



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  

---

Escola Politécnica

# INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE UMA MICROCERVEJARIA

Lucas Rodrigues de Moraes Tostes

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores: Rossana Odette Mattos Folly

Andrea Valdman

Rio de Janeiro

Março de 2015

# INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE UMA MICROCERVEJARIA

Lucas Rodrigues de Moraes Tostes

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO.

Examinado por:

---

Profª Rossana Odette Mattos Folly, D.Sc.

---

Prof Maurício Bezerra de Souza Jr., D.Sc.

---

João Marcos Monnerat de Souza, Eng. de  
Proc. da Petrobras.

RIO DE JANEIRO RJ - BRASIL

MARÇO de 2015

Tostes, Lucas Rodrigues de Moraes

Instrumentação e Controle do Processo de Produção de uma Microcervejaria/ Lucas Rodrigues de Moraes Tostes. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2015.

VIII, 80 p.: il.; 29,7 cm

Orientador: Rossana Odette Mattos Folly

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia de Controle e Automação, 2015

Referências Bibliográficas: p. **Error! Bookmark not defined.**

**Error! Bookmark not defined.**

1. Produção de Cerveja. 2. Tecnologia Arduino. 3. Instrumentação e Controle. 4. Testes Experimentais I. Folly, Rossana Odette Mattos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia de Controle e Automação. III. Instrumentação e Controle do Processo de Produção de uma Microcervejaria

## Dedicatória

À minha mãe que, pela dedicação a mim, não teve a oportunidade de fechar um ciclo como este.

## Agradecimentos

Primeiramente aos meus pais, Roberto e Teresa, que diariamente me incentivam, me apoiam e sempre se desdobraram para que eu tivesse todas as condições que me fizeram chegar onde eu estou.

À minha namorada, Clarice, que sempre me apoiou e me acompanhou durante todos os anos de UFRJ e sempre me deu forças, principalmente nas horas em que mais precisei.

Imensamente às minhas orientadoras, Rossana e Andrea, que desde a primeira conversa receberam eu e o meu projeto de braços abertos e sempre apoiaram e incentivaram em todas as etapas de desenvolvimento.

Ao João Villaça, que sem a ajuda dele não haveriam testes experimentais neste projeto.

Aos meus amigos de ECA que me acompanharam nesta jornada, sempre se unindo e se fortalecendo diante de todos os desafios que enfrentamos (e que conseguiram me aturar durante todos esses anos).

Aos meus parceiros cervejeiros, Rafael e Daniela, que embarcaram junto comigo nesta jornada sem volta de imersão no mundo cervejeiro.

À toda a minha família que, sem exceção, sempre me mostrou que qualquer desafio é digno de ser superado.

À todos meus amigos que sempre me alegraram, me apoiaram e, na maioria dos casos, respeitaram minhas ausências em momentos de estudo e trabalho.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Instrumentação e Controle do Processo de Produção de uma Microcervejaria

Lucas Rodrigues de Moraes Tostes

Março/2015

Orientador: Rossana Odette Mattos Folly

Curso: Engenharia de Controle e Automação

O alto custo de instrumentação e controle para processos industriais dificulta a sua utilização na indústria de pequenas e médias cervejarias. Este projeto teve como objetivo apresentar propostas de controle e instrumentação para este tipo de processo e que fizesse uso de tecnologias e ferramentas alternativas e de baixo custo. O escopo do projeto visou o aproveitamento de uma planta piloto residente no LADEQ, na Escola de Química/UFRJ.

Após o estudo do processo de produção de cerveja, numa perspectiva de pequenas e médias cervejarias, foram elaboradas propostas de implementação do processo adaptado à planta e instrumentação baseada na plataforma Arduino. Integração de dispositivos sensores com a placa Arduino, estabelecimento de comunicação ModBus entre a placa e o computador fizeram parte da aplicação na planta.

Testes experimentais foram executados na planta piloto para que fosse verificada a aplicabilidade dos instrumentos escolhidos às condições do processo. A partir dos resultados destes testes foram feitas análises sobre o perfil de comportamento da planta e de diferentes atuações. Os dados foram utilizados para a elaboração de um modelo matemático de comportamento da planta. Com este modelo, foram simuladas diferentes estratégias de controle com diferentes modos de atuação. Ao final, sugere-se testes experimentais de outras abordagens do processo propostas pelo trabalho assim como a elaboração de uma proposta de implementação de controle sequencial para o processo.

*Palavras-chave:* Microcervejaria, instrumentação, Arduino, controle, processos

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

## INSTRUMENTATION AND CONTROL OF A MICROBREWERY PRODUCTION PROCESS

Lucas Rodrigues de Moraes Tostes

March/2015

Advisor: Rossana Odette Mattos Folly

Course: Control and Automation Engineering

The high costs of instrumentation and control implementations make its utilization difficult in the small and medium sized brewery industry. The purpose of this project was to present control and instrumentation implementation proposals that use alternative and low costs tools and technologies. This projects approach was based on the reuse of a pilot plant, located in LADEQ, at Escola de Química/UFRJ.

After studies about the beer production process in a small and medium breweries perspective, proposals of process implementation adapted to the plant and instrumentation based on the Arduino platform were made. Sensoring devices and Arduino board integration, ModBus communication between a computer and the Arduino board were part of the applied instrumentation.

Experimental tests were executed on the plant so that the instruments applicability to the process conditions was verified. Analysis about the plant's behaviour were made based on the tests results. The tests data was used to build a mathematical model of the plant. Using this model, different control strategies with different actuation modes were simulated. At the end, it is advised that new experimental trials focused on control application and sequential control design proposals are made.

*Keywords:* Microbrewery, instrumentation, Arduino, control, process

## Sumário

1 – Introdução .....	1
1.1 – Objetivo.....	2
1.2 – Organização do trabalho .....	2
2 – Revisão Bibliográfica .....	3
2.1 – Processo de Produção de Cerveja .....	3
2.1.1 - Limpeza e Sanitização .....	4
2.1.2 - Moagem .....	5
2.1.3 - Brassagem e Lavagem .....	5
2.1.4 - Fervura .....	8
2.1.5 – Fermentação .....	10
2.1.6 - Carbonatação.....	12
2.2 – Tecnologia Arduino .....	13
2.2.1 – Tecnologias auxiliares de software .....	15
2.3 – Controle de Processos Batelada .....	15
2.3.1 – Processos do tipo batelada.....	15
2.3.2 – Sistemas de controle .....	16
2.3.3 – Controle regulatório .....	17
2.3.3 – Controle sequencial .....	17
3 – Materiais e métodos .....	19
3.1 – Processo .....	19
3.1.1 – Preparação .....	20
3.1.2 – Brassagem .....	21
3.1.3 - Lavagem.....	22
3.1.4 – Fervura.....	23
3.1.5 – Resfriamento .....	25
3.2 – Descrição da Planta .....	26



3.2.1 – Modelo da Planta.....	26
3.2.2 – Tanques .....	27
3.2.3 – Manutenção da Planta .....	29
3.3 – Instrumentação .....	29
3.3.1 – Placa Arduino Uno .....	30
3.3.2 – Termômetro Digital DS18B20 .....	32
3.3.3 – Válvula Solenóide Ascoval Mod. 8222A047 .....	33
3.3.4 - Módulo Relé Songle SRD-05VDC-SL-C .....	35
4 – Desenvolvimento experimental .....	37
4.1 – Processo .....	37
4.1.1 – Preparação .....	37
4.1.2 – Brassagem .....	38
4.1.3 – Lavagem .....	39
4.1.4 – Fervura.....	40
4.1.5 – Resfriamento .....	40
4.1.6 – Instrumentação de medidas do Sistema.....	41
4.2 – Projetos da Planta.....	42
4.2.1 – Projeto A.....	42
4.2.2 – Projeto B.....	44
4.2.3 – Instrumentação de sensores .....	45
4.2.4 – Adaptações Realizadas .....	46
4.3 – Instrumentação .....	46
4.3.1 – Arquitetura.....	46
4.3.2 – Comunicações .....	48
4.3.3 – Configuração Arduino .....	48
4.3.4 – Configuração Sistema Supervisório .....	50
5 – Testes Experimentais .....	53

5.1 – Estrutura dos testes.....	53
5.2 – Elaboração dos testes .....	55
5.2.1 – Teste 1 .....	55
5.2.2 – Testes 2 e 3 .....	56
5.3 – Condições dos testes .....	57
5.3.1 – Teste 1 .....	57
5.3.2 – Teste 2 .....	57
5.3.3 – Teste 3 .....	58
5.4 – Resultados dos testes.....	59
5.4.1 – Teste 1 .....	59
5.4.2 – Teste 2 .....	62
5.4.2 – Teste 3 .....	65
6 – Propostas de Controle .....	69
6.1 – Arquitetura geral .....	69
6.2 – Controle regulatório .....	70
6.2.1 – Modelo matemático da planta .....	71
6.2.2 – Entrada teste para controles.....	72
6.2.3 – Controle proporcional simples .....	73
6.2.4 – Controle PID.....	76
6.2.5 – Controle com atuação on/off .....	77
6.2.6 – Uma proposta de implementação do controle regulatório.....	81
6.3 – Controle supervisorio e sequencial .....	81
6.3.1 – Uma proposta de controle supervisorio e sequencial .....	82
7 – Conclusão .....	83
7.1 – Trabalhos futuros .....	83
8 - Referências .....	84

Figura 1 - Placa Arduino Uno.....	13
Figura 2 - Arduino e conexões.....	14
Figura 3 - Encadeamento das Etapas do Processo.....	19
Figura 4 - Fluxograma Etapa de Preparação.....	20
Figura 5 - Fluxograma Etapa de Brassagem.....	21
Figura 6 - Fluxograma Etapa de Lavagem.....	23
Figura 7 - Fluxograma Etapa de Fervura.....	24
Figura 8 - Fluxograma Etapa de Resfriamento.....	25
Figura 9 - Modelo da Planta Apresentada.....	27
Figura 10 - Foto do sistema antes das modificações.....	28
Figura 11 - Foto do Tanque 1.....	29
Figura 12 - IDE Arduino com exemplo de código.....	31
Figura 13 - Exemplo de Esquemático de Conexões Arduino.....	32
Figura 14 - Termômetro Digital DS18B20 e Módulo.....	33
Figura 15 - Imagem da válvula solenóide instalada.....	34
Figura 16 - Módulo de Relé Songle-SRD Duplo.....	35
Figura 17 - Exemplo de Esquemático Conexões Relé SRD-05VDC-SL-C.....	36
Figura 18 - Configuração da Etapa de Preparação.....	38
Figura 19 - Configuração na Etapa de Brassagem.....	39
Figura 20 - Configuração da Etapa de Lavagem.....	40
Figura 21 - Configuração da Etapa de Resfriamento.....	41
Figura 22 - Projeto A de Implementação na Planta.....	43
Figura 23 - Projeto B de Implementação da Planta.....	45
Figura 24 - Arquitetura de instrumentação adotada.....	47
Figura 25 - Bancada de trabalho anexa à planta.....	47
Figura 26 - Arduino conectado aos dispositivos na planta.....	49
Figura 27 - Trecho de código de configuração do Arduino.....	49
Figura 28 - Interface de monitoramento implementada no software Proficy iFix.....	50
.....	
Figura 29 - Configuração dos parâmetros da comunicação ModBus.....	51
Figura 30 - Listagem de variáveis configuradas no sistema supervisório.....	52
Figura 31 - Foto do arranjo dos termômetros no tanque 1.....	54
Figura 32 - Instrumentação Tanque 1.....	54
Figura 33 - Instrumentação Tanque 2.....	55

Figura 34 - Gráfico dos registros de temperatura no Teste 1 .....	59
Figura 35 - Gráfico da parte de resfriamento do Teste 1 .....	61
Figura 36 - Gráfico de temperaturas do tanque 1, teste 2 .....	62
Figura 37 - Tanque 1, teste 2, 'Overshoot' da temperatura .....	63
Figura 38 - Gráfico de temperaturas do tanque 2, teste 2 .....	64
Figura 39 - Gráfico de temperaturas tanque 1, teste 3 .....	66
Figura 40 - Gráfico de temperaturas tanque 2, teste 3 .....	67
Figura 41 - Arquitetura de Controle .....	69
Figura 42 - Gráfico de simulação do modelo do tanque 1 no teste 3 .....	72
Figura 43 - Gráfico de entrada de setpoint adotado.....	73
Figura 44 - Diagrama de blocos realimentação com ganho proporcional .....	73
Figura 45 - Resposta da planta à realimentação com ganho proporcional .....	74
Figura 46 - Detalhamento da resposta da planta à realimentação com ganho proporcional.....	75
Figura 47 - Gráfico do sinal de controle para o controle realimentado proporcional.....	76
Figura 48 - Gráfico do sinal de controle para a realimentação com controle PID .....	77
Figura 49 - Diagrama de blocos controle proporcional com atuação relé.....	77
Figura 50 - Resposta da planta à realimentação com ganho proporcional e atuação on/off .....	79
Figura 51 - Detalhamento da resposta da planta ao controle relé.....	80
Figura 52 - Sinal de controle e chaveamento do relé no controle com atuação on/off .....	80

Tabela 1 - Tabela de temperaturas de ação de enzimas [3] .....	6
Tabela 2 - Variáveis da Etapa de Preparação .....	20
Tabela 3 - Variáveis da Etapa de Brassagem.....	22
Tabela 4 - Variáveis da Etapa de Lavagem .....	23
Tabela 5 - Variáveis da Etapa de Fervura.....	24
Tabela 6- Variáveis da Etapa de Resfriamento.....	26
Tabela 7- Especificações dos tanques.....	28
Tabela 8 -Especificações Arduino Uno .....	30
Tabela 9 - Especificações Solenóide Ascoval 8222A047 .....	34
Tabela 10 - Especificações Relé Songle SRD-05VDC-SL-C .....	36
Tabela 11 - Variáveis de monitoramento nos tanques.....	41
Tabela 12 – Instrumentação de sensores dos tanques.....	46
Tabela 13 - Endereços de variáveis na arquitetura de comunicação ModBus....	51
Tabela 14 - Variáveis registradas nos testes .....	53
Tabela 15 - Condições levantadas Teste 1 .....	57
Tabela 16 - Condições levantadas Teste 2.....	58
Tabela 17- Condições levantadas Teste 3.....	58
Tabela 18 - Inclinações médias das temperaturas nas faixas lineares dos testes	66
Tabela 19 - Parâmetros obtidos para o modelo .....	71
Tabela 20 - Etapas de um perfil exemplo de brassagem.....	72
Tabela 21 - Parâmetros ajustados do controle realimentado proporcional.....	74

## 1 - Introdução

O controle e a instrumentação de processos constituem áreas da tecnologia imprescindíveis para a indústria. O crescente desenvolvimento e aprimoramento de ferramentas para esta área permitiram o avanço industrial em inúmeros aspectos: minimização de custos, qualidade de produtos, flexibilidade de processos, potencialização da automação, dentre inúmeros outros.

Este movimento não limita-se apenas aos processos industriais. A área de instrumentação e controle tem avançado também em aplicações de pequeno e médio porte, através de tecnologias alternativas que se mostram acessíveis à qualquer indivíduo. Um ótimo exemplo disto é a plataforma Arduino. O baixo custo e a versatilidade desta tecnologia, resultaram numa explosão de popularidade da mesma. A cada vez mais vasta comunidade de usuários contribui para a diversificação de aplicações e para o desenvolvimento de referências e ferramentas que aumentam a acessibilidade da plataforma, independente do conhecimento do indivíduo.

Um mercado que recentemente tem observado o maior crescimento de sua história e que, ao mesmo tempo, ainda apresenta parcelas tímidas de investimento em aprimoramentos no processo é o de cervejas artesanais. Diferente de sua irmã gigantesca de cervejas convencionais, a indústria de cervejas artesanais se mostra refém de projetos pré-prontos ou consultorias superfaturadas para implementação de seu processo. O alto custo e os pobres ajustes do controle e da automação nestas implementações desencoraja o desenvolvimento da parte criativa do processo (como por exemplo a elaboração de novas receitas), sobrecarregando a mão de obra das pequenas e médias cervejarias com tarefas repetitivas e manuais.

A aplicação destas novas e acessíveis ferramentas de controle e automação nos processos de produção de cerveja em pequenas e médias cervejarias representa um grande potencial de crescimento para este mercado. Esta integração pode não só contribuir para a expansão da cultura cervejeira nacional quanto potencializar a visibilidade internacional tanto das cervejas artesanais quanto do desenvolvimento tecnológico brasileiro.

## **1.1 – Objetivo**

Este trabalho visa apresentar oportunidades de instrumentação e controle para processos de produção de cervejas em pequenas e médias cervejarias, que implementem tecnologias alternativas de controle e automação. O foco desta abordagem está na elaboração de propostas que se encaixem com a realidade de investimentos de empresas deste nicho de mercado e que fortaleçam a utilização destas tecnologias.

As propostas construídas neste trabalho, têm como base a utilização e o reaproveitamento de uma planta piloto residente no LADEQ (Laboratório do Departamento de Engenharia Química), na Escola de Química/UFRJ. O projeto contempla o estudo de adaptações nesta planta que permitam a implementação do processo de produção de cerveja na mesma.

Testes experimentais das propostas de instrumentação também fazem parte do escopo deste projeto, para que seja vislumbrada a adequação das tecnologias utilizadas às condições que se assemelhem ao processo escolhido.

## **1.2 – Organização do trabalho**

O capítulo 2 apresenta revisões teóricas acerca do processo de produção de cerveja, numa perspectiva de pequenas e médias cervejarias, das tecnologias utilizadas e da fundamentação de arquiteturas de controle.

O capítulo 3 descreve e especifica materiais e métodos utilizados no escopo do projeto, contemplando um método de produção de cerveja e especificações da planta e de instrumentos utilizados. O desenvolvimento experimental dos materiais e métodos citados no capítulo 3 é apresentado no capítulo 4, que apresenta configurações e propostas de utilização dos mesmos.

Os testes experimentais e a análise de seus dados são abordados no capítulo 5 e propostas e simulações de controle acerca das condições levantadas são apresentados no capítulo 6. Por fim o capítulo 7 apresenta considerações finais e potenciais trabalhos futuros dos assuntos abordados.

## 2 – Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta considerações teóricas levantadas a partir do estudo do processo de produção de cerveja, da tecnologia Arduino e de arquiteturas de controle para processos em batelada.

### 2.1 – Processo de Produção de Cerveja

Na sua abordagem mais simples, o processo de produção de cerveja consiste em transformar amido oriundo da cevada em álcool. O objetivo de um cervejeiro é alcançar isso com a maior eficiência possível em termos de quantidade de álcool por unidade de amido. Contudo, sua maior preocupação é manter a consistência em todos os aspectos de seu produto – espuma, claridade, cor e sabor [1].

Apesar de normalmente não contemplado por cervejarias, um pré-processo na produção de cerveja merece destaque: a malteação. Grãos de cevada, os mais presentes nas cervejas, ainda que ricos em amido, são de difícil moagem e extração de açúcares. Este processo consiste na germinação controlada dos grãos, que envolve a umidificação, a germinação em si e a secagem [2]. Estas etapas tornam os grãos mais flexíveis, facilitando a moagem, e desenvolvem as enzimas necessárias para a quebra dos amidos em um processo posterior (brassagem). O produto deste processo pode variar de acordo com os parâmetros de suas etapas (ex: tempo e temperatura de secagem) [1].

A matéria-prima do processo, além do malte, é composta fundamentalmente por água, lúpulo e leveduras selecionadas, podendo conter também diferentes especiarias e aditivos. As quantidades variam de acordo com a receita do rótulo. A seguir são indicadas algumas características dos ingredientes essenciais da cerveja:

1. **Malte de cevada:** É o responsável pelo fornecimento dos açúcares fermentáveis que contribuem para o condicionamento (carbonatação), conteúdo de álcool e sabores fermentados da cerveja [4].
2. **Lúpulo:** Lúpulos são flores em formato de cones. Sua fama é normalmente atribuída pela contribuição do amargor e de aromas e sabores florais. No entanto, uma de suas características mais importantes é a de conceder maior durabilidade à cerveja, uma vez que o mesmo inibe o crescimento de bactérias responsáveis pela deterioração da cerveja [4].
3. **Água:** A água e suas propriedades são importantes para o processo e podem alterar o produto final. No entanto, é comum supervalorizar-se a importância da



água. Esta crença é herança de uma época em que o tratamento de água não era simples tarefa. Considerando que, hoje em dia, a disponibilidade de água potável é relativamente simples, a qualidade da água não infere mais no produto final do que a qualidade dos outros ingredientes. Uma ótima água não consegue fazer uma ótima cerveja sem que haja ótimos maltes, lúpulos e leveduras [4].

4. **Levedura:** Leveduras, biologicamente classificadas como fungos, são microorganismos vivos que metabolizam e se alimentam dos ingredientes presentes no mosto cervejeiro. Este metabolismo, chamado de fermentação, é o responsável pelo álcool e pelo sabor final da cerveja [4].

O processo abordado neste projeto, é o comumente presente nas cervejarias tanto profissionais quanto caseiras. Ele é o responsável por transformar o malte de cevada, juntamente com os outros ingredientes, em cerveja propriamente dita. As etapas descritas neste trabalho são: Limpeza e Sanitização, Moagem, Brassagem e Lavagem, Fervura, Fermentação e Carbonatação e Envase.

### 2.1.1 - Limpeza e Sanitização

Em todas as etapas do processo, a limpeza, muitas vezes acompanhada da sanitização ou esterilização, é essencial para o sucesso do produto [3]. Qualquer tipo de resíduo ou microorganismo não desejado pode gerar desvios de sabor que impossibilitam a consistência dos resultados independente da rigorosidade das etapas do processo. O desleixo neste aspecto pode até esmo tornar o produto final intragável.

Para esclarecer a nomenclatura usada no projeto, são apresentados a seguir três termos usados para etapas deste processo:

1. **Limpeza:** Empregada para livrar de resíduos visíveis a olho nu: ex: sujeira, manchas, etc.
2. **Sanitização:** Responsável por matar ou reduzir microorganismos indesejáveis a níveis negligenciáveis.
3. **Esterilização:** Etapa que elimina por completo todas as formas de vida, especialmente microorganismos, seja por meios químicos ou físicos [3].

Um dos requisitos para o sucesso da fermentação, a etapa responsável pelo álcool e o equilíbrio entre os diferentes sabores da cerveja, é fornecer um ambiente favorável para que as leveduras possam metabolizar. No entanto, este mesmo ambiente se mostra favorável à outros microorganismos que geram características indesejáveis,

por este motivo é necessário garantir que as populações destes microorganismos sejam dizimadas ou minimizadas e, assim, não oferecer riscos ou competição ao crescimento das leveduras. Idealmente, esta etapa seria realizada pela esterilização mas, dada as dificuldades de implementação deste processo, isso é alcançado por meio da sanitização [3, 4].

### **2.1.2 - Moagem**

A moagem consiste na quebra dos grãos maltados de cevada. Algumas considerações devem ser levadas em conta neste processo: o malte deve ser quebrado em partículas pequenas o suficiente para o acesso da água e as cascas dos grãos devem se manter intactas o suficiente para ajudar na filtração do mosto líquido. Com isto alcançado, a hidratação das partículas permitirá a ativação das enzimas geradas na malteação e também a solubilização das moléculas de substrato (principalmente o amido) durante a brassagem [3].

Esta tarefa, à primeira vista, pode parecer simples e desimportante diante das outras etapas no entanto isso não é verdade. Uma moagem de má qualidade pode acarretar em uma perda significativa de eficiência no processo de conversão de açúcar e, conseqüentemente, um pior resultado no produto final [1]. Após esta etapa, o malte moído é despejado em água para que se inicie o próximo processo: a Brassagem.

### **2.1.3 - Brassagem e Lavagem**

A etapa de brassagem tem como objetivo principal a transformação do amido do malte de cevada em açúcares menores e fermentáveis. Nesta etapa, também são extraídos diversos nutrientes, minerais e proteínas dos grãos. Isto confere ao mosto resultante todas as características nutricionais necessárias para que posteriormente seja consumido pelas leveduras e, assim, gerado o álcool e os sabores resultantes da cerveja.

O processo consiste na maceração dos grãos em água morna com a manutenção de diferentes degraus e rampas de temperatura. O seu funcionamento se dá em quatro funções principais: hidratação do malte, gelatinização de seus amidos, liberação de suas enzimas naturais e conversão dos amidos em açúcares fermentáveis [3]. O malte moído é despejado em água morna ou quente para que haja a hidratação. A mistura resultante é então estabilizada em diferentes patamares de temperatura para que as outras funções sejam cumpridas.

A Tabela 1 apresenta as enzimas deste processo e suas respectivas funções:

Tabela 1 - Tabela de temperaturas de ação de enzimas [3]

Enzima	Intervalo de Temperatura Ativa	Intervalo de Temperatura Preferido	Função
Beta-glucanase	20° - 50° C	35° - 45° C	Melhor repouso para quebra de goma de adjuntos não maltados
Proteases	20° - 65° C	45° - 55° C	Solubilização de proteínas insolúveis do estoque da cevada
Peptidases	20° - 67° C	45° - 55° C	Produção de FAN (Free Amino Nitrogen) de proteínas solúveis
Dextrinase limite	60° - 67° C	60° - 65° C	Clivagem das dextrinas limites
Beta-amylase	60° - 65° C	60° C	Produção da maltose
Alpha-amylase	60° - 75° C	60° - 70° C	Produção de uma variedade de açúcares e dextrinas, incluindo maltose

A liberação das enzimas naturais da cevada é, em grande parte, cumprida pelo processo de malteação, no entanto pode-se adicionar uma etapa ao processo de brassagem conhecida como '*Repouso Proteico*' que complementa esta liberação. A ação da enzima Beta-Glucanase durante este repouso auxilia na quebra de gomas dos adjuntos e, conseqüentemente, na liberação das outras enzimas. Esta etapa tem como ponto ótimo de temperatura 45° C e além da beta-glucanase, conta com a ação de

enzimas (proteases e peptidases) que ajudam na solubilização e produção de proteínas que posteriormente ajudarão no processo de fermentação. Estas funções são normalmente utilizadas em receitas que envolvem alto percentual de grãos em flocos ou não maltados e também grãos com malteação moderada (como por exemplo receitas de cervejas do tipo Weiss, de trigo).

A gelatinização dos amidos é extremamente importante para que a ação das enzimas seja eficiente. A temperatura de gelatinização do malte de cevada é de 60° - 65° C, portanto é comum que esta função seja cumprida gradualmente ao mesmo tempo em que as enzimas de quebra dos amidos atuam. Em casos de utilização de grãos diferentes da cevada maltada, mais atenção à isso pode-se fazer necessária uma vez que as temperaturas para esta função são diferentes.

As grandes responsáveis pela conversão dos amidos em açúcares fermentáveis são as enzimas alfa e beta-amilase. Através da Tabela 1, observa-se que suas temperaturas de trabalho estão na faixa de 60° a 75 °C, esta normalmente é a faixa em que o processo de brassagem realiza as suas conversões principais, com as suas maiores durações.

Apesar de terem ações similares, as enzimas alfa e beta amilase têm uma diferença de grande importância no resultado: a beta amilase produz apenas açúcares fermentáveis e a alfa amilase produz ambos açúcares fermentáveis quanto não fermentáveis. Desta forma, quando as condições para a atuação da beta amilase são priorizadas, temos uma cerveja menos encorpada e de maior potencial alcoólico. Já no caso da alfa amilase, obtém-se uma cerveja mais encorpada e mais adocicada [3]. É possível compensar o teor alcoólico, quando a quantidade de açúcares não fermentáveis é maior, com a adição direta de açúcares invertidos na etapa da fervura. Normalmente, esta 'prioridade de condições' para uma enzima ou outra se dá na escolha da temperatura desta etapa: quanto mais tempo perto de 60° C, mais a enzima beta amilase atua, e quanto mais tempo perto de 75° C, mais a alfa amilase atua. É possível também utilizar uma brassagem balanceada com temperatura ao redor de 65 °C.

O último degrau de temperatura aplicado é o denominado 'Mash-out'. Este degrau é em torno de 78° C, é normalmente aplicado por 15 min e tem como objetivo desnaturar as enzimas do processo e tornar o mosto mais líquido, de forma a facilitar a filtragem. Terminados os degraus de temperatura programados (que levam, somados, entre 30 e 90 minutos, dependendo-se da eficiência do equipamento), a mistura é

repousada por 15 minutos, de forma a acomodar os grãos no fundo (chamado cama de grãos), e é então retirado o mosto primário filtrando-se os resíduos sólidos (grãos). O chamado mosto primário é o resultado deste processo e o mosto secundário é gerado pela etapa chamada ‘lavagem’.

O processo de lavagem tem como objetivo capturar os açúcares remanescentes na cama de grãos. Existem diversos métodos de lavagem, que podem ser generalizados em dois grupos: lavagem contínua e lavagem por batelada. As cervejarias comerciais e microcervejarias normalmente optam pela lavagem contínua por esta apresentar maior eficiência, já muitos cervejeiros caseiros utilizam a outra opção pela simplicidade e conveniência [3].

A lavagem contínua consiste em estabelecer um fluxo de água na entrada, filtrada e a 78° C, igual ao de mosto secundário na saída, ambos constantes. A água da entrada deve ser despejada da forma mais dispersa possível, de forma a não criar ‘canais preferenciais’ no caminho percorrido desde o topo da cama de grãos até a torneira de saída. Desta forma, o volume de líquido no recipiente de brassagem deve permanecer constante e um pouco acima da altura da cama de grãos (dependendo do método). O fim deste processo pode ser determinado tanto pelo volume de água utilizado na entrada (processos mais controlados) quanto pela observação da concentração de açúcar no mosto resultado, terminando o processo assim que a concentração determinada pela receita é alcançada.

A partir do resultado destes processos é possível estimar-se a eficiência do equipamento e do método implementado, medindo-se a proporção do açúcar capturado no mosto (primário + secundário) em relação a uma estimativa do açúcar disponível no estoque dos grãos utilizados.

A formulação de uma receita para cerveja não se limita somente à escolha dos ingredientes utilizados. A escolha dos degraus temperatura / tempo durante o processo de brassagem é determinante em vários aspectos da cerveja resultante. Vale ressaltar também que o perfil e a eficiência do equipamento podem interferir bastante no resultado. Mesmo a aplicação rigorosa das etapas da receita pode gerar produtos diferentes quando feitas em cervejarias distintas.

#### **2.1.4 - Fervura**

Existem quatro razões essenciais para a fervura do mosto [5]:

1. Extração das principais características dos lúpulos;

2. Coagulação e precipitação de proteínas indesejáveis;
3. Eliminação de componentes voláteis que podem gerar sabores e aspectos indesejáveis;
4. Evaporar parte do mosto para que uma densidade maior seja atingida (em casos de cervejas de ‘alta gravidade’).

Como já comentado anteriormente, uma das características mais importantes do lúpulo na cerveja é o de estender sua durabilidade através de compostos que inibem o crescimento de bactérias causadores da deterioração da cerveja. A liberação e solubilização destes compostos são resultados da isomerização dos lúpulos, que acontece durante a fervura [5, 6]. Este processo também é responsável pela estabilização do amargor gerado pelos lúpulos.

Diferentes tempos de adição dos lúpulos na fervura geram diferentes resultados na cerveja, isto acontece pelo tempo em que os mesmos se sujeitam à isomerização e à volatilização de seus componentes. Lúpulos adicionados no início da fervura (a 60 – 40 min do fim) são os responsáveis pelo amargor da cerveja. Já quando mais perto do final, são conferidos os sabores (15 – 5 min do fim) e os aromas (5 – 0 min do fim). Os óleos presentes no lúpulo são os que geram seu aroma. Como os mesmos são muito voláteis, é necessário que eles fiquem o mínimo possível na fervura quando utilizados para o aroma [6] (existem casos em que os mesmos são adicionados diretamente ao fermentador – isto chama-se ‘dry hopping’).

Certos tipos de proteínas podem ser coagulados durante a fervura do mosto. Estas proteínas coaguláveis são em grande parte responsáveis pela opacidade da cerveja. Algumas delas também contribuem para o escurecimento do produto. Existem adjuntos que podem ser utilizados para ajudar na coagulação e precipitação destas proteínas, contribuindo para a translucência e a cor. No entanto, seu uso em excesso pode prejudicar a formação de espuma do produto final, uma vez que a mesma é resultado da ação de proteínas.

Completado o tempo de fervura, deve-se resfriar o mosto quente o mais rápido possível. Desta forma, evita-se a formação e solubilização de alguns compostos indesejáveis (que se formam em torno de 85° C) e também contribui-se para a precipitação dos resíduos sólidos da fervura (conjunto chamado de *trub*), facilitando a sua separação antes da passagem para o recipiente de fermentação.

Além de todas estas razões descritas, podemos comentar também a importância de outra contribuição do processo de fervura do mosto: a esterilização. A fervura do mosto nos garante que possíveis bactérias e/ou leveduras que se encontrem no mosto pré-fervura, adjuntos ou lúpulos sejam mortas, eliminando, portanto, mais um risco de contaminação [6]. Com isso, após a fervura, a manutenção da sanitização do mosto e dos recipientes torna-se crítica para o processo, devendo diminuir ao mínimo a exposição dos mesmos à potenciais de contaminação (como por exemplo o ar).

### **2.1.5 – Fermentação**

A fermentação é a etapa da produção em que os açúcares fermentáveis são transformados no álcool contido na cerveja. Diversos fatores influenciam nesta etapa, onde o controle das condições é essencial. Pelo perfil delicado do processo bioquímico realizado nesta etapa, as mais pequenas variações na temperatura, pH, densidade e composições do mosto podem ser responsáveis por mudanças drásticas no produto final.

Esta é considerada a etapa mais crítica do processo de produção de cerveja, em vários aspectos. É nesta etapa, chamada de 'parte fria' do processo, que aparecem os riscos da contaminação, portanto o cuidado com a sanitização deve ser onipresente [7]. Grande parte dos possíveis desvios de sabor e qualidade da cerveja são resultados do descuido neste aspecto. Outro fator agravante é o de que esta é a parte mais longa do processo.

A fermentação não limita-se apenas à produção de álcool e gás carbônico a partir dos açúcares do mosto. O processo bioquímico realizado pelas leveduras gera também compostos essenciais para a determinação dos sabores da cerveja (ésteres, álcools de alto peso molecular, compostos sulfúricos e outros). Simplesmente adicionar etanol ao mosto não seria o suficiente para gerar uma cerveja como conhecemos, principalmente por estes subprodutos da fermentação [7].

Existem três principais fatores que são responsáveis pelo perfil e sucesso da fermentação: as condições da levedura, a composição nutricional do mosto e o controle das condições físicas do meio [3, 5]. A seguir são listadas algumas preocupações e possíveis problemas relacionados à estes fatores:

1. **Adequação da levedura:** Cada tipo de cerveja pede um tipo de levedura. É a combinação do tipo de levedura com as condições proporcionadas pela receita (densidade, pH, temperatura, composição nutricional) que dita o

perfil do produto. Cálculos da quantidade de células a serem utilizadas devem ser feitas levando em consideração ambos os aspectos mencionados.

2. **Composição nutricional do mosto:** O mosto em que a levedura será aplicada deve suprir todas as necessidades nutricionais para o crescimento e trabalho das leveduras. A quantidade mínima de oxigênio para garantir a reprodução e adaptação inicial das mesmas ao mosto, e o mínimo necessário de nutrientes devem ser garantidos para que a mesma possa realizar seus trabalhos. É comum em receitas de *all-grain* (em que se utiliza os grãos moídos e não extratos) que a quantidade de nutrientes já seja suprida pelos próprios grãos utilizados.
3. **Temperatura:** Do início ao fim da fermentação, a temperatura influencia no perfil de trabalho realizado pelas leveduras. Os patamares de temperatura durante a fermentação fazem parte da elaboração da receita da cerveja e devem ser controlados. Temperaturas mais altas do que o indicado podem gerar subprodutos indesejáveis e temperaturas mais baixas podem causar o adormecimento das leveduras.

O processo de fermentação na produção de cerveja pode ser separado em três etapas: adaptação, atenuação e condicionamento.

1. **Fase de adaptação** (até 36 horas): Esta fase é responsável pela adaptação da levedura às condições apresentadas pelo mosto. As leveduras analisam o estoque de nutrientes disponíveis para que possam produzir as enzimas necessárias para a adaptação. Durante este período, o oxigênio contido no mosto é consumido para que a reprodução nesta fase seja mais eficiente.
2. **Fase de atenuação** (de 2 a 10 dias): É nesta etapa que a fermentação em si é iniciada. A levedura passa a metabolizar de forma anaeróbia e, assim, começa a transformar os açúcares fermentáveis em álcool e liberar CO<sub>2</sub>. A taxa de atenuação do mosto é máxima nesta fase (a densidade tende a cair em 2/3 a 3/4 do valor inicial). Subprodutos da fermentação de sabor e aroma indesejáveis são gerados nesta etapa, no entanto, os mesmos podem ser reabsorvidos posteriormente pelas próprias leveduras na etapa de condicionamento.
3. **Fase de condicionamento ou maturação** (de 10 a muitos dias): Durante esta fase, a maior parte dos açúcares fermentáveis já foi consumido e muitas



das leveduras se encontram adormecidas. No entanto, esta fase é essencial para que os sabores e aromas da cerveja se equilibrem. Algumas funções da levedura ainda são executadas. A fermentação de açúcares maiores e, portanto, mais difíceis de serem consumidos acontece nesta etapa, assim como a reabsorção de subprodutos oriundos da fermentação na fase de atenuação. Há casos em que esta fase é realizada na própria garrafa ou barril. Dependendo do estilo da cerveja, este período pode durar até anos.

### **2.1.6 - Carbonatação**

A carbonatação da cerveja é o que confere o último ajuste da cerveja para o produto final. Equipamentos e métodos de carbonatação e envase variam bastante dependendo do equipamento da cervejaria.

A levedura, no processo de transformação do açúcar em álcool, gera também gás carbônico (CO<sub>2</sub>), o mesmo utilizado para a carbonatação da cerveja. Isto não confere apenas uma coincidência. Um dos principais métodos de carbonatação, tanto na produção industrial quanto caseira, é o de aproveitar este gás gerado pela fermentação.

No processo industrial, os tanques fermentadores possuem válvulas de controle de pressão. Esta pressão é regulada de forma que a pressão final do tanque corresponda à uma pressão que permita a solubilização de gás carbônico no nível de carbonatação desejado na cerveja. Os cálculos para esta solubilização envolvem registros de temperatura, pressão e tempo de fermentação. Técnicas avançadas de envase permitem que este gás dissolvido não escape durante a transferência para garrafas e/ou barris.

Não é comum que o processo caseiro disponha de tanques fermentadores que envolvam tais válvulas de controle de pressão, tampouco de métodos de envase que garantam a manutenção do gás dissolvido. Desta forma, é necessário deixar o gás carbônico gerado pela fermentação ser liberado, caso contrário podem haver riscos maiores para os equipamentos de fermentação.

Apesar disso, o método de carbonatação mais comum utilizado por cervejeiros caseiros, e até algumas microcervejarias, também envolve o aproveitamento do gás liberado pela fermentação, de uma forma diferente. Este método consiste na adição de uma quantidade calculada de açúcar nas próprias garrafas lacradas (ou barris). O açúcar adicionado é então fermentado pelas leveduras remanescentes no próprio recipiente envasado. É comum que o processo de filtragem não seja preciso o suficiente para

retirar-se todas as leveduras da cerveja, o que neste caso é uma grande ajuda para os cervejeiros. Este processo é chamado de *priming*.

Um outro método de carbonatação comumente utilizado para o envase de cerveja em barris, é o chamado de carbonatação forçada. Ao invés de aproveitar o gás carbônico gerado pela fermentação, a cerveja finalizada é submetida a uma carga controlada de pressão de gás carbônico a uma certa temperatura e, desta forma, é deixada em repouso para que o CO<sub>2</sub> tenha tempo o suficiente para se solubilizar na cerveja. Uma das grandes vantagens deste método é o de que permite a carbonatação em um período mais curto do que o processo de *priming* descrito anteriormente (pode durar de algumas horas a 1 semana, enquanto o processo de *priming* leva no mínimo 1 semana).

## 2.2 - Tecnologia Arduino

A tecnologia Arduino é uma plataforma open-source que tem como objetivo a interação dos ‘meios digitais’ com os meios físicos. A construção se baseia em dois componentes: um dispositivo programável e um ambiente de desenvolvimento de software para este dispositivo [8]. Na sua forma mais básica, o dispositivo, apresentado na Figura 1, é constituído por uma placa acoplada a um chip microcontrolador, entradas e saídas digitais e uma interface USB.



Figura 1 - Placa Arduino Uno (Fonte: <http://www.arduino.cc>)

A flexibilidade de integração com dispositivos faz com que a gama de aplicações desta plataforma seja diversa [8]. Seu uso pode variar desde a implementação de um simples termostato (conectando-se a um termômetro e um relé para controle) até

uma complexa impressora de três dimensões (em que se conecta com inúmeros sensores e motores atuadores).

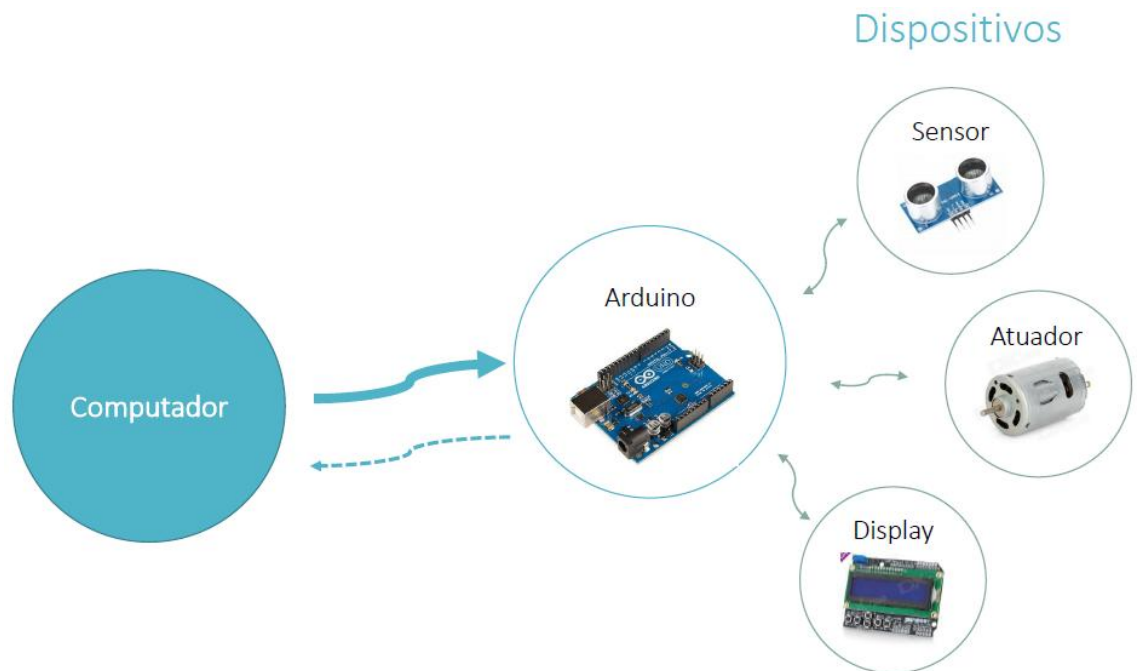


Figura 2 - Arduino e conexões

O dispositivo foi inicialmente idealizado como uma ferramenta de prototipagem eletrônica, com foco principal no meio acadêmico. No entanto, a sua versatilidade e facilidade de uso o fez conquistar também outros públicos. A cultura DIY (sigla do termo inglês: “*Do it Yourself*” que traduz “Faça você mesmo”), muito comum nos Estados Unidos, é uma das grandes responsáveis pelo crescimento de mercado desde a sua criação. A vasta comunidade desta plataforma na internet e no mundo permite o fácil acesso a tutoriais e explicações de uso das mais variadas aplicações, independente da especificidade e independente do nível de conhecimento que o usuário tem ou deseja ter.

Uma de suas possíveis aplicações é servir como uma ponte de comunicação entre outros dispositivos, como é mostrado na Figura 2. Sua interface USB nativa pode simular portas seriais e ser utilizada para troca de mensagens em tempo real, sejam estas dos estados dos sensores, sinais para os atuadores ou dados quaisquer. Outros tipos de comunicação também podem ser implementados com a ajuda de dispositivos acopláveis à placa, como por exemplo: Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth.

### **2.2.1 – Tecnologias auxiliares de software**

A plataforma de software arduino, assim como linguagens mais comuns de software, permite a inclusão de bibliotecas externas no código compilado. Este fator contribui para a facilidade de desenvolvimento do software de comando da placa.

Bibliotecas como a OneWireBus, por exemplo, auxiliam na utilização de dispositivos que permitam a comunicação por meio deste protocolo. A biblioteca SimpleModBus também é um exemplo de código auxiliar para comunicação da placa com dispositivos mais robustos (como computadores). A utilização destas bibliotecas permite ao usuário não se preocupar com detalhes de parametrização de comunicação que necessitam configuração mais avançada, já que as mesmas oferecem configurações pré-estabelecidas e funções simples de reconfiguração.

## **2.3 – Controle de Processos Batelada**

Este tópico visa apresentar um estudo sobre necessidades, dificuldades e especificações de sistemas de controle para processos batelada. A escolha deste tipo de processo foi feita devido à sua proximidade com o perfil de produção de cerveja.

### **2.3.1 – Processos do tipo batelada**

‘Um processo é considerado do tipo batelada se, por estruturação física do equipamento do processo ou por outros fatores, consiste na execução de uma sequência de uma ou mais etapas que necessitam seguir determinada ordem.’ – [10]

Processos em batelada são processos descontínuos. Ingredientes são sequencialmente preparados (misturados, cozinhados, reagidos) e então finalizados e empacotados. Quando os ingredientes são combinados nas devidas proporções e expostos às condições de processo programadas, o produto resultante do processo é tido como aceitável. Apesar de não serem nem do tipo discreto e nem do tipo contínuo, processos em batelada apresentam características de ambos [9].

Os produtos de um processo em batelada podem ser feitos em um ou mais recipientes. Estes recipientes são normalmente submetidos à diferentes operações nas quais múltiplas funções de processamento são aplicadas. Geralmente, os produtos resultantes de um processo deste tipo apresentam identidade única. Isto quer dizer que lotes especialmente bons ou ruins podem ser estudados para que o conhecimento do processo seja aprofundado e utilizado para otimizar parâmetros usados em futuros lotes.

### 2.3.2 – Sistemas de controle

Numa forma simplificadora, controles podem ser caracterizados como regulatórios ou sequenciais. O controle regulatório tem como objetivo a regulação de uma das saídas de um processo a seu respectivo setpoint, compensando a ação de possíveis distúrbios e/ou mudanças no setpoint. Controle sequencial tem como função a sequenciação ótima do processo controlado em uma série de estados distintos.

Um sistema de controle voltado para processos em batelada deve permitir uma produção flexível que implemente controles regulatórios e sequenciais. Para tal intuito, deve ser possível a programação de receitas que especifiquem o encadeamento e as características das variáveis controladas. A versatilidade de um sistema de controle de batelada geralmente está ligada à sua eficiência de aplicação [9].

Algumas funções devem ser cumpridas por tal sistema [9]:

1. Implementar controles feedback de fluxos, temperaturas, pressões, nível, assim como estratégias mais avançadas de controle;
2. Realizar cálculos de variáveis indiretas tais como balanço de energia;
3. Prover controle sequencial de batelada que envolva ações como: misturar ingredientes, esquentar, esperar compleção de reações, resfriar, transferir produto, dentre outras;
4. Agendar e monitorar operações de unidades de processamento múltiplo;
5. Medir e transferir ingredientes e materiais para os tanques e outros recipientes como especificado nas receitas;
6. Ajustar os devidos setpoints de variáveis de processo (temperatura, pressão, nível, fluxo, etc) como necessário;
7. Detectar o fim de processos e reações;
8. Registrar e reportar dados e informações do processo realizado;
9. Permitir o monitoramento e ajuste em tempo real das variáveis do processo;
10. Manter registros de especificações de receitas (variáveis, nome, autor, data de criação, dentre outros).

Garantir o funcionamento de todas estas funções simultaneamente é o ponto chave de um sistema de controle para processos em batelada. Uma alternativa para a implementação de tal sistema é a utilização de um sistema de controle supervisão, que permite a coordenação todas estas funções e a implementação de algumas destas funções.

### **2.3.3 – Controle regulatório**

O controle regulatório de processos em batelada é essencialmente o mesmo que em processos contínuos: monitoração e controle de variáveis de processo. A maior diferença entre estes processos é a de que, em batelada, o processo é descontínuo, o que implica numa maior ocorrência de estados transitórios. Tais estados dificultam o controle, pois necessitam de ajustes de ganho para a otimização de respostas dinâmicas.

A variabilidade nas receitas, matérias primas e no processo em si aumentam as demandas do controle regulatório. Além disso, o perfil naturalmente dinâmico e variante no tempo de processos batelada causa variações e distúrbios significativos nas variáveis de processo ao longo da operação [9]. Não há condições de operação em estado estacionários nas quais os controladores podem ser ajustados para otimizar as respostas dinâmicas ao longo de diferentes lotes.

A maioria das malhas de controle regulatório (de temperatura, pressão, nível, etc) podem ser satisfatoriamente controladas por realimentação simples baseadas em controladores com algoritmo PID (proporcional, integral e derivativo) [9]. Esta realimentação fornece bom acompanhamento de setpoint e grande robustez à possíveis distúrbios e modificações no setpoint em variadas aplicações. No entanto, como dito anteriormente, estratégias mais elaboradas de controle se fazem necessárias para que a resposta dinâmica dos controladores seja ótima, uma vez que a variabilidade do processo e a grande quantidade de estados transitórios são recorrentes neste tipo de processo.

### **2.3.3 – Controle sequencial**

A estratégia do controle sequencial pode variar desde o simples desencadeamento das etapas do processos de acordo com o estado das variáveis até designs mais complexos que implementem situações de erro e segurança.

Independente da complexidade do processo, as ações necessárias, os tipos de controle e o estado dos processos variam com o tempo. O gerenciamento do tempo e da sequenciação de eventos, sejam estes fixos ou variáveis, são o básico do controle sequencial [9].

Controles para processos batelada não se limitam à minimização de desvios de setpoint em estados estacionários. É comum a necessidade de ações alternativas de controle como resposta à eventos como falhas de equipamentos, grandes variações ao

longo do processo e interferências externas. A implementação de respostas deste tipo podem estar contempladas no controle sequencial.

## 3 – Materiais e métodos

Neste capítulo, são apresentados especificações de materiais e instrumentos utilizados neste trabalho, assim como métodos dos processos estudados.

### 3.1 – Processo

Neste tópico, abordamos o processo de produção de cerveja, numa perspectiva de microcervejarias, com teor mais técnico sobre variáveis mais críticas do processo. Não faz parte deste escopo a denominada ‘parte fria’ do processo, responsável pela etapa de fermentação, carbonatação e envase, assim como as partes antecedentes à ‘parte quente’ do processo: malteação e moagem. O sequenciamento das etapas está diposto na Figura 3.

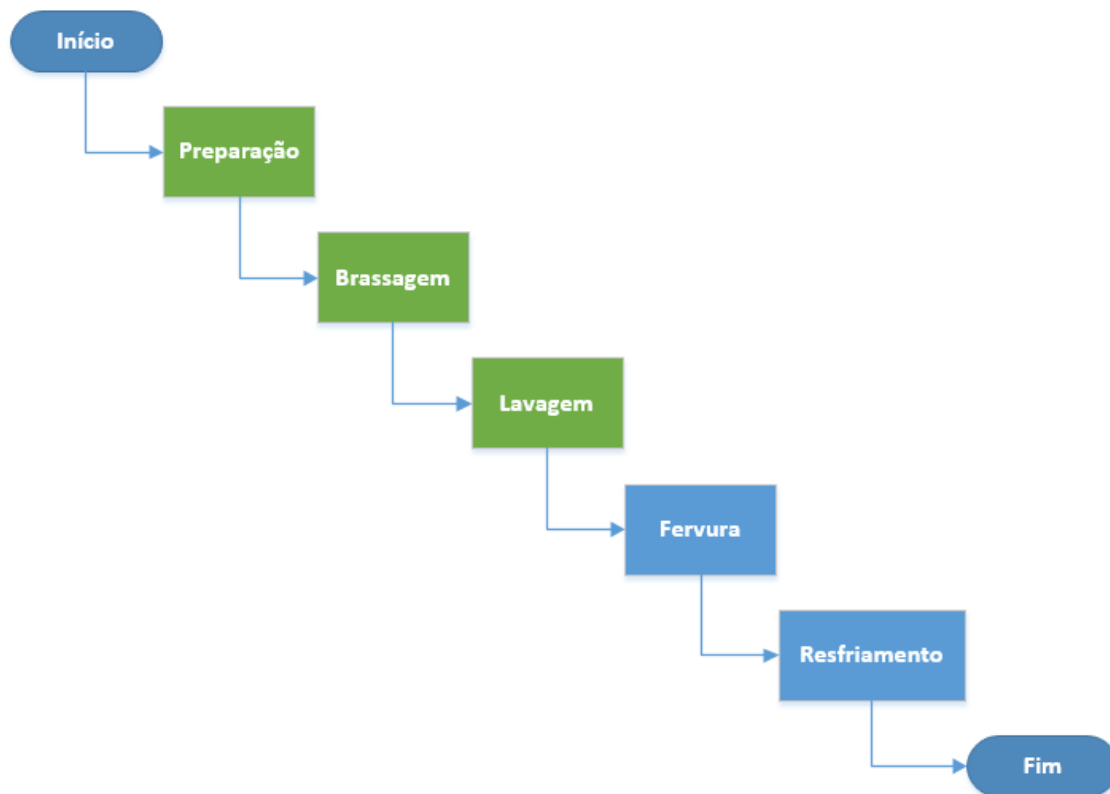


Figura 3 - Encadeamento das Etapas do Processo

Existem diversas grandezas que influenciam de forma significativa o processo: tempo de processamento de cada etapa, temperatura, volume de água e mosto, peso dos ingredientes, densidade do mosto, pH, concentração de açúcares, agitação, dispersão da temperatura, dentre outras. As mesmas variam em graus de complexidade e formas de observação e manipulação. Por questões de simplicidade, este projeto analisa as



variáveis básicas mais importantes do processo, variando-se de acordo com o perfil da etapa. Estas variáveis são separadas em dois tipos: Medição, para medição pontual em determinados momentos do processo; e Monitoramento, para acompanhamento em tempo real.

### 3.1.1 - Preparação

A etapa de preparação serve para garantir as condições iniciais do processo, principalmente em termos de volume e temperatura. Estas condições são indicadas pela receita escolhida, podendo variar. É nesta etapa que é feita a pesagem e separação de todos os ingredientes utilizados no processo com suas devidas quantidades (água, maltes moídos e lúpulos). As etapas são mostradas na Figura 4 e as respectivas variáveis na Tabela 2.

Tabela 2 - Variáveis da Etapa de Preparação

Variável	Observado	Tipo
Temperatura	Água	Medição
Peso	Maltes moídos, Lúpulo	Medição
Volume	Água	Medição

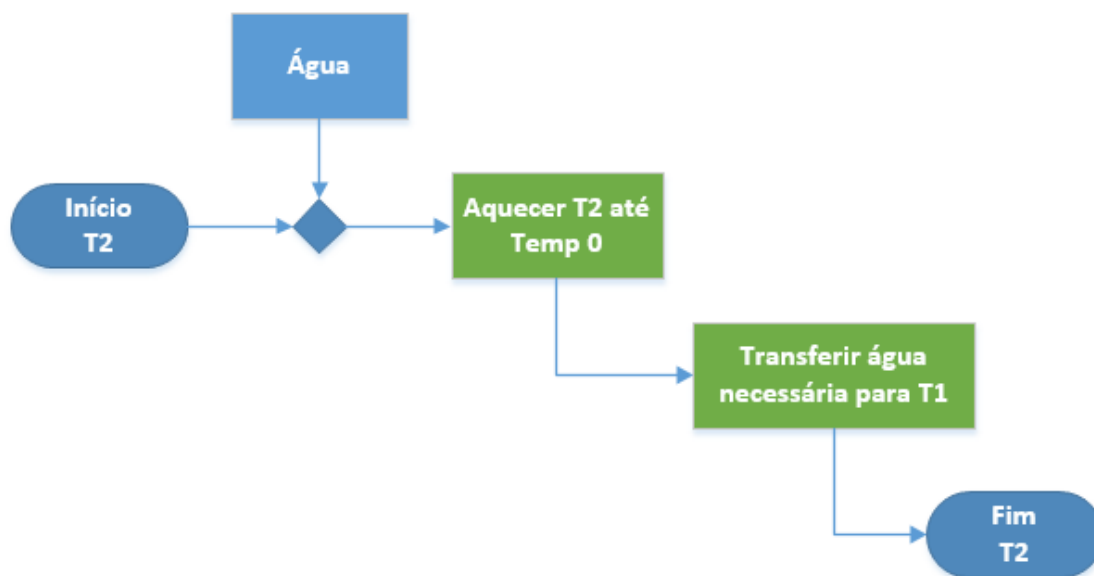


Figura 4 - Fluxograma Etapa de Preparação

### 3.1.2 - Brassagem

Após a preparação, o malte moído separado é despejado na água pré-aquecida para dar-se início à etapa de brassagem. Esta etapa é a responsável pela extração e quebra dos açúcares contidos nos grãos malteados. Do ponto de vista do processo, ela consiste basicamente da manutenção da temperatura da mistura em diferentes degraus e rampas, como é demonstrado na Figura 5. Diferentes receitas de cerveja representam a implementação de diferentes perfis de temperatura neste processo.

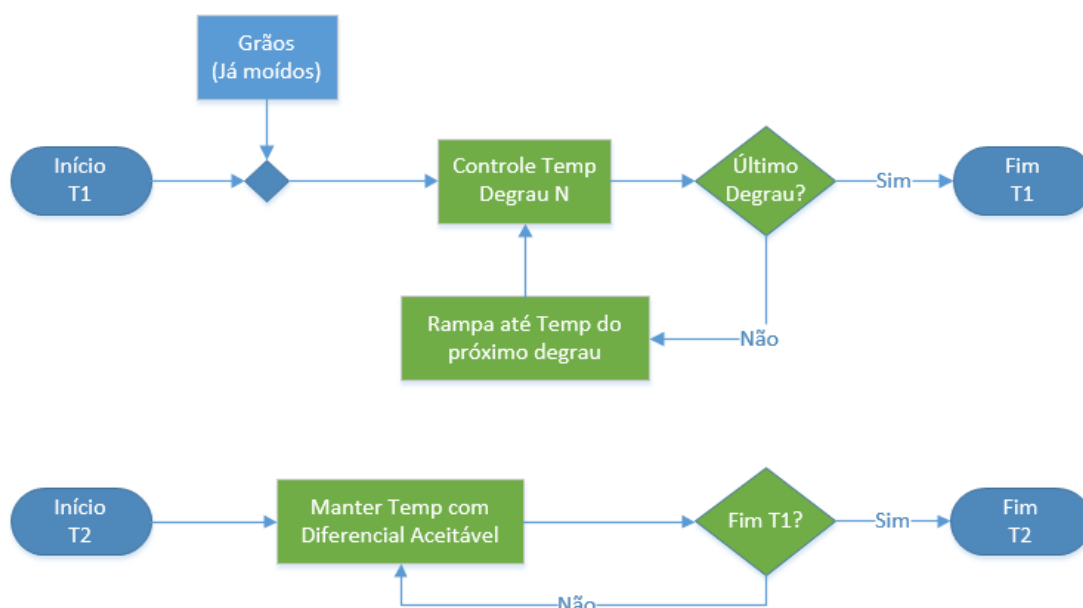


Figura 5 - Fluxograma Etapa de Brassagem

As variáveis desta etapa são enunciadas na Tabela 3. O controle destas é crítico. O perfil do produto depende do sucesso destas estratégias de controle. Temperaturas fora da faixa planejada modificam a ação das enzimas, variando a proporção de açúcares fermentáveis e não fermentáveis ou até gerando compostos indesejáveis. Apesar da criticidade, o controle não é complexo, já que trata-se de um processo longo (duração máxima de 90 minutos, com degraus de no mínimo 15 minutos) e faixas de temperaturas largas (variação de no máximo 2°C). A maior dificuldade é a homogeneização da temperatura da mistura. Embora simples, é bom ressaltar que quanto mais preciso for o controle do processo, melhor é a qualidade e taxa de repetibilidade do produto nesta etapa.

Terminadas as faixas de temperaturas do processo, é necessário deixar a mistura repousar por 15 minutos para que a cama de grãos possa assentar-se e, assim, facilitar a

filtragem. Após este processo, realizamos a transferência do mosto primário para o recipiente de fervura, separando-se o líquido dos resíduos sólidos (grãos).

Tabela 3 - Variáveis da Etapa de Brassagem

Variável	Observado	Tipo
Temperatura	Mistura (grãos + água)	Monitoramento
Tempo	Degraus e Rampas – Mistura	Monitoramento

### 3.1.3 - Lavagem

Antes do fim da etapa de brassagem, é feita a lavagem dos grãos. Esta etapa tem como objetivo a captura dos açúcares contidos nos grãos que não foram absorvidos pelo mosto primário (da brassagem), dando origem ao mosto secundário. O desencadeamento é mostrado na Figura 6. Este método, consiste no despejo de um volume pré-determinado de água quente (temperatura aproximada de 78°C) na cama de grãos ainda coberta de líquido. Vale ressaltar que este despejo deve ser feito da maneira mais dispersa possível, para que a cama de grãos não seja modificada e a taxa de absorção dos açúcares seja ótima. A duração desta etapa varia com a quantidade de líquido utilizada e também com o perfil do equipamento utilizado.

O término e o sucesso destas últimas etapas é ditado pela densidade e a concentração de açúcar dos mostos primário e secundário. Medições são feitas conferindo-as com o valor nominal da receita até que os valores apresentem-se dentro da faixa de aceitação. Possíveis desvios destas características podem ser consertados posteriormente (como a adição de água filtrada antes da fervura ou aumento do tempo total de fervura).

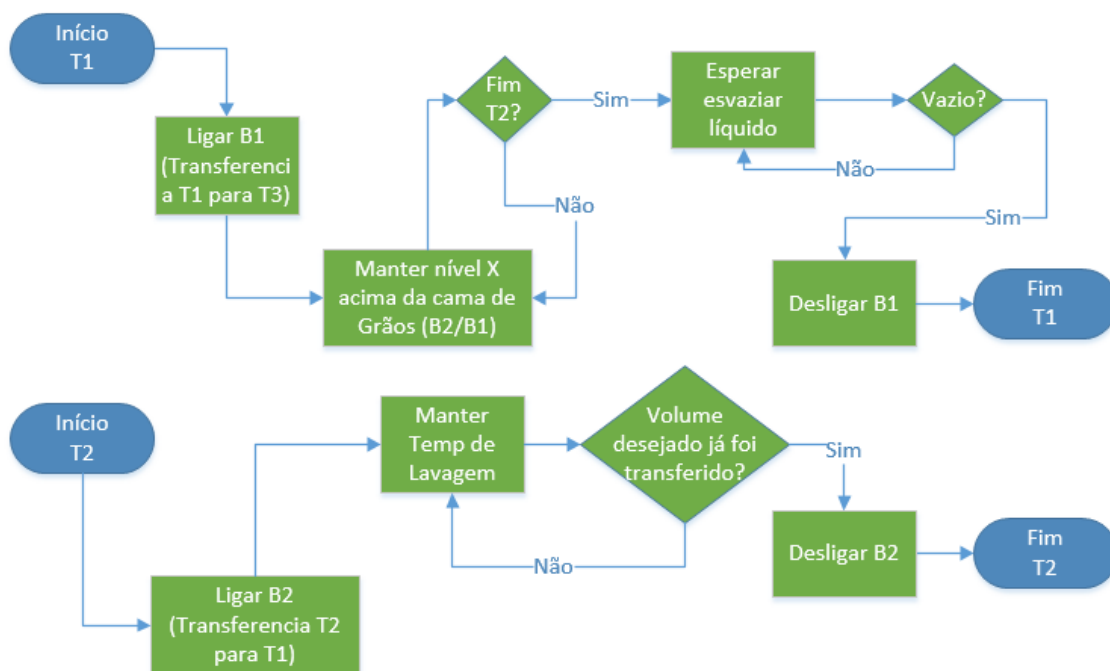


Figura 6 - Fluxograma Etapa de Lavagem

A Tabela 4 - Variáveis da Etapa de Lavagem apresenta as respectivas variáveis desta etapa.

Tabela 4 - Variáveis da Etapa de Lavagem

Variável	Observado	Tipo
<b>Temperatura</b>	Água de Lavagem	Monitoramento
<b>Tempo</b>	Duração da Lavagem	Monitoramento
<b>Volume</b>	Água de Lavagem	Monitoramento
<b>Densidade</b>	Mosto Primário e Secundário	Medição (final)

### 3.1.4 - Fervura

A partir do mosto resultante das etapas de brassagem e lavagem, é realizado o processo de fervura. Como já descrito anteriormente, esta etapa tem como objetivo a

isomerização dos lúpulos e também a esterilização do mosto para que o processo de fermentação ocorra sem problemas.

Esta etapa consiste basicamente da fervura do mosto durante um tempo determinado (que, na maioria dos casos, varia entre 30 e 90 min, contados desde o início da ebulição) e a adição de diferentes quantidades de lúpulo(s) em diferentes tempos da fervura. A Figura 7 apresenta este procedimento. A temperatura do mosto satura aos 100°C da fervura (já que o mesmo é composto majoritariamente por água), portanto não precisamos nos preocupar com o controle da mesma. O fator determinante neste aspecto é garantir que a fonte de calor seja constante e tenha potência suficiente para manter uma fervura com intensa movimentação de bolhas e evaporação de cerca de 10% do mosto a cada 1h.

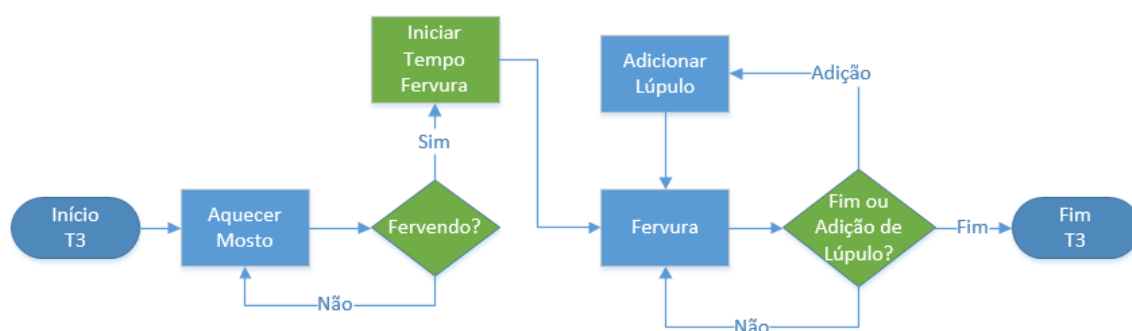


Figura 7 - Fluxograma Etapa de Fervura

Como apresentado na Tabela 5 - Variáveis da Etapa de Fervura, A variável observada ao decorrer deste processo é o tempo decorrido para que a fervura programada seja cumprida e as adições de lúpulo sejam realizadas nos momentos estabelecidos (como vimos anteriormente, diferentes momentos conferem diferentes propriedades do lúpulo ao produto final).

Tabela 5 - Variáveis da Etapa de Fervura

Variável	Observado	Tipo
Temperatura	Mosto	Monitoramento
Tempo	Adições de Lúpulo,	Monitoramento

### 3.1.5 – Resfriamento

Após o fim da fervura, é necessário resfriar-se o mosto até a temperatura de fermentação para que o mesmo seja transferido para o recipiente fermentador, retirando-se o conjunto de resíduos sólidos do fim da fervura (*trub*). O mais importante desta etapa é que seja o mais rápido possível minimizar a formação de compostos indesejáveis potencialmente gerados nas temperaturas intermediárias deste processo (em torno de 85°C). Um método de resfriamento é exemplificado na Figura 8.

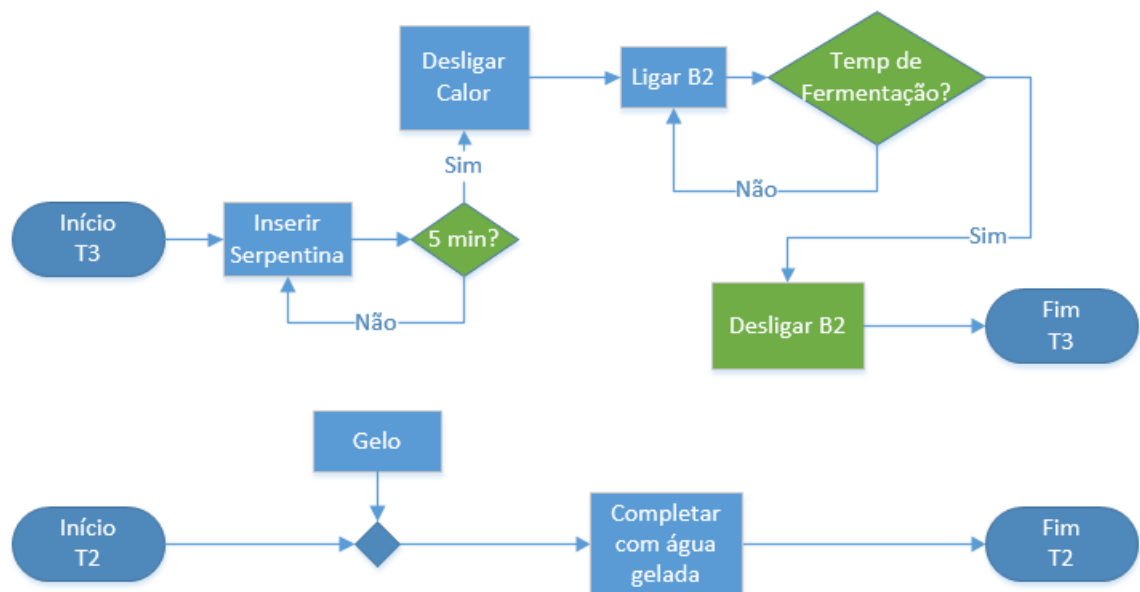


Figura 8 - Fluxograma Etapa de Resfriamento

O monitoramento exigido ao decorrer desta etapa é o da temperatura do mosto e do tempo de processamento, que determinam a duração e o final da mesma. Ao seu fim, diversas medidas devem ser efetuadas para que se confira o sucesso do processo até aqui e, caso necessário, realize-se ajustes prévios à fermentação (estas medições podem também serem realizadas no próprio recipiente fermentador). A Tabela 6 enuncia as variáveis. Vale lembrar que, neste momento, todos os equipamentos que entram em contato com a mistura devem estar devidamente sanitizados para evitar contaminações que atrapalhem a fermentação.

Tabela 6- Variáveis da Etapa de Resfriamento

Variável	Observado	Tipo
Temperatura	Resfriamento do Mosto	Monitoramento
Tempo	Resfriamento do Mosto	Monitoramento
Volume	Mosto pré-fermentação	Medição (final)
Densidade	Mosto pré-fermentação	Medição (final)

### 3.2 – Descrição da Planta

O escopo prático deste projeto está baseado no aproveitamento de uma planta presente no LADEQ (Laboratório do Departamento de Engenharia Química), na Escola de Química/UFRJ. Este sistema esteve inativo por aproximadamente 30 anos, sendo peça considerada como potencial descarte do laboratório. Apesar disso, por conter estruturas revestidas por aço inoxidável, se mostrou ainda em condições de restauro e aproveitamento.

#### 3.2.1 – Modelo da Planta

Testes e medições foram feitos para que as condições das vias, válvulas e dos próprios tanques fossem testadas. A partir destes testes, foi possível chegar a um modelo de funcionamento do sistema, apresentado na Figura 9. A disposição de altura dos tanques nesta figura está de acordo com a disposição aproximada da planta piloto real.

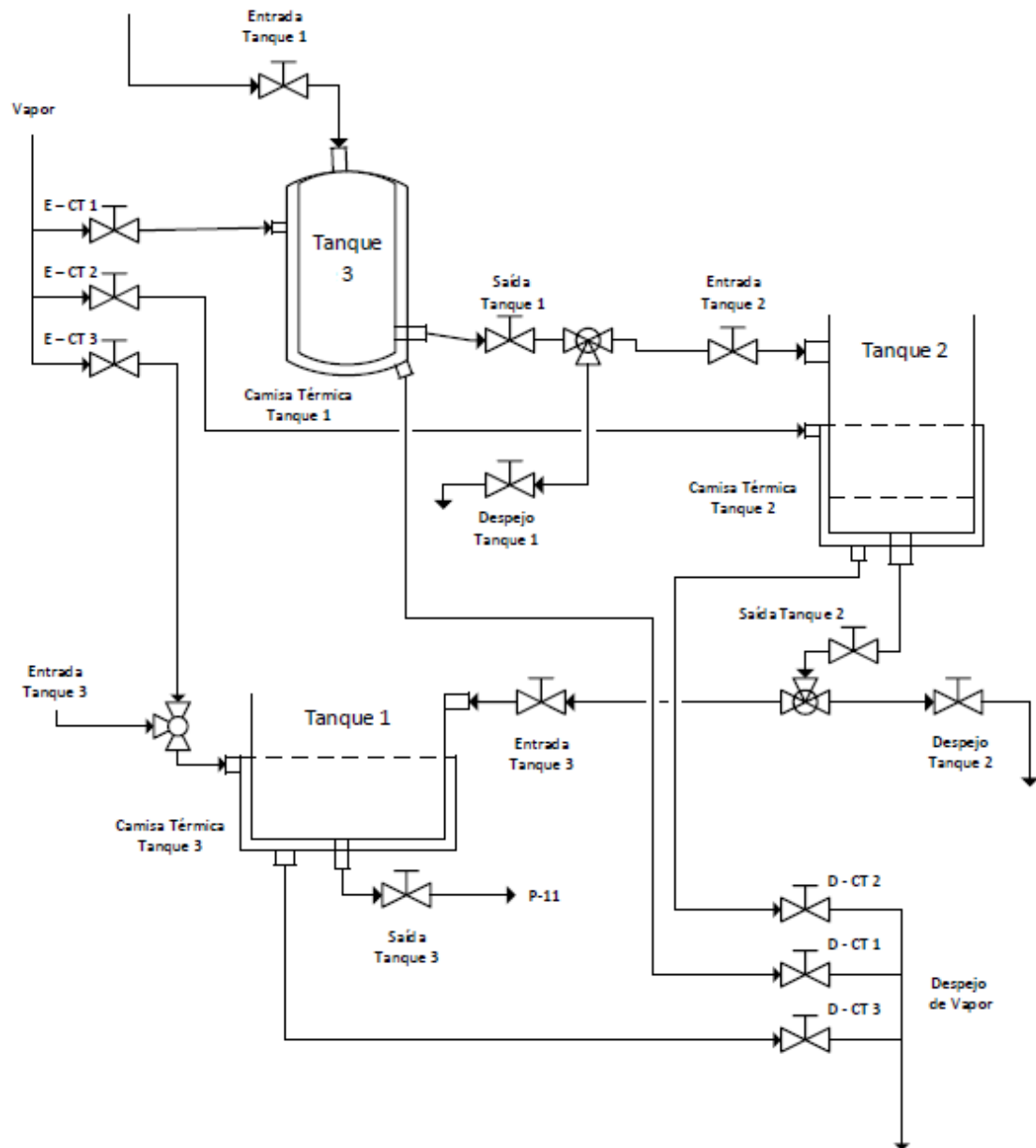


Figura 9 - Modelo da Planta Apresentada

### 3.2.2 - Tanques

A planta é composta por 3 tanques, sendo dois abertos e um fechado. Uma foto da disposição dos tanques é apresentada na Figura 10. Um dos tanques (Tanque 3), por ser fechado, impossibilitou medidas e estimativas mais precisas sobre seu funcionamento, uma vez que o acesso ao seu interior exige a utilização de equipamentos mecânicos de grande porte. Sendo assim, são abordados o detalhamento apenas dos tanques 1 e 2.





Figura 10 - Foto do sistema antes das modificações

Ambos os tanques têm parte de seu volume revestido por uma camisa térmica que contém uma serpentina para passagem de vapor. Os tanques são compostos por ferro galvanizado e apresentam um revestimento em aço inoxidável no seu interior. Entradas laterais e saídas no fundo estão presentes nos dois tanques. A Tabela 7 apresenta as especificações de cada tanque.

Tabela 7- Especificações dos tanques

	Tanque 1	Tanque 2
Diâmetro	59 cm	59 cm
Altura	80 cm	110 cm
Volume (aproximado)	220 L	300 L
Altura Camisa Térmica	45 cm	55 cm



Figura 11 - Foto do Tanque 1

### 3.2.3 - Manutenção da Planta

Uma limpeza manual extensiva foi aplicada aos tanques para que fossem feitos os testes experimentais. Grande parte dos resíduos visíveis de poeira e deterioração foram removidos, permitindo a utilização dos tanques e de suas vias de entrada e saída e conexões. Uma foto do Tanque 1, previamente à limpeza, é apresentada na Figura 11. No entanto, para sua utilização de fato em um processo de produção de cerveja, seriam necessárias restauração e limpezas mais profundas.

As válvulas, vias e conexões da planta são de ferro galvanizado. Todas as válvulas de processo são flangeadas. As válvulas de liberação de vapor para cada tanque são simples e manuais.

A conexão da linha de vapor ao tanque 2 encontrava-se rompida e sem condições de uso, as demais estavam intactas mas obstruídas. Os tanques inicialmente continham tampas de contenção de alta pressão com bordas revestidas de borracha, mas as mesmas se mostraram completamente deterioradas e foram, portanto, descartadas.

### 3.3 - Instrumentação

A partir das variáveis do processo apresentadas no tópico 3.1, um conjunto de instrumentos foi separado e analisado com o intuito de contemplar a implementação do

processo. A integração e utilização dos mesmos no sistema de automação serão discutidos posteriormente no capítulo 4.

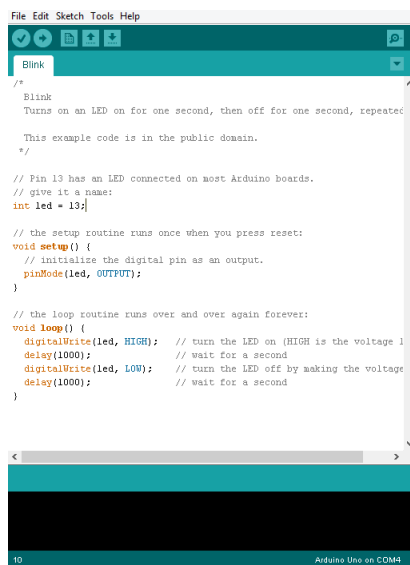
### 3.3.1 – Placa Arduino Uno

O Arduino Uno é uma placa microcontroladora programável baseada no chip ATmega328. Ele possui 14 pinos de entradas/saídas digitais dos quais 6 podem ser usados como saídas PWM (Pulse Width Modulation), além de 6 entradas analógicas, um ressonador cerâmico de 16 MHz, uma conexão USB, uma entrada de fonte, um cabeçote ICSP e um botão de reset. Ele contempla o circuito necessário para o suporte do microcontrolador, basta conectá-lo a um computador através de um cabo USB ou alimentá-lo com uma fonte AC-DC ou uma bateria de 12V [11]. Suas especificações estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 -Especificações Arduino Uno

Especificações	
Microcontrolador	ATmega328
Voltagem de Operação	5V
Voltagem de Entrada (recomendada/limites)	7-12V / 6-20V
Pinos I/O Digitais	14 (dos quais 6 fornecem saída PWM)
Pinos de Entrada Analógica	6
Corrente DC por Pino I/O e Pino 3,3 V	40 mA e 50 mA
Memória Flash	32 KB (ATmega328) dos quais 0.5 KB são utilizados pelo bootloader
SRAM - EEPROM	2 KB – 1 KB (ATmega328)
Clock	16 MHz
Comprimento	68,6 mm
Largura	53,4 mm
Peso	25 g

Um dos focos do desenvolvimento da placa Arduino foi a facilidade de comunicação com um computador, outro Arduino ou outros microcontroladores. O chip ATmega328 fornece comunicação serial UART TTL (5V), a qual está disponível nos pinos digitais 0 (RX) e 1 (TX). Um Atmega16U2 permite a comunicação serial pela USB e aparece como uma porta virtual para softwares no computador. O software do Arduino inclui um monitor da porta serial que permite o envio e recebimento de dados textuais simples para a placa. Os LEDs de TX e RX piscam de forma a demonstrar quando dados estão sendo transmitidos pela placa ao computador pela interface USB [11].

A screenshot of the Arduino IDE interface. The window title is "File Edit Sketch Tools Help". The main area displays the "Blink" sketch code. The code includes comments explaining the function and the setup/loop routines. The code is as follows:

```
File Edit Sketch Tools Help
Blink
/*
 * Blink
 * Turns on an LED on for one second, then off for one second, repeated
 *
 * This example code is in the public domain.
 */
// Pin 13 has an LED connected on most Arduino boards.
// give it a name:
int led = 13;

// the setup routine runs once when you press reset:
void setup() {
  // initialize the digital pin as an output.
  pinMode(led, OUTPUT);
}

// the loop routine runs over and over again forever:
void loop() {
  digitalWrite(led, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage 1)
  delay(1000);            // wait for a second
  digitalWrite(led, LOW); // turn the LED off by making the voltage
  delay(1000);            // wait for a second
}
```

The bottom status bar shows "10" and "Arduino Uno on COM4".

Figura 12 - IDE Arduino com exemplo de código

O Arduino Uno pode ser programado com o IDE da plataforma Arduino (como demonstrado na Figura 12), o qual possui a sua própria linguagem de programação e estrutura baseadas na linguagem C/C++. Programas compilados pela sua própria plataforma de software são enviados à placa para que a mesma execute a rotina programada. É possível também o envio de código compilado de outras linguagens para a placa. A versatilidade de sua programação vem também da possibilidade da utilização direta de bibliotecas externas programadas em C/C++, largamente disponíveis na internet (e muitas vezes de código aberto). Programas Arduino podem ser divididos em três partes principais: estruturas, valores (variáveis e constantes) e funções. Suas rotinas são baseadas na execução de uma função de inicialização e depois a repetição de uma função de atualização até que seja efetuado o reset ou cortada a alimentação da placa [12].

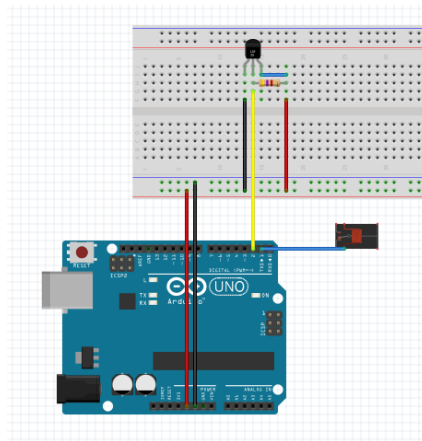


Figura 13 - Exemplo de Esquemático de Conexões Arduino

Por suas propriedades de comunicação e conexões, o Arduino é um ótimo instrumento de integração de diferentes componentes e dispositivos. Este é o principal objetivo de sua utilização neste projeto. A obtenção de dados de sensores, a manipulação direta de atuadores, a facilidade de programação e modificação de rotinas de trabalho e a comunicação em tempo real com computadores são virtudes no trabalho com dispositivos físicos. A Figura 13 apresenta um exemplo de conexões implementadas com a placa.

Apesar de não contemplar a mesma robustez de uma plataforma industrial já conceituada no mercado, a plataforma Arduino destaca-se no quesito custo. Orçamentos de instrumentação utilizando-se esta plataforma podem ser até 10% do preço de uma plataforma industrial.

Neste projeto, utilizamos a comunicação ModBus do dispositivo diretamente com um computador que funcionará como sistema supervisor, de forma que ao mesmo sejam fornecidos dados de sensores e recebidos comandos de chaveamento de relés a partir do mesmo.

### 3.3.2 - Termômetro Digital DS18B20

O dispositivo DS18B20 é um termômetro digital que fornece medições de temperatura em graus Celsius através de 9 a 12 bits. Uma foto de seu dispositivo e uma montagem são mostradas na Figura 14. Sua comunicação é implementada pela tecnologia One-Wire bus que, por definição, necessita apenas de 1 linha de transmissão de dados (e 1 terra) para comunicação com um microprocessador central [13]. A temperatura de operação deste dispositivo está no intervalo de  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $+125^{\circ}\text{C}$  e tem a precisão de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  no intervalo de  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $+85^{\circ}\text{C}$ . A alimentação do mesmo pode ser

feita diretamente da linha de dados, eliminando a necessidade de uma fonte de alimentação externa.



Figura 14 - Termômetro Digital DS18B20 e Módulo (Fonte: <http://www.ventor.co.in>)

Cada dispositivo deste modelo possui um código serial próprio de 64 bits, o que permite a utilização de diversos dispositivos na mesma linha de dados One-Wire. Desta forma, é relativamente simples a utilização de um mesmo microcontrolador para o monitoramento de diferentes pontos de temperatura.

As tecnologias utilizadas por este dispositivo (como por exemplo: One-Wire) são de fácil integração com a plataforma Arduino. Existem bibliotecas abertas disponíveis para a plataforma tanto para a interpretação de dados do próprio dispositivo quanto da implementação do One-Wire. Além disso, pela sua ampla utilização na comunidade da plataforma Arduino, existem diversos exemplos abertos de conexões possíveis para a sua integração com esta plataforma.

### **3.3.3 - Válvula Solenóide Ascoval Mod. 8222A047**

A solenóide Ascoval Modelo 8222A047 é uma solenóide industrial de ½” para vapor manufaturada para trabalho em condições de alta pressão e alta temperatura, uma foto é apresentada na Figura 15. Sua alimentação é de 110Vac. Outras especificações são enumeradas na Tabela 9.

Tabela 9 - Especificações Solenóide Ascoval 8222A047

Especificações	
Alimentação	110 Vac
Potência	10,5 W
Funcionamento	On/Off (Normalmente fechada)
Tubulação	½"
Temperatura de Trabalho	Até 180° C
Pressão de Trabalho	0,14 – 9 kgf/cm <sup>2</sup>
Fluido	Vapor
Dimensões	4.0 x 2.7 x 1.8 cm

O seu funcionamento se resume ao estancamento de uma via de vapor quando não alimentada e a abertura da via quando o contrário. Com esta funcionalidade, é possível regular a passagem e exposição de vapor por determinadas vias (como por exemplo camisas térmicas de tanques) implementando, assim, um atuador sobre a fonte de calor do processo.



Figura 15 - Imagem da válvula solenóide instalada

Apesar de não conter interface direta de comunicação com controladores, sua alimentação pode ser manipulada através de um controle relé que aceite suas condições

de trabalho. Desta forma, ela se torna uma opção viável no ponto de vista de automatização do processo, ao contrário de uma válvula de acionamento manual.

### 3.3.4 - Módulo Relé Songle SRD-05VDC-SL-C

O módulo relé Songle SRD-05VDC-SL-C é um dispositivo relé utilizado para controlar (on/off) dispositivos ao mesmo tempo que permite o isolamento em relação ao controlador [14]. O dispositivo é apresentado na Figura 16. Seu maior objetivo é permitir o acoplamento de dispositivos de alta potência (como por exemplo, solenóides) em malhas de controle com microcontroladores. Este modelo compõe uma implementação de um relé magnético com todos estes aspectos e, ao mesmo tempo, baixo custo.

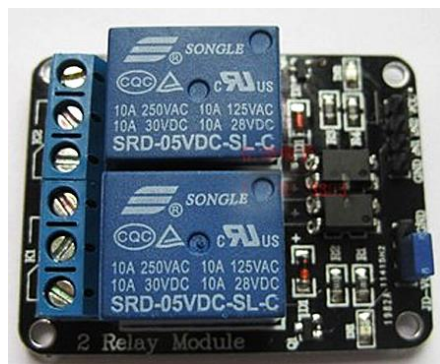


Figura 16 - Módulo de Relé Songle-SRD Duplo (Fonte: <http://arduino-info.wikispaces.com>)

O dispositivo contém um transistor acoplado que comuta a bobina do relé para ligado/desligado. Um diagrama exemplo de conexões é mostrado na Figura 17. Um diodo instalado na placa fornece a proteção de diodo para a voltagem contraeletromotriz. Para seu funcionamento, é necessário fornecer um terra comum, uma tensão de alimentação 5V para o relé e um sinal de entrada para ativar o relé pelo transistor [14]. A Tabela 10 apresenta suas especificações [15].



Tabela 10 - Especificações Relé Sngle SRD-05VDC-SL-C

Especificações	
Alimentação	5 VDC, ~85 mA, 3.3-5 VDC (sinal de entrada)
Interface de Comunicação	Lógica (High/Low) (3.3-5 VDC)
Temperatura de Operação	-25° C a +70° C
Dimensões	4.0 x 2.7 x 1.8 cm

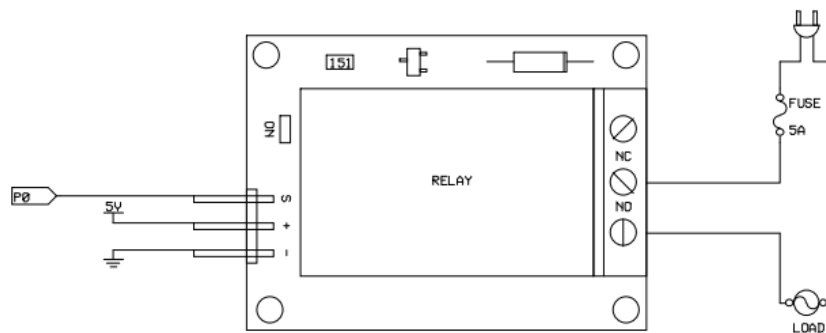


Figura 17 - Exemplo de Esquemático Conexões Relé SRD-05VDC-SL-C (Fonte: <http://pub.ucpros.com/download/27115-Single-Relay-Board-Guide-v1.0.pdf>)

As condições de operação deste dispositivo (comunicação, alimentação) seguem o padrão da placa Arduino. Seu controle é feito através de um simples controle lógico de on/off digital, nativamente implementado na plataforma Arduino. Além disso, a sua característica de baixo custo é de grande importância para o escopo deste projeto, uma vez que dispositivos deste tipo não são de fácil acesso.

## 4 – Desenvolvimento experimental

Este capítulo visa apresentar configurações e implementações de métodos e instrumentos apresentados no capítulo 3. A organização segue a mesma ordem do capítulo anterior.

### 4.1 – Processo

A partir do estudo do processo mostrado nos capítulos anteriores, foi elaborada uma proposta planta integral capaz de manipular cada etapa do processo descrito. Este tópico visa apresentar uma proposta de procedimento para o processo, representado com o detalhamento operacional.

A planta idealizada teve como base uma tecnologia amplamente conhecida pela comunidade de cevejeiros caseiros para técnicas de brassagem, denominada HERMS (Heat Exchange Recirculation Mash System – Sistema de troca de calor por recirculação da brassagem), tendo como inspiração a arquitetura aberta implementada pela The Electric Brewery. Esta arquitetura é formada por três tanques abertos de tamanhos similares [16]. Além dos tanques, são necessárias 2 bombas para transferência entre tanques, uma serpentina de circulação para resfriamento e uma fonte de calor (resistência ou fogo direto) para fervura no tanque 3 e um instrumento de dispersão de água para a etapa de lavagem [16]. As especificações dos tanque são:

- **Tanque de Mosto (Tanque 1):** Tanque com conexões para entrada e saída, de preferência termicamente isolado.
- **Tanque de água quente (Tanque 2):** Tanque com conexões para entrada e saída de água, uma serpentina interna com entrada e saída do fluido de processo e uma resistência ou fonte de calor para aquecimento do tanque.
- **Tanque de fervura (Tanque 3):** Tanque com conexões de entrada e saída e fonte de calor para fervura.

As conexões entre entradas e saídas dos tanques e bombas não são fixas e variam de acordo com a etapa em andamento. As configurações de cada etapa serão apresentadas juntamente às mesmas.

#### 4.1.1 – Preparação

A etapa de preparação se inicia com a adição de um determinado volume de água (água de brassagem + água de lavagem) no tanque de água quente. Esta água é aquecida até que se chegue à temperatura programada (pré despejo de malte) para a

brassagem e é então transferida a quantidade relativa à brassagem para o tanque de mosto. Caso o tanque não suporte as águas de brassagem e lavagem somadas, deve-se completar a água de lavagem após o fim da transferência e esquentá-la imediatamente. Concomitantemente, são preparadas as pesagens dos ingredientes malte moído e lúpulo. As conexões, de acordo com o método proposto, são apresentadas na Figura 18.

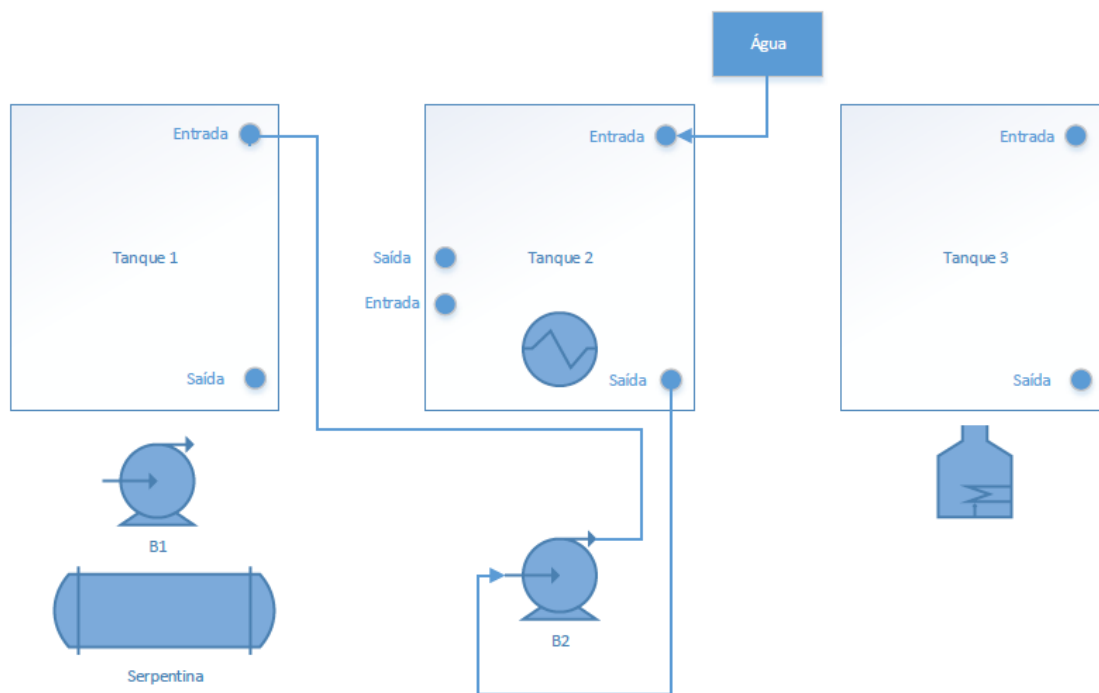


Figura 18 - Configuração da Etapa de Preparação

#### 4.1.2 - Brassagem

Esta etapa inicia-se com o despejo do malte moído no tanque de mosto. Um diagrama das conexões é apresentado na Figura 19. Neste momento é iniciada a contagem do tempo para respeitar os degraus e rampas de temperatura especificados pela receita.

O controle da brassagem segue as propostas da tecnologia HERMS. Uma das bombas conecta a saída do tanque de mosto com a entrada da serpentina do tanque de água quente e o inverso para a volta. Desta forma, a recirculação do mosto pela serpentina do tanque de água quente permite a manipulação da temperatura do tanque de mosto através do outro tanque, em que a temperatura é diretamente controlada pela resistência. O controle pode ser feito através do desligamento da bomba ou pelo chaveamento de uma solenóide que desvia o fluxo de volta para o tanque de mosto. É importante notar que a temperatura do tanque de água quente deve sempre ser maior do

que a do mosto em no mínimo 10° C, a fim de otimizar a troca de calor e facilitar o controle.

A configuração de recirculação facilita a homogeneização da temperatura de todo o mosto e de ajuda no assentamento da cama de grãos, que é essencial para a posterior filtragem do mosto.

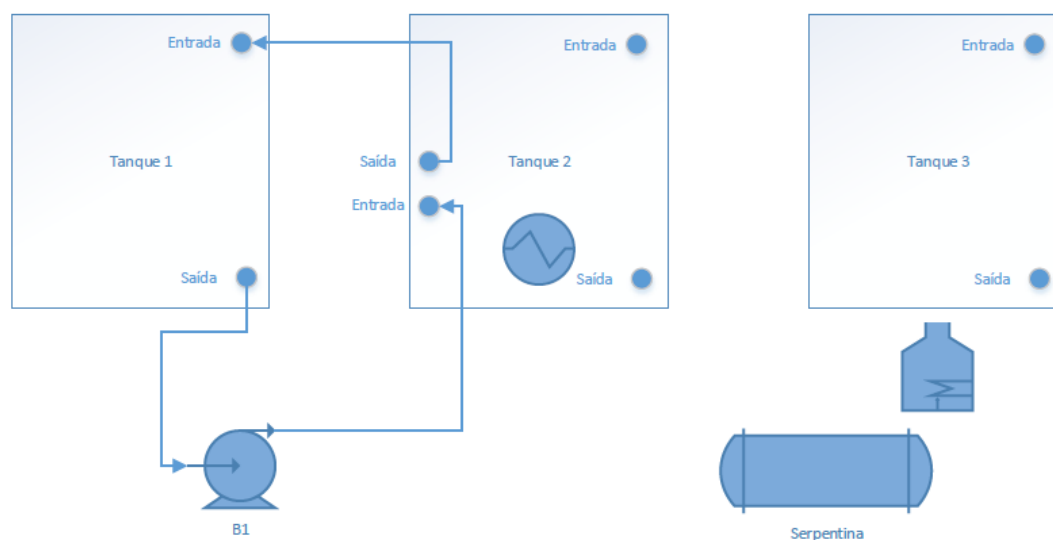


Figura 19 - Configuração na Etapa de Brassagem

#### 4.1.3 - Lavagem

Ao fim da brassagem, o mosto, filtrado pela cama de grãos, começa a ser transferido para o tanque de fervura. A taxa de absorção de açúcares dos grãos tem um ponto ótimo numa determinada relação da altura da cama de grãos com a altura do líquido cobrindo a mesma. É no momento que esta relação atinge este ponto que a lavagem se inicia.

A configuração para esta etapa é mostrada na Figura 20. O decorrer do processo da lavagem se dá com a transferência do mosto no tanque de mosto para o tanque de fervura ao mesmo tempo que a água de lavagem, que se encontra no tanque de água quente, é despejada sobre a cama de grãos da maneira mais dispersa possível. É importante observar e controlar a vazão da água de lavagem para que a relação da altura do mosto e da cama de grãos seja mantida. Idealmente este processo é terminado quando a densidade do mosto pré-fervura confere com o previsto pela receita, no entanto é possível que a água de lavagem termine e a cama de grãos se seque antes deste momento por erros de cálculos.

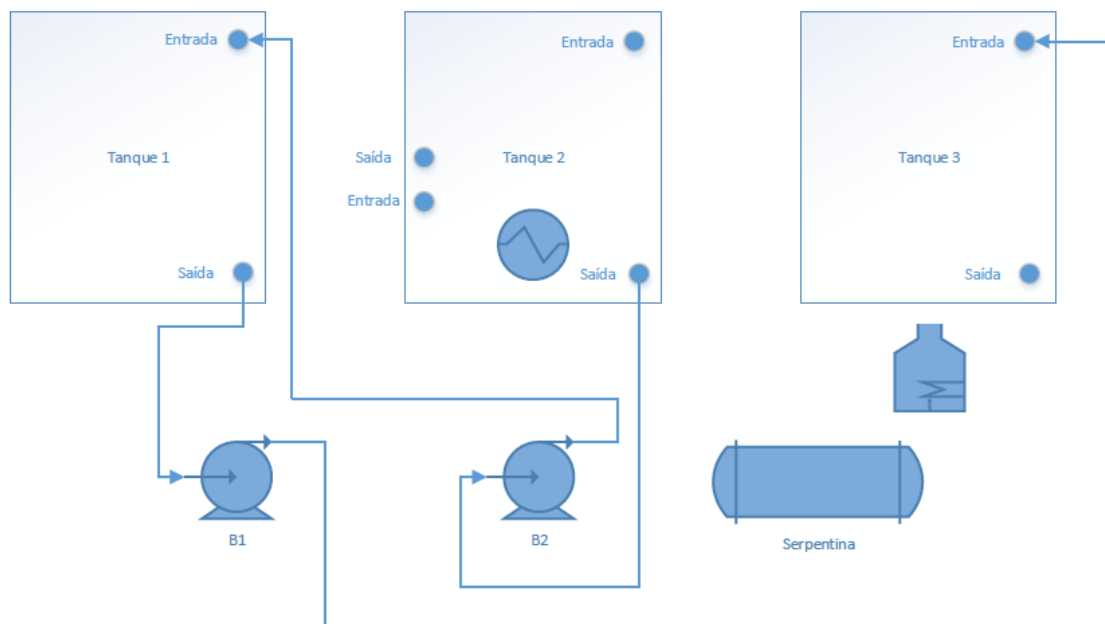


Figura 20 - Configuração da Etapa de Lavagem

#### 4.1.4 - Fervura

Com o mosto pré-fervura já transferido para o tanque de fervura, a fonte de calor deve ser ligada para que o mosto atinja seu ponto de ebulição. A contagem do tempo, utilizada para garantir a duração da fervura e os momentos de adições de lúpulos e adjuntos, é iniciada assim que o mosto atinge os 100° C.

A única preocupação além da contagem do tempo é a de manter a fonte de calor constante para que não se transborde o mosto em função do borbulhamento da fervura e para que a taxa de evaporação esteja dentro da faixa ideal. Não há necessidade de conexões nesta etapa.

#### 4.1.5 - Resfriamento

Antes do fim da fervura, deve-se adicionar gelo e água ao tanque de água quente (no momento vazio) e conectar a saída deste tanque na entrada da serpentina de resfriamento (com uma bomba), como pode-se observar na Figura 21. Nos últimos minutos da fervura, deve-se introduzir a serpentina de resfriamento no tanque de fervura para que a mesma seja sanitizada antes de sua atuação.

Assim que a fervura termina, deve-se ligar a bomba e circular a mistura de temperatura mais baixa na serpentina de resfriamento. O volume da mistura no tanque de água quente deve ser mantido através de uma fonte de água na menor temperatura

possível. A água quente na saída da serpentina pode ser reaproveitada para a limpeza do tanque de brassagem ou simplesmente despejada.

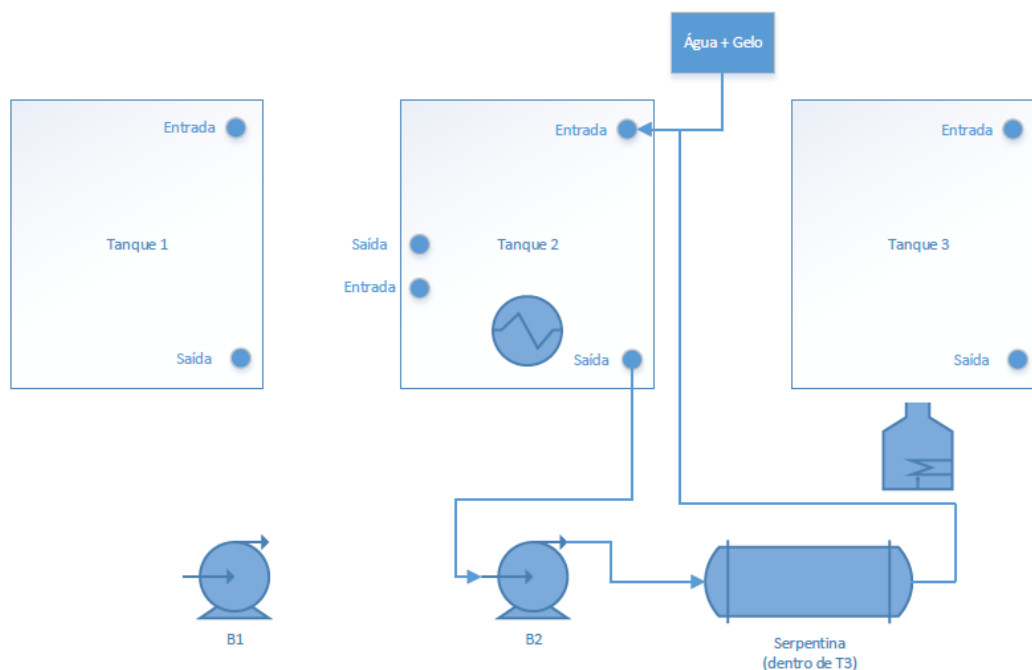


Figura 21 - Configuração da Etapa de Resfriamento

#### 4.1.6 - Instrumentação de medidas do Sistema

No tópico 3.1, discutimos a necessidade de medições e monitoramento das variáveis para cada etapa do processo. Neste tópico, ajustamos a implementação do processo para a topologia de uso de três tanques. Estes estudos combinados fornecem uma perspectiva de instrumentação de sensores que proporcionem todo o monitoramento necessário.

A partir das variáveis, seus tipos de monitoramento e a estrutura implementada para cada etapa foi montada a Tabela 11, com a separação dos tanques e suas necessidades de medições.

Tabela 11 - Variáveis de monitoramento nos tanques

Variável	Tanque 1 (de água quente)	Tanque 2 (de mosto)	Tanque 3 (de fervura)
Temperatura	Monitoramento	Monitoramento	Monitoramento
Volume	Medição	Monitoramento	-
Densidade	-	-	Medição

## 4.2 – Projetos da Planta

A partir das análises estruturais da planta e do sistema descrito no tópico anterior, foram criados diagramas de processo e instrumentação (Diagrama P&ID) em cima do procedimento definido para a planta. Durante esta etapa do trabalho, a disponibilidade da linha de vapor para os tanques ainda era desconhecida, portanto foram elaborados dois modelos que contemplavam dois diferentes cenários possíveis:

- **Projeto A:**

- Disponibilidade de vapor apenas no tanque 1.
- Bombas de recirculação para a brassagem.

- **Projeto B:**

- Disponibilidade de vapor para os três tanques.
- Não há bombas para recirculação.

Ambos os projetos fazem proveito de uma grande vantagem nesta planta: a disposição vertical dos tanques. Esta disposição permite que as transferências entre tanques em determinadas etapas sejam realizadas pela ação da gravidade e não bombas. Para aproveitar isto, a atribuição dos tanques segue a ordem: Tanque 3 – Tanque de água quente, Tanque 2 – Tanque de mosto, Tanque 1 – Tanque de fervura. O fundo falso se faz presente no tanque 2 em ambos os projetos, uma vez que é peça essencial para a filtragem do mosto após o fim da brassagem. Os projetos contemplam a mesma arquitetura de monitoramento, portanto este tópico será omitido no projeto B.

Após a elaboração dos diagramas e suas especificações, são apresentadas as adaptações realizadas e as condições da planta para a realização dos testes experimentais.

### 4.2.1 – Projeto A

O projeto A é apresentado na Figura 22. Pela não disposição de vapor no tanque de água quente, este projeto necessita da instalação de uma resistência acoplada ao mesmo. Isto pode representar uma vantagem já que é uma fonte de calor mais previsível, portanto mais controlável.

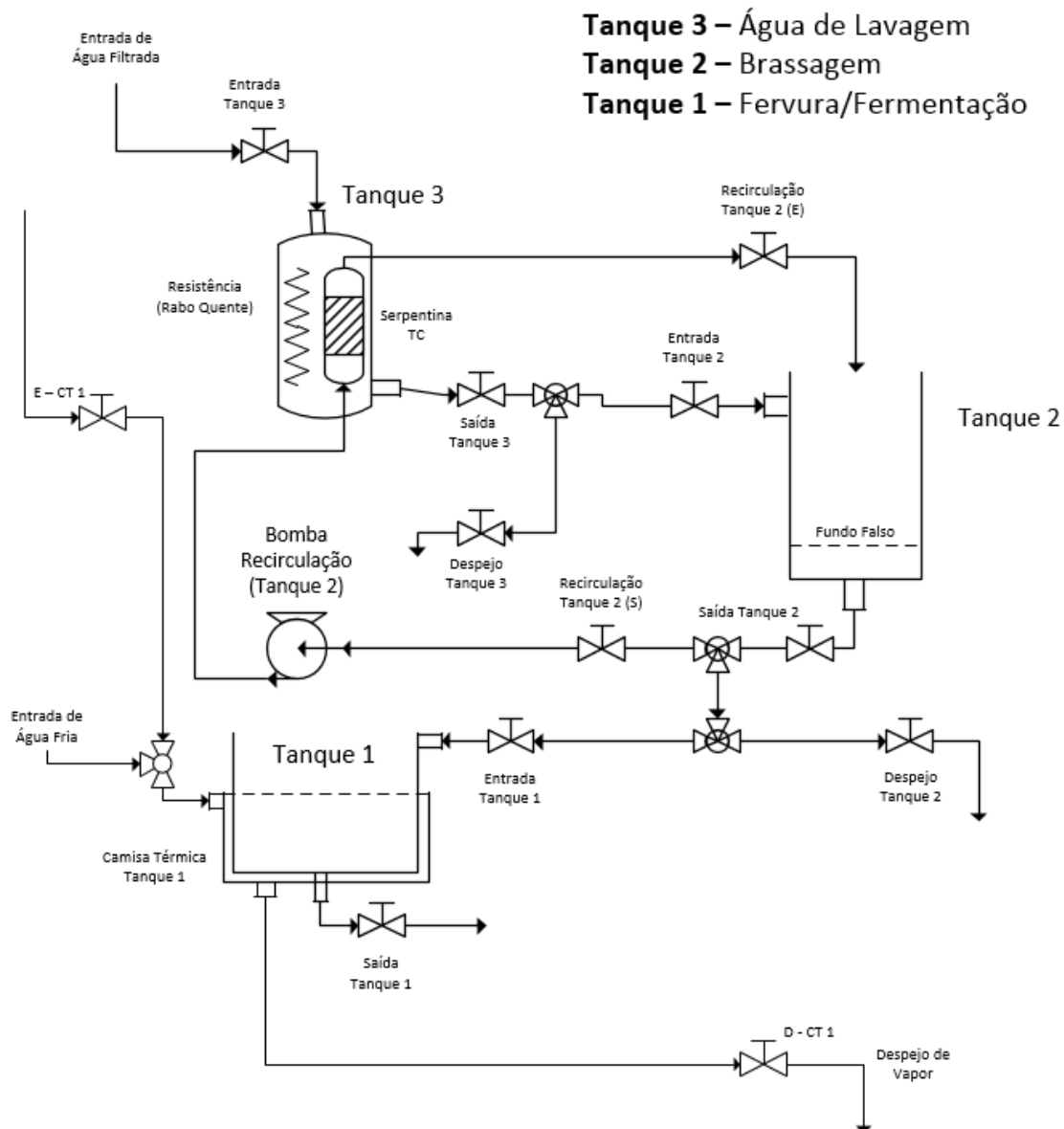


Figura 22 - Projeto A de Implementação na Planta

A maior desvantagem do projeto A é a complexidade adicionada na inclusão das conexões relativas ao uso da bomba na recirculação. A instalação de uma conexão de três vias na saída do tanque dois e de uma nova válvula para recirculação, combinadas com a instalação das respectivas vias, exige mais trabalho no projeto e na implementação das adaptações hidráulicas.

Apesar da complexidade pela inclusão da bomba, o projeto A não necessita de solenóides para o controle de temperatura nos tanques de água quente e de mosto. Além disso, as propostas de controle do sistema HERMS tornam a manutenção das temperaturas de brassagem mais precisas. Não é necessário, também, um misturador contínuo uma vez que a homogeneização da temperatura é realizada pela recirculação.



#### **4.2.2 – Projeto B**

O foco deste modelo, apresentado na Figura 23, se resume ao reaproveitamento dos recursos disponíveis pela planta original, minimizando as adaptações necessárias. A disponibilidade de vapor é aproveitada como principal fonte de calor para cada um dos tanques. A instalação de solenóides de vapor em cada um dos tanques pode variar de acordo com o grau de automação adotado.

A metodologia de acionamento relé (on/off) das fontes de calor implementada no projeto A também se aplica ao projeto B. No entanto, este projeto, ao trabalhar com o vapor como fonte de calor, carrega uma variabilidade maior da atuação e, assim, uma maior complexidade na elaboração do controle. A necessidade das solenóides que permitam o acionamento automático das fontes de calor também representa um fator de potenciais dificuldades.

A alternativa de controle da arquitetura HERMS não é possível neste modelo, uma vez que não há meios de recirculação do mosto do tanque 2 para o tanque 3. Como alternativa a este controle, será utilizado a metodologia de acionamento relé para manutenção da temperatura durante a etapa de brassagem combinado com a ação de um misturador para ajudar na homogeneização da temperatura. A desvantagem desta topologia é no assentamento da cama de grãos, que exige mais tempo.

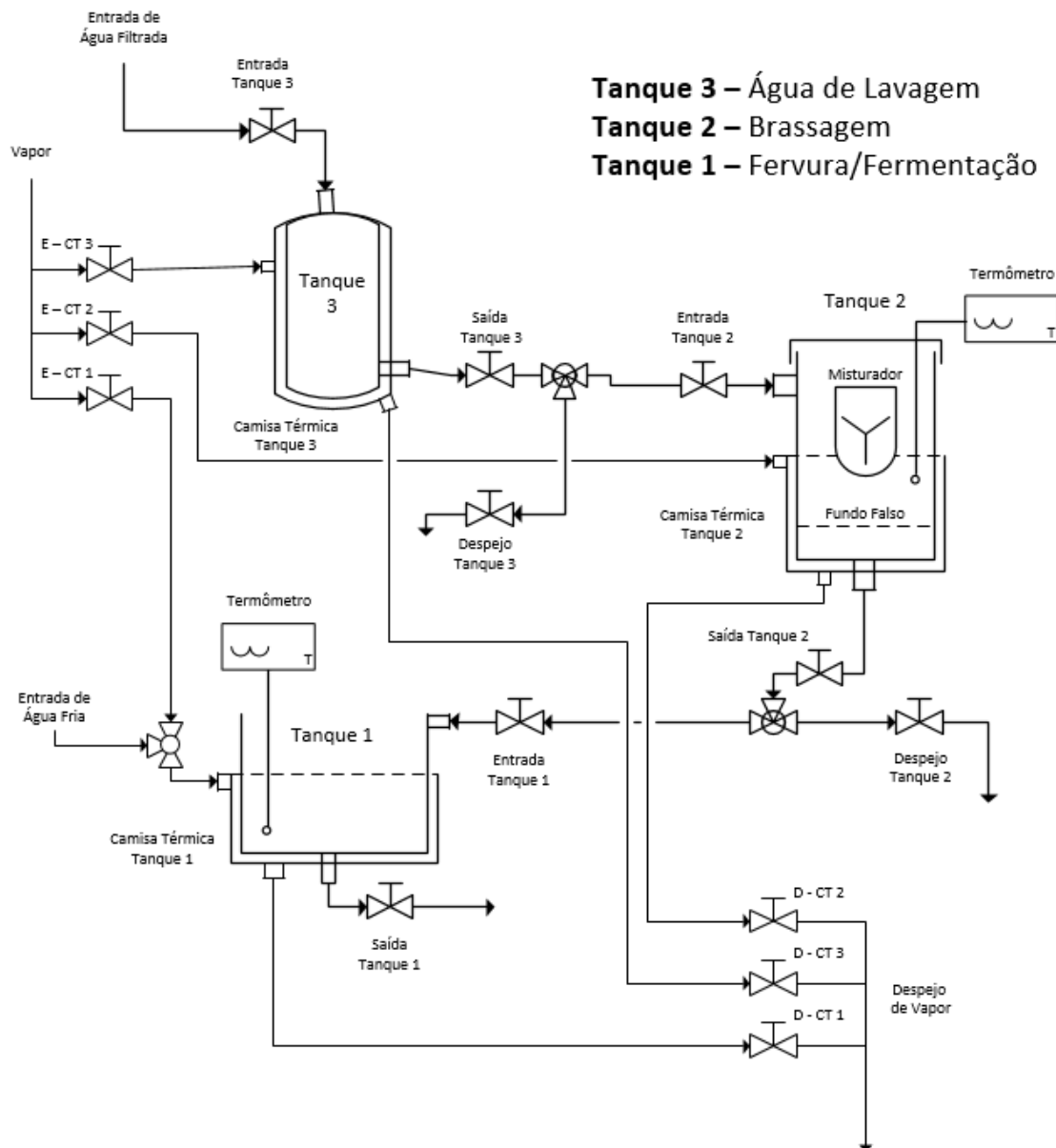


Figura 23 - Projeto B de Implementação da Planta

A disponibilidade de vapor em todos os tanques simplifica o processo de esterilização dos mesmos, o que não é possível através da instalação de uma resistência elétrica como fonte de calor. Apesar disso, os testes experimentais realizados neste trabalho não contemplam as partes críticas de contaminação (fermentação), portanto a esterilização nos tanques não se faz necessária.

#### 4.2.3 - Instrumentação de sensores

A partir da tabela apresentada no tópico 4.1, foram especificados os tipos de sensores necessários para a planta. Com o objetivo de minimização de custos, as variáveis do tipo medição foram desconsideradas na implementação de sensores, uma

vez que não necessitam de monitoramento em tempo real e podem ser obtidas pontualmente através de instrumentos manuais.

De acordo com as necessidades de monitoramento, os projetos das plantas incluíram os devidos sensores em cada tanque. Vale ressaltar que a arquitetura abordada aqui tem como objetivo a minimização da utilização de sensores sem o comprometimento da qualidade de controle do processo. A Tabela 12 apresenta os tipos de sensores contemplados.

Tabela 12 – Instrumentação de sensores dos tanques

	Tanque 1	Tanque 2	Tanque 3
Temperatura	Sim	Sim	Sim
Volume	Não	Sim	Não

#### 4.2.4 - Adaptações Realizadas

Levando em consideração o escopo dos testes experimentais do projeto e também as vantagens e desvantagens das instalações propostas, foram realizadas as adaptações necessárias na planta piloto disponível no LADEQ/EQ/UFRJ. Com as dificuldades de manuseio do tanque 1, o mesmo foi descartado do escopo de testes.

A conexão da linha de vapor ao tanque 2 foi restaurada e a do tanque 1 foi desobstruída, possibilitando a utilização de vapor em ambos os tanques. Na linha de entrada de vapor foi instalada uma única solenóide que libera o acesso aos dois tanques, o direcionamento do vapor a um, outro ou ambos é feito através das válvulas manuais na entrada da camisa de cada tanque. A bomba de recirculação foi descartada por necessitar também da inclusão de novas vias e válvulas.

### 4.3 - Instrumentação

Neste tópico, detalhamos a instrumentação implementada para realização dos testes experimentais, apresentando conexões e configurações dos dispositivos.

#### 4.3.1 - Arquitetura

A arquitetura de implementação teve como inspiração a plataforma *open-source* Arduino. A escolha dos dispositivos físicos para sensoramento e atuação (termômetros e relé) foi feita com base no grau de compatibilidade com a plataforma. Na Figura 24 mostramos um diagrama representativo da arquitetura adotada.

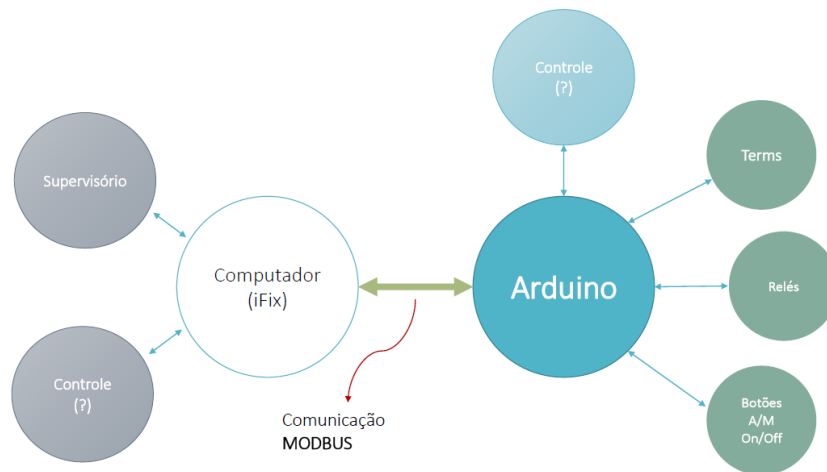


Figura 24 - Arquitetura de instrumentação adotada

Nesta topologia, a placa Arduino Uno funciona como central de comunicação entre o sistema supervisório e os dispositivos utilizados. O processamento digital dos dados do termômetro, o envio da lógica de chaveamento para o relé e a troca de dados com o computador de supervisão são responsabilidades da placa. A Figura 25 apresenta uma foto do arranjo em uso.



Figura 25 - Bancada de trabalho anexa à planta

Para o sistema de supervisão foi adotada a versão demo do software Proficy iFix, especializado em controle e supervisão de processos industriais. Ele serviu como plataforma de monitoramento dos sensores, interface de comandos para o Arduino e registrador de dados dos testes experimentais.

### **4.3.2 – Comunicações**

As comunicações implementadas na instrumentação estão de acordo com o diagrama apresentado na Figura 24. A placa arduino comunica-se com os instrumentos e com o computador supervisor. Não há comunicação direta dos dispositivos com o computador.

O protocolo ModBus é utilizado na interface entre o Arduino e o software iFix, através da conexão USB da placa com o computador e por meio de uma comunicação de porta serial virtual (simulada pelo driver do software Arduino instalado no computador). Este protocolo permite o acesso de registradores de dados na placa Arduino pelo software iFix.

O termômetro digital DS18B20 envia seus dados digitalmente para a placa Arduino por meio de um fio único de comunicação, utilizando a tecnologia One-Wire. Os pacotes de dados contém o respectivo código serial do termômetro. Desta forma, o próprio Arduino consegue interpretar os dados recebidos (através de bibliotecas externas utilizadas no código) e identificar qual termômetro enviou quais dados.

O envio de comandos de chaveamento de estados para o relé Songle SRD é feito através de um sinal digital simples com lógica High/Low pela placa Arduino. O relé, por sua vez, controla a abertura da válvula solenóide através do corte de sua alimentação.

### **4.3.3 – Configuração Arduino**

A configuração da placa Arduino é feita através de código programado e compilado na própria plataforma de software da tecnologia Arduino. A configuração é enviada para a placa por meio da interface USB. A disposição física é demonstrada na Figura 26.



Figura 26 - Arduino conectado aos dispositivos na planta

Todos os códigos utilizados são programados no IDE da plataforma, como exemplificado na Figura 27. Estes códigos recebem o auxílio da inclusão das bibliotecas externas abertas One-WireBus e Dallas-Temperature, construídas para permitir a interpretação de dados recebidos pelo termômetro, e SimpleModBus, feita para contemplar o protocolo de comunicação ModBus através da porta USB.

```
TempReles | Arduino 1.0.5+2
File Edit Sketch Tools Help

TempReles
+/-

void updateRelays() {
  if (software) {
    // Caso esteja sendo controlado pelo iFix
    for (int i = 0; i < numberofRelays; i = i+1) {
      if (analogReads[i]) {
        relayStates[i] = HIGH;
      } else {
        relayStates[i] = LOW;
      }

      digitalWrite(relayPins[i], relayStates[i]);
    }
  } else {
    // Caso esteja sendo controlado manualmente
    for (int i = 0; i < numberofRelays; i = i+1) {
      if (previous[i] != (digitalRead(buttonPins[i]))) {
        readings[i] = (digitalRead(buttonPins[i]));
      } else {
        readings[i] = (digitalRead(buttonPins[i]));
      }

      // If the input just went from LOW and HIGH and we've waited long enough
      // to ignore any noise on the circuit, toggle the output pin and remember
      // the time
      if (readings[i] == HIGH && previous[i] == LOW && millis() - time[i] > debounce) {
        if (relayStates[i] == HIGH) {
          relayStates[i] = LOW;
        } else {

```

Figura 27 - Trecho de código de configuração do Arduino

Os códigos de setup inicial são rodados toda vez que o Arduino é ligado na alimentação ou quando se executa um reset da placa (é feito toda vez que se envia uma configuração nova ou pode ser acionado manualmente). Estes códigos iniciais são responsáveis pela organização das variáveis que a placa utiliza (especificar quais

endereços de registradores guardarão as temperaturas, o estado atual e o desejado dos relés).

A rotina de execução do Arduino nesta arquitetura segue as seguintes tarefas, nesta ordem: ler e interpretar os dados de temperatura; gravá-los nos endereços reservados para estes dados nos registradores do ModBus (para que o sistema supervisorio possa lê-los); ler os registradores que guardam o valor desejado do estado do relé (que podem ser modificados pelo sistema supervisorio) e mudar o estado do relé de acordo com o solicitado (caso necessário).

#### 4.3.4 – Configuração Sistema Supervisorio

O sistema supervisorio implementado no software Proficy iFix tem como principal objetivo estabelecer uma interface visual para monitoramento e atuação na planta. Este sistema recebe dados de temperatura e envia comandos de atuação do relé para a placa Arduino.

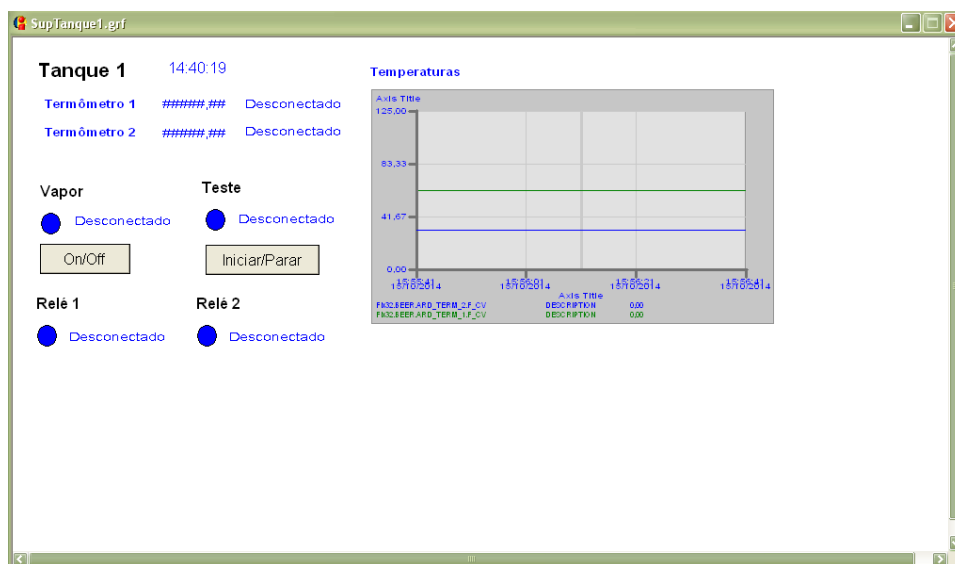


Figura 28 - Interface de monitoramento implementada no software Proficy iFix

A interface visual foi desenvolvida para monitorar os termômetros de cada tanque e gerenciar o tempo de cada teste. Botões foram adicionados para o acionamento do relé e o início da cronometragem de cada teste. Apresentamos a disposição da interface na Figura 28.

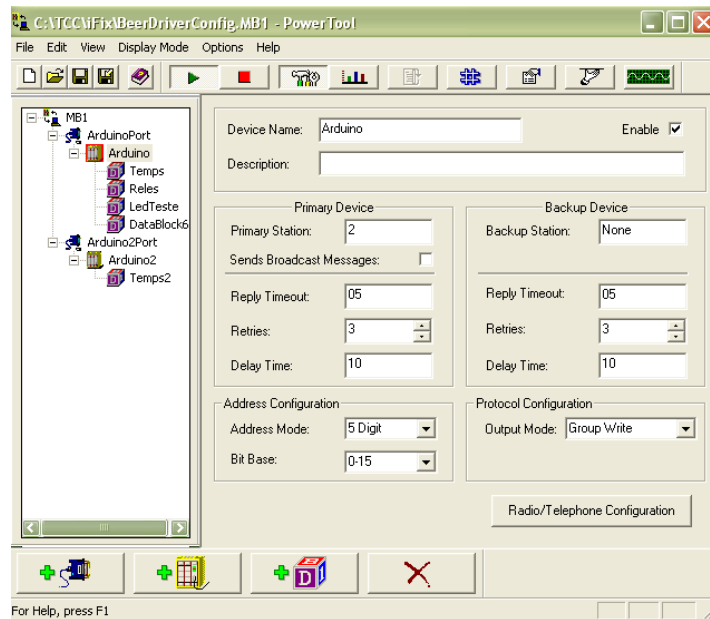


Figura 29 - Configuração dos parâmetros da comunicação ModBus

A configuração dos parâmetros do protocolo ModBus dentro do software é feita com base nos padrões estabelecidos pela biblioteca de ModBus utilizada na programação da placa Arduino. O software Proficy iFix dispõe de um componente, denominado MB1, que implementa o driver desta comunicação e permite a configuração da mesma. A Figura 29 demonstra a tela de configuração do driver. Os parâmetros indicam endereços de registradores que contemplam dados que podem ser acessados por ambas as partes. Endereços são listados baseados nos seus tipos (tendo como referência o dispositivo slave – no caso a placa arduino), como apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 - Endereços de variáveis na arquitetura de comunicação ModBus

Endereços	Tipo de variável
00001 – 09999	Saídas digitais
10001 – 19999	Entradas digitais
30001 – 39999	Entradas analógicas
40001 - 49999	Saídas analógicas

Após os parâmetros estarem configurados e a comunicação testada e estabelecida, os endereços dos registradores da placa Arduino são adicionados na lista de variáveis contempladas pela rotina do programa com seus respectivos nomes e



funções. Esta listagem, apresentada na Figura 30, serve para designar o nomes utilizados para cada endereço de comunicação, de forma que as variáveis podem ser utilizadas em outros componentes do software (como por exemplo no desenvolvimento das interfaces gráficas).

	Tag Name	Type	Description	Scan Time	I/O Dev	I/O Addr	Curr Value
1	ARD_TERM_1	AI	Temperatura do Termometro 1 do Arduino	1	MB1	Arduino:40001	????
2	ARD_TERM_2	AI	Temperatura do Termometro 2 do Arduino	1	MB1	Arduino:40002	????
3	ARD_TERM_3	AI	Temperatura do Termometro 3 do Arduino	1	MB1	Arduino:40003	????
4	TEMP1_SP	AO	SetPoint de Temperatura do Tanque 1	—	SIM	0	0.00
5	ARD_TERM_1_ON	DI	Conexão do Termometro 1 do Arduino	1	MB1	Arduino:00001	????
6	ARD_TERM_2_ON	DI	Conexão do Termometro 2 do Arduino	1	MB1	Arduino:00002	????
7	ARD_TERM_3_ON	DI	Conexão do Termometro 3 do Arduino	1	MB1	Arduino:00003	????
8	AUTO_MAN	DI		1	MB1	Arduino:00006	????
9	RELE_1	DI	Relé 1	1	MB1	Arduino:00004	????
10	RELE_2	DI	Relé 2	1	MB1	Arduino:00005	????
11	TESTANDO	DO	Teste sendo realizado	—	SIM	0:0	OPEN
12	VALVMANUAL_AB_TQ	DO	Abertura da válvula manual Tanque 1	—	SIM	0:0	OPEN
13	VALVMANUAL_AB_TQ	DO	Abertura da válvula manual Tanque 2	—	SIM	0:0	OPEN
14	TIMER_TESTE	TM	Timer de Tempo decorrido do Teste	—	—	—	????
15	BEER	TX	Controle de um Processo Cervejeiro	1	SIM	0	

Figura 30 - Listagem de variáveis configuradas no sistema supervisorio

O software Proficy iFix implementa também um banco de dados que guarda todo o histórico de variáveis selecionadas pelo usuário, de acordo com a listagem mencionada anteriormente. Estes dados podem ser posteriormente exportado em formatos compatíveis com outros softwares de processamento de dados (como por exemplo o Microsoft Excel ou o MatLab).

## 5 – Testes Experimentais

A partir do estudo feito em torno das condições e das funcionalidades da planta, foram elaborados testes experimentais para identificar propriedades do funcionamento da mesma em situações que assemelham-se à etapas do processo de produção de cerveja descrito neste projeto. Este trabalho contempla a execução de três diferentes testes, todos com o objetivo de identificação de características de comportamento da planta. Como mencionado anteriormente, o tanque 3 não apresentava condições para realização dos testes portanto foi descartado desta etapa.

### 5.1 – Estrutura dos testes

A observação das variáveis é estruturada com base nas potenciais necessidades de monitoramento apresentada e contemplada pela instrumentação proposta nos modelos. Condições iniciais dos testes também são consideradas para auxiliar nas conclusões. A listagem dos registros escolhidos são enumerados na Tabela 14.

Tabela 14 - Variáveis registradas nos testes

Variável	Medição
Tempo decorrido	Contínua
Temperatura (líquido e ambiente)	Contínua
Volume	Pontual (início, fim)
Pressão do vapor	Pontual

A distribuição de temperatura dentro dos tanques também é um fator de grande importância, por isso o arranjo dos termômetros dentro dos tanques foi desenhado de forma que permitisse a caracterização desta distribuição. Na Figura 31 demonstramos a instalação com uma foto.



Figura 31 - Foto do arranjo dos termômetros no tanque 1

Na instrumentação de cada um dos testes, foram utilizados dois termômetros para cada tanque. O tanque 1, no primeiro teste, apresentou um termômetro no centro do líquido e outro logo acima do tanque para registrar a temperatura externa no topo do tanque. Nos outros testes o tanque 1 foi monitorado com um termômetro no centro do líquido e o outro também coberto pelo líquido mas posicionado mais próximo da borda lateral do tanque e mais próximo da superfície do líquido. O desenho esquemático é apresentado na Figura 32.

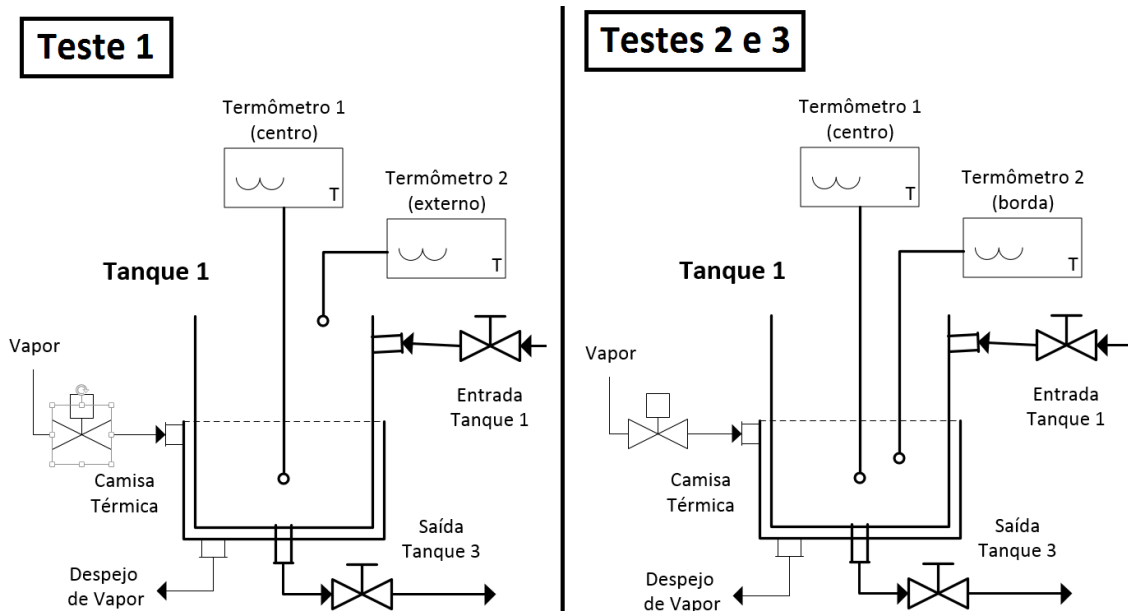


Figura 32 - Instrumentação Tanque 1

O tanque 2 foi configurado de forma similar à do tanque 1 nos testes 2 e 3 (Figura 33), no entanto o termômetro da borda foi posicionado um pouco mais próximo à camisa térmica.

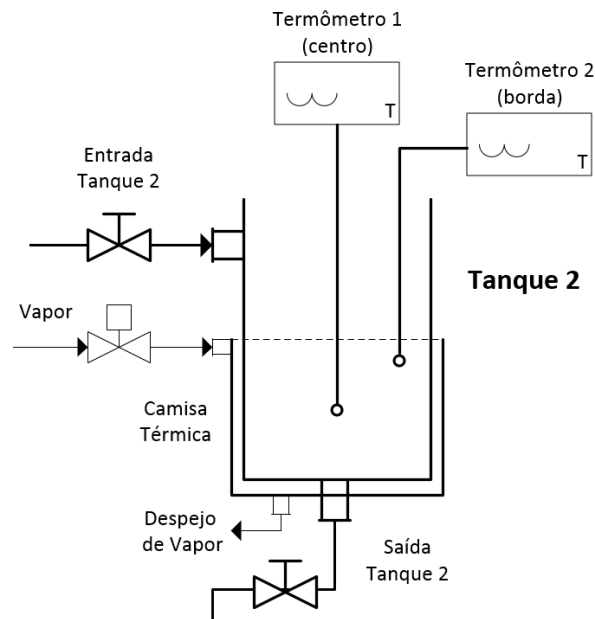


Figura 33 - Instrumentação Tanque 2

## 5.2 – Elaboração dos testes

Neste tópico é discutida a elaboração de cada um dos testes. Os comportamentos observados são as respostas com malha aberta da planta à dois tipos de entradas diferentes: degrau (teste 1) e onda quadrada (testes 2 e 3). Pela proximidade de objetivo e operação dos testes 2 e 3, a elaboração dos mesmos foi apresentada em conjunto.

O principal foco dos testes foi trabalhar com a planta em condições próximas às apresentadas pelo processo. Para isso, foram diferenciadas as etapas em que o controle das condições é importante (como a brassagem e lavagem) e as etapas que exigem o trabalho da planta em condições de limite (como a fervura).

### 5.2.1 – Teste 1

Como teste inicial, foi introduzida uma entrada do tipo degrau a fim de testar as condições da planta em situações limites de operação. O teste contemplou operações com os extremos das temperaturas do processo (desde a temperatura ambiente à de fervura) e observação de condições transitórias pelas temperaturas estratégicas para o controle (entre 40 °C e 80 °C). O trabalho em condições extremas do processo permitiu a observação da estabilidade e funcionamento planta e dos instrumentos em tais operações.

Outro grande objetivo deste primeiro teste foi o de observar e identificar possíveis problemas na instrumentação implementada, uma vez que foi a primeira vez

em que foram utilizados todos os instrumentos de forma integrada. Por este motivo, este teste se limitou somente à utilização tanque 1.

O teste começa com uma entrada degrau na saída de vapor para o tanque 1. Esta entrada permanece aberta até atingir as condições de saturação de temperatura, ou seja, a fervura da água contida no tanque 1. Após atingir tal condição, o vapor é mantido aberto por um tempo determinado para observar-se a taxa de evaporação da planta. Após este tempo, a entrada é desligada e o tanque é deixado em repouso. Os registros do teste permanecem um tempo determinado após o desligamento do vapor para que se observe o comportamento do sistema em condições de resfriamento (sem agitação). Após este período é terminado o teste.

### **5.2.2 - Testes 2 e 3**

Os testes 2 e 3 têm como objetivo a caracterização da operação da planta em condições de temperatura próximas às das etapas do processo em que o controle de temperatura é necessário. A faixa em questão é de 40 °C a 80 °C. A diferença entre os dois testes é a de que no teste 2 a fonte de vapor é usada alternadamente para cada tanque (não há uso simultâneo da mesma fonte de vapor) enquanto no teste 3 a fonte é usada para os dois ao mesmo tempo. O teste 3 também contempla uma rápida (2 minutos) agitação manual ao fim.

A escolha da entrada como onda quadrada se deve ao fato desta abordagem identificar melhor condições de atuação no sistema, expondo características potencialmente dificultadoras do controle (atrasos e não linearidades). Tempos de resposta à abertura e fechamento da válvula, por exemplo, é um dos fatores que pode implicar numa maior complexidade de atuação e, conseqüentemente, de controle.

Além das condições de atuação, este teste teve como intuito a observação de variáveis internas do processo que influenciam no resultado. A determinação das taxas de calor fornecidas pela vapor a cada tanque, a dispersão de calor dentro do líquido e a interferência da agitação são observadas nestes testes.

Ambos os testes estão baseados numa entrada de onda quadrada, com período aproximado de 15 minutos, na fonte de vapor para cada um dos tanques. A diferença fundamental entre os testes 2 e 3 é a de que no teste 2 a fonte de vapor está aberta o tempo todo, alternando-se entre os tanques de 15 em 15 minutos, e no teste 3 a fonte é aberta e fechada nesta mesma frequência, mas com a saída para ambos os tanques sendo aberta simultaneamente.

### 5.3 – Condições dos testes

A seguir são enunciadas as condições em que os testes foram realizados. O foco deste tópico é apresentar todas as variáveis não monitoradas que possam influenciar o comportamento da planta nos processos testados.

Todos os testes envolveram a utilização de água como fluido de processo e procederam com o tanque aberto. A fonte de calor utilizada foi vapor nas camisas térmicas dos tanques, diferenciando-se as condições de utilização no teste 3 (onde ambas foram usadas simultaneamente).

#### 5.3.1 – Teste 1

O primeiro teste foi realizado integralmente no tanque 1. As condições iniciais e finais do mesmo são analisadas, para que seja possível obter conclusões sobre as taxas de evaporação do equipamento. A Tabela 15 apresenta as anotações levantadas.

Tabela 15 - Condições levantadas Teste 1

Medida	Início	Fim
Altura do líquido	55 cm	49 cm
Volume utilizado	150 L	134 L
Pressão do Vapor de Entrada	1,05 kgf	-
Hora	14:56	18:10
Temperatura Inicial	25 °C	-

#### 5.3.2 – Teste 2

O segundo teste contemplou a utilização dos tanques 1 e 2. O volume para cada um dos tanques foi escolhido com o intuito de cobrir a camisa térmica de cada um. Este teste não envolveu temperaturas de fervura, portanto a medição de altura do líquido e os cálculos de volume foram realizados apenas para as condições iniciais. No fim do teste, os tanques foram esvaziados ainda com a temperatura sendo registrada. Apresentamos as condições na Tabela 16.

Tabela 16 - Condições levantadas Teste 2

Medida	Tanque 1	Tanque 2
Altura do líquido	45 cm	55 cm
Volume utilizado	125 L	150 L
Pressão do Vapor de Entrada	1,05 kgf	1,05 kgf
Utilização do Vapor	Alternada	Alternada
Hora	14:40 - 16:00	14:40 - 16:00
Temperatura Inicial	24,5 °C	24,5 °C

### 5.3.3 – Teste 3

As condições do teste número 3 se assemelham às do segundo teste. Este teste também foi realizado com a operação dos tanques 2 e 3. As medições foram apenas das condições iniciais dos tanques e uma agitação manual rápida (2 minutos) foi realizada neste teste, afim de simular o comportamento da planta sob ação de um agitador e também para observar se a diferença de temperatura registrada pelos termômetros diminuía. A pressão do vapor no início do teste estava baixa (abaixo de 0,8 kgf), no entanto foi estabilizada no decorrer do teste. A Tabela 17- Condições levantadas Teste 3 apresenta as condições.

Tabela 17- Condições levantadas Teste 3

Medida	Tanque 1	Tanque 2
Altura do líquido	45 cm	55 cm
Volume utilizado	125 L	150 L
Pressão do Vapor de Entrada	1,1 kgf	1,1 kgf
Utilização do Vapor	Simultânea	Simultânea
Hora	17:00 – 18:26	17:00 – 18:26
Temperatura Inicial	26 °C	25,5 °C

## 5.4 – Resultados dos testes

A seguir serão apresentados os resultados dos testes, com os respectivos registros e análises.

### 5.4.1 – Teste 1

Na Figura 34, é mostrado o gráfico das temperaturas registradas durante o teste. Como a legenda informa: a linha superior em azul representa o registro da temperatura dentro do tanque, a linha vermelha apresentando alta taxa de ruído é a temperatura do ar medida no topo do tanque e a linha inferior verde representa a abertura do vapor. A linha vertical indica o momento em que o vapor foi cortado.

A primeira conclusão que podemos retirar deste teste é a de que os instrumentos funcionaram corretamente. O registro de temperatura de saturação marcou a temperatura esperada (100 °C) o que indica que suas indicações estão condizentes com o real. O ruído apresentado pelo termômetro de medição da temperatura o ar é aceitável dada a variabilidade de tal grandeza para o ar quando submetido a tais condições.

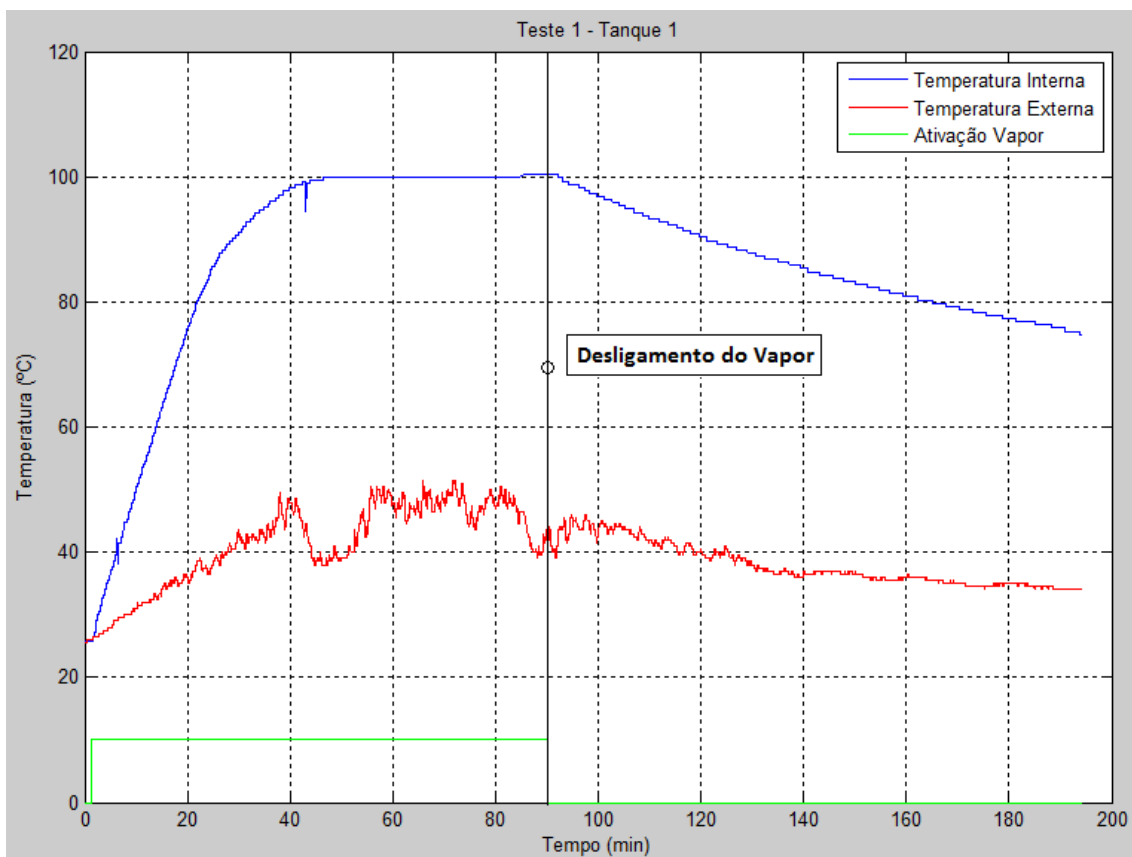


Figura 34 - Gráfico dos registros de temperatura no Teste 1

A resposta obtida pelo degrau aplicado no vapor apresenta comportamento visivelmente linear na faixa de 25 °C a aproximadamente 85 °C, o que se espera de um



sistema integrador de primeira ordem. A linearidade se dá pelo fato da taxa de transferência de calor estar em condição de saturação, ou seja, a taxa de calor cedido pelo vapor para a água está em seu valor máximo. O ganho do vapor sobre a planta pode ser estimado em tal regime (em °C/minuto, pela inclinação da reta).

Na faixa entre 85 °C e 100 °C a resposta se assemelha a uma resposta de um sistema de primeira ordem realimentado com setpoint de entrada em 100 °C. Curiosamente, este comportamento pode ser comparado a este perfil ao notar-se que a taxa de transferência de calor feita do vapor para a água no tanque é proporcional à diferença de temperatura entre os dois. Esta diferença funcionaria como o sinal de erro do sistema (a realimentação) da planta que controla o ganho da planta, diminuindo a sua ação quando próxima aos 100 °C, já que é o limite inferior da temperatura do vapor.

Um comportamento visualmente notado foi o de que na faixa linear de aumento de temperatura da planta (de 25 °C a 85 °C) a tubulação de despejo de vapor estava liberando água enquanto na outra faixa (85 °C a 100 °C) a mesma estava despejando vapor. Isto é um fato que representa que a taxa de calor fornecida pelo vapor é maior na faixa linear.

É possível reparar que nas temperaturas em que a evaporação não estava ocorrendo, a temperatura do ar no topo do tanque acompanhou linearmente a temperatura da água do tanque, descartando-se os ruídos. O ruído se intensificou durante a evaporação (o que se espera já que a agitação do ar no topo do tanque é maior) mas a média da temperatura registrada por este termômetro não continuou a subir. Na verdade, de forma curiosa, a temperatura registrou uma queda repentina no momento em que a evaporação foi iniciada. Uma queda de mesmo aspecto foi registrada próxima ao momento de desligamento do vapor. Observa-se que a taxa de ruído é menor em temperaturas menores que 85 °C, tanto na etapa de aquecimento quanto na etapa de resfriamento. Isto é um possível indicativo de que este ruído está diretamente relacionado à temperatura da água no tanque.

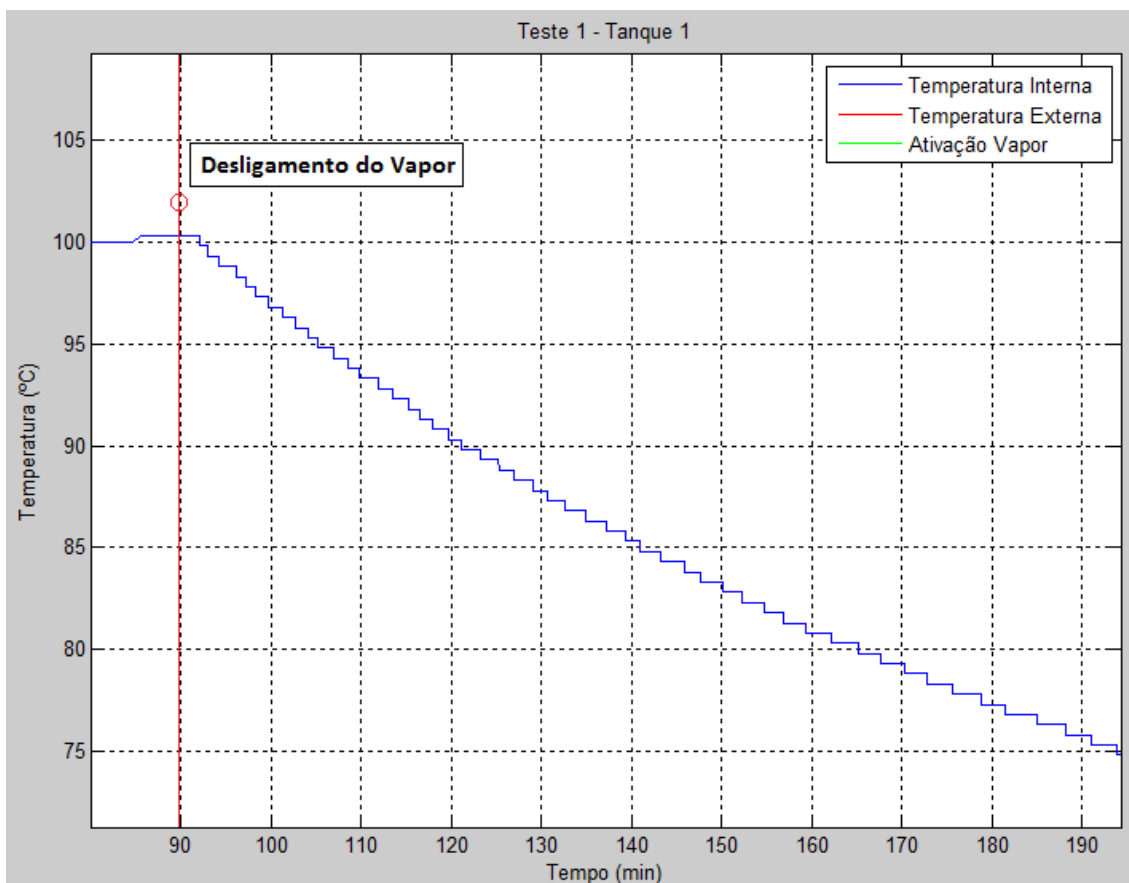


Figura 35 - Gráfico da parte de resfriamento do Teste 1

Aproximadamente três minutos após o desligamento do vapor, observamos um lento decaimento da temperatura. Isto pode ser explicado pela perda de calor da planta para o ambiente que, por ser muito menor do que o calor fornecido pelo vapor, só evidencia sua atuação após o corte da fonte de calor. Este curto período de três minutos após o desligamento representa a energia que a água estava utilizando para evaporar parte de sua massa. Somada à esta energia, temos também a pequena parcela de energia entregue pelo vapor que permaneceu na camisa. Após a perda destas energias, o calor perdido se apresenta na decaimento da temperatura.

É possível observar que a curva de resfriamento não é linear. A explicação para este fato é novamente a de que a troca de calor é proporcional à diferença de temperatura entre os corpos, portanto quanto menor a temperatura do líquido, menor é a perda de calor para o ambiente. Apesar das diferenças de temperatura desta troca e da troca efetuada pelo vapor no período linear serem próximas, o fato da água quente e o ambiente estarem em repouso faz com que a troca de calor não atinja seu valor de saturação. Por este motivo, a linearidade não é conferida neste caso.

### 5.4.2 - Teste 2

O segundo teste visou a utilização de um sinal de uma onda quadrada de período 15 minutos como entrada. Pelo alto ganho de calor proporcionado pela fonte de vapor e pelo objetivo de não trabalhar em temperaturas fora da faixa de trabalho, o proceder do teste apresentou duas aberturas do vapor para o tanque 1 e somente uma para o tanque 2. Este teste permitiu uma melhor visão sobre a atuação da abertura do vapor sobre a temperatura no tanque e também condições de homogeneidade da temperatura dentro do tanque.

#### 5.4.2.1 - Tanque 1

O gráfico das temperaturas do tanque 1 são apresentados na Figura 36.

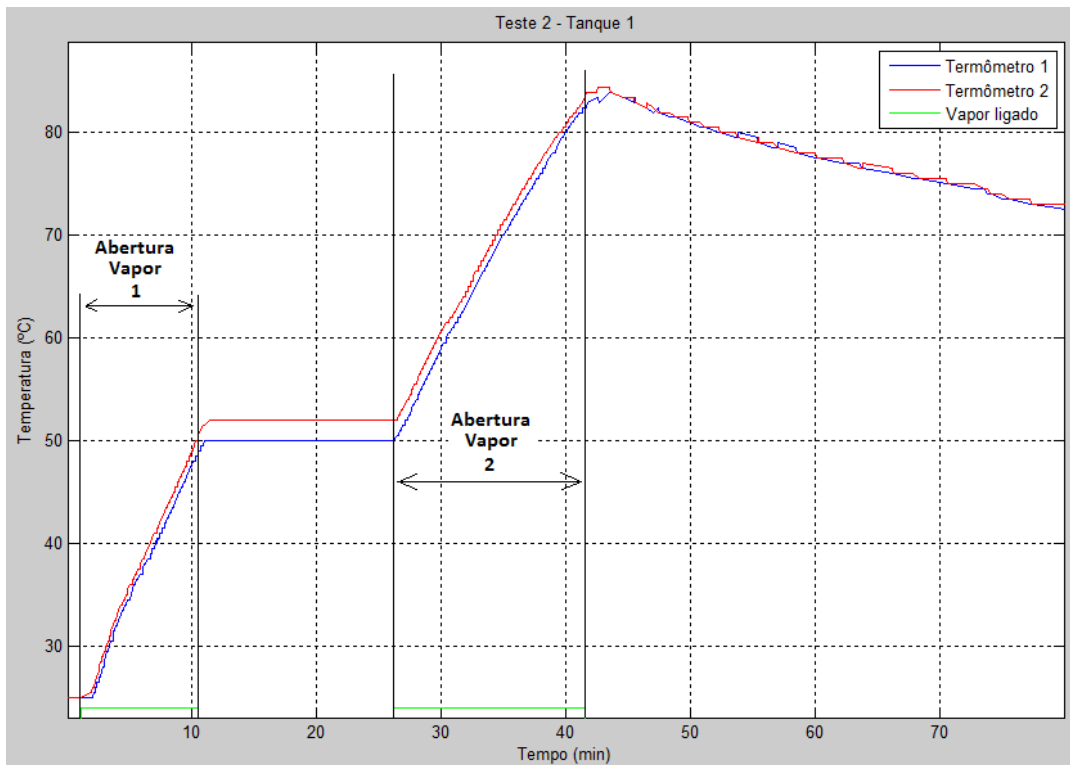


Figura 36 - Gráfico de temperaturas do tanque 1, teste 2

O elemento mais notável neste gráfico é a diferença entre o comportamento da planta após o desligamento do vapor na primeira abertura e na segunda abertura. Após o primeiro fechamento, a planta apresentou uma perda de calor para o ambiente desprezível, mantendo uma temperatura constante. Já no segundo fechamento, a temperatura imediatamente começou a diminuir. Como evidenciado no teste 1, é possível verificar isso pela diferença de temperatura com o ambiente. É interessante observar que a curva de resfriamento após o segundo fechamento indica que, a esta temperatura, o intervalo de tempo foi o suficiente para registrar-se o resfriamento, já o

intervalo de tempo após o primeiro corte indica que este nesta temperatura o decaimento de temperatura é mais lento o suficiente para não aparecer.

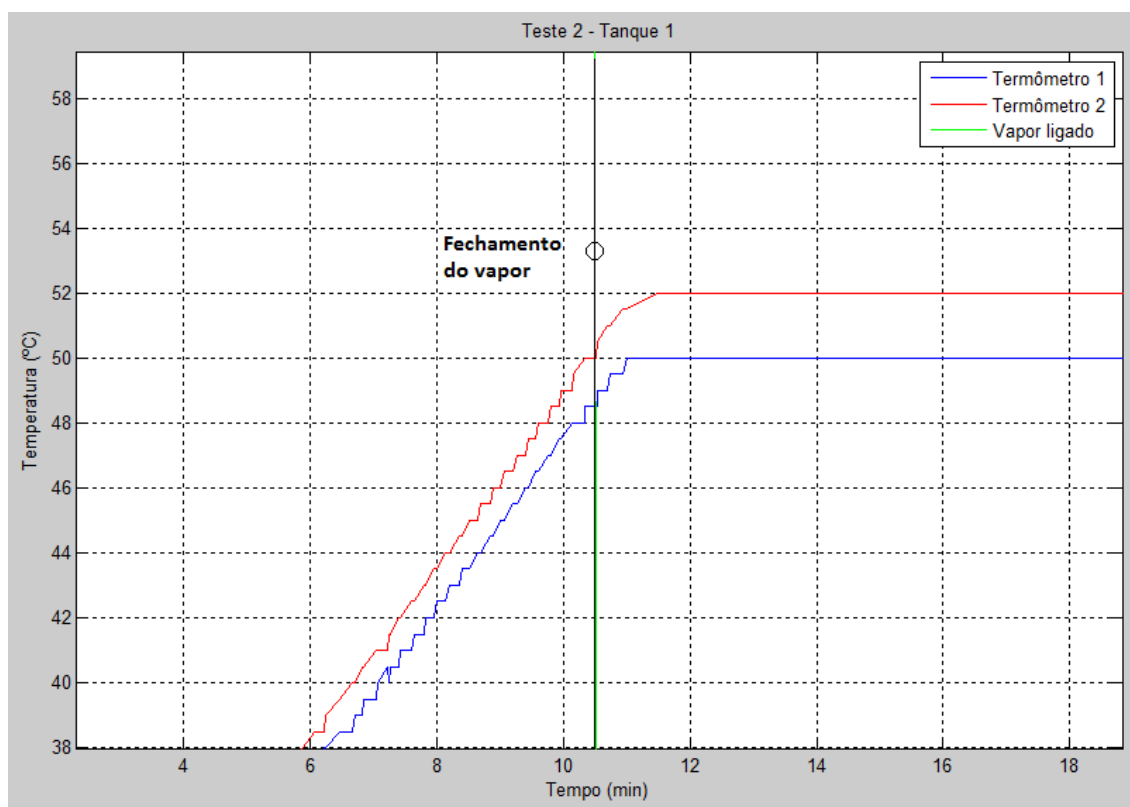


Figura 37 - Tanque 1, teste 2, 'Overshoot' da temperatura

Outro aspecto que é possível se observar é a inércia do aumento de temperatura após o fechamento do vapor nos dois casos. A Figura 37 mostra em detalhes este 'overshoot' do primeiro caso. Para ambos os termômetros a temperatura se estabilizou aproximadamente 2 °C acima da temperatura registrada no momento de fechamento do vapor. Esta diferença representa o limite da margem de aceitação do controle exigido no processo. Isto aponta como a estratégia de controle de temperatura nas condições desta planta deve considerar as dinâmicas correspondentes a esta inércia.

Um pequeno atraso na atuação na temperatura é perceptível na primeira abertura de vapor do teste, diferentemente da segunda liberação, em que a temperatura começa a aumentar no momento da abertura. Este fato pode ser explicado pelo preenchimento da camisa térmica com o vapor condensado. Pela utilização na primeira liberação, a segunda não necessitou deste pequeno atraso para preencher a camisa térmica.

A diferença de inclinação entre as duas atuações do vapor pode ser verificada também. Na primeira abertura, foi verificada uma inclinação de 2,9 °C/min enquanto na segunda foi de aproximadamente 2 °C/min

A disposição dos termômetros também demonstrou como a temperatura dentro da água dentro do recipiente não é homogênea. A diferença de temperatura registrada nos termômetros se manteve até no momento em que a planta encontrava-se em repouso, inclusive apresentando sua maior discrepância, de 2 °C. Foi possível também observar que nas condições de maior temperatura esta diferença diminuiu até que as mesmas se igualaram durante o resfriamento, considerando-se a margem de erro do instrumento.

#### 5.4.2.2 - Tanque 2

O teste 2 aplicado ao tanque 2 apresentou uma única abertura do vapor, na Figura 38 apresentamos os dados obtidos. O gráfico de temperatura do tanque 2 apresenta alguns aspectos já notados nos testes do tanque 1 de forma mais acentuada.

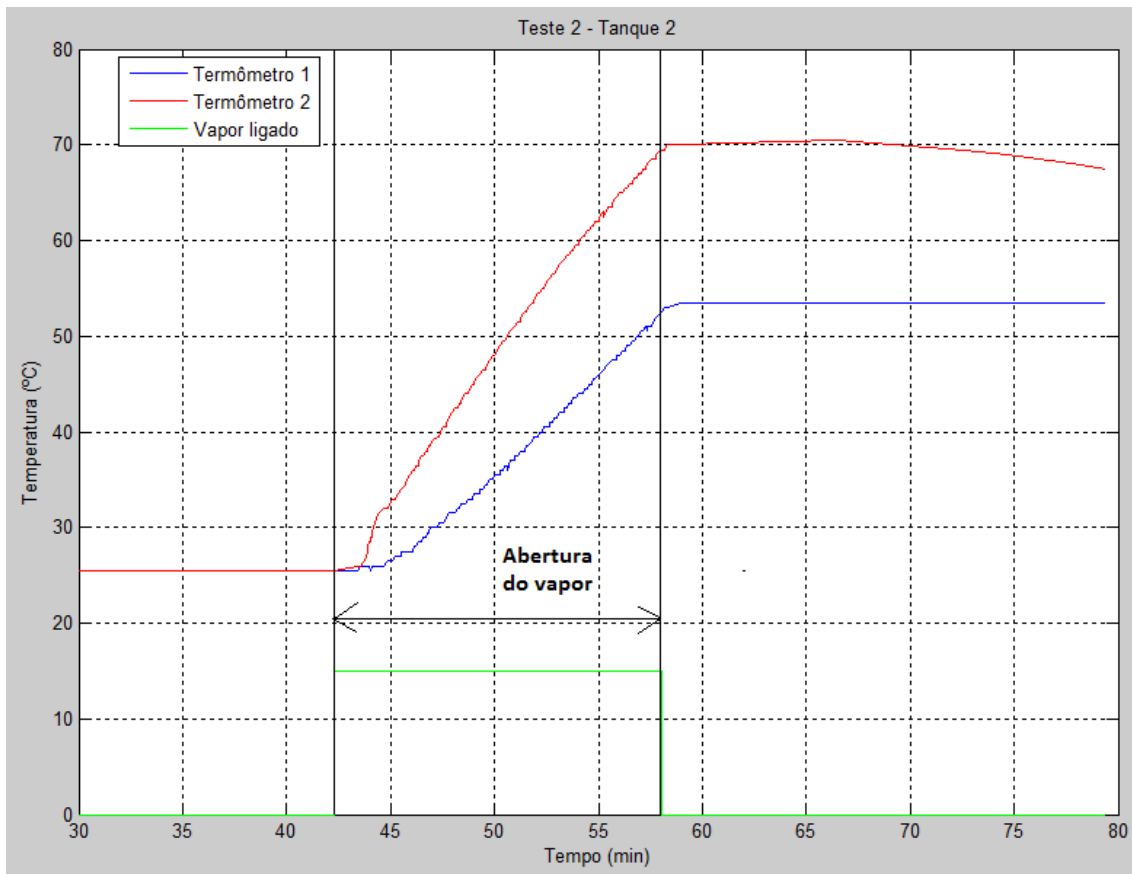


Figura 38 - Gráfico de temperaturas do tanque 2, teste 2

É possível notar que o atraso de atuação do vapor é um pouco maior neste tanque, o que condiz com o fato da camisa térmica deste tanque ser maior. Outra possível justificativa é a de que o volume utilizado neste tanque é maior do que o volume contido no outro tanque.

O aspecto mais notável neste gráfico é a diferença de temperatura registrada pelos termômetros, que chega a 17 °C. A inclinação das temperaturas registradas também mostra uma diferença grande: 3,2 °C /minuto para o termômetro 2 e 2,25 °C/minuto para o termômetro 1. O principal motivo destas diferenças serem maiores é o de que o arranjo dos termômetros permitiu o registro de pontos mais distantes dentro do volume testado. No entanto, não deixa de ser surpreendente o fato da diferença ser tão grande e do equilíbrio desta diferença se manter após o fechamento do vapor.

O comportamento das temperaturas registradas pelos termômetros após o corte do vapor também mostram uma diferença considerável. O decaimento da temperatura no termômetro 2 mostra que tal ponto está perdendo calor com o tempo, diferentemente do termômetro 1 que registra uma temperatura constante. Tal fato demonstra que a perda de calor do ponto registrado pelo termômetro 2 não é resultado da homogeneização da temperatura do líquido dentro do tanque, mas sim da perda de calor para o ambiente. Além de estar mais próximo do contato com o ambiente, o mesmo apresenta uma temperatura maior, aumentando a perda.

### **5.4.2 - Teste 3**

O terceiro teste manteve o objetivo do segundo teste de aplicar uma onda quadrada de 15 minutos de período no vapor dos tanques 1 e 2. Desta vez, ambos os tanques contemplaram duas ocorrências de ativação do vapor. A grande diferença deste teste é a utilização simultânea do vapor nos dois tanques, o que se espera que diminua os ganhos da planta. Os mesmos comportamentos de interesse puderam ser observados neste teste.

#### *5.4.2.1 - Tanque 1*

Na Figura 39 é apresentado o gráfico de temperaturas do tanque 1 deste teste, sua semelhança com o gráfico do teste 2 é evidente. A seguir são apresentadas algumas diferenças.

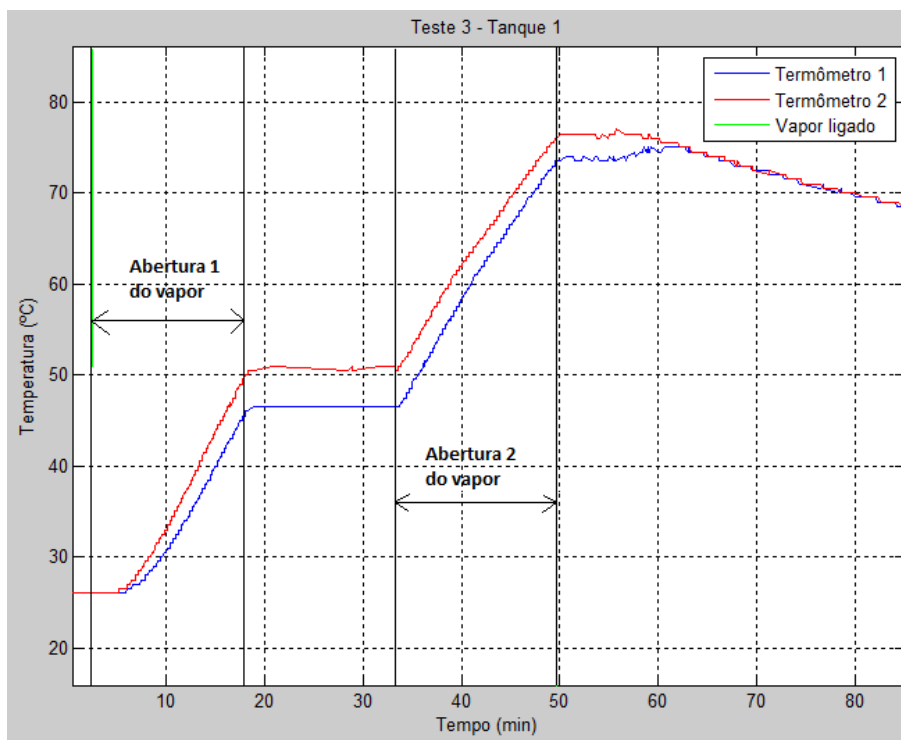


Figura 39 - Gráfico de temperaturas tanque 1, teste 3

A inclinação das faixas lineares são notavelmente menores que as obtidas no teste 2, como é apresentado na Tabela 18. Isto é condizente com o esperado, uma vez que a utilização do vapor é dividida entre os dois tanques. O maior atraso na atuação do vapor sobre a temperatura também pode ser justificado pelo menor fluxo de vapor, pois desta forma a camisa térmica leva mais tempo para ser preenchida e aquecida.

Tabela 18 - Inclinações médias das temperaturas nas faixas lineares dos testes

(°C/min)	Tanque 1		Tanque 2	
	1º vapor	2º vapor	1º vapor	2º vapor
Teste 1	2,6	-	-	-
Teste 2	2,9	2,0	2,7	-
Teste 3	2,0	1,6	T1: 1,7 – T2: 2,8	T1: 1,9 - T2: 1,4

A curva de resfriamento não se apresentou imediatamente decrescente como no caso do teste 2. É possível justificar tal ocorrência pelo fato da temperatura resultante estar abaixo da registrada no segundo caso. Após 10 minutos do segundo fechamento do vapor, foi feita a curta agitação manual do tanque, com o intuito de acelerar o

resfriamento e contribuir para a homogeneização das temperaturas. A mesma teve duração de aproximadamente dois minutos. Pode-se afirmar que a agitação comprovou sua importância no processo, contribuindo significativamente para ambos os objetivos da mesma, principalmente pelo fato de ter sido executada por um período curto.

#### 5.4.2.1 - Tanque 2

O gráfico de temperaturas do segundo tanque para o teste 3 é apresentado na Figura 40.

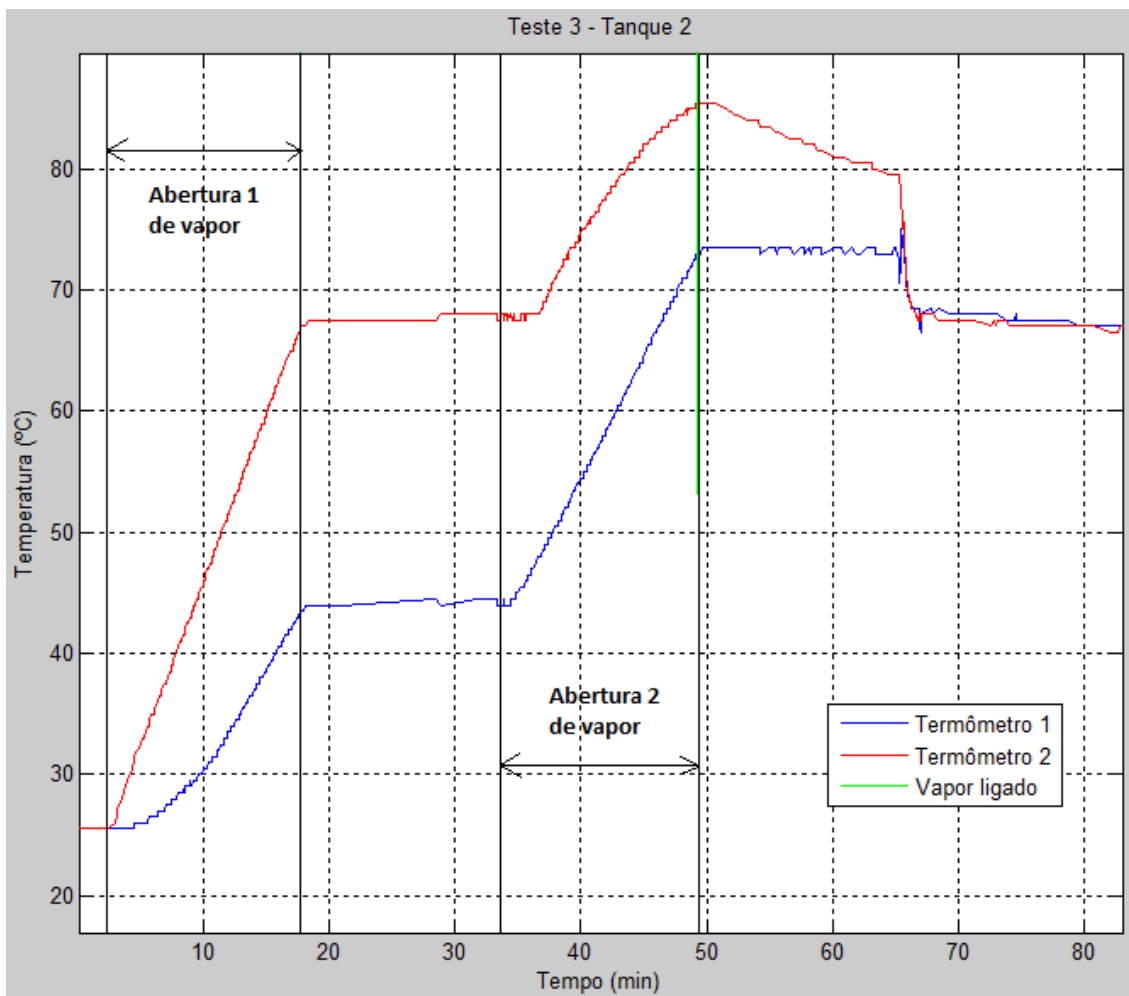


Figura 40 - Gráfico de temperaturas tanque 2, teste 3

A inclinação dos registros de um dos termômetros neste teste apresentou resultados diferentes do padrão observado nos outros testes. O termômetro 2, posicionado na borda do tanque, deu continuidade ao padrão notado: inclinação maior na primeira abertura (de 2,8 °C/min) do que na segunda abertura (de 1,4 °C/min) já o termômetro 1, central, apresentou uma inclinação maior na segunda abertura (de 1,9 °C/min) do que na primeira abertura (de 1,7 °C/min). Como tal comparação não foi



possível para o tanque 2 no teste 2, a sugestão para esta questão é a de que necessita de mais testes para verificar tal ocorrência. No entanto, é possível se basear na hipótese de que a diferença de posicionamento relativo entre os termômetros (do tanque 2 comparado ao tanque 1) e a discrepância observada nas temperaturas registradas contribuíram para este fenômeno.

O interessante deste gráfico é notar a ação da agitação aos 65 minutos de teste. Assim como observado para o tanque 1, as temperaturas dos termômetros (por mais que a discrepância fosse maior) se igualaram rapidamente. Direcionando ao mesmo resultado do tanque 1: a atuação do agitador é essencial para a homogeneização da temperatura dentro do tanque.

## 6 – Propostas de Controle

Neste capítulo são discutidas algumas propostas e alternativas de controle baseadas no perfil do processo estudado e nas condições apresentadas pelos modelos e resultados dos testes experimentais. As propostas descritas neste capítulo têm como inspiração a metodologia de controle para processos em batelada descrito na revisão bibliográfica deste trabalho.

### 6.1 – Arquitetura geral

A estrutura fundamental do controle apresentado neste capítulo se baseia na integração de diferentes níveis e tipos de controle. Na Figura 41 apresentamos um desenho esquemático desta configuração.

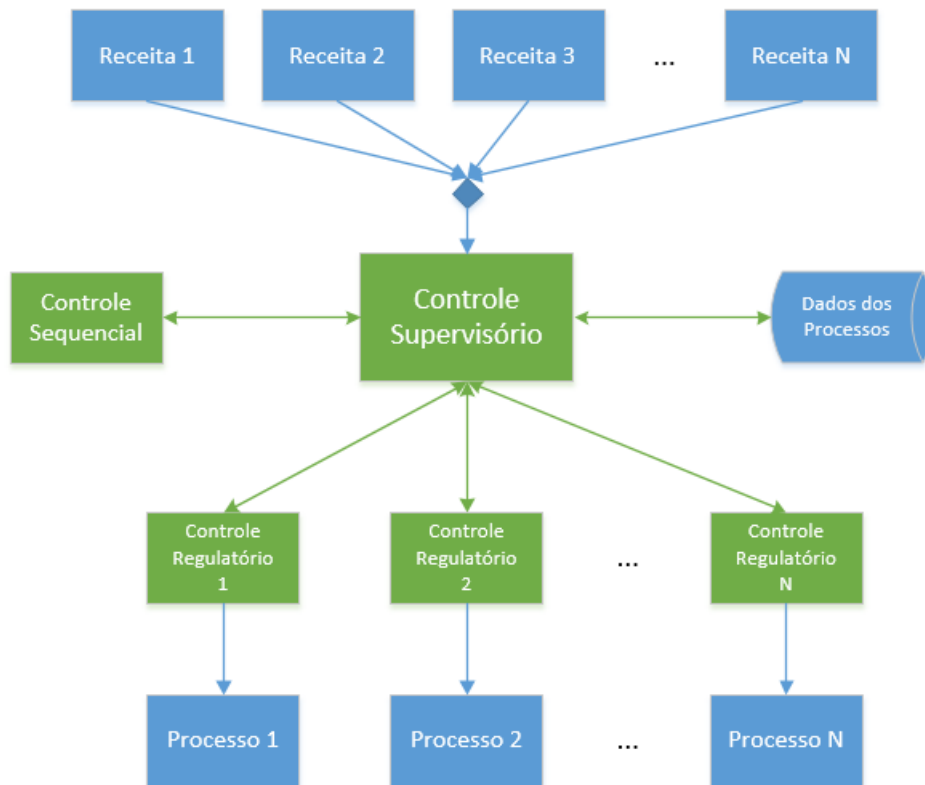


Figura 41 - Arquitetura de Controle

O controle supervisorio implementa a coordenação de todos os controles e registros. A manutenção de dados de histórico dos processos, parâmetros configurados, especificações de receitas e outros, é função deste controle. Ele também é o grande responsável pelo estabelecimento da comunicação entre o processo e o usuário, normalmente implementada por via de uma interface gráfica interativa.

Os controles regulatórios são normalmente desenhados e implementados por dispositivos configurados para operações em equipamentos específicos. Sinais de mudanças e configuração de setpoints e comandos são recebidos pelo controle supervísório para que sejam operadas as diferentes funções apresentadas pelos equipamentos. É possível estabelecer uma ponte de comunicação de configuração para que futuras reconfigurações (como por exemplo mudanças na estratégia de controle) dos dispositivos do controle regulatório sejam simplificadas.

A sequenciação das etapas do processo e o monitoramento de estados são tarefas do controle sequencial. Estados e condições das variáveis dos processos são recebidas do controle supervísório para que os mesmos sejam interpretados em eventos que desencadeiam o andar das etapas do processo, ou até mesmo condições de erro. Este desencadeamento é convertido em comandos que são enviados para o controle supervísório. É comum a implementação deste tipo de controle como parte do controle supervísório.

A interface entre os diferentes controles é estabelecida pelo sistema supervísório. Comandos de encadeamento de etapas são recebidos do controle sequencial e convertidos em instruções e enviados para os controles regulatórios. Condições e estados de variáveis do processo são repassados dos controles regulatórios para o controle sequencial pelo controle supervísório.

## **6.2 – Controle regulatório**

O controle regulatório tem como papel a manipulação e o controle das variáveis de processo, garantindo que as mesmas se comportem conforme o processo esperado. Este controle é o que comanda os instrumentos no campo, monitorando dados de sensores e enviando comandos aos atuadores em tempo real.

A implementação do controle regulatório, como dito anteriormente, envolve o estudo metucioso dos comportamentos e condições de operação do equipamento em que o mesmo é aplicado. Seguindo esta metodologia, este tópico elabora propostas e simulações de controle em cima de um modelo baseado nos dados experimentais obtidos sobre os comportamentos dos tanques da planta.

As condições adotadas para a atuação do controle são de uma válvula proporcional, em que sua abertura pode variar de 0 a 100%. Desta forma determinando a ação de controle entre 0 e 1. Ao fim deste tópico, são abordadas simulações de

controle que contemplem a atuação por uma válvula On/Off, que condiz com a instrumentação proposta nesse projeto.

### 6.2.1 - Modelo matemático da planta

O modelo seguiu a estrutura teórica esperada para este perfil de processo: um sistema de primeira ordem, praticamente integrador com possíveis distúrbios e atrasos. A equação abaixo apresenta esta estrutura.

$$G(s) = \frac{K e^{-t_d s}}{t_p s + 1}$$

A partir desta estrutura, foram utilizados os dados experimentais obtidos dos testes realizados no tanque 1 para encaixar a parametrização desta planta à estrutura proposta. A ferramenta de identificação de sistemas apresentada pelo software MatLab foi utilizada para a obtenção destes parâmetros, apresentados na Tabela 19. O ganho utilizado é o correspondente à todos os componentes, desde o sinal de ativação até a resposta da planta.

Tabela 19 - Parâmetros obtidos para o modelo

Parâmetro	Valor obtido
Ganho K	1244,8
Atraso $t_d$ (segundos)	27
Constante de tempo $t_p$ (minutos)	6802

Os parâmetros foram gerados a partir dos dados do tanque 1 durante o teste 3. Na Figura 42 apresentamos a comparação dos dados simulados com os reais. A diferença entre os gráficos pode ser observada em determinadas dinâmicas mais complexas, desconsideradas na elaboração do modelo.

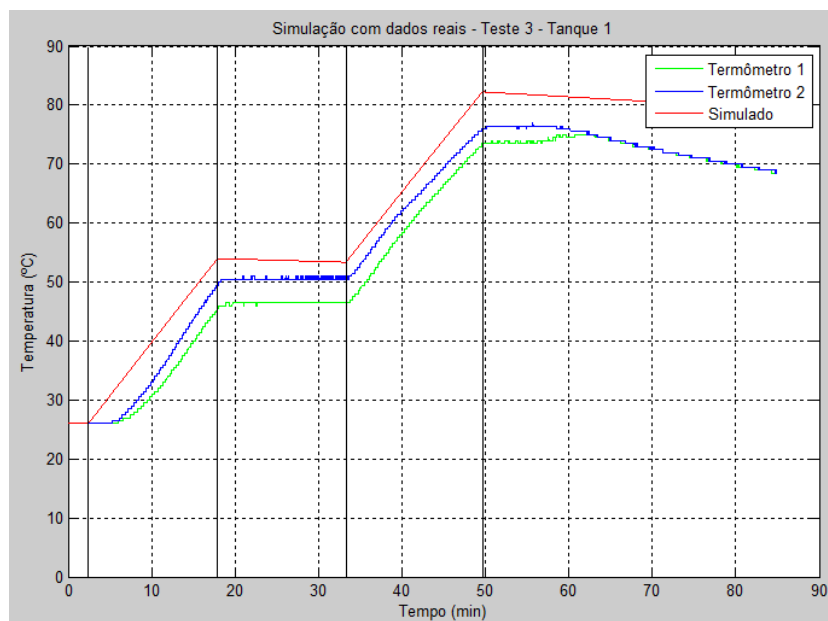


Figura 42 - Gráfico de simulação do modelo do tanque 1 no teste 3

### 6.2.2 - Entrada teste para controles

Para fins de teste de precisão dos controles, foi elaborado um gráfico de setpoint para a entrada dos controladores. Estes dados foram criados com base em um perfil real de temperaturas de uma brassagem. Na Tabela 20 apresentamos as etapas de temperatura e justificativas.

Tabela 20 - Etapas de um perfil exemplo de brassagem

Nome	Temperatura	Tempo
Repouso proteico	45 °C	10 min
Ação da alfa amilase	60 °C	40 min
Ação da beta amilase	70 °C	40 min
Desnaturação das enzimas	78 °C	15 min

Os dados para entrada no setpoint dos controladores visam respeitar estas etapas assim como a taxa ideal de aquecimento (aproximadamente 1°C / minuto). Na Figura 43 - Gráfico de entrada de setpoint adotado mostramos o gráfico destes dados.

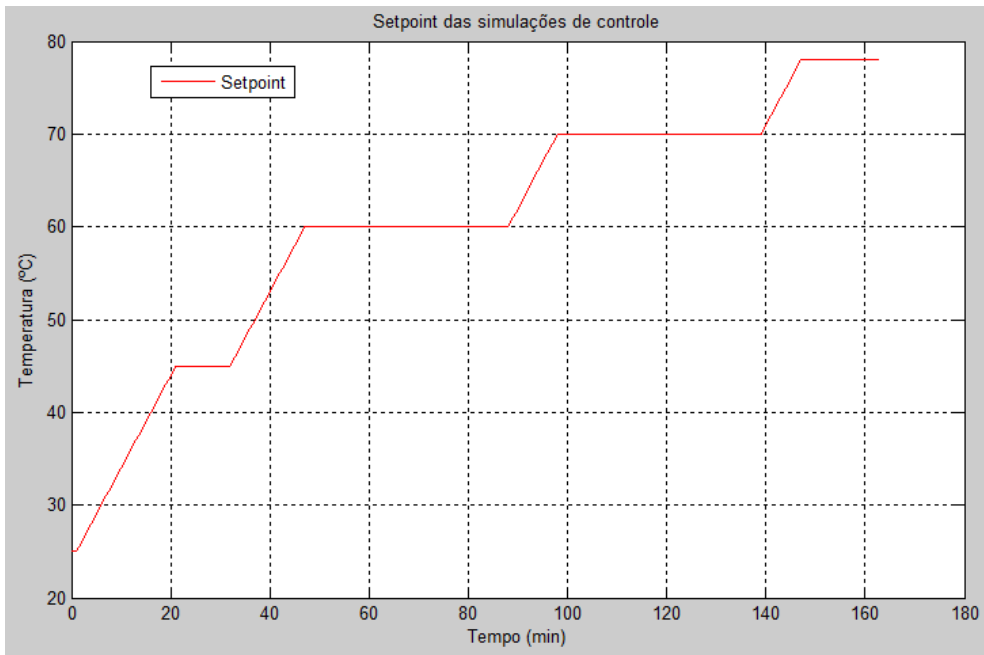


Figura 43 - Gráfico de entrada de setpoint adotado

### 6.2.3 - Controle proporcional simples

A primeira abordagem de controle apresentada é a de realimentação com ganho proporcional simples. A arquitetura do controle é apresentada na Figura 44.

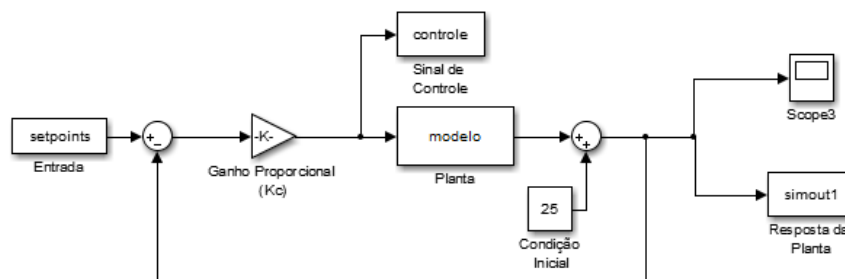


Figura 44 - Diagrama de blocos realimentação com ganho proporcional

A partir desta arquitetura, o modelo da planta foi analisado na ferramenta de ajuste de controladores do MatLab para que a sintonização do ganho proporcional simples fosse implementada. Esta ferramenta apresenta os dados de resposta a um degrau unitário em tempo real e a partir destes dados foi escolhido um ganho que melhor se ajustasse à planta. A prioridade na escolha foi obter um ganho que minimizasse o tempo de resposta e que ao mesmo tempo não implicasse em overshoot no controle (já que no nosso caso o controle não permite atuação contrária). Na Tabela 21 apresentamos os dados de resposta da sintonização escolhida.

Tabela 21 - Parâmetros ajustados do controle realimentado proporcional

Parâmetro	Valor
Ganho proporcional (Kc)	0,43751
Tempo de subida	93 segundos
Tempo de resposta	150 segundos
Overshoot	0 %

Os resultados obtidos com a entrada especificada são apresentados no gráfico da Figura 45. Como podemos observar nos dados, o interessante desta planta é que, pelo seu perfil praticamente integrador, o próprio ganho proporcional simples anula o erro de regime na resposta. Vemos também que a taxa de aquecimento desejada (de 1°C /min) também foi respeitada dadas as dinâmicas do sistema.

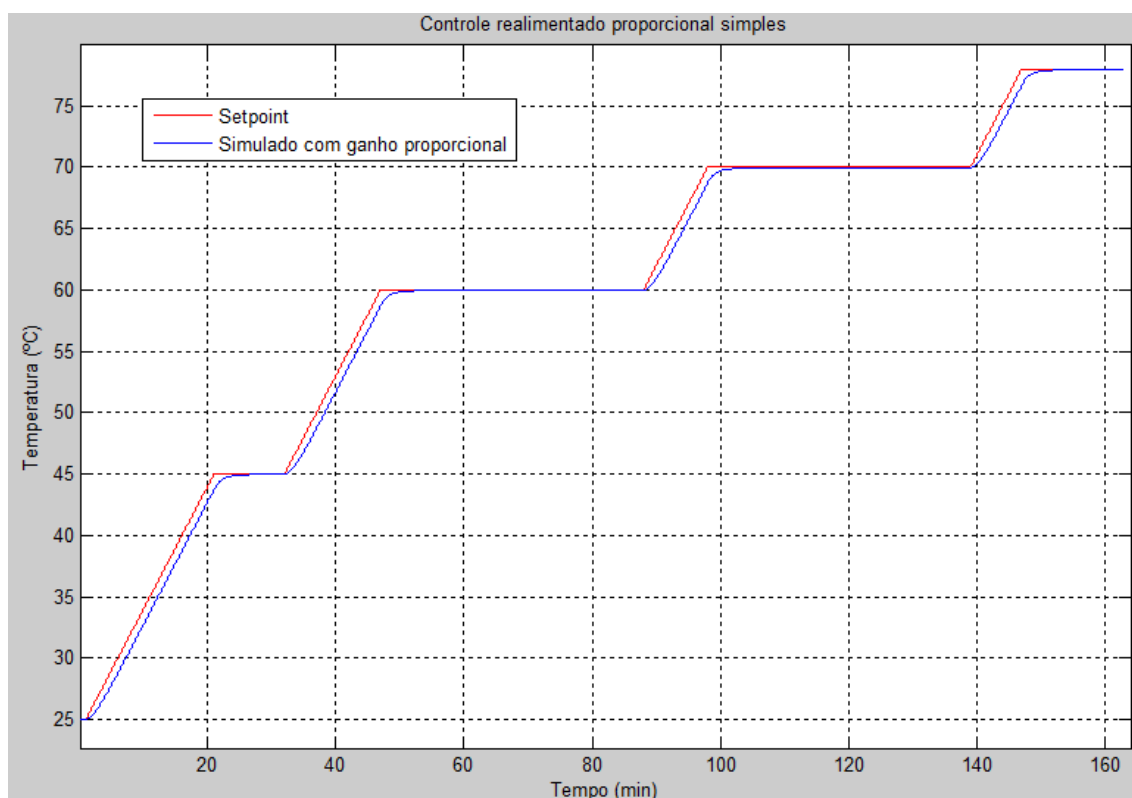


Figura 45 - Resposta da planta à realimentação com ganho proporcional

A análise mais criteriosa dos tempos de resposta para cada patamar de temperatura indica que o controle adotado se apresenta satisfatório para o processo. Na Figura 46, o gráfico de resposta é rerepresentado com maior detalhes nas dinâmicas de transição das etapas. No momento do início da etapa, a diferença de temperatura da

planta com o esperado pelo setpoint está dentro da margem de aceitação do processo (aproximadamente  $1,5^{\circ}\text{C}$ ). Isto mostra que este tipo de controle se adequa ao requisitado.

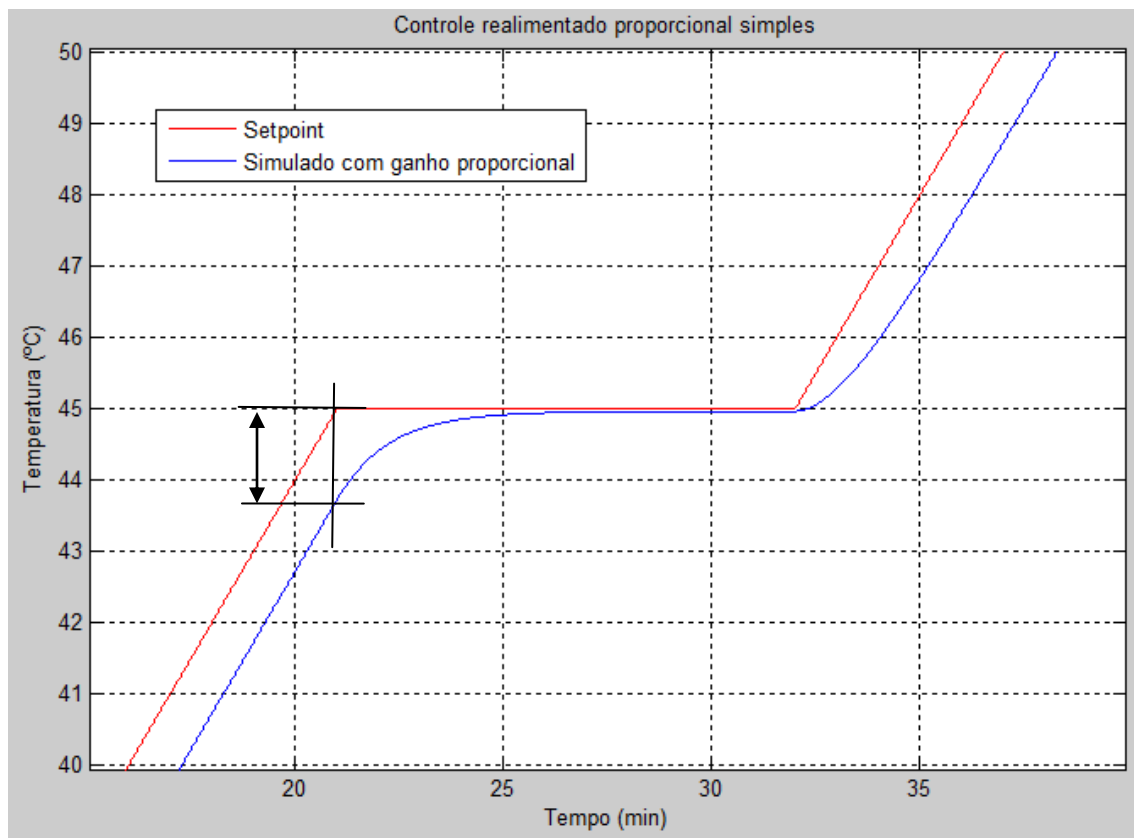


Figura 46 - Detalhamento da resposta da planta à realimentação com ganho proporcional

O sinal de controle mostra que o controle aplicado está dentro do padrão estabelecido de atuação. O gráfico da Figura 47 apresenta este sinal. É notável também que o sinal de controle não apresenta dinâmicas extremas ou perigosas para os instrumentos da planta (como por exemplo mudanças bruscas). A taxa máxima de abertura é de  $10\%/min$ , o que representa uma dinâmica segura.



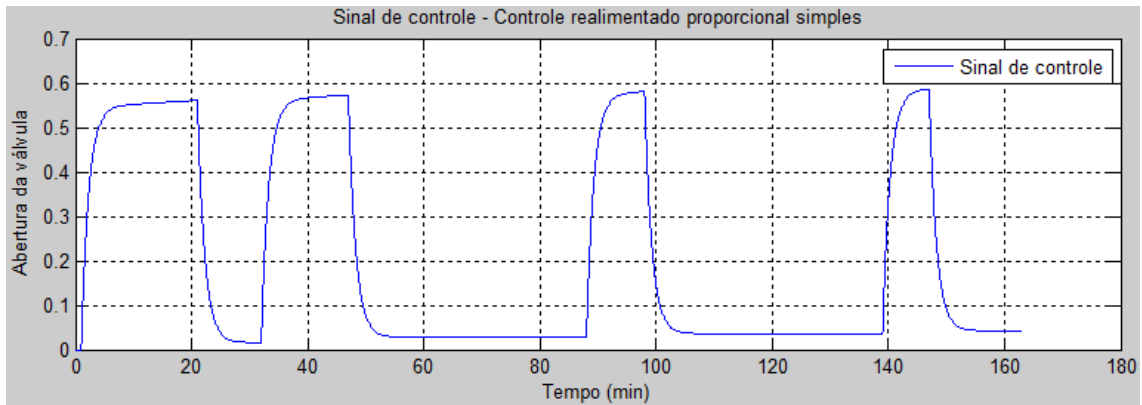


Figura 47 - Gráfico do sinal de controle para o controle realimentado proporcional

#### 6.2.4 - Controle PID

A segunda abordagem de implementação de controle é o do controle PID (proporcional integral derivativo). A sua sintonia seguiu os mesmos passos utilizados para o do controle proporcional simples, no entanto os resultados não foram satisfatórios.

Diferentes ajustes foram testados e todos apresentavam dinâmicas levemente superiores à obtida nos resultados do controle proporcional. Foi obtida uma diminuição no erro de temperatura nos momentos de início dos patamares (para aproximadamente  $1^{\circ}\text{C}$  ao invés de  $1,5^{\circ}\text{C}$ ).

No entanto, todas as sintonias testadas apresentavam a mesma dificuldade: pela maior intensidade do controle, o sinal de controle apresentava alto índice de ruídos e dinâmicas inviáveis fisicamente para a válvula. Problemas oriundos do método de integração utilizados pelo simulador também podem ter contribuído para este comportamento. A Figura 48 exemplifica estas dinâmicas. Este fato somado ao sucesso do controle proporcional foi o suficiente para o controle PID ser descartado da implementação proposta neste trabalho.

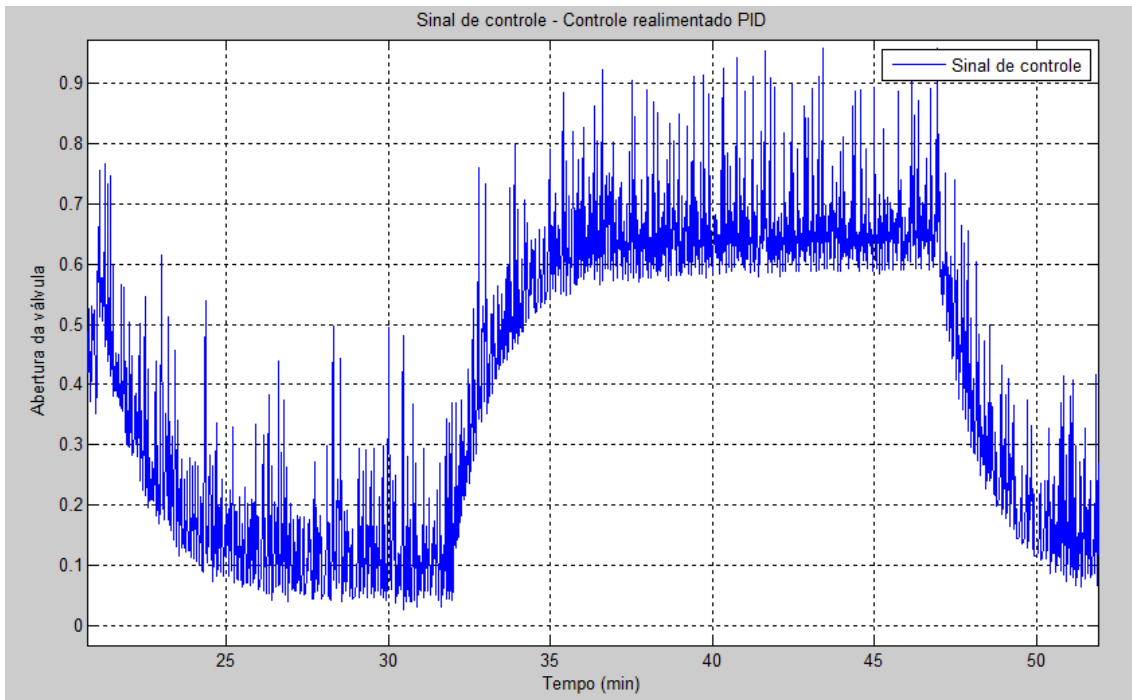


Figura 48 - Gráfico do sinal de controle para a realimentação com controle PID

### 6.2.5 - Controle com atuação on/off

Um dos grandes desafios da instrumentação proposta por este trabalho é o da implementação do controle de temperatura através da atuação de um relé (com controle on/off). Este tópico visa a simulação de sintonizações que implementem este tipo de controle e seus resultados.

A arquitetura adotada para este tipo de controle é apresentada na Figura 49. O acionamento do relé é feito de acordo com o sinal do controle proporcional utilizado nos tópicos anteriores.

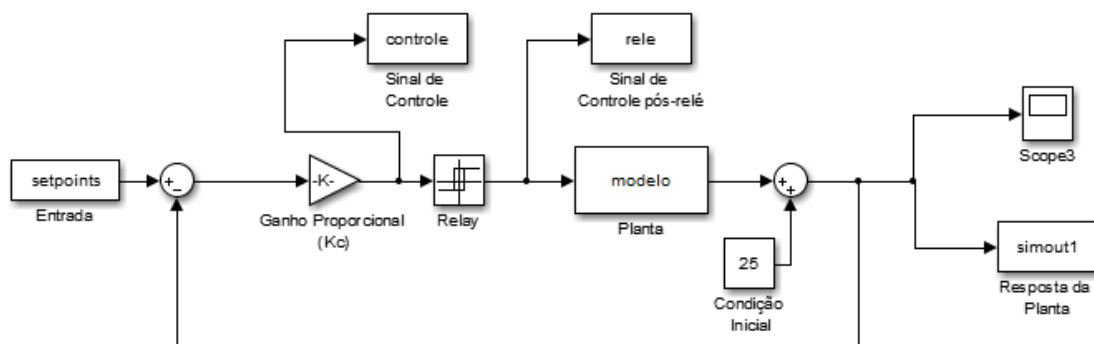


Figura 49 - Diagrama de blocos controle proporcional com atuação relé

A dificuldade deste controle vem dos diversos fatores que devem ser considerados na escolha dos parâmetros utilizados. O chaveamento do relé, em

situações da planta real, envolve diversas dinâmicas complexas que não são implementadas no modelo. Desta forma, o controle deve ser pensado numa forma de minimizar as trocas de estados do relé, ou pelo menos manter o tempo entre elas dentro de um mínimo aceitável.

A estratégia do controle proporcional atuando juntamente com o relé foi adotada da seguinte forma: o relé recebe o sinal do controle proporcional e, através de limites pré-estabelecidos para este sinal de controle (no caso: -1 para desligamento e 1 para acionamento), rege a atuação. Esta estratégia é semelhante à normalmente adotada por termostatos liga-desliga, em que o sinal que rege o acionamento é diretamente o da temperatura. No nosso caso, o ganho proporcional é o inverso do erro máximo permitido de temperatura entre o setpoint e o da planta.

$$K_c = \frac{1}{e_{max}}$$

A sintonização deste ganho proporcional foi feita com base na margem de aceitação de erro de temperatura que adotamos para o processo. A margem de variação aceitável no processo é de 1,5 °C, portanto adotamos a margem de erro de 1 °C para compensar possíveis erros proporcionados por dinâmicas não implementadas. Desta forma, o ganho utilizado foi unitário. O gráfico da Figura 50 apresenta os resultados obtidos.

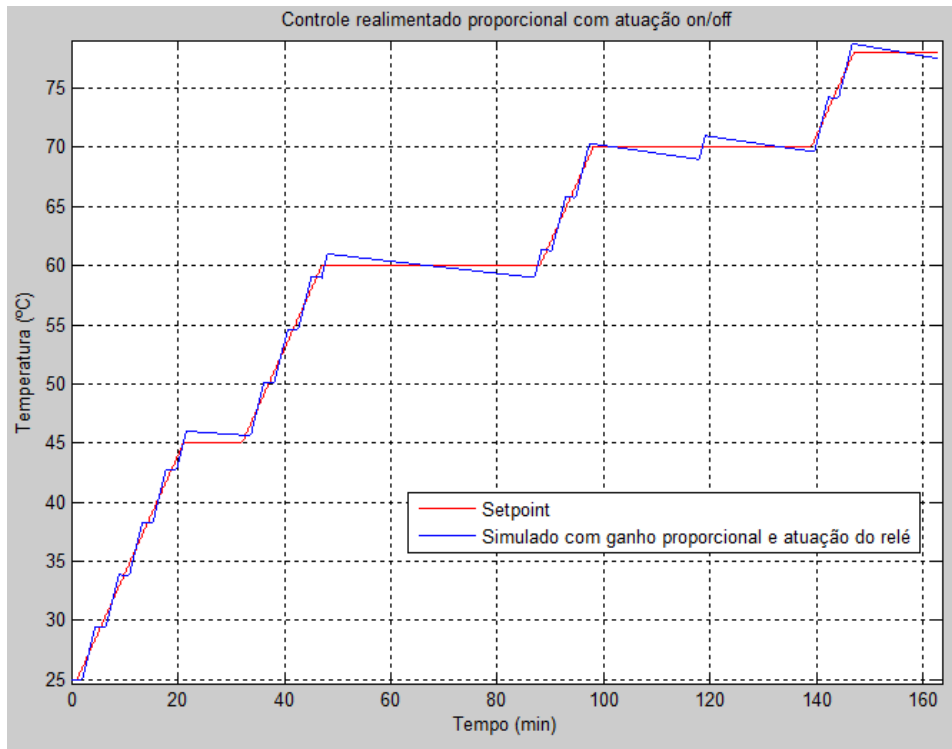


Figura 50 - Resposta da planta à realimentação com ganho proporcional e atuação on/off

A partir do gráfico pode-se observar que a resposta obtida foi satisfatória no ponto de vista de margem de erro da temperatura. Como pode ser visto no detalhamento apresentado na Figura 51, nota-se também que o chaveamento do relé corresponde à quando a margem de erro de temperatura chega ao limite estabelecido (1°C). A maior preocupação com o resultado deste controle é quanto à inclinação da reta, que não corresponde ao idealizado para o processo, possivelmente pelo alto ganho do vapor.

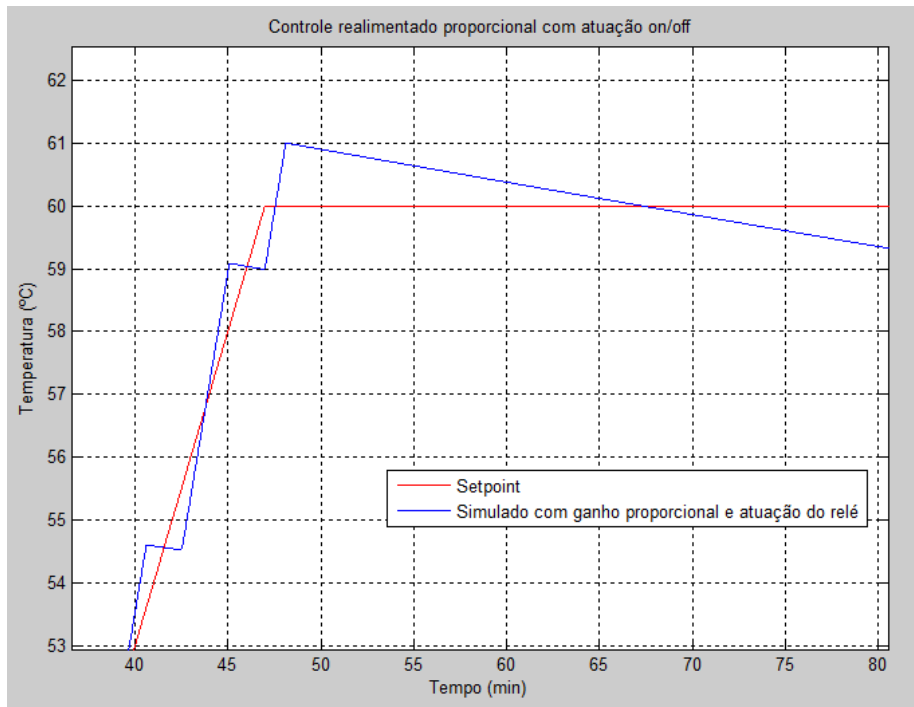


Figura 51 - Detalhamento da resposta da planta ao controle relé

A frequência máxima de chaveamento apresentada com o erro escolhido se mostrou dentro de intervalos aceitáveis. No gráfico da Figura 52, o sinal de controle e o correspondente chaveamento do relé são apresentados. A frequência média obtida no relé é de 0,45 chaveamentos por minuto, o que corresponde a um chaveamento a cada 2,2 minutos. É importante ressaltar que foi adotada uma margem de erro de temperatura menor do que o necessário, portanto caso experimentalmente as dinâmicas impossibilitem esta frequência, ainda há espaço para diminuí-la.

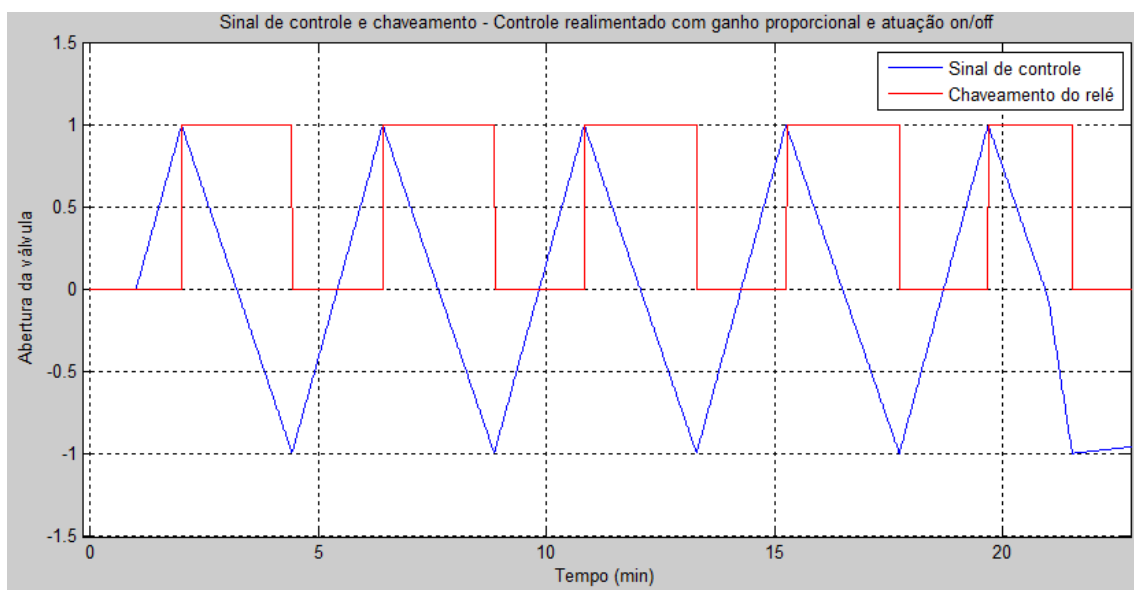


Figura 52 - Sinal de controle e chaveamento do relé no controle com atuação on/off

### **6.2.6 – Uma proposta de implementação do controle regulatório**

Como já descrito neste trabalho, o controle regulatório normalmente está atribuído para tarefas de controle em tempo real de variáveis de processo. Desta forma, uma ferramenta que implemente este controle deve conseguir interagir com diferentes dispositivos de campo (sensores e atuadores).

Este trabalho aponta como proposta de implementação de controle regulatório, com foco em processos de produção de cerveja, a plataforma Arduino. Esta é a ferramenta que mais se encaixa no perfil de ação deste tipo de controle. A plataforma incorpora tanto comunicações com dispositivos de campo para monitoração e atuação quanto integração com dispositivos de maior processamento, que sejam capazes de implementar o controle supervisório e sequencial da planta. O baixo custo, a versatilidade de comunicação, a flexibilidade de configuração e a filosofia open source fazem com que esta plataforma apareça como uma opção atraente para o desenvolvimento do controle regulatório neste processo.

Ao longo da elaboração da instrumentação e da realização dos testes, os dispositivos Arduino reforçaram o seu potencial de ferramenta de controle. Duas placas Arduino Uno foram utilizadas simultaneamente, ligadas à um computador supervisor, para a monitoração dos dois tanques durante dois dos testes experimentais realizados. Isto demonstra como esta plataforma se encaixa numa proposta de implementação da arquitetura de controle descrita neste capítulo.

### **6.3 – Controle supervisório e sequencial**

O controle supervisório, como seu próprio nome sugere, é o responsável pela supervisão de todos os elementos que compõem o controle de planta. É ele quem coordena as comunicações, o monitoramento e a organização dos diferentes controles e condições da planta.

O principal papel do controle sequencial é lidar com o desencadeamento de diferentes eventos e garantir o seguimento da rotina do processo da planta. Eventos podem ser situações de erro, mudanças de estado ou qualquer acontecimento digno de resposta. Pela alta capacidade de processamento de hoje em dia, é comum a integração deste tipo de controle juntamente ao controle supervisório em uma única ferramenta.

### **6.3.1 – Uma proposta de controle supervisório e sequencial**

A instrumentação projetada e utilizada na planta descrita neste trabalho fez o uso da versão demo do software Proficy iFix como ferramenta de monitoração e manutenção de dados dos experimentos. Softwares como este são denominados sistemas SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition). Como o próprio nome já diz, este tipo de software foi desenvolvido para a implementação de controles supervisórios de sistemas como descritos neste trabalho. Existem diversos softwares deste tipo disponíveis no mercado, inclusive que seguem a filosofia open source como a plataforma Arduino, que podem constituir ótimas opções para a implementação do controle supervisório no processo abordado.

O software SCADA, hoje em dia, contempla também opções robustas para a implementação computacional do controle sequencial. No entanto, o escopo deste trabalho não apresentou opções e/ou propostas significativas de controle sequencial principalmente pelo fato de contemplar uma abordagem manual deste tipo de controle. As válvulas de transferências entre tanques foram aproveitadas da planta original e todas são de operação manual. A automatização deste controle também requisitaria a instalação de instrumentações adicionais. O monitoramento automático de variáveis extras, como por exemplo o nível dos tanques, seria necessário para a implementação do desencadeamento de eventos e também a especificação de situações de alarme.

## 7 – Conclusão

O principal foco deste trabalho foi apresentar uma proposta de instrumentação e controle para o processo de produção de cerveja, utilizando-se uma plataforma acessível de instrumentos e ferramentas. O sucesso do trabalho neste aspecto se evidenciou ao longo da execução dos testes experimentais.

O funcionamento dos instrumentos nas tarefas de registrar os dados e permitir o acompanhamento das variáveis do processo em tempo real mostrou que a plataforma Arduino já apresenta maturidade o suficiente para a implementação em aplicações deste porte. Os testes elaborados e realizados confirmaram a adequação da instrumentação assim como permitiram a análise de condições do processo que não seriam possíveis sem dados experimentais.

O processamento dos dados experimentais também permitiu esclarecimentos sobre diferentes formas de controle sobre o processo adotado. Os dados de dispersão da temperatura nos tanques, por exemplo, evidenciou a necessidade de um agitador e potencializou a importância da bomba de recirculação como sugerido anteriormente. As simulações de controle também mostraram a adequação das diferentes formas de atuação neste processo.

A maior realização deste trabalho foi a descoberta do imenso potencial de trabalho apresentado pela integração das duas idéias fundamentais propostas: uma abordagem de controle sobre processos de pequenas e médias cervejarias e uma abordagem de instrumentação utilizando uma plataforma acessível. A complexidade do processo somada ao poder (e baixo custo) de implementação da plataforma apresentam um vasto horizonte de trabalho nesta integração.

### 7.1 – Trabalhos futuros

Apesar das possibilidades de trabalhos futuros serem enormes, foram separados alguns tópicos que constituem seguimentos imediatos deste trabalho:

- Uma abordagem de instrumentação e implementação do controle sequencial como apresentado;
- Testes experimentais de diferentes propostas de controle regulatório;
- Testes experimentais que caracterizem melhor dinâmicas de atuação e
- A produção do primeiro lote de cerveja oriundo da integração: cerveja + Arduino.



## 8 - Referências

1. BAMFORTH, C. Beer: Tap into the art and science of brewing. 3 ed. New York, NY, EUA. 2009. Oxford University Press Inc.
2. Malteação. “Cervejaria Fraga”. Disponível em: <http://www.cervejariafraga.com.br>. Acessado em: 12/01/2015.
3. PALMER, J. J. How to brew. Boulder, Colorado, EUA. 2006. Brewers Publications.
4. Papazian, C. The Complete joy of Homebrewing. 3 ed. New York, NY. 2003. Harper Collins Publishers Inc.
5. Papazian, C. The Homebrewer’s Companion. 2 ed. New York, NY, EUA. 2014. Harper Collins Publishers Inc.
6. Wort Boiling: Homebrew Science. “Brew Your Own”. Disponível em: <https://byo.com/grains/item/1650-wort-boiling-homebrew-science>. Acessado em: 18/01/2015.
7. WHITE, C. , ZAINASHEFF, J. Yeast: The Practical Guide to Beer Fermentation. Boulder, Colorado, EUA. 2010. Brewers Publications.
8. Guide – Introduction. “Arduino – Introduction”. Disponível em: <http://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. Acessado em: 21/01/2015.
9. FISHER, T. G. Batch Control Systems: Design, Application, and Implementation. North Carolina, EUA. 1990. Instrument Society of America.
10. Shaw, W. T., Computer Control of Batch Processes, EMC Controls, Inc., Cockeysville, MD, 1982.
11. Arduino Uno. “Arduino – ArduinoBoardUno”. Disponível em: <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>. Acessado em: 21/01/2015.
12. Language Reference. “Arduino – Reference”. Disponível em: <http://arduino.cc/en/Reference/HomePage>
13. Datasheet Thermometer DS18B20. “Datasheets”. Disponível em: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>. Acesso em: 05/02/2015

14. Single Relay Board Guide. “Guides”. Disponível em:  
<http://pub.ucpros.com/download/27115-Single-Relay-Board-Guide-v1.0.pdf?osCsid=cqflskn8ttjbes470m691h5ro6>. Acesso em: 05/02/2015.
15. Datasheet Single Relay Board (#27115). “Datasheets”. Disponível em:  
<http://pub.ucpros.com/download/27115-Songle-Relay-Datasheet.pdf?osCsid=cqflskn8ttjbes470m691h5ro6>. Acesso em: 05/02/2015.
16. Parts List for Building Your Brewery. “The Electric Brewery”. Disponível em:  
<http://www.theelectricbrewery.com/> Acessado em: 15/02/2015.