

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA**

ANDERSON RODRIGO MARZAGÃO

**ESTUDO DA AUTOMAÇÃO DO PROCESSO DE ESTERILIZAÇÃO DA
AUTOCLAVE VERTICAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO

2014

ANDERSON RODRIGO MARZAGÃO

**ESTUDO DA AUTOMAÇÃO DO PROCESSO DE ESTERILIZAÇÃO DA
AUTOCLAVE VERTICAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 (TCC 2), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletrônico, da Coordenação do Curso de Engenharia Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Toledo.

Orientador: Prof. Me. Alessandro Paulo de Oliveira

Co-orientador: Prof. Dr. Felipe Walter Dafico Pfrimer

TOLEDO

2014



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso Nº 012

Estudo da Automação de Processo de Esterilização da Autoclave Vertical

por

Anderson Rodrigo Marzagão

Esse Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 9:10 h do dia **09 de dezembro de 2014** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Eletrônica**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Profa. M. Jaqueline Vargas
(UTFPR-TD)

Prof. M. José Dolores Vergara Dietrich
(UTFPR-TD)

Prof. M. Alessandro Paulo de Oliveira
(UTFPR-TD)
Orientador

Visto da Coordenação

Prof. M. Alessandro Paulo de Oliveira
Coordenador da COELE

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, concedendo saúde, força e perseverança para superar as dificuldades.

Aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Toledo, seu corpo docente, direção e administração.

Ao meu orientador Prof. Me. Alessandro, pelo empenho dedicado à elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Felipe e ao Prof. Me. Vergara pela cooperação na elaboração deste trabalho.

À minha namorada, pelo carinho e apoio.

Aos meus colegas de graduação.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

MARZAGÃO, Anderson R. **Estudo da Automação do Processo de Esterilização de Autoclave Vertical**. 2014. 57f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2014.

A esterilização de materiais é uma atividade rotineira em laboratórios de pesquisa e em consultórios odontológicos. Um dos equipamentos utilizados para esta atividade é a autoclave vertical. No laboratório de Processos Químicos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Toledo a autoclave vertical é utilizada para a esterilização dos materiais utilizados em atividades de pesquisas e em aulas práticas realizadas pelos alunos. Para tal procedimento, faz-se necessário a presença de um operador para gerenciar e controlar todas as etapas do processo, inclusive a contagem de tempo. Neste trabalho, objetiva-se estudar e desenvolver um sistema de controle que automatize o processo de esterilização, controlando com precisão as duas variáveis do processo que impactam diretamente na qualidade do material a ser esterilizado – temperatura e tempo. Para tal controle, foi utilizado o microcontrolador PIC16F877A como componente principal para o processo de automação, juntamente com o sensor de temperatura AD22100KTZ que interpretou a condição do processo.

Palavras-chave: Esterilização. Autoclave. Automação. Microcontrolador.

ABSTRACT

MARZAGÃO, Anderson R. **Study of the Automation of the Vertical Autoclave Process**. 2014. 57f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) – Federal University of Technology – Paraná. Toledo, 2014.

The materials sterilization is a routine activity in research laboratories and in dental offices. One of the used devices for this activity is the vertical autoclave. In the Chemical Processes laboratory of the Paraná Federal Technological University – Campus Toledo, the vertical autoclave is used to sterilize materials that have been necessary in research activities and in practical classes, in which the students are in contact with this device. For such procedure, it is important the presence of an operator to manage and control all the stages of the process, including timing. This paper aims to study and develop a control system that automates the sterilization process, controlling with accuracy both variables of the process which have a direct impact on the work quality – temperature and time. For this control, a microcontroller PIC16F877A was used as the main component to the automation process, together with the temperature sensor AD22100KTZ which interpreted the process condition.

Keywords: Sterilization. Autoclave. Automation. Microcontroller.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Autoclave vertical	16
Figura 2 – Circuito comando – potência	19
Figura 3 – Diagrama de blocos do sistema a ser controlado	20
Figura 4 – Diagrama de blocos com o controlador proporcional	21
Figura 5 – Resposta a um degrau de entrada para variações de K_p	22
Figura 6 – Diagrama de blocos para o controle PI	23
Figura 7 – Diagrama de blocos para o controle PD	24
Figura 8 – Diagrama de blocos para o controle PID	25
Figura 9 – Resposta ao degrau de uma planta	26
Figura 10 – Curva de resposta em forma de S	27
Figura 11 – Aproximação pelo método de Euler	29
Figura 12 – Aproximação pela Transformada de Tustin	30
Figura 13 – Resposta do sistema ao degrau de 324 W	33
Figura 14 – Sensor de temperatura AD22100KTZ	35
Figura 15 – Degrau de temperatura para o sensor AD22100KTZ	35
Figura 16 – Degrau de temperatura para a autoclave	36
Figura 17 – Modulação por largura de pulso	38
Figura 18 – Circuito para fonte de alimentação 5 V	41
Figura 19 – Disposição da fonte de alimentação 5 V	42
Figura 20 – Circuito central de controle – microcontrolador, LCD, teclado e sensor de temperatura	43
Figura 21 – Disposição da placa central de controle – microcontrolador, LCD, teclado e sensor de temperatura	43
Figura 22 – Circuito eletrônico comando – potência	44
Figura 23 – Disposição do circuito eletrônico comando – potência	45
Figura 24 – Dinâmica da autoclave antes da automação	46
Figura 25 – Montagem do sistema de controle na autoclave	49
Figura 26 – Dinâmica da autoclave após a automação – 65°C	50
Figura 27 – Dinâmica da autoclave após a automação – 121°C	51
Figura 28 – Indicação da temperatura e pressão no manômetro da autoclave	52

Figura 29 – Indicação da temperatura no display de LCD 52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Regra de sintonia de Ziegles-Nichols baseada na resposta ao degrau da planta	28
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

A/D	Analógico / Digital
CPU	<i>Central Processor Unit</i>
I/O	<i>Input/Output</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
PD	Proporcional Derivativo
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
ZOH	Segurador de Ordem Zero

SUMÁRIO

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	13
1.2 OBJETIVOS	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 ESTERILIZAÇÃO	15
2.1.1 Autoclave	15
2.2 MICROCONTROLADOR	17
2.2.1 Conversor Analógico/Digital.....	17
2.3 PWM.....	18
2.4 CIRCUITO DE POTÊNCIA.....	18
2.5 SENSOR DE TEMPERATURA	19
2.6 CONTROLE	19
2.6.1 Diagrama de Blocos.....	20
2.6.2 Controle Proporcional	21
2.6.3 Controle Proporcional e Integral.....	22
2.6.4 Controle Proporcional e Derivativo	23
2.6.5 Controle Proporcional, Integral e Derivativo.....	24
2.7 PID DIGITAL	28
2.7.1 Aproximação da derivada pelo método de Euler.....	28
2.7.2 Aproximação da integral pela transformação de Tustin.....	29
2.7.3 Equação Final do PID Digital.....	30
2.8 CONCLUSÃO PARCIAL	31
3 ANÁLISE DO SISTEMA A SER CONTROLADO – A AUTOCLAVE	32
3.1 A FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA	32

3.2 ESTUDO DA DINÂMICA DO SENSOR E DA AUTOCLAVE	34
3.2 O CONTROLE PID – SINTONIA E UTILIZAÇÃO EM MICROCONTROLADORES	37
3.3 UTILIZAÇÃO DO PWM.....	38
4 DESENVOLVIMENTO PRÁTICO DOS CIRCUITOS ELETRÔNICOS PARA A REALIZAÇÃO DA AUTOMAÇÃO	41
4.1 FONTE DE ALIMENTAÇÃO	41
4.2 CIRCUITO PARA O FUNCIONAMENTO DO MICROCONTROLADOR, TECLADO ALFANUMÉRICO E DISPLAY DE LCD.....	42
4.3 CIRCUITO DE COMANDO-POTÊNCIA.....	44
6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	46
6.1 ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA DINÂMICA DE FUNCIONAMENTO DA AUTOCLAVE ANTES DO PROCESSO DE AUTOMAÇÃO	46
6.2 ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA DINÂMICA DE FUNCIONAMENTO DA AUTOCLAVE APÓS O PROCESSO DE AUTOMAÇÃO.....	47
7 CONCLUSÕES	54
REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

O compartilhamento de materiais em laboratórios para a realização de diversos experimentos é uma prática comum. Para que o experimento que está sendo realizado não seja comprometido pela presença de micro-organismos oriundos de um experimento anterior é necessário que se faça a esterilização dos materiais utilizados.

Esterilizar um equipamento significa eliminar todas as formas de vida de seu interior ou superfície [1]. A esterilização é o processo que promove a completa eliminação ou destruição de todas as formas de microrganismos presentes: vírus, bactérias, fungos, protozoários e esporos [2].

A esterilização de um material pode ser obtida por diversos métodos, e a escolha do mesmo deve de ser feita de acordo com cada tipo de material. A escolha do método utilizado para esterilizar deve ser baseada no uso pretendido e na resistência dos materiais a serem esterilizados. Essa prática deve ser feita de maneira segura e eficaz [2].

Um dos métodos mais utilizados para esterilização em laboratórios de pesquisa, consultórios odontológicos e hospitais pelo fato de ser seguro, rápido, eficiente e barato, é o método de vapor saturado sob pressão, obtido por um equipamento denominado de autoclave.

Assim, o presente trabalho, visa automatizar o processo de esterilização realizado na autoclave vertical, visando garantir praticidade, confiabilidade e segurança ao processo.

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Para o desenvolvimento desta proposta, foi considerado o Laboratório de Processos Químicos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Toledo, onde atualmente utiliza-se a autoclave para a esterilização dos materiais.

Tal autoclave, ao ser ligada, tem a sua chave seletora de posições colocada manualmente na posição “máxima”. Nessa configuração, as duas resistências responsáveis pelo aquecimento são comutadas na configuração “paralelo”, onde a

resistência equivalente torna-se menor, o que aumenta a dissipação de potência. A partir de então, a temperatura e pressão interna da autoclave começam a subir. Ao chegar ao nível ideal de temperatura/pressão para o processo que é 121°C/1,5 kgf/cm², observada por um operador no manômetro do equipamento, este operador comuta a chave de posições para a posição “média”, que retira uma das resistências do processo, aumentando a resistência equivalente e, conseqüentemente, reduzindo a dissipação de potência, com o objetivo de manter a temperatura interna em aproximadamente 121°C, para que o processo de esterilização aconteça. Simultaneamente, no momento em que o operador observa que a temperatura chegou ao limite estabelecido, o mesmo aciona a contagem de tempo em um cronômetro manual. Ao final desse tempo, o operador interfere novamente na chave de posições, desligando o equipamento. Como não há queda imediata da pressão/temperatura da autoclave, o operador abre um registro permitindo que todo o vapor escoe, reduzindo assim a pressão/temperatura da autoclave, possibilitando que a tampa possa ser aberta para a retirada dos materiais submetidos ao processo de esterilização.

É um processo quase que totalmente manual, utilizando o método de controle “on-off” para o controle da temperatura da autoclave, permitindo assim, que um novo método de controle seja desenvolvido para o equipamento juntamente com a automação do mesmo.

1.2 OBJETIVOS

A presente proposta tem como objetivo estudar, projetar e testar um sistema de controle para a autoclave, automatizando o processo de esterilização.

Os objetivos específicos do trabalho se resumem aos itens listados abaixo:

- i. Estudar e definir método de controle para a autoclave;
- ii. Projetar um circuito eletrônico para o controle do processo de esterilização tendo como componente principal um microcontrolador;
- iii. Desenvolver o programa que gerenciará todo o processo;
- iv. Realizar testes práticos do referido sistema de controle na autoclave que se encontra no Laboratório de Processos Químicos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o desenvolvimento do presente projeto, será realizada, inicialmente, uma revisão bibliográfica sobre esterilização, microcontroladores, sensores de temperatura e método de controle de processos PID (Proporcional, Integral e Derivativo), que são os pontos-chaves para a automatização do processo.

2.1 ESTERILIZAÇÃO

O calor vem sendo utilizado pelo ser humano ao longo de sua existência para purificar as coisas conforme sua necessidade. O calor gerado por uma aplicação a altas temperaturas atua no rompimento das membranas e desnaturação de proteínas e ácidos nucleicos. A queima, porém, é um tanto excessiva para o uso cotidiano, além de que em alguns casos, pode levar também a destruição do material em si. Agentes transmissíveis, tais como vírus e bactérias, podem ser eliminados através da esterilização. Alguns métodos utilizados para conseguir a esterilização são [3]:

- Autoclaves: altamente efetivas e baratas;
- Fornos a ar quente: convenientes para objetos sensíveis a esforços mecânicos, porém deixa resíduo tóxico nos itens esterilizados;
- Vapor à baixa temperatura e formaldeído: efetivo para instrumentos com cavidades ou aberturas tubulares;
- Química esporicida: frequentemente utilizada como desinfetante, mas também, pode esterilizar instrumentos se usada por períodos prolongados;
- Irradiação: raios gama e elétrons acelerados são excelentes para a esterilização.

Assim, dentre os métodos existentes, a autoclave é aqui considerada pelas características anteriormente mencionadas.

2.1.1 Autoclave

A autoclave é um equipamento muito utilizado para esterilização de materiais por ser altamente eficiente com um custo acessível. A Figura 1 mostra a autoclave vertical utilizada neste trabalho.



Figura 1 – Autoclave vertical
Fonte: [5]

O processo de esterilização por autoclave consiste em manter o material a ser esterilizado em contato com o vapor de água em temperatura elevada, por um período de tempo suficientemente adequado para eliminar todos os micro-organismos. Uma autoclave é formada por um cilindro metálico resistente, vertical ou horizontal, onde geralmente fica a resistência elétrica que aquecerá a água. Possui uma tampa que apresenta parafusos de orelhas que permitem fechá-la totalmente. Na parte superior da tampa estão as válvulas de segurança e de ar. Além disso, apresenta uma chave de comando para controlar temperatura e um manômetro indicador de temperatura e pressão [4].

2.2 MICROCONTROLADOR

Um microcontrolador é um sistema computacional completo. As principais características de um microcontrolador são [6]:

- Unidade Central de Processamento (CPU);
- Sistema de *clock* para dar sequência às atividades da CPU;
- Memória para armazenamento de instruções;
- Memória para manipulação de dados;
- Entradas para interiorizar na CPU informações do mundo externo;
- Saídas para exteriorizar informações processadas pela CPU para o mundo externo;
- Programa (*firmware*) para definir o objetivo ao sistema;
- Módulos de temporização;
- Conversores A/D (Analógico/Digital)

Um microcontrolador possui todos os recursos necessários para a automação de uma autoclave.

2.2.1 Conversor Analógico/Digital

Os sinais encontrados no mundo real são analógicos, pois suas variações ao longo do tempo são de forma contínua. No entanto, os sinais manipulados por microcontroladores, são digitais.

A conversão analógico-digital é o processo que possibilita a representação de sinais analógicos no mundo digital. Desta forma é possível utilizar os dados extraídos do mundo real para cálculos ou operar seus valores em um microcontrolador [6].

No microcontrolador PIC16F877A, um conversor A/D está presente internamente e sua utilização é relativamente simples. De forma geral, em sua entrada temos um valor de tensão oriunda de um sensor que corresponde a um

determinado valor da grandeza medida. E em sua saída, temos um sinal amostrado em um dado intervalo de tempo. Com esse sinal obtido, em valor digital, o microcontrolador executa as suas ações conforme sua programação.

2.3 PWM

O PWM (*Pulse Width Modulation* – Modulação por Largura de Pulso) é um dos recursos disponíveis em microcontroladores. A partir da modulação por largura de pulso é possível obter um sinal analógico, mesmo sua saída sendo um sinal digital que pode assumir apenas dois valores: nível lógico alto ou nível lógico baixo. A saída gerada é uma onda quadrada, de frequência constante e largura de pulso variável.

A partir do sinal do PWM de um microcontrolador é possível controlar a tensão média aplicada a uma determinada carga acoplada a sua saída, necessitando apenas de um circuito eletrônico para realizar o elo comando-potência.

2.4 CIRCUITO DE POTÊNCIA

A saída de um microcontrolador libera apenas duas possíveis situações: nível lógico baixo ou nível lógico alto. Em nível lógico baixo, o valor da tensão é 0 V e em nível lógico alto, a tensão é 5 V. A corrente elétrica disponibilizada na saída de um microcontrolador, que é de aproximadamente 20 mA, não é suficiente para acionar uma carga de elevada potência acoplada em seu terminal, necessitando assim, que haja um circuito eletrônico que receba esse valor de corrente de magnitude pequena e acione a carga do sistema.

Para realizar esse elo comando-potência há um dispositivo denominado opto-acoplador, que a partir de um sinal elétrico de comando vindo do microcontrolador é capaz de chavear um diac que por sua vez é usado como sinal do gate de um triac, possibilitando assim que o triac controle a corrente sobre a carga.

A Figura 2 mostra o circuito que fará o elo comando-potência.

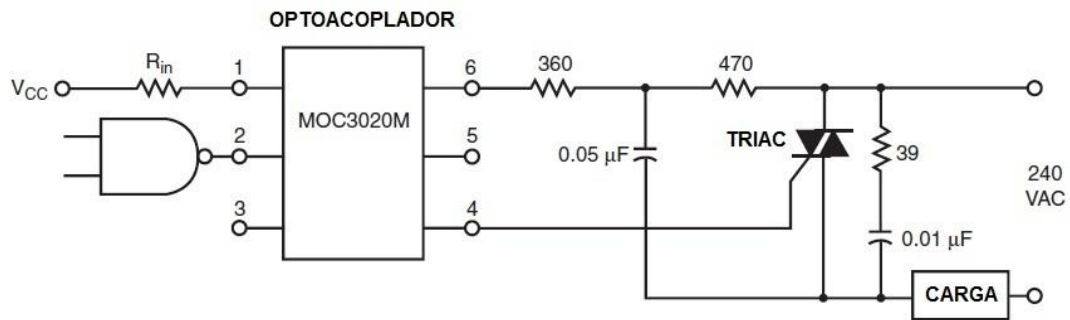


Figura 2 – Circuito comando – potência

Fonte: Adaptado de [14]

2.5 SENSOR DE TEMPERATURA

Para obter o valor da temperatura em um determinado meio, é necessário que um dispositivo interprete essa condição física. Tais dispositivos são denominados sensores de temperatura.

Um sensor de temperatura é um transdutor que, quando submetido a uma mudança de temperatura, fornece uma resposta claramente dependente da temperatura. Todas as propriedades físicas que são influenciadas pela temperatura podem ser usadas para a construção de um sensor de temperatura: a expansão térmica dos gases, líquidos e sólidos, a resistência elétrica de condutores metálicos, a corrente através de condutores metálicos ou semicondutores, a radiação de substâncias brilhantes, a frequência de ressonância de cristais, entre outros [7].

Para a utilização de um sensor de temperatura no interior de uma autoclave, alguns cuidados técnicos devem ser tomados, principalmente pelo fato que muitos dos sensores de temperatura disponíveis no mercado não são apropriados para as altas temperaturas atingidas.

2.6 CONTROLE

Os controladores PID (Proporcional, Integral e Derivativo) são controladores utilizados em sistemas realimentados com larga aplicação em automação industrial

no que diz respeito a controle de processos, visto que em muitos casos não há a necessidade de se conhecer o modelo da planta do sistema. Esses controladores calculam um erro entre o valor medido na saída e o valor desejado para o processo. Assim o controlador age para diminuir o erro que foi gerado, ajustando suas entradas. O cálculo do controlador PID envolve três parâmetros: Proporcional, Integral e Derivativo [8].

Toda a revisão bibliográfica sobre o controle PID, definições, ilustrações e equações, teve como referência OGATA [8].

2.6.1 Diagrama de Blocos

O diagrama de blocos é representação gráfica do sistema a ser controlado cujo objetivo é simplificar a esquematização e mesmo assim continuar a passar a informação que cada elemento presente possui. Através dele pode-se transmitir a função de cada estágio e relacionar cada etapa de interligação entre eles. Os diagramas de bloco são mais fáceis de desenhar do que os circuitos que eles representam. Assim, é possível, mediante a utilização de regras especiais, denominadas “Álgebra dos diagramas de Bloco”, reduzi-los a um único bloco e, finalmente, achar a função de transferência global do problema, sem necessidade de resolver o sistema inicial de equações diferenciais que, algumas vezes, exige muito tempo devido ao elevado número de equações envolvidas. A Figura 3 mostra o diagrama de blocos do sistema a ser controlado.

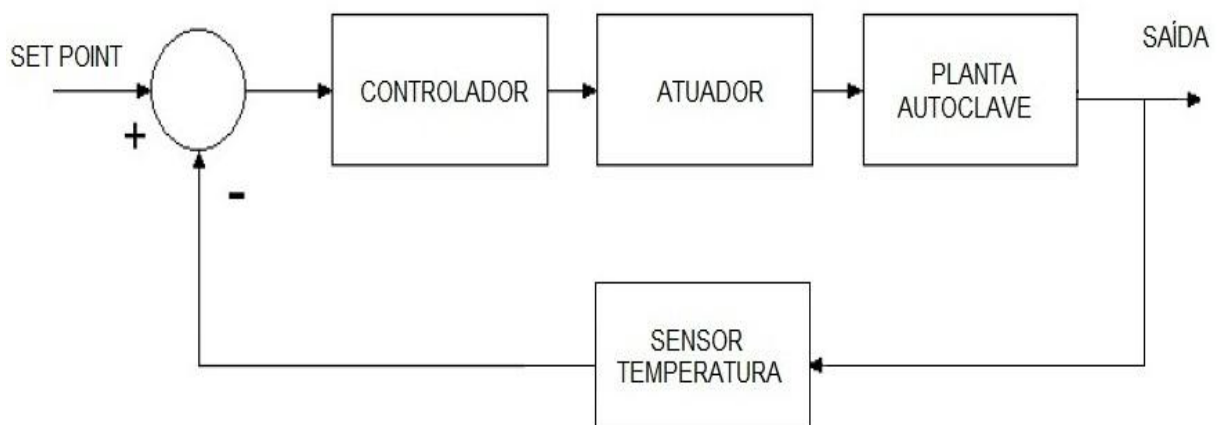


Figura 3 – Diagrama de blocos do sistema a ser controlado

2.6.2 Controle Proporcional

O controlador proporcional (P) é um dos sistemas de controle mais simples, ficando à frente somente do controle *on-off*. Com o controlador proporcional já é possível obter uma melhoria na resposta da saída controlada. Esta forma de controle é basicamente obter o erro do sistema $e(t)$ e aplicar um ganho fixo K_p .

O controle proporcional em um controlador PID gera um valor na saída proporcional ao erro obtido na realimentação. A resposta proporcional pode ser ajustada a partir da constante de ganho. Quanto maior for a constante K_p , maior será o ganho do erro. Mas se a constante K_p for muito pequena, menor será o seu tempo de resposta.

O sinal de controle $u(t)$ que representa um controlador proporcional é dado por:

$$u(t) = k_p e(t) \quad (2.1)$$

A Figura 4 mostra o diagrama de blocos para um sistema com controle proporcional.

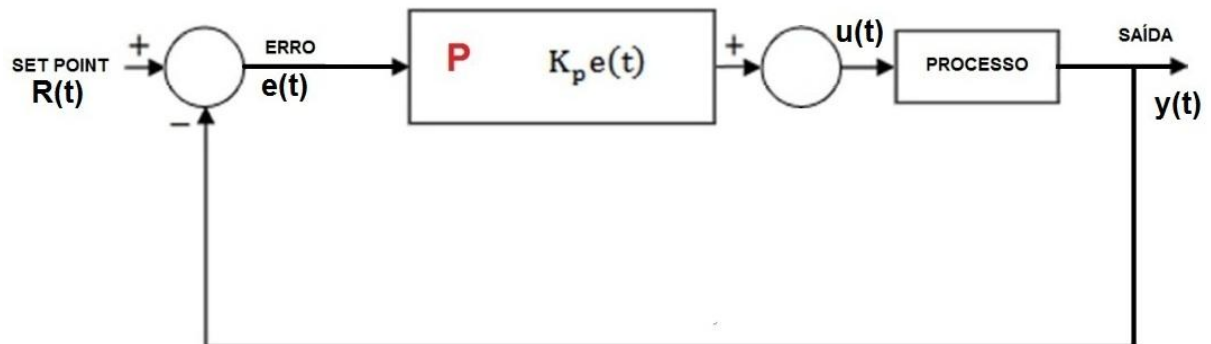


Figura 4 – Diagrama de blocos com o controlador proporcional

A Figura 5 mostra o comportamento da saída em relação a um degrau de entrada de um sistema semelhante ao da autoclave para variações no valor do ganho proporcional K_p . Vemos que o tempo para atingir o regime permanente é menor quanto maior for o valor de K_p .

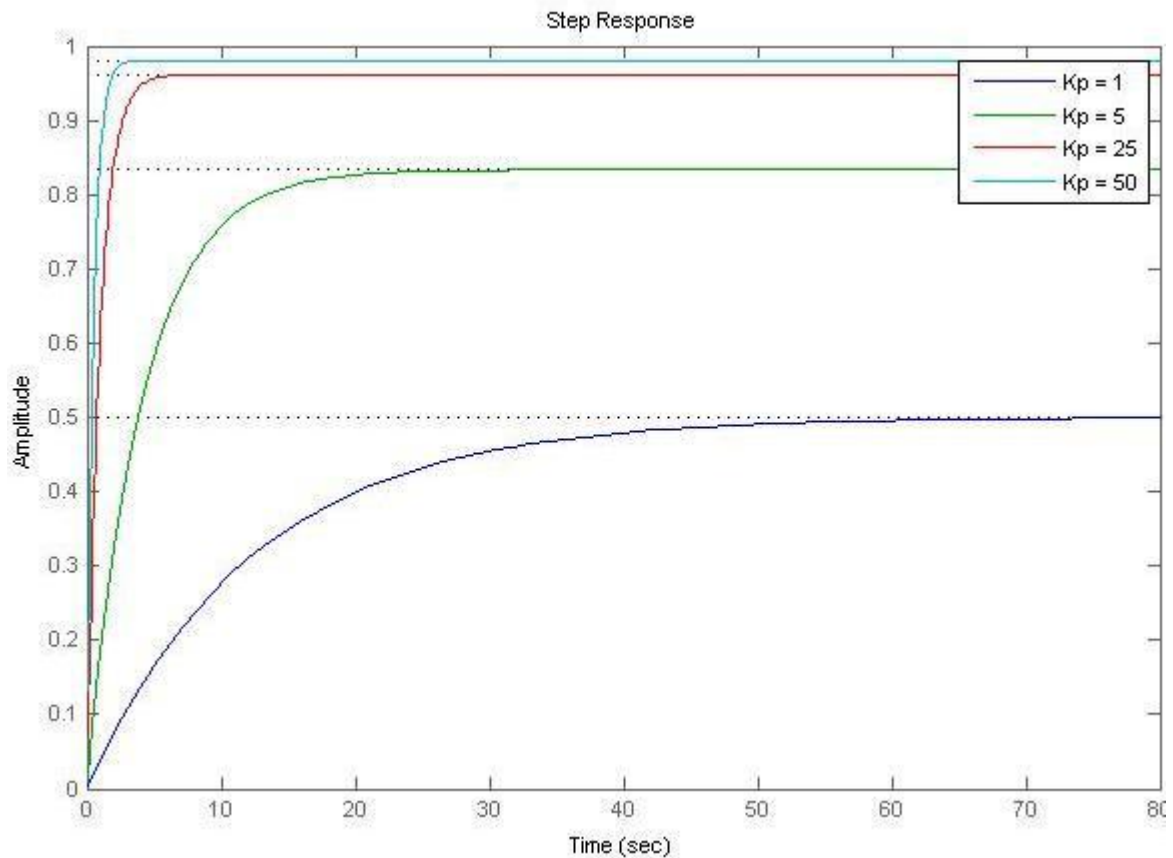


Figura 5 – Resposta a um degrau de entrada para variações de K_p

2.6.3 Controle Proporcional e Integral

O controle integral consiste em aplicar ao sinal de controle $u(t)$ um ganho K_i proporcional à integral do sinal de erro $e(t)$. Esse ganho K_i é a constante ajustável. No controle integral, se o sinal de erro $e(t)$ for aumentado em duas vezes, o valor do sinal de controle $u(t)$ irá variar duas vezes mais rápido, já para erro nulo, o valor do sinal de controle $u(t)$ não será alterado.

Entretanto, o controle integral tende a comprometer a estabilidade do sistema. Como forma de resolver este impasse, o controle integral é aplicado em conjunto com a ação proporcional, constituindo assim o controlador PI (proporcional e integral).

O sinal de controle para o controlador PI é dado por:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.2)$$

A função principal da ação integral é fazer com que processos sigam, com erro nulo, um sinal de referência.

A Figura 6 mostra o diagrama de blocos para um sistema com controle PI.

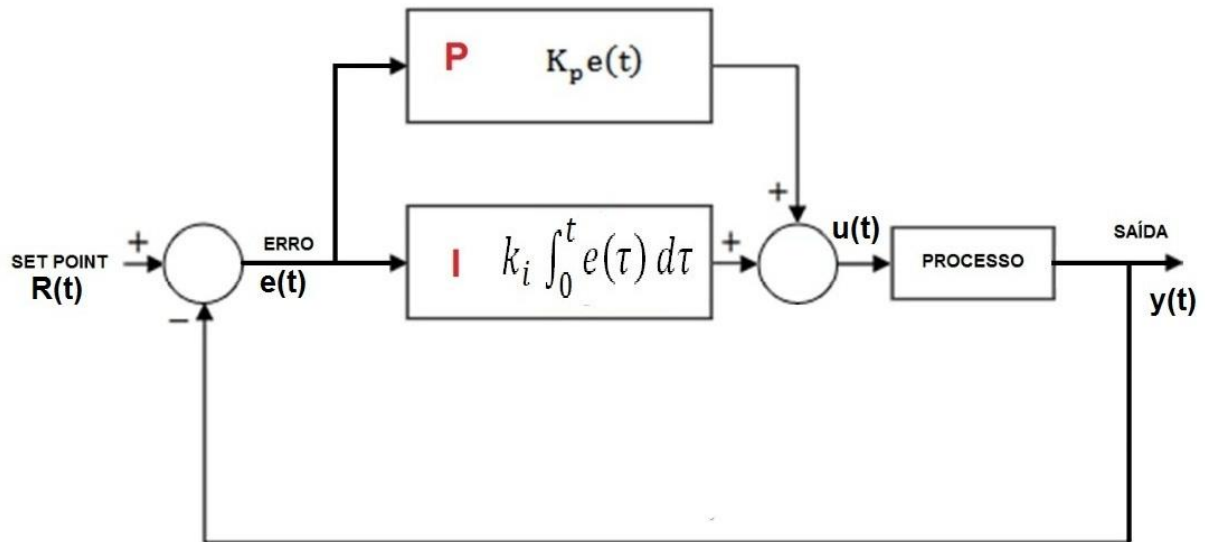


Figura 6 – Diagrama de blocos para o controle PI

2.6.4 Controle Proporcional e Derivativo

A ação de controle derivativa, quando adicionada a um controlador proporcional, propicia um meio de obter um controlador com alta sensibilidade. Uma vantagem em se usar ação de controle derivativa é que ela responde à taxa de variação do erro atuante e pode produzir uma correção significativa antes de o valor do erro atuante tornar-se demasiadamente grande. O controle derivativo, portanto, antecipa o erro atuante e inicia uma ação corretiva mais cedo, tendendo a aumentar a estabilidade do sistema [8].

A saída de um processo apresenta, intuitivamente, certa "inércia" com relação a modificações na variável de entrada. Quando a variável de entrada é modificada, leva-se certo tempo para que a saída sofra uma alteração, como se o sinal de controle estivesse em atraso para corrigir o erro existente. Este fato é responsável por transitórios com grande amplitude e período de oscilação, podendo, em um caso

extremo, gerar respostas instáveis no sistema. A ação derivativa quando combinada com a ação proporcional tem justamente a função de "antecipar" a ação de controle a fim de que o processo reaja mais rápido, antevendo o sinal de erro. Neste caso, o sinal de controle a ser aplicado é proporcional a uma previsão da saída do processo [9].

O sinal de controle para o controlador PD (proporcional e derivativo) é dado por:

$$u(t) = k_p e(t) + k_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.3)$$

A Figura 7 mostra o diagrama de blocos para um sistema com controle PD.

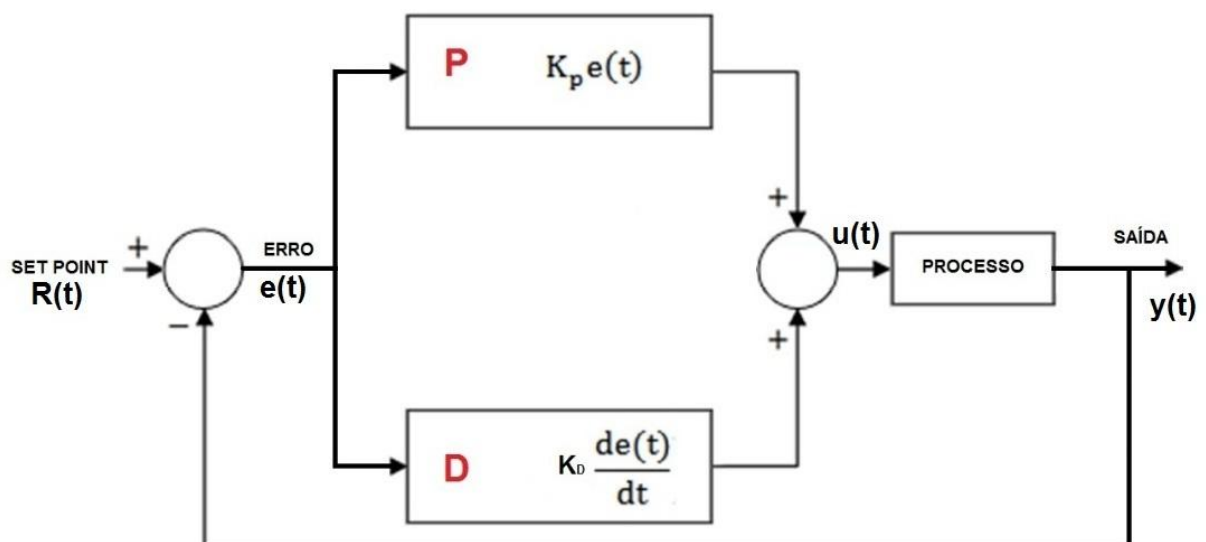


Figura 7 – Diagrama de blocos para o controle PD

2.6.5 Controle Proporcional, Integral e Derivativo

A combinação das técnicas de controle P, PI e PD é conhecida como controle PID, que soma a ação proporcional às ações integral e derivativa.

A ação integral elimina o erro em regime estacionário, pois apresenta um resultado não nulo quando o erro do sistema for nulo. Por outro lado, a ação integral pode introduzir oscilação na resposta devido ao aumento da ordem do sistema. A

ação derivativa antecipa o erro e produz uma ação corretiva antecipadamente e proporcional à taxa de variação do erro atual.

O sinal de controle para o controlador PID é dado por:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.4)$$

A Figura 8 mostra o diagrama de blocos para um sistema com controle PID.

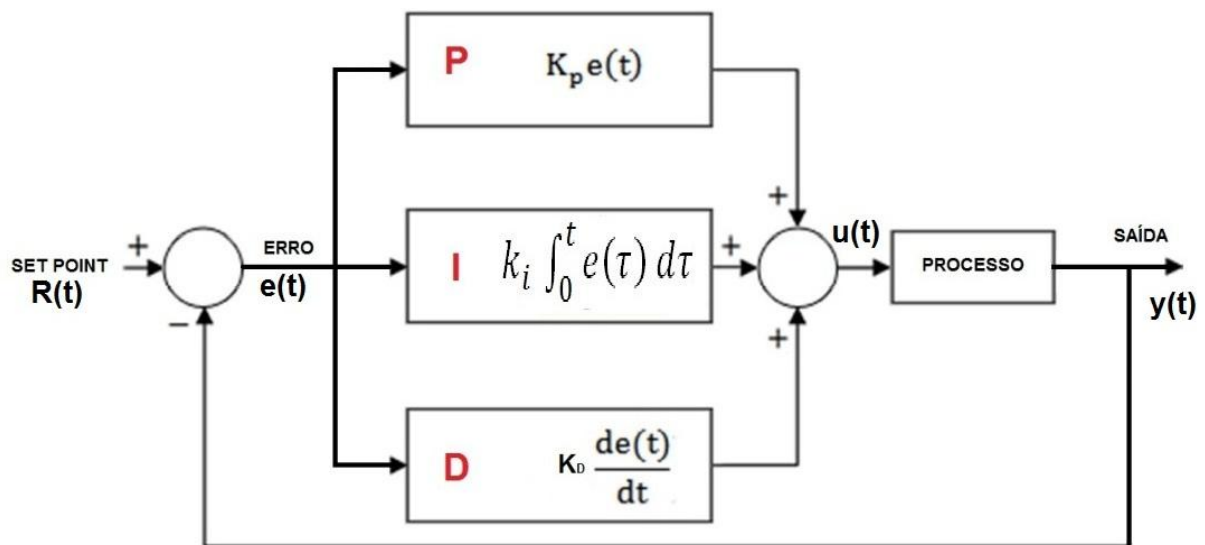


Figura 8 – Diagrama de blocos para o controle PID

2.6.6 Sintonia de Controladores PID

Para a implementação de um controlador PID é necessário obter os valores das constantes K_p , K_i e K_d .

A utilização dos métodos de Ziegles-Nichols para a regulação dos parâmetros de um controlador PID mostra que é possível realizar o controle de um sistema sem conhecer de fato o modelo matemático da sua planta. Um desses métodos, chamado de “curva de reação do processo”, aplicável em sistemas de primeira ordem, analisa a resposta do sistema sem nenhuma ação do controlador, e então, extrai-se da curva os parâmetros que resultarão nos ganhos K_p , K_i e K_d . Outro método, válido para sistemas de segunda ordem ou maior, chamado de “ciclo

máximo”, inicia-se com a análise da resposta do sistema apenas com o controlador proporcional, e em seguida, extrai-se os parâmetros da curva de resposta obtendo os valores de K_p , K_i e K_d [10].

Ziegles-Nichols propuseram regras para a determinação de valores do ganho proporcional K_p , do tempo integral T_i e do tempo derivativo T_d baseadas na característica da resposta temporal de uma dada planta. Com o valor do tempo integral T_i é possível encontrar o ganho integral $K_i = \frac{K_p}{T_i}$ e com o valor do tempo derivativo T_d é possível encontrar o ganho derivativo $K_d = K_p T_d$. Essa determinação dos parâmetros dos controladores PID pode ser feita por meio de experimentos com a planta [8].

Para a realização da sintonia do controlador PID segundo as regras de Ziegles-Nichols, aplica-se na entrada da planta em malha aberta um degrau, como mostra a Figura 9, e obtêm a resposta da planta.

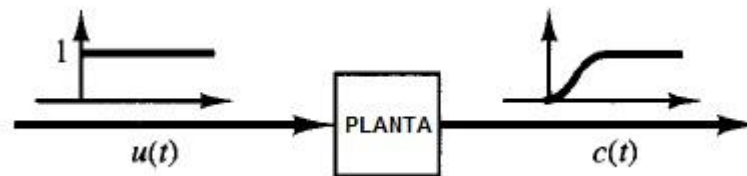


Figura 9 – Resposta ao degrau de uma planta

Fonte: [8]

Se a planta a ser analisada não possuir integradores nem polos complexos conjugados dominantes, então essa curva de resposta ao degrau pode ter o aspecto de um “S” [8]. A Figura 10 mostra a curva obtida.



Figura 10 – Curva de resposta em forma de S

Fonte: [8]

Com a obtenção da curva no formato de S, é possível caracterizar duas constantes: o atraso L e a constante de tempo T . Tais constantes podem ser obtidas traçando uma linha tangente no ponto de inflexão da curva, conforme indicado na Figura 8, e determinando a intersecção da linha tangente com o eixo dos tempos e a linha $c(t) = K$.

A função de transferência $\frac{C(s)}{U(s)}$ pode ser aproximada por um sistema de primeira ordem com um atraso de transporte, como se segue [8]:

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-Ls}}{Ts+1} \quad (2.5)$$

Ziegles-Nichols sugeriram escolher os valores de K_p , T_i e T_d conforme Tabela 1.

Tabela 1: Regra de sintonia de Ziegles-Nichols baseada na resposta ao degrau da planta

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

2.7 PID DIGITAL

A aplicação de um controle PID em um microcontrolador exige a dedução da equação (2.4) para um formato digital, adotando algumas aproximações nos termos derivativo e integral. Tal dedução se faz necessária porque a equação do PID é bastante complexa e quando executada em tempo real durante o processo de controle exige muito processamento, o que não é suportado pelos controladores comerciais destinados à referida tarefa.

Existem várias maneiras para aproximação digital de uma equação em tempo discreto, objetivando a obtenção final da equação das diferenças a ser implementada no microcontrolador. Neste trabalho será apresentado o método de Euler para a parcela derivativa e a transformação de Tustin para a parcela integral.

2.7.1 Aproximação da derivada pelo método de Euler

Uma das técnicas mais comuns para fazer estas aproximações consiste na estratégia de derivação por emulação. Nela a primeira derivada no tempo de uma função é aproximada por uma diferença no tempo conforme a equação [11]:

$$\frac{de(t)}{dt} \cong \frac{e(kT) - e(kT - T)}{T} \quad (2.6)$$

Sendo:

T : período de amostragem;

$e(kT)$: valor do erro no instante atual;

$e(kT - T)$: valor do erro no instante de amostragem anterior ao atual.

Um segurador de ordem zero (ZOH) mantém o sinal amostrado constante durante o período de amostragem. A Figura 11 mostra o resultado da aproximação, comparando o sinal analógico $u(t)$ com o sinal $u(t)$ com ZOH.

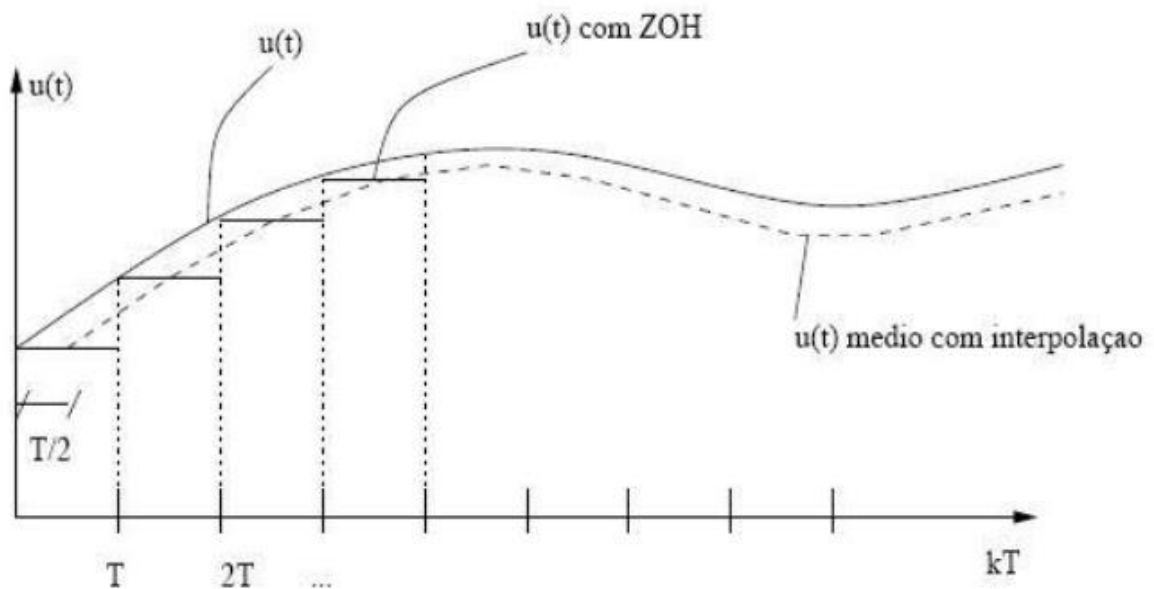


Figura 11 – Aproximação pelo método de Euler

Fonte: [11]

2.7.2 Aproximação da integral pela transformação de Tustin

Esta aproximação consiste na aproximação da integral pela regra trapezoidal, conforme equação [11].

$$\int_0^{kT} e(t)dt = \int_0^{kT-T} e(t)dt + \int_{kT-T}^{kT} e(t)dt \quad (2.7)$$

Ao aplicar a regra, aproxima-se $\int_0^{kT-T} e(t)dt$ no intervalo T e definiu-se $u(kT)$ como a área acumulada dos trapézios até o instante kT , logo:

$$u(kT) = u(kT - T) + \frac{e(kT-T) + e(kT)}{2} T \quad (2.8)$$

A Figura 12 mostra a aproximação por Transformada de Tustin.

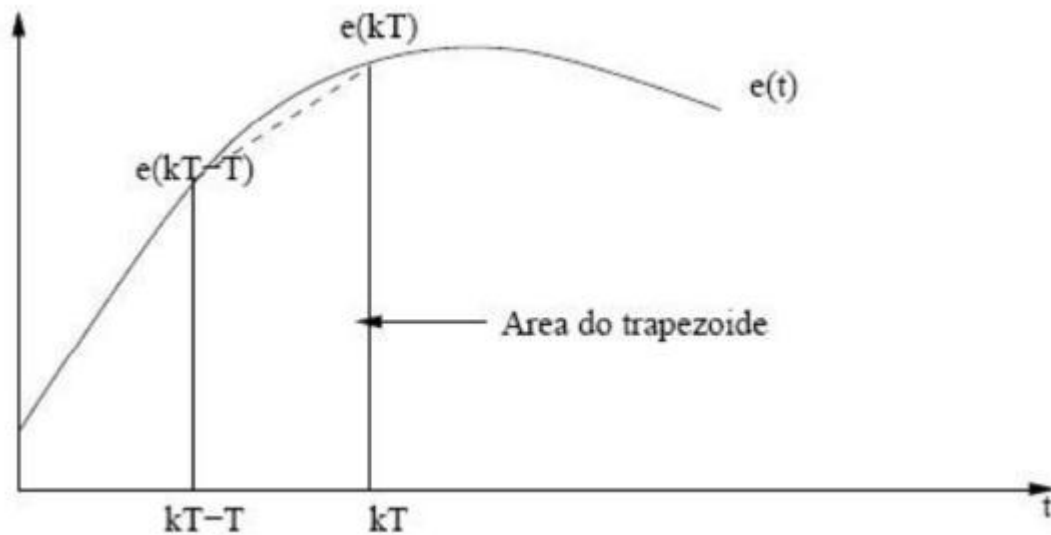


Figura 12 – Aproximação pela Transformada de Tustin

Fonte: [11]

2.7.3 Equação Final do PID Digital

Realizadas as aproximações das parcelas integral e derivativa, o controle PID pode ser implementado para utilização com microcontrolados conforme equação [11].

$$u(t) = k_p e(t) + u_i(kT - T) + k_i \frac{e(kT) + e(kT-T)}{2} T + k_d \frac{e(kT) - e(kT-T)}{T} \quad (2.9)$$

Onde:

k_p : ganho proporcional do sistema;

$u_i(kT - T)$: valor da ação integral no instante anterior ao instante atual do sistema;

k_i : ganho integral do sistema;

$e(kT)$: erro atual do sistema;

$e(kT - T)$: erro no instante anterior ao instante atual do sistema;

T : período de amostragem do sistema;

k_d : ganho derivativo do sistema;

$u(t)$: sinal de entrada no sistema.

2.8 CONCLUSÃO PARCIAL

Por fim, com base no que foi discutido ao longo de revisão, decidiu-se analisar o comportamento da autoclave a fim de se obter a sua função de transferência e suas características técnicas de funcionamento, como corrente elétrica e potência consumida.

Diante do que fora apresentado, decidiu-se implementar um controlador PID visto que o mesmo possui características desejáveis quanto a sistemas de controle.

Em relação aos dispositivos eletrônicos escolhidos para serem utilizados na implementação da automação da autoclave, os que valem ressaltar são o microcontrolador PIC16F877A, por possuir as características das quais serão necessárias para o projeto, como conversor Analógico / Digital, PWM, Timer entre outras, o sensor de temperatura AD22100KTZ por suportar altos níveis de temperatura atingidos na autoclave, o optoacoplador MOC3020M e o TRIAC BTB-40 por suportarem correntes em níveis necessários para o funcionamento da autoclave.

Com isso, decidiu-se confeccionar em placa de circuito impresso a fonte para o funcionamento do circuito de controle, a placa para o circuito comando-potência e a placa de controle onde se encontrará o microcontrolador.

3 ANÁLISE DO SISTEMA A SER CONTROLADO – A AUTOCLAVE

Para a realização da automação do processo de esterilização da autoclave vertical é de fundamental importância conhecer a dinâmica dos sistemas envolvidos para saber qual a melhor maneira de agir sobre eles.

3.1 A FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

Funções de transferências de primeira ordem descrevem muito bem a dinâmica dos sistemas térmicos, ou seja, tais sistemas tem comportamento de primeira ordem.

Sendo a função de transferência de primeira ordem

$$H(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \cdot e^{-\theta s} \quad (3.1)$$

a constante K é o valor do ganho do sistema, τ é a constante de tempo. Esta constante de tempo caracteriza a velocidade com que o sistema responde a uma entrada [12].

Ao aplicarmos um degrau de amplitude A e a resposta do sistema for medida, podemos determinar os valores das duas constantes presentes na equação 3.1. O valor da constante K , ou seja, o valor do ganho do sistema, pode ser definida pela regra:

$$K = \frac{y(\infty) - y(0)}{A} \quad (3.2)$$

Onde $y(0)$ é o valor da função no instante inicial, ou seja, o valor da temperatura ambiente em que se encontra o sistema térmico a ser analisado, neste caso, a autoclave. Já $y(\infty)$ é o valor da função em regime permanente, ou seja, a temperatura na qual o sistema permanece estável ao degrau de entrada.

Utilizando a resposta ao degrau de entrada é possível encontrar, também, o valor da constante de tempo τ , que é definida como o tempo que o sistema precisa para se alcançar 63,2% da variação máxima do degrau aplicado, conforme equação

$$y(\tau) = 0,632 (y(\infty) - y(0)) + y(0). \quad (3.3)$$

A fim de se obterem as constantes anteriormente mencionadas, foi aplicado um degrau de 324 W na autoclave obtendo como resposta o gráfico da Figura 13.

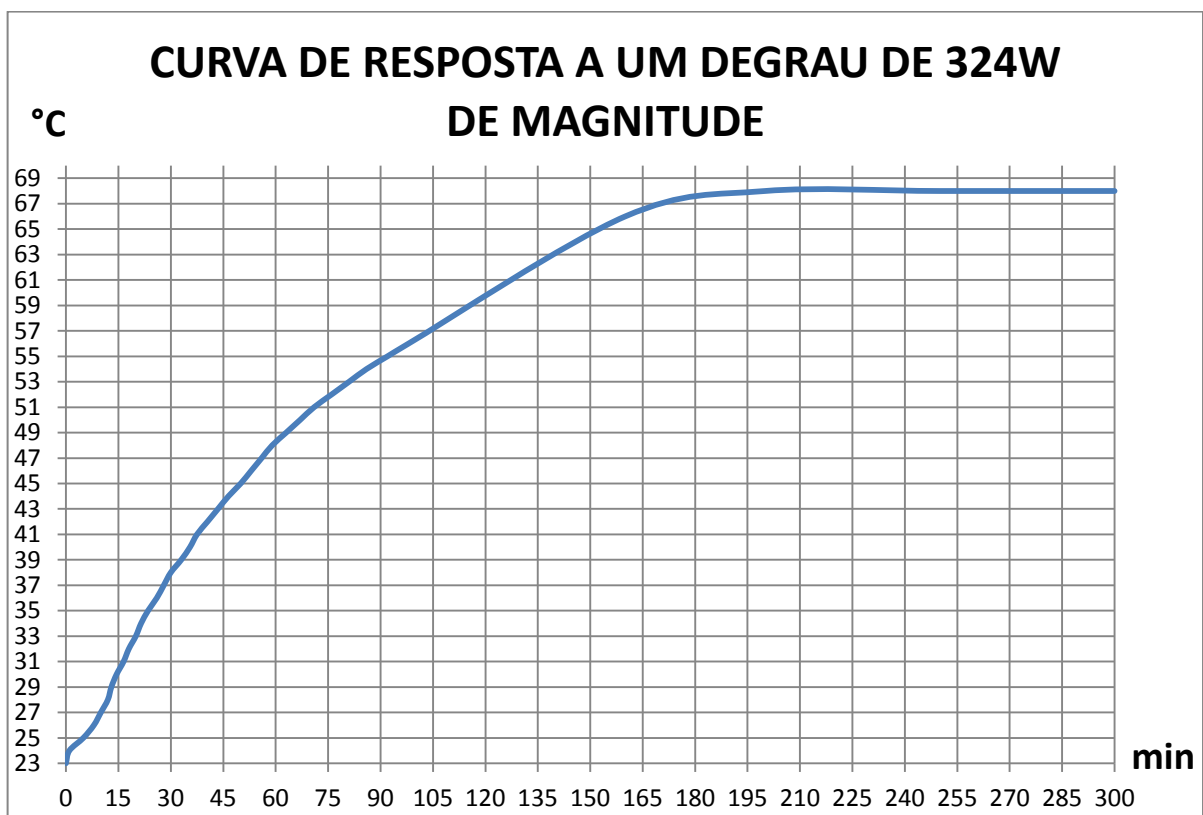


Figura 13 – Resposta do sistema ao degrau de 324 W

Onde se pode constatar que $y(0) = 23^{\circ}\text{C}$ e $y(\infty) = 68^{\circ}\text{C}$. Logo o valor de K pode ser encontrado conforme equação 3.2.

$$K = \frac{y(\infty) - y(0)}{A} = \frac{68 - 23}{324} = 0,14 \quad (3.4)$$

Já o valor da constante de tempo τ pode ser encontrada a partir da equação 3.3.

$$y(\tau) = 0,632(68 - 23) + 23 = 51,44\text{ °C} \quad (3.5)$$

Onde 51,44°C corresponde a 4260 segundos, ou seja, 71 minutos.

Assim a função de transferência para o sistema analisado pode ser escrita por

$$H(s) = \frac{K}{\tau s + 1} = \frac{0,14}{4260s + 1} \quad (3.6)$$

Com estes resultados, principalmente com o valor da constante de tempo $\tau = 4260$ segundos, fica evidente que o sistema térmico analisado possui uma dinâmica muito lenta o que pode fazer com que seja preciso alguns cuidados especiais.

3.2 ESTUDO DA DINÂMICA DO SENSOR E DA AUTOCLAVE

Quando se utiliza um sensor para medir uma grandeza, espera-se que o mesmo possa representar com confiabilidade o valor real da grandeza medida sem interferir no sistema. Mas, sabemos que não existe sensor ideal e por isso precisamos escolher um modelo que atenda à nossa necessidade e que seja o mais próximo possível do ideal.

Para este trabalho, determinou-se a utilização do sensor AD22100KTZ por suportar as altas temperaturas atingidas em uma autoclave. A Figura 14 mostra este sensor.



Figura 14 – Sensor de temperatura AD22100KTZ

Fonte: [13]

Para comprovar a eficiência desse sensor nesta aplicação, o mesmo foi submetido a uma temperatura de 100°C no interior da autoclave e após atingir esta temperatura, o mesmo foi retirado e deixado exposto à temperatura ambiente para verificar quanto tempo levaria para indicar este novo valor. O gráfico que mostra este comportamento está na Figura 15.

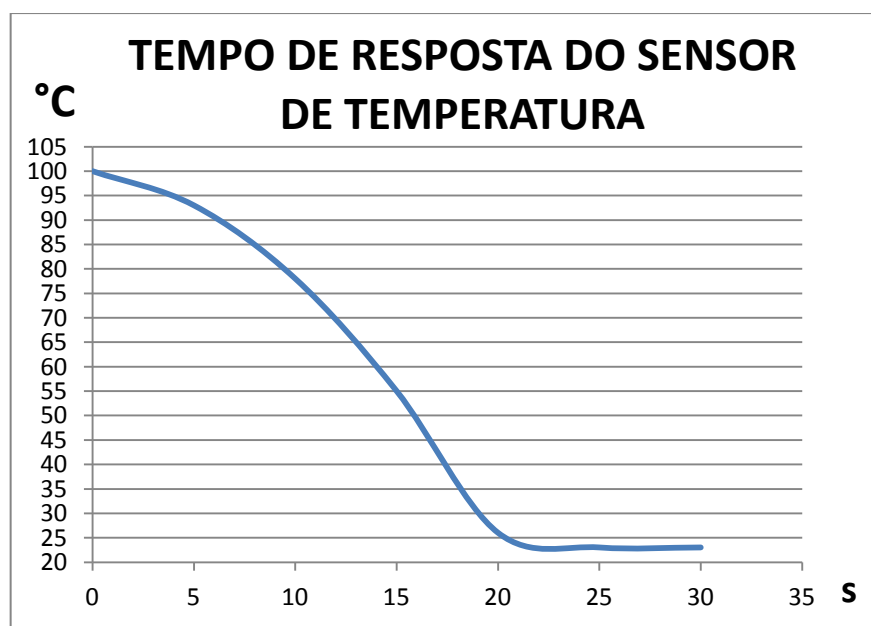


Figura 15 – Degrau de temperatura para o sensor AD22100KTZ

O mesmo procedimento foi realizado com a autoclave, ou seja, esta foi submetida a 100°C e, após estabilizar neste valor, foi deixada sem qualquer forma de alimentação em suas resistências até atingir a temperatura ambiente. O gráfico que mostra este comportamento está presente na Figura 16.

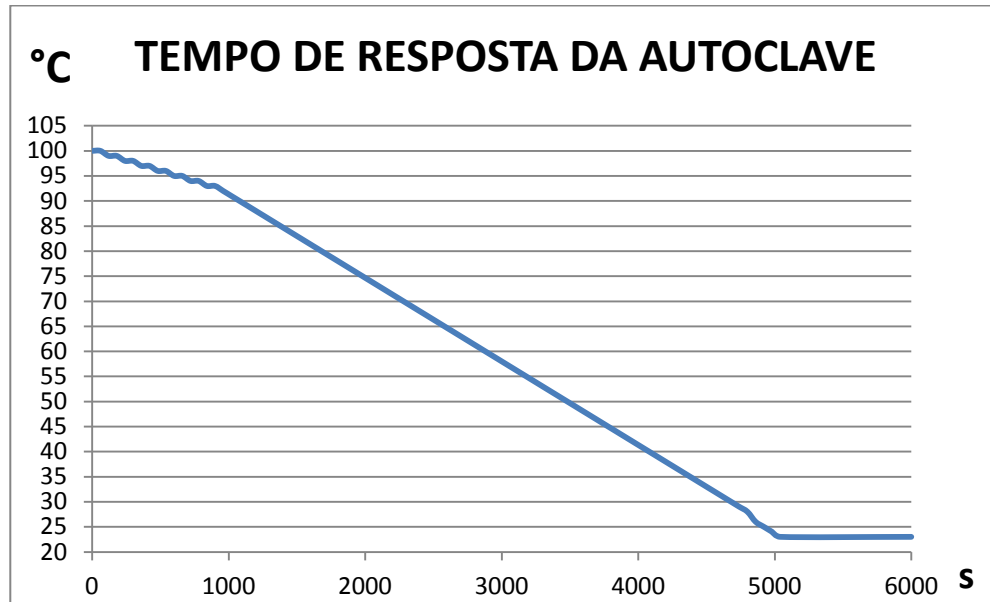


Figura 16 – Degrau de temperatura para a autoclave

Ao analisarmos as Figuras 15 e 16 podemos constatar que o tempo que o sensor leva para estabilizar na temperatura ambiente após estar submetido a 100°C é de aproximadamente 25 segundos, já o tempo que autoclave leva para o mesmo procedimento é de aproximadamente 5040 segundos, ou seja, um tempo de aproximadamente 200 vezes maior que o tempo do sensor. Com este procedimento, é possível afirmar que quando há uma mudança de temperatura na autoclave, o sensor acusa quase que imediatamente esta variação, se comparado com o tempo que a autoclave leva para acusar. Portanto, pode-se concluir que é viável a utilização deste sensor para capturar a temperatura por ser muito mais rápido que a autoclave, não interferindo assim no sistema de controle.

3.2 O CONTROLE PID – SINTONIA E UTILIZAÇÃO EM MICROCONTROLADORES

A utilização do controle PID ocorre com a utilização da equação 2.4 no sistema a ser controlado. Porém, nessa equação se encontram algumas constantes que precisam ser determinadas: K_p , K_i e K_d . Conforme visto na seção “2.5.6 *Sintonia de Controladores PID*”, Ziegles-Nichols propuseram um método para extrair essas constantes do sistema.

Segundo a proposta de Ziegles-Nichols, para sistemas de primeira ordem podemos utilizar a Tabela 1 para encontrar o valor dessas constantes, desde que se tenham os valores da constante de tempo T e do atraso de transporte L .

Conforme visto na seção “3.1 A FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA” mais especificadamente na Figura 13, temos a constante de tempo $T = 4260$. Por se tratar de um sistema térmico, não há o atraso de transporte L , porém, nesta aplicação fora considerado um atraso no sensoriamento do sistema, sendo este muito pequeno em relação a constante de tempo, algo em torno de 30 segundos.

Logo, com esses valores e com a Tabela 1 podemos encontrar:

$$K_p = 1,2 \frac{T}{L} = 1,2 \frac{4260}{30} = 170,4 \quad (3.7)$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{170,4}{2L} = \frac{170,4}{2 \cdot 30} = 2,84 \quad (3.8)$$

$$K_d = K_p T_d = K_p \frac{L}{2} = \frac{170,4 \cdot 30}{2} = 2556 \quad (3.9)$$

Embora os valores dessas constantes foram encontrados através dos equacionamentos anteriormente descritos, elas apenas serviram de referência para uma série de ajustes em seus valores, pois durante a implementação do controlador verificou-se a necessidade de alterações para resultados mais satisfatórios.

Conforme visto na seção “2.6.3 *Equação Final do PID Digital*” e mais especificadamente na Equação 2.9, o controle PID pode ser implementado em um sistema a ser controlado via microcontrolador. Para tanto, a fim de facilitar a

implementação da equação no *firmware* de controle e o entendimento do comportamento da equação, algumas substituições foram realizadas nas constantes presentes na equação.

$$A_i = \frac{k_i.T}{2} \quad (3.10)$$

$$A_d = \frac{k_d}{T} \quad (3.11)$$

Onde A_i é a constante da ação integral da equação e A_d é a constante da ação derivativa. Assim a equação a ser implementada no *firmware* de controle passa a ser:

$$u(t) = k_p e(t) + u_i(kT - T) + A_i \cdot [e(kT) + e(kT - T)] + A_d \cdot [e(kT) - e(kT - T)] \quad (3.12)$$

3.3 UTILIZAÇÃO DO PWM

O PWM é a alteração da largura do pulso de um sinal de onda quadrada que pode controlar a potência fornecida a uma carga [14].

A Figura 17 mostra como é possível através do PWM controlar a potência fornecida a uma carga.

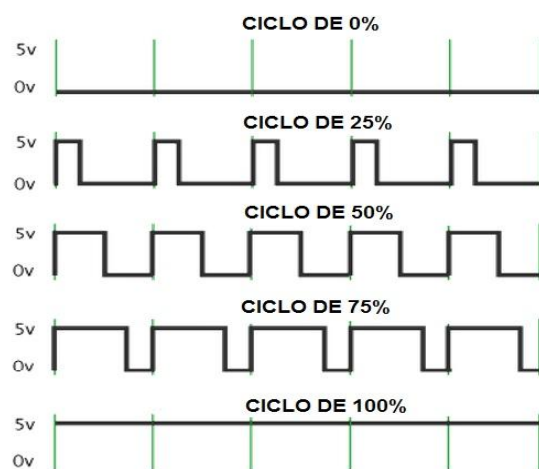


Figura 17 – Modulação por largura de pulso

Fonte: Adaptado de [14]

Como mostra na Figura 17 é possível controlar a tensão elétrica nas resistências da autoclave através do ciclo ativo do PWM necessitando apenas de um circuito que receba este sinal de comando e acione o circuito de potência conforme será descrito na Seção 4.3.

Os microcontroladores da serie PIC16F877A possui internamente a função PWM. O período do PWM é definido pela equação:

$$PWM = \frac{1}{clock} * 4 * t2_div * (periodo + 1) \quad (3.13)$$

Como o cristal utilizado tem frequência de 16MHz (*clock*), *t2_div* pode assumir apenas os valores de 1, 4 ou 16 e o *período* varia entre 0 e 255, o maior valor de período para o PWM fica em torno de 1ms. Com este período, a frequência é de 1KHz, o que é muito elevada e desnecessária para a aplicação nas resistências da autoclave.

Para resolver este impasse, foi elaborado um PWM via programação. Utilizando as interrupções por estouro do timer 0, foi possível desenvolver uma modulação por largura de pulso com período de 2 segundos, período este considerado ideal para esta aplicação.

O microcontrolador PIC16F877A divide internamente a frequência de oscilação do cristal por 4. Logo ao utilizar um cristal de 16 MHz:

$$clock = \frac{freq.cristal}{4} = \frac{16000000}{4} = 4 \text{ MHz} \quad (3.14)$$

Em microcontroladores há um divisor da frequência de oscilação do clock definido como *prescaler*, ou seja, pode-se reduzir o valor do *clock* para valores mais apropriados à aplicação desejada. Definindo o *prescaler* como 64:

$$Freq.Prescaler = \frac{clock}{prescaler} = 62500 \text{ Hz} \quad (3.15)$$

$$Tempo \text{ entre incrementos} = \frac{1}{Freq.Prescaler} = 16 \mu s \quad (3.16)$$

Sendo o timer 0 um contador de 8 bits, temos que seu estouro acontece a cada 256 incrementos, logo:

$$\begin{aligned} \textit{tempo entre interrupções} &= \textit{tempo entre incrementos} * 256 = \\ 16 \mu .256 &= 4,096 \textit{ ms} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Isso significa que a cada interrupção se passaram 4,096 ms. Logo, ao contarmos a quantidade de interrupções, é possível obter com precisão os valores de tempo necessários ao PWM. Como o período desejado é de 2 segundos, basta contarmos até atingir 488 interrupções que terá se passado 1,999 segundos.

4 DESENVOLVIMENTO PRÁTICO DOS CIRCUITOS ELETRÔNICOS PARA A REALIZAÇÃO DA AUTOMAÇÃO

A realização da automação da autoclave vertical exige que alguns circuitos eletrônicos sejam confeccionados. Nas seções 4.1 a 4.3 estão descritos detalhadamente cada um desses circuitos.

4.1 FONTE DE ALIMENTAÇÃO

O microcontrolador PIC16F877A necessita para o seu funcionamento uma tensão contínua de 5 V e alguns poucos miliamperes. Portanto, uma placa de circuito impresso foi confeccionada com o circuito da Figura 18.

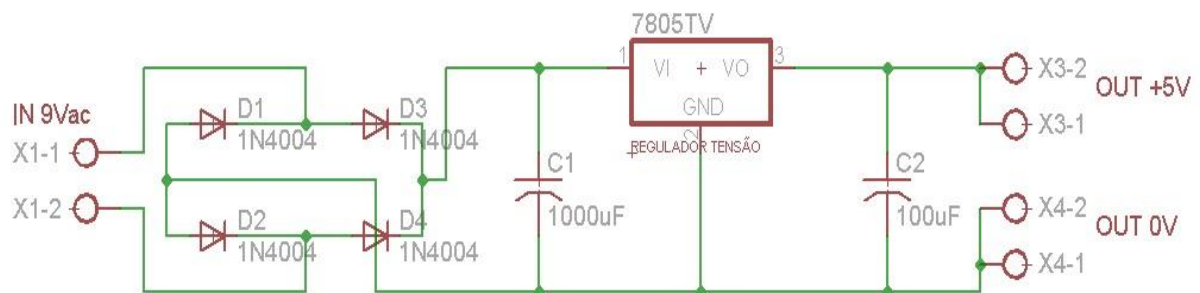


Figura 18 – Circuito para fonte de alimentação 5 V

Com o circuito da Figura 18, a placa de circuito impresso ficou disposta conforme a Figura 19.

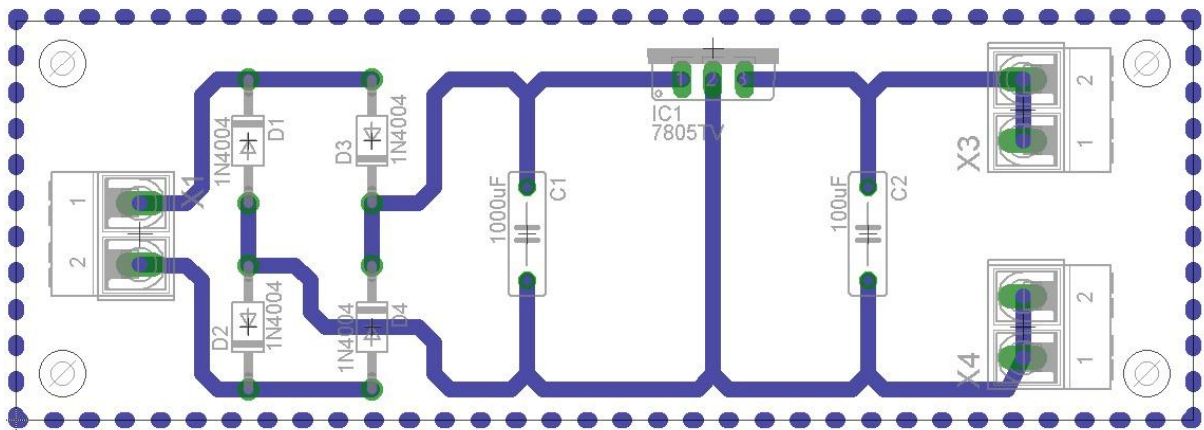


Figura 19 – Disposição da fonte de alimentação 5 V

Na Figura 18, que mostra o circuito da fonte de alimentação, não está mostrado o transformador que fará o rebaixamento de 127 V para 9 V. Este transformador ficou separado da placa onde os terminais do primário serão conectados à rede elétrica 127 V – 60 Hz e os terminais do secundário serão conectados nos conectores X1-1 e X1-2 da placa da fonte de alimentação 5 V.

4.2 CIRCUITO PARA O FUNCIONAMENTO DO MICROCONTROLADOR, TECLADO ALFANUMÉRICO E DISPLAY DE LCD

O microcontrolador PIC16F877A necessita para seu funcionamento, além da fonte de alimentação de 5 V, dois capacitores para serem utilizados juntamente com o cristal.

Juntamente com o circuito para a utilização do microcontrolador, foi confeccionado o circuito para a utilização do sensor de temperatura, do teclado alfanumérico e do display de LCD. A Figura 20 mostra todos estes circuitos que foram confeccionados em uma única placa.

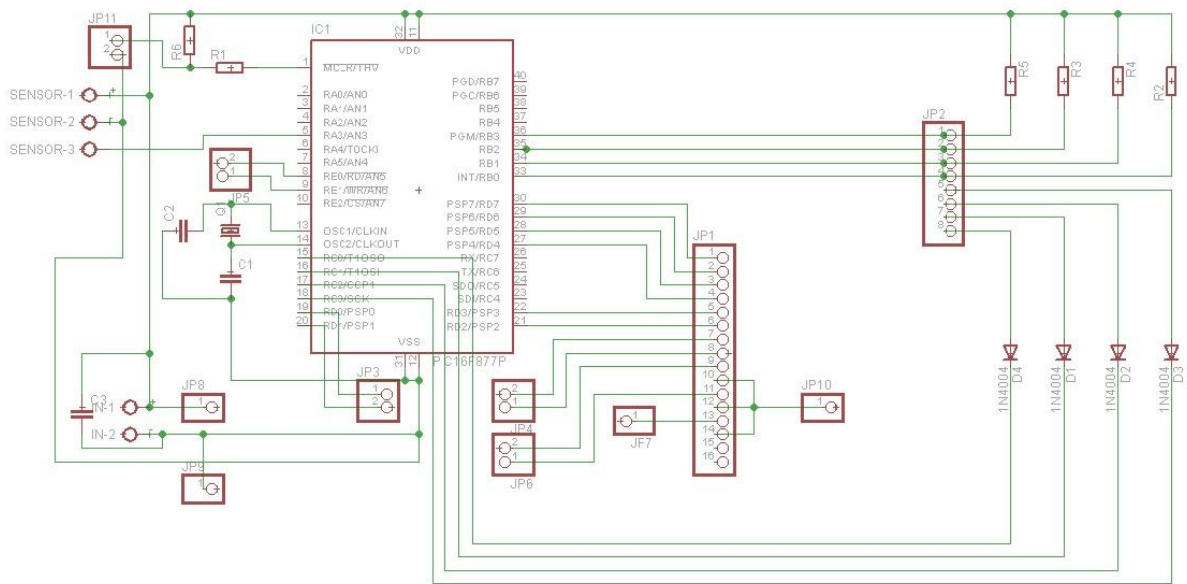


Figura 20 – Circuito central de controle – microcontrolador, LCD, teclado e sensor de temperatura

A Figura 21 mostra a placa de circuito impresso com o circuito central de controle.

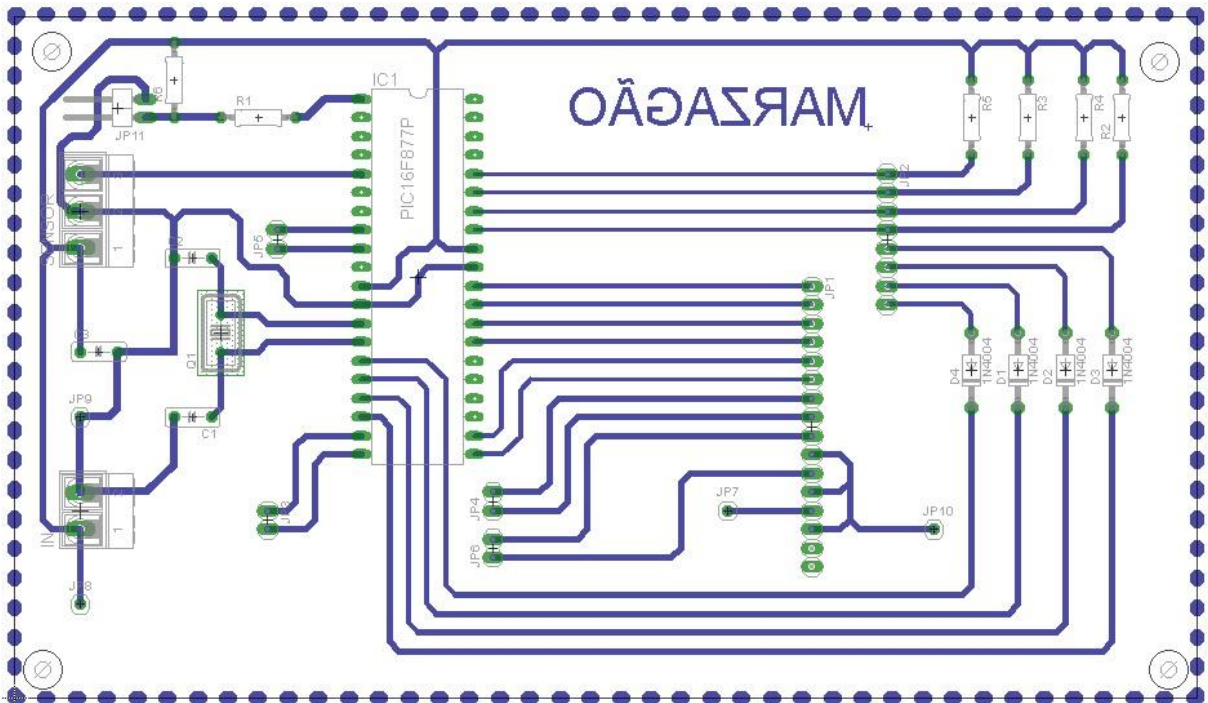


Figura 21 – Disposição da placa central de controle – microcontrolador, LCD, teclado e sensor de temperatura

4.3 CIRCUITO DE COMANDO-POTÊNCIA

Para realizar o elo comando - potência foi utilizado o circuito conforme Figura 22.

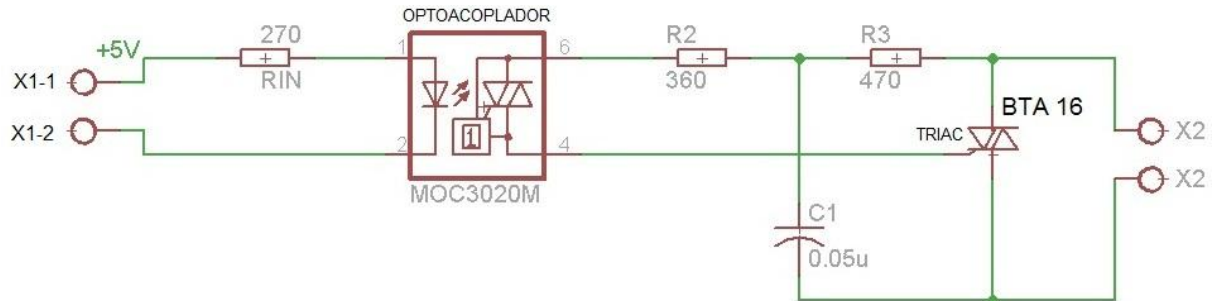


Figura 22 – Circuito eletrônico comando – potência

Fonte: Alterado de [14].

Neste circuito, o sinal oriundo do PWM do microcontrolador é injetado no terminal “X1-2”. Todas as vezes que este sinal estiver em nível lógico baixo, ou seja, 0 volts, uma corrente elétrica irá circular pelo terminal de entrada do optoacoplador fazendo com que o mesmo comute seu diac interno. Quando isto ocorre, o terminal de gatilho do triac é alimentado e a carga passa a receber a tensão elétrica da rede. Com isso é possível controlar o tempo que a carga recebe tensão elétrica e conseqüentemente, a tensão média ao longo de um período, fazendo com que seja possível controlar a tensão da autoclave com este circuito de controle.

A Figura 23 mostra a placa de circuito impresso do circuito eletrônico de comando – potência.

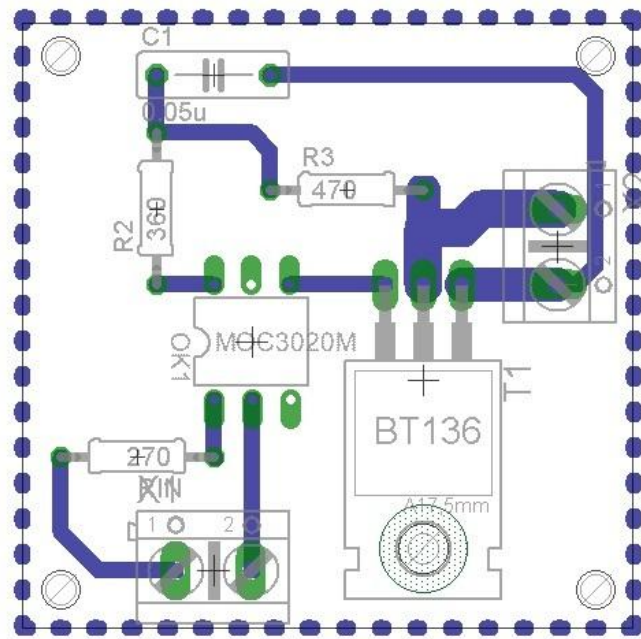


Figura 23 – Disposição do circuito eletrônico comando – potência

6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção será apresentado o estudo do comportamento da dinâmica de funcionamento da autoclave antes e depois do processo de automação. Após apresentado estes dois estudos, uma conclusão a respeito também será apresentada.

6.1 ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA DINÂMICA DE FUNCIONAMENTO DA AUTOCLAVE ANTES DO PROCESSO DE AUTOMAÇÃO

Para uma análise do sistema depois de realizada a automação do mesmo e utilizando o método de controle PID, fez-se anteriormente, um levantamento do comportamento da autoclave. Como já mencionado neste trabalho, o processo de controle ocorria de forma manual, ou seja, com a presença de um operador para gerenciar as etapas do processo. O método de controle utilizado nas resistências da autoclave era o “*on-off*”.

O resultado desse levantamento é mostrado na Figura 24.

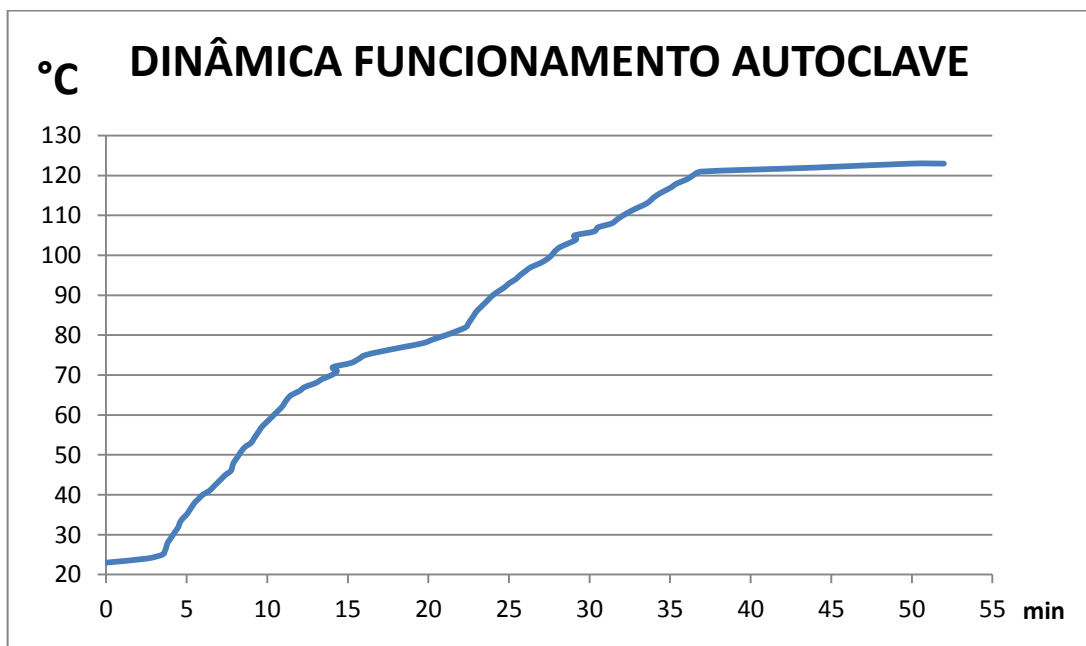


Figura 24 – Dinâmica da autoclave antes da automação

Conforme pode ser observado na Figura 24, a temperatura inicial do processo, ou seja, a temperatura ambiente no momento dessa coleta de dados era de 23°C. O tempo que a autoclave demorou a atingir os 121°C necessários para o início do processo de esterilização foi 2216 segundos, ou seja, aproximadamente 37 minutos. Após atingir essa temperatura, conforme já explicado na seção “1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA”, uma das resistências em paralelo é retirada do circuito e a dissipação de potência passa ser menor. Mesmo com essa menor dissipação de potência, podemos verificar no gráfico da Figura 24, a temperatura no interior da autoclave sofreu uma variação de 2°C até o fim do tempo para um processo de esterilização, atingindo 123°C.

6.2 ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA DINÂMICA DE FUNCIONAMENTO DA AUTOCLAVE APÓS O PROCESSO DE AUTOMAÇÃO

Após o desenvolvimento de todas as etapas para o funcionamento do sistema de controle, deu-se início aos testes práticos do processo de automação da autoclave.

Devido à dinâmica lenta do processo de esterilização, ou seja, leva-se muito para a autoclave atingir a temperatura desejada e a oscilação depois de atingido o *set-point* também ocorrer de forma muito lenta, iniciou-se o controle do processo somente com o controlador PI, desprezando assim a parcela derivativa.

Devido ao alto valor da corrente elétrica consumida pela autoclave quando está operando em sua potência máxima, cerca de 13 A, a primeira verificação do funcionamento do sistema de controle ocorreu com a mesma em sua configuração mínima, ou seja, com as duas resistências colocadas em série, o que consome aproximadamente 3,4 A. O *set-point* para fins de acelerar o processo de testes, já que a autoclave não estaria operando em sua potência máxima, também sofreu alteração, sendo seu valor configurado para 65°C.

Com esta configuração de *set-point*, realizou-se via *firmware* de controle um intervalo para o início do controle PI, ou seja, enquanto a temperatura for menor que 63°C, as resistências da autoclave são ligadas de forma permanente, sem nenhuma

ação do controle PI. Assim que essa temperatura for atingida, o nível de tensão nas resistências da autoclave e conseqüentemente o calor gerado passa a ser controlado pelo controlador PI. Como o sistema de controle de temperatura da autoclave não permite a retirada de calor, sempre que a saída do controlador, oriunda do cálculo da Equação 3.12, receber um valor menor que zero, o que na teoria seria a implementação de um sistema para a retirada de calor do interior da autoclave, as resistências simplesmente passam a não mais receber tensão elétrica, ou seja, são desligadas.

Em relação à utilização das Equações 3.10 e 3.11 no sistema de controle, primeiro foi preciso definir as constantes:

$$T = 2$$

$$K_p = 100$$

$$K_i = 1$$

$$K_D = 0$$

Logo o resultado das Equações 3.10 e 3.11 assim ficaram:

$$A_i = \frac{k_i \cdot T}{2} = 1$$

$$A_d = \frac{k_d}{T} = 0$$

O tempo de amostragem foi definido como sendo 2 segundos por ser suficientemente adequado para o correto funcionamento da função PWM desenvolvida via *firmware*. Já os valores de K_p e K_i foram determinados a partir das Equações 3.7 e 3.8, que apenas serviram de base para a determinação dos valores definidos de forma empírica que melhor atendessem a necessidade desta automação.

Logo a Equação 3.12 foi assim implementada no *firmware* de controle:

$$u(t) = 100 e(t) + u_i(kT - T) + [e(kT) + e(kT - T)] \quad (6.1)$$

Nota-se que a parcela derivativa do controle PID foi ignorada devido ao comportamento da dinâmica do processo a ser controlado não exigir tal implementação – sistema térmico de primeira ordem com elevada constante de tempo.

A Figura 25 mostra a montagem do sistema de controle na autoclave para a realização dos testes. Conforme indicado na mesma, pode-se notar a placa principal de circuito impresso contendo o microcontrolador PIC16F877A, os componentes eletrônicos necessários para o seu funcionamento, o display de LCD, o teclado para entrada de dados e a entrada do sensor de temperatura AD22100KTZ. Nota-se também, o transformador utilizado juntamente com a fonte CC de 5 V e o circuito de potência contendo principalmente o optoacoplador e o triac responsável pelo chaveamento.



Figura 25 – Montagem do sistema de controle na autoclave

A Figura 26 mostra o comportamento da autoclave após a implementação do controlador PI, tendo como *set-point* 65°C e as resistências da autoclave comutadas na configuração série.

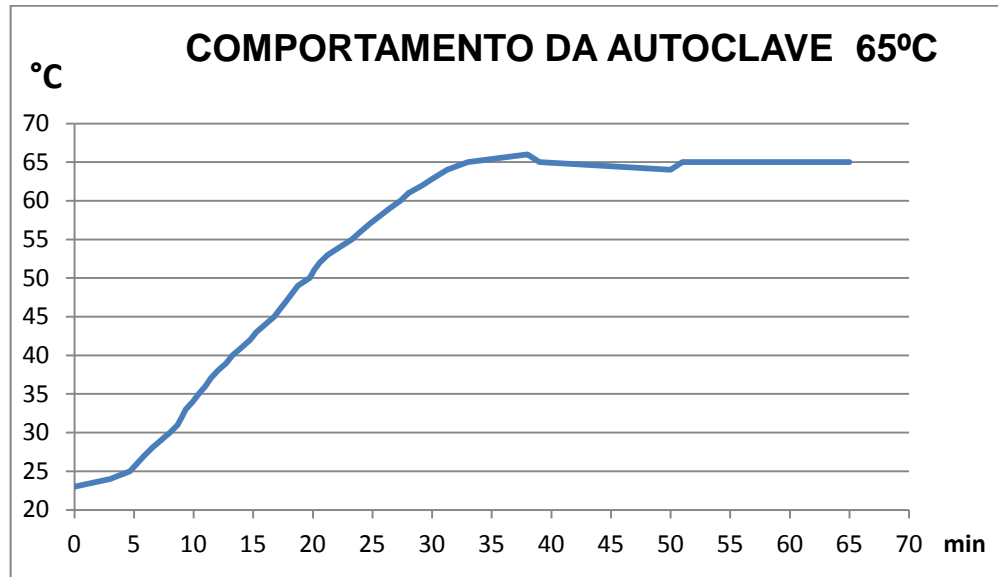


Figura 26 – Dinâmica da autoclave após a automação – 65°C

Vemos na Figura 26 que o comportamento da curva de resposta da autoclave até chegar ao valor de *set-point* é aproximadamente linear, e que quando o atinge, sofre apenas um pequeno sobressinal de 1°C que é imediatamente corrigido pelo controlador. Vemos também que, em regime permanente, a temperatura é mantida no valor de *set-point* e qualquer variação é rapidamente corrigida pela ação integral do controlador.

Depois de realizado os testes com o valor de *set-point* em 65°C e constatado que o sistema de controle mostrou-se eficaz, foram realizados testes com o valor de *set-point* em 121°C, que é a temperatura em que a esterilização deve ocorrer. Para tanto, para que essa temperatura possa ser atingida no menor tempo possível a autoclave tem que ter suas resistências comutadas na configuração paralelo.

A Figura 27 mostra o comportamento da autoclave tendo como *set-point* 121°C e as resistências comutadas na configuração paralelo, ou seja, dissipação máxima de potência.

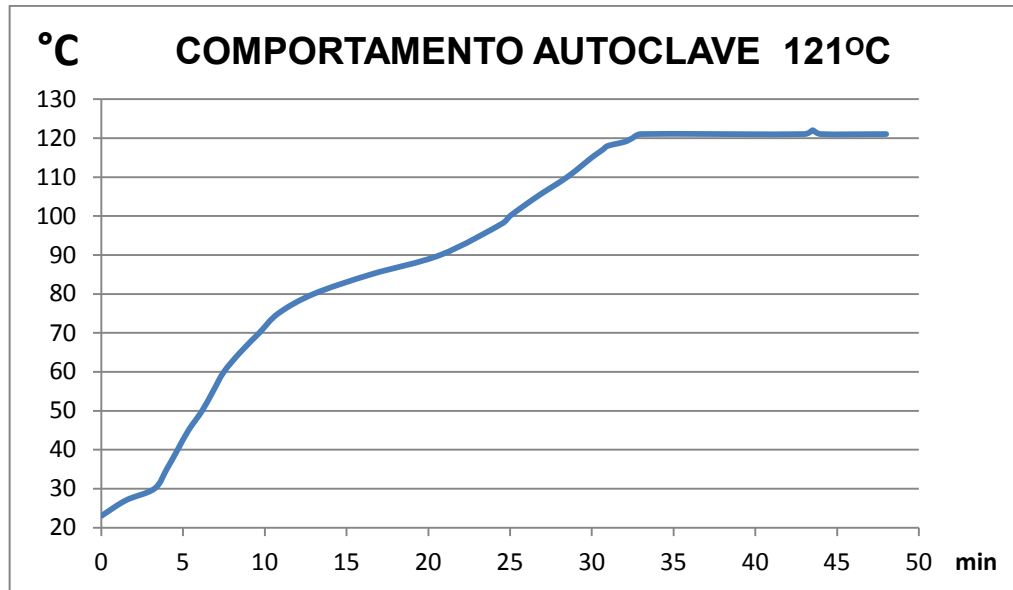


Figura 27 – Dinâmica da autoclave após a automação – 121°C

Vemos na Figura 27 que o comportamento da curva de resposta da autoclave até chegar ao valor de *set-point* sofre aproximadamente quatro inclinações em sua curva até atingir o regime permanente, e quando atinge tal valor, sua temperatura se mantém praticamente constante. No teste realizado com o sistema de controle, a temperatura em regime permanente chegou a sofrer uma pequena variação de temperatura chegando aos 122°C o que foi rapidamente corrigido pelo controlador.

Vale ressaltar que da mesma forma que no teste a 65°C, o controle PI não é acionado desde o início do processo, mas somente quando se atinge 119°C. Tal fato se explica pela limitação técnica do equipamento, ou seja, mesmo o controlador solicitando que a tensão aplicada seja superior a 220V, as resistências da autoclave não suportam valores superiores aos nominais, logo, para temperaturas inferiores a 63°C, para o *set-point* de 65°C, e 119°C, para *set-point* de 121°C, a saída do controlador sempre indicaria tensões superiores a 220V e então, foi programado esse intervalo para a entrada da ação do controlador.

A Figura 28 mostra o manômetro do equipamento indicando que a temperatura está em 121°C o que corresponde a 1,5 kgf/cm² de pressão durante o processo de esterilização.



Figura 28 – Indicação da temperatura e pressão no manômetro da autoclave

A Figura 29 mostra a indicação no display de LCD da temperatura durante o processo de esterilização.



Figura 29 – Indicação da temperatura no display de LCD

Nota-se nas Figuras 28 e 29 que a indicação da temperatura são equivalentes em ambos os sistemas, o que comprova que confiabilidade na medição da temperatura por parte do sensor utilizado no projeto.

7 CONCLUSÕES

O sistema de controle apresentado neste trabalho se mostrou compatível e adequado para a aplicação proposta, dado o bom resultado alcançado no controle da temperatura da autoclave.

Quanto aos componentes escolhidos para tal aplicação, ressaltando principalmente o microcontrolador, o sensor de temperatura e o triac de potência, ambos apresentaram ótimo desempenho, visto que o objetivo final só fora alcançado devido à escolha precisa destes componentes, já que na autoclave a temperatura atingida é elevada, o que nem todo sensor suporta, e a corrente elétrica consumida também possui valores que exigiram cuidados especiais.

O sistema de controle PI apresentado atende às exigências do correto procedimento de esterilização de materiais realizado no laboratório. Porém, ao compararmos as Figuras 24 e 27, dinâmica da autoclave antes e depois do processo de automação respectivamente, nota-se que não houve uma melhora significativa na curva de resposta da planta que justificaria a implementação desse controlador como forma de melhorar o período transitório. Tal fato se justifica pela dinâmica lenta do sistema térmico estudado, que devido a limitações técnicas do equipamento – não é possível aplicar tensões superiores à nominal – torna-se muito difícil agir no período transitório da curva de resposta.

O objetivo deste trabalho era o estudo da automação do processo de esterilização da autoclave vertical, que visava, também, dispensar a presença de um operador para gerenciar as etapas do processo. Para que a automação pudesse acontecer havia a necessidade do uso de um microcontrolador no sistema de controle. Com a disponibilidade de um microcontrolador no sistema, torna-se viável a implementação deste controlador PI, pois além de se mostrar totalmente adequado a aplicação proposta, pode-se substituir as duas resistências da autoclave para apenas uma, já que o calor produzido passa a ser controlado pelo nível de tensão elétrica aplicado e não mais pela comutação em diferentes configurações nas resistências do equipamento.

Diante do trabalho desenvolvido, seguem sugestões para trabalhos futuros:

- Estudo sobre a alocação do sensor de temperatura para implantação em definitivo do sistema de controle na autoclave, visto que a alta pressão submetida no interior da autoclave demanda cuidados especiais quanto à alocação de um sensor em sua estrutura interna.
- Estudar melhorias no sistema de dissipação de calor do triac, visto que o aquecimento do mesmo pode ser considerado elevado devido à alta corrente elétrica que a autoclave demanda.
- Acoplamento de todo o sistema de controle em um só compartimento visando à alocação do mesmo junto à autoclave.

REFERÊNCIAS

- 1 SCHMIDELL, Willibaldo. **Biotecnologia Industrial**. São Paulo: Blucher, 2001.
- 2 IDEIAS E SOLUÇÕES. **Importância da Esterilização nas atividades de Biossegurança**. Disponível em: <<http://www.stermax.com.br/blog/importancia-da-esterilizacao-nas-atividades-de-biosseguranca/>>. Acesso em 10 de maio de 2014.
- 3 INVENSYS EUROTHERM LIFE SCIENCES SOLUTIONS. **O Processo de Esterilização (Autoclaves)**. Disponível em: <http://www.eurothermltda.com.br/life-sciences/aplicacoes_esteri.htm>. Acesso em 20 de junho de 2014.
- 4 SILVA, Raquel. **Como funciona uma autoclave**. Disponível em: <<http://pontociencia.org.br/gerarpdf/index.php?experiencia=353>>. Acesso em 20 de junho de 2014.
- 5 PHOENIX. **Autoclave Vertical Linha AV**. Disponível em: <<http://www.phoenix.ind.br/index.php?id=474&idioma=1>>. Acesso em 10 de março de 2014.
- 6 DENARDIN, Gustavo Weber. **Microcontroladores**. Disponível em: <http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/eduardo_henrique/materiais/apostila_micro_do_Gustavo_Weber.pdf>. Acesso em 10 maio de 2014.
- 7 GRUPO ECIL. **Sensores de Temperatura**. Disponível em: <<http://www.ecil.com.br/temperatura-industrial/pirometria/sensores-temperatura/>>. Acesso em 20 de junho de 2014.
- 8 OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 4ed. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

9 SILVA, João Manoel. **O Controlador PID**. Disponível em: <<http://www.ece.ufrgs.br/~jmgomes/pid/Apostila/apostila/node24.html>>. Acesso em 15 de maio de 2014.

10 PRADO, Thiago Alexandre. **Implementação de um controlador PID embarcado para o controle em malha fechada de um estimulador neuromuscular funcional**. Disponível em: <<https://docs.google.com/file/d/0B0T8omiWkMq8M29EZFNrUC1EUVE/edit>>. Acesso em 10 de julho de 2014.

11 MACIEL, Marcelo. **Controle PID com aproximação Digital para utilização no PIC**. Disponível em: <<http://www.marcelomaciel.com/2012/05/pid-digital-para-pic.html#more>>. Acesso em 01 de outubro de 2014.

12 MELO, Marcelo Marques. **Modelagem De Uma Estufa Térmica E Sintonia Do Controlador Pid**. Disponível em: <https://www3.dti.ufv.br/sig_del/consultar/download/161>. Acesso em 05 de abril de 2014.

13 ANALOG DEVICE. **AD22100KTZ Datasheet**, 2004. Disponível em <<http://html.alldatasheet.com/html-pdf/521863/AD/AD22100KTZ/27/1/AD22100KTZ.html>>. Acesso em 01 de setembro de 2014.

14 LABORATÓRIO DE GARAGEM. **Tutorial: o que é e como utilizar a Modulação por Largura de Pulso ou PWM (Pulse Width Modulation) no Arduino**. Disponível em: <<http://labdegaragem.com/profiles/blogs/tutorial-o-que-e-como-utilizar-o-modula-o-por-largura-de-pulso-ou>>. Acesso em 10 de agosto de 2014.

15 FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. **MOC3020M Datasheet**, 2003. Disponível em: <<http://html.alldatasheet.com/html-pdf/53866/FAIRCHILD/MOC3020M/407/1/MOC3020M.html>>. Acesso em 10 de junho de 2014.