



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP - Escola de
Minas - Colegiado do curso de Engenharia de Controle
e Automação - CECAU



Igor Silva Honório

Desenvolvimento de uma panela para a produção de cerveja

Monografia de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

Ouro Preto, 2018

Igor Silva Honório

Desenvolvimento de uma panela para a produção de cerveja

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis

Ouro Preto, 2018

H774d Honório, Igor Silva.
Desenvolvimento de uma panela para a produção de cerveja [manuscrito] /
Igor Silva Honório. - 2018.

57f.: il.: color; graf.; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Agnaldo Jose da Rocha Reis.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas
Fundamentais.

1. Controle de Temperatura. 2. ATmega328P. 3. Produção de Cerveja. I.
Reis, Agnaldo Jose da Rocha. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III.
Titulo.

CDU: 681.5

Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br

Monografia defendida e aprovada, em 25 de outubro de 2018, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis - Orientador



Prof. M. Sc. João Carlos Vilela de Castro – Professor Convidado



Prof. Vinicius Marinho Silva – Professor Convidado

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais, Olavo e Cláudia, por todo amor, carinho e por nunca medirem esforços para que eu pudesse estudar.

À minha irmã, Clarissa, pelo companheirismo e apoio durante toda essa jornada.

Ao amigo Vinícius De Carvalho Zanini, que muito me ensinou e teve toda paciência durante o desenvolvimento desse trabalho.

À Nath, minha parceira e amiga, pela força, incentivo e por todos os momentos de alegria.

À UFOP, à Escola de Minas e todos os professores, pelo ensino de qualidade.

Por fim, à gloriosa REPÚBLICA EXÍLIO, seus moradores e ex-alunos por toda a experiência e aprendizado, onde em poucos anos eu pude crescer mais do que nunca.

Resumo

A cerveja é uma das bebidas mais consumidas no Brasil e no mundo, e isso não é algo recente. Tal bebida está presente há milhares de anos e em diversas civilizações do mundo, sendo uma das primeiras bebidas alcoólicas da história da humanidade. Nos últimos anos, no Brasil, houve um grande aumento na produção das cervejas artesanais e também da produção caseira de cerveja. Nesse tipo de produção, uma das tarefas mais importantes é controlar a temperatura durante as várias etapas do processo de produção, o que é normalmente trabalhoso e inexato. Este projeto apresenta o desenvolvimento de um sistema elétrico para produção de cerveja com temperatura controlada. O sistema é composto basicamente de uma panela com uma resistência elétrica interna de alta potência, um sensor de temperatura PT100, um microcontrolador (ATmega328P) e um circuito para o acionamento da resistência. Para o controle será utilizado um controlador PI, implementado no microcontrolador. Pretende-se obter uma temperatura estável de acordo com o programado pelo usuário, obtendo-se maior facilidade e qualidade em todo o processo.

Palavras-chaves: Controle de Temperatura, ATmega328P, Produção de Cerveja, PT-100.

Abstract

Beer is one of the most consumed beverages in Brazil and around the world, and that isn't something new. This beverage has been consumed for thousands of years and in different civilizations. During the last few years, in Brazil, there was a huge raise of the craft beer production. In this kind of production, one of the most important task is to control the temperature during many stages of the process, which take a lot of work and is inaccurate. This project presents the development of an electric system to control the temperature while brewing. The system is basically composed by a cauldron with a high power resistance, a PT100 temperature sensor, a microcontroller (AT-mega 328P) and a circuit to trigger the resistance. The control used will be a PI, implemented in the microcontroller. The intention is to obtain a stable temperature according to what the user desire, obtaining more easiness and quality throughout the process.

Key-words: Temperature Control, ATmega328P, Brewing, PT-100.

Lista de ilustrações

Figura 1	Arduino UNO	24
Figura 2	Desenho esquemático de um microcontrolador	25
Figura 3	IDE do Arduino	25
Figura 4	Sinal PWM	27
Figura 5	Resistência de alta densidade	28
Figura 6	Resistências de baixa densidade	29
Figura 7	Esquema de um relé eletromecânico	30
Figura 8	Esquema de um relé de estado sólido	30
Figura 9	Controle liga/desliga	32
Figura 10	Exemplo de gráfico ideal para a sintonia Ziegler-Nichols	33
Figura 11	Exemplo de rampa utilizada na produção da cerveja	37
Figura 12	Foto do caldeirão com a torneira já embutida	40
Figura 13	Caldeirão finalizado	40
Figura 14	Versão do menu para desenvolvimento e testes	41
Figura 15	SSR utilizado no projeto	42
Figura 16	Projeto desenvolvido no software Proteus	43
Figura 17	Desenho da placa de circuito impresso	43
Figura 18	Gráfico relacionando a saída do termômetro com a temperatura real em graus Celsius	45
Figura 19	Curva encontrada após o degrau	46
Figura 20	Comparação entre os controladores desenvolvidos	47
Figura 21	Equipamento Biermaker	55
Figura 22	Equipamento Cigarra Elétrica	55
Figura 23	Equipamento Beerbot	56

Lista de tabelas

Tabela 1	Comparativo entre modelos de Arduino	24
Tabela 2	Tabela para sintonia Ziegler-Nichols	34
Tabela 3	Dados coletados para a calibração do sensor	44

Lista de abreviaturas e siglas

UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
IDE	Integrated Development Environment
PCB	Printed Circuit Board
EMR	Eletromechanical Relay
SSR	Solid State Relay
IBU	International Bitterness Unit
PI	Controlador Proporcional Integral
PID	Controlador Proporcional Integral Derivativo
PD	Controlador Proporcional Derivativo
PWM	Pulse-Width Modulation
IHM	Interface Homem-Máquina
CCP	Coefficiente de Correlação de Pearson

Sumário

1	Introdução	19
1.1	Objetivos	20
1.2	Motivação	20
1.3	Metodologia	20
2	Revisão bibliográfica	23
2.1	Arduino	23
2.1.0.1	Arduino UNO	23
2.1.0.2	Microcontroladores	23
2.1.0.3	Ambiente de desenvolvimento integrado do Arduino	25
2.1.0.4	Timers	26
2.1.0.5	Interrupções	26
2.1.0.6	Interrupções por timer	26
2.1.0.7	Interrupção externa	27
2.1.0.8	Entradas e saídas	27
2.1.0.9	Modulação por largura de pulso (PWM)	27
2.2	Sensor	28
2.2.0.1	PT100	28
2.3	Atuadores	28
2.3.0.1	Resistência elétrica	28
2.4	Relés	29
2.4.0.1	Relés eletromecânicos	29
2.4.0.2	Relé de estado sólido	30
2.5	Sistemas de controle	31
2.5.1	Controle liga/desliga (ON/OFF)	31
2.5.2	Controle Proporcional	31
2.5.3	Controle Proporcional Integral	32
2.5.4	Controle Proporcional Integral Derivativo	32
2.5.5	Método de Ziegler-Nichols	33
2.6	Produção da cerveja	34
2.6.1	Ingredientes principais	34
2.6.1.1	Malte	34
2.6.1.2	Lúpulo	34
2.6.1.3	Leveduras	35
2.6.1.4	Água	36

2.6.2	Processo de produção da cerveja	36
2.6.2.1	Brassagem	36
2.6.2.2	Lavagem	36
2.6.2.3	Fervura	37
2.6.2.4	Resfriamento	38
2.6.2.5	Fermentação	38
2.6.2.6	Outras etapas	38
3	Desenvolvimento	39
3.1	Montagem do equipamento	39
3.2	Programação do microcontrolador	40
3.3	Interface com o usuário	41
3.4	Acionamento da resistência	41
3.5	Projeto eletrônico	42
3.6	Calibração do sensor de temperatura	42
3.7	Controle	45
4	Resultados	47
4.1	Análise	47
5	Considerações finais	49
5.1	Conclusão	49
5.1.1	Sugestões para trabalhos futuros	49
	Referências	51
	Apêndices	53
	APÊNDICE A Comparação com outros produtos	55

1 Introdução

Controle é um termo cujo conceito é muito amplo. Porém, na área da engenharia, é comumente utilizado para se referir a sistemas os quais o objetivo é manter determinadas variáveis de um processo entre um certo limite desejado. Dessa forma, nos processos no qual é utilizado, o controle traz uma maior qualidade, confiabilidade, eficiência e segurança, tanto ao produto final quanto ao processo em si (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006), tornando então, no mercado competitivo atual, a aplicação de tal tecnologia essencial em qualquer campo da engenharia e da ciência (OGATA; YANG, 2002).

Sistemas de controle de temperatura são facilmente encontrados no dia a dia. Alguns exemplos são: os sistemas de aquecimento de água residenciais, os fornos elétricos e as saunas. A maior parte dessas aplicações têm algo em comum: funcionam com a utilização de um sensor e um switch para ligar e desligar o aquecedor. Quando a temperatura atinge o valor máximo, o aquecedor é desligado, e quando a mesma atinge o valor mínimo exigido, o aquecedor é ligado, mantendo sempre a temperatura entre valores específicos.

Porém, segundo Liepold (2001), mesmo este tipo de controle sendo adequado para diversas aplicações, muitos sistemas necessitam de um controle com maior precisão. Um exemplo disso é a produção de cerveja, processo o qual necessita que a temperatura seja mantida estável em valores pré definidos.

A cerveja é feita utilizando-se basicamente água, lúpulo, malte e fermento, e consiste de diversos passos, sendo os principais deles: brassagem, lavagem, fervura, fermentação e o armazenamento. A brassagem é necessária para o processo de sacarificação, a lavagem visa maximizar a retirada de açúcares do malte, a fervura serve para adicionar amargor, sabores e aroma à cerveja com o uso dos lúpulos, a fermentação é feita com o resfriamento seguido da adição de leveduras, e o armazenamento, o último estágio, serve para estocar a bebida, o que pode normalmente ser feito em barris ou garrafas (WEEKS, 2015).

Todas essas etapas devem ser realizadas em temperaturas bem específicas para que o produto final atinja sua qualidade ideal, sendo por isso, o controle automático da temperatura uma ferramenta muito útil. Neste projeto foi desenvolvido o protótipo de uma panela cervejeira para controlar de forma automática a temperatura durante processo. No protótipo feito utilizando a plataforma Arduino, o usuário definirá as temperaturas que ele deseja para a produção da cerveja e a resistência será ativada de acordo com a saída do controlador PID implementado. Além da qualidade, este projeto visa facilitar o processo de produção de cerveja, minimizar o seu tempo e aumentar a sua eficiência.

1.1 Objetivos

Estudar, projetar e construir um equipamento de baixo custo para a produção de cerveja artesanal em pequena escala, o qual possa, de forma precisa, controlar a temperatura durante todo o processo.

1.2 Motivação

Esse trabalho foi desenvolvido após o autor, produtor de cerveja artesanal por alguns anos, perceber que alguns dos principais problemas encontrados nesse processo poderiam ser resolvidos com a utilização de uma panela elétrica com controle automático de temperatura. Alguns desses problemas são: a dificuldade para se controlar a temperatura utilizando fogareiros a gás; a necessidade de manusear diversos equipamentos como, por exemplo, botijões de gás e fogareiros; e a necessidade de ter alguém sempre conferindo a temperatura e tentando controlá-la, o que, além de perigoso, é ineficiente.

Ademais, equipamentos com essa finalidade que já estão no mercado possuem preços muito elevados, como pode ser visto no apêndice A, dificultando o acesso para as pessoas que produzem em pequenas quantidades ou que têm um menor poder aquisitivo. Isso pode fazer com que a eficiência e a qualidade desses produtores não atinjam os resultados esperados.

Ou seja, esse trabalho tem como motivação reduzir o esforço do produtor de cerveja caseiro e também aumentar tanto a segurança de todos os envolvidos no processo quanto a qualidade do produto final.

Além disso, tal projeto serve para a aplicação do conhecimento teórico adquirido em sala de aula durante a graduação.

1.3 Metodologia

Para o desenvolvimento do trabalho foi feita inicialmente uma pesquisa bibliográfica, com o intuito de se desenvolver um projeto da forma mais eficiente e com os métodos e as ferramentas mais apropriados para tal aplicação. A partir disso, foi feita a definição e obtenção dos materiais.

Com todos os itens necessários em mãos e o projeto inicial já definido, foi feita a implementação de um protótipo para que o projeto fosse analisado e testado, com a intenção de encontrar todas as possíveis falhas do projeto antes que o hardware fosse finalizado e também para que pudesse ser iniciada a programação do sistema. Tanto o protótipo quanto o circuito final foram desenvolvidos no software Proteus, programa que

permite o desenvolvimento do projeto, a sua simulação e também a criação do desenho da placa de circuito impresso (PCB) que será utilizada.

Durante o desenvolvimento do software, tiveram de ser feitas a calibração do sensor de temperatura, o desenvolvimento e teste prático do controlador, além da interface com o usuário.

Após a finalização do projeto, foram feitos experimentos-teste para a obtenção de dados. Com as informações obtidas no experimento, pôde se analisar todas as respostas e variáveis do sistema, permitindo uma análise final sobre a eficiência do sistema como um todo, mas principalmente do seu controlador.

2 Revisão bibliográfica

Neste capítulo serão abordados os conceitos e informações que foram levantados para o desenvolvimento deste trabalho. Dessa forma, serão descritos os principais componentes utilizados, assim como as informações teóricas sobre a qual o trabalho foi embasado.

2.1 Arduino

O Arduino, uma plataforma de hardware e uma IDE de programação de código aberto desenvolvida na Itália no ano de 2005, tinha a finalidade de tornar mais fácil o aprendizado e o desenvolvimento de novas tecnologias por alunos de design leigos em programação (MUYNARSK; GARCIA, 2015). Foi uma grande inovação para a eletrônica, permitindo o desenvolvimento de novos produtos de forma mais rápida e simples.

É uma placa microcontrolada que conta com entradas e saídas nas quais podem se conectar diversos tipos de sensores e atuadores. Através da sua programação, realizada na IDE, pode utilizar das entradas e saídas para o desenvolvimento de uma infinidade de aplicações.

Existem diferentes modelos de Arduino, e a tabela 1 mostra algumas das principais diferenças entre eles.

2.1.0.1 Arduino UNO

De acordo com as necessidades do projeto; número de portas e memória; o Arduino escolhido para o desenvolvimento do trabalho foi o UNO, que pode ser visto na figura 1. O Arduino Uno conta com o microcontrolador ATmega 328p; possui cristal oscilador de 16MHz; 14 portas digitais de entrada e saída, sendo 6 delas PWM; conta com seis portas analógicas de entrada; e possui também conector USB, que serve tanto para a transferência das instruções para a placa do hardware quanto para a alimentação do mesmo (datasheet).

2.1.0.2 Microcontroladores

Um microcontrolado pode ser definido como um pequeno computador dentro de um circuito integrado, que consiste basicamente de um microcontrolador e dos seus periféricos, como memórias, portas de entrada e saída, conversores A/D e etc, que podem ser vistos na figura 2. Podem ser programados e, por isso, são utilizados em uma ampla gama de aplicações.

	Arduino Uno	Arduino Mega2560	Arduino Leonardo	Arduino Due	Arduino ADK	Arduino Nano	Arduino Pro Mini	Arduino Esplora
								
Microcontrolador	ATmega328	ATmega2560	ATmega32u4	AT91SAM3X8E	ATmega2560	ATmega168 (versão 2.x) ou ATmega328 (versão 3.x)	ATmega168	ATmega32u4
Portas digitais	14	54	20	54	54	14	14	-
Portas PWM	6	15	7	12	15	6	6	-
Portas analógicas	6	16	12	12	16	8	8	-
Memória	32 K (0,5 K usado pelo bootloader)	256 K (8 K usados pelo bootloader)	32 K (4 K usados pelo bootloader)	512 K disponível para aplicações	256 K (8 K usados pelo bootloader)	16 K (ATmega168) ou 32K (ATmega328), 2 K usados pelo bootloader	16 K (2k usados pelo bootloader)	32 K (4 K usados pelo bootloader)
Clock	16 Mhz	16 Mhz	16 Mhz	84 Mhz	16 Mhz	16 Mhz	8 Mhz (modelo 3.3v) ou 16 Mhz (modelo 5v)	16 Mhz
Conexão	USB	USB	Micro USB	Micro USB	USB	USB Mini-B	Serial / Módulo USB externo	Micro USB
Conector para alimentação externa	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não
Tensão de operação	5v	5v	5v	3.3v	5v	5v	3.3v ou 5v, dependendo do modelo	5v
Corrente máxima portas E/S	40 mA	40 mA	40 mA	130 mA	40 mA	40 mA	40 mA	-
Alimentação	7 - 12 Vdc	3.35 - 12 V (modelo 3.3v), ou 5 - 12 V (modelo 5v)	5v					

Tabela 1 – Comparativo entre modelos de Arduino

(THOMSEN, 2014)

Disponível em: <https://www.filipeflop.com/blog/tipos-de-arduino-qual-comprar/>

Figura 1 – Arduino UNO

(THOMSEN, 2014)

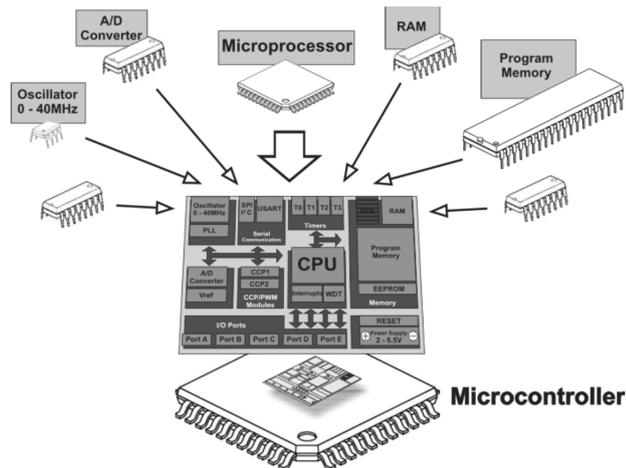


Figura 2 – Desenho esquemático de um microcontrolador
(TORRES; MARTINS, 2010)

2.1.0.3 Ambiente de desenvolvimento integrado do Arduino

O arduino possui seu próprio Ambiente de desenvolvimento integrado, do inglês Integrated Development Environment ou IDE, o qual é um software livre que, utilizando de uma linguagem baseada em C, pode se programar para o Arduino. Nele é possível programar, testar e fazer o upload do programa para a placa. O Arduino então irá executar as instruções definidas na programação. A figura 3 mostra a IDE oficial do arduino.

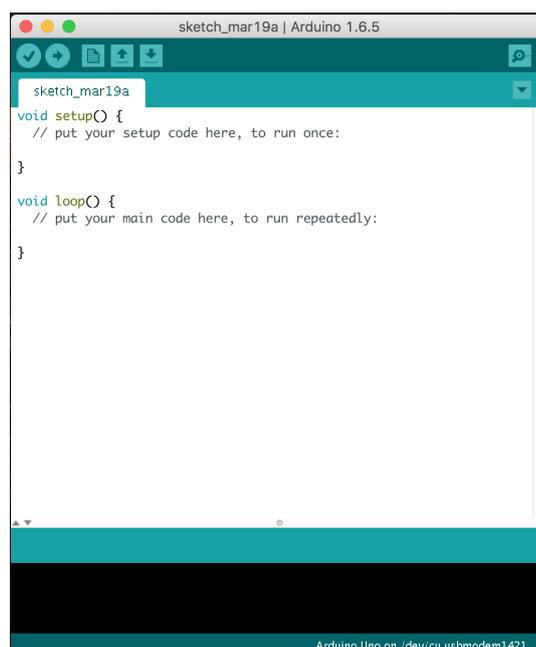


Figura 3 – IDE do Arduino

2.1.0.4 Timers

O timer é um recurso utilizado pelo microcontrolador para a contagem de tempo. Isso é feito com o auxílio de um oscilador que, de acordo com [Pereira \(\)](#), pode ser definido como:

O oscilador do microcontrolador utiliza cristal de quartzo para o seu funcionamento. Mesmo não sendo a solução mais simples para a obtenção de um sinal de relógio, existem muitas razões para usá-lo. A frequência do oscilador é precisamente definida e muito estável, de modo que gera pulsos sempre da mesma largura, o que os torna ideais para a medição do tempo. Tais osciladores também são usados em relógios de quartzo. Se é necessário medir o tempo entre dois eventos, basta contar os pulsos gerados por este oscilador. Isto é exatamente o que o temporizador, ou timer, faz.

A cada pulso, um registrador, normalmente de 8 ou 16 bits, é incrementado, e quando atinge o seu limite, uma interrupção é gerada.

Os timers presentes no Arduino UNO são: o Timer0, que tem resolução de 8bits e é responsável pelas funções `delay()`, `millis()` e `micros()`; o Timer1, cuja resolução é 16bits; e o Timer2, com resolução de 8bits.

2.1.0.5 Interrupções

De acordo com [Souza \(2009\)](#), as interrupções servem para, como o próprio nome diz, interromper o programa para a realização de ações que devem ser tomadas instantaneamente. Quando ocorre uma interrupção, o programa que estava sendo executado é paralisado, a função definida pelo programador dentro da interrupção é executada, e por fim, o programa que estava sendo executado inicialmente volta a sê-lo. São tratadas diretamente pelo hardware, o que as torna muito rápidas e disponíveis a qualquer ponto do sistema.

Dois dos principais tipos de interrupção utilizados no arduino são as por timer e as externas.

2.1.0.6 Interrupções por timer

São interrupções que ocorrem quando os timers internos do microcontrolador estouram. Podem ser utilizados tanto para a contagem de eventos, quanto para a contagem de tempo, pois, como pode ser incrementado a qualquer momento durante a execução do programa, a contagem fica precisa ([SOUZA, 2009](#)).

2.1.0.7 Interrupção externa

É uma interrupção gerada por um sinal externo ligado a uma porta do microcontrolador. Funciona de forma que, se ocorrer uma mudança de estado do sinal recebido por essa porta, independente do que esteja sendo processado naquele instante pelo microcontrolador, a entrada será reconhecida (SOUZA, 2009).

2.1.0.8 Entradas e saídas

O Arduino UNO possui 14 pinos de entrada e saída digitais, sendo que 6 deles podem ser usados também com saída PWM, e 6 pinos de entrada analógica. Os pinos digitais são numerados de 0 a 13, suportam corrente máxima de 40mA e possuem resolução de 8 bits. Já os pinos analógicos são identificados de A0 a A5 e possuem um conversor analógico/digital, também conhecido como conversor A/D, com resolução de 10 bits: o que converte o valor de entrada em um valor binário de 0 a 1023.

2.1.0.9 Modulação por largura de pulso (PWM)

Modulação por largura de pulso, que vem do inglês Pulse Width Modulation, é uma técnica utilizada para se simular sinais analógicos a partir de sinais digitais. É feito através da rápida alternância da saída digital entre ligado e desligado, o que, de acordo com a largura do pulso, simula um sinal analógico entre a tensão total, que é de 5 volts no caso do Arduino UNO, e o zero (MCROBERTS, 2013). A figura 4 mostra exemplos em que a alteração da largura do pulso, de 10%, 50% e 90%, simula saídas com tensões diferentes.

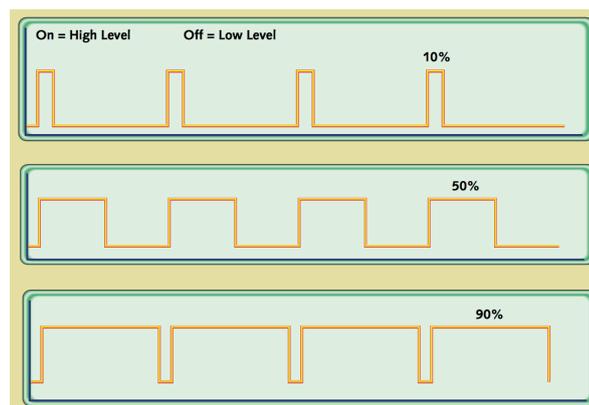


Figura 4 – Sinal PWM

(BARR, 2001)

No arduino UNO, os pinos que permitem essa função são os pinos 3, 5, 6, 9, 10 e 11. A frequência predefinida com que pode ser chaveado é de 490 Hz, exceto os pinos 5 e 6, que operam em 980 Hz. A frequência do PWM em todas essas portas pode ser modificado via programação.

2.2 Sensor

2.2.0.1 PT100

De acordo com [CASSANO \(2003\)](#), a temperatura é a segunda grandeza mais medida da natureza, perdendo apenas para o tempo. Isso mostra o quanto o controle e a mensuração dessa variável são importantes tanto nos processos industriais quanto no dia-a-dia das pessoas.

Os sensores PT-100 ou termorresistências de platina, como também são conhecidos, têm a função de medir essa variável. Isso é feito através da medição da resistência elétrica do transdutor, que varia de acordo com a mudança da temperatura.

Nesse processo, optou-se pelo PT100 devido a sua rápida resposta à variação de temperatura e à sua alta repetitividade.

2.3 Atuadores

2.3.0.1 Resistência elétrica

Para o aquecimento da panela foi utilizada uma resistência elétrica de alta potência. Uma das características mais importantes das resistências elétricas, além da sua potência e tensão, é a sua densidade, que é representada pela relação entre a sua potência e a área da sua superfície. Devido a essa característica, existem dois tipos de resistência elétrica para o aquecimento:

- Resistências de alta densidade:

Possuem uma área de contato muito pequena para dissipar o calor, como mostra a figura 5. Esse tipo é comumente encontrado nos chuveiros elétricos.



Figura 5 – Resistência de alta densidade

- Resistências de baixa densidade:

Já as resistências de baixa densidade, que podem ser vistas na figura 6 são aquelas cuja área de contato é significativamente maior, o que facilita a troca de calor com o líquido. São muito utilizadas para o aquecimento de boilers residenciais e painéis elétricos.



Figura 6 – Resistências de baixa densidade

Para compararmos os dois tipos, se colocarmos as duas de mesma potência, cada uma em em uma panela com água em condições iguais, as duas poderão aquecer a água até uma mesma temperatura. Porém, a diferença é que, para isso, a resistência de alta densidade atingirá temperaturas muito mais altas que a de baixa densidade.

Para evitar problemas devido a concentração de uma temperatura muito alta onde o elemento resistivo será colocado, no projeto foi utilizada uma resistência de baixa densidade, com uma potência de 5.000 watts.

2.4 Relés

É um dispositivo que tem como finalidade permitir ou não a passagem de corrente para um determinado aparelho a ele conectado. São muito utilizados na eletrônica para se isolar os circuitos de alta potência e também para acionar os mesmos com correntes e tensões mais baixas: o que normalmente é necessário quando se usa microcontroladores, já que esses possuem saídas muito limitadas.

2.4.0.1 Relés eletromecânicos

É um equipamento que combina um acionamento elétrico com um sistema mecânico, através do eletromagnetismo, para o acionamento da carga.

Existem diversos tipos de relés eletromecânicos, sendo que os mais comuns funcionam utilizando uma bobina, a qual ao ser energizada, gera um campo magnético que atrai uma armadura, como mostra a figura 7, o que altera a posição dos contatos, que podem abrir, fechar ou comutar, dependendo do seu tipo (CUNHA, 2009).

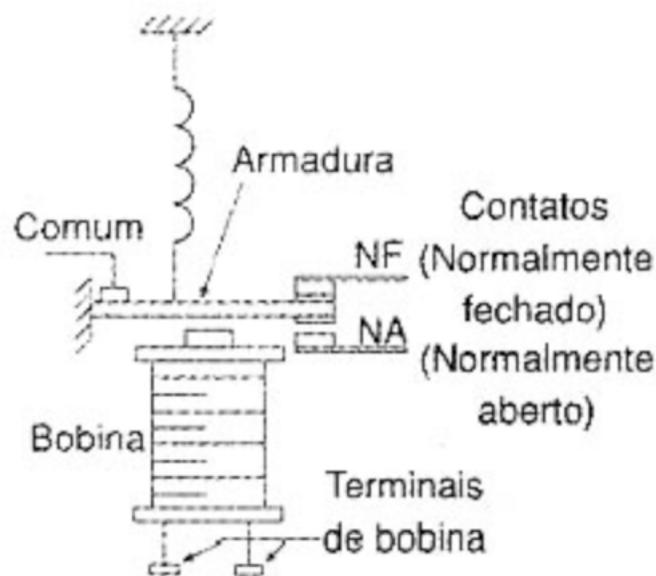


Figura 7 – Esquema de um relé eletromecânico

Fonte: (BRAGA, 2012)

Por possuir partes móveis, possui as desvantagens de se desgastar; gerar ruídos, tanto elétricos quanto audíveis; e normalmente serem grandes e pesados

2.4.0.2 Relé de estado sólido

Já o relé de estado sólido não possui partes móveis. Esse tipo de relé, para comutar altas correntes com uma pequena tensão e corrente, utiliza como chave semicondutores de potência, como tiristores e transistores.

Na figura 8 pode ser visto o esquema de um SSR no qual o acionamento é feito por um acoplador óptico que quando energizado faz com que um FET de potência conduza a corrente.

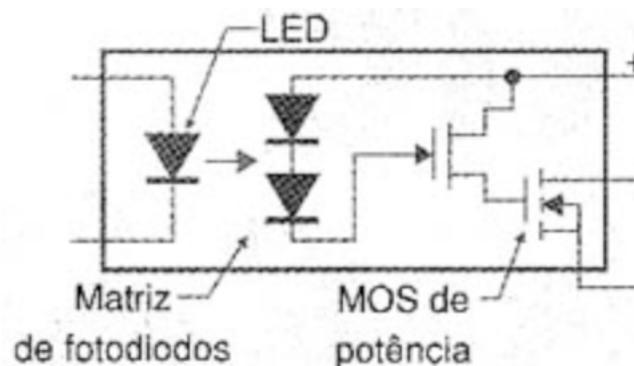


Figura 8 – Esquema de um relé de estado sólido

(BRAGA, 2012)

Segundo Braga (2012), o SSR possui vantagens significativas sobre o EMR, algumas

delas são:

- São menores e mais leves;
- Apresentam menor desgaste, dando-lhe uma vida útil maior;
- Pode ser utilizado em frequências muito maiores;
- Elimina significativamente os ruídos.

2.5 Sistemas de controle

O controle automático, de acordo com [Dorf et al. \(2001\)](#), usa uma relação preestabelecida entre a entrada e a saída com a intenção de manter as variáveis de um processo em valores predeterminados.

Existem diversos tipos de controladores e de técnicas para o seu desenvolvimento atualmente, nesta seção serão descritos as principais.

2.5.1 Controle liga/desliga (ON/OFF)

É um tipo de controle muito utilizado em sistemas de controle residenciais e industriais, porém, não é capaz de manter a variável controlada no set-point determinado. Tem esse nome pois apresenta apenas estes dois estados de atuação, ligado e desligado.

Nele, utilizando-se de um sensor, é feita a leitura do estado atual do sistema e, de acordo com o sistema que está sendo controlado, liga ou desliga o atuador para que a variável volte ao valor determinado como set-point.

Tem como vantagens a sua simplicidade e o seu baixo custo. Entretanto, tem pontos negativos como saída oscilante, falta de precisão e desgaste do controlador por uso excessivo pelo excesso de partidas.

Para evitar o desgaste devido às partidas excessivas, pode-se utilizar o controlador liga/desliga com histerese, vide figura 9. Esse método consiste em, ao invés de definir apenas um valor como limite para acionamento ou não da carga, definir um intervalo. Dessa forma, a variável que está sendo controlada vai ter uma maior variação, entretanto, a carga que está sendo acionada terá uma vida útil maior.

2.5.2 Controle Proporcional

Segundo [Campos e Teixeira \(2006\)](#), o controlador proporcional atua na variável manipulada de forma proporcional ao erro $e(t)$, que é a diferença entre o valor-alvo e a

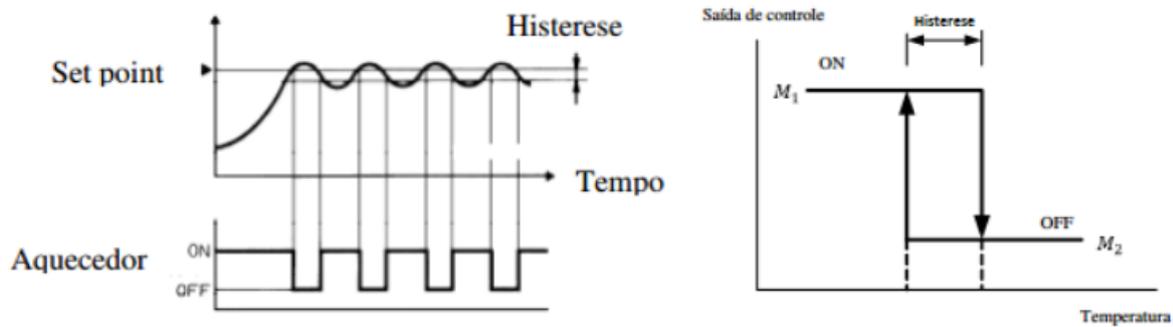


Figura 9 – Controle liga/desliga
(BEZERRA et al., 2007)

grandeza medida. Sendo K_p o ganho do controlador, a ação de controle $u(t)$ pode ser expressa por:

$$U(t) = K_p \cdot e(t)$$

Quanto maior o ganho, menor é o erro do sistema em regime permanente. Entretanto, o aumento excessivo do ganho pode fazer o sistema oscilar, levando-o a instabilidade. Por outro lado, se o ganho for muito baixo, este poderá ficar distante do valor desejado, não eliminando o erro em regime permanente (IBRAHIM, 2006).

2.5.3 Controle Proporcional Integral

De acordo com Campos e Teixeira (2006), o controlador PI apresenta uma saída proporcional tanto ao erro quanto à integral do erro, conforme mostrado pela equação a seguir:

$$U(t) = K_p \cdot (e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) dt)$$

A ação integral faz com que o sistema tenha mais um polo na origem da FT do controlador, o que tende a piorar a estabilidade do sistema em malha fechada. Por isso, normalmente não é utilizado de maneira isolada. Porém, quando utilizado em conjunto com a ação proporcional, faz com que o erro em regime permanente seja nulo, desde que a resposta gerada pelo controlador seja estável (BAZANELLA; JR, 1999).

2.5.4 Controle Proporcional Integral Derivativo

De acordo com Ogata e Yang (2002), os controles PID estão presentes em mais da metade dos controles industriais utilizados.

Esse tipo de controle gera uma saída proporcional ao erro, proporcional à integral do erro e proporcional à derivada do erro (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006). O que segundo

Ogata e Yang (2002), apresenta as vantagens de cada um dos três tipos de controle. A sua função pode ser vista na equação a seguir:

$$U(t) = Kp.(e(t) + \frac{1}{Ti} \cdot \int_0^t e(t)dt + Td \cdot \frac{de(t)}{dt})$$

2.5.5 Método de Ziegler-Nichols

É um método inovador que inovou na época de sua publicação, por ter sido o primeiro propondo uma metodologia objetiva e simples para a sintonia de controladores PID, desenvolvido por Jonh Ziegler e Nathaniel B. Nichols. Eles desenvolveram um conjunto de regras para a determinação dos valores do ganho proporcional K_p , do tempo integral T_i e do tempo derivativo T_d (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006).

O método da curva de reação consiste em obter, inicialmente, a resposta da planta ao degrau unitário. Para que o método possa ser aplicado, a curva de resposta ao sinal de entrada deve ter o aspecto de um S, como mostra a figura 10.

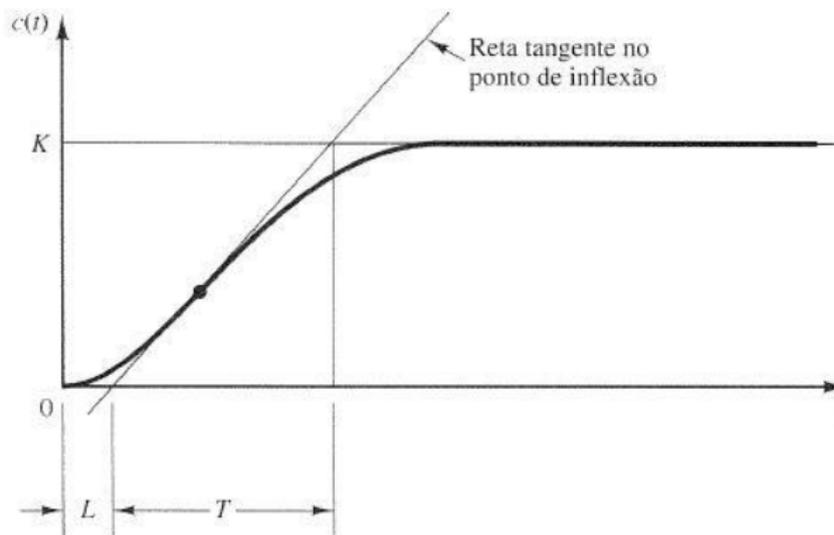


Figura 10 – Exemplo de gráfico ideal para a sintonia Ziegler-Nichols

(OGATA; YANG, 2002)

A curva em S tem como característica o tempo de atraso (L) e a constante de tempo (T). Através do desenho da tangente no ponto de inflexão da curva podemos encontrar os valores do atraso e a constante de tempo, como se pode ver no gráfico da figura 10.

Conhecendo os valores de L , T e K , e com o auxílio da tabela 2, é possível encontrar os valores para do ganho proporcional K_p , do tempo integral T_i e do tempo derivativo T_d .

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$		0
PI	$0,9 \cdot \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \cdot \frac{T}{L}$	$2 \cdot L$	$0,5 \cdot L$

Tabela 2 – Tabela para sintonia Ziegler-Nichols

2.6 Produção da cerveja

A produção da cerveja remonta a milhares de anos. Não se sabe ao certo onde e quando surgiu, mas há indícios da sua fabricação desde antes de 4.000 a.C.. Desde o seu surgimento até hoje, com a experiência de incontáveis fabricações e com o desenvolvimento da tecnologia, sofreu diversas alterações, seja nos seus ingredientes, seja na forma de se produzir.

Além de uma das mais antigas, a cerveja é hoje em dia, segundo Nelson (2005), a bebida alcoólica mais consumida no mundo.

Nessa sessão serão apresentadas as principais informações necessárias para a produção de cerveja.

2.6.1 Ingredientes principais

2.6.1.1 Malte

São cereais que passam pelo processo da maltagem, técnica na qual deixa-se o grão germinar para a criação de enzimas que quebram parcialmente os seus amidos e proteínas. Após isso, é feita a secagem ou torrefação do mesmo, gerando o malte (MORADO, 2009). A cerveja deve, necessariamente, ser feita utilizando malte de cevada, mas pode também ser acrescentado outros tipos de cereais, que podem ser maltados ou não, como trigo, arroz, milho e vários outros.

No preparo da cerveja, o malte é moído e, embebido em água, aquecido para converter o seu amido em açúcar. Esse açúcar é posteriormente fermentado, gerando o álcool da cerveja (PALMER, 2006).

2.6.1.2 Lúpulo

O lúpulo é uma flor nativa, e mais comumente cultivada, no hemisfério norte, devido a sua necessidade de luz e de baixas temperaturas. Na produção da cerveja, foi inicialmente utilizado para aumentar a durabilidade da mesma, já que antes da sua utilização azedavam rapidamente e viravam vinagre. Apesar de a princípio ter sido utilizado por esse motivo, o

lúpulo trouxe o amargor, aroma e sabor agradável à cerveja, o que justifica o seu uso até os dias de hoje (BRIGGS et al., 2004).

De acordo com Palmer (2006), em cada momento que o lúpulo é adicionado ao processo, ele traz diferentes características para a cerveja, são eles:

- Amargor: Adicionado no início da fervura, traz maior amargor para a receita. Por ser fervido por muito tempo, seus óleos aromáticos tendem a evaporar, não interferindo de forma efetiva no sabor e aroma da cerveja.
- Sabor: Ao ser adicionado no meio da fervura, normalmente faltando entre 20 e 40 minutos para o fim da fervura, traz sabores característicos devido à combinação da evaporação dos óleos aromáticos e o amargor adquirido.
- Aroma: Quando adicionado no fim da fervura, usualmente faltando menos de 15 minutos, pouco dos óleos aromáticos exalam, deixando o produto final com um maior aroma desse lúpulo.
- Dry hopping: Para adicionar mais aroma à cerveja, pode ser utilizada também a técnica de dry hopping, que consiste na adição de lúpulo no estágio da fermentação. Se feito no início da fermentação, pode fazer com que o aroma do lúpulo seja perdido junto com o dióxido de carbono gerado. Por isso, é recomendável que seja feito mais próximo do fim da fermentação.

2.6.1.3 Leveduras

É um tipo de fungo microscópico, cujo nome oficial é *Saccharomyces Cerevisiae*. De acordo com HUGHES (2014, p. 32), “Esse é o ingrediente que transforma em cerveja o mosto doce produzido pelo malte, o lúpulo e a água”. Ou seja, se alimentam dos açúcares e carboidratos presentes no mosto, gerando dióxido de carbono, álcool etílico e outros que podem influenciar no sabor das cervejas, sendo os mais comuns os: Ésteres, álcoois fúseis e o diacetil.

Podem ser divididas em dois tipos diferentes:

- Leveduras de alta fermentação: Normalmente empregues na produção das Ales, são ativadas em temperaturas mais altas, entre 15 e 25 C aproximadamente. Produzem aromas típicos frutados.
- Leveduras de baixa fermentação: Normalmente utilizadas nas Lagers, fermentam em temperaturas mais baixas, entre 9 e 15 C.

2.6.1.4 Água

As características químicas da água são de grande valor para o produto final a ser obtido. De acordo com [Briggs et al. \(2004\)](#), a cerveja possui normalmente, entre 91 e 98% de água, logo, este é um ingrediente fundamental das mesmas.

Diferentes tipos de água, com diferentes características químicas, trazem maior qualidade para tipos específicos de cerveja. Como exemplos mais claros disso, temos as águas com poucos minerais da região de Pilsen, na República Tcheca, que é ideal para a produção do tipo lager, e as águas ricas em cálcio e bicarbonato da Irlanda, que a tornam ótima para a produção da cerveja do tipo stout ([MORADO, 2009](#)).

Porém, com a evolução da química, hoje em dia os minerais podem ser adicionados ou removidos da água para torna-la mais apropriada para o tipo de cerveja que será feito. Esse processo é muito utilizado pelas grandes fabricantes de cerveja.

2.6.2 Processo de produção da cerveja

Nessa seção serão apresentadas as etapas do processo de produção de cerveja. O método que será descrito é o “all-grain com brassagem em saco”, uma técnica de produção na qual permite-se a utilização de apenas uma panela para as etapas da brassagem, sparge e fervura. A figura 11 apresenta um exemplo de como varia a temperatura durante cada uma das etapas de fabricação da cerveja. O primeiro degrau é referente à brassagem, o segundo à lavagem e o terceiro à fervura, sendo que cada uma será explicada a seguir.

2.6.2.1 Brassagem

A brassagem consiste em adicionar o malte moído, que serve para expor o amido contido no seu interior, à água a uma temperatura específica para ativar as enzimas do malte e converter o seu amido em açúcares fermentáveis. São várias as enzimas que servem para converter o amido em açúcar, sendo cada uma delas favorecida por temperaturas diferentes. Isso permite ao mestre cervejeiro definir a temperatura da sua brassagem de acordo com as enzimas que o mesmo deseja ativar de acordo com o seu objetivo ([PALMER, 2006](#)).

Quanto mais preciso o controle da temperatura durante essa etapa, mais próximo o produto final será daquele planejado pelo mestre cervejeiro. Porém, normalmente são utilizados fogareiros a gás, o que torna difícil o controle da temperatura.

2.6.2.2 Lavagem

Muito conhecido também como sparge, que vem do inglês, é a fase na qual o mosto é separado do malte para extrair os açúcares ainda presentes no malte. Existem algumas formas diferentes de se realizar essa etapa, mas os mais comuns são: a primeira consiste

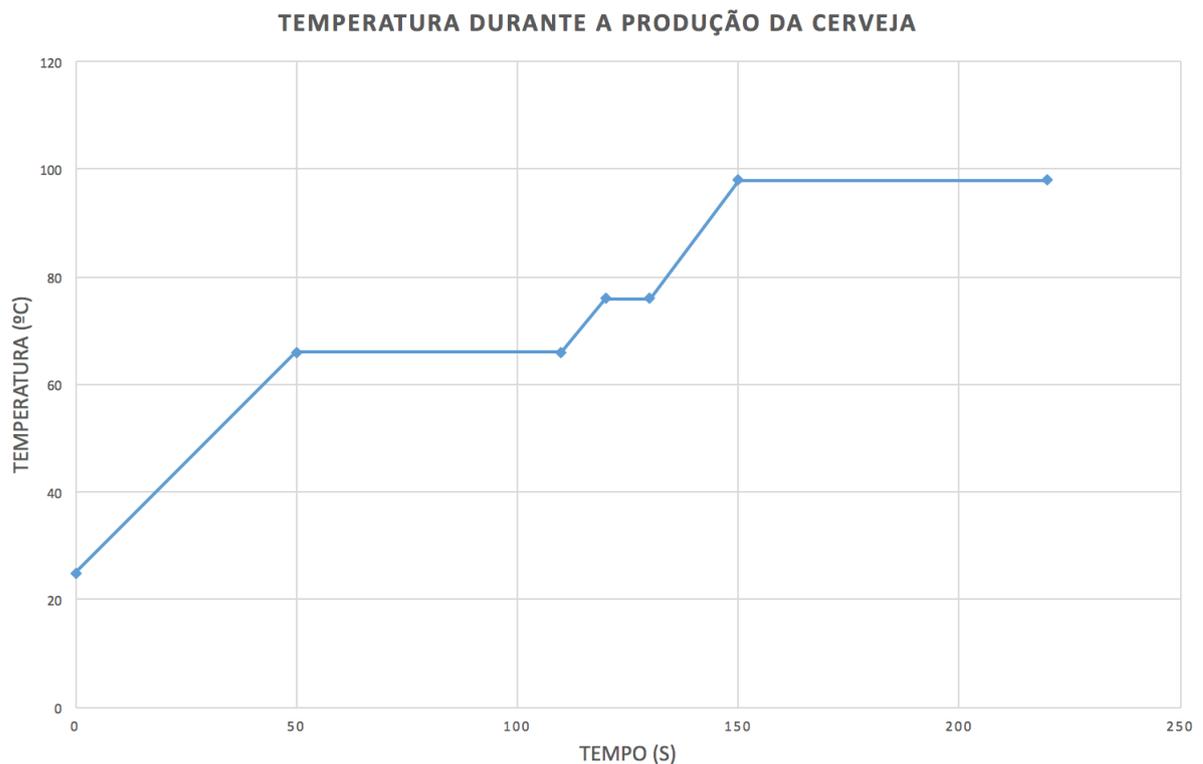


Figura 11 – Exemplo de rampa utilizada na produção da cerveja

em lentamente adicionar água quente, normalmente entre 74 e 78 C, em cima da panela de brassagem e ao mesmo tempo ir drenando o mosto para outro tanque; o segundo consiste em aumentar a temperatura do mosto e, a partir daí, ou drenar o líquido, ou retirar os sólidos da panela, o que pode ser feito com o uso de sacos ou panos desde o início da brassagem.

2.6.2.3 Fervura

Com a panela de fervura cheia, o mosto é fervido por, usualmente, entre 1 e 2 horas. É nessa etapa em que é feita a lupulagem da cerveja. De acordo com (BRIGGS et al., 2004), durante essa etapa ocorrem diversas alterações nas características do mosto, sendo algumas delas:

- Eliminação de micro-organismos, que podem concorrer com as leveduras pelos nutrientes do mosto;
- A coagulação de proteínas indesejadas;
- A adição de aromas, amargor e sabor devido à adição dos lúpulos.

2.6.2.4 Resfriamento

Ao fim da fervura, o mosto deve ser resfriado até a temperatura na qual possa ser inoculado pela levedura e fermentado. De acordo com (PALMER, 2006), isso deve ser feito da forma mais rápida possível para evitar danos causados pela oxidação e a proliferação de bactérias.

2.6.2.5 Fermentação

É iniciada pela inoculação de leveduras específicas para a cerveja, que metaboliza substâncias dissolvidas no mosto. Com isso, mais células do fermento e substâncias características das cervejas são geradas. Os principais produtos gerados pela fermentação são o etanol, o dióxido de carbono e calor (BRIGGS et al., 2004).

A temperatura na qual a cerveja é fermentada depende do seu estilo e do tipo de fermento que está sendo utilizado. Por precisarem de temperaturas baixas, normalmente inferiores à temperatura ambiente no Brasil, os produtores de cerveja usam equipamentos para resfriá-la.

2.6.2.6 Outras etapas

Após as etapas descritas anteriormente, existem as etapas de maturação, *primming* e o engarrafamento. Essas etapas servem, respectivamente, para: melhoramento do sabor e clarificação do produto final; geração do gás da cerveja; e envase, que pode ser em barris, garrafas e outros recipientes.

3 Desenvolvimento

O desenvolvimento do protótipo foi feito nas seguintes etapas: montagem da estrutura, desenvolvimento da interface com o usuário, calibração dos sensores, a implementação do controle da temperatura e, por fim, a interligação de todo o projeto. A primeira consistiu na montagem da estrutura da panela, adicionando a resistência elétrica, o sensor de temperatura e uma torneira; a segunda se refere a montagem, em protoboard, da interface com o usuário à programação do software; já na terceira etapa, foi realizada a calibração do sensor PT-100, assim como a integração dos sistemas e a programação final, relacionando a interface já desenvolvida, através de um controle, com o sensor e o atuador.

Após o funcionamento e teste do protótipo, será desenvolvida uma versão mais refinada do hardware, que contará com circuito impresso e caixa protetora, o que trará maior praticidade, valor e segurança para o produto.

3.1 Montagem do equipamento

A montagem da estrutura foi feita utilizando como base um caldeirão de alumínio de 68 litros, o que é normalmente utilizado para a produção caseira de cerveja.

Como durante a fabricação da cerveja é necessário transferir o mosto para diferentes panelas e/ou recipientes, foi adicionada uma torneira no seu fundo, o que pode ser visto na figura [12](#).

Além disso, para o controle da temperatura, foram adicionados os sensores e atuadores na panela, que são, respectivamente, o sensor de temperatura PT100 e uma resistência elétrica de alta densidade de 5.000 W, que podem ser visto na figura [13](#).

A resistência elétrica foi colocada no fundo da panela para que a mesma não entre em contato com o saco de grãos a ser utilizado na brassagem, o que poderia causar grandes problemas na mesma. Ademais, dessa forma, é possível também realizar a brassagem utilizando um fundo falso para separar os grãos da resistência.

O termômetro foi posicionado na metade da altura da panela. Isso foi feito para que o mesmo fique sempre mergulhado no mosto, independentemente da quantidade de cerveja a ser produzida e, além disso, serve para distanciar o sensor da resistência, o que torna a sua leitura mais confiável.

Após essas alterações, foram realizados testes para verificação de vazamentos e para testar o funcionamento da resistência elétrica.



Figura 12 – Foto do caldeirão com a torneira já embutida



Figura 13 – Caldeirão finalizado

3.2 Programação do microcontrolador

Para a comunicação entre os diferentes componentes do sistema, display, encoder e sensor de temperatura, foi utilizado o Arduino UNO. O programa foi desenvolvido utilizando a IDE própria do Arduino.

O programa foi desenvolvido em duas fases: na primeira, realizou-se o desenvolvimento da interface com o usuário, que utiliza o encoder para a entrada de informações e o display para que se possa visualizar as modificações e acompanhar o processo; na segunda,

foram feitos a leitura e a calibração do sensor, acionamento da resistência elétrica, assim como o seu controle.

3.3 Interface com o usuário

É chamada de interface com o usuário a parte do sistema ou produto destinada para que o utilizador do sistema possa realizar alterações ou configurações no sistema. Sem isso, o produto perde grande parte da sua funcionalidade. O caso da panela para a produção de cerveja não é diferente. Por isso, foi necessário o desenvolvimento de uma interface.

Para que o usuário entre com os dados que deseja; informações de tempo e de temperatura necessárias para o processo, e para navegar dentro do menu; foi utilizado um encoder rotativo com botão. Este permite, de acordo com a forma com que deseja levar o processo, a alteração e a confirmação das variáveis de entrada.

Ademais, um display LCD 16x2 foi utilizado para a visualização das variáveis na hora da configuração do sistema. Além de servir para que o usuário defina as variáveis do seu processo, após iniciado o processo, serve para que o usuário possa acompanhar o seu andamento e ainda, se achar necessário, realizar novas alterações durante o mesmo.

A versão para desenvolvimento e testes, montada em protoboard, pode ser vista na figura 14.

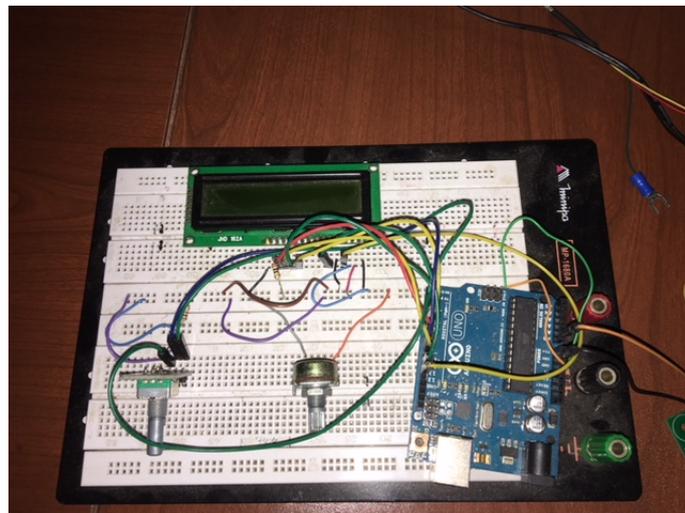


Figura 14 – Versão do menu para desenvolvimento e testes

3.4 Acionamento da resistência

Como a resistência elétrica utilizada para o aquecimento precisa ser alimentada com 220 V e possui uma potência de 5.000 W, que não podem ser fornecidas pelo Arduino,

foi utilizado um relé de estado sólido para o seu acionamento.

O relé utilizado, mostrado na figura 15, pode ser acionado por tensões entre 3 e 32 V, permitindo o seu acionamento pelo Arduino. Ademais, suporta até 40 A de corrente, o que permite, seguramente, o acionamento da resistência elétrica utilizada no projeto.



Figura 15 – SSR utilizado no projeto

Este relé tem como característica a dissipação de muito calor, e como o mesmo apresenta faixa de utilização de até 80 C, tem como necessidade a utilização de um dissipador de calor.

3.5 Projeto eletrônico

O primeiro passo para a confecção da placa de circuito impresso foi o desenvolvimento do projeto no software Proteus. Foi desenhado no software o mesmo circuito já desenvolvido no protoboard. O projeto desenvolvido no Proteus pode ser visto na figura 16.

Com o circuito já desenvolvido no software, foi possível exportá-lo para o Ares Proteus. Nele é possível projetar a placa de circuito impresso organizando os diversos componentes utilizados na placa e traçando as trilhas. Na figura 17 pode ser vista a visualização da placa de circuito impresso.

3.6 Calibração do sensor de temperatura

Para a utilização do sensor de temperatura PT100, foi necessário realizar a sua calibração. Para isso, foi utilizado um termômetro LM35, o qual não necessita de calibração, apresenta uma precisão de 0,5 °C e tem uma variação na sua saída de 10 mV a cada grau Celsius de variação (INSTRUMENTS; SENSORS, 1999).

Utilizando o Arduino UNO foi desenvolvido um programa que coletava, a cada 0,5 °C, a saída do PT100. O Arduino, utilizando seu conversor Analógico-Digital convertia a

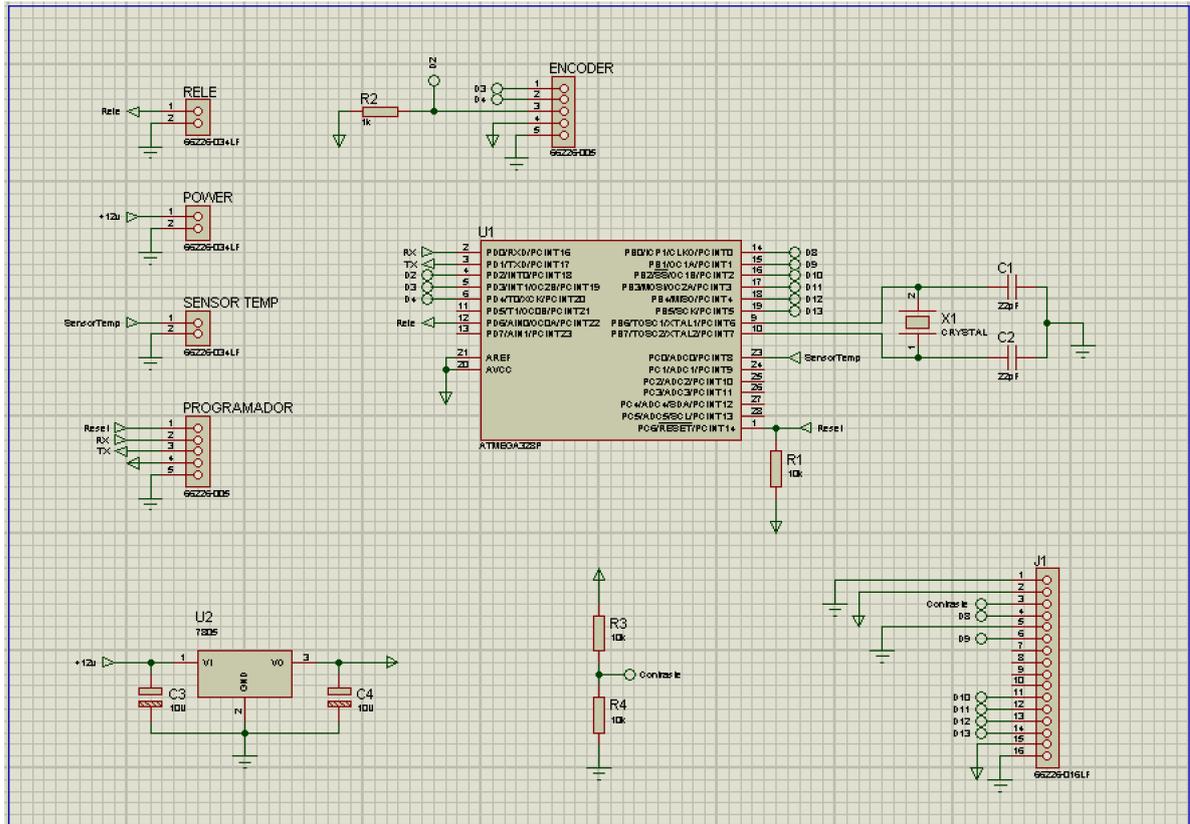


Figura 16 – Projeto desenvolvido no software Proteus

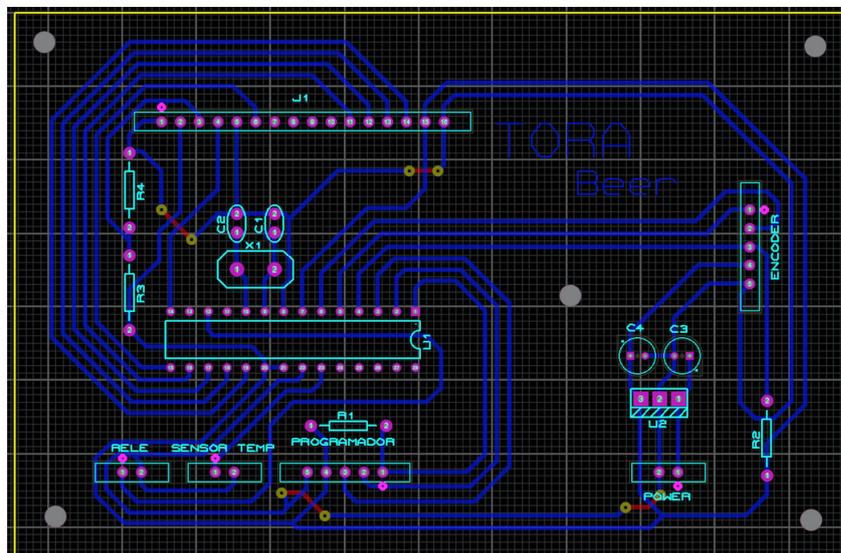


Figura 17 – Desenho da placa de circuito impresso

tensão que recebia do sensor, a qual poderia variar entre 0 e 5 Volts, em valores entre 0 e 1023. Os dados coletados podem ser vistos na tabela 3.

A partir desses dados foi feito o cálculo do Coeficiente de Correlação de Pearson (CCP). O CCP mede a correlação entre duas variáveis distintas, gerando um valor entre 1 (correlação perfeita) e -1 (correlação perfeita, mas negativa), sendo que 0 significa que

Amostra	Dados										
	Y	X									
1	21,00	227,00	42	41,50	395,00	83	62,00	561,00	124	82,50	722,00
2	21,50	232,00	43	42,00	399,00	84	62,50	566,00	125	83,00	728,00
3	22,00	235,00	44	42,50	404,00	85	63,00	569,00	126	83,50	731,00
4	22,50	238,00	45	43,00	408,00	86	63,50	574,00	127	84,00	735,00
5	23,00	240,00	46	43,50	410,00	87	64,00	577,00	128	84,50	739,00
6	23,50	247,00	47	44,00	414,00	88	64,50	580,00	129	85,00	744,00
7	24,00	251,00	48	44,50	417,00	89	65,00	585,00	130	85,50	745,00
8	24,50	253,00	49	45,00	423,00	90	65,50	589,00	131	86,00	750,00
9	25,00	256,00	50	45,50	425,00	91	66,00	591,00	132	86,50	753,00
10	25,50	261,00	51	46,00	429,00	92	66,50	598,00	133	87,00	758,00
11	26,00	265,00	52	46,50	432,00	93	67,00	601,00	134	87,50	760,00
12	26,50	268,00	53	47,00	439,00	94	67,50	606,00	135	88,00	765,00
13	27,00	272,00	54	47,50	442,00	95	68,00	608,00	136	88,50	769,00
14	27,50	275,00	55	48,00	447,00	96	68,50	614,00	137	89,00	773,00
15	28,00	279,00	56	48,50	450,00	97	69,00	617,00	138	89,50	776,00
16	28,50	288,00	57	49,00	455,00	98	69,50	619,00	139	90,00	782,00
17	29,00	290,00	58	49,50	459,00	99	70,00	623,00	140	90,50	785,00
18	29,50	297,00	59	50,00	463,00	100	70,50	629,00	141	91,00	789,00
19	30,00	304,00	60	50,50	467,00	101	71,00	631,00	142	91,50	793,00
20	30,50	308,00	61	51,00	471,00	102	71,50	634,00	143	92,00	798,00
21	31,00	313,00	62	51,50	475,00	103	72,00	639,00	144	92,50	802,00
22	31,50	316,00	63	52,00	480,00	104	72,50	643,00	145	93,00	807,00
23	32,00	321,00	64	52,50	483,00	105	73,00	649,00	146	93,50	811,00
24	32,50	324,00	65	53,00	487,00	106	73,50	651,00	147	94,00	816,00
25	33,00	329,00	66	53,50	492,00	107	74,00	656,00	148	94,50	819,00
26	33,50	334,00	67	54,00	495,00	108	74,50	659,00	149	95,00	824,00
27	34,00	336,00	68	54,50	500,00	109	75,00	664,00	150	95,50	827,00
28	34,50	341,00	69	55,00	504,00	110	75,50	667,00	151	96,00	830,00
29	35,00	344,00	70	55,50	507,00	111	76,00	671,00	152	96,50	836,00
30	35,50	347,00	71	56,00	512,00	112	76,50	674,00	153	97,00	838,00
31	36,00	351,00	72	56,50	516,00	113	77,00	678,00			
32	36,50	356,00	73	57,00	520,00	114	77,50	682,00			
33	37,00	359,00	74	57,50	524,00	115	78,00	684,00			
34	37,50	361,00	75	58,00	528,00	116	78,50	688,00			
35	38,00	369,00	76	58,50	531,00	117	79,00	695,00			
36	38,50	373,00	77	59,00	535,00	118	79,50	698,00			
37	39,00	376,00	78	59,50	539,00	119	80,00	703,00			
38	39,50	380,00	79	60,00	543,00	120	80,50	705,00			
39	40,00	383,00	80	60,50	546,00	121	81,00	712,00			
40	40,50	389,00	81	61,00	552,00	122	81,50	716,00			
41	41,00	391,00	82	61,50	557,00	123	82,00	719,00			

Tabela 3 – Dados coletados para a calibração do sensor

não existe relação entre elas (ADLER; PARMRYD, 2010). A fórmula para o seu cálculo, em que x representa o sinal recebido pelo arduino na porta correspondente ao PT100 e y corresponde à temperatura real da água medida pelo sensor LM35, pode ser vista a seguir:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

O valor encontrado para o coeficiente de Pearson foi 1,0, o que permite concluir que a correlação entre os dados é muito forte.

Com isso, foi possível gerar o diagrama de dispersão e a linha de tendência das amostras, que podem ser vistos na figura 18, o que permitiu também encontrar a equação da reta, que correlaciona as duas variáveis.

$$y = 0.1245.x - 7.5739$$

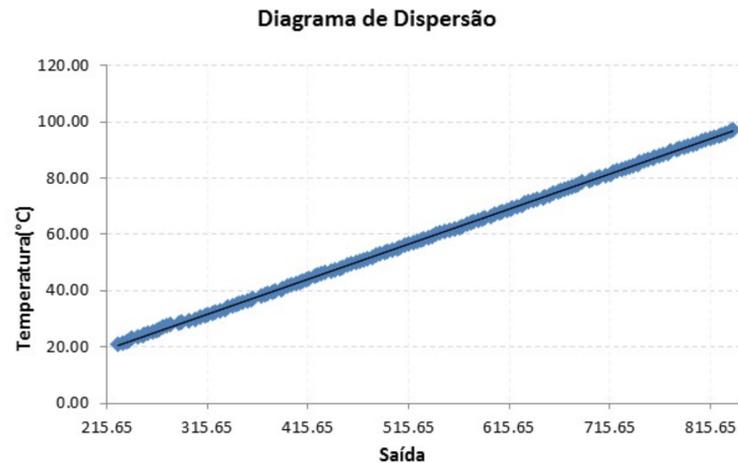


Figura 18 – Gráfico relacionando a saída do termômetro com a temperatura real em graus Celsius

Essa é uma equação de primeiro grau, na qual y representa a temperatura em graus celsius e x o valor recebido pelo microcontrolador na porta correspondente ao sensor de temperatura. Utilizando-se dessa, foi possível a utilização do sensor PT100 para a obtenção da temperatura do líquido na panela já em graus Célsius.

3.7 Controle

Para o desenvolvimento do controlador foi proposta a sintonia tanto de um controlador PI, quanto de um PID, para que depois sejam comparados e se defina aquele que apresenta a melhor resposta para o tipo de sistema que está sendo desenvolvido. Para isso foi utilizado o método Ziegler-Nichols.

O procedimento foi iniciado com a temperatura estável em 56,16C, na qual a tensão aplicada na resistência era de 5,5V e a panela permaneceu durante todo o processo com a tampa fechada, para diminuir a troca de calor com o ambiente. Foi aplicado em seguida, em malha aberta, um degrau com 5% da tensão da rede, o que corresponde a aproximadamente 11V. Esperou-se então até que a temperatura da água se estabilizasse novamente. Durante todo o procedimento, o tempo de amostragem foi de 1 segundo.

Após a realização do procedimento citado, foram obtidos o gráfico e, utilizando o software MATLAB, foram encontrados o ponto de inflexão da curva e a reta tangente a esse ponto. Utilizando o método Ziegler-Nichols, foi possível encontrar os valores de L e T e, com isso, os parâmetros dos controladores. A figura 19 apresenta a curva obtida com o experimento e a reta tangente ao ponto de inflexão.

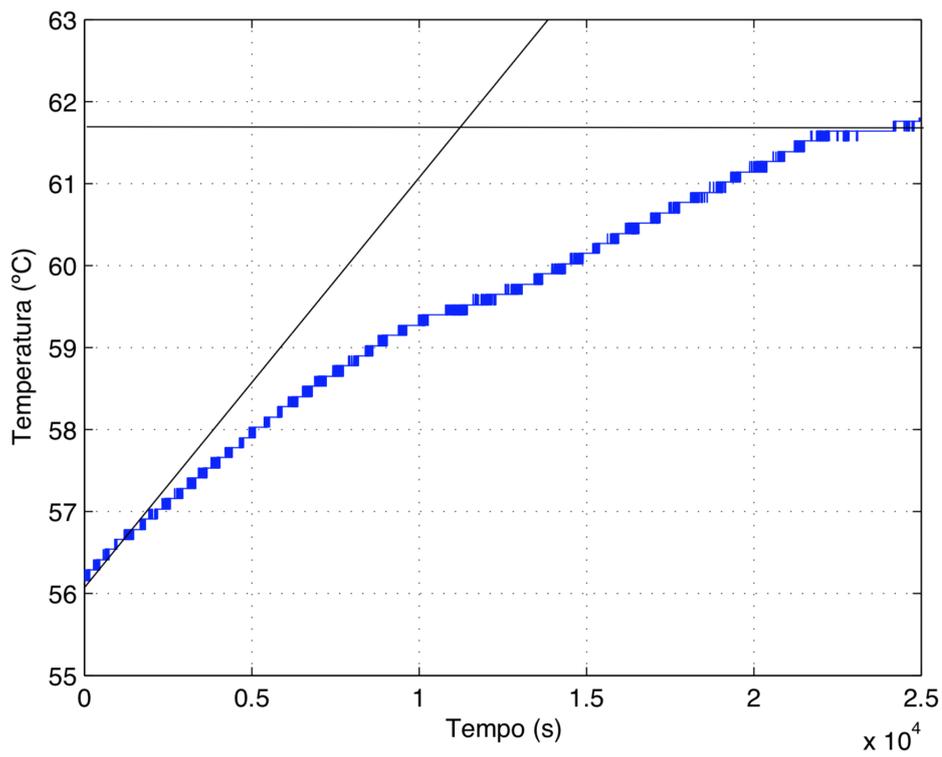


Figura 19 – Curva encontrada após o degrau

Seguem os Parâmetros do controlador PI:

- $K_p = 40,59$
- $K_i = 0,0425$

Seguem os Parâmetros do controlador PI:

- $K_p = 54,13$
- $K_i = 0,0946$
- $K_i = 2,64$

4 Resultados

Esse capítulo tem a finalidade de apresentar os resultados obtidos quanto aos controladores utilizados.

4.1 Análise

Foram feitos experimentos com os controladores PI, PID e, para uma melhor comparação, um controlador Liga-Desliga (On-Off). Todos os experimentos foram feitos com a temperatura inicial de 29C e um valor alvo de 62C. A figura 20 apresenta a resposta dos três controles.

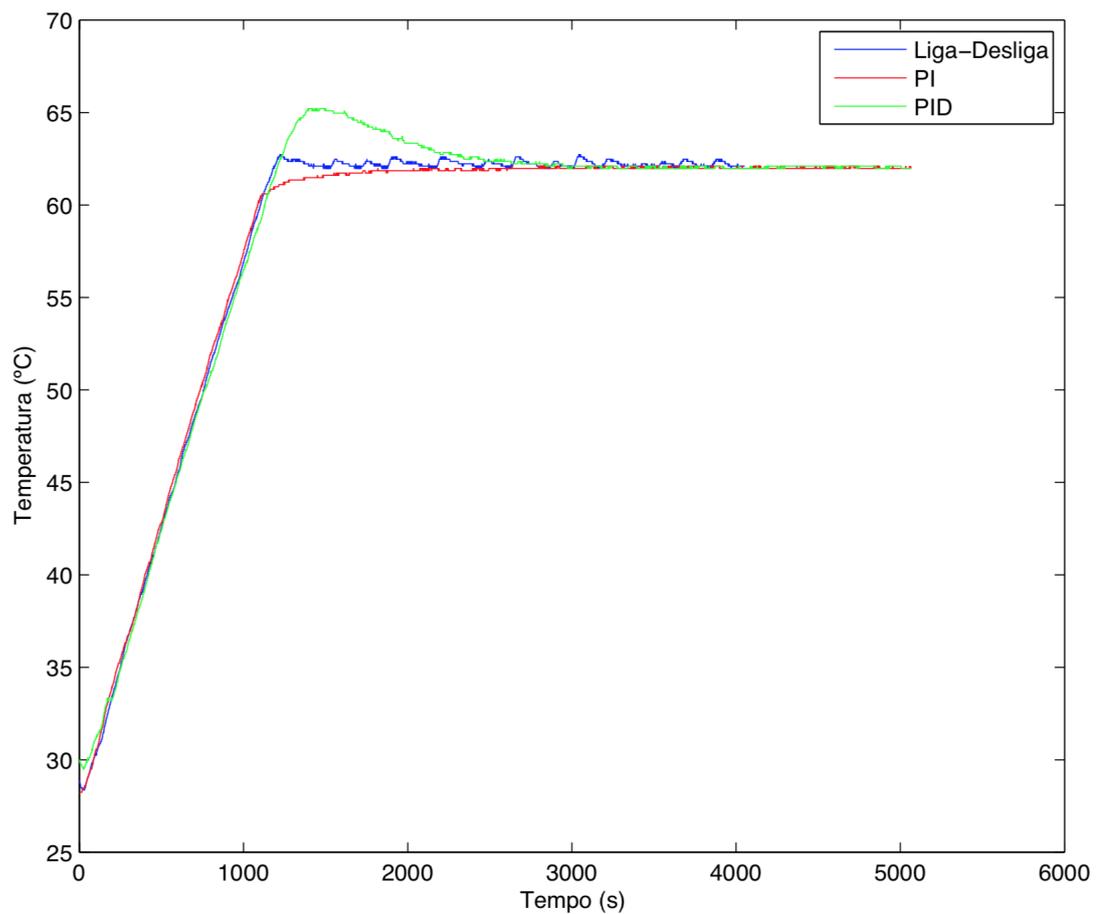


Figura 20 – Comparação entre os controladores desenvolvidos

Analisando o gráfico é possível notar que tanto o controlador Liga-Desliga quanto

o PID apresentam *overshoot*, sendo o deste de aproximadamente 7% e o daquele de aproximadamente 2%, o que, em ambos os casos, pode afetar o resultado da produção da cerveja. Já o controlador PI não apresentou nenhum sobressinal e obteve um tempo de resposta aceitável.

O controlador PI desenvolvido teve um Overshoot de aproximadamente 2%, o que é aceitável para o tipo de sistema que está sendo desenvolvido nesse projeto. Porém, o do controlador criado com parâmetros aleatórios foi muito superior, atingindo aproximadamente 10% além da temperatura desejada, o que descarta a sua utilização nesse projeto.

5 Considerações finais

5.1 Conclusão

De acordo com os resultados apresentados neste trabalho, pode-se concluir que o seu objetivo principal foi alcançado. Afinal, o equipamento desenvolvido, de acordo com os resultados encontrados, foi capaz de controlar de forma eficiente a temperatura durante a produção de cerveja.

Ademais, torna mais prática a produção da cerveja, necessitando de menos atenção e intervenção do usuário, trazendo também maior qualidade ao produto final, por manter a temperatura em valores muito mais próximos do ideal.

5.1.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, o autor recomenda a adição de uma bomba d'água, resistente a altas temperaturas. Isso fará uma maior recirculação do mosto e, dessa forma, irá homogeneizar de forma mais eficiente a temperatura durante o processo e tornar a intervenção do usuário ainda menos necessária.

Outra sugestão é a configuração de receitas e rampas pré-programadas, para que o usuário possa selecionar desde o início a receita e as temperatura que deseja seguir durante todo o processo.

Ademais, sugere-se também, além do dissipador de calor, colocar o relé de estado sólido dentro de uma caixa com ventilação forçada, utilizando, por exemplo, coolers. Isso se deve ao fato de, mesmo com o dissipador de calor, o relé atingir temperaturas muito altas, o que pode atrapalhar o seu funcionamento ou até mesmo danificá-lo permanentemente.

Referências

- ADLER, J.; PARMRYD, I. Quantifying colocalization by correlation: the pearson correlation coefficient is superior to the mander's overlap coefficient. *Cytometry Part A*, 2010. Wiley Online Library, v. 77, n. 8, p. 733–742, 2010. Citado na página 44.
- BARR, M. Pulse width modulation. *Embedded Systems Programming*, 2001. v. 14, n. 10, p. 103–104, 2001. Citado na página 27.
- BAZANELLA, A. S.; JR, J. d. S. Ajuste de controladores pid. *Apostila do Curso de Extensão, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre*, 1999. 1999. Citado na página 32.
- BEZERRA, J. H. et al. *Estudo de sistema de controle usando o controlador PID em processos industriais*. [S.l.]: [sn], 2007. Citado na página 32.
- BRAGA, N. C. *Como funcionam os Relés de Estado Sólido*. 2012. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/4915-art651>>. Citado na página 30.
- BRIGGS, D. E. et al. *Brewing: science and practice*. [S.l.]: Elsevier, 2004. Citado 4 vezes nas páginas 35, 36, 37 e 38.
- CAMPOS, M. C. M. M. de; TEIXEIRA, H. C. *Controles típicos de equipamentos e processos industriais*. [S.l.]: Edgard Blücher, 2006. Citado 4 vezes nas páginas 19, 31, 32 e 33.
- CASSANO, D. Os limites da temperatura. *Revista Metrologia & Instrumentação*, 2003. p. 18–24, 2003. Citado na página 28.
- CUNHA, L. Relés e contatores. *O Setor Elétrico: Revista Eletrônica. Santa Cecília*, 2009. n. 45, 2009. Citado na página 29.
- DORF, R. C. et al. *Sistemas de controle moderno*. [S.l.]: São Paulo. LTC, 2001. Citado na página 31.
- HUGHES, G. Cerveja feita em casa. *São Paulo: Publifolha*, 2014. 2014. Citado na página 35.
- IBRAHIM, D. *Microcontroller based applied digital control*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2006. Citado na página 32.
- INSTRUMENTS, T.; SENSORS, L. P. C. T. Lm358 datasheet. *Texas Instruments Incorporated*, 1999. 1999. Citado na página 42.
- LIEPOLD, C. F. *Adaptive temperature control circuit with PWM output*. [S.l.]: Google Patents, 2001. US Patent 6,252,209. Citado na página 19.
- MCROBERTS, M. *Beginning Arduino*. [S.l.]: Apress, 2013. Citado na página 27.

- MORADO, R. *Larousse de cerveja*. [S.l.]: Larousse do Brasil, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 36.
- MUYNARSK, O. G.; GARCIA, M. V. R. Sistema de monitoramento e controle de máquinas elétricas, utilizando microcontrolador arduino e supervisor elipse scada para diminuição de parada não programadas para a manutenção. *Caleidoscópio*, 2015. v. 1, n. 6, p. 98–107, 2015. Citado na página 23.
- NELSON, M. *The barbarian's beverage: A history of beer in ancient Europe*. [S.l.]: Routledge, 2005. Citado na página 34.
- OGATA, K.; YANG, Y. *Modern control engineering*. [S.l.]: Prentice hall India, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 19, 32 e 33.
- PALMER, J. J. How to brew. *EUA: Brewers Publications*, 2006. 2006. Citado 4 vezes nas páginas 34, 35, 36 e 38.
- PEREIRA, F. d. A. *Microcontroladores PIC e Linguagem C*. [S.l.]. Citado na página 26.
- SOUZA, D. J. de. *Desbravando o PIC: Ampliado e atualizado para PIC16F628A*. [S.l.]: Érica, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- THOMSEN, A. *Qual Arduino Comprar? Conheça os Tipos de Arduino*. 2014. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/blog/tipos-de-arduino-qual-comprar/>>. Citado na página 24.
- TORRES, F.; MARTINS, H. Apostila didática picminas: Sistemas microcontrolados. *Belo Horizonte: Axoon*, 2010. v. 1, 2010. Citado na página 25.
- WEEKS, M. Arduino controlled brewing. In: IEEE. *SoutheastCon 2015*. [S.l.], 2015. p. 1–5. Citado na página 19.

Apêndices

APÊNDICE A – Comparação com outros produtos

Atualmente existem muitos produtos com funções semelhantes no mercado, afinal, é uma atividade que está em alta no país. Porém, grande parte desses produtos apresentam valores muito altos, o que os torna inacessível para os iniciantes na fabricação de cerveja. Nas figuras 21, 22 e 23 podemos ver exemplos desses produtos, que apresentam preços entre R\$ 7.000,00 e R\$ 13.000,00.



Figura 21 – Equipamento Biermaker



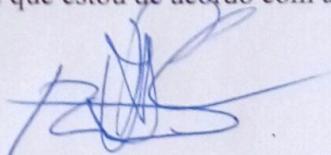
Figura 22 – Equipamento Cigarra Elétrica



Figura 23 – Equipamento Beerbot

DECLARAÇÃO

Declaro que o aluno Igor Silva Honório, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado "Desenvolvimento de uma panela para a produção de cerveja", efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.



Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis

Ouro Preto, 13 de novembro de 2018