



Universidade Federal
de Campina Grande



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JANDILSON ALMEIDA BANDEIRA

**PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE DE TEMPERATURA E
MONITORAMENTO DA UMIDADE EM EQUIPAMENTO DE
SECAGEM DE ALIMENTOS**

Campina Grande, Paraíba
2018

JANDILSON ALMEIDA BANDEIRA

**PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE DE TEMPERATURA E
MONITORAMENTO DA UMIDADE EM EQUIPAMENTO DE
SECAGEM DE ALIMENTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido a Coordenação de Graduação
em Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande, Campus
Campina Grande, como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Controle e Automação

Orientador: Prof. Dr. Antônio Marcus Nogueira Lima

Campina Grande, Paraíba

2018

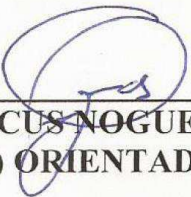
JANDILSON ALMEIDA BANDEIRA

**PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE DE TEMPERATURA E
MONITORAMENTO DA UMIDADE EM EQUIPAMENTO DE
SECAGEM DE ALIMENTOS**

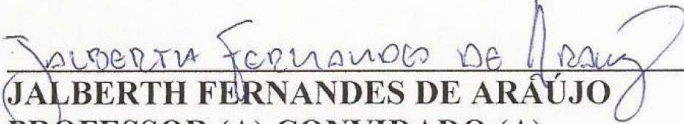
Trabalho de Conclusão de Curso
submetido a Coordenação de Graduação
em Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande, Campus
Campina Grande, como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Controle e Automação

Aprovado em: 06/08/2018



ANTONIO MARCUS NOGUEIRA LIMA
PROFESSOR (A) ORIENTADOR (A)



JALBERTH FERNANDES DE ARAÚJO
PROFESSOR (A) CONVIDADO (A)

Campina Grande, Paraíba

2018

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais, Maria de Lourdes por todo seu apoio, por sempre acreditar em mim, por fazer sacrifícios incalculáveis para que eu pudesse estudar e realizar meu sonho e José Bandeira que me ensinou a diferenciar o certo do errado e que o maior bem de um homem é seu caráter, me ensinou também que perseverança e trabalho duro são apenas degraus para se alcançar os sonhos.

A minha noiva Tamires dos Santos por me ajudar em todos os momentos difíceis, por ser uma companheira tão atenciosa e me trazer paz nos momentos mais nebulosos ao longo do curso, por ser minha orientadora pessoal e ser essa pessoa tão maravilhosa que me faz tão feliz.

A minha prima Maria Hildanete por resolver grande parte dos meus problemas pessoais e por estar sempre ao lado dos meus pais quando eu não pude estar por perto. Meu primo Washington Bandeira por me acolher e sempre me ajudar quando precisei nessa caminhada tão árdua.

Agradeço ao meu amigo Júlio Cesar que sempre esteve disposto a me ajudar ao longo de todo o curso e em especial neste trabalho e por me escutar nos momentos mais filosóficos quando discutimos sobre o futuro.

Aos amigos Rafael Paiva, Kaio Freitas, Josué Marcos por serem excelentes companheiros de estudo e por sempre me ajudarem nos momentos mais complicados com relação ao curso. A Flávia Izabely pela disponibilidade e atenção durante este trabalho.

Ao meu supervisor de estágio Bruno Sobel pela compreensão da minha ausência no trabalho quando se fez necessário, pela disposição em conseguir componentes para o projeto e por me inspirar como engenheiro.

A professora Líbia Conrado por acreditar no meu trabalho e disponibilizar o sistema de secagem e o laboratório de engenharia bioquímica.

Ao meu orientador Antônio Marcos pela disponibilidade e dicas valiosas para conclusão deste trabalho, por acreditar que eu conseguiria realizar o projeto mesmos nas condições adversas que lhe explicitiei.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes”

(Isaac Newton)

RESUMO

Na secagem de alimentos são utilizados sistemas térmicos onde podem existir o armazenamento e/ou o fluxo de calor, apresentando três formas de transmissão, são elas condução, convecção e radiação. Os sistemas de controle de secagem são utilizados em muitos processos industriais que exigem precisão de medidas. Na indústria alimentícia é fundamental que a temperatura, a umidade ou mesmo a pressão de diversos processos estejam dentro dos padrões, pois, variações além da tolerância podem comprometer gravemente o produto final. Pensando nisso foi proposto nesse trabalho desenvolver um sistema de controle de temperatura utilizando um controlador PID para substituir o sistema de controle *on-off* e realizar o monitoramento da umidade no equipamento de secagem de produtos alimentícios. O sistema de secagem encontra-se acoplado a um secador de leito fixo, um leito fluidizado e um leito de jorro o qual está instalado no Laboratório de Engenharia Bioquímica do Departamento de Engenharia Química da UFCG. Através de experimentos e técnicas de modelagem foi possível encontrar a função de transferência da planta. De posse das especificações de projeto, como variação máxima na temperatura e os pontos onde se deseja aferir umidade foi possível, juntamente com a função de transferência da planta, utilizar métodos de sintonia de controladores PID para obtenção das constantes do controlador. Desse modo, realizou-se as devidas simulações utilizando o software Matlab e a partir da análise das simulações, a escolha do controlador que atendesse as especificações. Os passos seguintes foram a escolha dos componentes que possibilitassem as medições de temperatura e umidade, definição dos instrumentos para comunicação homem-máquina, projeto do circuito de aquisição de sinais de tensão para que fosse possível determinar a passagem pelo zero a cada meio ciclo e definição do atuador. Para o tratamento dos sinais, processamento dos dados e implementação do controlador PID foi escolhido utilizar o microcontrolador ATmega328 da Atmel. Após confecção de toda estrutura física dos circuitos foi então desenvolvido o código utilizando a linguagem de programação C++ no ambiente de desenvolvimento integrado do Arduino. Por fim foram realizados testes para validação do projeto observando o comportamento da temperatura, estes experimentos mostraram-se satisfatórios, visto que os objetivos propostos foram alcançados.

Palavras-chave: PID; microcontrolador; secador; função de transferência.

ABSTRACT

Thermal systems are used in food drying process, in which may exist storage and/or heat flux. This phenomenon can be observed in three kinds of transmission: conduction, convection and radiation. The drying control systems are used in many industrial processes and demand very precise measurements. In food industry, it is fundamental that temperature, humidity and pressure are accorded to certain standards, seeing that variations above tolerances can jeopardize quality. Focused on this problem, this paper proposes to develop a control system using PID controllers to replace on-off systems and manage to monitor humidity in food products dryers. O drying system is coupled to a fixed bed dryer, a fluidized bed and a jet bed, installed in the Biochemistry Engineering Laboratory in Chemical Engineering Department in UFCG. Through the experiments and model techniques, it was possible to find the transfer function of the system. With the project specifications in hands like maximum temperature variation and spots in which it is desired to measure humidity it was possible to methods for tuning PID controller to obtain constants for the controller. Therefore, it was possible to simulate using Matlab software and from that to choose a controller that match the specifications. The next steps were to choose components that can perform temperature e humidity measurements, specify tools that can manage communication men-machine, to project the acquisition circuit of tension signals in order to determine the passage through zero point in each cycle and definition of actuator. An Atmel's microcontroller ATmega328 was chosen for signal handling, data processing and implementation of PID controller. After fabrication of the structure of the circuits, a code was developed using programing language C++ in Arduino's integrated development environment. Finally, it was made tests to validate the project observing temperature behavior, which were satisfactory, since proposed goals were reached.

Keywords: PID; microcontrollers; dryer; transfer function.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Processo de secagem.....	13
Figura 2. Sistema em malha aberta genérico.....	25
Figura 3. Sistema em malha fechada genérico.....	26
Figura 4. Sistemas de primeira ordem e sua função de transferência.....	29
Figura 5. Resposta de um sistema de primeira ordem com atraso de transporte.....	30
Figura 6. Método de sintonia Ziegler/Nichols de malha aberta.....	30
Figura 7. Diagrama de blocos de um controlador liga-desliga.....	32
Figura 8. Diagrama de blocos de um controlador proporcional.....	32
Figura 9. Diagrama de blocos de um controlador integral.....	33
Figura 10. Diagrama de blocos da ação proporcional-e-integral.....	33
Figura 11. Diagrama de blocos da ação proporcional-e-derivativo.....	34
Figura 12. Diagrama de blocos da ação proporcional-integral-derivativo.....	35
Figura 13. Microcontrolador ATmega328P.....	38
Figura 14. Sensor DHT22.....	30
Figura 15. Foto e diagrama do equipamento utilizado na realização da secagem convectiva.....	40
Figura 16. teclado <i>4x4 Matrix Membrane Keypad</i> e um <i>Display LCD 20x4 Backlight Azul</i> utilizados na interação homem máquina.....	41
Figura 17. Triac BTA24-600-BW.....	41
Figura 18. Dissipador de calor.....	42
Figura 19. Termômetro digital para fins alimentícios modelo TP-101.....	43
Figura 20. Cronometro de mão digital.....	43
Figura 21. Resposta ao degrau da planta, valores discretos de temperatura versus tempo.....	44
Figura 22. Interpolação dos pontos de temperatura versus tempo da resposta ao degrau da planta.....	45
Figura 23. Modelagem pelo método de Ziegler-Nichols de malha aberta.....	46
Figura 24. Respostas simuladas dos controladores.....	48
Figura 25. Circuito e forma de onda da tensão com o controle do ângulo de disparo do triac.....	49
Figura 26. Tensão de saída (sobre uma carga resistiva). Normalizada em relação ao valor eficaz da tensão de entrada.....	50

Figura 27. Circuito <i>zero cross</i>	51
Figura 28. Ligações dos pinos do ATmega328.....	52
Figura 29. Configuração do barramento do teclado 4x4 e do <i>LCD</i> 20x4.....	53
Figura 30. Configuração dos circuitos para os DHT22.....	53
Figura 31. Circuito de acionamento dos triac's.....	54
Figura 32. Circuito de aquisição dos sinais e processamento.....	55
Figura 33. Circuito completo para acionamento dos triac's.....	55
Figura 34. Placas confeccionadas.....	56
Figura 35. Diagrama das entradas e saídas do microcontrolador.....	58
Figura 36. Resposta do sistema após implementação do PID.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Tipos de parametrização para PID.....	46
Tabela 2. Coeficiente da parametrização PID.....	47
Tabela 3. Coeficientes de sintonia PID.....	47

LISTA DE SÍMBOLOS

A = área normal ao fluxo de calor, m^2

c = calor específico da substância, $kcal/kg\ ^\circ C$

C = capacitância térmica, $kcal/^\circ C$

$e[n]$ = Sinal de erro na entrada do controlador na amostra n

$e[n-1]$ = Sinal de erro na entrada do controlador na amostra $n-1$

$e(t)$ = erro atuante

G = vazão mássica de regime permanente, kg/s

H = coeficiente de convecção, $kcal/m^2\ s\ ^\circ C$

\underline{H} = valor estacionário da taxa de fluxo de calor de entrada, $kcal/s$

k = condutividade térmica, $kcal/m\ s\ ^\circ C$

K = coeficiente, $kcal/s\ ^\circ C$

K_d = Coeficiente da ação derivativa

K_i = Coeficiente da ação integral

K_p = Coeficiente da ação proporcional

m = peso da substância considerada, kg

M = massa do líquido no reservatório, kg

n = Amostra a ser processada

q = taxa de fluxo de calor, $kcal/s$

R = resistência térmica, $^\circ C\ s/kcal$

T_a = distância entre pontos

T^*_a = Período de amostragem

T_d = tempo derivativo

T_i = tempo integral

$u[n]$: Sinal de saída do sistema na amostra n

$u(t)$ = sinal de saída do controlador

$\Delta \theta$ = diferença de temperatura, $^\circ C$

ΔX = espessura do condutor, m

$\underline{\theta}_i$ = temperatura de regime estacionário do líquido de entrada, $^\circ C$

$\underline{\theta}_o$ = temperatura de regime estacionário do líquido de saída, $^\circ C$

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS.....	15
2.1 Objetivo Geral.....	15
2.2 Objetivos Específicos.....	15
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
3.1 Transmissão de calor.....	16
3.1.1 Condução.....	16
3.1.2 Convecção.....	17
3.1.3 Irradiação.....	18
3.2 Trocador de calor.....	19
3.3 Operação de secagem.....	20
3.4 Variáveis externas do processo de secagem.....	22
3.5 Variáveis internas do processo de secagem.....	22
3.6 Secagem de alimentos.....	23
3.7 Sistemas de controle.....	25
3.8 Modelagem térmica.....	27
3.9 Controladores.....	31
3.9.1 Projeto de controladores.....	35
3.9.2 Projeto no espaço de estados.....	36
3.9.3 Controlador PID digital.....	36
3.9.4 Microcontrolador.....	37
3.10 Sensores.....	38
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
4.1 Materiais.....	40
4.2 Métodos.....	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
5.1 Controle da potência na carga resistiva.....	48
5.2 Implementação no microcontrolador.....	56
6. CONCLUSÃO.....	60
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
Anexo 1.....	64

1. INTRODUÇÃO

Entende-se por secagem uma operação na qual a atividade de água do material é reduzida pela remoção de água por vaporização, através da eliminação de um líquido volátil contido num corpo não volátil, logo, o tipo de secagem depende do produto, constituição e das características do produto final (PARK *et al.*, 2006).

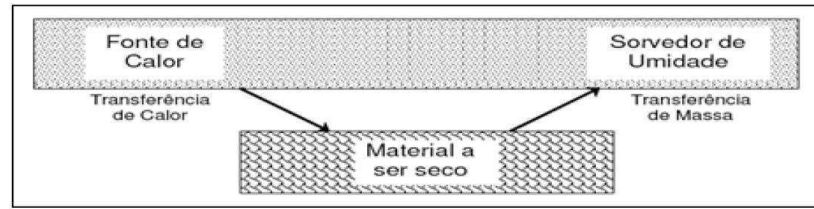
A secagem é uma operação de fundamental importância em diversos segmentos produtivos como na indústria química, agricultura, biotecnologia, alimentos, polímeros, cerâmica, papel e celulose, farmacêutica, minério e processamento de madeira. Sendo um dos mais antigos métodos de conservação de alimentos e de acordo com registros históricos, as sociedades primitivas já secavam a carne utilizando o sol. Atualmente, o processo de secagem de alimentos é um método de preservação essencial. Alimentos secos podem ser armazenados por longos períodos sem ocorrência de deterioração. Isso ocorre pelo fato dos microrganismos responsáveis por este efeito serem incapazes de crescer e multiplicar-se na ausência de água e de muitas enzimas que promovem alterações indesejáveis na composição química dos alimentos nestas condições (ARAÚJO, 2013).

Na secagem de alimentos são utilizados sistemas térmicos onde podem existir o armazenamento e/ou o fluxo de calor, apresentando três formas de transmissão, são elas condução, convecção e radiação. Onde normalmente estão ambas envolvidas no processo de transmissão de calor, sendo que, geralmente uma das formas de transmissão se sobrepõe as outras ou duas formas são preponderantes sobre a terceira, o que geralmente acontece (KREITH; BOHN, 1997).

A secagem depende de fatores como a umidade de equilíbrio, a temperatura e a umidade relativa do ar; a condição da superfície externa da massa submetida à secagem, e as transformações do ar quente e úmido no interior do secador. (SANTOS, 2014).

De acordo com Park *et al.* (2007), um sistema de secagem apresenta a seguinte configuração: uma fonte quente para que a umidade do material seja evaporada e deve haver um sorvedor de umidade capaz de remover o vapor d'água arrastado pela transferência de massa, gerando uma superfície seca no material (Figura 1).

Figura 1. Processo de secagem.



Fonte: Park *et al.* (2007).

Combelli (1952) reforça que além da preservação das características físicas e químicas, alguns dos benefícios da secagem estão ligados ao fato de que com a perda de água o valor alimentício do produto concentra-se; o alimento seco é mais leve, compacto, mais fácil de transportar, além de manter o sabor inalterado por longos períodos, dificultando ainda a proliferação microbiana pelo baixo teor de água, reduzindo os custos com armazenagem e transporte devido à redução de volume.

Os equipamentos para a transferência de calor e massa são definidos conforme os mecanismos por dois fenômenos. A transferência de calor (ou energia) do meio para evaporação da umidade superficial depende das condições externas de umidade do ar, temperatura, fluxo e direção de ar, da área de contato e da pressão; e a transferência de massa (umidade) da parte interna à externa com a subsequente evaporação é função da natureza física do sólido, de sua umidade e temperatura, indicando a dificuldade de secagem nos materiais, sendo que para a evaporação da superfície ao ambiente é necessário que a água migre do interior do sólido à superfície (SANTOS JÚNIOR, 2014).

O desempenho de secadores varia de acordo com uma série de fatores como o teor de umidade inicial e final do produto, propriedades físicas do produto, temperatura de secagem, resistência oferecida ao fluxo de ar, e condições ambientais como temperatura e umidade relativa, além do tipo de fonte de energia, sistema de carga e tipo de ventilador (SILVA *et al.*, 2000).

Os sistemas de controle de secagem são utilizados em muitos processos industriais que exigem precisão de medidas. Na indústria alimentícia é fundamental que a temperatura, a umidade ou mesmo a pressão de diversos processos esteja dentro dos padrões, pois variações além da tolerância podem comprometer gravemente o produto final (SANTOS JÚNIOR, 2014).

Para a realização do controle de determinadas variáveis é de fundamental importância desenvolver uma modelagem matemática que descreva o comportamento do sistema. A modelagem matemática consiste em traduzir uma situação ou tema do meio cotidiano para uma

linguagem matemática. Essa linguagem que é denominada modelo matemático pressupõe um conjunto de símbolos e relações matemáticas que representam o fenômeno em questão (BIEMBENGUT, 2014).

Na modelagem matemática de sistemas térmicos pode-se analisar o comportamento do mesmo através de experimentos, de modo a se obter o modelo mais adequado. Na teoria de controle, as funções de transferência são utilizadas para caracterizar as relações de entrada e saída dos componentes do sistema, e a função de transferência do sistema é alcançada tomando-se a transformada de Laplace em ambos os membros da equação (OGATA, 2000).

Na elaboração do projeto utiliza-se o conceito de que sistemas de controle podem ser divididos em subsistemas e processos construídos com o objetivo de se obter uma saída desejada com um desempenho desejado, dada uma entrada específica, dessa maneira é possível criar um gabarito de resposta temporal com parâmetros almejados e decidir qual estratégia usar para se alcançar o melhor desempenho (NISE, 2012).

De posse do gabarito de resposta temporal desejado e do modelo matemático do sistema é possível realizar simulações onde será definido qual melhor tipo de controlador que atende as necessidades do projeto. Uma vez escolhido o controlador a ser utilizado o projeto é implementado fisicamente e realiza-se testes para validação das simulações.

Para o projeto de controle de um sistema de secagem deve-se obter um ajuste adequado do controlador de temperatura sendo necessário realizar uma modelagem do comportamento do processo. Este processo tem várias etapas, a primeira consiste em realizar um estudo das variáveis do sistema e suas correlações. Posteriormente define-se um método para equacionar ou identificar estas relações. No referido trabalho optou-se pela utilização do método de resposta ao degrau, que neste caso, tem como objetivo extrair a função de transferência do sistema de secagem. Com a função de transferência obtida, realizou-se simulações para analisar o comportamento do sistema com diferentes métodos de sintonia dos controladores PID, sendo escolhido para implementação física o sistema que apresentou melhores resultados dentro dos parâmetros requeridos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Projetar um sistema de controle de temperatura e monitoramento da umidade, de modo que: A massa de ar que chega ao material que se deseja secar, mantenha-se com uma variação máxima de temperatura de $\pm 2,0$ °C; opere com uma faixa de temperatura entre 40 °C e 80 °C; monitore a umidade relativa do ar durante todo o processo de secagem do material; não tenha *over shoot* (entretanto o material só é colocado para secagem quando o sistema atinge o regime permanente), para que o sistema de secagem instalado no Laboratório de Engenharia Bioquímica do Departamento de Engenharia Química na referida universidade volte a operar com as especificações requeridas.

2.2 Objetivos específicos

- ✓ Realizar a substituição do sistema de controle *on-off* utilizado para controlar a temperatura do sistema de secagem por um sistema de controle PID;
- ✓ Realizar medições de temperatura e umidade em três pontos específicos do secador;
- ✓ Estudar a modelagem de sistemas térmicos e definir qual abordagem utilizar para a obtenção da função de transferência do sistema de secagem em questão;
- ✓ Simular o comportamento do sistema a partir das variáveis de entrada e saída;
- ✓ Simular diferentes métodos de sintonia de PID e decidir qual método abrange os requisitos de projeto;
- ✓ Realizar a análise dos dados para definição dos componentes a serem utilizados para a execução do projeto;
- ✓ Implementação física do sistema de controle e monitoramento;
- ✓ Realizar testes para validação do projeto.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Transmissão de calor

Sempre que ocorre um gradiente de temperatura no interior de um sistema ou quando há contato de dois sistemas com temperaturas diferentes ocorre um processo de transferência de energia conhecido como transferência de calor (NETTO, 1987).

O estudo da transferência de calor está diretamente relacionado com a termodinâmica de modo que a primeira e a segunda lei não podem ser feridas. A primeira lei é aplicada para garantir a conservação da energia e a segunda lei para estabelecer o sentido do fluxo de calor.

Formalmente o estudo da transferência de calor é efetuado admitindo-se três mecanismos de transmissão, sendo eles a condução, convecção e radiação (KREITH, 1973).

3.1.1 Condução

A condução térmica ocorre quando o calor flui de uma região de temperatura mais alta para outra mais baixa, dentro de um meio sólido, líquido ou gasoso através do contato direto entre os materiais, essa explicação envolve tanto a representação da Segunda Lei da Termodinâmica, quando se diz que a transmissão de calor parte de uma região de temperatura mais alta para outra de temperatura mais baixa, quanto a definição específica do processo de transmissão de calor por condução (KREITH; BOHN, 1997).

A condução ou os secadores indiretos são mais adequados para produtos finos ou para sólidos muito úmidos. O calor é fornecido por evaporação através de uma superfície aquecida, estacionária ou móvel, colocada dentro do secador para suportar, carregar ou confinar os sólidos. A umidade evaporada é transportada por uma operação a vácuo ou por um fluxo de gás que é principalmente um carregador de umidade. A operação a vácuo é indicada para sólidos sensíveis ao calor, já que a perda de entalpia com o ar de secagem em secadores convectivos é grande e sua eficiência térmica tende a ser baixa. Para secadores de condução a eficiência térmica é maior. Secadores de pás para a secagem de massas, secadores rotativos com tubos de vapor internos e secadores de tambor para secagem de lamelas finas são exemplos de secadores indiretos (KREITH, 1973).

Secadores mais eficientes podem ser elaborados para operações que combinem vantagens tanto do aquecimento direto quanto do indireto, por exemplo, um secador de leite fluidizado

com tubos de aquecimento imersos ou bobinas para secagem de polímeros sensíveis ao calor. Tal secador pode ter apenas um terço do tamanho de um secador de leite fluidizado puramente convectivo para a mesma obrigação (KREITH, 1973).

É importante ressaltar que, algumas vezes, é possível operar o mesmo aparelho em modo direto, indireto, ou em uma combinação de ambos. Por exemplo, um secador de leite fluidizado pode ser puramente convectivo (por exemplo, secagem de chá), puramente condutivo (por exemplo, secagem a vácuo de grânulos farmacêuticos), ou uma combinação direto-indireto (por exemplo, secagem de carvão pulverizado com tubos de aquecimento imersos) (NETTO, 1987).

3.1.2 Convecção

A convecção é basicamente uma forma alterada da condução, na qual o processo de transporte de energia ocorre pela ação combinada da condução de calor, armazenamento de energia e movimento de mistura. A convecção é importante principalmente como mecanismo de transferência de energia entre uma superfície sólida e um líquido ou gás. Nos fluidos a mobilidade das partículas é alta comparada a materiais sólidos, com isso, as partículas aquecidas pelo contato direto com a superfície sólida tendem a migrar para os locais onde a temperatura é mais baixa (KREITH; BOHN, 1997).

Desse modo, é possível observar uma superposição de transferência macroscópica de energia ao processo microscópico de condução de calor. Tais deslocamentos internos estão fundamentalmente restritos aos meios fluidos. Se forem causados por diferenças de densidade em virtude de variações de temperatura no seio do fluido, tem-se o mecanismo conhecido como convecção livre ou natural. Por outro lado, se forem provocados por um agente externo, tem-se a chamada convecção forçada (KREITH, 1973).

A convecção é provavelmente o modo mais comum de secagem de partículas ou sólidos pastosos. O calor é fornecido pelo ar aquecido ou um gás que flui sobre a superfície do sólido. Calor por evaporação é fornecido pela convecção para a superfície exposta do material e a umidade evaporada é carregada pelo meio de secagem. Ar (o mais comum), gás inerte (tal como N₂, para a secagem de sólidos úmidos com solvente orgânico), gases de combustão direta ou vapor superaquecido podem ser usados em sistemas de secagem convectiva (KREITH, 1973).

Estes secadores são também chamados de secadores diretos. No período inicial de taxa de secagem constante (onde a umidade da superfície é removida), a superfície do sólido assume a temperatura de bulbo úmido correspondente à temperatura do ar e condições de umidade da

mesma localização. No período de queda da taxa de secagem a temperatura do sólido aproxima-se da temperatura de bulbo seco do meio externo. Esses fatores devem ser levados em consideração durante o processo de secagem de sólidos sensíveis ao calor. Quando ocorre a secagem com vapor superaquecido, a temperatura do sólido corresponde à temperatura de saturação a pressão de operação, por exemplo, 100°C para vapor a 1 atm. Para sólidos suscetíveis à oxidação ou desnaturação, por exemplo, na presença de oxigênio, a sensibilidade ao calor pode ser bastante diferente em ambiente de vapor. A qualidade do produto pode variar também. Esta só pode ser determinada através de testes de laboratório. Exemplos de secadores convectivos (direto) são secadores de ar em suspensão, tais como leito fluidizado, pneumático, rotativo ou secadores do tipo spray (NETTO, 1987).

3.1.3 Irradiação

A radiação térmica é um processo pelo qual o calor é transmitido de um corpo a alta temperatura para um de mais baixa através de ondas eletromagnéticas, mesmo que tais corpos estejam separados no espaço, ainda que exista o vácuo entre eles). Assim, não há necessidade de contato físico entre os corpos para que a energia seja transmitida entre os corpos na forma de calor (KREITH; BOHN, 1997).

Qualquer corpo está ininterruptamente emitindo energia, bem como absorvendo quantidades de energia radiante que sobre ele incidem provenientes do meio que o cerca. Nos corpos reais, porém, nem toda a energia radiante incidente é absorvida. Parte pode ser refletida e parte pode ser transmitida através do corpo (NETTO, 1987).

Existem várias fontes de radiação eletromagnética com comprimentos de onda que variam a partir do espectro solar até as micro-ondas (0,2 m – 0,2 μm). A radiação solar raramente penetra além da camada externa do material, a qual absorve apenas uma parte da radiação incidente, dependendo do seu comprimento de onda. A radiação infravermelha é usada frequentemente na secagem de revestimentos, folhas e filmes finos e aquecimento de sólidos volumetricamente, reduzindo assim a resistência interna à transferência de calor. A energia é absorvida seletivamente pelas moléculas de água: o produto fica mais seco com menos uso de energia (ARAÚJO, 2013).

O custo de capital bem como os custos de operação utilizando o método de secagem por irradiação são altos e por isso esta técnica é utilizada para a secagem de produtos de alto valor unitário ou para correção final do perfil de umidade em que apenas pequenas quantidades de

umidade ligada são removidas, como nos perfis de umidade de papel utilizando aquecimento por radiofrequência. O modo combinado da secagem com convecção (por exemplo, infravermelho juntamente com jatos de ar ou micro-ondas para a secagem de alimentos em fatias) também são viáveis comercialmente (ARAÚJO, 2013).

3.2 Trocador de calor

Define-se por trocadores de qualquer dispositivo onde duas ou mais correntes de fluido transferem calor devido à diferença de temperaturas entre elas (SADIK; LIU, 2002).

Os trocadores de calor são equipamentos que promovem a transferência de calor entre dois ou mais fluidos em temperaturas diferentes. Foram desenvolvidos muitos tipos de trocadores de calor para emprego em diversos níveis de complicação tecnológica e de porte, como usinas elétricas a vapor, usinas de processamento químico, aquecimento e condicionamento de ar em edifícios, refrigeradores domésticos, radiadores de automóveis, radiadores de veículos espaciais, etc. Nos tipos comuns, como os trocadores de calor casco tubo e radiadores de automóveis, a transferência de calor se processa principalmente por condução e convecção, de um fluido quente para um fluido frio, separados por uma parede metálica. Nas caldeiras e nos condensadores, a transferência de calor por ebulição e por condensação é de primordial importância. Em certos tipos de trocadores de calor, como as torres de resfriamento, o fluido quente (por exemplo, a água) é resfriado por mistura direta com o fluido frio (por exemplo, o ar); isto é, a água nebulizada, ou que cai em uma corrente induzida de ar, é resfriada por convecção e por vaporização. Nos radiadores para aplicações espaciais, o calor residual do fluido refrigerante é transportado por convecção e condução para a superfície de uma aleta e daí, por radiação térmica, para o espaço (vácuo) (KANDLIKAR; SHAH, 1989).

O projeto de trocadores de calor é um assunto complexo. A transferência de calor e a perda de carga, o dimensionamento e a avaliação do desempenho, e aspectos econômicos têm papéis importantes no projeto final. Por exemplo, embora sejam muito importantes as considerações de custo nas aplicações de grande porte como usinas geradoras de energia elétrica e de processamento químico, as considerações de peso e de dimensões são o fator dominante na escolha do projeto para aplicações espaciais e aeronáuticas (KANDLIKAR; SHAH, 1989).

3.3 Operação de secagem

A secagem é a operação unitária que promove a remoção de um líquido agregado a um sólido para uma gasosa insaturada através de vaporização térmica (MCCABE *et al.*, 1993). A transferência de umidade na forma de vapor para uma fase gasosa não saturada ocorre quando a pressão de vapor do líquido presente no material é maior que a pressão parcial do vapor no mesmo líquido na fase gasosa (STRUMILLO; KUDRA, 1986). Ou seja, a operação de secagem converte uma matéria-prima sólida, semi-sólida, ou líquida para um produto sólido por evaporação da umidade na forma de vapor através da aplicação de calor (ARAÚJO, 2013).

Tratando-se de um processo de remoção térmica de substâncias voláteis (umidade) para a obtenção de um produto sólido. Quando um sólido úmido é sujeito à secagem térmica, dois processos ocorrem simultaneamente, sendo o primeiro a transferência de energia (na maior parte em forma de calor) a partir do ambiente circundante para evaporar a superfície úmida; e o segundo a transferência da umidade interna para a superfície do sólido e subsequente evaporação (ARAÚJO, 2013).

A taxa na qual ocorre a secagem é condicionada por estes dois processos. A transferência de energia na forma de calor a partir do ambiente circundante para o sólido úmido pode ocorrer como resultado da convecção, condução, irradiação ou, em alguns casos, como resultado de uma combinação destes efeitos. Secadores industriais diferem no tipo e *design*, dependendo do método de transferência de calor empregado. Em muitos casos, o calor é transferido para a superfície do sólido úmido e depois para o seu interior. No entanto, em sistemas dielétricos, de rádio frequência (RF) ou por micro-ondas, a energia é fornecida para gerar calor internamente dentro do sólido e depois fluxos para as superfícies exteriores (ARAÚJO, 2013).

No primeiro processo, a remoção de água na forma de vapor a partir da superfície do material, depende das condições externas de temperatura, umidade e fluxo de ar, área de exposição da superfície e pressão. Já no segundo, o movimento da umidade internamente dentro do sólido, é uma função da natureza física do sólido, da temperatura e de seu teor de umidade. Em uma operação de secagem, qualquer um destes processos pode ser o fator limitante que regula a velocidade de secagem, embora ambos procedam simultaneamente através do ciclo de secagem (TAYLOR; FRANCIS, 2006).

A secagem ocorre pela efetiva vaporização do líquido através do fornecimento de calor à matéria-prima úmida. Como notado anteriormente, o calor pode ser fornecido por convecção (secadores diretos), por condução (contato ou secadores indiretos), radiação ou

volumetricamente através da colocação do material úmido em campos eletromagnéticos de micro-ondas ou rádio frequência (RF). Mais de 85% dos secadores industriais são do tipo convectivo com ar quente ou gases de combustão como meio de secagem. Mais de 99% das aplicações envolvem a remoção de água. Todos os modos, exceto o dielétrico (micro-ondas e RF) fornecem calor através da superfície do objeto da secagem que é então difundido para o interior do sólido principalmente por condução. O líquido é transportado para a superfície do material e então é liberado na forma de gás ou vapor (TAYLOR AND FRANCIS GROUP, 2006).

O transporte da umidade dentro do sólido pode ocorrer através de um ou mais mecanismos de transferência de massa como a difusão do líquido, se o sólido úmido se encontra em uma temperatura abaixo do ponto de ebulição do líquido; difusão do vapor, se o líquido vaporiza-se dentro do material; difusão de Knudsen, se a secagem é realizada em baixas temperaturas e pressões (liofilização); difusão de superfície ou mesmo combinações de mecanismos (TAYLOR;FRANCIS, 2006).

É importante observar que em muitos processos, a secagem imprópria pode levar a danos irreversíveis a qualidade do produto, pois se trata de uma operação complexa envolvendo transferência transitória de calor e massa juntamente com vários outros processos, tais como transformações químicas ou físicas, que por sua vez, podem causar alterações como: encolhimento, estufamento, cristalização, transições vítreas, alterações de cor, textura, odor ou outras propriedades do produto sólido (ARAÚJO, 2013).

Aparentemente, nenhum procedimento único de projeto é aplicável a todos os processos de secagem. Portanto, é essencial a análise dos fundamentos de transferência de calor e massa, juntamente com o conhecimento das propriedades do material (qualidade) ao tentar projetar um secador ou analisar um secador existente. Matematicamente, todos os processos envolvidos, mesmo no secador mais simples, são altamente não lineares e, portanto, o aumento de escala é geralmente muito difícil. Experimentos em laboratório e em escalas-piloto junto com experiências de campo são essenciais para o desenvolvimento de novos secadores. Fornecedores de secadores, normalmente, oferecem apenas uma estreita faixa de equipamentos de secagem. O interessado deve, portanto, estar razoavelmente familiarizado com o conhecimento básico sobre a grande variedade de secadores e ser capaz de chegar com uma seleção preliminar informal antes de negociar com os vendedores, pois vários secadores diferentes podem ser capazes de lidar com uma dada aplicação (PARNK *et al.*, 2007).

3.4 Variáveis externas do processo de secagem

As variáveis externas de atuação essencial nos processos de secagem são a temperatura, umidade, taxa e direção do fluxo de ar, forma física do sólido, agitação e o método de suporte do sólido durante a operação de secagem (WILLIAMS-GARDNER, 1971). Estas condições são especialmente importantes durante a fase inicial de secagem onde a umidade da superfície é removida. Por exemplo, em materiais como cerâmica e madeira onde ocorre um considerável encolhimento, a excessiva evaporação na superfície depois da umidade inicial livre ter sido removida configura elevados gradientes de umidade do interior para a superfície. Isto pode causar ressecamento, encolhimento excessivo e, conseqüentemente, elevada tensão dentro do material causando rachaduras e empenamento. Nestes casos, a evaporação na superfície deve ser retardada através do uso de ar com elevada umidade relativa, mantendo uma taxa de maior segurança para o movimento interno da umidade através da transferência de calor. A evaporação da superfície é controlada pela difusão de vapor da superfície do sólido para a atmosfera circundante através de uma fina camada de ar em contato com a superfície (ARAÚJO, 2013).

Uma vez que a secagem envolve uma transferência interfase de massa, quando um gás é colocado em contato com um líquido no qual é essencialmente insolúvel, torna-se necessária à familiarização com as características de equilíbrio do sólido úmido. Além disso, uma vez que a transferência de massa é normalmente acompanhada por uma transferência simultânea de calor, devem ser feitas as devidas considerações a respeito das características entálpicas do processo (ARAÚJO, 2013).

3.5 Variáveis internas do processo de secagem

Como resultado da transferência de calor para um sólido úmido, um gradiente de temperatura se desenvolve dentro do sólido enquanto a evaporação da umidade ocorre a partir da superfície. Este fato produz uma migração da umidade do interior do sólido para a superfície, o que ocorre através de um ou mais mecanismos chamados difusão, fluxo capilar, pressões internas criadas pelo encolhimento durante a secagem, e, no caso de secadores indiretos (condução), por meio da ocorrência de progressivas e repetidas vaporizações e recondensações da umidade para a superfície externa (ARAÚJO, 2013).

Variáveis como a velocidade do ar e temperatura que normalmente aumentam a velocidade de evaporação da superfície, são de importância decrescente, exceto para promover a taxa de transferência de calor. Longos períodos de residência e, quando permitido, temperaturas mais altas tornam-se necessários (ARAÚJO, 2013).

Em alguns materiais, a evaporação excessiva na superfície configura altos gradientes de umidade do interior em direção à superfície, o que pode causar ressecamento, encolhimento excessivo e, conseqüentemente, altas tensões que resultam em rachaduras ou deformações. Em tais casos, é essencial não incorrer em gradientes de umidade muito altos, retardando a evaporação da superfície mediante o emprego de elevada umidade relativa do ar, mantendo uma maior taxa de movimento da umidade interna em virtude da transferência de calor. O gradiente de temperatura criado no sólido irá também criar um gradiente de pressão de vapor, o qual por sua vez, resultará na difusão da umidade sob a forma de vapor para a superfície, ocorrendo de forma simultânea ao movimento da umidade na forma líquida (ARAÚJO, 2013).

3.6 Secagem de alimentos

Uma das grandes preocupações da humanidade consiste na racionalização de suas fontes de alimentos. Para tanto, vários métodos vêm sendo desenvolvidos ao longo do tempo visando a sua conservação e transformação. A remoção de água de alimentos sólidos através dos processos de secagem pode ser citada como um desses métodos, surgindo como uma forma de reduzir a atividade de água e inibir o crescimento microbiano, evitando assim a deterioração dos mesmos. Esta remoção passou a ter grande importância na indústria atual devido ao grande potencial de redução dos custos energéticos em comparação à conservação a frio, bem como dos custos de transporte, embalagem e armazenagem destes alimentos (PARK *et al.*, 2006).

O século XX é marcado pela implantação da área de tecnologia de alimentos, cuja industrialização em massa só foi possível pela adoção de métodos de preservação e conservação por ela instituídos. Esses métodos modernos, desde os mais simples até os mais elaborados, proporcionaram maior variedade de produtos de alta qualidade (LEONARDI; AZEVEDO, 2018).

A relevância da tecnologia de alimentos está no desenvolvimento de métodos e processos que possam reduzir as perdas, aumentando o aproveitamento de subprodutos, e também aumentar a disponibilidade de alimentos, aumentando sua “vida de prateleira” sem abrir mão da qualidade. Acompanhando esse progresso, a indústria também ofereceu novas perspectivas

para a melhor apresentação dos produtos e manutenção de suas condições sensoriais e nutritivas (NESPOLO *et al.*, 2015; GAVA *et al.*, 2008).

A utilização do calor na conservação de alimentos tem como fundamento os efeitos destrutivos das altas temperaturas sobre os microrganismos. O calor desnatura as proteínas e inativa as enzimas necessárias ao metabolismo microbiano, destruindo desta forma parte ou todos os microrganismos. Entretanto, o calor não possui efeito residual, isto é, depois de terminada a sua ação, pode ocorrer a recontaminação do produto (LOPES, 2007).

Na secagem artificial são utilizados equipamentos específicos, no qual o alimento é colocado e o processo de desidratação ocorre por um dado período de tempo, sendo denominada batelada. Usa-se, geralmente, ar quente com uma velocidade de 0,5 m/s a 3 m/s e baixa umidade quando se tratado de transferência de calor por convecção; mas podem ocorrer também através de transferência de calor por condução e radiação. Vale ressaltar que a retenção de vitaminas em alimentos secos com a secagem artificial é superior à dos alimentos secos ao sol (CELESTINO, 2010).

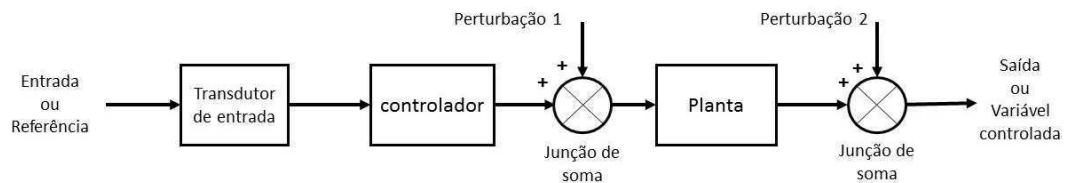
Na secagem, normalmente, deve ser fornecida uma quantidade suficiente de calor ao material para que o líquido seja evaporado. Durante o processo ocorre transferência simultânea de calor e massa tanto internamente quanto entre a superfície externa do material e o ambiente que o envolve, ou seja, ocorre transferência de calor do ar para o material e de massa (água) do material para o ar. Assim, em função da necessidade de energia térmica para a evaporação da água, ocorre um resfriamento do ar de secagem pela perda de calor sensível. No entanto, o balanço energético é nulo porque o ar recupera, na forma de vapor de água (calor latente), o que perdeu na forma de calor sensível (CAVARIANI, 1996).

No caso particular de matérias primas perecíveis, como produtos alimentícios, a secagem contribui para a preservação de suas propriedades nutricionais e fisiológicas, possibilitando um armazenamento em condições ambientais durante longos períodos. Tal efeito é conseguido pela criação de condições desfavoráveis ao desenvolvimento de microrganismos no produto e pela quase total eliminação de suas atividades metabólicas (TRAVAGLINI *et al.*, 1993). Especificamente para grãos agrícolas, além da preservação da qualidade fisiológica durante o armazenamento, a secagem contribui com a antecipação da colheita, mantendo o poder de germinação minimizado a perda do produto no campo, disponibilizando as áreas para novos cultivos e, portanto, aumentando a capacidade produtiva (SOKHAHANSANJ; JAYAS, 2006).

3.7 Sistemas de controle

Entre as diversas configurações que um sistema pode apresentar duas que aparecem com maior frequência, são elas: sistema de malha aberta e sistema de malha fechada. Um sistema em malha aberta genérico é mostrado na Figura 2. Ele começa com um subsistema chamado de transdutor de entrada, o qual converte a forma da entrada para aquela utilizada pelo controlador. O controlador aciona um processo ou uma planta. A entrada algumas vezes é chamada de referência, enquanto a saída pode ser chamada de variável controlada. Uma desvantagem de um sistema em malha aberta é que ele não pode realizar compensações para quaisquer perturbações que sejam adicionadas ao sinal de acionamento do controlador. Sistemas em malha aberta, então, não efetuam correções por causa das perturbações e são comandados simplesmente pela entrada (NISE, 2012).

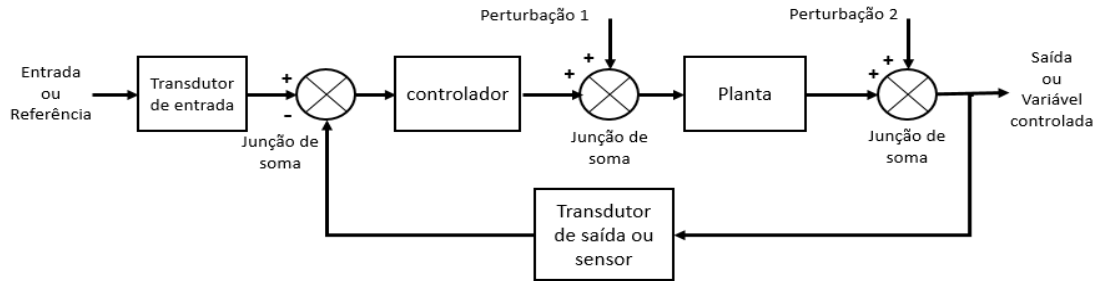
Figura 2. Sistema em malha aberta genérico.



Fonte: Próprio autor (2018).

No sistema de malha fechada da Figura 3, o transdutor de entrada converte a forma da entrada para a forma utilizada pelo controlador. Um transdutor de saída, ou sensor, mede a resposta da saída e a converte para a forma utilizada pelo controlador. A primeira junção de soma adiciona algebricamente o sinal de entrada ao sinal de saída, que chega através da malha de realimentação, o caminho de retorno da saída para a junção de soma. O sinal de saída é subtraído do sinal de entrada. O resultado, geralmente, é chamado de sinal de atuação. Entretanto, nos sistemas em que ambos os transdutores, de entrada e da saída, possuem ganho unitário (isto é, o transdutor amplifica sua entrada por um fator igual a 1), o valor do sinal de atuação é igual à diferença real entre a entrada e a saída. Nessas condições, o sinal de atuação é chamado de erro (NISE, 2012).

Figura 3. Sistema em malha fechada genérico.



Fonte: Próprio autor (2018).

No desenvolvimento do projeto é importante analisar três objetivos principais: produzir a resposta transitória desejada, reduzir o erro em regime permanente e alcançar a estabilidade. Outro objetivo de análise e de projeto está focado na resposta em regime permanente. Para o regime permanente, a resposta deve se assemelhar à entrada, e é geralmente o que permanece depois que os transitórios tenham decaído a zero. Para que seja discutida a estabilidade, parte-se do fato de que a resposta total de um sistema é a soma da resposta natural com a resposta forçada. A forma ou a natureza dessa resposta é dependente apenas do sistema, e não da entrada. Por outro lado, a forma ou a natureza da resposta forçada é dependente da entrada. Assim, para um sistema linear, pode-se escrever (NISE, 2012):

$$\text{Resposta total} = \text{Resposta natural} + \text{Resposta forçada} \quad (1)$$

Para um sistema de controle ser útil, a resposta natural deve eventualmente tender a zero, deixando, assim, apenas a resposta forçada, ou oscilar. Em alguns sistemas, entretanto, a resposta natural aumenta sem limites, ao invés de diminuir até chegar a zero ou oscilar. Eventualmente, a resposta natural é tão maior que a resposta forçada, que o sistema não é mais controlado. Esta condição, chamada de instabilidade, poderia levar à autodestruição do dispositivo físico, caso limitadores não façam parte do projeto (NISE, 2012).

Para realizar as análises mencionadas anteriormente, realiza-se a modelagem dos sistemas, que podem se apresentar na forma de equações diferenciais, contudo obter a solução de tais equações pode ser um trabalho árduo. Para contornar isso, um método operacional que pode ser utilizado é a transformada de Laplace, sendo uma maneira vantajosa de se obter a solução de equações diferenciais lineares. Através da transformada de Laplace é possível

converter muitas das funções comuns, tais como senóides, funções senoidais amortecidas e exponenciais, em funções algébricas de uma variável complexa s . Operações como derivação e integração podem ser substituídas por operações algébricas no plano complexo. Assim uma equação diferencial linear pode ser transformada numa equação algébrica da variável complexa s . Se a equação algébrica em s for resolvida em termos da variável dependente, será então possível a solução da equação diferencial com o auxílio de uma tabela de pares Transformada-Função ou através da técnica de expansão em frações parciais (OGATA, 2000).

Uma vantagem do método da transformada de Laplace é que ele permite o uso de técnicas gráficas para prever o desempenho do sistema sem a necessidade de resolver as equações diferenciais que o descrevem. Outra vantagem do método da transformada de Laplace é que, ao se resolver a equação diferencial, tanto a componente transitória como a de regime permanente podem ser obtidas simultaneamente (OGATA, 2000).

3.8 Modelagem térmica

Na modelagem dos sistemas térmicos podem ser analisados em termos de resistência e de capacitância, embora a capacitância térmica e a resistência térmica não possam ser representadas precisamente como parâmetros concentrados, já que elas são usualmente distribuídas ao longo da substância. No entanto para o sistema térmico em questão admite-se que possa ser representado por um modelo a parâmetros distribuídos (OGATA, 2000).

Para modelagem de sistemas térmicos que possuem transferência de calor por condução ou convecção temos que:

$$q = K \Delta \theta \quad (2)$$

O coeficiente K é dado por

$$K = \frac{kA}{\Delta X}, \text{ para condução} \quad (3)$$

$$K = HA, \text{ para convecção} \quad (4)$$

Resistência térmica e capacitância térmica. A resistência térmica R para transferência de calor entre duas substâncias pode ser definida como se segue:

$$R = \frac{\text{variação na diferença de temperatura } (^{\circ}\text{C})}{\text{Variação na taxa de fluxo de calor (kcal/s)}} \quad (5)$$

A resistência térmica para transferência de calor por condução ou por convecção é dada por

$$R = \frac{d(\Delta \theta)}{dq} = \frac{1}{K} \quad (6)$$

Uma vez que os coeficientes de condutividade e de convecção térmica são aproximadamente constantes, a resistência térmica tanto para condução quanto para convecção é constante (OGATA, 2000).

A capacitância térmica C é definida por

$$C = \frac{\text{Variação no calor armazenado, kcal}}{\text{Variação na temperatura, } ^\circ\text{C}} \quad (7)$$

Ou

$$C = mc \quad (8)$$

Para o sistema térmico analisado, é suposto que o reservatório seja termicamente isolado de modo a eliminar as perdas de calor para o ar em volta do sistema. Também é suposto que não há armazenamento de calor no material de isolamento e que o fluido no reservatório esteja perfeitamente misturado de que a temperatura do fluido seja uniforme. Assim, uma temperatura única é usada para descrever a temperatura do fluido no reservatório e do fluido de saída (OGATA, 2000).

Supondo que a temperatura do líquido que entra seja mantida constante e que a taxa de entrada de calor seja subitamente variada de \underline{H} para $\underline{H} + h$, onde h , representa uma pequena variação na taxa de entrada de calor. A taxa de saída de calor irá variar então gradualmente deste \underline{H} até $\underline{H} + h_o$. A temperatura do líquido que sai também irá variar deste $\underline{\theta}_o$ até $\underline{\theta}_o + \theta$. Para este caso, h_o , C , R são obtidos, respectivamente, por

$$h_o = Gc\theta \quad (9)$$

$$C = Mc \quad (10)$$

$$R = \frac{\theta}{h_o} = \frac{1}{Gc} \quad (11)$$

A equação diferencial para este sistema é

$$C \frac{d\theta}{dt} = h_i - h_o \quad (12)$$

Que pode ser reescrita como

$$RC \frac{d\theta}{dt} + \theta = Rh_i \quad (13)$$

Sendo assim, a constante de tempo do sistema é igual a RC segundos. A função de transferência que relaciona θ e h_i é dada por

$$\frac{\theta(s)}{H_i(s)} = \frac{R}{RCs+1} \quad (14)$$

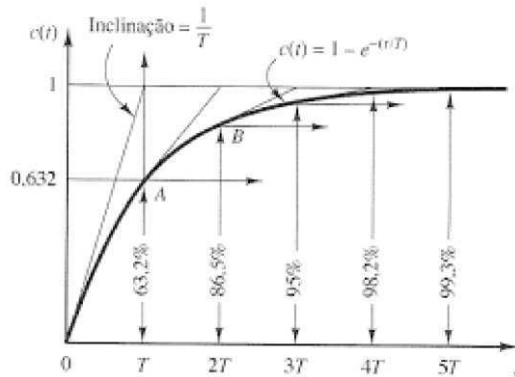
Onde

$$\theta(s) = L [\theta(t)] \quad (15)$$

$$H_i(s) = L [h_i(t)] \quad (16)$$

Para sistemas de primeira ordem é possível encontrar sua função de transferência observando sua resposta ao degrau experimentalmente, como pode ser observado na Figura 4.

Figura 4. Sistemas de primeira ordem e sua função de transferência.

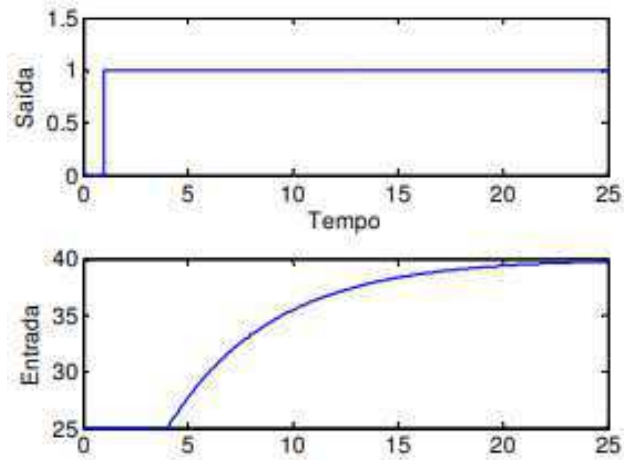


$$H(s) = \frac{1}{Ts+1} \quad (17)$$

Fonte: Beltrame e Hey (2007).

Utilizando a expressão $y(T) = 0,632[[y(\infty) - y(0)] + y(0)]$, é possível obter $y(T)$ e T com os valores de $y(\infty)$ e de $y(0)$ que são visíveis através da resposta ao degrau. Entretanto na prática há um fator chamado de atraso de transporte, e ele não está incluso neste método. Atraso de transporte é o tempo que um sistema leva para responder a uma entrada, ou seja, o sistema recebe um sinal de excitação em sua entrada, mas sua saída não apresenta uma variação imediata de acordo com a excitação de entrada. A resposta (típica) no tempo de sistemas de primeira ordem com atraso de transporte pode ser observada na Figura 5 (OGATA, 2000).

Figura 5. Resposta de um sistema de primeira ordem com atraso de transporte.

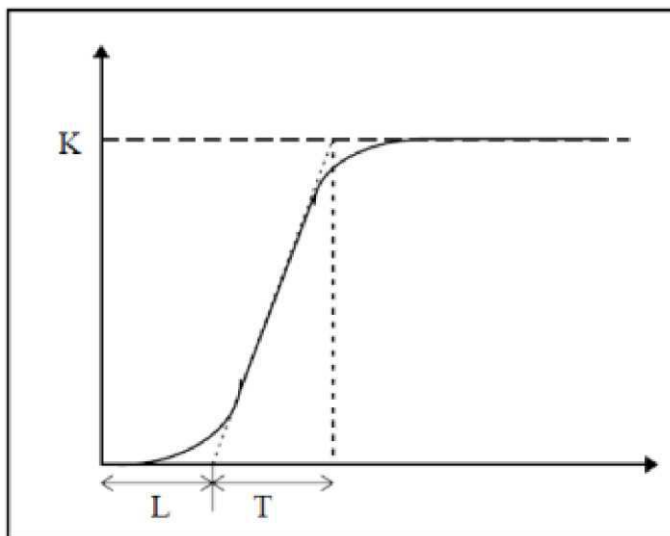


Fonte: Chevarria e Coelho (2006).

Depois de observada que a curva de reação a uma entrada degrau é de fato similar àquelas apresentadas na Figura 6 pode-se fazer a identificação do sistema através da aproximação a um sistema de primeira ordem com atraso de transporte. Existem diversas maneiras de fazer a estimação dos parâmetros de um sistema a partir da resposta ao degrau. Entre eles podemos citar Ziegler/Nichols, Sundaresan/Krishnaswamy, Nishikawa, Hägglund e o método de Smith (OGATA, 2000).

No método de Ziegler/Nichols de malha aberta quando tem-se um sistema de primeira ordem que possui atraso de transporte com comportamento similar a Figura 6.

Figura 6. Método de sintonia Ziegler/Nichols de malha aberta.



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

Fonte: Saraiva (2011).

Onde K é o ganho estático do processo e a curva de resposta ao degrau será caracterizada por duas variáveis, o atraso de transporte L e a constante de tempo T .

3.9 Controladores

Os controladores de processo são advenços da automação sendo eles responsáveis por controlar processos industriais ou parte deles por meio de algoritmos programáveis de controles específicos. Contudo, esses dispositivos não atuam sozinhos. Eles precisam de outros coadjuvantes, como atuadores e sensores. Na indústria existem seis tipos clássicos de controladores. São eles (OGATA, 2000):

- ✓ Controlador de duas posições ou liga-desliga (on-off);
- ✓ Controladores proporcionais;
- ✓ Controladores do tipo integral;
- ✓ Controladores do tipo proporcional e integral;
- ✓ Controladores do tipo proporcional e derivativo;
- ✓ Controladores do tipo proporcional, integral e derivativo.

Os controladores de duas posições têm seu elemento atuante funcionando como uma chave possuindo assim apenas dois modos de operação, “ligado” ou “desligado”. Este controle é relativamente simples e barato e, por esta razão, extremamente utilizado tanto em sistemas de controle industrial como em sistemas de controle doméstico (OGATA, 2000).

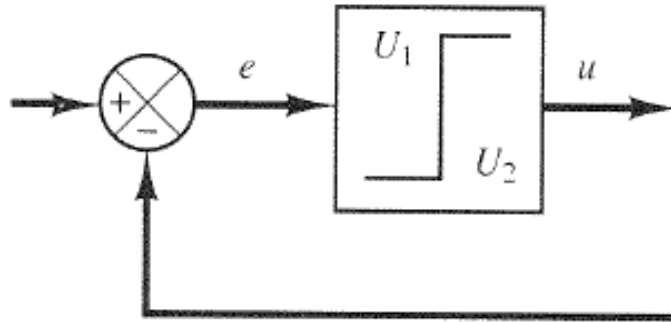
Considera-se $u(t)$ o sinal de saída do controlador e $e(t)$ o sinal de erro atuante. Em um controlador de duas posições, o sinal $u(t)$ permanece igual a um valor máximo ou a um valor mínimo, conforme o sinal de erro atuante seja positivo ou negativo, de modo que

$$u(t) = U_1, \text{ para } e(t) > 0 \quad (19)$$

$$u(t) = U_2, \text{ para } e(t) < 0 \quad (20)$$

onde U_1 e U_2 são constantes. Essa configuração pode ser vista na Figura 7.

Figura 7. Diagrama de blocos de um controlador liga-desliga.



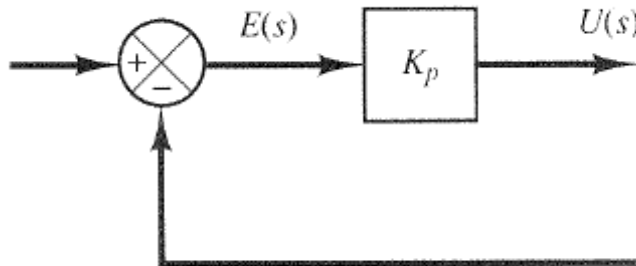
Fonte: Nise (2012).

O controlador com ação proporcional, a relação entre o sinal de saída do controlador $u(t)$ e o sinal de erro atuante $e(t)$ é

$$u(t) = K_p e(t) \quad (21)$$

onde K_p é denominado ganho proporcional. O controlador proporcional é essencialmente um amplificador com ganho ajustável. Um diagrama de blocos é mostrado na Figura 8.

Figura 8. Diagrama de blocos de um controlador proporcional.



Fonte: Nise (2012).

Para o controlador com ação integral, o valor da saída do controlador $u(t)$ é variado segundo uma taxa proporcional ao sinal de erro atuante $e(t)$. Sendo assim,

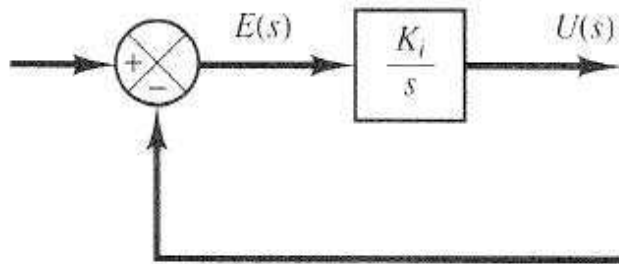
$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \quad (22)$$

Com função de transferência

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (23)$$

Onde K_i é uma constante ajustável, se o valor de $e(t)$ for dobrado, então o valor de $u(t)$ varia duas vezes mais rápido. Para erro atuante nulo, o valor de $u(t)$ permanece estacionário. O diagrama de bloco de um controlador integral é representado na Figura 9.

Figura 9. Diagrama de blocos de um controlador integral.



Fonte: Nise (2012).

A ação de controle proporcional-e-integral é definida da seguinte forma

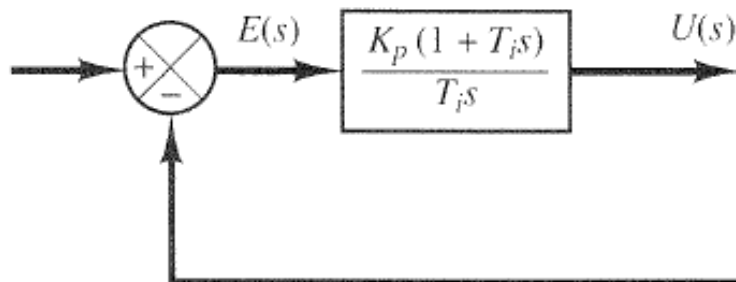
$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (24)$$

Com função de transferência

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (25)$$

Onde K_p representa o ganho proporcional e T_i é chamado tempo integral, ambos são ajustáveis. O tempo integral ajusta a ação de controle integral, enquanto uma mudança no valor de K_p afeta tanto a parte proporcional como a parte integral da ação de controle (OGATA, 2000). O diagrama de bloco da ação proporcional-e-integral é mostrado na Figura 10.

Figura 10. Diagrama de blocos da ação proporcional-e-integral.



Fonte: Nise (2012).

Na ação de controle proporcional-e-derivativa temos o controlador definido da seguinte forma

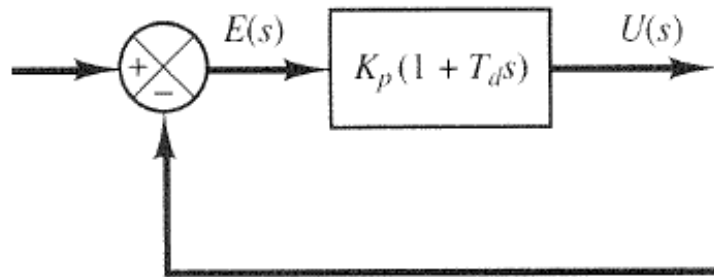
$$u(t) = K_p + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (26)$$

Com função de transferência

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p(1 + T_d s) \quad (27)$$

Onde K_p representa o ganho proporcional e T_d é uma constante chamada tempo derivativo, tanto K_p como T_d são ajustáveis. Esse controlador trabalha com base na magnitude da saída do controlador que é proporcional à taxa de variação do sinal de erro atuante. A Figura 11 mostra o diagrama de bloco do controlador proporcional-e-derivativo. (OGATA, 2000).

Figura 11. Diagrama de blocos da ação proporcional-e-derivativo.



Fonte: Nise (2012).

Para a ação de controle proporcional-integral-derivativo temos a combinação de controle proporcional, ação de controle integral e ação de controle derivativa. Esta ação combinada possui as vantagens de cada uma das três ações de controle individuais (OGATA, 2000). A equação de deste controlador é dada por

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (28)$$

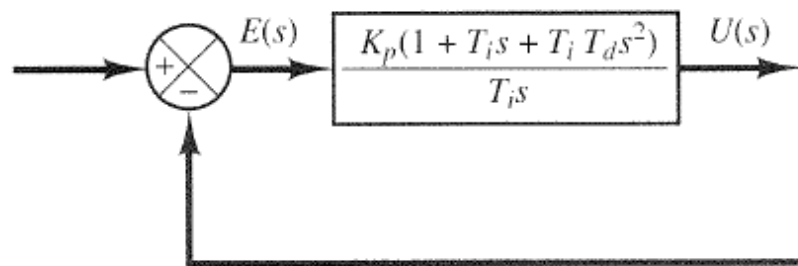
Ou pela sua função de transferência

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (29)$$

Onde K_p representa o ganho proporcional, T_d representa o tempo derivativo e T_i o tempo integral. Seu diagrama de blocos está representado na Figura 12.

O controle PID está em uso em mais da metade dos controladores industriais utilizados atualmente. A utilidade dos controles PID está na sua aplicabilidade geral à maioria dos sistemas de controle, quando bem ajustado o controlador PID consegue, zerar o *offset* e melhorar a estabilidade relativa do sistema. Este controlador normalmente é utilizado quando temos respostas transitórias e um regime insatisfatório (ARAÚJO, 2007).

Figura 12. Diagrama de blocos da ação proporcional-integral-derivativo.



Fonte: Nise (2012).

3.9.1 Projeto de controladores

Quando se fala no projeto de controladores existem alguns métodos de análise de comportamento do sistema que podem ser observados em malha aberta ou malha fechada. Se o sistema tiver um ganho de malha variável, então a localização dos polos de malha fechada depende do valor do ganho de malha escolhido, sendo de fundamental importância conhecer como os polos de malha fechada se movem no plano s quando o ganho de malha é variado (OGATA, 2000).

Um método simples para determinar as raízes da equação característica foi desenvolvido por W. R Evans e é amplamente usado em engenharia de controle. Este método, denominado método do lugar das raízes, é um procedimento pelo qual as raízes da equação característica são alocadas graficamente em função dos valores de um parâmetro do sistema (OGATA, 2000).

O método do lugar das raízes tem como ideia central de que os valores de s que fazem a função de transferência de malha ser igual a -1 devem satisfazer a equação característica do sistema. Este método é uma técnica gráfica poderosa para investigar os efeitos do valor de um parâmetro do sistema sobre a localização dos polos a malha fechada (OGATA, 2000).

3.9.2 Projeto no espaço de estados

Outro método bastante utilizado chama-se técnica de alocação ou imposição de polos. Se o sistema em análise for completamente controlável, então os polos do sistema a malha fechada podem ser localizados em quaisquer posições desejadas por meio de retroação de estado através de uma matriz de ganho de retroação de estados adequado (NISE, 2012).

3.9.3 Controlador PID digital

A equação de controle PID para sinais digitais, Equação 31, possui algumas diferenças com relação à equação de controle PID para sinais analógicos, Equação 30, pois integrais e derivadas não são implementáveis em microcontroladores e microprocessadores.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (30)$$

Fonte: Bolton (1995).

Para traduzir estas operações em modelos matemáticos que permitam uma descrição lógica em *software*, é preciso utilizar de alguns artifícios de cálculo numérico, então tomando a regra dos trapézios para a integral, que consiste na média aritmética das somas a direita e a esquerda de *Riemann*, e para a derivada utilizando do conceito de diferenciação, obtêm-se a Equação 31.

Onde n e $n - 1$ referem-se às amostras que serão utilizadas e T_a é a distância entre os pontos.

$$u[n] = K_p e[n] + \frac{K_i T_a}{2} \{ \sum_0^n e[n-1] + \sum_0^n e[n] \} + K_d \frac{e[n] - e[n-1]}{T_a} \quad (31)$$

Fonte: Neves (2014).

Aplicando a transformada Z na Equação 31, é possível encontrar uma função de transferência e a partir disto, pode-se encontrar uma equação de diferenças que permite uma implementação mais adequada do controle PID.

Considerando $T_a = 1$, pode-se dizer que:

$$KP = K_p \quad (32)$$

$$KI = \frac{K_i}{2} \quad (33)$$

$$KD = K_d \quad (34)$$

E por fim realizando-se as devidas manipulações matemáticas e reagrupando as variáveis para melhor visualização da equação, chega-se à:

$$G(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{(KP+KI+KD)-(KP-KI+2KD)z^{-1}+KDz^{-2}}{(1-z^{-1})} \quad (35)$$

$$b_0 = KP + KI + KD \quad (36)$$

$$b_1 = -KP + KI - 2KD \quad (37)$$

$$b_2 = KD \quad (38)$$

$$G(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{b_0+b_1z^{-1}+b_2z^{-2}}{1-z^{-1}} \quad (39)$$

Extraindo a equação de diferenças a partir de $G(z)$, obtêm-se a expressão que pode ser implementada em qualquer microcontrolador ou microprocessador, a Equação 40.

$$u(n) = b_0e[n] + b_1e[n - 1] + b_2e[n - 2] - u[n - 1] \quad (40)$$

Fonte: Neves (2014).

3.9.4 Microcontrolador

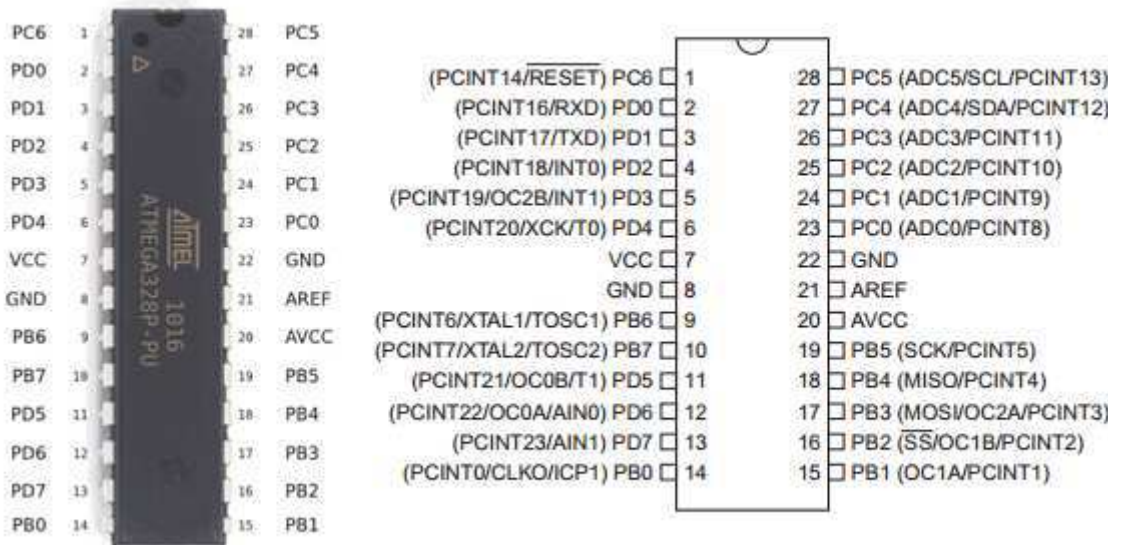
Microcontroladores são usados para controlar automaticamente produtos e aparelhos, tais como sistema de controle de motores de automóveis, implantes médicos, controles remotos e outros sistemas embarcados (MCROBERTS, 2015).

Por ter tamanho e preço reduzido em comparação com usar um microprocessador, memória e periféricos de entrada e saída separados, microcontroladores tornam economicamente viável o controle digital de cada vez mais aparelhos e processos. Eles normalmente possuem capacidade de processamento e memória reduzidos em relação a um computador comum devido a priorizarem outros aspectos, tais como consumo de energia, tamanho e preço (MCROBERTS, 2015).

O microcontrolador ATmega328P visto na Figura 13 faz parte da popular família de microcontroladores de 8 bits CMOS baseado na arquitetura AVR lançada pela ATMEL. O ATmega 328P que possui 28 pinos sendo 6 entradas analógicas ADC (conversores

analógicos digitais), 14 pinos de saída digital sendo 6 deles com PWM (*pulse width modulation*) aonde pode-se utilizá-los como saídas analógicas (tensão entre 0 ~ 5V) (MCROBERTS, 2015).

Figura 13. Microcontrolador ATmega328P.



Fonte: Datasheet ATmega328p.

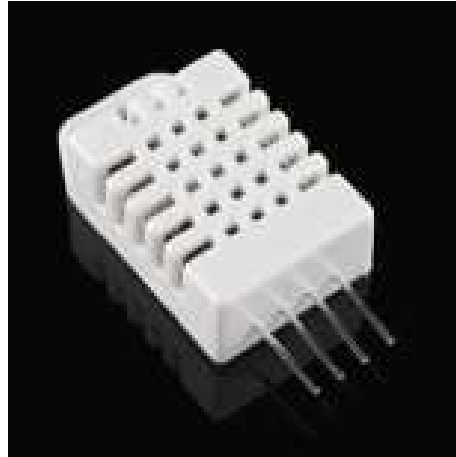
3.10 Sensores

Para aquisição de dados de temperatura são encontrados vários sensores no mercado, com diferentes recursos, modo de operação e diferentes métodos de transmissão da informação além de dimensões das mais variadas, escalas de medição e sensibilidade a variação da temperatura, com esses diferentes recursos cabe ao projetista a escolha do sensor que mais se adequa a sua necessidade. Um sensor de temperatura nada mais é do que um transdutor que, submetido a uma mudança de temperatura, fornece uma resposta claramente dependente da temperatura (ARAÚJO, 2007).

Entre as opções de sensores de temperatura que além desta grandeza também pode medir outra como a umidade, por exemplo, temos o DHT22 (Figura 14), capaz de aferir temperatura e umidade permitindo fazer leituras de temperaturas entre -40 a +80 graus Celsius e umidade entre 0 a 100%, com uma precisão na leitura da umidade de $\pm 2\%$ e na leitura da temperatura de $\pm 0,5^\circ\text{C}$, uma resolução de 0.1, tempo de resposta 2s, dimensões 25x17,7 mm

e possuindo compatibilidade de uso com ATmega328p, *Raspberry*, PIC e outros microcontroladores (ARAÚJO, 2007).

Figura 14. Sensor DHT22.



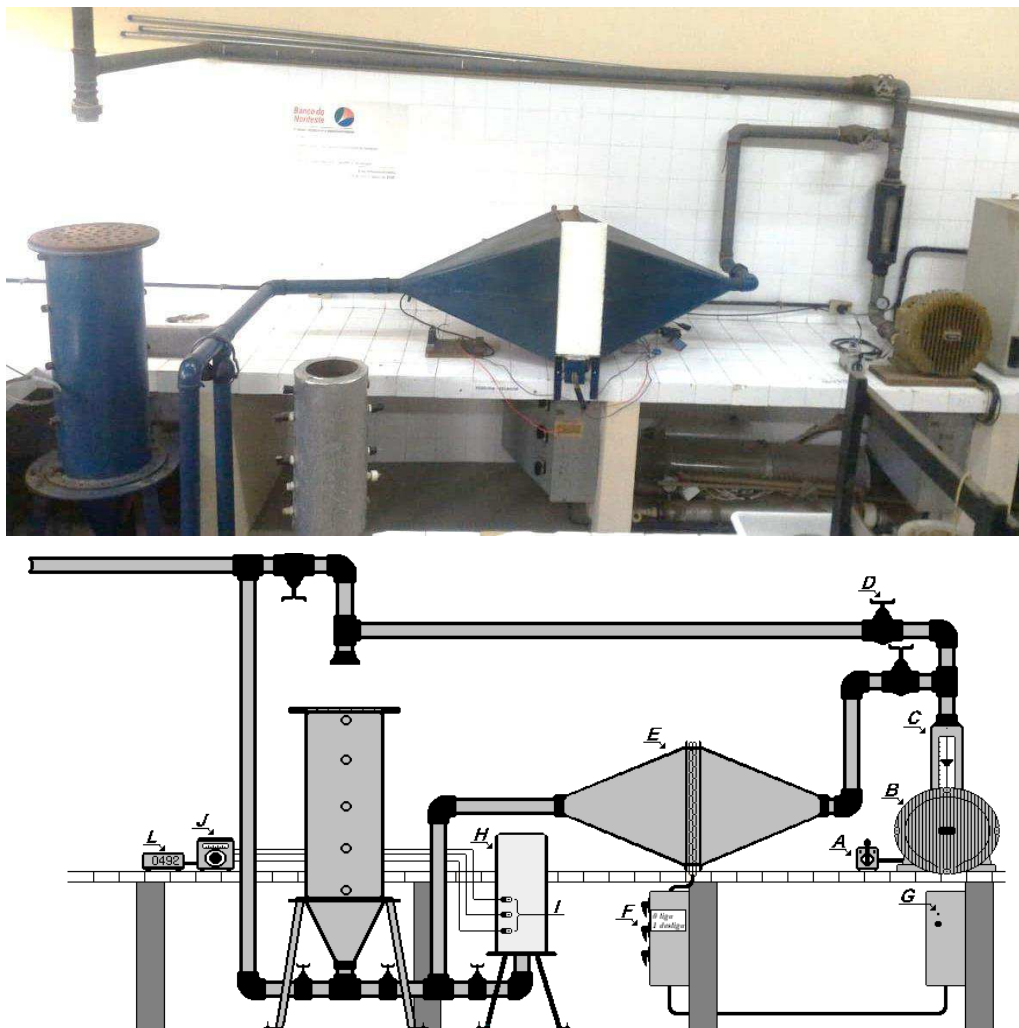
Fonte: Datasheet DHT22

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

O sistema de secagem no qual foi implementado o controle PID de temperatura é composto por um secador convectivo descrito na Figura 15.

Figura 15. Foto e diagrama do equipamento utilizado na realização da secagem convectiva.



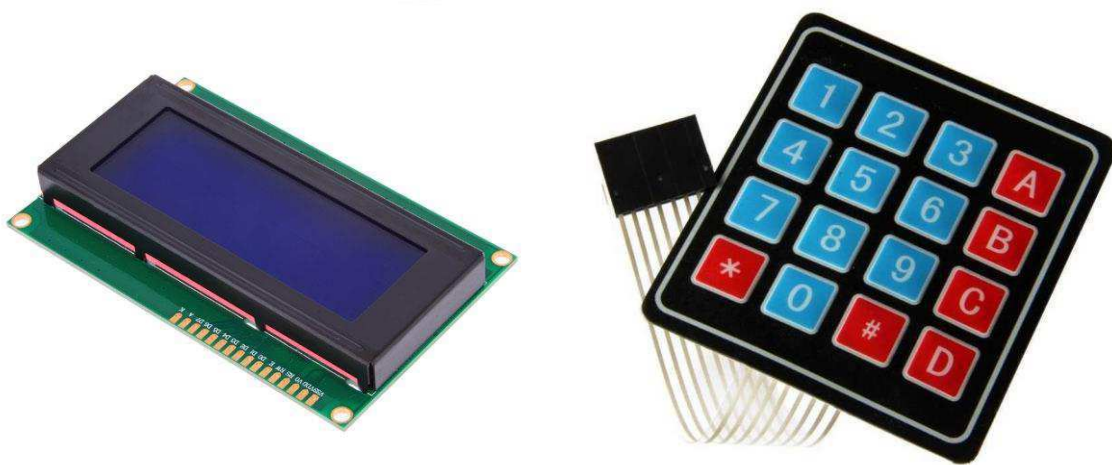
Fonte: Alexandre et al. (2013)

A. Chave do compressor, B. Ventilador radial, C. Medidor de vazão, D. Válvula reguladora, E. Aquecedor elétrico, F. Chave das resistências, G. Chave do sistema de controle, H. Câmara de secagem, I. Termopares, J. Controlador de temperatura, L. Milivoltímetro digital.

Aquisição de dados da temperatura e umidade: Para coletar as grandezas de temperatura e umidade foram utilizados quatro sensores DHT22.

Iteração homem-máquina: Para entrada dos dados de temperatura e para visualização dos valores de temperatura e umidade foi utilizado um teclado *4x4 Matrix Membrane Keypad* e um *Display LCD 20x4 Backlight Azul* respectivamente de acordo com a Figura 16.

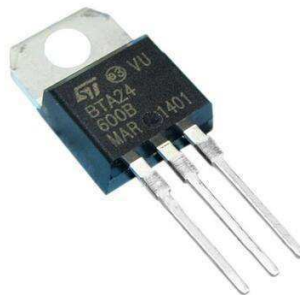
Figura 16. Teclado *4x4 Matrix Membrane Keypad* e um *Display LCD 20x4 Backlight Azul*.



Fonte: Datasheet do fabricante.

Controle da Potência: Para controlar a potência que vai para resistências do sistema de secagem foi utilizado em cada fase um Triac Bta-24600B Figura 17, com seu disparo controlado pelo Microcontrolador ATmega328P.

Figura 17. Triac BTA24-600-BW.



Fonte: Datasheet Triac BTA24-600-BW.

Microcontrolador: Para realizar o processamento dos dados foi utilizado o microcontrolador ATmega328P.

Dissipador de calor: Para dissipar o calor referente a potência dissipada do triac conforme a Figura 18.

Figura 18. Dissipador de calor.



Fonte: Próprio autor (2018).

4.2 Métodos

Através de experimentos realizados no sistema térmico da Figura 15, com a utilização de um termômetro digital para fins alimentícios modelo TP-101 (Figura 19) e um cronômetro de mão digital (Figura 20), foi observado o comportamento da temperatura ao longo do tempo, com medições de 15 em 15 segundos até que a temperatura ficasse constante, utilizando assim o método de resposta ao degrau do sistema em malha aberta.

Figura 19. Termômetro digital para fins alimentícios modelo TP-101.



Fonte: Datasheet TP-101.

Figura 20. Cronometro de mão digital.



Fonte: Google Imagens (2018).

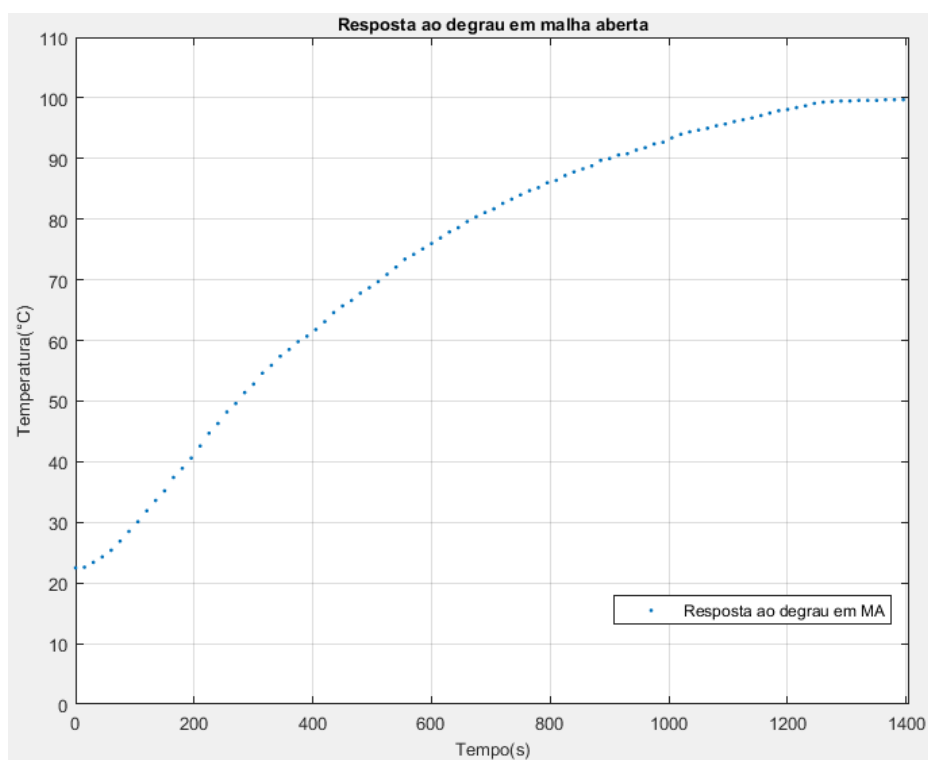
A partir dos dados obtidos foi gerado, no Matlab, um gráfico de valores discretos do comportamento da temperatura no tempo, em seguida esses pontos foram interpolados para obtenção de uma maior quantidade de dados e através do método de Ziegler-Nichols de malha aberta de onde foi obtida a função de transferência da planta, a partir desta, foram utilizados diferentes métodos de sintonia de controladores e realizadas as respectivas simulações para a escolha do controlador PID que atenda as especificações do projeto.

Após a definição do controlador a ser utilizado desenvolveu-se o circuito eletrônico e o circuito de potência que possibilitou a implementação do sistema de controle, onde foram realizados testes para validação do projeto.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

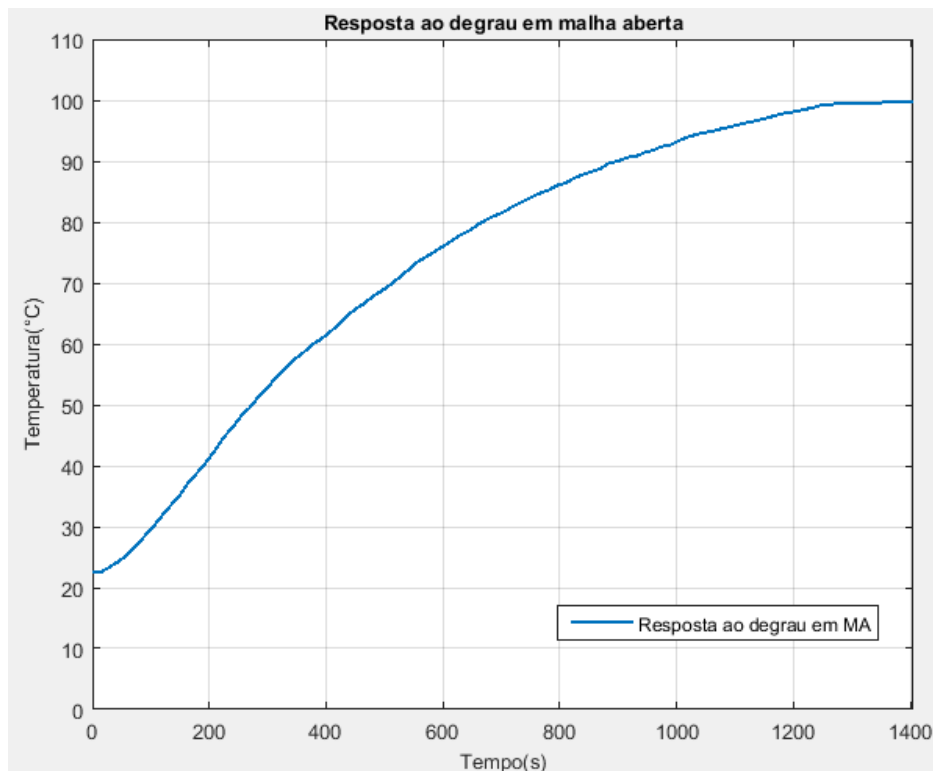
Os dados coletados foram processados no Matlab, gerando o gráfico da Figura 21. Para construção de um novo conjunto de dados a partir do conjunto de dados obtidos no experimento, foi feita uma interpolação apresentada na Figura 22.

Figura 21. Resposta ao degrau da planta, valores discretos de temperatura versus tempo.



Fonte: Próprio autor (2018).

Figura 22. Interpolação dos pontos de temperatura versus tempo da resposta ao degrau da planta.



Fonte: Próprio autor (2018).

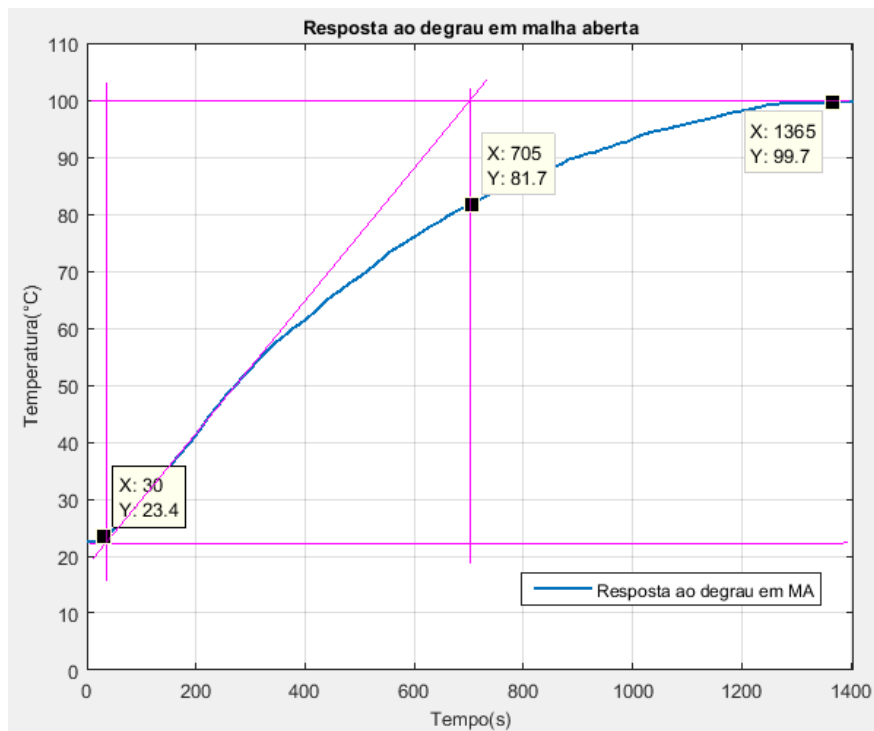
Após a obtenção da interpolação foram marcados os pontos mostrados na Figura 23 e então obteve-se o valor das seguintes constantes $L = 30s$, $T = 675s$ e $K = 99.7^{\circ}C$ e a partir das mesmas, aplicadas na Equação 17, obteve-se a seguinte equação:

$$H(s) = \frac{99.7}{675s+1} e^{-30s} \quad (41)$$

Utilizando a aproximação de Padé para funções de primeira ordem e realizando o truncamento no segundo termo obteve-se, após as devidas manipulações matemáticas, a função de transferência da planta:

$$H(s) = \frac{-0,1477s + 0,0098}{s^2 + 0,0681s + 0,000099} \quad (42)$$

Figura 23. Modelagem pelo método de Ziegler-Nichols de malha aberta.



Fonte: Próprio autor (2018).

De posse da função de transferência do sistema é possível projetar o controlador PID usando diferentes métodos. Para a planta em questão os métodos escolhidos para sintonia foram o CHR – 0% (Chien-Hrones-Reswick) , CHR – 20% e Ziegler-Nichols. Através dos valores obtidos experimentalmente e com auxílio da Tabela 1 de sintonia de controladores PID foi possível calcular os valores das constantes K_p , T_i e T_d mostrados na Tabela 2.

Tabela 1. Tipos de parametrização para PID

Método	K_p	T_i	T_d
CHR – 0%	$\frac{0,6}{k} * \frac{\tau}{\theta}$	τ	$0,5 * \theta$
CHR – 20%	$\frac{0,95}{k} * \frac{\tau}{\theta}$	$1,357 * \tau$	$0,474 * \theta$
ZN	$\frac{1,2}{k} * \frac{\tau}{\theta}$	$2 * \theta$	$0,5 * \theta$

Tabela 2. Coeficiente da parametrização PID

Método	K_p	T_i	T_d
CHR – 0%	0,1354	675	15
CHR – 20%	0,2144	915,97	14,22
ZN	0,2708	60	15

Uma vez encontrados os parâmetros K_p , T_i , T_d , foi possível encontrar os valores das constantes K_i e K_d através das seguintes equações

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (43)$$

$$K_d = K_p * T_d \quad (44)$$

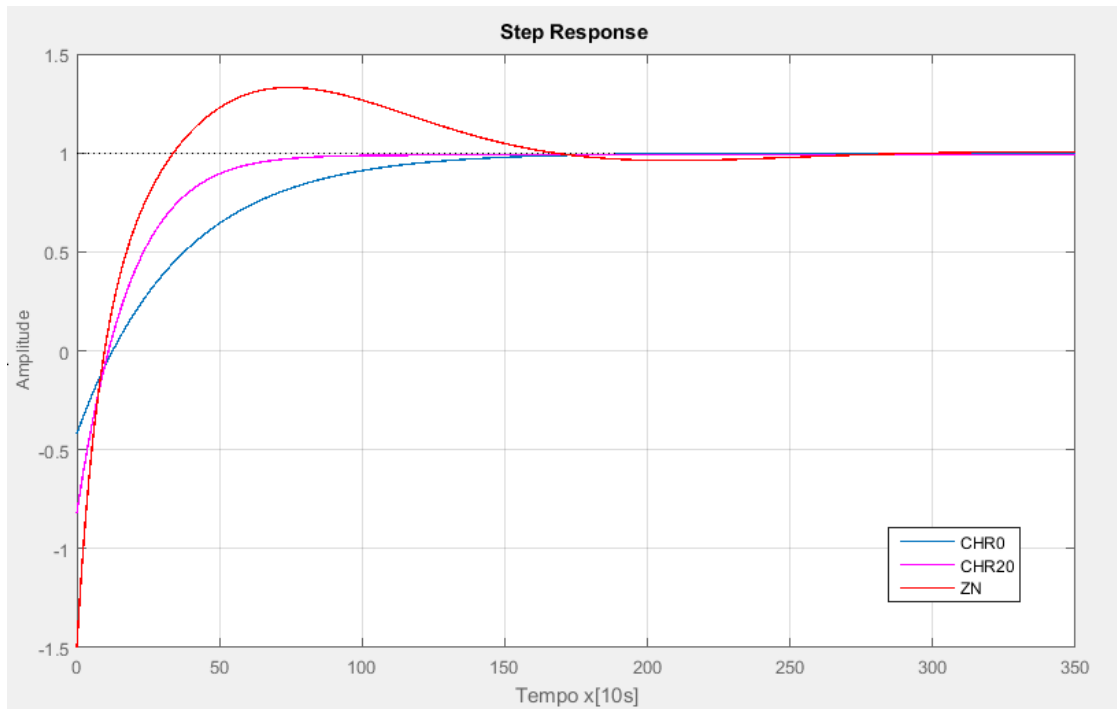
E assim obteve-se a Tabela 3.

Tabela 3. Coeficientes de sintonia PID

Método	K_p	K_i	K_d
CHR – 0%	0,1354	0,000200	2,031
CHR – 20%	0,2144	0,000234	3,049
ZN	0,2708	0,004513	4,062

Com os valores das constantes K_p , K_i e K_d mostrados na Tabela 3 foram realizadas simulações para observar o comportamento do sistema em resposta ao degrau (Figura 24), tendo como entrada um degrau unitário.

Figura 24. Respostas simuladas dos controladores.



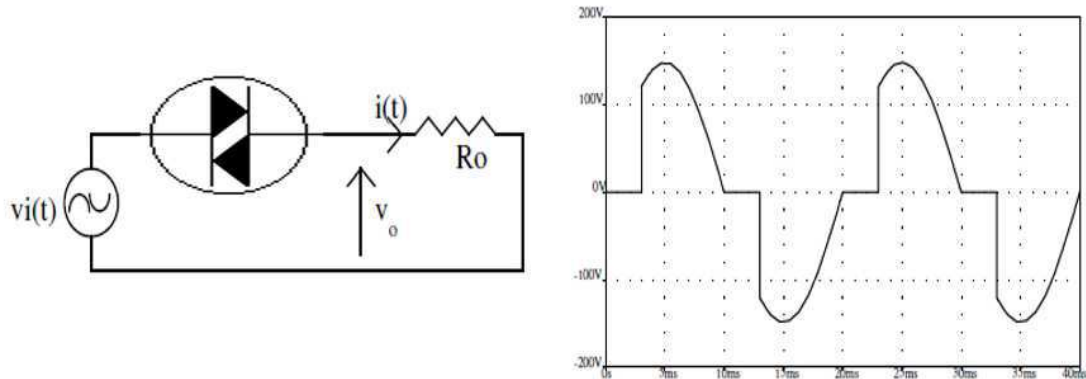
Fonte: Próprio autor (2018).

Observando os resultados obtidos na simulação da Figura 24, é possível notar que o método de sintonia CHR-20% atende os requisitos de *over shoot* zero e chegou em regime permanente mais rápido que os demais métodos. Sendo assim o método CHR-20% foi utilizado para implementação no microcontrolador.

5.1 Controle da potência na carga resistiva

Para um controle de potência onde a tensão é alternada, cujo circuito e formas de onda estão mostrados na Figura 25, e com carga resistiva, o desligamento do SCR se dará no momento em que a corrente cai a zero. Obviamente as formas de onda da tensão e da corrente na carga são as mesmas.

Figura 25. Circuito e forma de onda da tensão com o controle do ângulo de disparo do triac.



Fonte: Deckmann (2007).

O valor da tensão eficaz aplicada à carga resistiva é:

$$V_{of} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (v_i(t))^2 \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (V_i \cdot \sin(\theta))^2 \cdot d\theta} = V_i \cdot \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{4\pi}} \quad (45)$$

Onde:

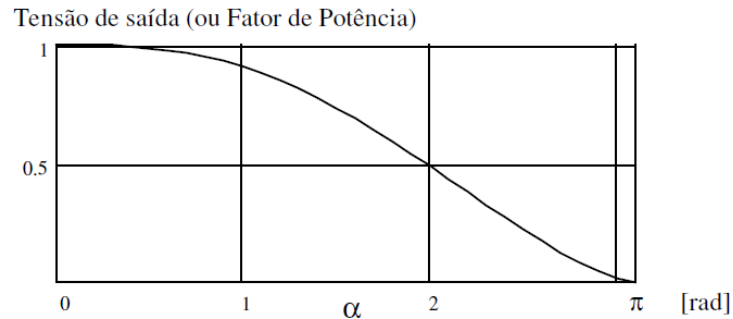
$$v_i(t) = V_i \cdot \sin(\theta)$$

$$\theta = \omega t$$

α é o ângulo de disparo do SCR, medido a partir do cruzamento da tensão com o zero.

A Figura 26 mostra a variação da tensão eficaz de saída como função do ângulo de disparo, supondo condução simétrica de ambas chaves. O fator de potência é dado pela relação entre a potência ativa e a potência aparente. Como a carga é resistiva, a potência ativa é aquela dissipada em R, dependendo, assim, do valor eficaz da tensão de saída. Como a corrente da fonte é a mesma da carga, o fator de potência é simplesmente a relação entre a tensão eficaz de saída e a tensão eficaz de entrada, ou seja, apresenta exatamente o mesmo comportamento mostrado na Figura 26.

Figura 26. Tensão de saída (sobre uma carga resistiva). Normalizada em relação ao valor eficaz da tensão de entrada.



Fonte: Deckmann (2007).

Sendo para o circuito das resistências a uma potência ativa de 2420W com tensão de 220 V e a corrente de 11 A e fator de potência 0 pois é uma carga puramente resistiva, temos sua potência ativa em função do ângulo de disparo do Triac dado pela seguinte equação:

$$P_a = \frac{\left(V_i \cdot \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{4\pi}} \right)^2}{R} \quad (46)$$

A partir desta, obtém-se

$$P_a = \left(4400 \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{4\pi} \right) \right) \quad (47)$$

O ângulo α é controlado pelo sinal normalizado $u(t)$ da seguinte maneira:

$$\alpha = 0 \rightarrow u = 1$$

$$\alpha = \pi \rightarrow u = 0$$

De modo que,

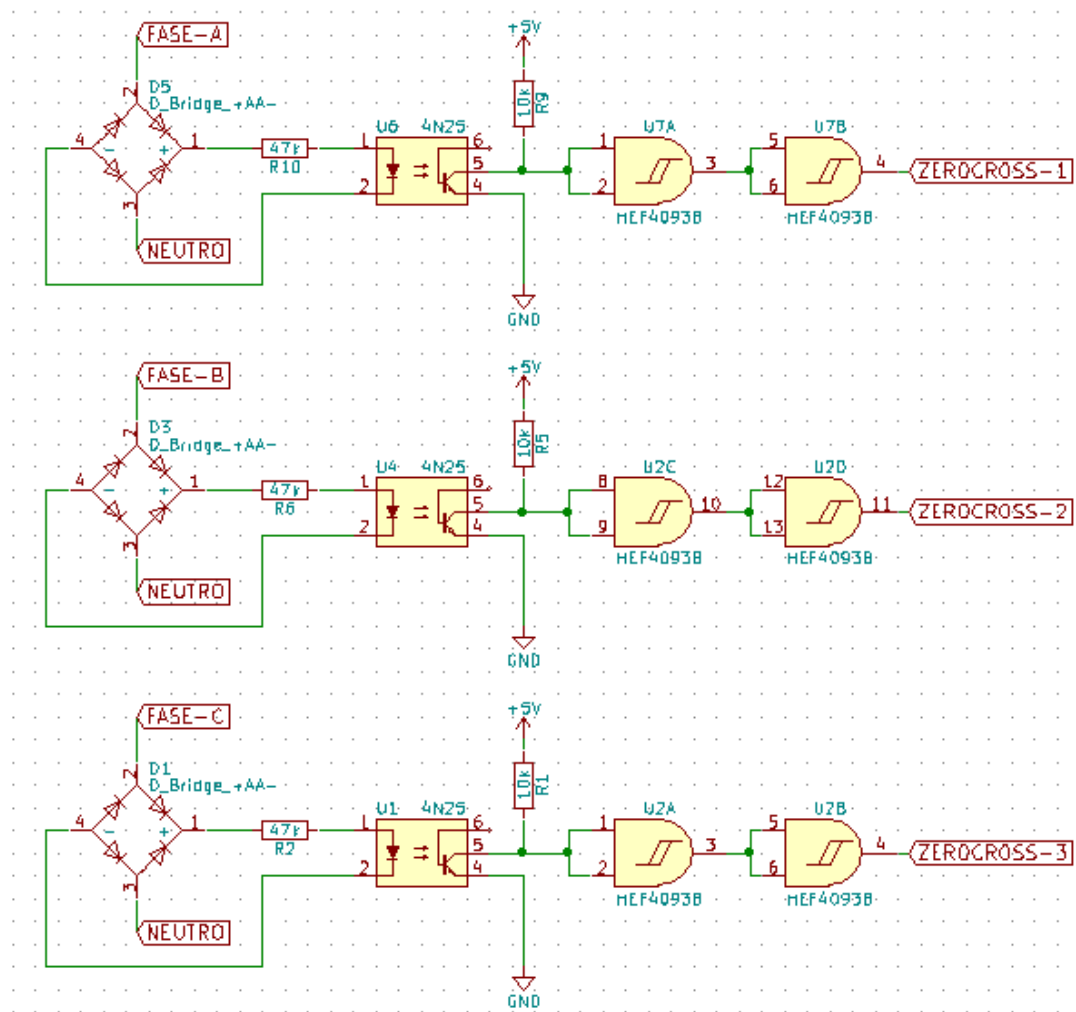
$$\alpha = \pi(1 - u)$$

E sabendo que $u(t)$ é o sinal PWM referente a saída do controlador PID temos que a potência enviada a resistência é descrita pela seguinte equação,

$$P(t) = 4400 \left[\frac{1}{2} - \frac{\pi(1-u(t))}{2\pi} + \frac{\sin(2\pi(1-u(t)))}{4\pi} \right] \quad (48)$$

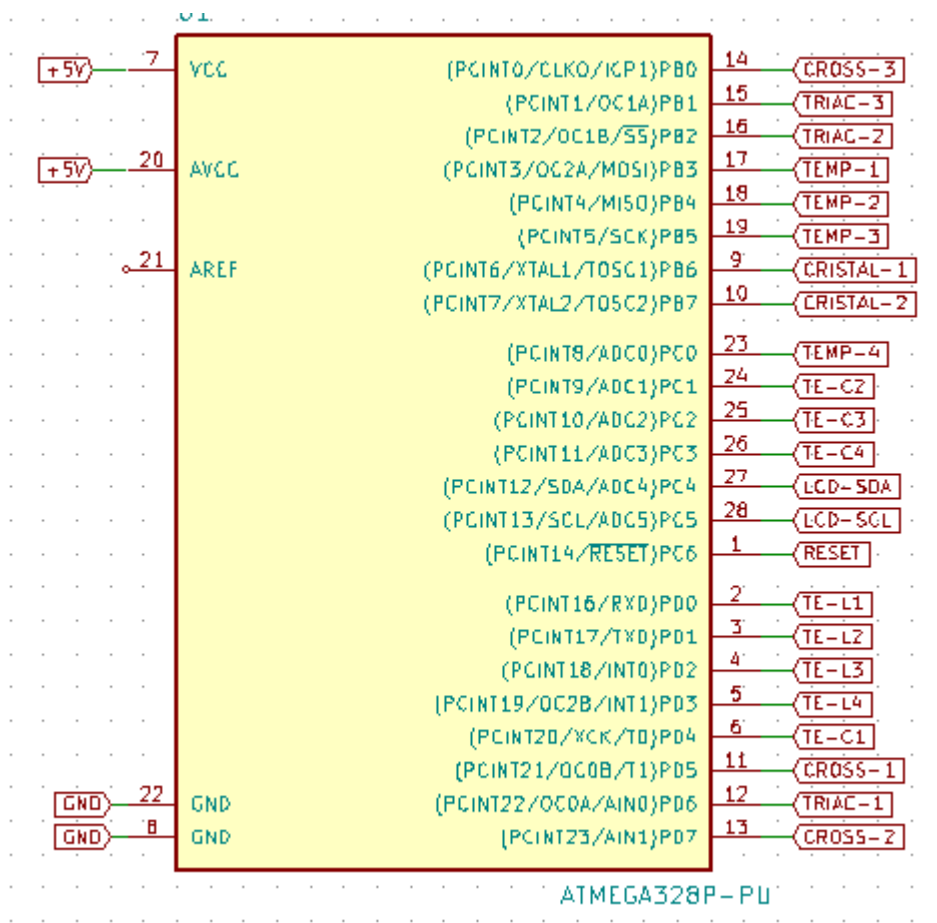
Para implementação completa do sistema de controle foi necessário implementar sistemas menores para aquisição dos sinais e assim tratá-los. Para realizar o controle da potência foi montado um circuito para detecção da passagem da tensão pelo zero, como mostrado na Figura 27, gerando sempre na passagem por zero (*ZERO CROSS-1*, *ZERO CROSS-2* e *ZERO CROSS-3*) um sinal de 5V para o microcontrolador conforme a Figura 28.

Figura 27. Circuito zero cross.



Fonte: Próprio autor (2018).

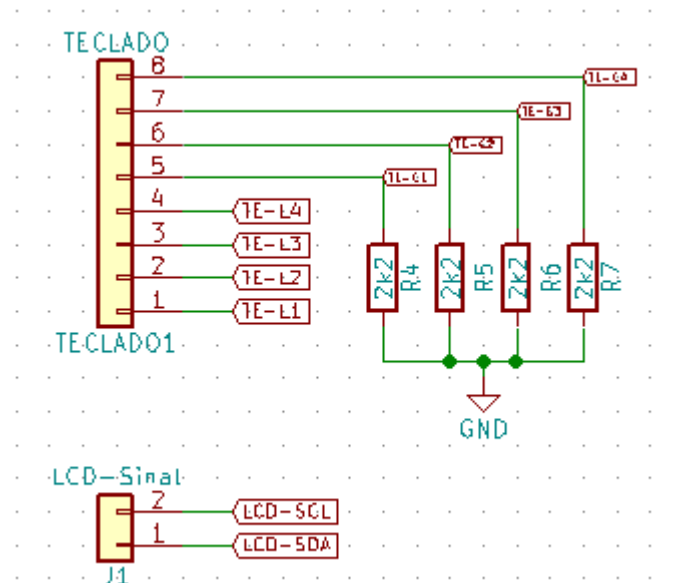
Figura 28. Ligações dos pinos do ATmega328.



Fonte: Próprio autor (2018).

Para a comunicação do microcontrolador com o *display LCD* foi usado o protocolo de comunicação I2C e para o teclado uma configuração padrão como mostrada na Figura 29 e suas respectivas conexões com o microcontrolador na Figura 28.

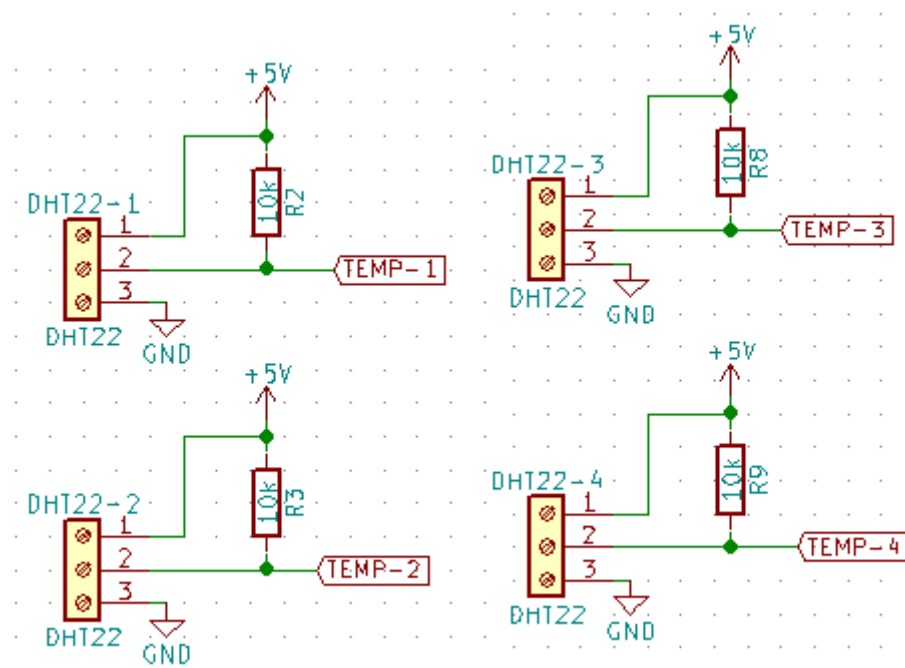
Figura 29. Configuração do barramento do teclado 4x4 e do *LCD* 20x4.



Fonte: Próprio autor (2018).

Para os sensores DHT22 foi utilizada a configuração da Figura 30 com suas saídas de dados (TEMP-1, TEMP-2, TEMP-3 e TEMP-4) conectadas ao microcontrolador Figura 28.

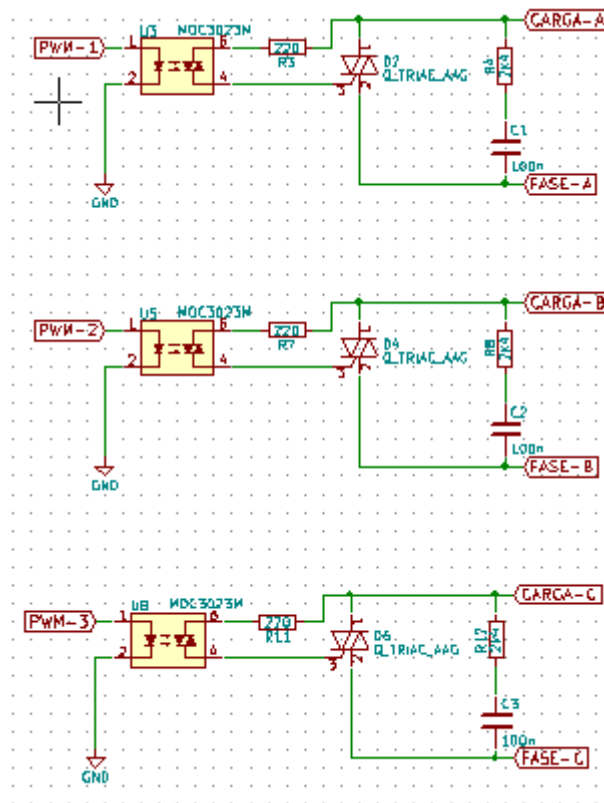
Figura 30. Configuração dos circuitos para os DHT22.



Fonte: Próprio autor (2018).

Para controlar o disparo dos triac's foi gerado no microcontrolador um sinal PWM passando por um optoacoplador MOC3023 constituído de um diodo emissor de luz infravermelho e um fototransistor de silício NPN, assim isolando o circuito DC do circuito AC Figura 31. Para o dimensionamento do dissipador de calor foi utilizada a tabela que se encontra no Anexo 1, sendo escolhido um dissipador de área 100cm², pois atende as especificações de dissipação de calor para o triac usado.

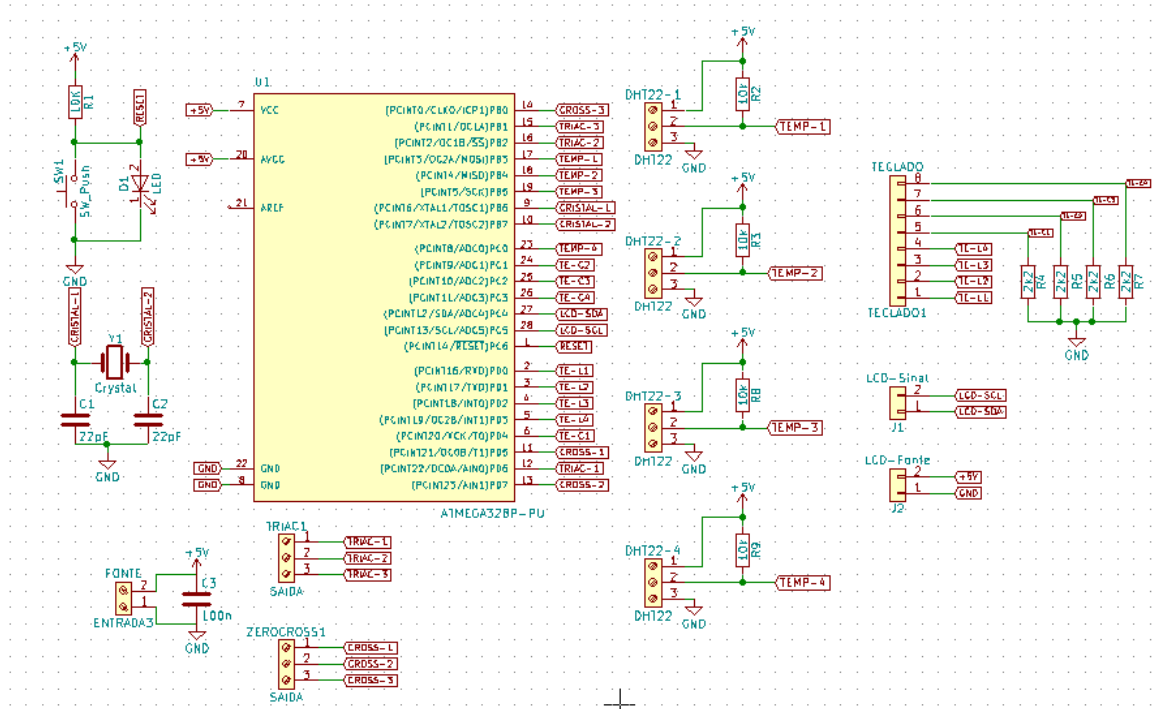
Figura 31. Circuito de acionamento dos triac's.



Fonte: Próprio autor (2018).

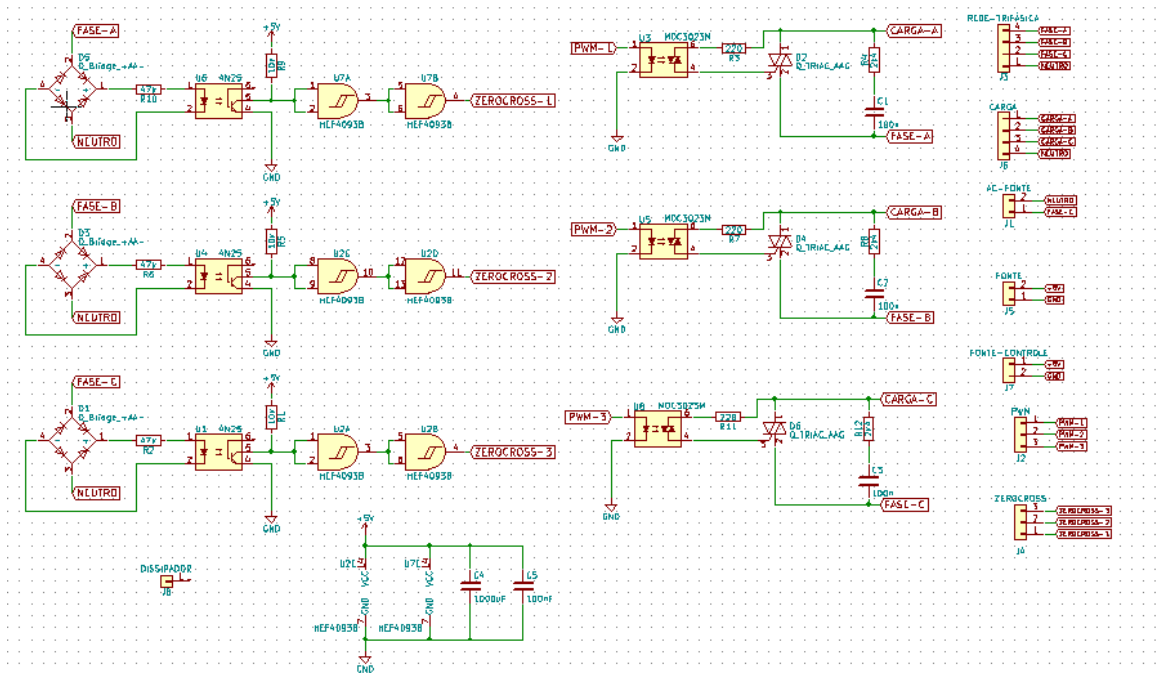
Os circuitos foram separados em dois, um de aquisição de sinais e processamento (Figura 32) e outro para o acionamento dos triac's (Figura 33), com isso obtendo uma melhor distribuição dos componentes e evitando possíveis interferências entre os mesmos.

Figura 32. Circuito de aquisição dos sinais e processamento.



Fonte: Próprio autor (2018).

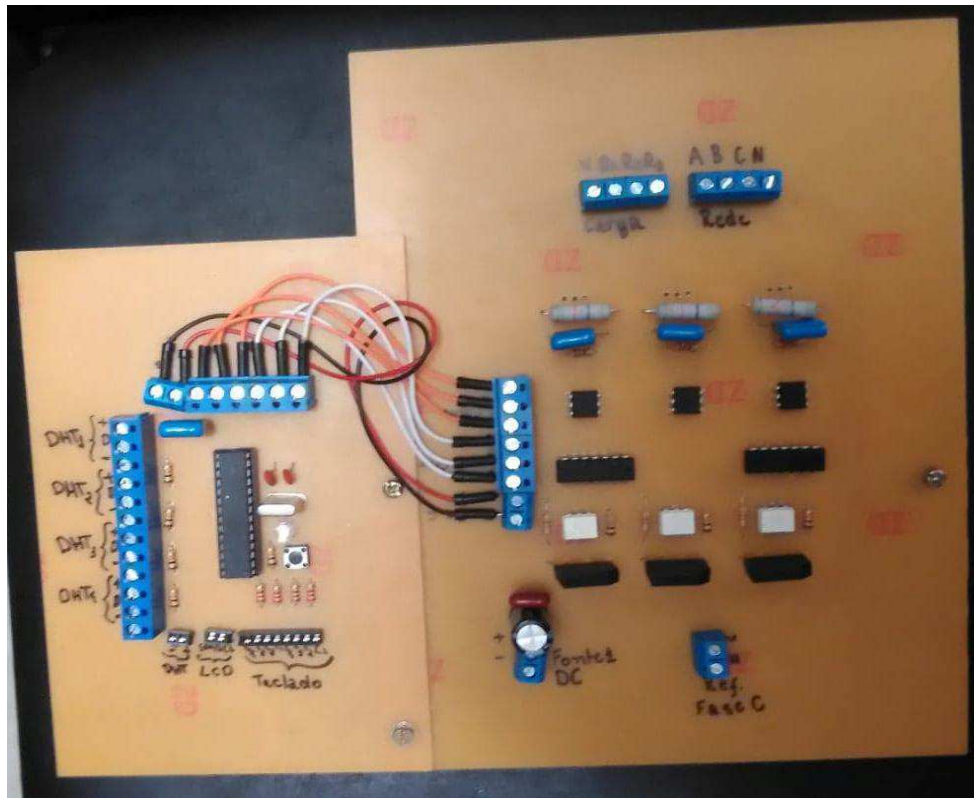
Figura 33. Circuito completo para acionamento dos triac's.



Fonte: Próprio autor (2018).

E então as placas foram confeccionadas e os componentes foram acoplados, formando os circuitos de controle, como pode ser observado na Figura 34(a) e no circuito de potência Figura 34(b).

Figura 34. Placas confeccionadas.



A: circuitos de controle

B: circuito de potência

Fonte: Próprio autor (2018).

5.2 Implementação no microcontrolador

Aplicando a transformada Z na equação do controlador PID pode-se encontrar uma equação de diferenças a partir das Equações 32, 33 e 34, que permite uma implementação no microcontrolador.

Considerando $T_a = 1$, temos:

$$KP = K_p = 0,2144 \quad (49)$$

$$KI = \frac{K_i}{2} = 0,000117 \quad (50)$$

$$KD = K_d = 3,049 \quad (51)$$

E por fim realizando-se as devidas manipulações matemáticas e reagrupando as variáveis para melhor visualização da equação, a partir das equações 35 à 39 chega-se à:

$$b_0 = 0,2144 + 0,000117 + 3,049 = 3,263517 \quad (52)$$

$$b_1 = -0,2144 + 0,000117 - 6,098 = -6,312283 \quad (53)$$

$$b_2 = 3,049 \quad (54)$$

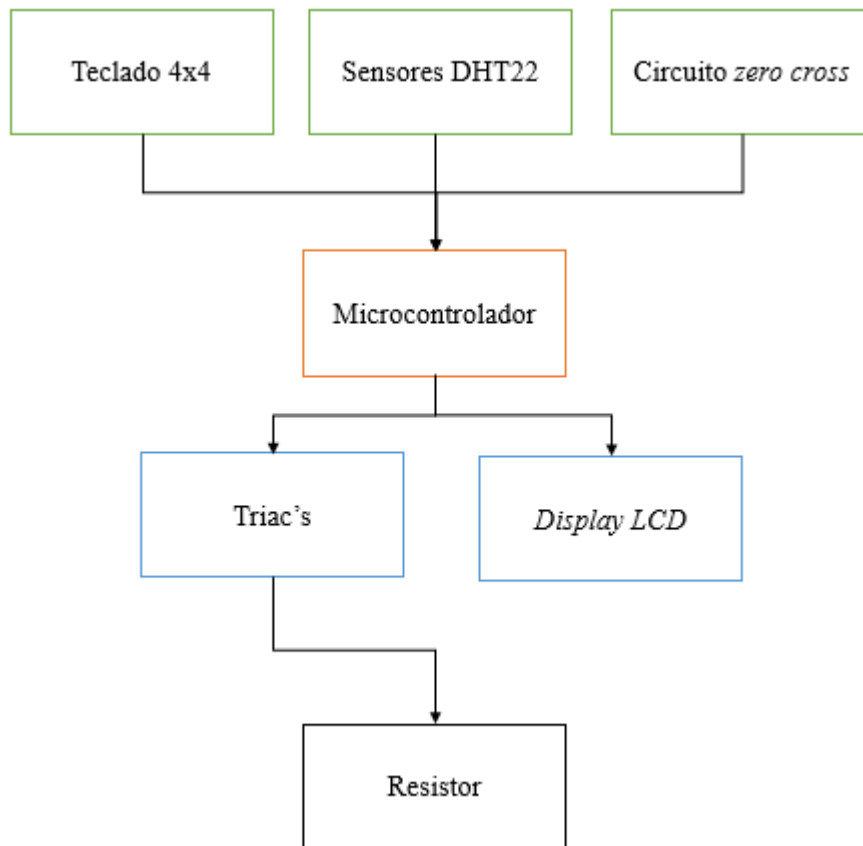
$$G(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{3,263517 - 6,312283z^{-1} + 3,049z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (55)$$

Extraindo a equação de diferenças a partir de $G(z)$, obtêm-se a expressão que pode ser implementada em qualquer microcontrolador ou microprocessador, a partir da Equação 40.

$$u(n) = 3,263517e[n] - 6,312283e[n - 1] + 3,049e[n - 2] - u[n - 1] \quad (56)$$

É possível ter uma melhor compreensão da estrutura do código implementado no microcontrolador observando a Figura 35.

Figura 35. Diagrama das entradas e saídas do microcontrolador.



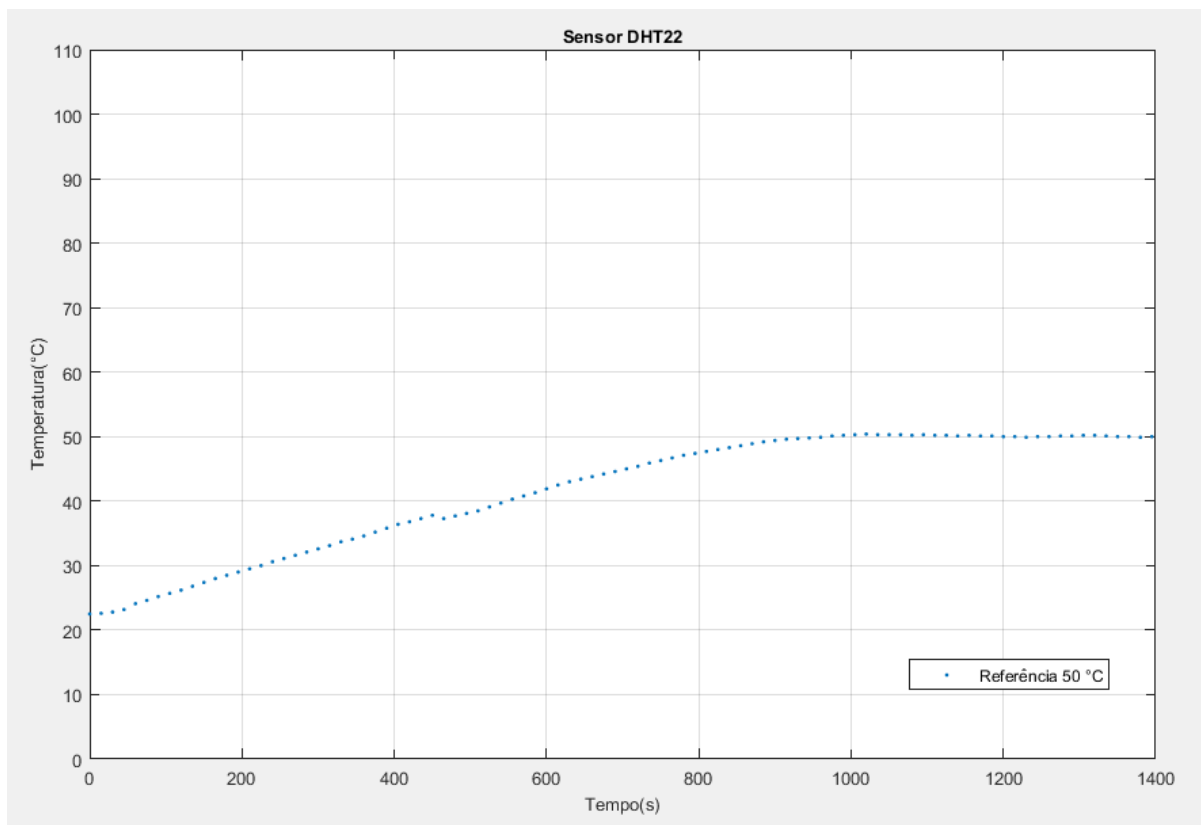
Fonte: Próprio autor (2018).

A partir da Figura 35 encontram-se como entradas de sinais no microcontrolador o teclado 4x4 onde o usuário irá indicar a temperatura que deseja realizar a secagem e esta será usada como a referência para o cálculo do erro, juntamente com a temperatura do ar de saída do sistema que será monitorada por um dos sensores DHT22, sendo esse sinal $e[n]$ usado na Equação 56 de implementação do PID no microcontrolador. Ainda como entrada no microcontrolador encontra-se o sinal vindo do circuito *zero cross*, sinal este que indica ao microcontrolador sempre que a tensão da rede elétrica passa pelo ponto de zero volts, com isso gerando uma interrupção.

Encontra-se como saída do microcontrolador o display LCD que recebe as informações de temperatura e humidade atualizadas a cada segundo. Também apresenta como saída o sinal PWM gerado pela função $u[n]$ do PID que aciona os triac's sempre que a interrupção do *zero cross* é acionada. Com isso a tensão de saída dos triac's varia conforme o sinal PWM e consequentemente controlando a potência que é enviada as resistências.

Com o código implementado foram realizados testes no sistema físico observando o comportamento do sistema com o PID implementado e monitorando a temperatura com o sensor DHT22. Foi escolhido para o teste a temperatura de referência 50 °C e coletado os dados a cada 15 segundos. No gráfico da Figura 36 encontra-se os dados coletados.

Figura 36. Experimento utilizando o sistema de controle PID.



Fonte: Próprio autor (2018).

Pode-se observar que a resposta do sistema se deu de forma satisfatória, visto que praticamente não houve *over shoot* e o tempo de regime permanente ficou dentro do esperado. Também é possível notar que apenas uma perturbação que ocorreu no sistema próximo a temperatura de 40 °C, o que atrasou um pouco o tempo de chegada ao regime permanente.

6. CONCLUSÃO

A aquisição da função de transferência de um sistema real de primeira ordem a partir de sua resposta ao degrau é uma ferramenta muito útil quando não se tem muitas informações sobre a construção física do sistema e não há a possibilidade de desmonte para uma observação mais detalhada dos componentes. Contudo encontrar a função de transferência dessa forma exige atenção em inúmeros detalhes que se não considerados podem resultar na equação errada da planta e conseqüentemente causar o mal dimensionamento do controlador, que por sua vez pode funcionar de forma indevida, chegando até mesmo a instabilidade do sistema.

Para a construção dos circuitos apresentados, é fundamental um prévio conhecimento sobre microcontroladores, quais são suas limitações construtivas e relacioná-las com as especificações que se deseja implementar, além de ter familiaridade com alguma linguagem de programação para que a tarefa de programar o microcontrolador não seja um grande obstáculo na construção do circuito e implementação das funções.

Ao fim do projeto com a substituição do sistema antigo de controle *on-off* por um sistema de controle PID, obteve-se um tempo de regime permanente satisfatório bem como uma variação na temperatura em regime permanente de ± 0.5 °C e um *over shoot* de 1% para uma referência de 50 °C. Dessa forma, os resultados obtidos atendem às especificações de projeto e validam os métodos utilizados para obtenção da função de transferência da planta e de sintonia do controlador.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDRE, H. V.; SILVA, F. L. H. da; GOMES, J. P.; SILVA, O. S. da; CARVALHO, J. P. D; LIMA, E. E. de. Cinética de secagem do resíduo de abacaxi enriquecido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 640-646, 2013.
- ARAÚJO, C. D. M. **Eficiência energética em sistemas de secagem, estudo de caso: produção de farinha de cascas de banana.** (Dissertação) Itajubá/MG. 2013 69 p.
- ARAÚJO, F. M. U. **Apostila de Sistema de Controle**, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal – Natal – RN, Brasil, 2007.
- BELTRAME, R. C.; HEY, H. L. **Sinais e sistemas.** 2007. (Apresentação de Trabalho/Congresso).
- BIEMBENGUT, M. S. Modelagem Matemática & Resolução de Problemas, Projetos e Etnomatemática: Pontos Confluentes. **ALEXANDRIA Revista de Educação em Ciência e Tecnologia**, v.7, n.2, p.197-219, nov. 2014.
- BOLTON, W. **Engenharia de Controle.** 1. ed. São Paulo: MARKON Books, 1995.
- CAVARIANI, C. **Secagem estacionária de sementes de milho com distribuição radial do fluxo de ar.** 1996. 85f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Esalq-USP.
- CELESTINO, S. M. C. **Princípios de secagem de alimentos.** Planaltina: Embrapa cerrados, 2010.
- COMBELLI, R. F. **Fabricación de Fideos y Otras Pastas Alimenticias.** Imprenta Clarasó. Barcelona: 1952. 1-318.
- CHEVARRIA, G. C.; COELHO, R. R. **Identificação de Sistemas de Primeira Ordem com Atraso de Transporte.** XXI Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia VI Feira de Protótipos, 2006.
- GAVA, A. J.; FRIAS, J. R. G.; SILVA, C. A. B. **Tecnologia de alimentos: princípios e aplicações.** São Paulo: Nobel, 2008.
- KANDLIKAR, S. G.; SHAH, R. K. Fórmulas de Eficácia Assintótica - NTU para Trocadores de Calor a Placas Multipasse. **ASME J. Heat Transfer**, 111, 1989, pp. 314-321.
- KREITH, F.; BOHN, M. S. **Princípios de Transferência de Calor.** São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1997.
- KREITH, F. **Princípios da Transmissão de Calor.** Editora Edgard Blücher, 1973.
- LEONARDI, J. G.; AZEVEDO, B. M. Métodos de conservação de alimentos. **Revista Saúde em Foco.** Edição nº 10, 2018.

LOPES, R. L. T. **Dossiê técnico: conservação de alimentos**. Fundação tecnológica de Minas Gerais-CETEC, 2007.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit Operation of Chemical Engineering**. 4th Ed. McGraw-Hill International Book. 1993.

MCCROBERTS, M. **Arduino Básico**. 2ª edição. Editora Novatec, 2015.

NESPOLO, C. R. *et al.* **Práticas em tecnologia de alimentos**. Porto Alegre: Artmed, 2015.

NETTO, C. A **Considerações sobre o Emprego de Sistemas de Isolação Térmica em Engenharia Naval**. Dissertação de Mestrado apresentado a Escola Politécnica, 1987.

NISE, N. S. **Engenharia de sistemas de controle**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 745 p.

NEVES, F. **Controlador PID digital: Uma modelagem prática para microcontroladores - Parte 1**. 2014. Disponível em: <<http://www.embarcados.com.br/controlador-pid-digital-uma-modelagem-praticapara-microcontroladores-parte-1/>>. Acesso em: 02 de junho de 2018.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 4. ed. Rio de Janeiro: Prentice Hall do Brasil, 2000.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. A.; PARK, K. J. B. **Seleção de processos e equipamentos de secagem**. CONBEA, Universidade Estadual de Campinas, 2006.

PARK, K. J. *et al.* **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**. Campinas: UNICAMP, 2007.

SADIK, K.; LIU, H. **Heat Exchangers: selection, rating, and thermal design**. 2. ed. Coral Gables: Crc Press, 2002. 621 p.

SANTOS JÚNIOR, J. J. S. Análise do processo de secagem industrial de espaguete em secadora de fluxo contínuo e a influência da matéria-prima sobre a qualidade do produto final. **Dissertação (Mestrado)** – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, Salvador, 2014.

SARAIVA, F. A. **Métodos de Síntese em Controladores PID**. Canoas, 2011.

SILVA, J. S.; SABIONE, P. M.; AFONSO, A. D. L.; PINTO, F. A. C. Avaliação de secadores e custo de secagem de produtos agrícolas. **Engenharia na Agricultura**. Série Armazenamento, v.2, n.2, p.1-17, 2000.

SOKHANSANJ, S.; JAYAS, D. S. Drying of foodstuffs. In: Mujumdar, A.S. **Handbook of industrial drying**. 2.ed. New York: Marcel Dekker, v.1, p.589-656, 2006.

STRUMILLO, C., KUDRA, T. Drying: Principles, Applications and Design, topics in chemical engineering v. 3, **Gordon and Breach Science Publishers S. A.** Montreux 2, Switzerland, 1986.

TAYLOR AND FRANCIS GROUP, LLC. **Handbook of industrial drying**, 2006.

TRAVAGLINI, D. A.; PINTO NETO, M.; BLEINROTH, W.; LEITÃO, M. F. D. E. F. **Banana passa: princípios de secagem, conservação e produção industrial**. ITAL/Rede de Núcleos de Informação Tecnológica. Campinas, 73p, 1993.

WILLIAMS-GARDNER, A. **Industrial Drying**. Leonard Hill, London, 1971, chaps. 2–4.

Anexo 1

Cálculo de Dissipação

---	PD (W)	R θ_{jc} (°C/W)	R θ_{cs} (°C/W)	Comprimento (mm)	R θ_{sa} (°C/W)	TA. (°C)	TM (°C)	T _j (°C)
		Temp. R θ_{jc} (°C)	Temp. R θ_{cs} (°C)	FC (R θ_{sa})	Temp. R θ_{sa} (°C)			
BTA24 - TO-220AB	16,85465	0,8	0,3	100	3,72	30	125	113,5
		13,48371699	5,056393873	1,04	64,94299673			

Legenda:

PD - Potencia Dissipada

R θ_{jc} - Thermal Resistance of Junction to Case

R θ_{ca} - Thermal Resistance of Case to Sink

R θ_{sa} - Thermal Resistance of Sink to Air

FC - Fator de Correção

Comprimento - Referente ao Dissipador

TA - Temperatura Ambiente

TM - Temperatura Máxima

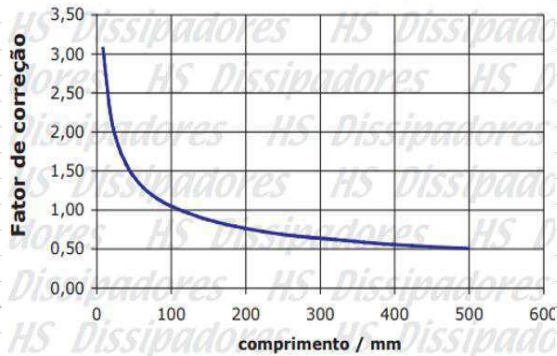
T_j - Temperatura da Junção (Resultado)

Thermal Resistance Case to Sink

DESCRIPTION	θ_{cs} (°C/W)	APPLICATION	HEAT SINK FLATNESS REQUIREMENTS
Bare Joint	0.5 - 1.0	Low power only	Very sensitive to variations in flatness and finish
Thermal Grease	0.1 - 0.2	High Power	Not sensitive, standard .004 inch/inch (max) ok
Aluminum Foil ⁽¹⁾ (pre-coated with alumina filled silicone)	0.2 - 0.4	High Power	For lowest θ_{cs} , .001inch/inch (typ) recommended
Aluminum Foil ⁽²⁾ (pre-coated with thermal grease)	0.2 - 0.4	High Power	For lowest θ_{cs} , .001inch/inch (typ) recommended
Kapton ⁽³⁾ (pre-coated with thermal grease)	0.3 - 0.5	Electrical Insulation	For lowest θ_{cs} , .001inch/inch (typ) recommended
Silicon Rubber (compressible)	0.4 - 1.0	Electrical Insulation	See Text
Mica (bare)	1.0 - 1.5	Electrical Insulation	Not recommended Mica is brittle and prone to crack
Mica (with thermal grease)	0.3 - 0.4		

Correção da Resistência Térmica em Fator do Comprimento

correção da resistência térmica para outros
comprimentos de dissipadores

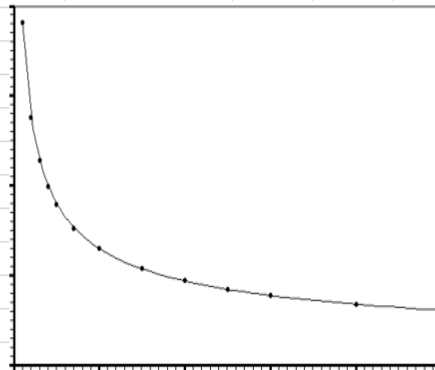


Comprimento (mm)	Fator de Correção
10	3,05
20	2,21
30	1,82
40	1,59
50	1,43
70	1,22
100	1,04
150	0,86
200	0,75
250	0,67
300	0,62
400	0,54
500	0,49

Exemplo: O dissipador HS 6524 possui resistência térmica igual a $3,72 \text{ }^\circ\text{C/W/4"}$. Isto quer dizer que um pedaço medindo 4 polegadas de comprimento possui a resistência térmica de $3,72 \text{ }^\circ\text{C/W}$. O mesmo dissipador com 40mm de comprimento possui resistência térmica igual a

$$3,72 \text{ }^\circ\text{C/W} \times 1,59 = 5,91 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

Gráfico da Interpolação

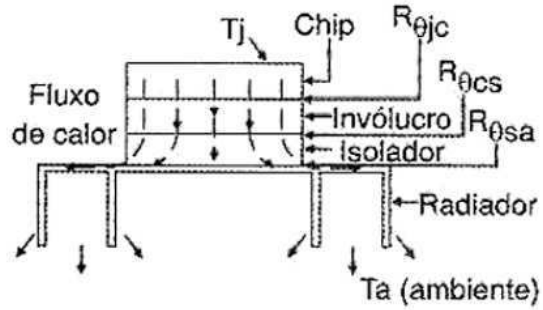


Interpolando os pontos obtemos a seguinte função:

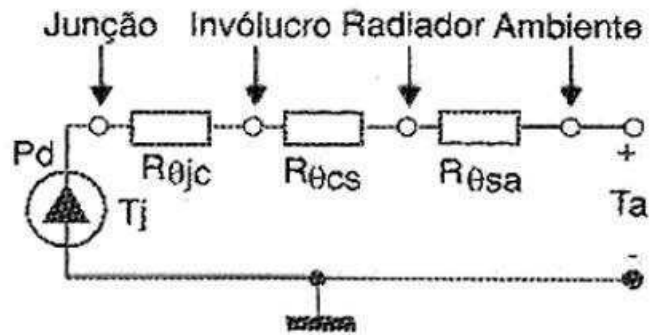
$$y = 8,984 * \{x^{(-0,4691)}\}$$

Y	X
1,316251841	60

Elementos do Circuito Térmico



Circuito Térmico



$$T_j = P_d (R_{\theta jc} + R_{\theta cs} + R_{\theta sa}) + T_a$$