Por fim, adicionou-se uma condição de intertravamento de segurança no sistema de controle, de forma que, quando a diferença entre a temperatura do setpoint do fermentador e a temperatura do interior do Tanque Frio fosse inferior a 5 °C, a bomba não seria ativada, independente de qualquer outra condição.

3.III.III. Calibração do sensor de vazão

O sensor de vazão utilizado em todos os experimentos foi um Sensor Hall Modelo YF-S201, com capacidade máxima de 30 L · min⁻¹ e equação característica fornecida pelo fabricante de:

$$F = \frac{\omega}{7,5} \quad \text{Equação I}$$

Sendo ω a frequência do sinal de onda quadrada emitido pelo sensor em Hz e F a vazão calculada em L · min⁻¹.

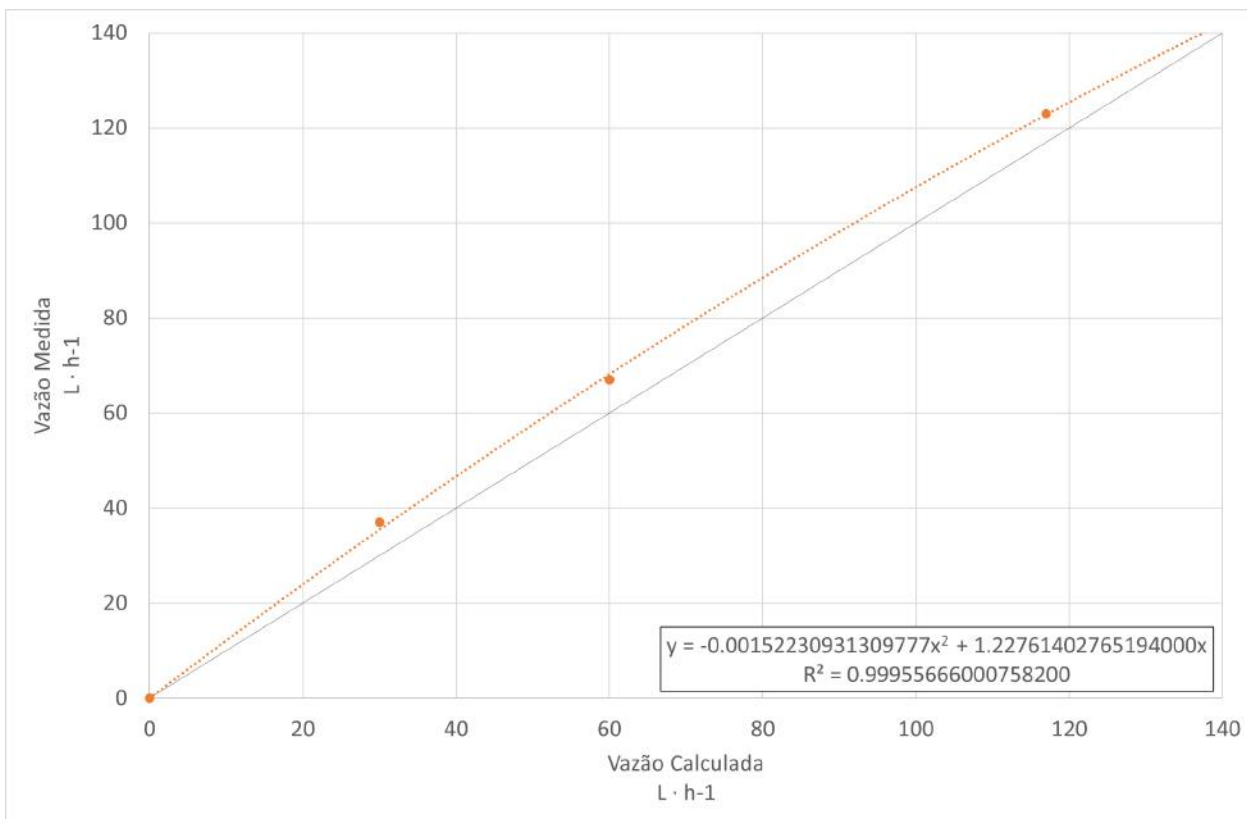
Para validação da equação, foi realizado um procedimento de calibração, no qual, para uma série de valores de abertura da válvula de reciclo, a vazão foi medida manualmente através de uma proveta e um temporizador. Os resultados dos testes experimentais são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Calibração do sensor de vazão

Experimento	Abertura do Sistema de Reciclo	Vazão Calculada $F_h [=] L \cdot h^{-1}$	Vazão Medida $F_r [=] L \cdot h^{-1}$
I	100 %	0	0
II	75 %	30	37
III	50 %	60	67
IV	0 %	117	123

Um gráfico de vazão medida por vazão calculada foi obtido com os pontos da Tabela 3.2 e realizou-se um ajuste polinomial de segundo grau com interseção no ponto (0; 0) para definir a equação final de cálculo da vazão (ver Figura 3.16).

Figura 3.16 – Comparação entre a vazão equivalente e a vazão real



Dessa forma, a equação final utilizada para obtenção da vazão equivalente definitiva (F_D) é:

$$F_D = 1,22761402765194 \cdot F_h - 0,00152230931309777 \cdot F_h^2 \quad \text{Equação II}$$

3.III.IV. Verificação dos sensores de temperatura

O sensor de temperatura utilizado foi uma Sonda DS18B20 de 1,0 m, com faixa de trabalho entre $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, cujo código operacional encontra-se bem descrito na biblioteca DS18B20 (*DFRobot*).

Para validação da programação, foi realizado um procedimento de verificação, no qual o sensor foi colocado em água com gelo e água fervente, com os resultados sendo apresentados na Tabela 3.3:

Tabela 3.3 – Verificação do sensor de temperatura

Sistema	Temperatura
Água + Gelo	0,75 °C
Água Fervendo	99,00 °C

O que demonstra que as medições encontram-se dentro da faixa considerada aceitável para a realização do experimento e não necessita de ajustes finos.

O código final, incluindo todos os parâmetros necessários para a implementação dos sensores, encontra-se no Apêndice.

3.IV. Condições de Realização dos Experimentos e da Coleta de Dados

No início dos testes experimentais, 50 L de água são adicionados ao Tanque Frio para serem utilizados como líquido de refrigeração. A água foi escolhida devido às suas propriedades bem conhecidas e por seu baixo custo. Em seguida, o tubo de saída do fermentador e o tubo de entrada na bomba de água são submergidos no líquido de refrigeração. O *freezer* é então fechado e isolado termicamente, ligado e colocado no modo desejado antes do início de cada experimento

(modo geladeira ou modo *freezer*), completando o Sistema de Refrigeração. O experimento é iniciado quando a temperatura do interior do Tanque Frio estabiliza-se no patamar desejado.

Para o início do experimento, o *setpoint* de controle da temperatura do fermentador é definido na programação do controlador (20 °C, 15 °C, 10 °C ou 5 °C) e a vazão de circulação do líquido de refrigeração é ajustada manualmente para a vazão a ser utilizada no experimento (vazão máxima, 50 % da vazão máxima ou 25 % da vazão máxima). Por fim, o fermentador é preenchido com água, o sistema de controle é acionado no modo manual e, constatado o correto funcionamento de todos os equipamentos, o sistema de controle é alterado para o modo automático para o início do experimento.

Durante a realização de experimentos, os dados dos sensores da Tabela 3.1 foram registrados pelo *script* em VBA PLX-DAQ-v2.11 (HAFFNER, s.d.), além da configuração de acionamento da bomba, dia de aquisição do dado e horário de aquisição do dado.

3.V. Tratamento de Dados

Os dados, conforme coletados, necessitam de tratamentos para serem analisados. As principais etapas de tratamento desenvolvidas para a detecção de *outliers* são: variáveis de medida fora da faixa do instrumento; dados fisicamente inconsistentes; variáveis de medida acima ou abaixo de uma tolerância. Estes dados foram excluídos da análise, garantindo a confiabilidade dos resultados. A Tabela 3.4 apresenta as regras utilizadas na primeira etapa, em função dos sensores utilizados e da característica da planta.

Tabela 3.4 – Faixa de operação dos sensores

Instrumento	Faixa de Trabalho
YF-S201	$0 < F[L \cdot h^{-1}] < 1800$
DS18B20	$- 55 < T[°C] < 155$

Na segunda etapa, para todos os registros de vazão, identificou-se os não-nulos ($F \neq 0$). Avaliou-se o estado de acionamento da bomba (ON/OFF) para o intervalo de dois registros anteriores, o próprio registro e dois registros posteriores. Caso esse intervalo fosse composto de registros OFF, o ponto analisado para a vazão de circulação seria excluído da análise.

Na terceira etapa de eliminação de *outliers*, para todos os registros de vazão não-nulos no experimento, calculou-se a média dos valores. Identificou-se os registros com valores superiores a 10 % em relação a essa média como *outliers*.

Com o objetivo de retirar os primeiros dados, nos quais o sistema de controle encontra-se inativo (bomba de circulação em modo manual), todos os registros nulos ($F = 0$) iniciais de vazão de circulação ocorrendo durante a configuração ON de acionamento da bomba foram excluídos da análise.

Na Figura 3.17, é possível observar alguns exemplos de *outliers* de vazão, como os pequenos picos na vazão de circulação do líquido de refrigeração, e um exemplo de *outlier* de temperatura, com um grande ruído na temperatura de saída do fermentador por volta do horário de 06:00. Após a realização do Tratamento de Dados, há um resultado com muito menos ruído e mais próximo das condições reais do experimento, como observado na Figura 3.18.

Figura 3.17 – Outliers detectados no Tratamento de Dados

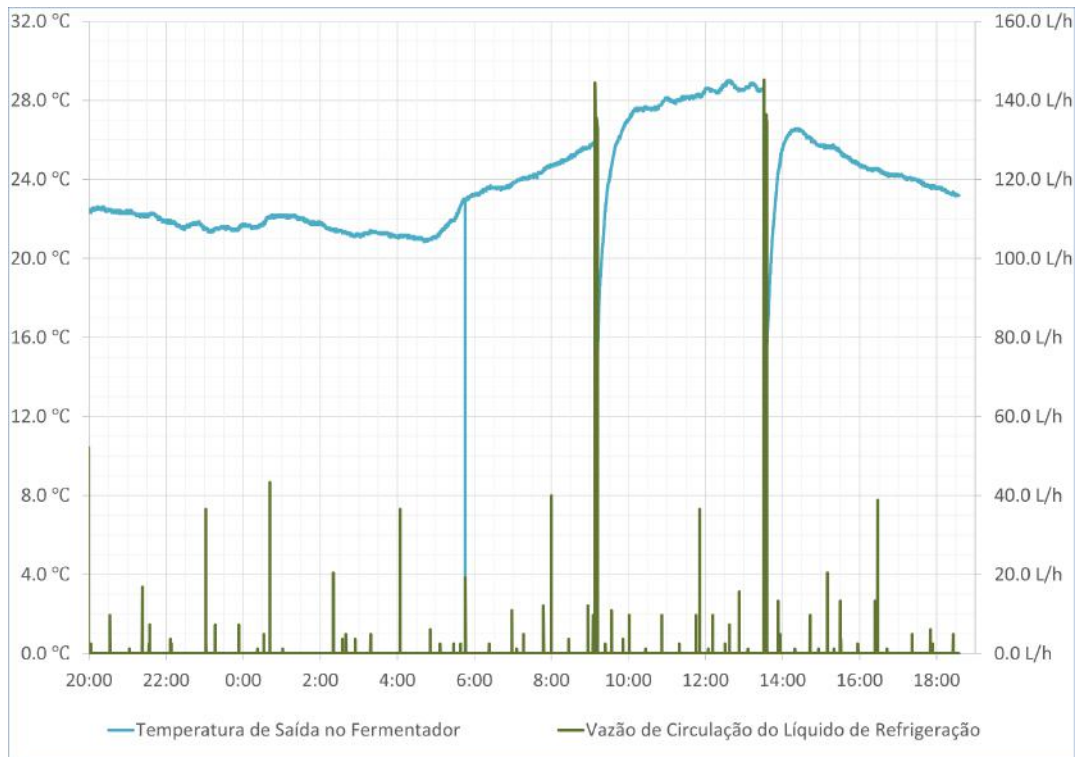
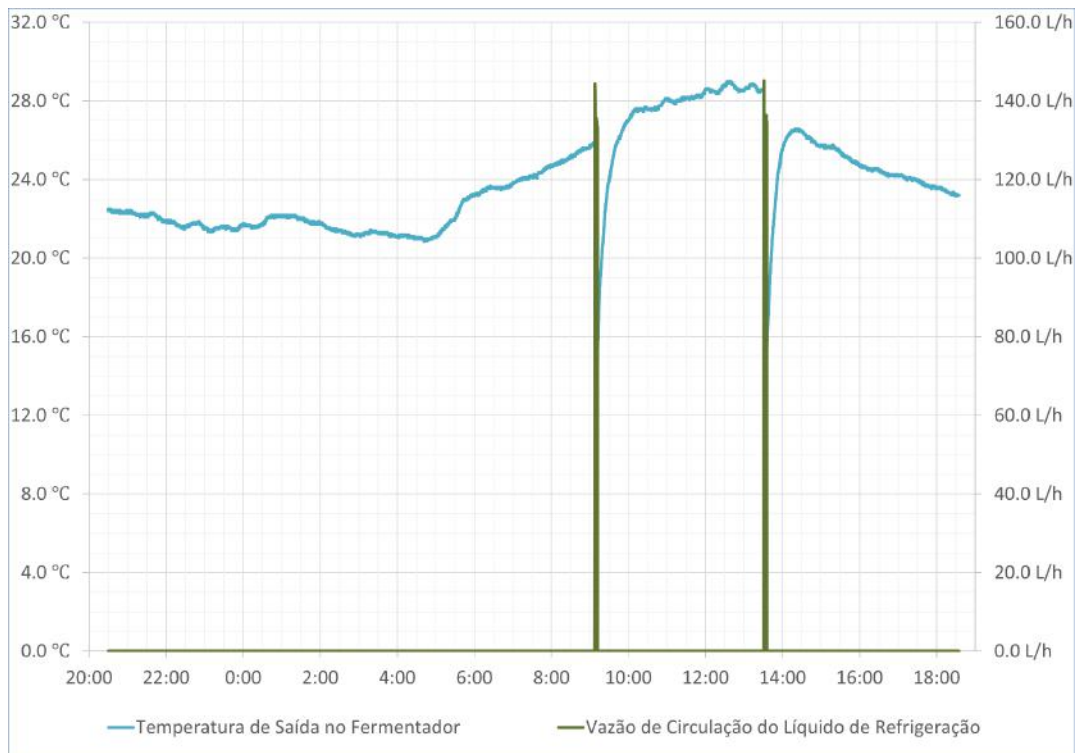


Figura 3.18 – Resultado gráfico do Tratamento de Dados



3.VI. Indicador de Viabilidade

Devido ao caráter qualitativo do estudo, desenvolveu-se indicadores de viabilidade para o sistema proposto.

Após o tratamento de dados, é realizada a análise de viabilidade do sistema nas diferentes condições operacionais, com o objetivo de avaliar a capacidade de funcionamento do sistema proposto. Os resultados dos experimentos são expressos por indicadores de viabilidade, desenvolvidos pelos autores.

Os indicadores são: Viável, quando se identifica que no experimento o sistema consegue manter a temperatura escolhida para a operação do Fermentador e o Tanque Frio consegue atingir a temperatura inicial antes de cada ativação da bomba, ou seja, o Tanque Frio consegue se regenerar; Condicionalmente Viável, o sistema mantém a temperatura escolhida para o Fermentador, mas a regeneração do Tanque frio é dependente da temperatura ambiente; e Inviável, o sistema não consegue manter o fermentador na temperatura desejada e/ou o Tanque frio não apresenta uma regeneração aparente em nenhum intervalo entre as ativações da bomba.

Ser Condicionalmente Viável implica em não poder afirmar se o sistema de controle será capaz de manter a temperatura escolhida durante o tempo necessário para fermentação de cerveja.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Ao todo, foram realizados 11 testes experimentais, sendo 5 para análise inicial do comportamento do sistema sem a ativação do sistema hidráulico e 6 para análise completa do sistema com reciclo do fluido de refrigeração.

A Tabela 4.1 apresenta um resumo dos testes realizados e das condições utilizadas em cada.

Tabela 4.1 – Relação dos testes realizados e principais variáveis de processo

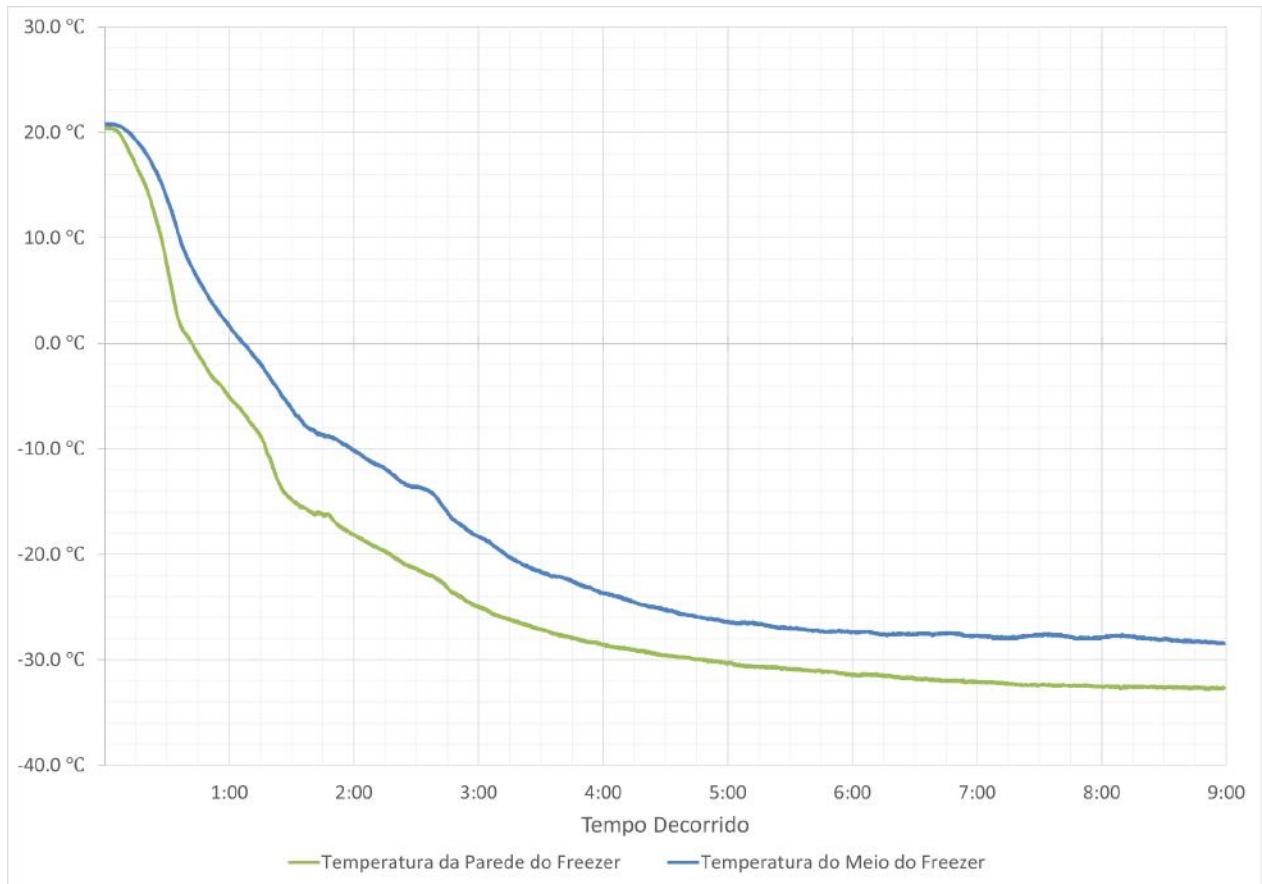
Análise	Variáveis Resposta	Variáveis Perturbação
1	temperaturas do interior do <i>freezer</i>	acionamento do compressor do <i>freezer</i>
2.a	temperaturas do interior do fermentador e do Tanque Frio	temperatura ambiente
2.b	temperaturas de entrada e saída e a temperatura na região próxima ao fermentador	temperatura ambiente
3	temperaturas de entrada, saída e interior do fermentador e temperatura do Tanque Frio	acionamento da bomba hidráulica
4.a 4.b 4.c 4.d 4.e 4.f	temperatura do interior do fermentador e do Tanque Frio	temperatura ambiente e acionamento da bomba

4.I. Teste Experimental 1 – Avaliação do Comportamento do Equipamento de Refrigeração

Este teste inicial foi realizado para analisar o funcionamento do equipamento de refrigeração, sem o Tanque Frio em seu interior. Neste caso, realizou-se a medição das temperaturas no interior do equipamento durante sua operação, utilizando um termômetro suspenso (similar ao termômetro de medição da temperatura no interior do fermentador) e um fixado junto à parede do

equipamento. Iniciou-se o monitoramento e aquisição dos dados das temperaturas após o equipamento ser ligado em Modo Freezer (modo de potência máxima), aguardando até as temperaturas internas atingirem um estado estacionário. O resultado do teste experimental 1 encontra-se na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Comportamento das temperaturas do interior do *freezer*



Pode-se observar que o sistema entra em estabilidade após cerca de 9 horas, com uma diferença entre as temperaturas do interior do *freezer* e da parede do equipamento, o que pode ser explicado pela distribuição térmica presente, formando um gradiente de temperatura entre o centro do equipamento e suas paredes (local no qual estão as serpentinas que contém o gás de refrigeração do *freezer*, responsável por absorver o calor do interior e resfriar o equipamento).

Também é possível observar que ambas as temperaturas assemelham-se a uma resposta de um sistema de primeira ordem a uma perturbação do tipo degrau (ativação do *freezer*). A partir

dos dados da Temperatura do Meio do *Freezer*, passados para variável desvio, aplicou-se o método de identificação experimental para uma resposta de primeira ordem com tempo morto, obtendo-se a função de transferência característica. A Equação I representada a função de transferência obtida:

$$\frac{\hat{T}(s)}{\hat{A}(s)} = \frac{\kappa}{\tau \cdot s + 1} \cdot e^{-\theta \cdot s} \quad \text{Equação III}$$

Com $\hat{T}(s)$ sendo a temperatura do interior do *freezer* em variável desvio, $\hat{A}(s)$ sendo a variável perturbação, um degrau de amplitude A correspondente à potência nominal do equipamento de refrigeração (115 W), κ sendo o ganho estático, τ sendo a constante de tempo e θ o tempo morto do processo.

Por questões de praticidade, a variável perturbação (acionamento do *freezer*) foi definida como 0 quando o equipamento está desligado e 1 quando está ligado.

Pelo método de identificação gráfica foi ajustada uma resposta de um sistema de primeira ordem com tempo morto sendo a temperatura a variável resposta e o acionamento do *freezer* a perturbação. Os parâmetros obtidos com o ajuste foram: $A \cdot \kappa = -50 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$; $\tau = 1,75 \text{ h}$; e $\theta = \frac{1}{6} \text{ h}$.

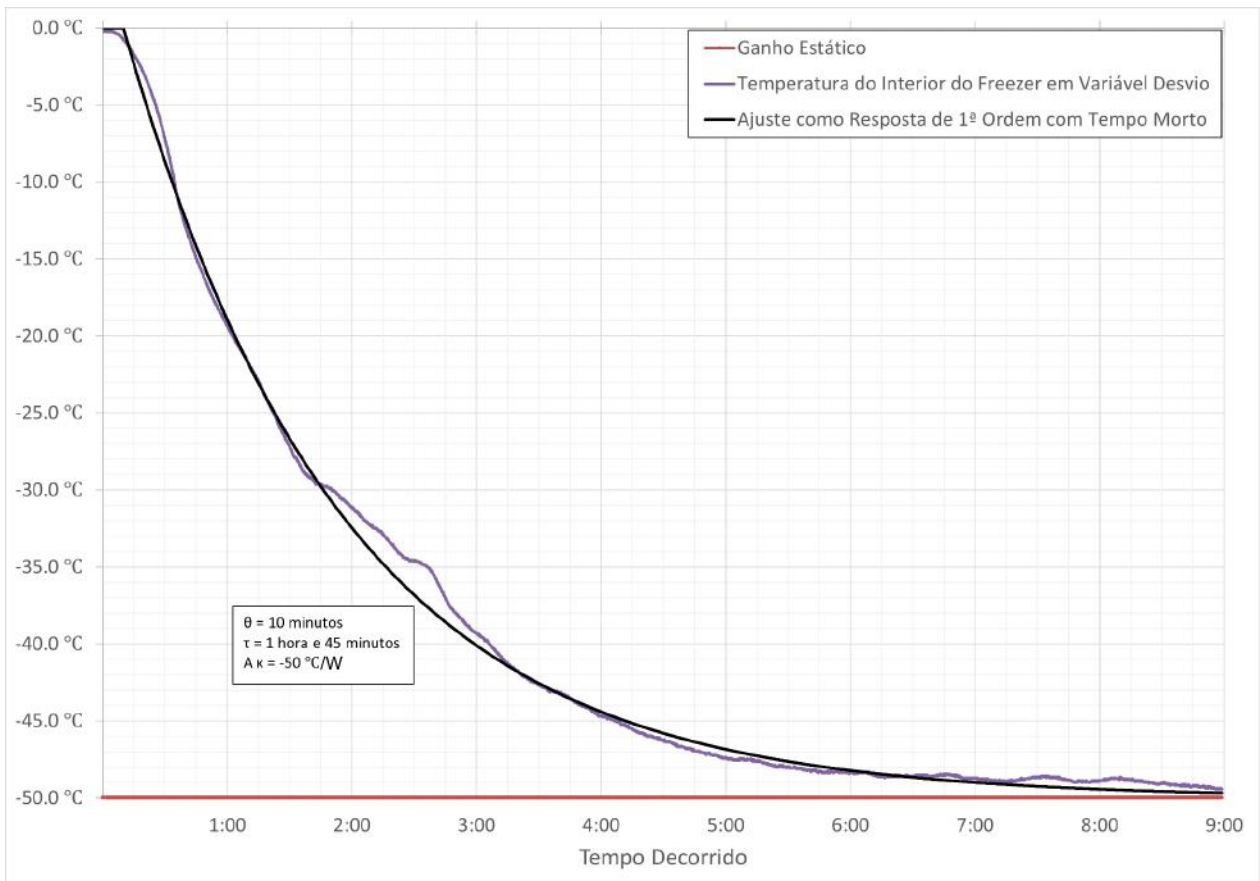
O ajuste retorna a equação da resposta ao longo do tempo da forma:

$$\begin{cases} T(t) = 0 & , 0 \leq t < \frac{1}{6} \text{ h} \\ T(t) = -50 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t-\frac{1}{6}}{1,75}} \right) + 20,75 & , \frac{1}{6} \text{ h} \leq t \end{cases}$$

Equação IV

A Figura 4.2 apresenta a comparação dos dados experimentais obtidos com o modelo ajustado para o comportamento do freezer, frente a uma perturbação degrau no acionamento do freezer.

Figura 4.2 – Ajuste da resposta da temperatura do interior do freezer



O modelo está visualmente bem ajustado apresentando um tempo para um novo estado estacionário de $5 \cdot \tau = 8,75 h$, o que está de acordo com a estimativa inicial de 9 horas.

Para todos os demais experimentos (Testes Experimentais 2, 3 e 4), seguiu-se o procedimento descrito no Capítulo 3, utilizando água como conteúdo do Fermentador e Tanque Frio por possuir propriedades físico-químicas conhecidas.

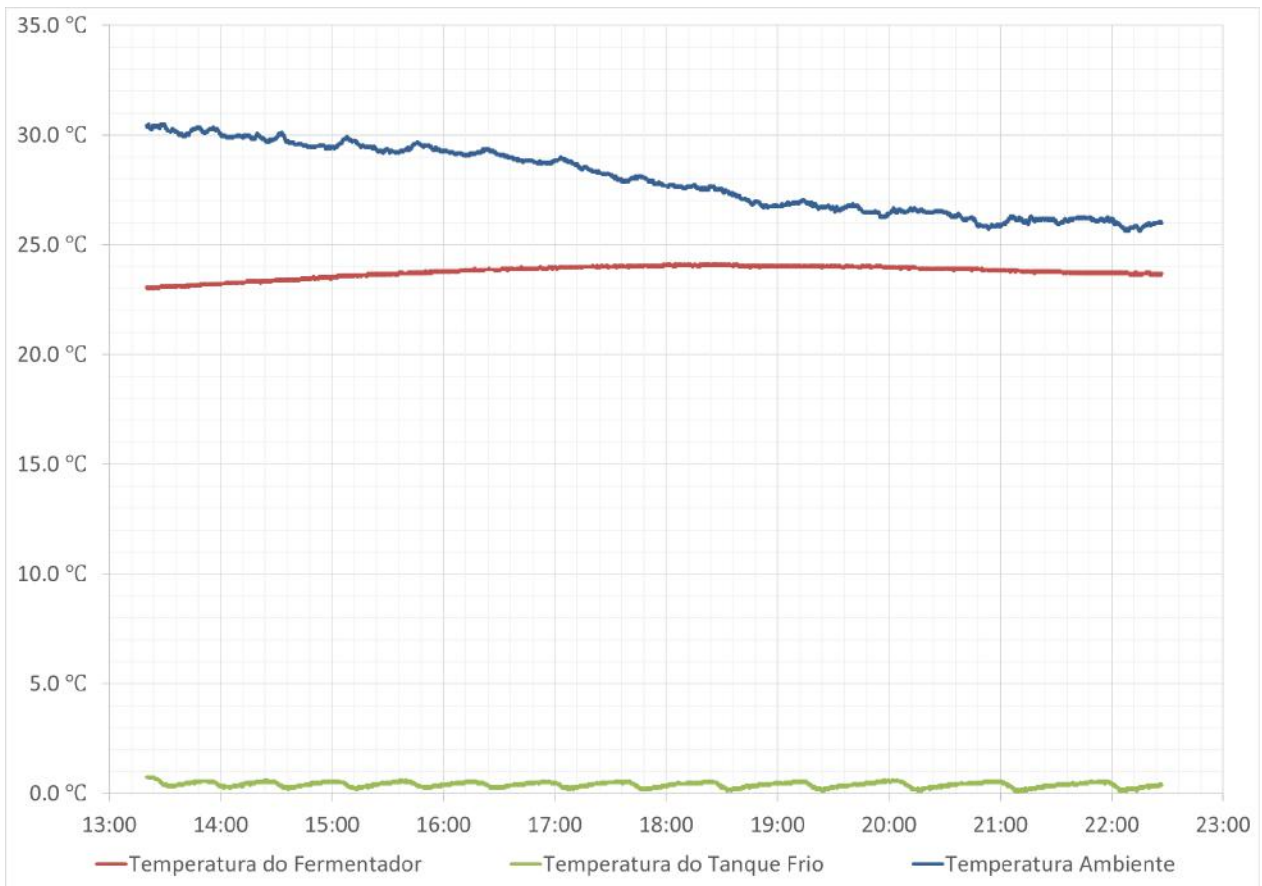
4.II. Teste Experimental 2 – Respostas à Temperatura Ambiente

O seguinte experimento foi preparado com o objetivo de avaliar o comportamento das temperaturas do sistema em relação à temperatura ambiente: o *freezer* foi configurado para modo “geladeira” e o sistema de controle manteve-se desligado, ou seja, não ocorreu acionamento da bomba. Após o Tanque Frio atingir o estado estacionário, o sistema foi monitorado ao longo do tempo.

4.II.I. Análise a – das temperaturas dos interiores do fermentador e do Tanque Frio

A temperatura do Tanque Frio estabiliza-se próximo a 0 °C, com pequenas oscilações, que representam o acionamento do compressor do *freezer* dentro do qual o Tanque Frio está inserido, conforme apresentado na Figura 4.3. Pode-se notar que essas oscilações têm uma frequência maior quanto maior a temperatura ambiente (próximo dos 30°C) e menor quanto menor a temperatura ambiente (próximo dos 25°C), o que mostra uma relação entre a temperatura do Tanque Frio e a temperatura ambiente, ou seja, o *freezer* não é um equipamento completamente isolado.

Figura 4.3 – Temperaturas dos interiores do fermentador e do Tanque Frio em relação à ambiente



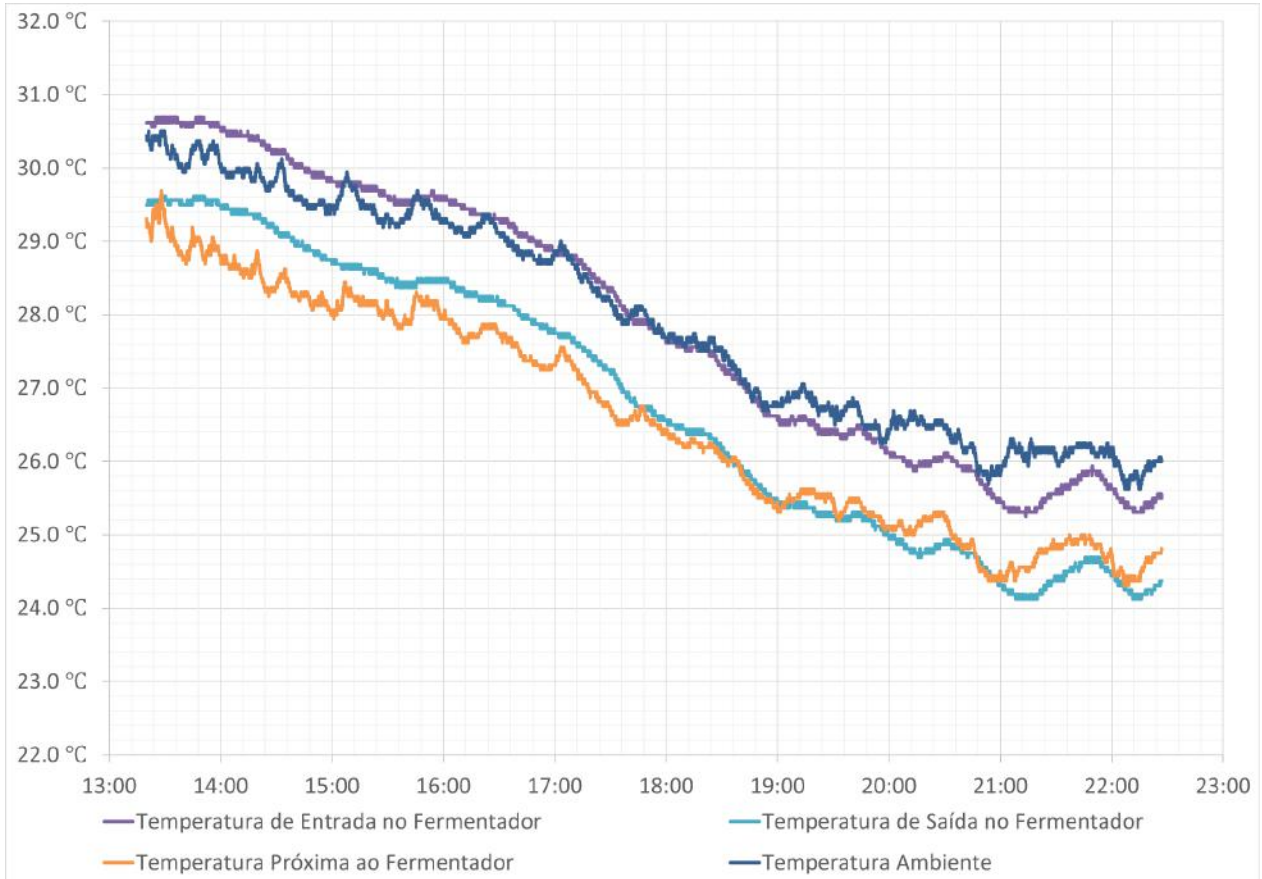
Observa-se ainda que a temperatura do fermentador também tem uma variação dependente da temperatura ambiente. Pode-se destacar que a temperatura do fermentador tem o crescimento desacelerado conforme vai se aproximando do valor da temperatura ambiente. Quando a temperatura se estabiliza, essa diferença permanece não-nula, o que pode ser explicado pela resistividade térmica dos meios.

4.II.II. Análise b – das temperaturas de Entrada, Saída e Próxima ao Fermentador

Na figura 4.4, as oscilações das temperaturas da entrada e da saída do fermentador (imersos no fluido refrigerante) são mais amortizadas frente às oscilações dos sensores posicionados no ambiente e próximo ao fermentador (em contato com o ar). Isso pode ser explicado pela diferença

entre capacidade térmica da água e do ar, sendo a da água maior, o que significa que é necessário mais calor para que a mesma aumente sua temperatura, o que diminui as oscilações.

Figura 4.4 – Temperaturas de entrada, saída e próxima ao fermentador em relação à ambiente



As temperaturas ambiente e próxima ao fermentador seguem comportamentos similares, embora esta última esteja deslocada um pouco para baixo no eixo de temperatura. Isso é devido à temperatura baixa (próximo a 25 °C) do fermentador em relação à temperatura ambiente. Dessa forma, existe um fluxo térmico do ar ao em torno do fermentador em direção ao centro dele, formando um sistema térmico com um gradiente de temperatura.

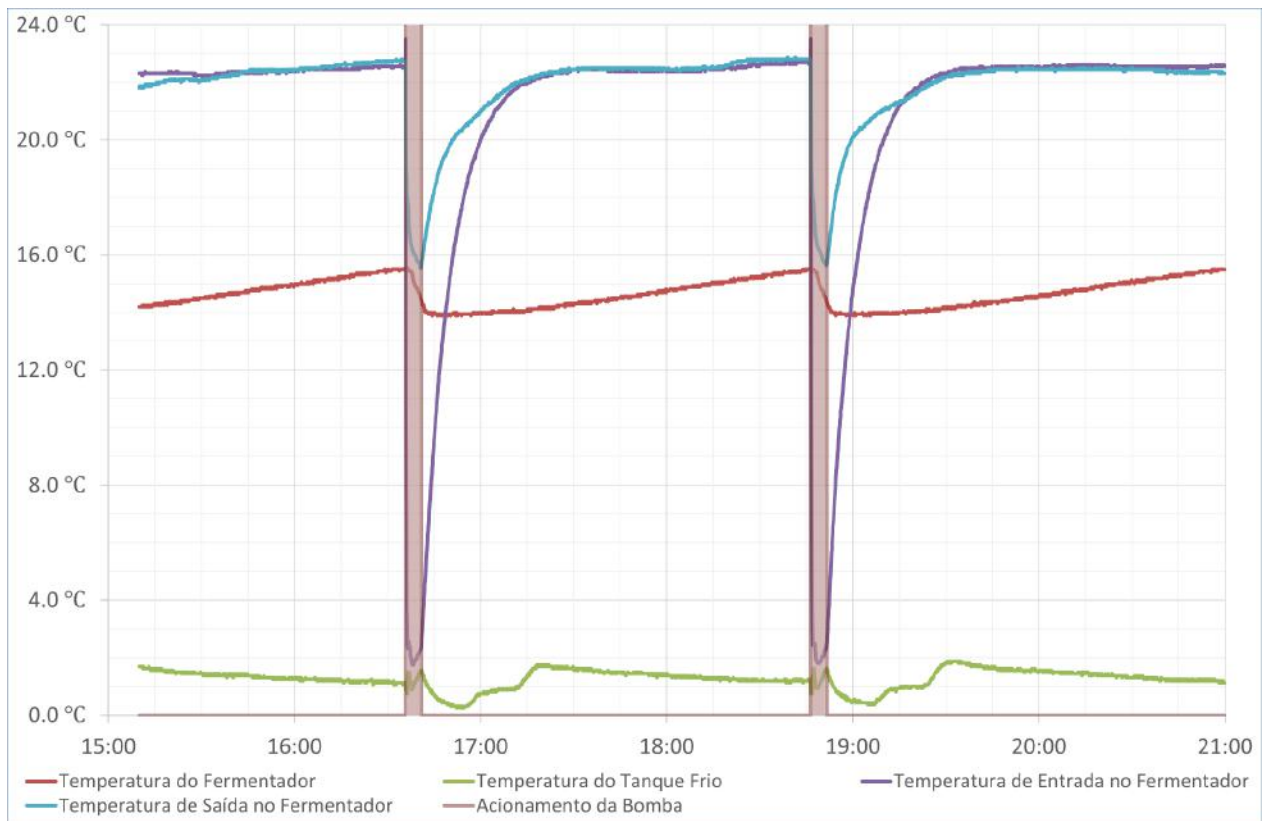
É possível identificar um *gap* entre a temperatura de entrada e a de saída do fermentador. Tal fato pode ser explicado devido ao comprimento das conexões com o Tanque Frio, já que a tubulação entre o sensor e o equipamento é menor quando se trata do sensor de saída. Outro ponto que pode influenciar essa diferença de temperatura é o posicionamento dos sensores na

tubulação. Caso um dos sensores esteja em contato com a parede do tubo, a influência da temperatura ambiente é mais relevante, com ambas as temperaturas de entrada e saída acompanhando a temperatura ambiente.

4.III. Teste Experimental 3 – Respostas ao Acionamento da Bomba Hidráulica

O seguinte experimento foi preparado com o objetivo de avaliar o comportamento das temperaturas do sistema em relação ao acionamento da bomba: o *freezer* manteve-se em modo “geladeira”, o sistema de controle foi ligado e a vazão foi definida para vazão máxima, ou seja, o reciclo manteve-se fechado durante o experimento. A figura 4.5 apresenta os resultados do Teste Experimental 3 para as Temperaturas de Entrada e Saída do Fermentador em relação ao acionamento da bomba.

Figura 4.5 – Respostas ao acionamento da bomba hidráulica



Enquanto a bomba permanece ligada, a temperatura de entrada fica próxima à do Tanque Frio. O que mostra que a troca térmica na tubulação é desprezível frente à vazão do fluido. Além disso, durante esses intervalos, a temperatura de saída da serpentina fica próxima à do fermentador. Dessa forma, podemos afirmar que a troca térmica é eficiente e que a serpentina está bem dimensionada.

Analisando o comportamento das temperaturas de entrada e saída do fermentador, nota-se que ambas apresentam respostas similares às de sistemas de primeira ordem, após o desligamento da bomba. Pode-se destacar que o tempo de resposta da temperatura de entrada é maior que o de saída, isso pode ser explicado analisando a diferença dessas temperaturas frente à temperatura ambiente. Quanto maior a diferença, menor é o tempo de resposta à perturbação.

4.IV. Teste Experimental 4 – Avaliação do Comportamento da Operação Completa da Planta

Ao todo, foram realizados 6 experimentos de funcionamento completo do sistema, nos quais foram feitas perturbações no *setpoint* da temperatura no interior do Fermentador, na temperatura inicial de operação no interior do Tanque Frio, no percentual da vazão de circulação do líquido de refrigeração e no modo de operação do *freezer*.

Para uma organização mais efetiva dos experimentos de funcionamento completo do sistema, optou-se pela codificação dos principais parâmetros envolvidos na definição dos testes experimentais, conforme apresentado na Tabela 4.2:

Tabela 4.2 – Codificação dos parâmetros dos experimentos

Parâmetro	Código	Exemplo	Interpretação
<i>set point</i> da temperatura no interior do Fermentador	SPF	SPF 20	<i>set point</i> em 20 °C
temperatura inicial de operação no interior do Tanque Frio	TTF	TTF 5	temperatura inicial de 5 °C
percentual da vazão de circulação do líquido de refrigeração em relação ao valor máximo	PVC	PVC 50	vazão de circulação equivalente a 50 % da vazão máxima
modo de Operação do Freezer	MOF	MOF G	modo geladeira
		MOF F	modo freezer

A Tabela 4.3 apresenta a lista de experimentos com operação completa realizados, bem como os valores dos parâmetros envolvidos:

Tabela 4.3 – Experimentos e parâmetros utilizados

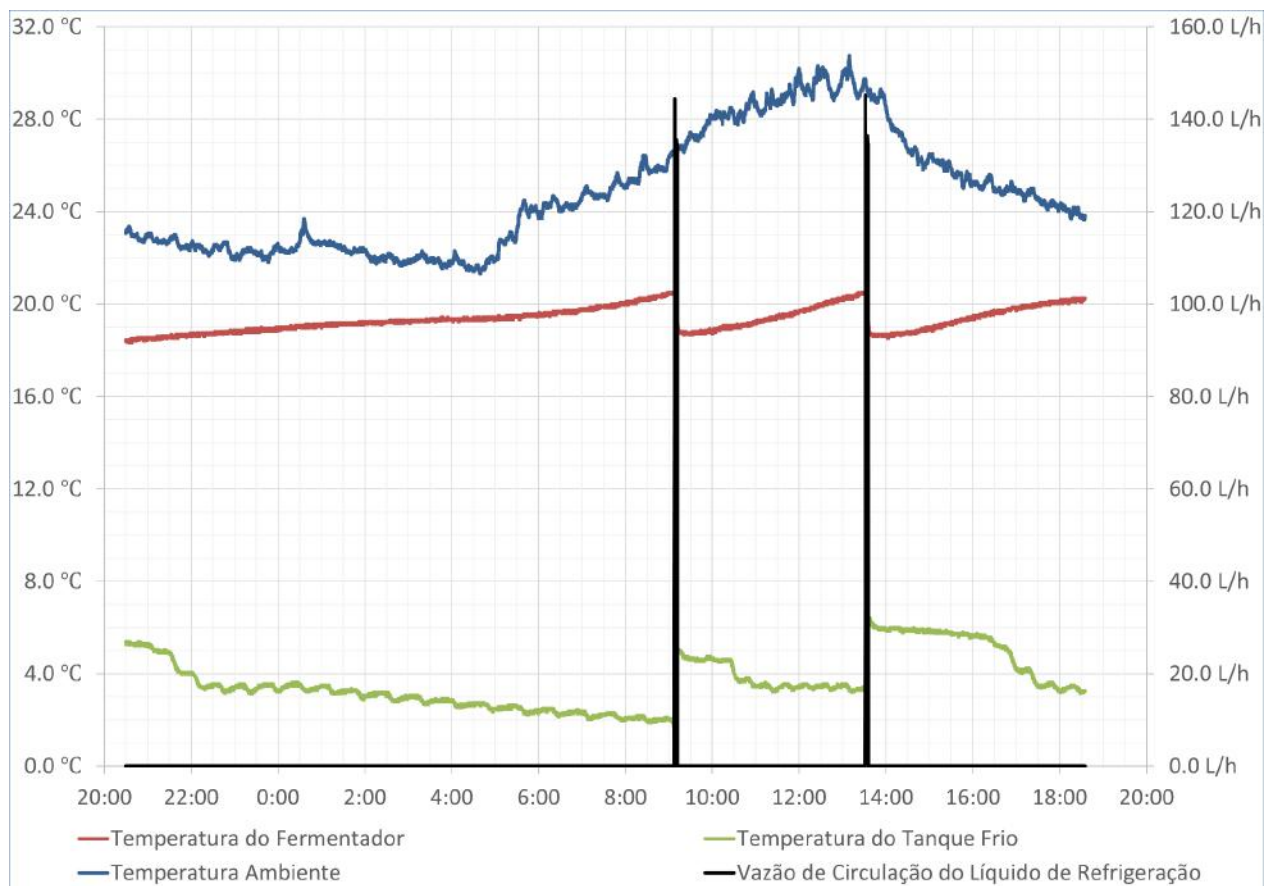
Experimento	SPF	TTF	PVC	MOF
a	20 °C	5 °C	100 %	geladeira
b	15 °C	10 °C	100 %	geladeira
c	10 °C	5 °C	100 %	geladeira
d	10 °C	0 °C	100 %	geladeira
e	15 °C	0 °C	50 %	<i>freezer</i>
f	15 °C	0 °C	25 %	<i>freezer</i>

4.IV.I. Operação completa a – SPF 20, TTF 5, PVC 100 e MOF G

O experimento foi realizado com as seguintes configurações: temperatura de controle do fermentador a 20 °C, temperatura inicial do Tanque Frio a 5 °C, freezer em modo “geladeira” e

vazão de circulação do líquido de refrigeração em 100 % da capacidade total. Os resultados estão apresentados na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Dados do experimento SPF 20°C, TTF 5°C, PVC 100% e MOF G



A viabilidade do sistema pode ser verificada analisando a temperatura do Fermentador e a temperatura do Tanque Frio. Como a primeira se manteve dentro da faixa de operação determinada para o experimento ($10 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$) e a segunda, ao longo do experimento, manteve-se próxima ou inferior à temperatura de início do experimento, pode-se dizer que o experimento é viável.

É importante frisar que, apesar de ser estabelecido um intervalo de controle de $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ na temperatura do fermentador, pode-se observar que, nos momentos após a ativação da bomba, são registradas temperaturas inferiores ao intervalo de controle. Isso é devido ao fato da dinâmica de

transferência de calor no fermentador ser mais lenta que a taxa de calor retirada pela serpentina e, ao mesmo tempo, mais rápida que a taxa de calor cedida pelo ambiente.

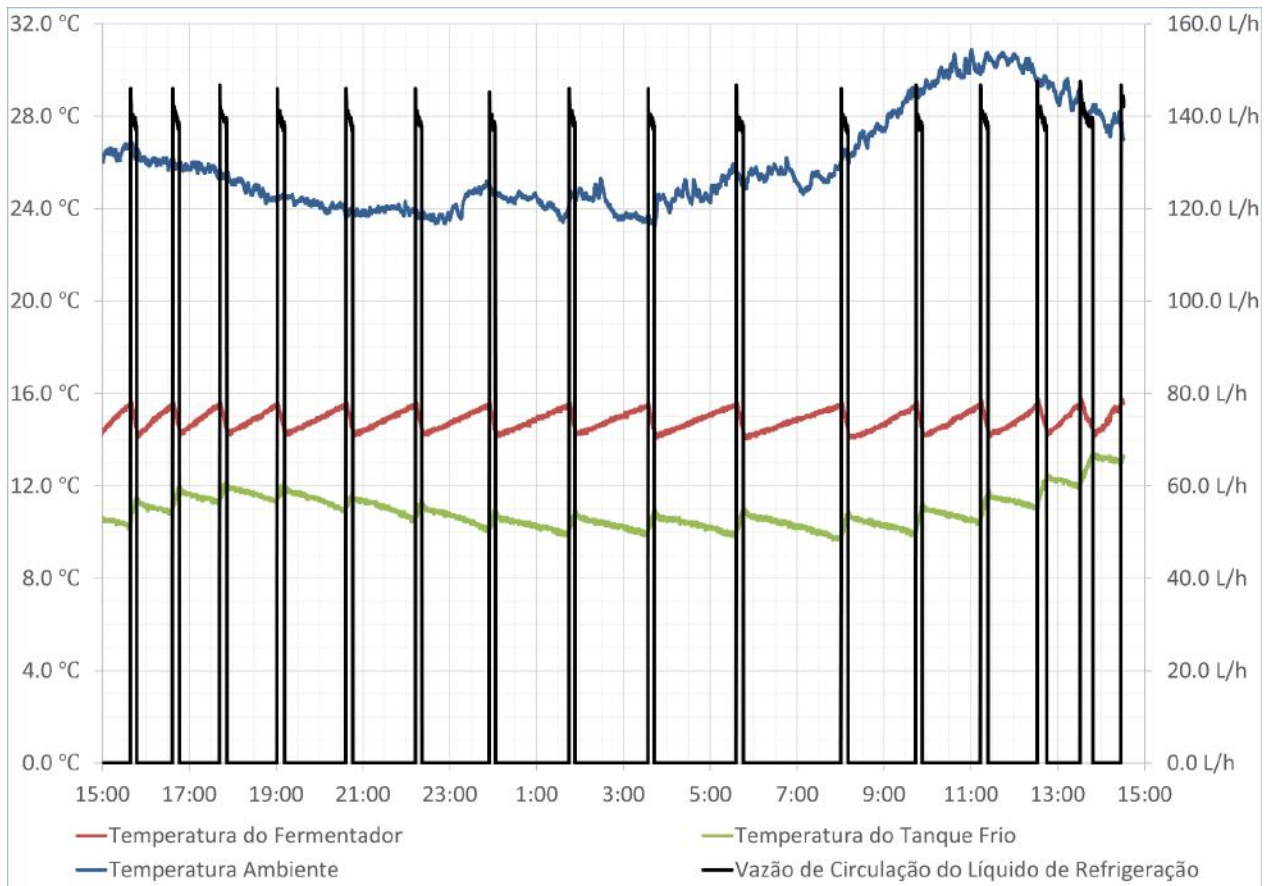
O tempo entre o início do experimento e a primeira ativação é maior que o tempo entre a primeira e segunda ativação. Isso pode ser explicado pela menor temperatura ambiente no primeiro intervalo quando comparado ao segundo. Logo existe uma relação entre a temperatura ambiente e o intervalo entre as ativações da bomba.

4.IV.II. Operação completa b – SPF 15, TTF 10, PVC 100 e MOF G

O experimento foi realizado com as seguintes configurações: temperatura de controle do fermentador a 15 °C, temperatura inicial do Tanque Frio a 10 °C, freezer em modo “geladeira” e vazão de circulação do líquido de refrigeração em 100 % da capacidade total. Os resultados estão apresentados na Figura 4.7.

Comparado ao experimento anterior, a temperatura definida para o fermentador teve uma redução de 5 °C e a temperatura inicial do Tanque Frio um aumento de 5 °C.

Figura 4.7 – Dados do experimento SPF 15°C, TTF 10°C, PVC 100% e MOF G



O sistema é condicionalmente viável, já que consegue manter o Fermentador na temperatura desejada e demonstra uma regeneração do Tanque Frio quando a temperatura ambiente encontra-se próxima a 24 °C.

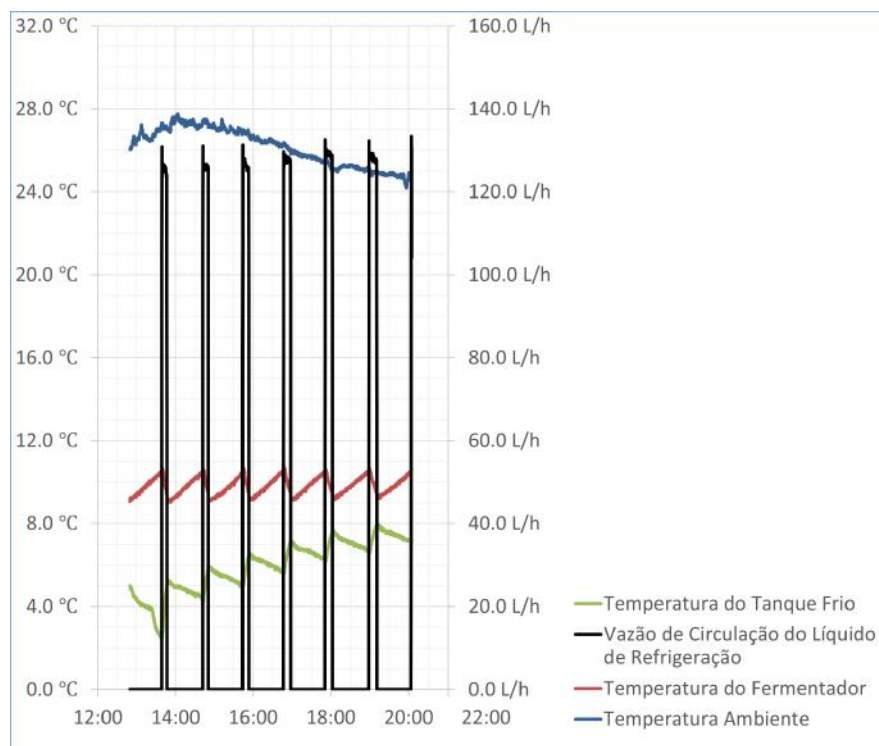
O intervalo entre essas ativações diminui quanto maior a temperatura ambiente. Além disso, é possível destacar que quanto menor o $(\Delta T)_{ferm. \rightarrow t. frio}$ mais tempo a bomba permanece ativa em cada ativação.

4.IV.III. Operação completa c – SPF 10, TTF 5, PVC 100 e MOF G

O experimento foi realizado com as seguintes configurações: temperatura de controle do fermentador a 10 °C, temperatura inicial do Tanque Frio a 5 °C, freezer em modo “geladeira” e vazão de circulação do líquido de refrigeração em 100 % da capacidade total. Os resultados estão apresentados na Figura 4.8.

Comparado ao experimento anterior, a temperatura definida para o fermentador teve uma redução de 5 °C e a temperatura inicial do Tanque Frio também uma redução de 5 °C.

Figura 4.8 – Dados do experimento SPF 10°C, TTF 5°C, PVC 100% e MOF G



A configuração desse experimento se mostrou inviável. Apesar de manter a temperatura desejada no Fermentador, o Tanque Frio não demonstrou regeneração em nenhum momento do experimento. Dessa forma, o sistema de controle não conseguiria manter o Fermentador na temperatura escolhida durante o período necessário de fermentação. Da mesma forma como o

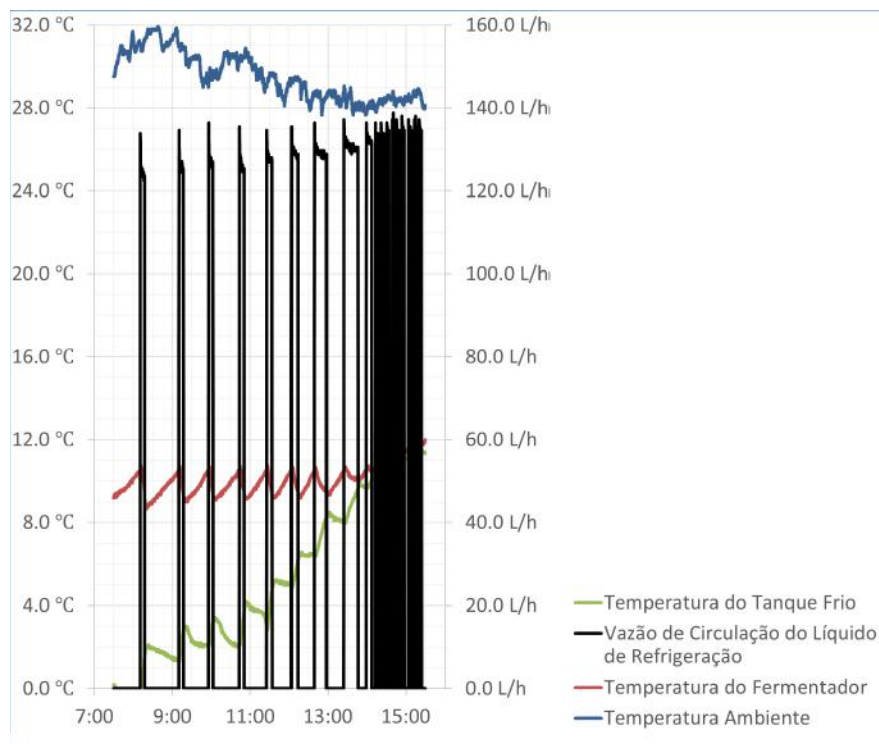
experimento anterior, pode-se observar que, quanto mais próxima as temperaturas do fermentador e do Tanque Frio, maior o tempo de ativação do sistema hidráulico.

4.IV.IV. Operação completa d – SPF 10, TTF 0, PVC 100 e MOF G

O experimento foi realizado com as seguintes configurações: temperatura de controle do fermentador a 10 °C, temperatura inicial do Tanque Frio a 0 °C, freezer em modo “geladeira” e vazão de circulação do líquido de refrigeração em 100 % da capacidade total. Os resultados estão apresentados no Figura 4.9.

Comparado ao experimento anterior, a temperatura inicial do Tanque Frio teve uma redução de 5 °C.

Figura 4.9 – Dados do experimento SPF 10°C, TTF 0°C, PVC 100% e MOF G



A configuração do sistema é inviável mesmo com $(\Delta T)_{ferm. \rightarrow t. frio}$ de 10 °C. Além disso, pode-se reafirmar a relação entre $(\Delta T)_{ferm. \rightarrow t. frio}$ e o tempo em que a bomba permanece ativa (quanto menor $(\Delta T)_{ferm. \rightarrow t. frio}$ mais tempo ela fica ligada a cada ativação).

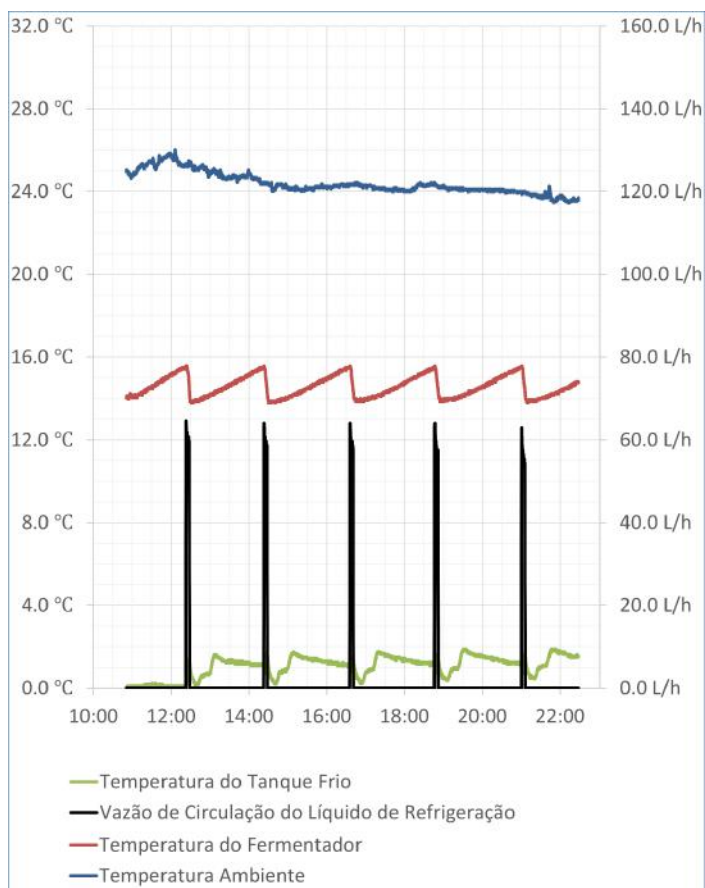
A programação responsável pela proteção do sistema mostrou-se ineficaz, pois, como foi utilizada a diferença entre um parâmetro e uma variável do sistema, em pouco tempo a condição de proteção pode ser revogada, ou seja, com a bomba desligada, o *freezer* rapidamente diminui a temperatura do Tanque Frio e, com isso, o delta torna-se superior a 5 °C. Como consequência, há ativações e desativações sucessivas do sistema hidráulico em um curto intervalo de tempo, o oposto do desejado.

4.IV.V. Operação completa e – SPF 15, TTF 0, PVC 50 e MOF F

O experimento foi realizado com as seguintes configurações: temperatura de controle do fermentador a 15 °C, temperatura inicial do Tanque Frio a 0 °C, freezer em modo “freezer” e vazão de circulação do líquido de refrigeração em 50 % da capacidade total. Os resultados estão apresentados no Figura 4.10.

Comparado ao experimento anterior, a temperatura definida para o fermentador teve um aumento de 5 °C, o equipamento de refrigeração mudou para modo freezer e a vazão foi reduzida para 50% da capacidade total.

Figura 4.10 – Dados do experimento SPF 15°C, TTF 0°C, PVC 50% e MOF F



Nessas configurações o sistema se apresentou viável. É possível observar um comportamento inesperado da temperatura do Tanque Frio após o desligamento do sistema hidráulico, no qual há uma queda repentina, seguido por um aumento rápido da temperatura em dois estágios e uma nova queda constante até o novo acionamento. Tal comportamento pode ser atribuído à homogeneização do Tanque Frio. Quando a vazão é baixa, o sistema torna-se mais termicamente heterogêneo e, com isso, a carga de água quente que chega durante a ativação da bomba é registrada lentamente pelo sensor de temperatura.

A pequena mudança de comportamento durante a subida pode ser explicada pela ativação e desativação do compressor do *freezer*, que, após certo tempo, permanece ligado até a próxima ativação. Tal efeito pode ser atribuído às diferentes cinéticas de transferência de calor, do gás de

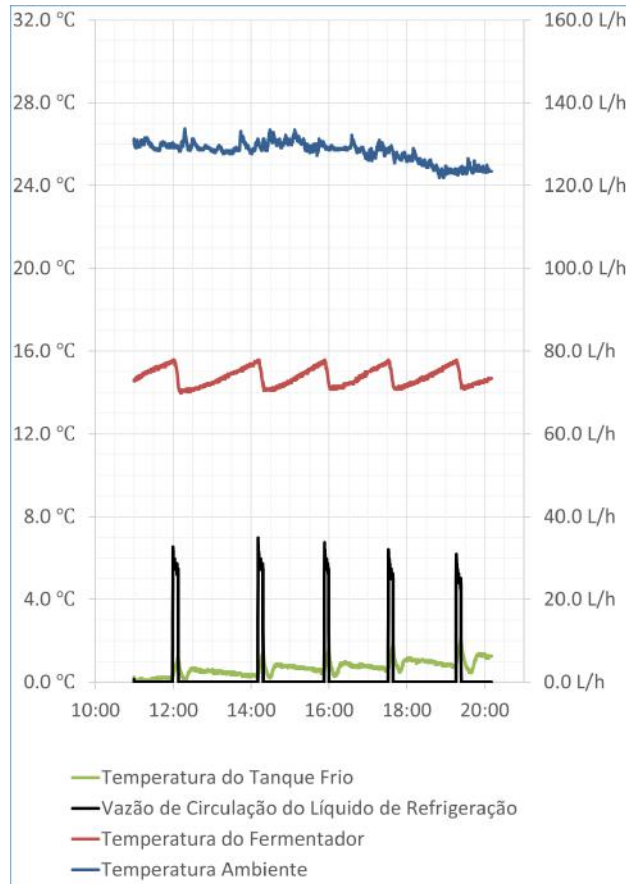
refrigeração para as paredes do *freezer*, das paredes do *freezer* para o seu interior, do interior do *freezer* para a superfície do Tanque Frio e da superfície do Tanque Frio para o seu interior.

4.IV.VI. Operação completa F – SPF 15, TTF 0, PVC 25 e MOF F

O experimento foi realizado com as seguintes configurações: temperatura de controle do fermentador a 15 °C, temperatura inicial do Tanque Frio a 0 °C, freezer em modo “freezer” e vazão de circulação do líquido de refrigeração em 25 % da capacidade total. Os resultados estão apresentados no Figura 4.11.

Comparado ao experimento anterior, a vazão foi reduzida para 25% da capacidade total.

Figura 4.11 – Dados do experimento SPF 15°C, TTF 0°C, PVC 25% e MOF F



O sistema com uma vazão de 25 % da vazão máxima apresentou-se viável. O mesmo comportamento anômalo referente à temperatura do Tanque Frio pôde ser observado, porém com uma menor intensidade.

4.V. Análise Comparativa dos Resultados

A Tabela 4.4 apresenta um resumo dos resultados do Teste Experimental 4:

Tabela 4.4 – Resumo dos resultados obtidos

Teste	Parâmetros	$\bar{T}_{ferm.} - \bar{T}_{t.frio.}$	Tempo médio de ativação do sistema hidráulico	$\bar{T}_{amb.} - \bar{T}_{ferm.}$	Intervalo médio entre acionamentos do sistema hidráulico	Viabilidade
4.a	SPF 20 TTF 5 PVC 100 MOF G	15,68 °C	4min 7s	5,43 °C	8h 28min	Viável
4.b	SPF 15 TTF 10 PVC 100 MOF G	3,96 °C	9min 50s	11,08 °C	1h 16min	Cond. Viável
4.c	SPF 10 TTF 5 PVC 100 MOF G	3,85 °C	10min 4s	16,34 °C	0h 53min	Inviável
4.d	SPF 10 TTF 0 PVC 100 MOF G	4,88 °C	6min 29s	19,43 °C	0h 16min	Inviável
4.e	SPF 15 TTF 0 PVC 50 MOF F	13,52 °C	5min 17s	9,81 °C	1h 57min	Viável
4.f	SPF 15 TTF 0 PVC 50 MOF F	14,07 °C	7min 38s	10,89 °C	1h 33min	Viável

Como método de análise, primeiramente optou-se por comparar os experimentos em pares.

No experimento II, o *setpoint* do fermentador é programado para uma temperatura 5 °C abaixo do I. Por conta disso, a bomba é acionada mais vezes pois o equipamento ganha mais calor do ambiente. Ademais, nota-se que o sistema hidráulico permanece ligado por mais tempo e isso pode ser explicado pela menor diferença de temperatura entre Tanque Frio e Fermentador. Por fim, o aumento de $\bar{T}_{amb.} - \bar{T}_{ferm.}$ torna o experimento condicionalmente viável, ou seja, a regeneração do Tanque Frio passa a depender da temperatura externa.

No experimento III, o *setpoint* do fermentador e a temperatura inicial do Tanque Frio foram reduzidos em 5 °C se comparado ao experimento II, mantendo a mesma diferença de temperaturas entre eles. Apesar do fato dessa diferença ser mantida, a redução do *setpoint* do fermentador inviabiliza o procedimento, pois há uma maior diferença de temperatura entre o fermentador e o ambiente e, por consequência, um maior ganho de calor, não sendo o Equipamento de Refrigeração suficiente para repor a perda.

Comparado agora com o experimento I, o III passa a ter um *setpoint* 10 °C abaixo. Como consequência, a operação torna-se inviável já que há tanto um aumento de $\bar{T}_{ferm.} - \bar{T}_{t.frio.}$ quanto uma diminuição de $\bar{T}_{amb.} - \bar{T}_{ferm.}$. Tal fato demonstra o papel fundamental da temperatura de fermentação para todo o funcionamento do sistema.

No experimento IV, a temperatura inicial do Tanque Frio foi reduzida em 5 °C, aumentando a diferença em relação à temperatura do fermentador. Mesmo com esse aumento, o sistema permanece inviável, já que também houve um aumento de $\bar{T}_{amb.} - \bar{T}_{ferm.}$. É válido ressaltar também que, mesmo com $\bar{T}_{ferm.} - \bar{T}_{t.frio.}$ inicial de 10 °C, a diferença média manteve-se abaixo dos 5 °C, pois não foi possível regenerar o Tanque Frio. Por fim, cabe ressaltar que o tempo entre ativações diminui drasticamente devido ao sistema de proteção entrar em colapso.

No experimento V, o *setpoint* do fermentador é programado para uma temperatura 5 °C superior à do experimento IV, a vazão é reduzida à metade e o equipamento de refrigeração passa a operar em modo *freezer*. Como consequência, a operação torna-se viável.

No experimento VI, a vazão de circulação do líquido de refrigeração foi reduzida para 25 % da vazão máxima, ou seja, metade da vazão do experimento V. Como consequência, a bomba permanece ligada por mais tempo entre cada ativação. Tal fato demonstra que a transferência de calor para o fermentador é muito rápida e, portanto, a vazão torna-se um fator limitante, já que passa a depender da capacidade térmica do fluido.

De modo similar, foi possível realizar a análise de cada parâmetro listado de operação de forma global, ou seja, similaridades envolvendo todos os experimentos.

Em relação a $\bar{T}_{ferm.} - \bar{T}_{t.frio.}$, pode-se observar que, quanto maior seu valor, menor o tempo de ativação do sistema hidráulico, pois a transferência de calor é diretamente proporcional à diferença entre as temperaturas.

Em relação a $\bar{T}_{amb.} - \bar{T}_{ferm.}$, pode-se observar que, quanto maior seu valor, menor o intervalo médio entre acionamentos da bomba, pois há uma maior transferência de calor do ambiente para o fermentador, necessitando de resfriamento mais recorrentemente.

Por fim, analisando a viabilidade de forma global, é possível observar que, para todos os valores de $\bar{T}_{amb.} - \bar{T}_{ferm.}$ próximos de 5 °C, os experimentos são viáveis, enquanto que, caso essa diferença passe a ser de 10 °C, a viabilidade passa a depender de $\bar{T}_{ferm.} - \bar{T}_{t.frio.}$ estarem próximos ou serem superiores a 10 °C. Concomitantemente, para $\bar{T}_{amb.} - \bar{T}_{ferm.}$ superiores a 15 °C, todos os experimentos mostram-se inviáveis.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.I. Conclusões

O projeto final experimental foi desenvolvido fora do espaço físico da universidade, cujo acesso estava impedido devido à crise pandêmica. Essa condição, apesar de atípica e desafiadora, não representou um impedimento para o desenvolvimento do estudo, que foi capaz de reproduzir a realidade dos produtores de cerveja artesanal de pequeno porte.

O sistema de monitoramento e controle desenvolvido custou aproximadamente 500 reais e não exigiu grandes alterações nos equipamentos originais.

A implementação de controle *on-off*, em contrapartida ao controle contínuo, é uma solução de menor custo e mostrou-se viável para manter a temperatura do fermentador em torno do *setpoint* desejado, para determinadas condições de operação.

A etapa de tratamento de dados desenvolvida permitiu a eliminação dos *outliers*, gerados normalmente por interferências elétricas no sistema de controle.

A utilização de água como fluido de processo permitiu a realização de vários testes sem comprometer o controle de qualidade do produto desejado, garantindo reprodutibilidade, além de reduzir os custos.

O sistema proposto mostra-se viável tecnicamente para processos de fermentação cuja diferença entre a temperatura ambiente e a do fermentador esteja próxima de 5 °C.

O sistema mostra-se condicionalmente viável para fermentações cuja mesma diferença esteja próxima de 10 °C, desde que o equipamento de refrigeração esteja em máxima potência e a diferença entre a temperatura do fermentador e a do Tanque Frio seja de aproximadamente 10 °C.

Apesar de o sistema não se mostrar viável quando a diferença entre a temperatura ambiente e a do fermentador é próxima de, ou superior a 15 °C, as condições de realização do experimento não foram as ideais, visto que não havia o isolamento do fermentador e também não havia o controle direto do acionamento do equipamento de refrigeração.

A análise global das diferenças de temperatura do sistema e dos tempos de funcionamento do sistema hidráulico permitiu uma compreensão sobre as transferências de calor envolvidas no sistema. Há uma relação direta com a diferença entre as temperaturas ambiente e do fermentador, bem como em relação ao tempo entre acionamentos da bomba.

O dimensionamento da serpentina está adequado, visto que, mesmo com a vazão máxima disponível, a temperatura de saída do fermentador encontra-se próxima a do interior do mesmo, e a diminuição da vazão de circulação provoca um aumento no tempo de acionamento.

O conceito dos indicadores de viabilidade de sistemas de refrigeração desenvolvidos, baseado na regeneração do Tanque Frio e controle da temperatura do fermentador, apresentou um resultado de fácil aferição e pode ser aplicado em tempo real em cervejarias artesanais.

O sistema proposto é uma promissora alternativa para realizar o *upscaling* gradual de uma planta de produção caseira sem ter um grande impacto no orçamento, já que se utiliza de equipamentos de fermentação e refrigeração já disponíveis para produção em métodos tradicionais, com instrumentações de baixo custo, complexidade e de fácil acesso.

5.II. Sugestões para projetos futuros

Desenvolvimento de um código de proteção para o sistema de circulação capaz de evitar o acionamento e desligamento ininterruptamente alternados da bomba hidráulica.

Implementação no sistema de controle de um módulo Real Time Clock e um SD Card, facilitando o monitoramento da produção com bateladas de longa duração, sem a necessidade de utilização de um computador permanentemente ligado.

Desconexão do termostato do equipamento de refrigeração e implementação de um relé na sua alimentação de energia, controlando o acionamento do compressor do equipamento por Arduino.

Estudos sobre o impacto da geração de calor da reação de fermentação na viabilidade do sistema proposto.

Estudos sobre o impacto da adoção de isolamento térmico no reator de fermentação, nas tubulações e conexões, de modo a diminuir a transferência de calor do ambiente para o fermentador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARNOLD, John P.; **Origin and history of beer and brewing: from prehistoric times to the beginning of brewing science and technology; a critical essay**; *Reprint Edition by BeerBooks*; Cleveland, Ohio, 2005.

BLACK, Thomas; **Grupo Modelo planeja exportar cerveja Corona para o Brasil**; *Exame*; Disponível em: <<https://exame.com/negocios/grupo-modelo-planeja-exportar-cerveja-corona-para-o-brasil>>; Acesso em 24 de julho de 2021.

BODAS, Álvaro; **Cerveja artesanal tem mercado quente para empreender e carreiras em alta**; *VC S. A.*; Disponível em: <voca.abril.com.br/empreendedorismo/mercado-de-cervejas-artesanais>; Acesso em 24 de julho de 2021.

BOUÇAS, Cibelle; **Concorrentes avançam sobre a Ambev**; *Valor Econômico*; Disponível em: <valor.globo.com/empresas/noticia/2020/02/05/concorrentes-avancam-sobre-a-ambev.ghtml>; Acesso em 24 de julho de 2021.

BURGESS, A. H.; **Hops: Botany, Cultivation and Utilization**; 1ª edição; *Leonard Hill, 1964*.

CABRERA, Paula; **Porta de entrada do setor de cervejas, ciganas reduzem ociosidade de fábricas**; *Folha de S. Paulo*; Disponível em: <[folha.com/bz15iyse](https://folha.com.br/bz15iyse)>; Acesso em 12 de maio de 2021.

CARNEIRO, Diego D.; **Estudo Computacional da Etapa Fermentativa da Produção de Cerveja e Proposta de uma Estratégia de Controle para o Processo**; *Instituto de Tecnologia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro*; Seropédica, 2010.

CONWAY, Jan; **Global beer production 1998-2019**; *Statista*; Disponível em: <statista.com/statistics/270275/worldwide-beer-production>; Acesso em 24 de julho de 2021.

DANIELS, Ray; **Designing Great Beers: The Ultimate Guide to Brewing Classic Beer Styles**; *Brewers Publications, 26 de janeiro 1998*

DE ARAUJO, Diogo P.; GOUVEIA, Igor de A.; FERREIRA, Vinicius L.; **Fermentador com Controle de Temperatura para Produção de Cerveja Artesanal**; *Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Curitiba, Engenharia de Controle e Automação*; Curitiba, 2018.

DE SOUZA, Liria A.; **Cerveja em tempos antigos**; *Brasil Escola*; Disponível em: <brasilecola.uol.com.br/quimica/cerveja-tempos-antigos.htm>; Acesso em 7 de julho de 2020.

DIAS, Diogo L.; **Processo de produção da cerveja**; *Brasil Escola*; Disponível em: <brasilecola.uol.com.br/quimica/processo-producao-cerveja.htm>; Acesso em 19 de novembro de 2020.

DO NASCIMENTO, Daniel V.; LOPES, Hygor A.; **Monitoramento, sensoriamento e controle remoto na produção de cerveja artesanal**; *Universidade Federal Fluminense*, 2018.

ENSMINGER, Marion E.; *et al.*; **Foods & Nutrition Encyclopedia**; 2ª edição, volume 2; *CRC Press*, 11 de dezembro de 2019.

ESBER, Alexandre M.; *et al.*; **Beer Challenge :: Beer Academy**; *Ambev Learning*; Disponível em: <youtube.com/watch?v=YEIIEEKFxWQ>; Acesso em 21 de julho de 2020.

FREITAS, Carlos Felipe; **INFOGRÁFICO Os maiores mercados de cerveja do mundo de 2018**; *Catalisi*; Disponível em: <catalisi.com.br/infografico-os-maiores-mercados-de-cerveja-do-mund-de-2018>; Acesso em 24 de julho de 2021.

GAAB, Jeffrey S.; **Munich: Hofbräuhaus & History – Beer, Culture, & Politics**; *International Academic Publishers*, 4 de setembro de 2006.

GOUS, P. W.; FOX, G. P.; **Amylopectin synthesis and hydrolysis – Understanding isoamylase and limit dextrinase and their impact on starch structure on barley (*Hordeum vulgare*) quality**; *Trends in Food Science & Technology*, 62, 23–32, 2017.

HAFFNER, David H.; **PLX-DAQ v2.11 Dual Trace Transfer to Excel**; *Hackaday*; Disponível em: <<https://hackaday.io/project/18126-dav5-v301-raman-spectrometer/log/67511-plx-daq-v211-dual-trace-transfer-to-excel>>; Acessado em 23 de agosto de 2021.

HAREENDRAN, T. K.; **Working with Water Flow Sensors & Arduino**; *Electro Schematics*; Disponível em: <circuitdigest.com/microcontroller-projects/arduino-based-water-flow-sensor>; Acessado em 23 de agosto de 2021.

HUI, Yiu H.; **Handbook of Food Science, Technology, and Engineering**; Volume 3; *CRC Press*, 2006.

JUNIOR, Amaro A. D.; VIEIRA, Antonia G.; FERREIRA, Taciano P.; **Processo de Produção de Cerveja**; *Revista Processos Químicos*, Jul / Dez de 2009.

MARKHAM, Brett L.; **The Mini Farming Guide to Fermenting: Self-Sufficiency from Beer and Cheese to Wine and Vinegar**; 1ª Edição; *Skyhorse Publishing*, 1º de agosto de 2012.

MARTINS, Luis Fernando; PANDOLFI, Marcos Alberto Claudio; COIMBRA, Caroline Cleonice; **Análise dos Indicadores do Mercado Cervejeiro Brasileiro**; *IV Simpósio de*

Tecnologia da Fatec Taquaritinga; Disponível em: <simtec.fatectq.edu.br/index.php/simtec/article/download/261/213>; Acesso em 24 de julho de 2021.

MATOSO, Felipe; **Como vender cerveja artesanal? Passo a passo para vender legalmente; Revendedor**; Disponível em: <revendedor.com.br/como-vender-cerveja-artesanal>; Acesso em 24 de julho de 2021.

MEIRONKE, Heiko; **Experimental studies of convection flow during the fermentation process of beer by means of Ultrasonic Doppler Velocimetry**; *9th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering*.

MELNIKOV, Giuliano M. D.; **Estudo Cinético do Processo Fermentativo de Produção de Cervejas em Mostos Concentrados**; *Faculdade de Engenharia Química de Lorena*; Lorena, São Paulo, 2002.

NELSON, Max; **The Barbarian's Beverage: A History of Beer in Ancient Europe**; *Taylor & Francis, 2004*.

PALMER, John J.; **How to Brew: Everything You Need to Know to Brew Beer Right the First Time**; 3ª edição; *Brewers Publications, 1 de maio de 2006*.

PEREIRA, Alexandre F.; **Curso Homebrew - A Arte de Fazer Cerveja em Casa**; 1ª edição; *Centro de Produções Técnicas e Editora Ltda*.

PICCINI, Ana R.; MORESCO, Cristiano; MUNHOS, Larissa; **Malteação**; *Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos da UFRGS*; Disponível em: <ufrgs.br/alimentus1/feira/prcerea/cerveja/maltea.htm>; Acesso em 16 de julho de 2020.

REMIGIO, Raphael V. S.; **Estudo Cinético de Três Cepas de Levedura em Mosto Cervejeiro**; *Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal da Paraíba*; João Pessoa, 2017.

SCHMIDELL, Willibaldo; LIMA, Urgel de A.; AQUARONE, Eugenio; BORZANI, Walter; **Biotechnologia Industrial**; Volume II, 1ª edição; *Editora Edgar Blucher LTDA., 1º de janeiro de 2001*.

SMITH, Bradley J.; **Home Brewing with BeerSmith: How to Brew and Design Great Beer at Home**; *CreateSpace Independent Publishing, 21 de outubro de 2010*.

STRONG, Gordon; *et al.*; **Diretrizes de Estilo para Cerveja do Beer Judge Certification Program**; *BJCP, 2008*; Disponível em: <bjcp.org/intl/2008styles-PT.pdf>; Acesso em 14 de julho de 2020.

STURMER, Márcio J.; **Desenvolvimento e Otimização de Tanque Fermentador para Cerveja Artesanal**; *Faculdade Horizontina, Curso de Engenharia Mecânica*; Horizontina-RS, 2016.

THOMSEN, Adilson; **Controlando lâmpadas com Módulo Relé Arduino**; *FilipeFlop Componentes Eletrônicos*; Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/blog/control-modulo-rele-arduino/>>; Publicado em 10 de fevereiro de 2013; Acessado em 23 de agosto de 2021.

VOLPE, Pedro L. O.; **Estudo da Fermentação Alcoólica de Soluções Diluídas de Diferentes Açúcares Utilizando Microcalorimetria de Fluxo**; *QUÍMICA NOVA*, 20(5) (1997).

YOUNG, Thomas W.; **Beer**; *Encyclopædia Britannica*; Disponível em: <britannica.com/topic/beer>; Acesso em 6 de julho de 2020.

As 10 cervejas mais vendidas no mundo; *Diário do Estado*, 2020.

Como construir um mini freezer Refrigerado; *Canal do Chopp*; Disponível em: <youtu.be/WEtKOZ5XU8I>; Acesso em 12 de maio de 2021.

Consumidores buscam alimentos saudáveis independente do preço; *Revista Empreendedor*; Disponível em: <abras.com.br/clipping/geral/4291/consumidores-buscam-alimentos-saudaveis-independente-do-preco>; Acesso em 24 de julho de 2021.

Destaque-se entre os amigos: conheça a história da cerveja no Brasil; *Instituto da Cerveja*; Disponível em: <institutodacerveja.com.br/blog/n142/novidades/destaque-se-entre-os-amigos-conheca-a-historia-da-cerveja-no-brasil>; Acesso em 24 de julho de 2021.

Dúvida de como montar um fermentador cônico de dupla parece + compressor de geladeira; *Home Brew Talk Brasil Forums*; Disponível em: <homebrewtalk.com.br/threads/d%C3%BAvida-de-como-montar-um-fermentador-c%C3%B4nico-de-dupla-parece-compressor-de-geladeira.409744>. Acesso em 19 de maio de 2021

Encyclopædia Britannica; 11ª edição; *Encyclopedia Britannica Company*, 1 de janeiro de 1911.

Fermentador Refrigerado com banco de Glicol; *Canal do Chopp*; Disponível em: <youtu.be/0O-kinGpeyQ>; Acesso em 12 de maio de 2021.

Historie: Die Brauerei Weihenstephaner; *Weihenstephaner*; Disponível em: <weihenstephaner.de/die-brauerei/historie>; Acesso em 7 de julho de 2020.

Instrução Normativa Nº 65, de 10 de Dezembro de 2019; *Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*; Diário Oficial da União, Edição 239, Seção 1, Página 31.

Kirin Beer University Report Global Beer Production by Country in 2018; *Kirin Holdings Company*; Disponível em: <kirinholdings.com/en/newsroom/release/2019/1003_01.html>; Acesso em 03 de janeiro de 2021.

Kirk-Othmer Food and Feed Technology, 1ª edição, volume 2; *Wiley-Interscience: 11 de janeiro de 2008*.

Kits Cervejeiros; *Cerveja da Casa*; Disponível em: <cervejadacasa.com/kits-ERVEJEIROS>; Acesso em 24 de julho de 2021.

O mapa da cerveja no Brasil; *Beer Art*; Disponível em: <revistabeerart.com/news/ERVEJARIAS-brasil>; Acesso em 24 de julho de 2021.

Oxford Dictionary of English; *Oxford University Press, 2019*.

Produção de Cerveja; *Escola de Química da UFRJ, 2018*.

Waterproof DS18B20 Digital Temperature Sensor; *DfRobot*; Disponível em: <application-datasheet.com/pdf/dfrobot/dfr0198.pdf>; Acessado em 09 de agosto de 2021.

Apêndice – Código do Controlador do sistema de fermentação com refrigeração

```
#include

int porta_rele1 = 23;
DS18B20 ds3(3);
DS18B20 ds4(4);
DS18B20 ds5(5);
DS18B20 ds6(6);
DS18B20 ds7(7);
DS18B20 ds8(8);

float tanque;
float entrada;
float saida;
float ambiente;
float proximo;
float fermentador;
float set;
float setup;
float setinf;

boolean bomba;
boolean protection;
volatile int flow_frequency;
unsigned int l_hour;
unsigned char flowsensor = 2;
unsigned long currentTime;
unsigned long cloopTime;
void flow ()
{
  flow_frequency++;
}
void setup() {
  set = 15;
  setup = set + 0.5;
  setinf = set - 0.5;

  protection = 0

  pinMode(porta_rele1, OUTPUT);

  pinMode(flowsensor, INPUT);
  digitalWrite(flowsensor, HIGH);
  Serial.begin(9600);
```



```

attachInterrupt(0, flow, RISING);
sei();
currentTime = millis();
cloopTime = currentTime;
Serial.println("LABEL,V,T1,T2,T3,T4,T5,T6,B,D,T");
}

void loop() {
currentTime = millis();
if(currentTime >= (cloopTime + 8000))
{
cloopTime = currentTime;

Serial.print("DATA,");
Serial.print(1.22761402765194000*flow_frequency
-0.00152230931309777*flow_frequency*flow_frequency,2);
flow_frequency = 0;
Serial.print(",");
tanque = ds8.getTempC();
Serial.print(tanque);
Serial.print(",");
entrada = ds7.getTempC();
Serial.print(entrada);
Serial.print(",");
saida = ds4.getTempC();
Serial.print(saida);
Serial.print(",");
ambiente = ds3.getTempC();
Serial.print(ambiente);
Serial.print(",");
proximo = ds5.getTempC();
Serial.print(proximo);
Serial.print(",");
fermentador = ds6.getTempC();
Serial.print(fermentador);
Serial.print(",");
Serial.print(bomba);
Serial.println(",DATE,TIME");

if (set - tanque < 5)
{
digitalWrite(porta_rele1, LOW);
bomba = 0;
protection = 1
}
else
{

```

```
if (set - tanque > 10)
{
protection = 0
}
}

if (fermentador > setup)
{
if (protection = 0)
{
digitalWrite(porta_rele1, HIGH);
bomba = 1;
}
else
{
if (protection = 1)
{
digitalWrite(porta_rele1, LOW);
bomba = 0;
}
}
}
else
{
if (fermentador < setinf)
{
digitalWrite(porta_rele1, LOW);
bomba = 0;
}
}
}
```