

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA

STEFAM PRESTES DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DIGITAL DE  
TEMPERATURA PARA MOSTURAÇÃO NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE  
CERVEJAS ARTESANAIS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO – PR

2016

STEFAM PRESTES DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DIGITAL DE  
TEMPERATURA PARA MOSTURAÇÃO NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE  
CERVEJAS ARTESANAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à banca avaliadora, do Curso Superior de Engenharia Eletrônica do Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) campus Campo Mourão como requisito para obtenção do título de Engenheiro Eletrônico.

Orientador: Prof. Me. Marcelo Nanni.

Co-orientador: Prof. Me. Leandro Castilho Brolin

CAMPO MOURÃO - PR

2016

---

**TERMO DE APROVAÇÃO**  
**DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO INTITULADO**  
Desenvolvimento de um Sistema de Controle Digital de Temperatura  
para Mosturação no Processo de Fabricação de Cervejas Artesanais  
por  
Stefam Prestes de Oliveira

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no dia 23 de Junho de 2016 ao Curso Superior de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Campo Mourão. O Candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho \_\_\_\_\_ (aprovado, aprovado com restrições ou reprovado).

---

Prof. Me. Flávio Luiz Rossini  
(UTFPR)

---

Prof. Dr. Roberto Ribeiro Neli  
(UTFPR)

---

Prof. Me. Marcelo Nanni  
(UTFPR)  
Orientador

## RESUMO

OLIVEIRA, Stefam Prestes de. DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DIGITAL DE TEMPERATURA PARA MOSTURAÇÃO NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CERVEJAS ARTESANAIS. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão 2016.

Visando o grande consumo e importância econômica da cerveja, a busca por processos cada vez mais eficientes para se aprimorar a qualidade sensorial do produto final é almejada entre os fabricantes, principalmente os artesanais que crescem mais a cada dia. No processo cervejeiro, uma etapa de grande importância é a mosturação, em que se faz o cozimento da mistura dos ingredientes água e malte, sendo a temperatura fator primordial. Para uma condução satisfatória deste processo, realizou-se um estudo direcionado, fazendo o levantamento de dados teóricos necessários e analisando-se suas principais variáveis com o objetivo de controlar o mesmo. É descrito, então, o desenvolvimento de um sistema de controle digital de temperatura microcontrolado para o processo de mosturação na produção de cervejas artesanais.

*Palavras-chave:* Controlador, PID, Temperatura.

## **ABSTRACT**

OLIVEIRA, Stefam Prestes de. DEVELOPMENT OF A SYSTEM OF DIGITAL TEMPERATURE CONTROL FOR Mashing IN THE PROCESS OF CRAFT BEERS MANUFACTURE. Final Paper – Electronics Engineering Bachelor Degree, Federal Technological University of Paraná. Campo Mourão 2016.

Aiming at the high consumption and economic importance of beer, the search for increasingly efficient processes to improve the sensory quality of the final product is desired among manufacturers, especially artisanal growing more every day. In the brewing process, a step of great importance is the mash, in which it makes cooking the mixture of water and malt ingredients, the temperature being prime factor. For a satisfactory conducting this process, we performed a study directed to make the necessary lifting theoretical data and analyzing its principal variables in order to control the same. It is described, then, the development of a digital control system micromachined temperature for mashing process in the production of brewed beers.

**Keywords:** controller, PID, temperature.

Sempre e primeiramente a Deus, pela força, saúde, sabedoria e perseverança para chegar até aqui.

Aos meus pais, João e Vitória, minha estrutura, minha motivação e minha razão. Não há palavras que possam expressar meus sentimentos, porém aqui, cabe apenas agradecer por tudo, cada noite mal dormida, cada lágrima e gota de suor escorrida, tudo isso é por vocês. Meu amor maior.

A meu irmão Sullivam, que se espelha em mim, mas sequer imagina que é meu espelho, por todo abraço e olhar silencioso nos quais gritava palavras expressivas de apoio e fé. [NC M]

Aos senhores e senhoras os quais hoje tenho a felicidade de chamar de amigos, ou até mais que isso, que conquistei durante minha jornada em Campo Mourão, e aos que já me acompanham de outras datas, obrigado!

Aos professores da UTFPR campus Campo Mourão, em especial os do Departamento Acadêmico de Eletrônica, dentre eles o professor Leandro Castilho Brolin, meu norte em TCC1, e ao professor Marcelo Nanni pelo seu apadrinhamento nos últimos minutos, bem como a todos os demais servidores, pela orientação, formação e dedicação.

Aos demais não mencionados, mas que para sempre serão lembrados.

*“Como o dente de leão que cresce em meio ao concreto eu persisto.” -W. Miller*

... Ah, já ia me esquecendo, *“E a bagagem?”*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Alguns exemplos de Malte .....	19
Figura 2 – Lúpulo .....	20
Figura 3 - Levedura de cerveja .....	21
Figura 4 - Variação da temperatura em função do tempo no processo de mosturação.....	24
Figura 5 - Propagação de tempo e temperatura no processo de cocção de três fervuras.....	28
Figura 6 - Convecção de calor da superfície aquecida para o fluido.....	31
Figura 7 - Exemplo de um sistema de controle em malha aberta. ....	36
Figura 8 - Exemplo de um sistema de controle em malha fechada. ....	37
Figura 9 - Gráfico da função degrau.....	38
Figura 10 - Análise das componentes de um sistema de controle em malha fechada.....	38
Figura 11 - Resposta para entrada em degrau Sistemas de 1ª Ordem .....	42
Figura 12 - Pinagem Atmega328. ....	44
Figura 13 - Modulação por Largura de Banda .....	45
Figura 14 - Proposta de circuito de potência. ....	46
Figura 15 - Componentes do sistema proposto.....	49
Figura 16: Leitura de temperaturas via comunicação serial .....	51
Figura 17 - Exemplo de vetor de leituras .....	51
Figura 18 - Aplicação de dados lidos ao software matemático .....	52
Figura 19 - Resposta do sistema a um degrau de potência .....	52
Figura 20 - Comparação em leitura do sensor e modelo.....	54
Figura 21 – Leitura do Sensor submetido ao degrau. ....	55
Figura 22 – Curva de resposta do sensor submetido a degrau.....	56
Figura 23 – Tempo necessário para o leitor atingir 63,2% da temperatura de estabilidade.....	56
Figura 24 - Relação de entra e saída do Atuador .....	58
Figura 25 - Diagrama da Malha Fechada do sistema .....	58
Figura 26 - Resposta do sistema em malha fechada para uma entrada em degrau.....	60
Figura 27 - Lugar das raízes do sistema.....	60
Figura 28 - Resposta do Sistema com PID calibrado .....	61
Figura 29 - Lugar das Raízes após calibração PID.....	61
Figura 30 - Comparação da resposta ao Degrau Unitário: (a) Com Compensador (b) Sem Compensador.....	62
Figura 31 - Fluxograma do algoritmo de programação.....	65
Figura 32 - Esquemático do circuito do protótipo .....	66
Figura 33 -Protótipo efetuando leitura do mosto.....	67
Figura 34 - Suporte para o sensor de temperatura.....	68
Figura 35 - Resistência do atuador.....	69
Figura 36 - Gráfico da resposta ao sistema físico.....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição do lúpulo comercial. ....	20
Tabela 2 - Temperaturas e pH para atuação de enzimas presentes no mosto cervejeiro. ....	25
Tabela 3 - Patamares de temperatura e os respectivos objetivos. ....	26
Tabela 4 - Tabela para cálculos de parâmetros de sintonia PID pelo método Ziegler-Nichols em malha aberta .....	42

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	10
1.1. TEMA DA PESQUISA .....	10
1.1.1. Delimitação do tema e justificativa .....	10
1.2. PROBLEMA.....	11
1.3. HIPÓTESE / PREMISA.....	11
1.4. OBJETIVOS .....	12
1.4.1. Objetivo geral .....	12
1.4.2. Objetivos específicos.....	12
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	13
2. REVISÃO DA LITERATURA .....	14
2.3. MATÉRIAS-PRIMAS DA CERVEJA .....	18
2.3.1. A água .....	18
2.3.2. O malte .....	18
2.3.3. O lúpulo .....	19
2.3.4. A levedura .....	21
2.3.5. Os adjuntos .....	21
2.4. PROCESSO DE PRODUÇÃO DA CERVEJA .....	22
2.4.1. Preparo do mosto .....	22
2.4.1.2. Mosturação .....	23
2.5. TEMPERATURA .....	28
2.5.1. Conceito de temperatura .....	29
2.5.2. Modelagem de sistemas térmicos.....	30
2.5.3. Transformada de Laplace .....	32
2.5.6. O sensor de temperatura LM35 .....	34
2.6. CONTROLE.....	35
2.6.1. A função degrau .....	37
2.6.3. Modos de controle do controlador PID.....	40
2.7. MICROCONTROLADOR .....	43
2.7.1. O microcontrolador ATMEGA328.....	44
2.8. ATUADOR .....	46
3. METODOLOGIA.....	48
4. DESENVOLVIMENTO .....	50
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	71
REFERÊNCIAS.....	73

## 1. INTRODUÇÃO

Esse capítulo tratará de uma contextualização do trabalho onde serão apresentados um resgate histórico, delimitação da questão, o levantamento sistemático do ponto de discussão, objetivos e procedimentos do mesmo.

### 1.1. TEMA DA PESQUISA

#### 1.1.1. Delimitação do tema e justificativa

A cerveja é uma das bebidas mais consumidas no mundo e está entre as criações mais antigas já realizadas pelo homem, porém, não se sabe dizer especificamente a data de sua criação. Acredita-se que há mais de 10 mil anos foi descoberto o fenômeno da fermentação, por meio do qual se obtiveram os primeiros exemplos de bebidas alcoólicas. Evidências científicas e arqueológicas adquiridas ao longo da história são suficientes para acreditar-se que a primeira bebida alcoólica feita do gênero foi produzida no final do quarto milênio antes de Cristo, pelos Sumérios, no sul da Babilônia (HORNSEY, 1999).

A regulamentação a respeito do processo de fabricação da cerveja se deu primeiramente na Baviera, em 1516, onde o Duque Guilherme IV, assinou o decreto de *Reinheitsgebot*, em português, Lei da Pureza. Tal lei especificava os ingredientes que poderiam ser utilizados para a fabricação da bebida, eram eles: malte de cevada, lúpulo e água. Apenas quase 300 anos depois, em 1808, que se introduziu a cerveja no Brasil, através de Dom João VI, sendo que, em meados de 1900, a indústria cervejeira nacional já estava estabelecida, com 27 cervejarias registradas (BARUFALDI, 1998).

De acordo com o SindiCerv (Sindicato Nacional da Indústria da Cerveja) no mercado de cerveja, o Brasil só perde, em volume, para a China (35 bilhões de litros/ano) e Estados Unidos (23,6 bilhões de litros/ano). Na última década, a produção de cerveja em nosso país cresceu impressionantes 69%, de 8,2 bilhões para 13,7 bilhões de litros anuais, segundo dados do Sicobe (Sistema de Controle de Produção de Bebidas da Receita Federal). A OMS, Organização Mundial da Saúde revelou em pesquisa que, 57,7% da população do Brasil toma algum tipo de bebida alcoólica, destes, 60% optam pela cerveja.

É perceptível a tendência do mercado quanto a pequenas empresas de cervejas diferenciadas, conhecidas como microcervejarias. O foco dessas microcervejarias é oferecer alta qualidade sensorial, onde se produzem as cervejas chamadas de artesanais. Pensando-se nisso, obter um controlador que complete o processo artesanal garante mais um diferencial de qualidade ao produto.

## 1.2. PROBLEMA

O processo de produção da cerveja é dividido basicamente em três etapas, a primeira de produção do mosto (ou mostura), seguida pelo processo de fermentação e por último o acabamento da cerveja, sendo que dentro de cada um existem inúmeros procedimentos a se cumprir, conforme o produto final desejado. Por exemplo, para processos industriais que visam estender a vida de prateleira do alimento, o aquecimento do líquido é muito importante para proporcionar a desativação enzimática e evitar o crescimento microbiológico (BERTO, 2004).

O processo de mostura, ou brassagem, na produção de cerveja artesanal, em sua maioria é feito de maneira manual, onde a temperatura está entre os principais, se não o principal responsável para a composição do produto final. Torna-se viável então, o desenvolvimento de um sistema de controle de temperatura, dando maior precisão no processo e conseqüentemente uma melhor composição no produto final, como cita Sanderson:

“A avaliação da qualidade pode ser feita observando-se as características gerais dos processos produtivos quando do seu desenvolvimento, pois conseqüentemente, controlando-se o processo, o produto dele resultante estará também controlado. Para isso, a análise de processos industriais baseia-se no estudo das variações com a utilização de modelos estatísticos adequados a cada caso, as quais fornecem informações precisas sobre a natureza destas variações e seus possíveis reflexos na qualidade dos produtos, nos quais qualquer variação de ingredientes e/ou processos produzirá diferentes tipos de cerveja” (SANDERSON, 2010).

## 1.3. HIPÓTESE / PREMISSA

Levantar todos os dados necessários para a implementação de um sistema de controle de temperatura em planta com desenvolvimento do protótipo para o processo de mosturação na produção de cervejas artesanais.

## 1.4. OBJETIVOS

Pretendeu-se estudar, elaborar, implementar e testar um protótipo de um sistema de controle microcontrolado para as diferentes rampas de temperatura durante o processo de mosturação na produção das mais diversas espécies de cervejas artesanais em pequena escala aplicados em um tanque. Buscou-se apresentar o desenvolvimento de um sistema de controle digital, a partir da utilização de um microcontrolador com alto desempenho, robusto, eficiente e simples.

### 1.4.1. Objetivo geral

O objetivo principal foi desenvolver uma interface eletrônica para controle do aquecimento das rampas de temperatura durante a mosturação na produção de cervejas artesanais. Uma das características a ser enfatizada é a implementação de um controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo), com ON/OFF (Liga/Desliga) para o controle preciso do aquecimento do mosto, proporcionando-se, desta forma, a utilização do sistema em planta.

### 1.4.2. Objetivos específicos

Levantaram-se os dados necessários sobre a cerveja e seu processo de produção, dando-se ênfase na etapa de mosturação e nas respectivas temperaturas. Analisaram-se os processos, como são elaborados, avaliaram-se números e métodos dos produtores de cervejas artesanais, traçando um método automatizado.

Ainda como exploratório e como parte descritiva, identificaram-se os parâmetros tanto do líquido da mistura a ser controlada, como da planta onde foi instalado o sistema de controle.

Caracterizou-se e foi traçado o modelamento matemático simplificado da planta, avaliando-se o melhor sensor, circuito amplificador, microcontrolador e resistência elétrica para uma melhor linearidade do processo e conseqüentemente uma melhoria no produto final.

Desenvolveu-se um protótipo com implementação em planta, com interfaceamento de comando para o usuário, que faz o monitoramento da temperatura

do mosto, sendo que ao se ultrapassar o valor configurado o sistema diminui o aquecimento, fazendo-se o processo reverso quando é necessário o aquecimento.

Descreveu-se o processo em sua totalidade, traçaram-se gráficos das rampas de temperaturas comumente utilizadas, todos após o devido levantamento e análise de dados, para verificar a viabilidade da aplicação.

## 1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O trabalho teve caráter exploratório, na literatura, onde focou-se na produção de cervejas artesanais; descritivo em relação aos métodos de mosturação e aplicável de forma a desenvolver-se um controlador digital de temperatura a ser aplicado em planta.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

Nesse capítulo são apresentadas as informações disponíveis na literatura que serviram de embasamento para a construção do trabalho.

### 2.1. História da cerveja

Pela definição de AQUARONE (1983), cerveja “é a bebida não destilada obtida de fermentação alcoólica de mosto de cereal maltado, geralmente malte de cevada, sendo facultativa a adição de outra matéria-prima, como milho, arroz, trigo e em geral o teor alcoólico é baixo, de 3% a 8%”.

Os primeiros registros de produção de uma bebida alcoólica a partir da fermentação de cereais foram registrados na Suméria. AQUARONE (1983) também cita que “a cervejaria mais antiga foi descoberta por arqueólogos no Egito e data de 5400 antes de Cristo”. Não existem datas concretas, mas indícios de centros de escavações apontam que o mel e sucos de frutas (fontes de açúcar) foram suas bases. Apesar de não existirem registros, existe um consenso de que a cerveja foi a primeira bebida inventada pelo Homem (MORADO, 2009).

MORADO cita que a produção de cerveja iniciou-se na Mesopotâmia há mais de 10.000 anos atrás, com a descoberta de técnicas de fermentação eficazes. Os padeiros detinham o conhecimento da confecção da cerveja, logo se tornando os pioneiros. A cerveja e o pão possuem a mesma matéria prima, a fermentação de cereais. Entretanto, existe uma diferença crucial entre eles. Após parcialmente assado, o bolo de cevada era colocado em recipientes com água, iniciando outra fermentação (MORADO, 2009). Durante milhares de anos a produção da cerveja fez-se de forma caseira, porém, relatos históricos mostram que a bebida consumida nesse período era distinta dos produtos que são disponibilizados nos dias de hoje, tendo sabores e cores muito mais fortes.

Ainda segundo MORADO, comenta-se que na Idade Média, a fabricação da cerveja ficou concentrada nos conventos e era feita de cevada, considerada forte e de boa qualidade e outras feitas de trigo ou aveia, de qualidade inferior. No século X, o Rei Ludwig da Baviera decretou uma lei que favorecia a fabricação de cerveja pelos conventos, estabelecendo cotas para aristocratas de acordo com a hierarquia. Os beneditinos de Weihenstephan foram os primeiros oficialmente a receber autorização

para fabricação e venda de cerveja de forma profissional – 1040 D.C. tendo os monges direito a 5 litros diários para o seu consumo pessoal. Com o tempo, os servos foram libertados e os cervejeiros passaram a distribuir o produto para as abadias. O consumo era tão grande que as tabernas começaram a se tornar importantes. Entre goles de cervejas, inúmeros negócios com a bebida eram fechados e a economia girava (MORADO, 2009). Como a cerveja é mais estável do que o vinho, era mais fácil transportá-la, entretanto isso não fez com que os nobres deixassem de consumi-lo (COUTINHO, 2009).

Em 1516, em um esforço para regularizar o processo de fabricação da cerveja, foi decretada a Lei da Pureza, a mais antiga conhecida. Esta determinou que os ingredientes que poderiam ser usados para fabricar cerveja eram: cevada, lúpulo e água. Não se conhecia nesta época a levedura de cerveja, e somente depois esta foi incluída na lei.

No século XVIII, o termômetro passou a ser utilizado pelos cervejeiros. Tornou-se possível regular a temperatura de fermentação. Por volta de 1765, com o motor a vapor, a industrialização passa a fazer parte da vida das cervejarias. Dosagens de fermentos e sacarina ficaram mais precisas, tendo como resultado uma bebida uniforme e forte (COUTINHO, 2009).

A receita, tradicionalmente empírica, não se alterou por conta das novas tecnologias. Isso fez com que o cervejeiro sempre fosse valorizado. Com os avanços da ciência, os detalhes químicos presentes na substância passaram a ser estudados. Lavoisier aprofunda-se nos estudos da fermentação alcoólica. No início do século XIX, Payen estuda a amilase. Dubrufaunt, em 1847, descobre a maltose (sacarificação do amido: transformação do açúcar em álcool e ácido carbônico) (COUTINHO, 2009).

COUTINHO (2009) diz que em 1871, Pasteur descobriu que a modificação da cerveja era o resultado da ação de microrganismos do ar, água ou dos aparelhos utilizados na fabricação do produto. Como ele já sabia eliminar os agentes que causavam as alterações na bebida, iniciou pesquisas e concluiu, através de análises microscópicas, que o que liberava o mau gosto na cerveja era o próprio levedo, Pasteur então adaptou o processo de preservação dos vinhos à cerveja, criando o processo chamado pasteurização. Com suas pesquisas, Pasteur também concluiu o princípio científico de que alteração do mosto ou da cerveja está ligada ao desenvolvimento de organismos microscópicos.

Com a descoberta de Pasteur, inúmeras outras pesquisas tiveram início, proporcionando novos e mais aperfeiçoados métodos de cultura de levedo, sendo que, após a revolução industrial, a cerveja passou de um produto empírico para um científico, permitindo, assim, o mestre cervejeiro de utilizar recursos sanitários para chegar à perfeição do produto (COUTINHO, 2009).

No Brasil, o contato inicial ocorreu no ano de 1637, junto à chegada de Maurício de Nassau no município de Recife, tornando este o principal porto da Companhia das Índias Ocidentais, trazendo o mestre cervejeiro chamado de Dirck Dix. No entanto, somente cerca de três anos depois, em outubro de 1640, uma cervejaria começou a ser planejada e montada em uma residência chamada de La Fontaine (SANTOS, 2005).

O mesmo COUTINHO (2009) indica que os portugueses temiam perder o mercado de vinhos para a cerveja fazendo com que somente no ano de 1808 a cerveja chegasse oficialmente no Brasil, junto à família real portuguesa, por conta do Rei que era um grande admirador da mesma, e a consumia diariamente.

Ao chegar à colônia, Dom João decreta a Abertura dos Portos às Nações Amigas, modificando drasticamente a vida econômica local e diversificando o comércio. Ocorre uma inundação de produtos estrangeiros, sendo que em 1810, com o Tratado de Amizade e Aliança e o de Comércio e Navegação, a presença inglesa como importadora é fortalecida, tendo seus impostos em torno de 15% e outros países girando por volta de 24%, dando imensa vantagem sobre os concorrentes e deixando a cerveja extremamente popular e bastante consumida (COUTINHO, 2009).

Mesmo a cerveja já sendo bastante consumida, o seu processo ainda era caseiro e praticamente de subsistência para as famílias dos imigrantes (MORADO, 2009). Somente em 1834, na cidade do Rio de Janeiro, passou a ser idealizada e montada uma cervejaria tipicamente brasileira, tendo essa um sucesso suficiente para gerar interesse de toda região em produzir cerveja. A partir de 1850, algumas famílias de imigrantes passaram a usar seus escravos para a produção de bebida, abastecendo o comércio local, tornando o Rio de Janeiro comparável às grandes cidades europeias referências no assunto (MELO, 2000).

A fabricação de cervejas no país começa a tomar grandes proporções a partir da metade do século XIX, com inúmeras fábricas iniciando suas atividades (SANTOS, 2005). Até o final do século XX as cervejarias, tanto grandes como pequenas, tinham uma disputa acirrada, quando começaram a surgir as microcervejarias, onde as

instalações são voltadas à produção de pequenas quantidades de cervejas únicas, raras e de melhor qualidade sensorial, ou seja, sabores, cores e texturas elevados (MORADO, 2009).

Com estas contribuições científicas, a fabricação de cerveja pôde se desenvolver plenamente, dentro de técnicas sofisticadas que proporcionam produtos de qualidade marcadamente superior (COMO FAZER CERVEJA, 1985).

## 2.2. As classificações da cerveja

As cervejas são basicamente classificadas em dois grupos, de acordo com o tipo de fermentação feito em sua produção, são elas: As cervejas conhecidas como “ale” que são produzidas com alta fermentação, e as cervejas tipo “lager” de baixa fermentação. Na sequência são apresentadas as classificações e uma breve descrição dos tipos de cerveja.

### 2.2.1. A cerveja tipo ale

As cervejas classificadas como Ale são produzidas com o fermento *Saccharomyces cerevisiae* sendo sua fermentação em temperaturas, dependendo do tipo de cerveja, em torno de 20°C. São consideradas cervejas de alta fermentação pelo fato de o fermento tender a ficar suspenso no tanque durante o processo, resultando em aromas e sabores complexos, com notas frutadas e de especiarias.

O fato de serem consideradas cervejas de alta fermentação não significa que tenham necessariamente teor alcoólico mais alto que as Lager. Também não são necessariamente escuras. Existem Ale de baixo e alto teor alcoólico, assim como claras e escuras. Até o ano de 1400, quando se começou a fabricar cervejas Lager, todas as cervejas eram Ale (EISENBAHN, 2010).

### 2.2.2. A cerveja tipo lager

As Lager, como dito anteriormente, são cervejas de baixa fermentação, cujo processo é feito em temperaturas menores que as do tipo Ale, em torno de 10°C. São produzidas com o fermento *Saccharomyces uvarum*, sendo raramente pouco frutadas, com aromas e sabores de cereais (cevada e/ou trigo), pão e lúpulo (EISENBACH, 2010).

### 2.3. MATÉRIAS-PRIMAS DA CERVEJA

Segundo MORADO, pela Lei da Pureza da Cerveja Alemã, os elementos das cervejas seriam os clássicos e sem grandes mudanças, porém, a bebida permite grande versatilidade quanto aos ingredientes que são utilizados em sua produção. A proporção dos ingredientes utilizados, o grau de maltagem do cereal, o tipo de lúpulo utilizado, o tipo de fermentação e a temperatura e duração das etapas do processo bem como o processo de armazenamento e envase, caracterizam uma grande diversidade de cervejas (MORADO, 2009).

A seguir serão apresentadas as matérias-primas e uma breve descrição sobre as mesmas.

#### 2.3.1. A água

A composição da cerveja é feita com mais de 91% de água, ou seja, a qualidade do produto final depende muito da mesma devendo apresentar características físico-químicas necessárias para produção de cada tipo de cerveja. Um exemplo de parâmetro que deve ser respeitados é o pH, que influencia diretamente a atividade enzimática (BORZANI, 2001).

#### 2.3.2. O malte

VENTURINI FILHO (2005) define malte como a matéria-prima resultante da germinação de qualquer cereal (cevada, milho, trigo, aveia, entre outros) a condições controladas. Exemplos de grãos de malte são mostrados na Figura 1.



**Figura 1 – Alguns exemplos de Malte**  
Fonte: <http://www.cervaleria.com>

Segundo BORZANI (2001), embora vários cereais possam ser satisfatoriamente maltados, a cevada é a que apresenta menores dificuldades técnicas no processo de maltagem e sendo a principal fonte de amido, cuja estrutura é modificada durante o processo de maltagem (conversão do cereal natural em malte), no qual o amido é convertido em açúcares, tais como maltose e glicose.

O processo de maltagem tem como finalidade elevar o conteúdo enzimático dos grãos de cevada através da síntese de amilases, proteases, glutanases, etc. Estas enzimas durante o processo de mosturação serão os catalisadores das reações de quebra das macromoléculas (proteínas, amido, glucano, etc.), presentes na matéria-prima em compostos menores que sejam solúveis no mosto (CERVESIA, 2010).

### 2.3.3. O lúpulo

O lúpulo (*Humulus lupulus* L.) é uma espécie de planta trepadeira, dóica (apresenta flores masculinas e femininas), perene, que pertence ao grupo das Urticáceas e da família Cannabaceae (CERVESIA, 2010). O interesse da indústria recai sobre flores femininas, as quais são ricas em glândulas amarelas, contendo lupulina (óleos essenciais), responsável pelo aroma e amargor característico das cervejas (BORZANI, 2001).



**Figura 2 – Lúpulo**  
 Fonte: <http://www.canalcatarinense.com.br>

Diferentemente do malte, o lúpulo, mostrado na Figura 2 não altera o corpo da cerveja nem seu teor alcoólico, mas é fundamental para conferir à bebida o aroma e amargor característicos das boas cervejas (MORADO, 2009).

A composição do lúpulo é mostrada na Tabela 1 - Composição do lúpulo comercial:

**Tabela 1 - Composição do lúpulo comercial.**

<b>COMPONENTE</b>	<b>CONCENTRAÇÃO (%)</b>
Água	10,0
Resinas totais	15,0
Óleos essenciais	0,5
Tanino	4,0
Monossacarídeos	2,0
Pectina	2,0
Aminoácidos	0,1
Proteína bruta	15,0
Lipídios e ceras	3,0
Cinzas	8,0
Celulose, lignina, etc.	40,4
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>

Fonte: BORZANI (2001).

Na visão cervejeira, as frações de maior importância da lupulina são as resinas e os óleos essenciais, sendo as resinas constituídas principalmente de alfa (também chamados humulonas) e beta ácidos (lupulonas). Durante a fervura do lúpulo no mosto, as moléculas de alfa-ácidos são isomerizadas para formar alfa-iso-ácidos, responsáveis pelo amargor (BORZANI, 2001).

#### 2.3.4. A levedura

Segundo VENTURI FILHO (2005), as características de aroma e sabor de qualquer cerveja são preponderantemente determinadas pelo tipo de levedura utilizada, que é classificada como fungo um exemplo é mostrado na Figura 3.



**Figura 3 - Levedura de cerveja**  
**Fonte: Adaptado de BORZANI (2001).**

Nas cervejarias, entretanto, se faz uma classificação empírica baseada no comportamento da levedura cervejeira durante a fermentação. Assim, se durante o processo fermentativo a levedura sobe para a superfície do mosto, ela é denominada de alta fermentação, e se ao final do processo fermentativo decanta no fundo do fermentador é chamada de baixa fermentação (BORZANI, 2001).

#### 2.3.5. Os adjuntos

Adjuntos podem ser genericamente definidos como produtos ou materiais que fornecem carboidratos para o mosto cervejeiro, desde que permitidos por lei. Em função disto podem substituir parcialmente o malte na produção de cerveja. O nível de substituição do malte pelo adjunto pode chegar a 50% onde cada cervejaria deve definir a proporção malte/adjunto para cada tipo de cerveja que produz. Os cereais mais utilizados na produção de adjunto cervejeiro são: arroz, milho, cevada, e sorgo (CERVESIA, 2010).

## 2.4. PROCESSO DE PRODUÇÃO DA CERVEJA

O processamento da produção da cerveja geralmente é dividido em três fases, são elas:

- i. Produção do mosto cervejeiro: Envolve a moagem do malte, a mosturação, fervura e clarificação do mosto;
- ii. Fermentação: Envolve a fermentação do mosto, e posteriormente a fermentação secundária também chamada de maturação;
- iii. Acabamento: Envolve os processos de clarificação, carbonatação, regulagem da cor, pasteurização e envase da bebida.

### 2.4.1. Preparo do mosto

Antes do processo de moagem o malte, geralmente comercializado em sacos de 25 ou 50 quilogramas, passa por um peneiramento a fim de retirar as impurezas brutas como metais, cascalhos, pedaços de plantas e sementes. Em seguida o malte é pesado nas quantidades necessárias para cada receita e é enviado para a moagem.

#### 2.4.1.1. Moagem

Ainda que a palavra "moagem" seja comumente utilizada, o termo que melhor descreve esta etapa do processo é "trituração", cujo qual, na grande maioria da indústria cervejeira busca-se a redução de toda a matéria a um grau uniforme de espessura.

Para o malte, busca-se inicialmente, romper a casca, para deixar exposta a porção interior do grão. Após isso, tenta-se desintegrar totalmente do endosperma. A parte interna do grão. Faz-se esse processo para que todos os seus elementos constituintes estejam acessíveis a atuação da ação enzimática, mantendo com isso um mínimo da quantidade de elementos finos (farinha) a fim de evitar a formação de uma quantidade excessiva de pasta no mosto.

Em termos práticos, um malte bem triturado não possuiria nenhum grão inteiro, um maior número de cascas rasgadas de um extremo ao outro sem aderência de endosperma, sendo o mesmo reduzido a um tamanho uniforme de partículas, com um mínimo de farinha fina (CERVEJA, 2010).

O tipo de moinho a ser utilizado na moagem depende da quantia que se pretende realizar a modificação do malte e das características dos recipientes de mosturação em que será elaborada a produção do mosto (BORZANI, 2010).

Após o processo de moagem, inicia-se o processo de mosturação, o qual será dado ênfase nesse trabalho.

#### 2.4.1.2. Mosturação

A etapa de mosturação, ou também comumente chamada de brassagem, no processo de produção de cerveja compreende a transformação dos ingredientes básicos (água, malte e adjunto) em mosto. A finalidade nessa etapa é recuperar a maior quantidade possível de extrato a partir do malte ou dos adjuntos que estiverem eventualmente complementando o malte.

Segundo VENTURI FILHO (2005), a mistura do malte moído juntamente com água e temperatura controlada, de acordo com um programa previamente estabelecido, tem por objetivo solubilizar as substâncias do malte diretamente solúveis em água, e com o auxílio das enzimas, solubilizar as substâncias que sejam insolúveis.

No processo cervejeiro, as enzimas do malte têm como função transformar o amido em açúcar e solubilizar as proteínas.

A enzima amilase (diástase) é a responsável pela decomposição do amido em dois procedimentos distintos:

- Liquefação do amido pela alfa amilase;
- Açucaração pela beta amilase.

A enzima peptidase rompe os complexos proteicos do malte proporcionando maior quantidade de proteínas solúveis no mosto.

O malte ainda é o único agente sacarificante permitido na fabricação da cerveja, embora técnicas sejam propostas para sua substituição pelo uso de enzimas puras. A liquefação do amido facilita a atuação das enzimas já que expõe as cadeias do polissacarídeo que, em sua forma cristalina, é mais resistente ao ataque enzimático.

Ainda segundo VENTURI FILHO (2005), a escolha do tipo de mosturação ou programa de tempo/temperatura, a ser aplicado durante a atuação enzimática vai depender da composição e do tipo de cerveja desejado, agregando, por exemplo, conhecimento do quanto de açúcares fermentescíveis deseja-se ou do quanto de

substâncias proteicas de alto peso molecular almeja-se para o “corpo” da cerveja e consistência da espuma.

As temperaturas de aquecimento da mistura malte moído e água podem obedecer à seguinte variação como apresentada na Figura 4:

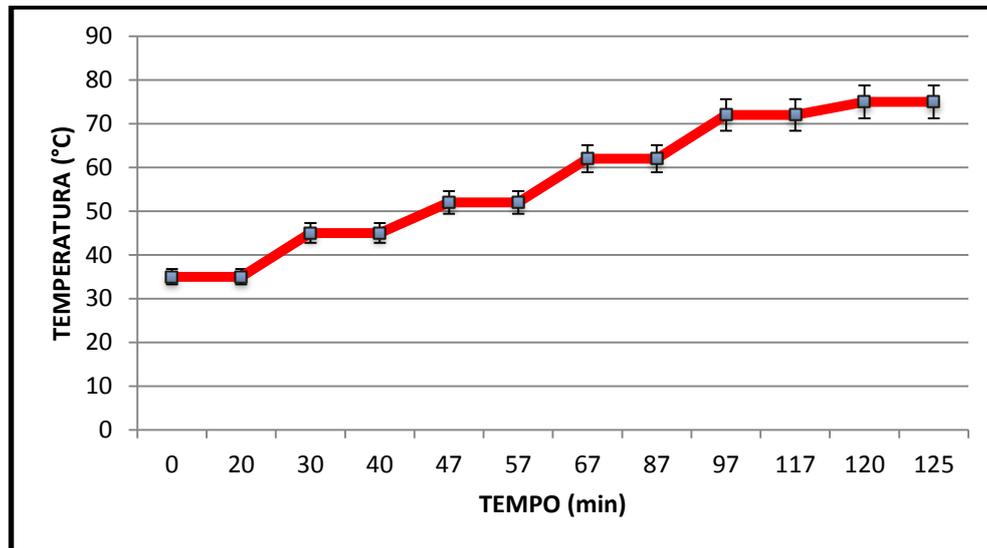


Figura 4 - Variação da temperatura em função do tempo no processo de mosturação.  
 FONTE: Adaptado de: VENTURI FILHO (2005).

BORZANI (2010) descreve as fases do processo:

- Parada de Acidificação (*Acid Rest*) 40-55°C: Diminui o pH melhorando a ação enzimática. Pouco utilizada haja vista hoje em dia os grãos já reduzem o PH para um limiar aceitável.
- Repouso Protéico (*Protein Rest*) 50-55°C: As enzimas atuantes nessa faixa de temperatura agem nos cereais ricos em proteína como trigo, aveia, centeio, grãos não maltados, dentre outros. Caso a receita tenha cereais protéicos essa rampa é fundamental sob pena de que tais grãos não sejam aproveitados. Sugere-se um repouso de 15 a 20 minutos em média.
- Sacarificação Beta (55-65°): Trabalha a “Beta Amilase”, enzima que converte o amido em açúcares fermentáveis resultando em uma cerveja mais alcoólica e menos encorpada/doce. Normalmente com um repouso de cerca de 50 a 70 minutos para garantir a total conversão do amido, porém a temperatura em que as beta amilases trabalham melhor é de 62°C.
- Sacarificação Alfa (68-73°): Trabalha a “Alfa Amilase” enzima que converte parte do amido em açúcares não fermentáveis gerando uma cerveja menos alcoólica e mais

encorpada/doce. Normalmente essa rampa possui um repouso de cerca de 15 a 30 minutos.

- Inativação das Enzimas (*Mash out*) (75-79°C): Etapa que tem como única função parar a atuação das enzimas e preparar o mosto para a filtragem/lavagem, geralmente com um repouso entre 5 e 10 minutos.

A Tabela 2 - Temperaturas e pH para atuação de enzimas presentes no mosto cervejeiro - apresenta valores de pH e temperatura ótimos para a atuação de determinadas enzimas chaves no processo de mosturação. Estes dados são muito importantes para que o cervejeiro possa determinar qual o tipo de mosto com que ele irá trabalhar e qual o tipo de cerveja que irá produzir.

**Tabela 2 - Temperaturas e pH para atuação de enzimas presentes no mosto cervejeiro.**

<b>ENZIMAS</b>	<b>TEMPERATURA</b>	<b>PH ÓTIMO</b>	<b>SUBTRATO</b>
Hemicelulases	40 a 45°C	4,5 a 4,7	Hemicelulose
Exopeptidases	40 a 50°C	5,2 a 8,2	Proteínas
Endopeptidases	50 a 60°C	5,0	Proteínas
Dextrinase	55 a 60°C	5,1	Amido
Beta-amilase	60 a 65°C	5,4 a 5,6	Amido
Alfa-amilase	70 a 75°C	5,6 a 5,8	Amido

FONTE: Adaptado de: JANJAR (2007).

Para a realização dos processos enzimáticos anteriormente descritos, existem dois processos básicos de mosturação. O processo de “cocção” é normalmente utilizado quando não se faz uso de adjuntos na formulação da cerveja. Os processos que fazem uso de adjuntos na formulação da cerveja seguem o processo de “infusão por duas massas” (CERVEJA, 2010).

Como base para esse projeto, foi trabalhado o processo de mosturação na produção de cerveja do tipo puro malte, o qual se utiliza do processo de cocção, termo que será explorado a seguir.

Segundo o dicionário Oxford, a cocção se refere ao processo de se extrair a essência de alguma coisa através da fervura ou do calor. No mundo da cerveja, cocção é um método de mosturação em que parte do mosto é levada a fervura e, em seguida, é devolvido à parte principal para elevar a temperatura a um novo patamar (OXFORD, 2013).

“O método de cocção foi desenvolvido antes do uso disseminado dos termômetros e com objetivo de elevar a temperatura do mosto a uma série de patamares de temperatura de maneira controlada, precisa e de fácil reprodução. Os termômetros foram desenvolvidos e disseminados ao longo dos séculos XVII e XVIII, com as escalas Fahrenheit e Celsius propostas somente em 1724 e 1742, respectivamente. Sem os termômetros, a mistura sucessiva de certos volumes de mosto que acabara de ferver com o mosto principal era uma maneira de garantir a precisão e a repetição do perfil de brassagem” (ROSA, 2009).

O método de cocção teve origem na Europa Central sendo utilizado na Alemanha, República Tcheca e Bélgica, por exemplo, até os dias de hoje. Existem vários métodos de cocção, classificados de acordo com o número de vezes em que parte do mosto é levada a ferver, sendo simples, duplas e triplas as cocções mais usadas (ROSA, 2009).

Dentre as vantagens do método de cocção estão certas reações físico-químicas (caramelização e reação de Maillard) que acontecem com a ferver, também com essa ferver, o amido e as enzimas se dissolvem mais facilmente e em maior escala, aumentando sua eficiência. Além de tudo isso, a ferver ainda ajuda a coagular as proteínas, aumentando bastante a limpidez da cerveja. Alguns exemplos dos patamares de temperatura são mostrados na tabela abaixo:

**Tabela 3 - Patamares de temperatura e os respectivos objetivos.**

TEMPERATURA	REPOUSO	OBJETIVO
35 a 45°C	Inicialização ou <i>mash-in</i> (acidificação, solubilização, betaglucanase).	Diminuir o pH para a brassagem, solubilizar o amido e reduzir a viscosidade para a lavagem.
44 a 45°C	Fenólico	Quebrar a ligação entre ácido ferúlico e outros elementos para maximizar a quantidade de ácido ferúlico em sua forma livre, a ser transformada pelo fermento em 4-vinyl guaiacol, a substância fenólica mais típica de cervejas de trigo, associado ao aroma de cravo.
46 a 55°C	Proteico (peptidase e protease)	Quebrar as proteínas “grandes” para diminuir a viscosidade e a turbidez e produzir amino-nitrogênio (aminoácidos necessários para a fermentação).
60 a 65°C	Beta-amilase	Quebrar “as pontas” do amido em açúcares relativamente simples.
65 a 72°C	Alfa-amilase	Quebrar “o meio” do amido em açúcares relativamente complexos.
62 a 70°C	Sacarificação (alfa e beta)	Quebrar o amido.

74 a 80°C	Finalização ou <i>mash-out</i>	Desnaturar as enzimas para estabilizar a conversão e diminuir a viscosidade para melhorar a lavagem.
-----------	--------------------------------	--

**FONTE: Adaptado de ROSA (2009).**

A quantidade a ser retirada do mosto principal para a cocção depende do equipamento e dos patamares de temperatura envolvidos na passagem. Em situações ideais, a mistura de duas partes de um mesmo líquido com temperaturas diferentes é a média das temperaturas ponderadas pelos respectivos volumes.

Ao se transferir a parte mais quente para o recipiente onde se encontra a parte mais fria, há perda de calor para o meio e também para o recipiente onde se encontra a parte mais fria. E se os líquidos foram diferentes ou tiverem densidades diferentes, é necessário levar em consideração a *massa térmica* do líquido, ou material em geral, pois a energia necessária para alterar certa quantidade de um material não depende só da massa do material, mas também do material em si, e essa dependência entra através de um parâmetro chamado *calor específico*, relacionado com a massa térmica. Por último, a parte retirada para a decocção será fervida e parte do volume será perdida pela evaporação.

Por esses motivos, na prática, é melhor aumentar a quantidade de mosto para a cocção e, na hora de retornar essa parte ao mosto principal, monitorar a temperatura para transferir apenas o necessário para alcançar o novo patamar. E às vezes isso pode não ser suficiente e pode ser necessário usar aquecimento direto para alcançar a temperatura desejada.

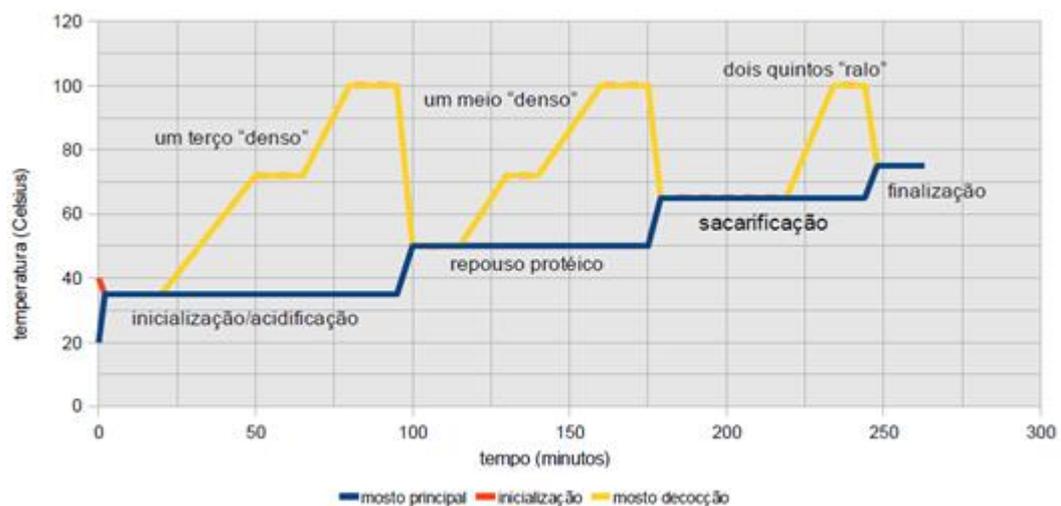
Outra coisa a ser levada em consideração é qual parte pegar do mosto. Em quase todas as passagens, é desejável colher uma parte mais densa do mosto, deixando escorrer parte do líquido que contém boa parte das enzimas já diluídas, para reduzir a quantidade de enzimas destruídas pela fervura. Apenas na parte do *mash-out* é melhor retirar uma parte menos densa, pegando mais líquido, para reduzir a quantidade de amido ainda não convertido e preso no bagaço que será dissolvido durante a fervura, já que ele não será mais convertido.

Na cocção da cerveja tipo puro malte, o malte moído é misturado com água quente no interior de um taque construído geralmente em aço inoxidável denominado de “mosturador” ou “tina de mosturação”, resultando em uma mistura que permanece em repouso por um tempo de duas horas a uma temperatura de 40°C. Ao final da primeira hora de repouso uma fração mássica equivalente a um quarto ou dois terços

do mosto é enviada para uma caldeira, onde será fervida por aproximadamente 30 minutos. O material fervido retorna ao mosturador elevando a temperatura da mistura para 52-54°C, ótima para a atividade das enzimas proteolíticas que devem nesta temperatura atuar sobre o conteúdo proteico presente no mosto. Após um período de aproximadamente 45 minutos nesta temperatura repete-se a operação por mais duas vezes, fazendo a temperatura do mosto atingir 65°C, temperatura ótima para a ação das amilases e posteriormente atingir a temperatura de 73-76°C, temperatura ótima para a filtração do mosto devido à viscosidade baixa nesta temperatura (BORZANI, 2010).

O método clássico de decocção tripla, mencionado acima, passa pelos patamares de acidificação, proteína, sacarificação e finalização (*mash-out*), com uma decocção entre cada uma delas. Na Figura 5 mostrada a seguir é possível visualizar esta rampa de subida da temperatura do mosto com o tempo. Estima-se que todo o processo de fervura do mosto demore cerca de quatro horas e meia.

A Figura 5, mostra um exemplo das rampas de propagação de tempo e temperatura no processo de cocção de três fervuras.



**Figura 5 - Propagação de tempo e temperatura no processo de cocção de três fervuras. Adaptado de: CERVEJA (2010).**

Na próxima seção serão abordados os conceitos de temperatura e os respectivos equacionamentos de sistemas térmicos.

## 2.5. TEMPERATURA

Como visto a temperatura é uma das principais variáveis de processo, sendo dessa forma, sua medição e controle de fundamental importância no processo de produção de cerveja (COHN, 2006).

#### 2.5.1. Conceito de temperatura

COHN (2006) explica que, perante a física clássica, a temperatura quantifica o calor, que é uma forma de energia relacionada à atividade molecular das substâncias, sendo a temperatura e a quantidade de calor maiores à medida que o nível de intensidade da agitação entre as moléculas de uma substância aumentam. Essa relação é dada pela fórmula:

$$\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (1)$$

Onde:

$\Delta Q$	= variação da quantidade de calor [cal ou J];
$m$	= massa da substância envolvida [g ou Kg];
$c$	= calor específico da substância [cal/g°C ou J/kg°C];
$\Delta T$	= variação da temperatura [°C];

No Brasil a unidade que exprime quantidade de calor é a caloria, sendo definida como a quantidade de calor necessária para elevar um grama de água de 14,5°C para 15,5°C. Mesmo não sendo uma unidade do sistema métrico, O INMETRO permite o emprego da mesma.

Ainda seguindo COHN (2006), um conceito fundamental é que o calor como uma forma de energia, não pode ser criado nem perdido, sendo esse apenas transformado ou transferido de um ponto a outro, deixando toda forma de medição de temperatura indireta, baseada a alteração de alguma propriedade física de um dado material. A escala termométrica de medição de temperatura utilizada nesse trabalho é a Celsius (°C), que é a escala SI (Sistema Internacional).

A parte crítica da especificação de um sistema onde ocorre medição de temperatura, dentre outros motivos existentes, se concentra na escolha do sensor mais apropriado e do dispositivo de proteção do mesmo. Os principais fatores a serem considerados estão relacionados a seguir:

- i. Faixa de temperatura: que no caso da mosturação precisa atuar de 0°C a aproximadamente 90°C.
- ii. Proteção: pois os sensores de temperatura são mecanicamente delicados e incapazes de resistir diretamente a condições agressivas.

O conhecimento do meio no qual irá operar o sensor, aliado à temperatura de trabalho, permite que se especifique o componente adequado.

### 2.5.2. Modelagem de sistemas térmicos

GOLNARAGHI (2012) apresenta as propriedades elementares da transferência de calor, onde dizem que, as duas variáveis mais importantes em um processo térmico são a temperatura  $T$  [°C] e a energia térmica ou calor armazenado  $Q$  [J], ambas expressas por unidades de energia. A transferência de calor está relacionada com a taxa de fluxo de calor  $q$  [W], a qual possui unidades de potência. Isto é,

$$q = \dot{Q} \quad (2)$$

Como nos sistemas elétricos, o conceito da capacitância em um problema de transferência de calor está relacionado com o armazenamento (ou descarga) de calor em um corpo. A capacitância  $C$  [J/K] está relacionada com a variação da temperatura  $T$  [°C] do corpo em relação ao tempo e à taxa de fluxo de calor  $q$  [W]:

$$q = C\dot{T} \quad (3)$$

Em que a capacitância térmica  $C$  [J/K] pode ser estabelecida como o produto entre a massa específica do material  $\rho$  [Kg/m<sup>3</sup>], o calor específico do material  $C_p$  [J/(kg.K)] e o volume  $V$  [m<sup>3</sup>], como pode-se ser visto em (4):

$$C = \rho C_p V \quad (4)$$

Em um sistema térmico, existem três diferentes formas de se transmitir o calor: por condução, convecção ou radiação, nesse trabalho usamos o método de convecção.

A convecção é um tipo de transferência de calor que ocorre entre uma superfície sólida e um fluido exposto sobre ela, forma de transferência que será utilizada nesse projeto, onde se mostra como exemplo de sistema a Figura 6.

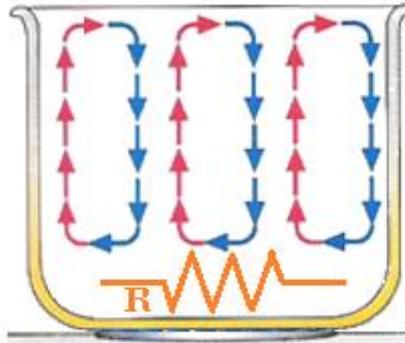


Figura 6 - Convecção de calor da superfície aquecida para o fluido.  
Fonte: Adaptado de GOLNARAGHI (2012).

Nesse projeto foi abordado um aquecimento por meio de resistência elétrica.

GOLNARAGHI demonstra que, no contorno, onde o fluido se encontra com uma superfície sólida, o processo de transferência de calor é por condução. Na convecção térmica, o fluxo de calor é expresso por:

$$q = hA \cdot \Delta T = D_0 \cdot \Delta T \quad (5)$$

Em que  $q$  [W] é a taxa de transferência de calor ou fluxo de calor,  $h$  [W/(m<sup>2</sup>K)] é o coeficiente de transferência de calor convectivo,  $A$  [m<sup>2</sup>] é a área de transferência de calor e  $\Delta T = T_b - T_f$  [°C] é a diferença entre as temperaturas do contorno e do fluido. O termo  $hA$  pode ser representado por  $D_0$ , em que:

$$D_0 = hA = \frac{1}{R} \quad (6)$$

Sendo a taxa de fluxo de calor  $q$  [W] representada em termos de resistência térmica  $R$  [Ω], de maneira:

$$q = \frac{\Delta T}{R} \quad (7)$$

### 2.5.3. Transformada de Laplace

De acordo com OGATA (1998), a transformada de Laplace é um método operacional que pode ser usado para solucionar equações diferenciais lineares, podendo, dessa maneira, converter funções exponenciais em funções algébricas de uma variável complexa “s”.

OGATA (1998) também diz que o método da transformada de Laplace é vantajoso, pois permite o uso de técnicas gráficas para prever o desempenho do sistema, sem a necessidade de solucionar sistemas de equações diferenciais, obtendo tanto a componente estacionária quanto a componente transitória da solução simultaneamente.

Em sua definição a transformada de Laplace é dada por:

$$\mathcal{L}[f(t)] = F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dt [f(t)] = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt \quad (8)$$

Onde:

$f(t)$  = uma função de tempo em que  $f(t) = 0$  para  $t < 0$ ;

$s$  = uma variável complexa;

$\mathcal{L}$  = um símbolo operacional que indica que a grandeza que ele antecede vai ser transformada por meio da integral de Laplace;

$F(s)$  = transformada de Laplace de  $f(t)$ ;

### 2.5.4. Análise do lugar das Raízes

Conforme OGATA (1998) cita, a característica da resposta transitória de um sistema de malha fechada depende essencialmente da localização dos polos de malha fechada. Se o ganho do sistema for variável, então a localização dos polos dependerá do valor do ganho de malha escolhido, onde os polos de malha fechada são as raízes da equação característica. Um método simples para a determinação das raízes da equação característica foi desenvolvido por Evans, método o qual é chamado de Método do Lugar das Raízes, que permite que as raízes da equação característica sejam representadas graficamente para todos os valores de um parâmetro do sistema.

O lugar das raízes da equação característica do sistema de malha fechada é dado quando um parâmetro específico (normalmente o ganho  $K$ ) varia de zero ao infinito (OGATA, 1998).

Considerando um sistema conforme a equação (9):

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (9)$$

Obtém-se a equação característica do sistema em malha fechada igualando-se o denominador do lado direito da função a zero, ou seja:

$$G(s)H(s) = -1 \quad (10)$$

As raízes da equação que corresponde a um dado valor do ganho podem então ser determinadas pela condição de módulo, onde, como em nosso caso,  $G(s)H(s)$  envolvem um parâmetro de ganho  $K$ .

#### 2.5.5. Transformada Z

Conforme nos é dado por OGATA (1998), a transformada em Z é uma ferramenta matemática na análise e síntese de sistemas discretos, desempenhando um papel paralelo ao desempenhado pela transformada de Laplace relativamente aos sistemas contínuos.

Para um sinal discreto  $x(n)$ , sua transformada de Fourier pode ser determinada, se existir, pela equação 11:

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n)e^{-j\omega n} \quad (11)$$

Existindo a transformada de Fourier, sua transformada inversa pode ser determinada pela equação 12:

$$x(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega \quad (12)$$

O problema é que nem sempre é possível encontrar a transformada para certos sinais, no entanto, existe uma saída para este problema que é a transformada z.

A transformada Z, representada por  $X(z)$ , de um sinal discreto  $x(n)$  é uma função complexa da variável complexa  $z \in \mathbb{C}$ , e define-se como mostra a equação 13:

$$X(z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n)z^{-n} \quad (13)$$

Utilizando-se destas formulações buscou-se a função de transferência da planta, contida pelo tanque ou panela de armazenamento do mosto, a resistência térmica, e também do próprio líquido, sendo que, para medir a temperatura do mesmo, foi utilizado o sensor de temperatura LM35, sensor que contém as especificações necessárias para um bom funcionamento do projeto, que será especificado no tópico seguinte.

#### 2.5.6. O sensor de temperatura LM35

O sensor LM35 é um sensor de precisão, fabricado pela *National Semiconductor*, que apresenta uma saída de tensão linear relativa à temperatura em que ele se encontrar no momento em que for alimentado por uma tensão que, pode ser de quatro a vinte volts em corrente contínua (TEXAS INSTRUMENTS, 2013).

Uma característica desse sensor é possuir em sua saída um sinal de 10 milivolts para cada grau Celsius de temperatura, sendo assim, apresenta uma boa vantagem com relação aos demais sensores de temperatura calibrados em “KELVIN”, não necessitando de nenhuma subtração de variáveis para que se obtenha uma escala de temperatura em graus Celsius (TEXAS INSTRUMENTS, 2013).

O LM35 também tem em suas características, não necessitar de qualquer calibração externa para fornecer com exatidão, valores de temperatura dentro da faixa de temperatura de  $-55^{\circ}\text{C}$  à  $150^{\circ}\text{C}$ .

Este sensor tem saída com baixa impedância, tensão linear e calibração inerente precisa, fazendo com que o interfaceamento de leitura seja especificamente simples, barateando todo o sistema em função disto. Pode ser alimentado com

alimentação simples ou simétrica, dependendo do que se desejar como sinal de saída, mas independentemente disso, a sensibilidade continuará sendo de 10 mV/°C (TEXAS INSTRUMENTS, 2013).

O dispositivo drena apenas 60µA da fonte de alimentação, sendo assim seu auto-aquecimento é de aproximadamente 0.1°C ao ar livre. O sensor LM35 é comercializado com vários tipos de encapsulamentos, sendo o mais comum o TO-92, que mais se parece com um transistor, e oferece ótima relação custo benefício, por ser o mais barato dos modelos e propiciar a mesma precisão dos demais. A grande diversidade de encapsulamentos se dá devido à alta gama de aplicações deste circuito integrado (TEXAS INSTRUMENTS, 2013).

Algumas características são fornecidas por um dos fornecedores do sensor LM35, a TEXAS INSTRUMENTS:

- Calibrado diretamente em graus Celsius (centígrados);
- Linear 10,0 mV /°C (fator de escala);
- Precisão de 0,5°C (a 25°C);
- Faixa de Operação de -55°C até 150°C;
- Adequado para aplicações remotas;
- Baixo custo / Não necessita de calibração no circuito;
- Alimentação 4V-30V;
- Menos de 60 miliampéres como corrente de passagem;
- Baixo auto-aquecimento, cerca de 0,08°C em ar ambiente;
- Não-linearidade apenas  $\pm \frac{1}{4}$ °C típica;
- Baixa impedância de saída, 0,1 Ohm para cada miliampéres de carga;

O sensor utilizado nesse projeto foi o sensor de temperatura L35C, em *package* (encapsulamento) de transistores TO-92, feita em plástico, que resiste a temperaturas dentre -55 graus Celsius e 150 graus Celsius, de acordo com o fabricante (TEXAS).

Avaliado o sensor, buscou-se uma revisão bibliográfica para os métodos de controle para encontrar uma melhor proposta para o desenvolvimento do controlador de temperatura.

## 2.6. CONTROLE

CAON (1999) diz que matemáticos desenvolveram um algoritmo chamado controle PID (Proporcional-Integral-Derivativo) em meados dos anos 30 do século XX. Os controladores PID industriais surgiram a partir dos anos 80, quando os microprocessadores conseguiram atingir uma capacidade de processamento e memória capazes de executar alguns algoritmos PID, porém no Brasil, um equipamento semelhante foi lançado apenas em 1993.

Os controladores PID são utilizados nas indústrias para o controle dos processos, geralmente feitos em malha fechada, pois a resposta do sistema retorna ao controle em forma de erro, ou seja, a subtração entre valor desejado e valor medido. As topologias de malha fechada e malha aberta serão descritos adiante (OGATA, 1998).

Um sistema de controle em malha aberta é o nome dado aos sistemas nos quais o sinal de saída não interfere na ação de controle, ou seja, não havendo uma retroação e nem um sinal de erro, havendo somente o sinal de entrada. A ação é executada ao se receber o sinal de entrada, porém o resultado não repercute em uma nova ação, sendo dessa maneira o processo dependente de calibração prévia. A Figura 7 mostra um exemplo de um sistema de controle à malha aberta (OGATA, 1998). Os conceitos de cada uma das componentes foram discutidos posteriormente, conforme exemplo demonstrado na Figura 7.

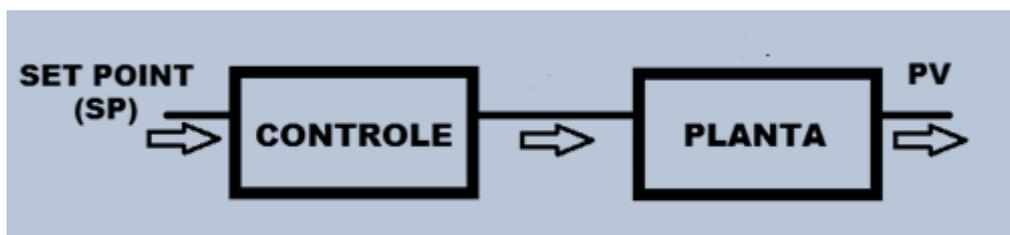


Figura 7 - Exemplo de um sistema de controle em malha aberta.  
Fonte: Adaptado de OGATA (1998).

CRUZ (2004) explica que nos sistemas de controle em malha fechada, a saída é utilizada para alterar o controle, por isso, geralmente são chamados de sistemas realimentados, ou sistemas com realimentação. O controlador é um dispositivo que utiliza do erro de um comparador, entre o valor desejado (*setpoint* ou *SP*) e o valor real medido (*presente variable* ou *PV*).

O controle em malha fechada é um sistema com retroação, isto é, o sistema mantém uma relação entre a saída e a referência. O erro é obtido pela subtração entre o sinal de saída do processo e o sinal de entrada. A diferença entre o sinal de entrada e o sinal de retroação, excita o controlador de modo que este atue no processo com o objetivo de reduzir cada vez mais o próprio erro, trazendo o valor do sinal de saída para o valor desejado, um exemplo desse sistema é apresentado na Figura 8 (OGATA, 1998).

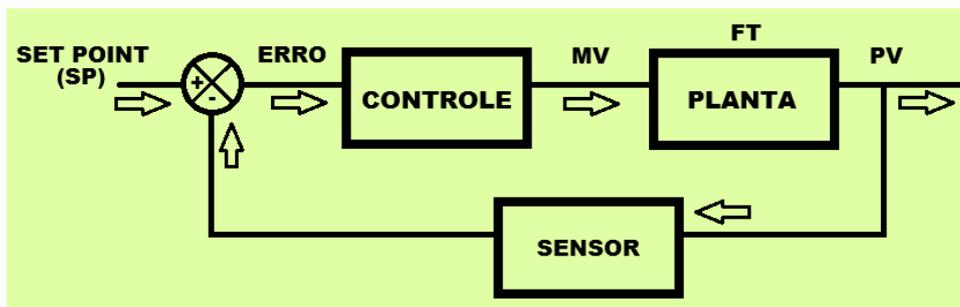


Figura 8 - Exemplo de um sistema de controle em malha fechada.  
Fonte: Adaptado de OGATA (1998).

Na sequência serão abordados os componentes de um sistema, além dos critérios de análise da resposta transitória, como tempo de atraso e tempo de subida e os conceitos de controle do controlador PID.

### 2.6.1. A função degrau

Função que representa a mudança do valor de uma variável para mais ou para menos. A alteração da temperatura desejada pode ser representada por uma função degrau: Ao mudar de 20°C para 22°C teremos um degrau de 2°C, sendo a função degrau uma transição instantânea e discreta (OGATA, 1998). O gráfico da função degrau é demonstrado na Figura 9:

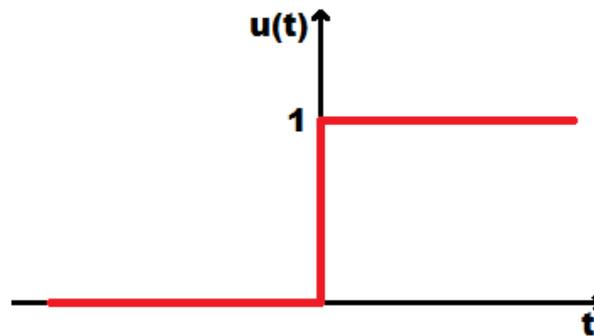


Figura 9 - Gráfico da função degrau.  
Fonte: Adaptado de OGATA (1998).

### 2.6.2. Análise e descrição das componentes

Na Figura 10 é dado um exemplo onde é feita uma análise dos componentes de um sistema de controle em malha fechada:

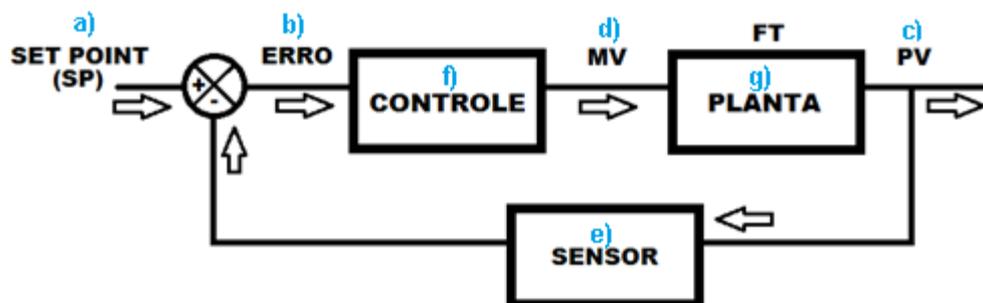


Figura 10 - Análise das componentes de um sistema de controle em malha fechada.  
Fonte: Adaptado de OGATA (1998).

Referenciando-se a Figura 10 pode-se descrever os seus componentes:

a) *Setpoint* (SP):

O *setpoint* é o valor de referência do controlador. É a variável de entrada (valor desejado) utilizada para o cálculo do erro do sistema. Um exemplo seria, em um sistema com uma temperatura que possa variar de 0°C a 200°C, supondo variações lineares e a variação do *setpoint* de 0 a 100, para cada variação de 1% no *setpoint* teremos 2°C variados. Iremos obter uma reta partindo da origem onde  $SP = 0$  e  $T = 0$  variando 2°C a cada 1% aumentado, então se desejarmos uma temperatura de 86°C, neste exemplo, o *setpoint* será de 43% (OGATA, 1998).

b) Sinal de erro:

O erro é a variável calculada entre a diferença do sinal referência (*setpoint*) e a saída do sistema. Esse sinal é usado para se determinar como a ação de controle irá

atuar no sistema para que a variável de saída se aproxime o máximo possível do valor de referência. Utilizando-se do mesmo exemplo, caso se deseje 86°C o *setpoint* será 43% e nesse momento tem-se uma temperatura de 20°C, ou seja, 10%. O valor do erro será o valor do *setpoint* subtraído do valor da temperatura e, calculando esse valor, chega-se a 33%. Esse sinal de 33% será usado para gerar uma correção a fim de atingir a temperatura desejada (OGATA, 1998).

c) Variável Controlada (PV):

A variável PV é variável de processo, *process variable* (PV) ou variável controlada, entendida nesse trabalho como a temperatura que se deseja controlar. Ela muda de acordo com a variação na entrada e sua representação numérica é usada no cálculo do erro pela equação a seguir:

$$E = SP - PV \quad (14)$$

A PV é o objetivo do controle. No caso do exemplo anterior a PV é a temperatura (OGATA, 1998).

d) Variável Manipulada (MV):

A variável manipulada, do inglês *manipulated variable* (MV), é a variável de saída do controlador, a qual atua na planta. É chamada de manipulada, porque, por exemplo, quando em malha aberta é a única que atua na planta e que é literalmente manipulada sem a necessidade de prévio processamento ou de ajustes. Portanto, é possível perceber que para o controle da variável controlada (controle indireto) é necessário a variável manipulada (controle direto) (OGATA, 1998).

e) Sensor

O sensor é o dispositivo responsável por mensurar a saída e informar de forma precisa qual o valor medido. Essa informação é comparada ao SP gerando o erro que é o sinal processado pelo controle (OGATA, 1998).

f) Controle

O controle é o protagonista no sistema para que este funcione adequadamente. Sua função está em atuar no processo e buscar a estabilização do sistema (OGATA, 1998).

### g) Planta

A planta é o conjunto de equipamentos que fazem parte do processo. Sua representação pode ser feita em uma equação no plano S. Quando a planta recebe o sinal do controlador, esta envia a resposta de acordo com sua equação, sendo representada por meio de uma função de transferência (OGATA, 1998).

A planta desse projeto foi um tanque protótipo, uma panela de alumínio de aproximadamente 10 litros.

É necessário ainda descrever o conceito de função transferência (FT). A função de transferência representa as relações de entrada e saída dos sistemas, ou seja, é a função que representa a união das equações relativas a cada equipamento do sistema. A função de transferência de um sistema representado por equações diferenciais lineares invariantes no tempo é definida como a relação entre a transformada de Laplace do sinal de saída (função resposta) e a transformada de Laplace do sinal de entrada (função excitação), na hipótese de que todas as condições iniciais são nulas (OGATA, 1998).

### 2.6.3. Modos de controle do controlador PID

As ações do controlador PID são respectivamente: ação proporcional (P), ação Integral (I) e ação Derivativa (D), sendo a característica de cada ação descrita a seguir:

#### a) Ação Proporcional

BAZANELLA (2000) descreve a ação proporcional como a que realiza um controle diretamente proporcional ao desvio, dada pela fórmula:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = Kp \quad (15)$$

Onde:

- $U$  é a amplitude do sinal de controle;
- $E$  é o sinal de erro (PV – SP);

-  $K_p$  é o ganho proporcional;

A ação proporcional não elimina o erro em regime permanente fazendo com que na mudança de *setpoint*, a saída fique longe da resposta desejada, além disso, se o ganho proporcional for alto, o sistema responde com um *overshoot* também alto. O controlador proporcional é essencialmente um amplificador com ganho ajustável.

b) Ação Proporcional-Integral

Ação em que se aplica tanto um fator proporcional ao erro quanto um fator integral ao mesmo, onde o primeiro tende a acelerar a resposta do sistema, e o segundo tende a reduzir ou eliminar o erro em regime permanente (BAZANELLA, 2000). A sua respectiva equação é dada:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i * s} \right) \quad (16)$$

Onde:  $T_i$  representa o tempo de integração. A relação da equação mostra que dependendo do  $K_p$ , a cada  $T_i$  minutos de integração, o sinal de saída variará a porcentagem relativa ao erro (PV - SP). Ou seja, a cada  $T_i$  minutos a ação  $K_p$  se repete. A ação PI elimina o erro em regime permanente.

c) Ação Proporcional-Integral-Derivativa.

Sendo um dos controles mais utilizados nas indústrias, esta ação de controle contém as três ações de controle juntas: Proporcional, Integral e Derivativa. Além dos efeitos das ações P e I, a ação derivativa antecipa a ação de controle em sua resposta, portanto, contribui para uma resposta mais rápida com um sobressinal reduzido. A ação derivativa diminui as oscilações da curva. A ação integral elimina o erro em regime permanente e a ação proporcional aumenta a velocidade da resposta. O efeito causado pelo controlador PI é eliminado pela ação derivativa. Essa última ação aumenta a estabilidade do sistema e torna a resposta mais rápida, a menos que exista ruído nas medições (BAZANELLA, 2000).

A equação de controle PID, sendo  $K_p$  o ganho proporcional,  $T_i$  o tempo de integração e  $T_d$  o tempo de derivação, é demonstrada a seguir:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) T_d s \quad (17)$$

OGATA (1998) explica que as curvas de resposta ao degrau devem ser obtidas experimentalmente, onde estas são caracterizadas por um tempo de atraso  $L$  e uma constante de tempo  $T$ , tal como é apresentado na Figura 11.

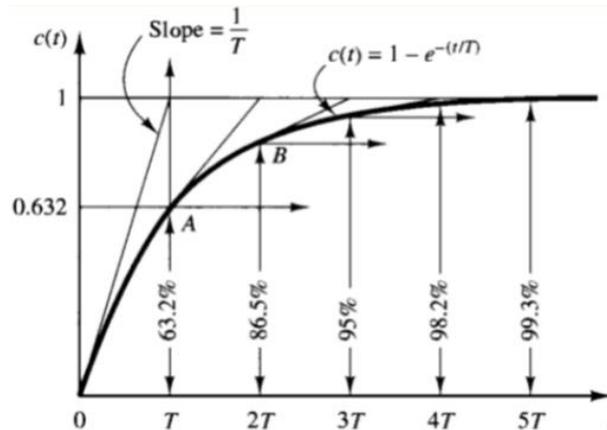


Figura 11 - Resposta para entrada em degrau Sistemas de 1ª Ordem  
Fonte: OGATA (1998).

Caso a curva não tenha esta forma, então este método de sintonização não pode ser aplicado (OGATA, 1998).

Ziegler e Nichols através da curva obtida pela resposta ao degrau e seus experimentos criaram uma tabela a partir da qual se é possível determinar os valores  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$ , essa tabela é dada a seguir (OGATA, 1998):

Tabela 4 - Tabela para cálculos de parâmetros de sintonia PID pelo método Ziegler-Nichols em malha aberta

CONTROLADOR	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0,9 * \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 * \frac{T}{L}$	$.2 * L$	$0,5 * L$

FONTE: Adaptado de: OGATA (1998).

Vistos os conceitos de controle, e buscando-se um controlador digital, torna-se viável o uso dos microcontroladores, o qual será tratado na seção seguinte.

## 2.7. MICROCONTROLADOR

Os microcontroladores são um dos principais componentes da eletrônica e da indústria automática. São circuitos integrados, geralmente de custo baixo, que contém em sua síntese: uma memória programável, sendo essa somente para leitura, armazenando permanentemente as instruções programadas, uma memória RAM, que trabalha com o armazenamento das “variáveis” utilizadas pelo programa e uma CPU, cuja função é interpretar e executar os comandos do programa. Além disso, os microcontroladores também possuem dispositivos de entradas e saídas, que tem a finalidade de controle de dispositivos externos ou de receber sinais pulsados de chaves e sensores (SILVA JÚNIOR, 1988).

Canais de comunicação serial, contadores e temporizadores também são encontrados em alguns modelos de microcontroladores. Esse sistema diferencia os sistemas baseados em microcontroladores daqueles baseados em microprocessadores, onde normalmente se utilizam vários componentes para implementar essas funções. Em contrapartida, as CPU's dos microcontroladores são, em geral, menos poderosas do que a dos microprocessadores.

“Atualmente os microcontroladores são elementos eletrônicos básicos para todos os engenheiros eletrônicos, principalmente os engenheiros eletrônicos, em função da inúmera variedade de aplicações. Com o avanço da tecnologia e a utilização da eletrônica digital por grande parte das empresas, o emprego dos microcontroladores vêm sendo muito requisitado para um melhor desenvolvimento da produção, diminuindo os custos e trazendo benefícios para as empresas que utilizam esse sistema” (GIANN BRAUNE REIS, 2006).

Considerando a relação custo/benefício, o uso dos microcontroladores não fica restrito somente às empresas de grande/médio porte, eles podem ser usados também em projetos eletrônicos, na substituição de vários componentes digitais, obtendo-se assim no final do projeto um melhor acabamento, pois o microcontrolador ocuparia um menor espaço físico, além de uma maior eficiência e praticidade (GIANN BRAUNE REIS, 2006).

Segundo SOUSA (2001), o primeiro microcontrolador foi lançado pela Texas Instruments em 1972. Conhecido como TMS 1000, era um microcontrolador de quatro *bits* que incluía em sua composição memórias RAM e ROM além de um suporte a I/O

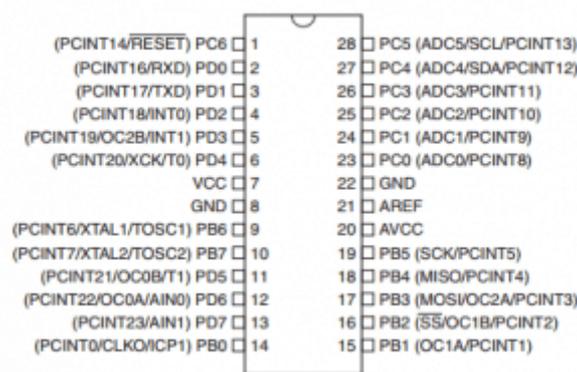
(IN/OUT em português ENTRADAS/SAÍDAS) em um único chip, o que permitia o seu uso na independência de qualquer outro chip externo. Em 1977 o fabricante Intel lançou o microcontrolador 8048, que possuía memória de programa externa (ROM), e memória de dados interna de 256 KBytes (RAM).

Existem no mercado muitos tipos de microcontroladores sendo o ATMEGA328 um dos mais populares, o seu sucesso se dá devido a vários motivos, como: baixo custo, facilidade de uso, versatilidade, vários fabricantes, além de ser rápido e eficaz. Nesse projeto utilizou-se do ATMEGA328, um microcontrolador da família ATMEL.

### 2.7.1. O microcontrolador ATMEGA328

O ATMEGA328 é um dispositivo microcontrolador de oito bits da família AVR com arquitetura RISC avançada e com encapsulamento DIP28. Ele conta com trinta e dois quilobytes de memória Flash, dois quilobytes de memória RAM e um quilobyte de memória EEPROM. Esse componente pode operar em até vinte mega Hertz, porém no nesse desenvolvimento foi optado por operar em 16 MHz, valor do cristal externo que está conectado aos pinos nove e dez do microcontrolador.

Esse microcontrolador possui vinte e oito pinos, sendo que vinte e três desses podem ser utilizados como I/O, ou seja, como entradas e saídas. A imagem abaixo exhibe a sua pinagem:



**Figura 12 - Pinagem Atmega328.**  
 Fonte: Atmel® ATMEGA328 Datasheet.

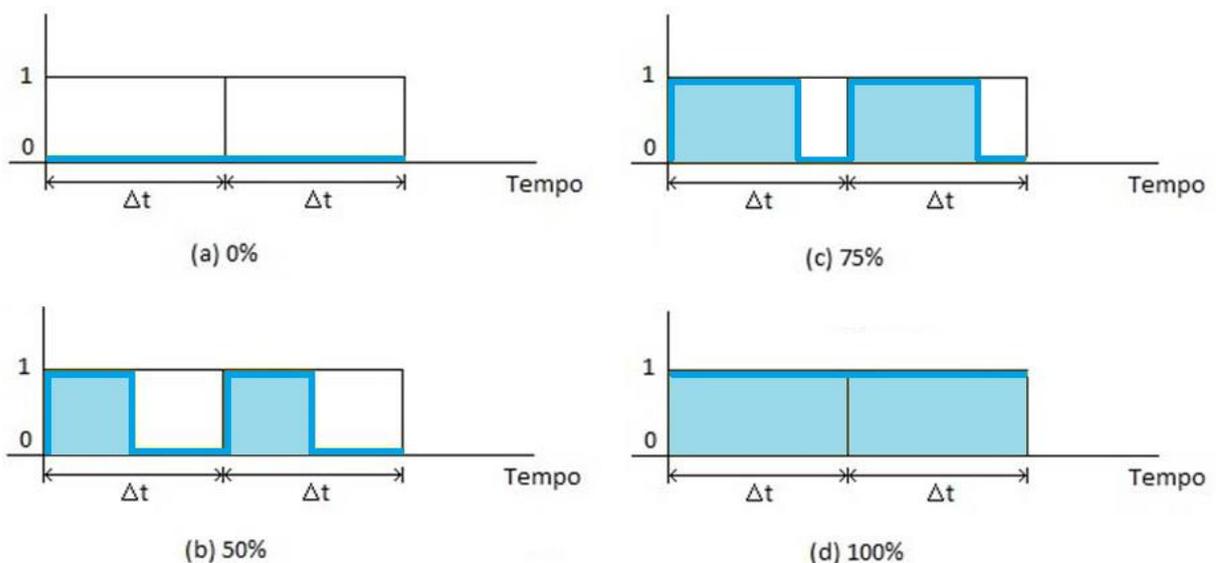
O fabricante ATMEL nos dá os dados necessários e características do mesmo dizendo que esse microcontrolador pode operar com tensões bem baixas, de até 1,8 Volts, mas nessa tensão apenas opera até 4MHz. Possui dois modos de consumo superbaixos, o Power-down Mode e o Power-save Mode, para que o sistema possa

poupar energia em situações de espera. Possui, como periféricos uma USART que funciona a até 250kbps, uma SPI, que vai a até 5MHz, e uma I2C que pode operar até 400kHz.

O ATMEGA328 também conta com um comparador analógico interno ao CI e diversos timers, além de 6 PWMs que são tratadas no tópico seguinte. A corrente máxima por pino é de 40 miliâmpères, mas a soma da corrente de todo o CI não pode ultrapassar 200 miliâmpères. Ele possui um oscilador interno de 32KHz que pode ser utilizado, por exemplo, em situações de baixo consumo (DATASHEET, 2016).

### 2.7.2. PWM

*Pulse Width Modulation*, ou em português, modulação por largura de pulso é uma função disponível no microcontrolador que tem como saída uma onda quadrada onde se ajusta uma razão de tempo em que ela será ligada (1) ou desligada (0). Essa onda tem uma frequência constante e alta, de forma que é imperceptível a transição entre o ligar e desligar, parecendo que o sinal é constante fornecendo uma razão da potência total. Um exemplo do funcionamento de um PWM é mostrado na Figura 13



**Figura 13 - Modulação por Largura de Banda**  
 Fonte: Editado de Atmel® ATMEGA328 Datasheet.

Nesse controlador, o PWM será usado para controlar a tensão fornecida à resistência de forma a controlar a temperatura da água. Conforme mostrado na figura 9, podemos descrever o eixo das ordenadas como a tensão e a área do gráfico é a

potência fornecida ao sistema. A função PWM no ATMEGA328 associa o número 0 a 0% e 255 a 100%.

## 2.8. ATUADOR

### 2.8.1. Controle de Potência

Atualmente, existem inúmeras aplicações tanto industriais como também comerciais que requerem controle de potência, alguns exemplos são: controle de iluminação, cargas de bateria, controle de velocidade de motores, soldas elétricas, entre tantos outros, incluindo o controle de aquecimento.

Estes controles utilizam em sua maioria tiristores, triacs, foto-acopladores e mais recentemente transistores de potência.

Para a aplicação no trabalho proposto, buscou-se se utilizar de um circuito com um foto-acoplador, ligado a um triac para controle do aquecimento de uma resistência elétrica dentro de um tanque.

O circuito foto-acoplador garante o isolamento físico entre a etapa de potência e placa de controle, no caso o microcontrolador, como pode ser visto na Figura 14, onde o foto-acoplador é o dispositivo MOC3010. Além disso, o foto-acoplador possui um dispositivo detector de zero, que garante o acionamento do triac somente quando a tensão da rede (Alimentação do Aquecedor) passe pelo valor zero, ou seja, trabalha em ciclo fechado, diminuindo os ruídos no circuito (NOLL, 2007).

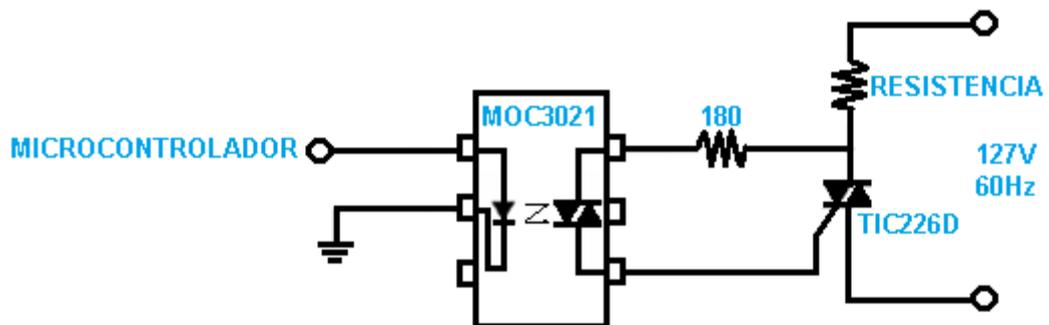


Figura 14 - Proposta de circuito de potência.  
Fonte: Própria com auxílio do software Corel Draw X6®.

A Série MOC3021 é formada por diodos de arseneto de gálio emissores de infravermelho, opticamente acoplados ao silício interruptor bilateral e são projetados para aplicações que exigem triac de disparo isolado, de baixa corrente de comutação

AC isolada, de alto isolamento elétrico (para 7500 Vac de pico), pequeno tamanho e baixo custo.

Detalhando-se a Figura 14 temos ainda um triac (*Triode for Alternating Current*) é um componente eletrônico equivalente a dois retificadores controlados de silício (SCR/tiristores) ligados em antiparalelo e com o terminal de disparo (ou gatilho - *gate*) ligados juntos. Este tipo de ligação resulta em uma chave eletrônica bidirecional que pode conduzir a corrente elétrica nos dois sentidos, no projeto utilizou-se de um triac modelo TIC226D. Tem-se ainda a resistência térmica do circuito implantada na planta ligada na rede 127 Volts.

### 3. METODOLOGIA

O presente trabalho trata da implementação de um sistema de controle de temperatura durante o processo de mosturação na produção de cerveja. O sistema proposto foi instalado em uma planta protótipo junto a uma panela de alumínio com capacidade de aproximadamente 10 litros.

Para uma melhor compreensão de todo o processo executado a seguir são descritas de forma sucinta as etapas envolvidas no trabalho. Os principais componentes do sistema podem ser visualizados na Figura 10.

#### i. Etapa 01 – Modelo Matemático da Planta

Foi determinado um modelo matemático simplificado da planta de forma analítica e experimental. Com a utilização de programas computacionais onde realizaram-se simulações para uma melhor compreensão da dinâmica da planta.

#### ii. Etapa 02 – Especificação de Projeto

Levantadas as especificações de projeto. Durante o processo de maturação o sistema de controle deve manter a temperatura do mosto de acordo com as rampas de entrada apresentadas pela Figura 4. Com estas informações foi determinada a potência elétrica requerida.

#### iii. Etapa 03 – Resistência Elétrica

Com a informação da potência elétrica requerida foi feita a especificação da resistência elétrica com o seu formato e localização de instalação na planta.

#### iv. Etapa 04 - Atuador

Após o dimensionamento da resistência elétrica, o que leva a corrente solicitada pela mesma, foi realizado o projeto do atuador contendo a estratégia de controle da corrente elétrica e dimensionamento dos componentes utilizados.

#### v. Etapa 05 – Sensor de Temperatura

Conforme já mencionado no trabalho o sensor utilizado será o LM35 que se enquadra perfeitamente as exigências de medida da temperatura. Também foi especificado o local de onde será extraído o valor da temperatura do mosto.

vi. Etapa 06 – Controlador Digital

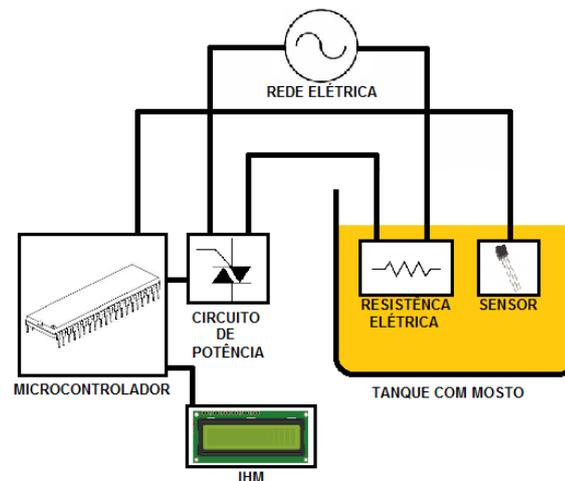
Efetuu-se a programação de um controlador PID Digital utilizando o microcontrolador ATMEGA328. O projeto do controlador foi realizado utilizando-se de técnicas de controle consolidadas na literatura, sendo que a comprovação dos resultados foi dada de forma teórica e prática, caso necessário, é possível via *software* realizar um ajuste fino dos parâmetros do controlador.

vii. Etapa 07 – IHM (Interface homem máquina)

Outra vantagem do controle digital que foi explorada neste trabalho foi a interface do sistema de controle com o usuário. Os dados mostrados no display foram definidos de acordo com a necessidade do operador.

viii. Etapa 08 – Implementação do sistema

Após executadas todas as etapas anteriores com sucesso o sistema proposto foi implementado em planta onde se realizaram vários testes e ajustes necessários para o funcionamento adequado do processo. A partir de então, foram-se realizadas análises de desempenho do sistema e fez-se uma verificação da compatibilidade existente entre as partes teórica e prática do trabalho. O esquema de implementação é mostrado na Figura 15.



**Figura 15 - Componentes do sistema proposto.**  
 Fonte: Própria com auxílio do software Corel Draw X6®.

Na seção seguinte é apresentada a modelagem matemática já como desenvolvimento do projeto.

## 4. DESENVOLVIMENTO

### 4.1. MODELAGEM MATEMÁTICA

#### 4.1.1. Modelagem da planta do sistema

O sistema de controle tem como objetivo manter a temperatura do líquido durante a mosturação em níveis pré-determinados. Para que se tornasse possível o controle desses níveis, foi necessário levantar a função de transferência da planta referente ao sistema a ser controlado e assim, posteriormente, se pudesse projetar o controlador PID.

Regulou-se uma temperatura média em relação às rampas de mosturação para a realização da coleta de dados. A temperatura média escolhida foi a de aproximadamente 53,76 graus Celsius, esperando a mesma estabilizar-se.

Com o propósito de obter a planta para o sistema de controle, utilizou-se de uma tensão eficaz de 127 Volts aliada ao sensor LM35. Essa resposta à entrada em degrau consistiu-se basicamente em ligar o sistema instantaneamente a uma tensão eficaz de 127 Volts e registrar qual o valor máximo que a temperatura consegue atingir, que, para este projeto, a temperatura para uma média das rampas foi de 53,76 graus Celsius.

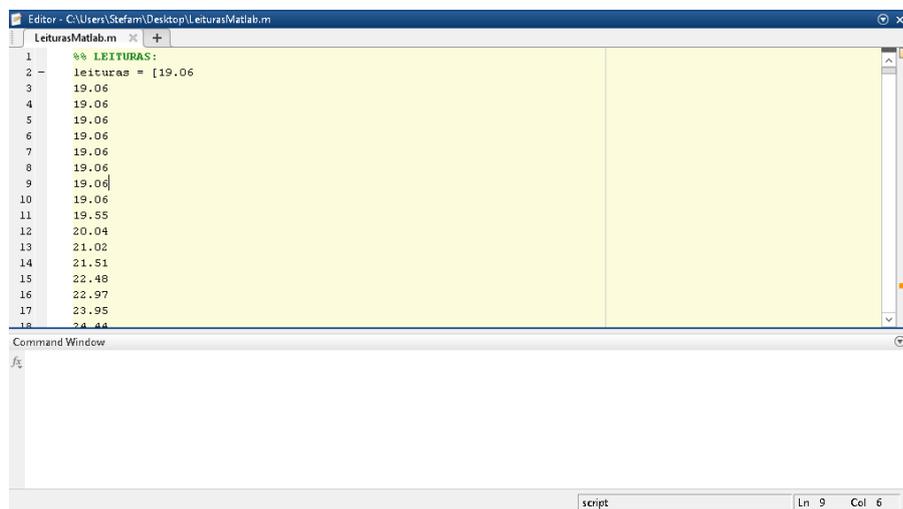
Para o sistema manter essa temperatura a potência necessária foi medida e registrou-se aproximados 49,83 Watts. O sistema controlado necessita ser em malha fechada, podendo, dessa forma, o controlador agir de maneira a corrigir o erro lido na saída do sistema, tendo, assim, seu melhor ajuste.

Pôde-se estimar o valor dessa potência a partir de dados coletados via comunicação serial, armazenando os dados de leitura de temperatura, bem como o valor da tensão contínua que é enviado ao atuador. Por meio da ligação do sensor LM35 conectado a uma das entradas analógicas e também fazendo o uso da comunicação serial a qual é permitida pelo microcontrolador utilizado no projeto, levantaram-se as leituras da variação de temperatura, cujas quais são mostradas com um exemplo na Figura 16:



**Figura 16: Leitura de temperaturas via comunicação serial**  
**Fonte: Própria com auxílio MVS ®.**

Os dados levantados via comunicação serial foram então transferidos para um software matemático, o qual foi utilizado também no desenvolvimento de trabalhos em algumas matérias do curso de graduação, o SciLab®, que se trata de um software científico para computação numérica o qual fornece um poderoso ambiente computacional aberto para infinitas aplicações. A Figura 17 mostra a aplicação dos dados de forma vetorial:



**Figura 17 - Exemplo de vetor de leituras**  
**Fonte: Própria com auxílio Scilab ®.**

Aplicados os valores lidos via porta serial no software matemático, deu-se início aos procedimentos de obtenção da função de transferência do sistema no qual como primeiro passo, construiu-se o gráfico da resposta ao degrau unitário como mostra a Figura 18:

```

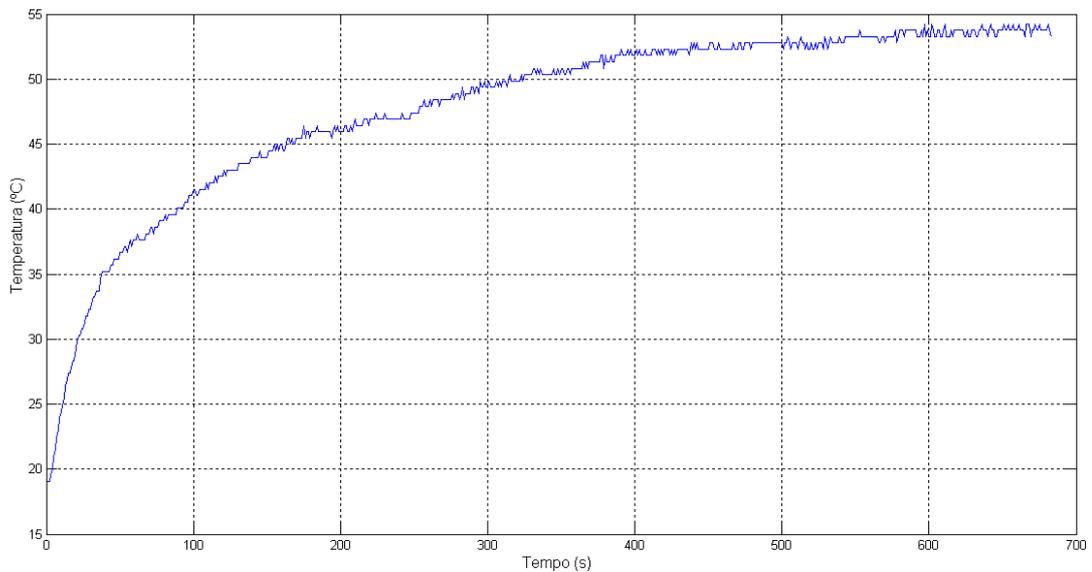
677 53.27
678 53.76
679 53.76
680 54.25
681 53.76
682 53.76
683 54.25
684 53.76
685 53.76
686 53.76
687 53.76
688 53.76
689 54.25
690 53.76
691 53.27];
692 x=[1:1:690];
693 plot(x, leituras);
694 %%fim de leituras

```

Command Window  
fz >>

**Figura 18 - Aplicação de dados lidos ao software matemático**  
**Fonte: Própria com auxílio Scilab ®.**

O gráfico obtido a partir da aplicação dos dados lidos é mostrado em sequência através da Figura 19:



**Figura 19 - Resposta do sistema a um degrau de potência**  
**Fonte: Própria com auxílio Scilab ®.**

Um modelo matemático simplificado foi determinado, sendo que a planta em estudo pôde ser caracterizada por um sistema de primeira ordem, cuja função de transferência é descrita através da equação (18) (OGATA, 1998):

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{K * e^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (18)$$

Em que:

- $C(s)$  é a temperatura do sistema controlado;
- $U(s)$  é a tensão de alimentação;
- $K$  é dado como ganho do sistema em malha aberta;
- $L$  é o tempo de atraso;
- $T$  é a constante de tempo.

Esta constante de tempo caracteriza a velocidade com que o sistema responde a uma entrada.

Obtiveram-se os parâmetros da equação (18) através da resposta à entrada em degrau aplicada ao sistema de aquecimento.

Para a obtenção do ganho do sistema em malha aberta, nosso parâmetro  $K$ , subtraiu-se a temperatura mínima medida, no caso, a ambiente que foi dada como  $19,06^\circ$  Celsius da temperatura máxima atingida na resposta ao degrau do circuito de aquecimento.

A partir da consideração de que o sistema sob controle é um sistema de primeira ordem, tem-se que o regime permanente é atingido em  $5T$ , no qual possui um erro menor que 1% (OGATA, 1998). É estruturado o valor dessa constante dividindo-se o total do deslocamento de tempo necessário para que o sistema atinja o regime permanente por cinco. No sistema o tempo para atingir a primeira rampa, pelo qual está sendo embasado esse cálculo foi de aproximadamente 11 minutos e meio, ou seja, aproximados 690 segundos, dando como resultado  $T = 138$  segundos.

A resposta para a entrada de degrau em tensão para o sistema é mostrado através gráfico apresentado na Figura 11.

Chegou-se então ao cálculo do valor do ganho do sistema através da equação (19):

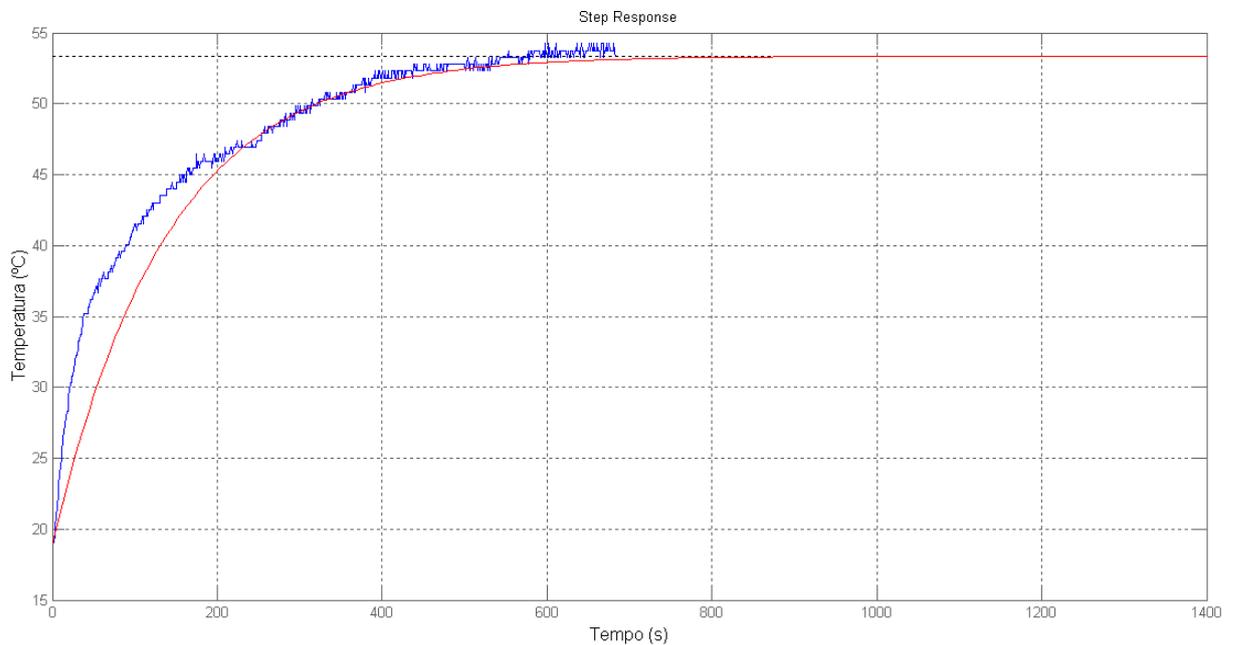
$$K = \frac{0,632 * (34,70) + 19,06}{49,83} = 0,8226 \quad (19)$$

Calculando-se o tempo médio que o líquido gasta para variar sua temperatura atual em  $1^\circ$  Celsius é obtido o tempo de atraso do sistema, o qual em ensaios considerou-se o sistema partindo do tempo zero.

Determinados todos esses parâmetros foi possível se obter a equação que representa a planta do sistema, cuja é mostrada pela equação 20:

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{0,8226 * e^{-1s}}{138s + 1} \quad (20)$$

A Figura 20 faz uma comparação usando os próprios dados de modelagem juntamente com a resposta do modelo que é indicado em vermelho. Observou-se dessa forma que a resposta ao degrau da função de transferência, aproximou-se bastante a resposta do gráfico de leituras do sensor via comunicação serial expressado em azul na mesma Figura 20.



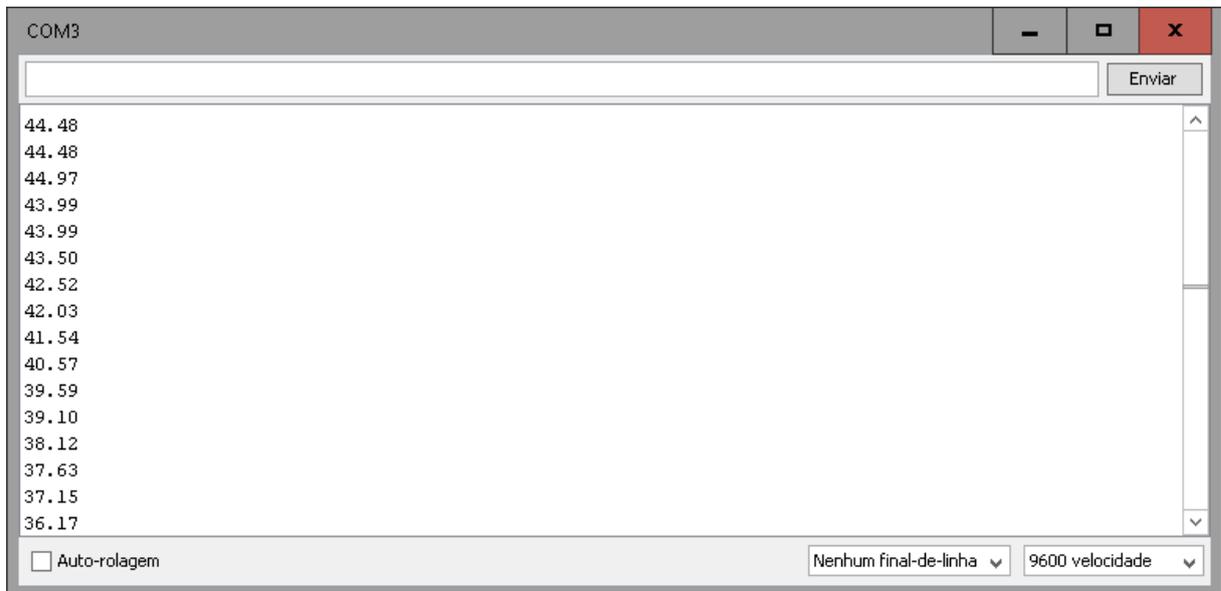
**Figura 20 - Comparação em leitura do sensor e modelo.**  
**Fonte: Própria com auxílio Scilab ®.**

O intuito da Figura 20 é afirmar que o sistema de temperatura é linear em faixa pré-determinadas. Como de esperado, o modelo nunca fica perfeito, embora ele se aproxime muito do comportamento do vetor de leituras do sensor. Essa análise qualitativa serve para concluir que o modelo pode representar a dinâmica do sistema, embora haja técnicas para fazer uma análise quantitativa sobre a qualidade do modelo. Sabemos que sistemas térmicos são de primeira ordem, a mesma ordem que a função de transferência determinada, tendo então mais uma validação na qual podemos concluir que o modelo é satisfatório.

#### 4.1.2. Modelagem do sensor LM35

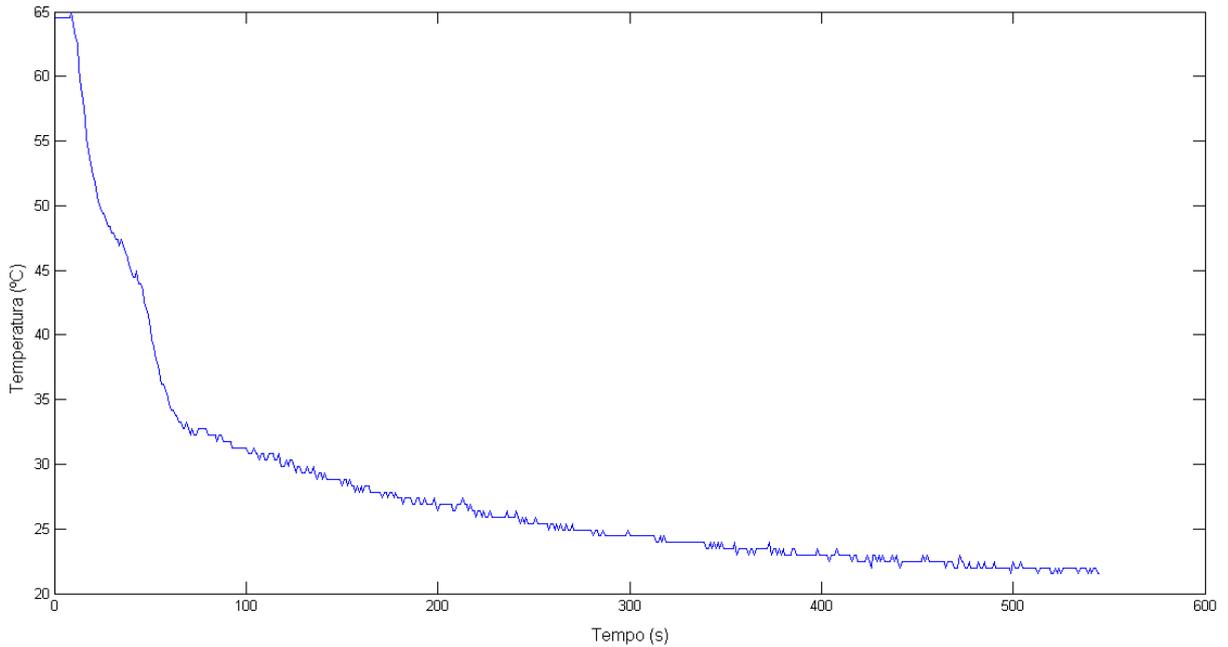
Para leituras e controle em projetos que envolvem temperatura, tem-se como princípio se utilizar de sensores cujos quais não interfiram nas respostas dos sistemas, registrando, de maneira imediata uma variação na temperatura da planta. Infelizmente, sensores e controladores ideais não são disponíveis nos dias atuais. Dado que os sensores ideais não são aplicados, uma variação em cima dos mesmos é existente e, com isso é necessário um estudo para se verificar a influência desse atraso é de fato relevante na leitura das temperaturas registradas na planta.

Partiu-se então do princípio de manter a temperatura do sistema em seu valor máximo, submetendo-o a um degrau de temperatura negativo, retirando-o do sistema e aplicando-o de imediato à temperatura ambiente até que se estabilizasse como mostra a figura 21.



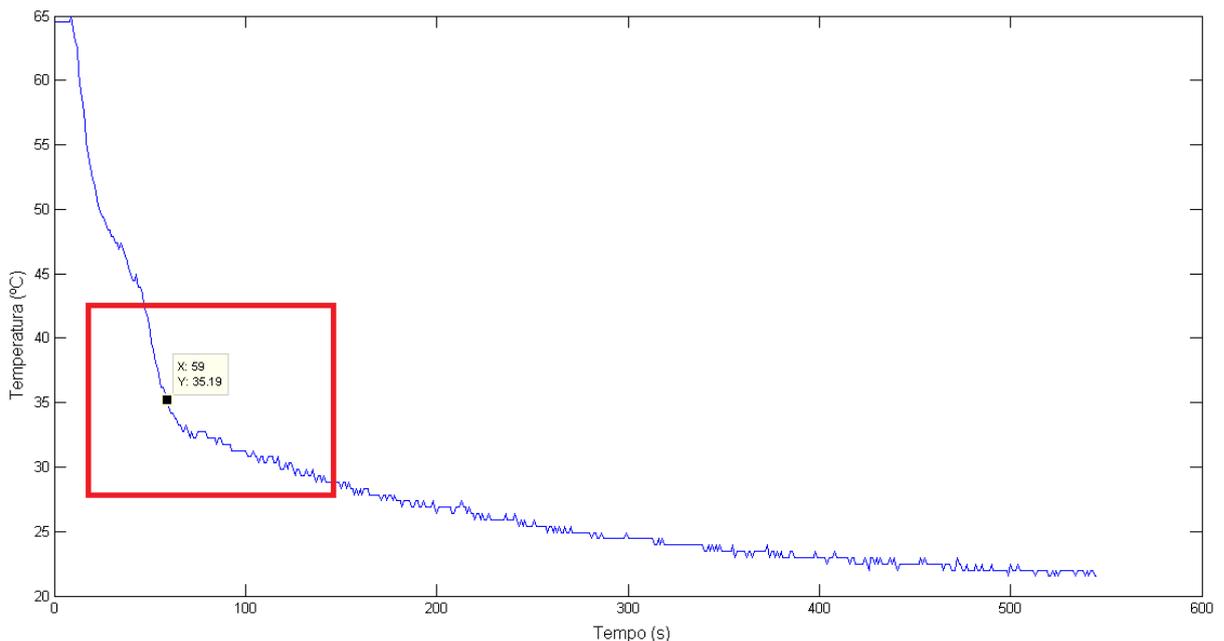
**Figura 21 – Leitura do Sensor submetido ao degrau.**  
Fonte: Própria com auxílio MVS ®.

Com um degrau aplicado no sensor, e analisando-se o seu gráfico, conseguiu-se chegar ao intervalo de tempo onde o mesmo demora 63,2% para atingir a estabilidade do degrau aplicado, mesmo procedimento mostrado na Figura 19.



**Figura 22 – Curva de resposta do sensor submetido a degrau.**  
**Fonte: Própria com auxílio Scilab ®.**

A figura 22 mostra a curva a qual obteve-se como resposta ao sensor submetido ao degrau onde notou-se que foram necessários 545 segundos para o sensor atingir a estabilidade, sendo 59 segundos para o mesmo atingir o valor de 63,2% da mesma como mostra a Figura 23. Cabe ainda comparar a curva do gráfico obtido com a curva mostrada no *datasheet* do sensor para aumentar a credibilidade desse valor, comprovando a possibilidade de utilização do mesmo.



**Figura 23 – Tempo necessário para o leitor atingir 63,2% da temperatura de estabilidade.**  
**Fonte: Própria com auxílio Scilab ®.**

Ainda como critério de confirmação, comparando com o gráfico do sistema, mostrado na Figura 19, o tempo necessário para que o sistema atingisse os 63,2% temperatura cuja fora submetido pelo degrau é de aproximadamente cinco vezes o tempo gasto pelo sensor, comprovando que não há atraso de informação prejudicando o controle do sistema.

#### 4.1.3. Modelagem em malha fechada

Para se conhecer o valor correto com o qual o sensor de temperatura atua sobre o sistema foram-se levantados os valores mínimos e máximos com o qual o mesmo trabalha, sendo esse valor variando entre dez e cento e trinta graus centígrados e dado que o LM35 atua com uma escala de zero a cinco Volts de tensão de maneira a ser mostrada pela equação (22), onde  $G_s$  representa o ganho do sensor:

$$(130 - 10) * G_s = (5 - 0) \tag{22}$$

$$G_s = \frac{1}{24}$$

Como mostrado, foi-se utilizado também para esse sistema um atuador, componente que faz a separação entre tensão contínua e tensão alternada, o qual é controlado por uma tensão de zero a cinco Volts na entrada convertendo a mesma em potência para o aquecimento da resistência do sistema. Esse atuador não respeita o princípio da superposição, possuindo, dessa maneira, um comportamento não-linear matematicamente. O que foi assumido para o mesmo, foi uma linearidade de aproximação, sendo que ao receber zero na sua entrada, seu aquecimento estaria em 0% (zero *percentil*) e ao receber cinco volts na sua entrada, o aquecimento se estabeleceria em 100% (cem *percentil*), considerando a resposta do sensor como imediata.

Coletaram-se os dados referentes à corrente e à tensão do atuador à medida que o ciclo de trabalho PWM era variado na entrada do optoacoplador, ou seja, na entrada do atuador e, com isso, obteve-se uma aproximação do ganho em potência de acordo com a tensão aplicada chegando-se a uma equação da mesma, referenciada em (22). O gráfico é mostrado na Figura 24.

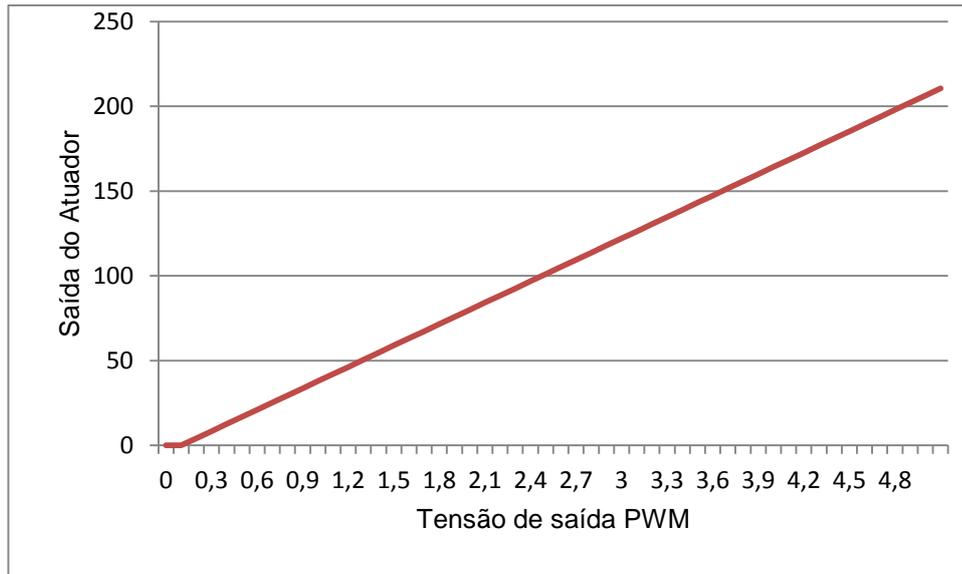


Figura 24 - Relação de entrada e saída do Atuador  
Fonte: Própria.

$$P = U * I$$

$$P = U * 41.70$$

(22)

Considerou-se então apenas o ganho proporcional que o atuador fornece ao sistema sendo o mesmo obtido pela média da aproximação linear mostrada na Figura 24.

Realizados todos esses cálculos, temos a função de cada componente do projeto em malha fechada, sendo, inicialmente obtida a função que caracteriza a planta, seguida da função ganho do atuador e por fim a função ganho do sensor de temperatura. Falta então encontrar os valores da equação do controlador proporcional-integral-derivativo.

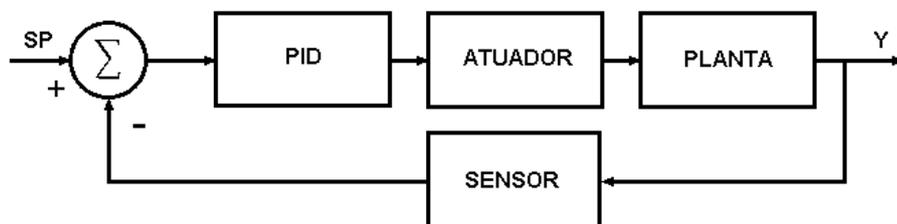


Figura 25 - Diagrama da Malha Fechada do sistema  
Fonte: Própria.

Da Figura 25 partiu-se para o equacionamento da função que representa o sistema.

Chegamos, dessa forma, a:

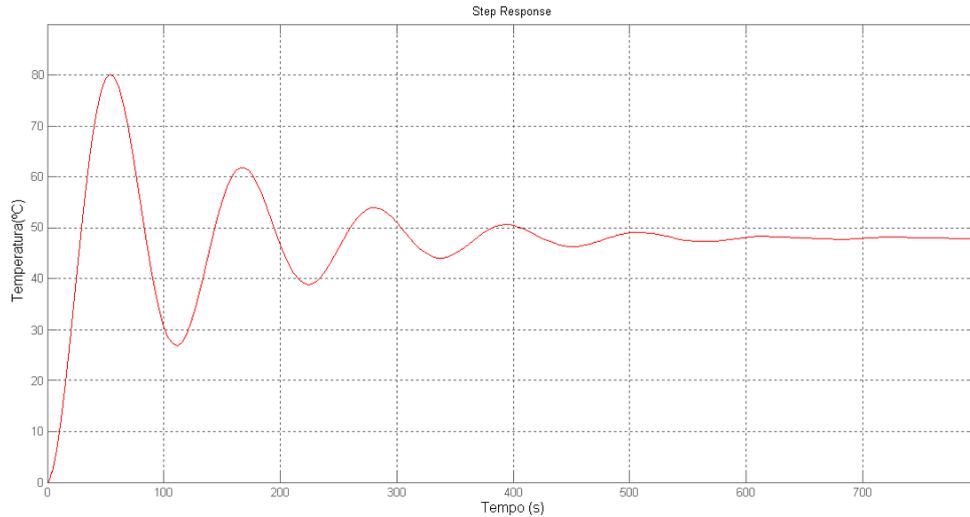
$$H(s) = \frac{G_{PID} * G_{atuador} * G_{planta}}{1 + G_{PID} * G_{atuador} * G_{planta} * G_{sensor}} \quad (23)$$

Realizaram-se as substituições, contas e simplificações utilizando-se de valores para os parâmetros do PID genéricos, sendo eles  $K_p = 1$ ,  $K_i = 0.5$  e  $K_d = 0$ , sendo, dessa maneira, possível chegar em  $H(s)$ , função que representa o modelo matemático do sistema em malha fechada, mostrado na equação (23):

$$H(s) = \frac{34,3s + 10.29}{138s^2 + s} * e^{-0,95s} \quad (24)$$

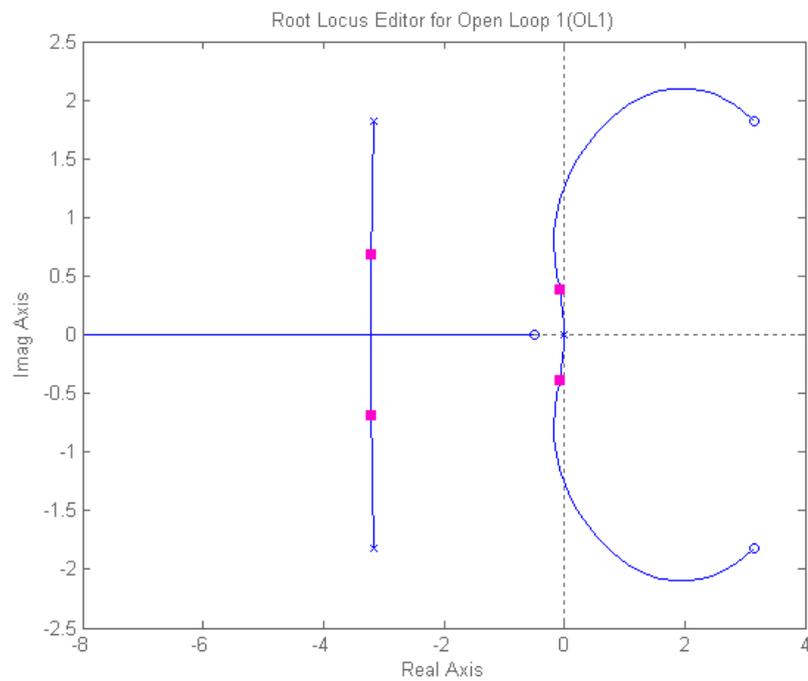
Após a determinada a equação que representa a planta, é possível se obter o os parâmetros necessários para um controlador PID, sendo eles o ganho proporcional ( $K_p$ ), a constante para integração ( $K_i$ ) e a constante para derivação ( $K_d$ ) de modo empírico, ou seja, alterando seus respectivos valores até que a resposta ao degrau do sistema torne-se aceitável e o mais próxima do ideal possível.

A resposta do sistema para uma entra em degrau com os parâmetros genéricos é mostrada na Figura 26.



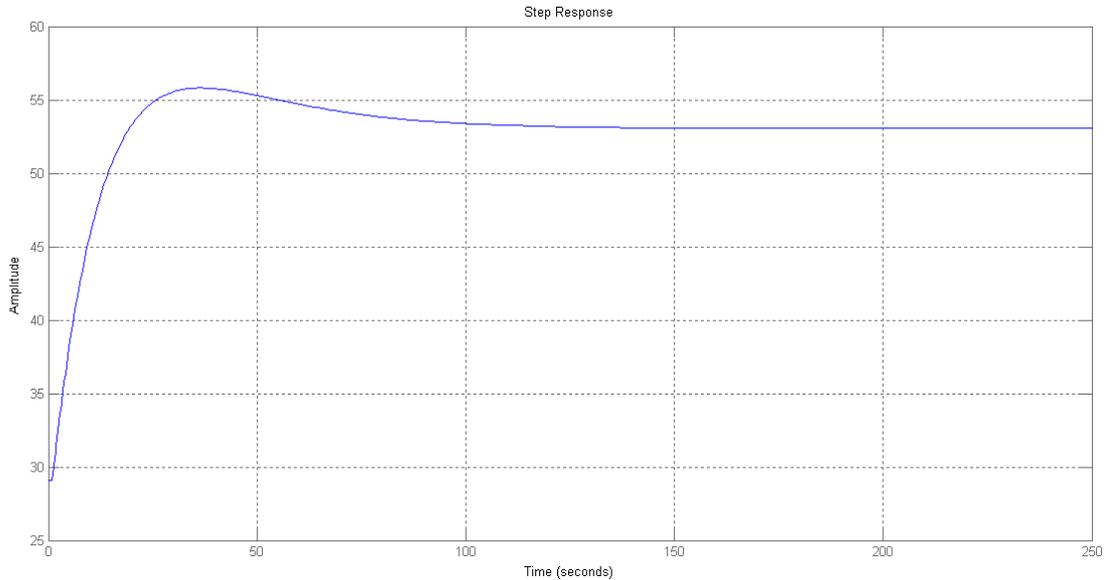
**Figura 26 - Resposta do sistema em malha fechada para uma entrada em degrau.**  
**Fonte: Própria.**

Encontrada a função que representa o sistema, OGATA (1998) também diz que é possível através da mesma obter o Lugar das Raízes (*Root-Locus*). Para obtenção do *Root-Locus* utilizou-se de uma ferramenta disponível no *software* matemático, sendo o seu gráfico mostrado na Figura 27.



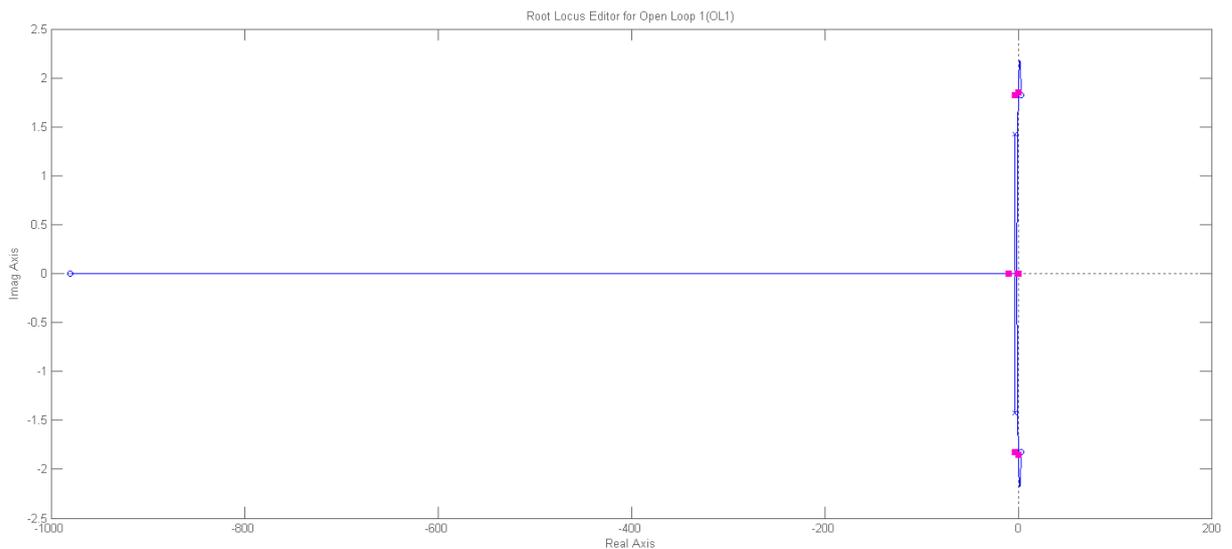
**Figura 27 - Lugar das raízes do sistema**  
**Fonte: Própria.**

Os testes para obtenção dos parâmetros foram feitos de forma empírica a fim de se obter uma resposta aceitável a uma entrada em degrau. Os valores obtidos foram  $K_p = 9.8$ ,  $K_i = 0,3$  e  $K_d = 0,01$ . O gráfico da resposta do sistema ao degrau é mostrado na Figura 28:



**Figura 28 - Resposta do Sistema com PID calibrado**  
Fonte: Própria.

O gráfico do lugar das raízes após a calibração do PID é apresentado na Figura 29:



**Figura 29 - Lugar das Raízes após calibração PID.**  
Fonte: Própria.

Determinaram-se os componentes do controlador PID a partir dos parâmetros encontrados em (14). Com isso, sabendo que a transformada de Laplace de um intervalo de tempo de segundos  $T$  é  $e^{-sT}$  (OGATA, 1998) foi possível determinar a função “ $H(s)$ ”, esta função de transferência exponencial é aproximada por uma função de transferência racional. A função de transferência “ $H(s)$ ” final é mostrada na equação (25):

$$H(s) = \frac{0,343s^2 + 34,3s + 10,29}{138s^2 + s} \quad (25)$$

Uma comparação é mostrada na Figura 30 entre a resposta compensada e a resposta não compensada do sistema.

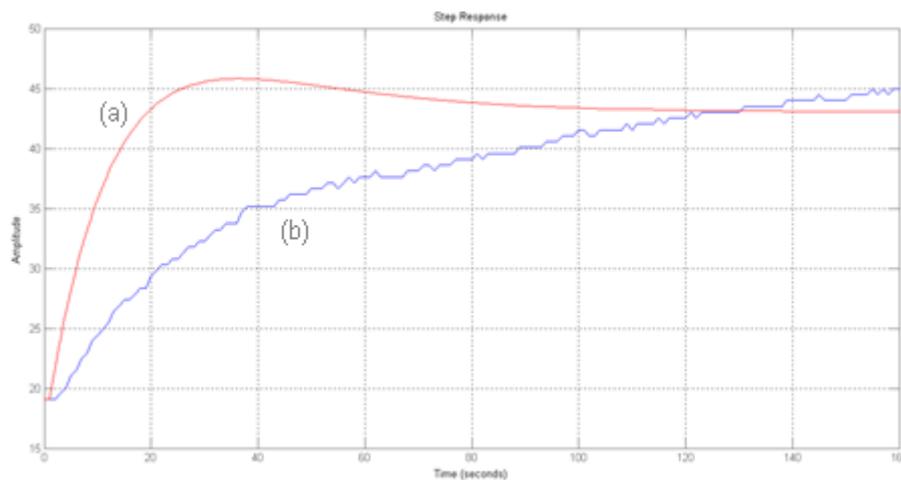


Figura 30 - Comparação da resposta ao Degrau Unitário: (a) Com Compensador (b) Sem Compensador.  
Fonte: Própria.

Para todas as rampas do processo, o sistema trabalhou de forma aceitável comprovando-se, então, que a aplicação dos parâmetros do PID está dimensionada de acordo com as necessidades. É necessária agora a discretização do sistema.

#### 4.1.4. Transformação Bilinear

A transformação bilinear realiza a mudança da variável da frequência complexa  $s$  (analógica) para a variável  $z$  (usada em sistemas digitais) de forma a permitir que um circuito elétrico analógico seja processado numericamente em computadores e em processadores digitais de sinais.

Partindo-se da conhecida Transformada de Laplace onde se têm:

$$G(s) = \int_0^{\infty} g(t)e^{-st} dt = \sum_{n=0}^{\infty} g(n\Delta t)e^{-sn\Delta t}\Delta t \quad (26)$$

E conhecendo-se a Transformada Z que nos é dada como (OGATA, 1998):

$$\bar{G}(z) = \sum_{n=0}^{\infty} g[n]z^{-n} \quad (27)$$

Podemos comparar ambas as equações chegando em:

$$G(s) = \bar{G}(z) = g(n\Delta t)\Delta t = g[n] \quad (28)$$

Por meio da comparação consegue-se a equivalência das funções:

$$e^{\Delta st} = z \quad (29)$$

Na relação  $z = \frac{1+x}{1-x}$  o logaritmo pode ser expandido, sendo que, quando considerada apenas uma aproximação de ordem primária, é possível obter-se a transformação bilinear mostrada em (30).

$$s = \frac{2}{\Delta t} \frac{(z - 1)}{(z + 1)} \quad (30)$$

Aplicou-se essa transformação ao sistema para ser possível o controle de maneira digital.

Executadas todas estas etapas o sistema proposto foi implementado em linguagem C/C++ no microcontrolador.

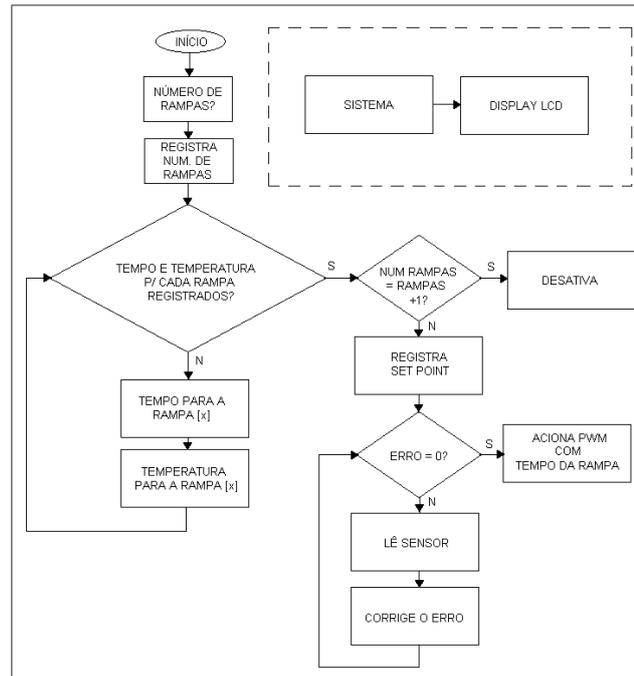
## 4.2. Algoritmo de controle

Baseado na linguagem de programação C/C++ a qual nos permite gravar no microcontrolador utilizado, o ATMEGA328, criou-se um algoritmo de acordo com as necessidades do operador de acordo com a Figura 31.

A linguagem C/C++ é estruturada e de alto nível com sintaxe simples e portátil sendo vastamente utilizada na programação de microcontroladores, como o utilizado nesse projeto. Fazendo-se uso de uma das facilidades da linguagem C/C++, aplicou-se nesse projeto o uso de funções, que nada mais são de que um conjunto de rotinas simples para a execução de rotinas complexas.

Geralmente rotinas, como bibliotecas de funções, são disponibilizados pelos fabricantes de microcontroladores em C para o uso em projetos. Para se executarem testes de programação, como as citadas, normalmente faz-se o uso de compiladores. Compiladores são usados para gerar o código fonte em C/C++ ou também em *Assembly*, se a programação for realizada em linguagem de máquina, possuindo na maioria dos casos uma interface para facilitar ainda mais o processo, bem como exemplos e funções em forma de biblioteca, fazendo upload dos mesmos para o microcontrolador.

No desenvolvimento deste trabalho foi usado o compilador IDE ® com suporte ao ATMEGA328, sendo que o mesmo também oferece suporte via comunicação serial, a qual foi essencial para leituras das temperaturas. O fluxograma do programa desenvolvido é mostrado na Figura 31.



**Figura 31 - Fluxograma do algoritmo de programação.**  
**Fonte: Própria.**

#### 4.3. Ferramenta de Simulação e Desenvolvimento

Uma ferramenta muito útil para o desenvolvimento de simulações, bem como a elaboração e construção de circuitos elétricos é o Proteus®. Nesse programa são disponíveis muitos componentes utilizados na eletrônica, incluindo uma vasta lista de microcontroladores, podendo-se utilizar pra a criação tanto de circuitos digitais, quando circuitos analógicos ou híbridos.

São disponibilizadas no programa, ainda, ferramentas como multímetros, osciloscópios, cargas entre outros, sendo, dessa maneira, o *software* de essencial importância para o desenvolvimento deste trabalho. Através do uso do Proteus® foi confeccionado o circuito do sistema de controle e também corrigidos alguns parâmetros de programação em simulação. O esquemático do circuito desenvolvido foi dividido em blocos para facilitar sua leitura o qual é mostrado na Figura 32.

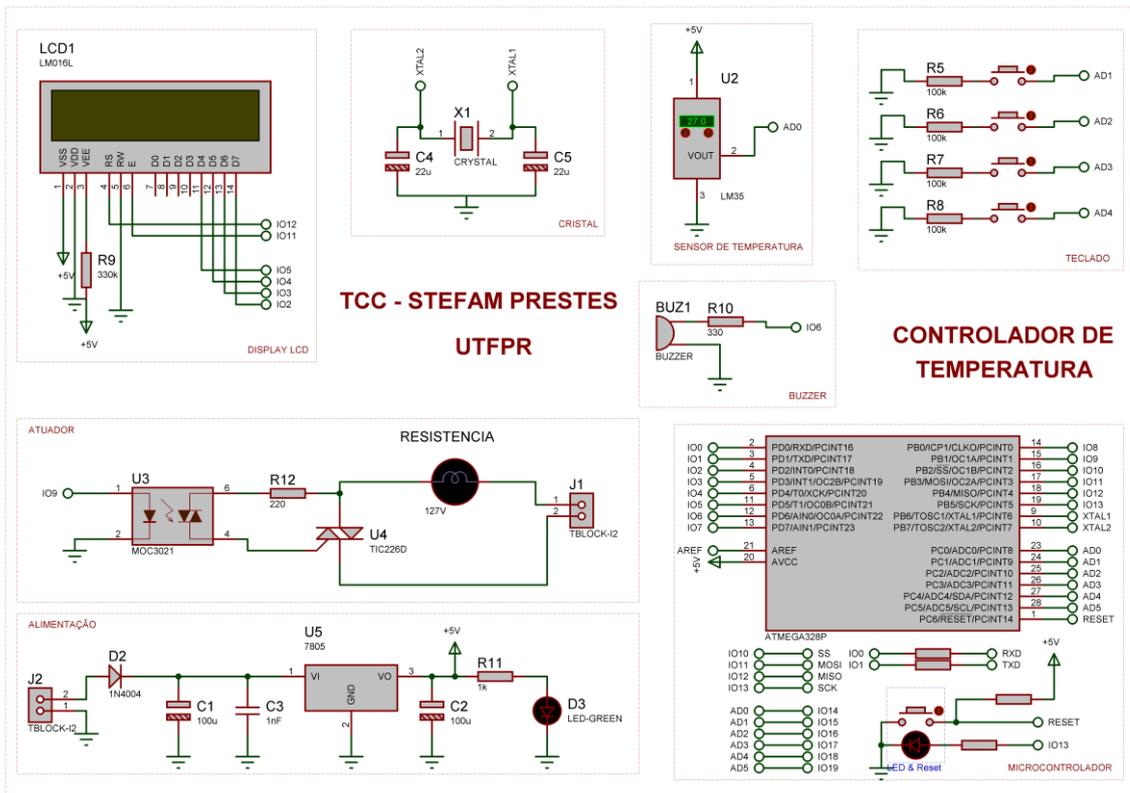


Figura 32 - Esquemático do circuito do protótipo  
 Fonte: Própria com auxílio Proteus.

Levantados todos os parâmetros, e adequadas todas as partes necessárias, tanto de software como de hardware, partiu-se para testes do sistema como um todo para a obtenção de resultados.

## 5. RESULTADOS

Na Figura 33 é mostrado o circuito do protótipo fazendo a leitura da temperatura a qual é mostrada no display LCD.

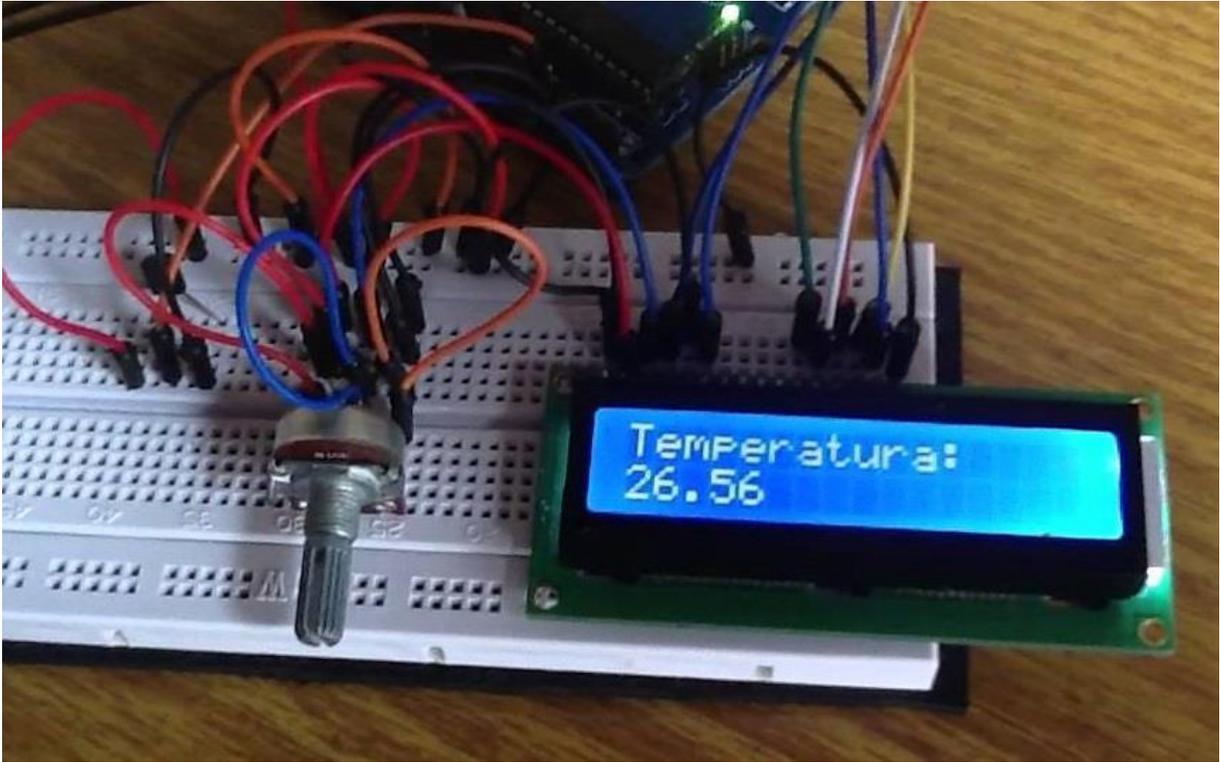


Figura 33 -Protótipo efetuando leitura do mosto.  
Fonte: Própria.

A leitura como descrito nos capítulos anteriores é realizada pelo sensor LM35, o qual foi posicionado dentro de um suporte fabricado por 200mm de tubing de alumínio, com 15mm de diâmetro ligado a um cabo 3 vias de 1,5 milímetros e isolado com silicone para que se pudesse colocar o sensor de temperatura dentro do mosto, como mostra a Figura 34.



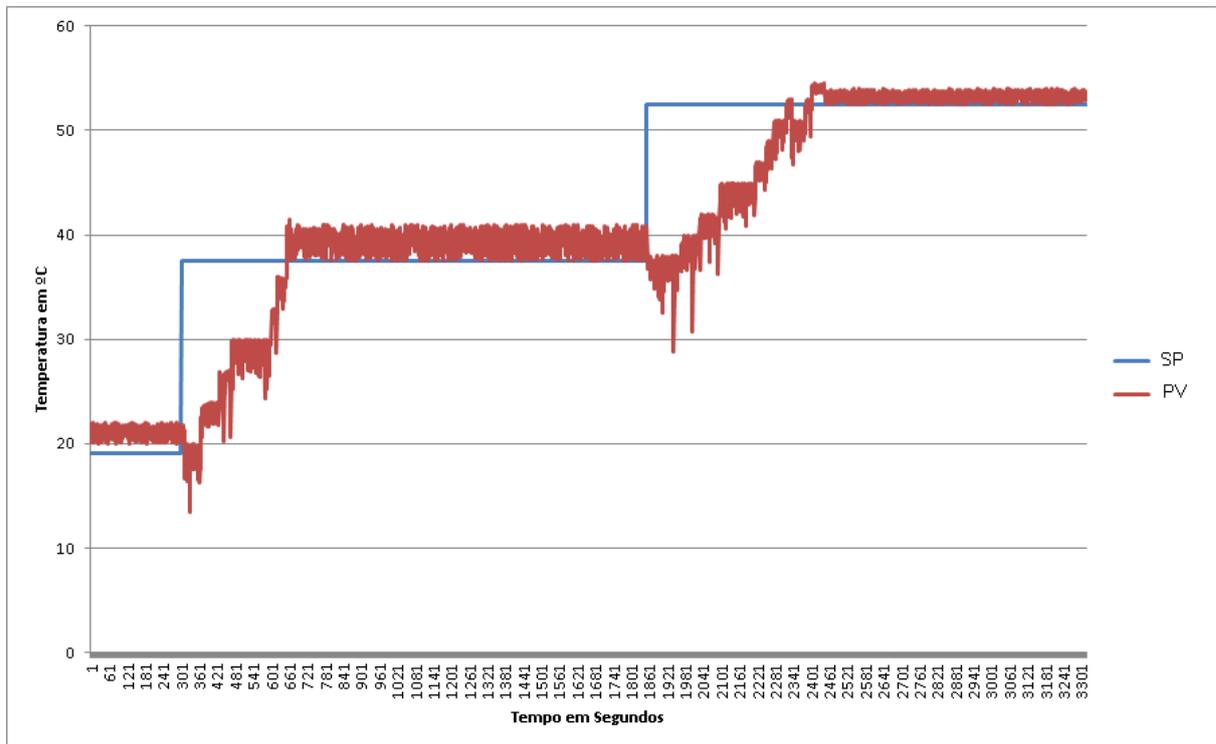
Figura 34 - Suporte para o sensor de temperatura.  
Fonte: Própria.

Depois dessa leitura, e efetuado o devido controle dentro do microcontrolador através do algoritmo mostrado na Figura 31, quem entra em ação é o atuador, o qual foi desenvolvido e ligado a uma resistência em madeira cortada do tipo 'garfo', o que a torna um bom isolante, sendo o fio da resistência em inox dividido através da sua superfície e ligado a uma tomada *plug* macho para fazer o controle da rede 127V como pode ser visto na Figura 35.



**Figura 35 - Resistência do atuador.**  
Fonte: Própria.

Para se realizarem os experimentos, tomou-se como base o uso de apenas duas rampas de temperatura sendo que o intervalo entre as medições e atuações do sistema foi dado a cada 1 segundo. Fizeram-se os testes, então, para o processo de Parada de Acidificação (*Acid Rest*), onde a temperatura deve ficar entre 30 e 45°C por cerca de vinte minutos, e o processo de Repouso Protéico (*Protein Rest*) com temperatura entre 50 e 55°C onde se sugere um repouso de 15 a 20 minutos em média como é mostrado no item 2.4.1.2 desse trabalho. A Figura 36 mostra o desempenho do controlador aplicado na planta já em meio físico.



**Figura 36 - Gráfico da resposta ao sistema físico.**  
**Fonte: Própria.**

Com o gráfico da temperatura apresentado, pôde-se mostrar que o controlador responde bem ao sistema de controle, sendo que a temperatura no sistema tende à temperatura de referência, ou seja, nosso *setpoint* (SP), o que demonstra que o controlador está atuando de maneira a corrigir a temperatura do sistema, como se era de esperado, de maneira rápida e aceitável, dentro dos parâmetros do processo de mosturação.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Fazer o uso de um controlador digital ajuda no processo de mosturação durante a fabricação de cervejas artesanais, facilitando o processo de maneira que o mesmo não necessite ficar a todo o momento controlando o aquecimento do líquido bem como ficar fazendo leituras com termômetros como é de costume.

Bem projetado, o controlador deixa o sistema muito mais prático trazendo inclusive mais segurança para o cervejeiro, ficando o mesmo menos exposto à chama do gás de cozinha que geralmente é utilizada para o processo bem como ao contato com o líquido quente. Além disso, tempo em que o operador gastaria cuidando e controlando o processo que geralmente leva em média duas horas, pode ser aproveitado com outras atividades.

### 6.1. Conclusão

Nesse trabalho foram realizados definições e estudos de controle e temperatura, bem como o processo de mosturação na produção de cervejas artesanais. Baseados nestes estudos, empiricamente desenvolveu-se um controlador digital com programação em C/C++ para o controle da temperatura no processo, através da modelagem matemática do sistema procurando a melhor precisão para o mesmo.

Pode-se concluir que o controlador digital de temperatura para auxílio e melhoria na produção de cervejas artesanais, inicialmente projetado, foi concluído, mesmo que em fase de protótipo. Todas as respostas bem como os gráficos gerados corresponderam às expectativas iniciais do projeto, sendo as diferenças entre a teoria e a prática aceitáveis. O objetivo de aprimorar os estudos e entendimento sobre controladores digitais, a concepção e a visualização de um controlador físico foram alcançados com sucesso.

Fazendo o uso das ferramentas de simulação como o software matemático, conseguiu-se uma considerável aproximação em todos os resultados, resultados os quais o nível de dificuldade seria muito maior de se obter apenas no levantamento prático do sistema, devido à sua complexidade.

Para o sistema implementado, o modelo determinístico atendeu de forma adequada, mesmo tendo o conhecimento de que os eventuais ruídos presentes

durante a modelagem são tratados apenas na modelagem estocástica. Porém, partiu-se da escolha de analisar apenas qualitativamente os dados do sistema de temperatura, justamente por conta da facilidade e praticidade que esse tipo de análise proporciona.

## 6.2. Trabalhos futuros

Podem ser aplicadas no projeto algumas considerações e melhorias significativas, como por exemplo, elaborar um melhor estudo sobre cada componente do sistema, aperfeiçoando-se cada caso individualmente.

Ficam, então, como sugestões de propostas para trabalhos futuros, uma maior e melhor mensurada ênfase no controle da temperatura e um estudo e dimensionamento da melhor localização para instalação tanto do sensor, bem como da própria resistência de aquecimento, o que proporcionaria uma melhor leitura e atuação no sistema, trazendo melhores e mais rápidas respostas.

## REFERÊNCIAS

AMBEV – COMPANHIA DE BEBIDAS DAS AMÉRICAS. **História da cerveja** Disponível em: <[www.ambev.com.br](http://www.ambev.com.br)>. Acesso: 04 de Dezembro de 2014.

AQUARONE, E. et alii. **Biotecnologia: Alimentos e Bebidas Produzidos por Fermentação**. São Paulo, Edgard Blücher, 1983.

BARUFALDI, R; OLIVEIRA, M.N. **Fundamentos de Tecnologia de Alimentos**. São Paulo, Atheneu, 1998. p.52.

BAZANELLA, S. Alexandre. **Ajuste de Controladores PID**. Disponível em: <<http://www.ece.ufrgs.br/~jmgomes/pid/Apostila/apostila/>>. Acesso em: 02 de Dezembro de 2014.

BORZANI, Walter. **Biotecnologia industrial**. São Paulo: E. Blücher, 2001. 4v, il.

CAON JR, José Roberto. **Controladores PID industriais com sintonia automática por realimentação por relés**. 1999. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Carlos, 1999.

CERVEJA. **Cerveja**. Disponível em: <[www.virtual.epm.br/material/tis/curr-bio/trab99/alcool/cerveja.htm](http://www.virtual.epm.br/material/tis/curr-bio/trab99/alcool/cerveja.htm)>. Acesso em: 21 de Novembro de 2014.

CERVESIA. **Tecnologia cervejeira**. Disponível em: <[www.cervesia.com.br](http://www.cervesia.com.br)>. Acesso em: 17 Nov 2014.

COLETÂNEA DE RESPOSTAS TÉCNICAS: Produção de cerveja. p.350. 2005. **Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas – SBRT**. Disponível em: <[http://www.publier.com.br/respostas\\_tecnicas/02alimentos.pdf](http://www.publier.com.br/respostas_tecnicas/02alimentos.pdf)>. Acesso em: 03 de Dezembro de 2014.

COMO FAZER CERVEJA. **Lei da pureza**. Disponível em: <[www.comofazercerveja.com.br](http://www.comofazercerveja.com.br)>. Acesso em: 19 de Novembro de 2014.

**COMO FAZER A CERVEJA**. São Paulo: Tres, 1985. 60p, il. (Biblioteca vida).

COUTINHO, Carlos Alberto Tavares. **A História da Cerveja no Mundo**. Cervesia Filia. Disponível em: <<http://www.cervisiafilia.com.br/cervmundo.html>> Acesso em: 27 de Outubro de 2014.

CRUZ, José Jaime da. **Entendendo e Ajustando Malhas de Controle**. São Paulo: Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas GAESI – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

EISENBahn. **História da cerveja**. Disponível em: <[www.eisenbahn.com.br](http://www.eisenbahn.com.br)>. Acesso em: 30 de Novembro de 2014.

HORNSEY, Ian S. **A history of beer and brewing**. 1<sup>st</sup> edition. Cambridge. RSC Paperbacks. 1999.

JANJAR, Diniz. **A história da cerveja**. In: JANJAR, Diniz. Produção de cerveja. Teresina, 2007. CD-ROM.

MORADO, Ronaldo. **Larousse da cerveja**. 1. ed. São Paulo : Larousse do Brasil, 2009. 357p, il. 69

MOTOROLA, Semiconductor Technical Data. **6-Pin DIP Random-Phase Optoisolators Triac Driver Output**. 1995.

NISE, Norman S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. 3. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

NOLL, Valdir. **Fotoacoplador e FotoTransistor**. Disponível em: <[www.cefetsc.edu.br/~vnoll/fotoscondutivos.PDF](http://www.cefetsc.edu.br/~vnoll/fotoscondutivos.PDF)> Acesso em: 01 de Dezembro de 2014.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 3ª Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC. 1998.

SANDERSON, K.; ORIENTE, A.; BOLDO, E. M. **Controle estatístico da etapa fermentativa no processo de produção da cerveja**. Cascavel, v.3, n.3, p.73-84, 2010.

SANTOS, Sergio de Paula. Os Primórdios da Cerveja no Brasil. São Paulo: Atelie Editorial, 2005.

SCHNEIDER, Guilherme Alceu. **Sistemas de Controle**. Curitiba: Departamento Acadêmico de Eletrônica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná 2011.

SILVA, S. R. UNIVERSIDADE REGIONAL DE BLUMENAU. **Produção de Cerveja: Etapa de Produção de Mosto**. 2006, 132p.,Il. Orientador: Dra. Lorena Benathar Ballod Tavares.

SINDICERV – SINDICATO NACIONAL DA INDUSTRIA DA CERVEJA. **Tipos de cerveja**. Disponível em: <[www.sindicerv.com.br](http://www.sindicerv.com.br)>. Acesso em: 11 de Novembro de 2014.

TEXAS INSTRUMENTS, Datasheet. **LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors**. SNIS159D – August 1999– Revised October 2013.

VENTURINI FILHO, Waldemar Gastoni [Coord.]. **Tecnologia de bebidas**: matéria-prima, processamento, BPF/APPCC, legislação e mercado. São Paulo: E. Blucher, 2005. xiv, 550 p, il.