ARTIGOS COMPLETOS 332

18 a 22 de outubro de 2021
Anais do ENEPE
ISSN 1677-6321

Unoeste

ARTIGOS COMPLETOS

SISTEMA DE CONTROLE DE TEMPERATURA DIGITAL 333

SISTEMA DE CONTROLE DE TEMPERATURA DIGITAL

Bruno Parpinelli Bonfim, César Daltoé Berci, Thiago Rodrigues

Universidade do Oeste Paulista – UNOESTE, Presidente Prudente, SP. E-mail: bruno_parpinelli@hotmail.com.

RESUMO
Elementos de controle digital, são estritamente necessários no funcionamento dos setores produtivos, garantindo que sistemas e processos operem nos parâmetros necessários, mesmo perante a perturbações externas e variações diversas, garantindo a estabilidade e continuidade da cadeia produtiva. O controle PID é um dos métodos mais utilizados no controle de sistemas dinâmicos, razão pela qual optou-se aqui pelo desenvolvimento de um sistema de controle PID digital com o uso de um processador ARM STM32F107VC, e auxílio da placa EasyMx v7 STM ARM, a fim de controlar um forno industrial. O controle de temperatura realizar-se-á através do sensor de temperatura e de resistências que promovem o aquecimento do local e consequentemente a temperatura. Com o uso do sistema de potência, o sinal de controle (PWM) foi capaz de ajustar a temperatura dentro do forno, assim simulando o processo de controle industrial em uma planta.
Palavras-chave: Controle PID; PID digital; sinal de controle.

DIGITAL TEMPERATURE CONTROL SYSTEM

ABSTRACT
Digital control elements are strictly necessary in the functioning of the productive sectors, ensuring that systems and processes operate within the necessary parameters, even in the face of external disturbances and diverse variations, ensuring the stability and continuity of the production chain. PID control is one of the most used methods in the control of dynamic systems, which is why we chose here to develop a digital PID control system with the use of an ARM STM32F107VC processor, and the aid of the EasyMx v7 STM ARM board, the in order to control an industrial oven. The temperature control will be carried out through the temperature sensor and resistances that promote the heating of the place and consequently the temperature. With the use of the power system, the control signal (PWM) was able to adjust the temperature inside the furnace, thus simulating the industrial control process in a plant.
Keywords: PID control; digital PID; control signal.

1. INTRODUÇÃO

O sistema de controle é essencial em qualquer área da engenharia, como por exemplo: nos processos industriais, projetos de veículos espaciais, sistemas robóticos, e controle de pressão, umidade, temperatura, vazão etc. (OGATA, 2011). No controle têm-se como objetivo principal, uma vez que se identifica as características do sistema, alterar parâmetros de interesse, a fim de otimizar o processo, através do projeto de um controlador que atuará na resposta do sistema permitindo que seu comportamento seja dentro dos parâmetros desejáveis mesmo diante de perturbações que antes poderiam leva-lo a instabilidade.

Dessa forma, propõem-se desenvolver um controlador digital para atuar em um forno industrial ou estufa no qual a temperatura é controlada através do aquecimento elétrico de resistências e monitorada através de sensores analógicos de temperatura. Esse tipo de equipamento é utilizado em inúmeras aplicações nas quais são necessários um controle e estabilidade da temperatura dentro de uma faixa definida e sua relevância é significativa em vários segmentos, que incluem a indústria de alimentos, insumos hospitalares (esterilização), farmacêutica e o agronegócio.

2. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do projeto, identificação da planta e ajuste do controle, utilizou-se um modelo em escala reduzida, no qual o processo de aquecimento da estuda/forno é realizado através do acionamento de duas lâmpadas DC incandescentes de $12V/50W$ controladas a partir da junção de um circuito digital e de potência.

A realimentação da planta se dá através de um sensor de temperatura LM35, instalado no interior do equipamento.

O sinal de referência, por sua vez, é criado utilizando-se um circuito ajustável através de um potenciômetro linear acoplado na placa de desenvolvimento, disponibilizando ao usuário a opção de ajuste da temperatura interna do forno através dele.

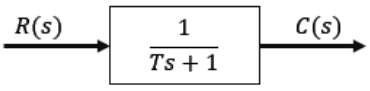
2.1. Identificação do sistema

Para o projeto do controlador é preciso conhecer a função de transferência (FT) do sistema. Para a construção analítica da FT, aplicou-se um degrau de tensão ao sistema a fim de identificar seu comportamento diante deste sinal e a partir dessas informações estimar sua FT.

Dessa forma, após a construção do sistema físico de isolamento térmico, montagem da alimentação das lâmpada e posicionamento do sensor, foi aplicado um degrau de tensão na alimentação das lâmpadas DC incandescente ligadas em série afim de analisar a resposta de temperatura dentro da estufa com o sensor LM35 por um intervalo de 1317 segundos – intervalos longos permitem que o sistema estabilize-se plenamente após ligado.

É relevante ressaltar que o sistema em questão é de primeira ordem, e pode ser representado em diagrama de blocos, como mostrado na Figura 1. Nele também é considerado que as condições iniciais são nulas. (DOS SANTOS, 2017).

Figura 1. Sistema de primeira ordem.

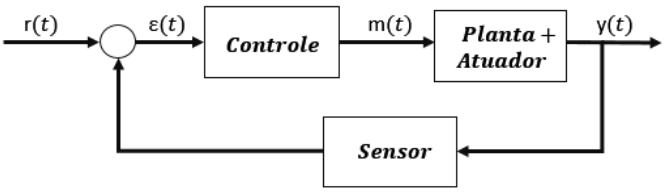


Fonte: (Autores, 2020).

2.2. Controle PID

A partir da FT caracterizada, foi desenvolvido um sistema de controle PID (Proporcional, Integral e Derivativo) para o sistema da estuda, a fim de melhorar a resposta em questão de rapidez e estabilidade (eliminação do erro em regime transitório e permanente). Um sistema de controle dotado de realimentação, como na figura abaixo, compara em cada instante o valor de saída da planta $y(t)$, medida pelo sensor, com o valor desejado de referência $r(t)$ indicado na entrada do sistema. O resultado dessa comparação é o erro atuante $\varepsilon(t)$ que é levado ao controlador, e produz um sinal de controle $m(t)$. Esse sinal é levado às componentes seguintes do sistema de controle com o intuito de reduzir o desvio da saída em relação ao sinal desejado. (OGATA, 2011).

Figura 2. Sistema controlado.



Fonte: (Autores, 2020).

A atuação do controlador PID, é dividido em proporcional (P), integrativo (I) e derivativo (D). A ação proporcional, é responsável por aumentar proporcionalmente o sinal de erro atuante, o qual é obtido pela subtração da variável de processo (PV), neste caso a saída do sensor, e o sinal de referência (Set

Point). Isso faz com que o circuito de malha fechada reaja mais rapidamente sobre o erro, ou seja, menor será o tempo de acomodação, porém o sistema pode apresentar erro em regime estacionário. (COSTA, 2019). Já o efeito integrativo é o de tentar reduzir o erro em regime permanente, aumentando a precisão da resposta. No entanto deve ser bem ajustado, pois pode tornar o sistema mais lento e oscilatório por conta do polo adicionado pelo integrador. (NISE, 2012). Por fim a ação derivativa atua essencialmente sobre a resposta transitória do sistema, adicionando um zero. Para tanto, deve-se modificar a posição dos polos dominantes do sistema de forma a se obter as especificações desejadas relativas ao componente transitório da resposta. (BARROS; ROSSI; SARTOR, 2015).

2.3. Sintonia do controle

A fim de implementar o projeto do controlador de forma prática e rápida, diversos pesquisadores desenvolveram metodologias para ajuste das constantes do PID. Dentre as diversas metodologias existentes o método de Ziegler-Nichols, amplamente conhecido e difundido em sistemas de controle.

O método de Ziegler-Nichols, foi desenvolvido em 1942, e foi o primeiro trabalho a propor uma sintonia para controladores PID, e com certeza foi a descoberta de uma importante metodologia. A mesma pode ser utilizada em plantas cujo modelo matemático é desconhecido, como o modelo desenvolvido neste projeto que foi estimado através da resposta ao degrau, por exemplo.

O método é de fácil compreensão, porém é necessário um ajuste fino após iniciado os testes físicos no sistema controlado. A equação do PID no domínio do tempo tem a seguinte forma (OGATA, 2011):

$$Gc(s) = Kp\, e(t) + Ki \int e(t)\, dt + Kd \frac{de(t)}{dt} \qquad (1)$$

A função de transferência do controlador PID no domínio da frequência pode ser encontrada através da transformada de Laplace da equação (1).

$$Gc(s) = Kp + \frac{Ki}{S} + KdS \qquad (2)$$

onde Kp é o ganho proporcional, Ki o ganho integrativo e Kd o ganho derivativo.

Há uma outra forma de representar a função de transferência do controlador PID no domínio da frequência, onde é considerado o tempo integrativo e derivativo. Isso é de extrema importância, pois na Figura 3 é visível que os valores encontrados para o PID estão relacionados com o tempo integrativo e derivativo.

$$Gc(s) = Kp(1 + \frac{1}{TiS} + TdS) \qquad (3)$$

A Figura a seguir foi proposta por Ziegler-Nichols, na qual é possível encontrar os valores do ganho proporcional Kp, do tempo integrativo Ti e do tempo derivativo Td. (OGATA, 2011).

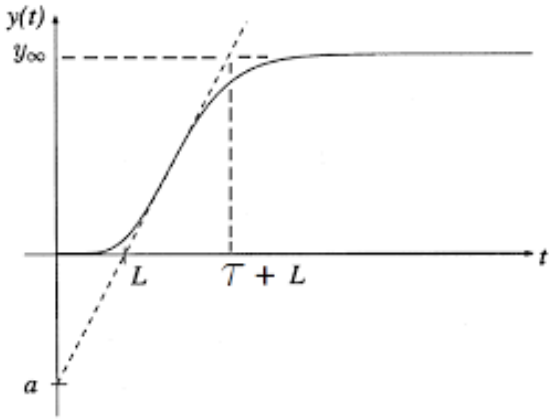
Figura 3. Ajuste PID.

Controlador	Kp	Ti	Td
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0{,}9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0{,}3}$	0
PID	$1{,}2\frac{T}{L}$	$2L$	$0{,}5L$

Fonte: (Autores, 2020).

O atraso (L) e a constante de tempo (T) são determinadas desenhando-se uma linha tangente no ponto de inflexão da curva com o formato em S e determinando-se a intersecção da linha tangente com o eixo dos tempos e a linha y(t) = K, como mostrado na Figura 4.

Figura 4. Curva S do sistema.



Fonte: (VASCONCELLOS, 2017).

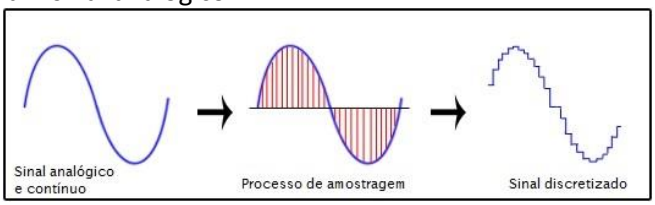
Outra forma de encontrar o atraso (L) em um sistema de temperatura, é medir o tempo em que o forno leva para variar a temperatura em 1°C após ligado. Sendo assim, foi considerado L = 5 segundos, tendo como base a planilha de valores do início da medição extraída do data logger de bancada. No entanto é importante ressaltar que este atraso foi considerado apenas para encontrar os ajustes iniciais dos ganhos através do método de Ziegler-Nichols, uma vez que 5 segundos de atraso é praticamente desprezível com relação aos 1317 segundos de estabilização do sistema. Já a constante de tempo é T = 119 segundos, como já encontrado na caracterização da FT.

2.4. Discretização de sinais

Os sinais contínuos, são sempre definidos em todos os instantes de tempo, ou seja, podem ser representados como uma função do tempo. Já os sinais discretos, são definidos em apenas alguns instantes do tempo, ou seja, como se fosse uma sequência de valores. (COSTA, 2019).

É importante ressaltar que os processadores digitais conseguem armazenar e processar apenas sinais discretos, e como o processamento dos sistemas neste projeto é realizado pela central, ou seja, pelo microprocessador, é necessária uma conversão dos sinais analógicos para sinais digitais. Por exemplo, o sensor de LM35 emite um valor de tensão a cada variação de sua leitura, por isso a central utiliza um conversor analógico-digital (A/D) para realizar a transformação do sinal contínuo em sinal discreto.

Figura 5. Discretização de um sinal analógico.



Fonte: (PUHLMANN, 2014).

Em um conversor analógico-digital o valor analógico é transformado em um sinal amostrado, porém este processo é realizado com um certo tempo de conversão (taxa de amostragem), o que é definido com amostragem. Posteriormente este sinal é quantizado e convertido em uma sequência de números binários. Porém é importante evidenciar que pelo teorema de Nyquist, a taxa de amostragem deve ser pelo menos o dobro da faixa de passagem do sinal, caso contrário, poderá ocorrer distorção. (NISE, 2012).

2.5. Controle digital

Considerando a equação de controle PID (2), pode se determinar uma implementação digital deste controle utilizando aproximações discretas. Através da regra da diferença atrasada e da integração retangular avançada, junto à transformada Z, pode-se definir o seguinte algoritmo para o controlador digital.

$$U_k = (Kp * e_k) + (Ki * Ta * S_k) + (\frac{Kd}{Ta} * e_k - e_{k-1}) \quad (4)$$

onde U_k é a saída responsável pelo ajuste de PWM, e_k é o erro e Ta o tempo de amostragem dos A/D.

A parte responsável pelo ajuste ponderado ao aumento e diminuição do erro, é o somatório de S_k.

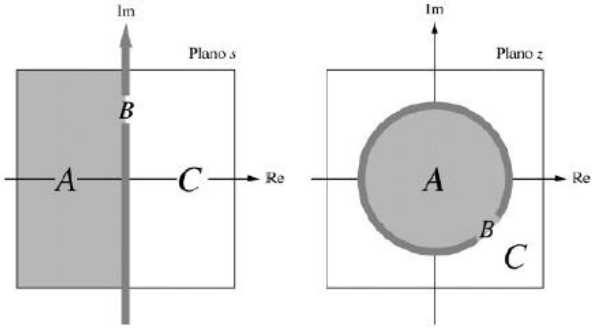
$$S_k = S_{k-1} + e_k \quad (5)$$

Assim, esta parcela causa um efeito de amortecimento à variação do erro no controlador, ou seja, diminuindo o erro em regime permanente.

2.6. Estabilidade via plano Z

No plano S, a região de estabilidade é justamente o plano esquerdo. Já no controle digital, um sistema é estável se todos os polos da função de transferência de malha fechada, estiverem dentro do círculo unitário no plano Z.

Figura 6. Mapeamento do plano S para o plano Z.



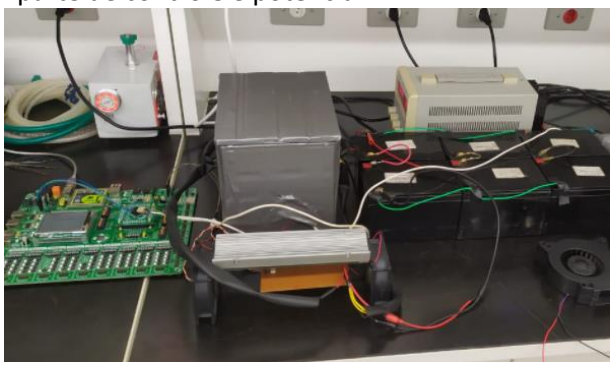
Fonte: (NISE, 2012).

É importante salientar que no sistema foi adotado um tempo de amostragem de $18\mu s$, assim garantindo a estabilidade do sistema via plano Z.

2.7. Construção do sistema

Finalizado os estudos das respostas e o projeto do controlador digital, foi montado todo o sistema utilizando os equipamentos disponibilizados no Laboratório de Eletrônica e Engenharia Elétrica da Universidade do Oeste Paulista. Na figura 7 é possível visualizar todos os circuitos acoplados.

Figura 7. Sistema completo – parte de controle e potência.



Fonte: (Autores, 2020).

A este sistema foram aplicados diversos testes a fim verificar o comportamento do sistema diante a variação no valor de referência e alterações perturbativas na temperatura do forno simuladas através da abertura repentina da tampa. Desta forma pode ser observado o real funcionamento do sistema de controle aplicado à planta.

2.8. Processador digital

Com a implementação do controle digital através da equação (4), é preciso um processador para realizar todo os cálculos na devida velocidade. Neste projeto foi utilizado o STM32F107VCT6, um

processador da ARM que é integrado à uma placa de desenvolvimento da Mikroe. Algumas especificações deste microcontrolador são: frequência de 72 MHz, 256K bytes de memória Flash, 64K bytes de geral propósito SRAM, controlador Ethernet integrado, USB 2.0 (OTG, Host, Dispositivo), 80 Uso geral Pinos de I/O (mapeáveis em 16 interrupções externas), 4 temporizadores de 16 bits, 2x12 bits A/D (16 canais), 2x12 bits D/A, 5xUARTs, relógio interno em tempo real (RTC), controladores 2xI2C, 3xSPI e 2xCAN, e também possui serial wire debug (SWD) e interfaces JTAG para programação e depuração.

Figura 8. Placa de desenvolvimento EasyMx PRO v7 para STM32.

Fonte: (Mikroe, 2020).

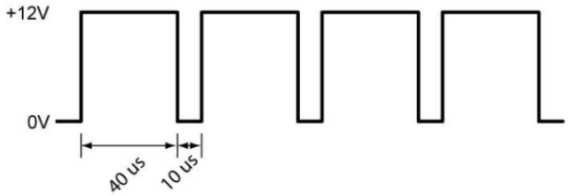
Outro fator importante com relação ao processador é que este também possui ponto flutuante, o que é essencial para garantir que o processamento eletrônico seja capaz de resolver os cálculos com precisão adequada em tempo hábil.

A placa também conta com um visor LCD de 320X240 pixels, o qual foi implementado para auxiliar a visualização dos valores de temperatura dentro do forno (A/D port.3), referência ajustada através do potenciômetro na própria placa (A/D port.10) e o sinal de acionamento PWM (A/D port.PA0).

2.8.1. Sinal PWM de saída

Com já mencionado, após a realização do cálculo do controlador digital, é preciso o acionamento proporcional da parte de potência, sendo assim é utilizado o pulso de PWM (Pulse Width Modulation), ou seja, uma modulação de largura de pulso.

Figura 9. Modulação de largura de pulso.



Fonte: (Autores, 2020).

Como visto na figura a cima, o duty cycle do PWM é a porcentagem em que os pulsos ficam em nível alto com relação ao período inteiro de pulso. Neste exemplo é possível visualizar um período total de $50\mu s$.

No anexo A, é apresentado a configuração dos A/D's, do controle digital e também do acionamento do PWM.

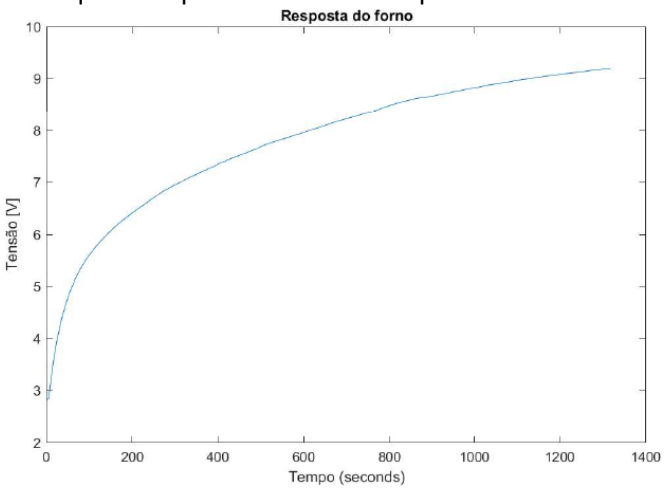
3. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentadas as informações referentes a identificação do sistema, o ajuste do PID e os dados de teste do controlador.

3.1. Identificação do sistema

A figura 10 apresenta a resposta do forno quando aplica-se 12V nas lâmpadas, repare que a unidade de medida da resposta do sistema foi a tensão (Volts) em função do tempo.

Figura 10. Resposta do forno quando aplicado 12V nas lâmpadas DC incandescente 50W.

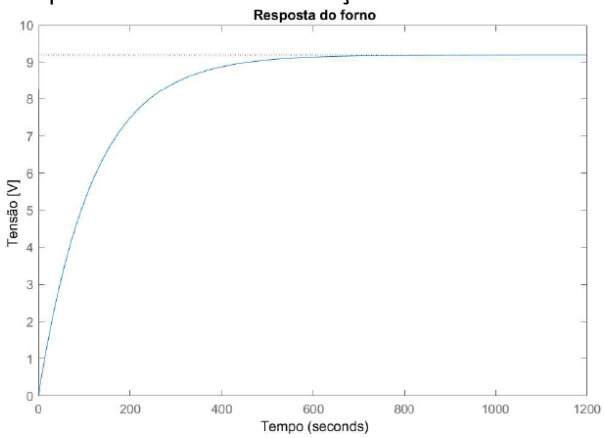


Fonte: (Autores, 2020).

Analisando a figura a cima, é possível verificar que o sistema tende a se estabilizar após os $9{,}2V$ no eixo Tensão $[V]$, com um tempo de 1317 segundos no eixo Tempo $[s]$. Segundo OGATA (2011), a constante de tempo é o tempo necessário para que a resposta ao degrau alcance 63% do seu valor final, ou seja, $5{,}796V$ em 119 segundos. Com estes dados extraídos do ensaio, é possível estimar a FT do sistema do forno.

$$G(s) = \frac{9{,}2}{119s + 1} \qquad (6)$$

Figura 11. Resposta do forno quando simulado sua função de transferência.



Fonte: (Autores, 2020).

3.2. Sintonia do controle

Com o auxílio da Figura 3, tem-se os valores de $Kp = 28$; $Ti = 10$ e $Td = 2{,}5$ sendo possível calcular os seguintes ganhos.

$$Kp = 28{,}56 \qquad (7)$$

$$Ki = \frac{Kp}{TiS} = 2{,}856 \qquad (8)$$

$$Kd = KpTdS = 71{,}4 \qquad (9)$$

Com os valores dos ganhos já encontrados, a função de transferência do controlador $Gc(s)$ através da equação (2) é:

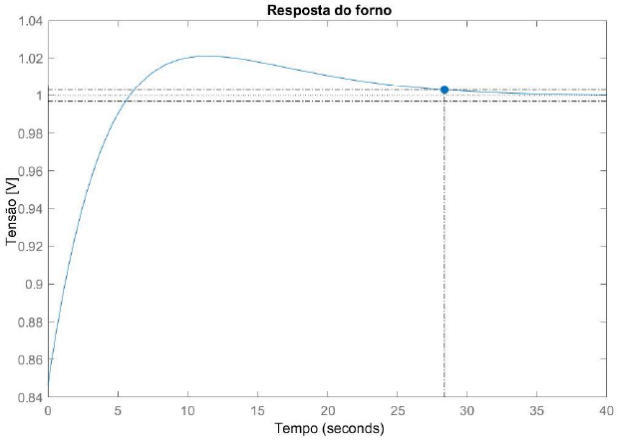
$$Gc(s) = \frac{71{,}4S^2 + 28{,}56S + 2{,}856}{S} \qquad (10)$$

Aplicando o controlador ao sistema obtêm-se:

$$FT(s) = \frac{656{,}9S^2+262{,}8S+26{,}28}{775{,}9S^2+263{,}8S+26{,}28} \quad (11)$$

Simulando a aplicação de um degrau a entrada do sistema controlado obtêm:

Figura 12. Resposta do forno quando simulado o controle PID em sua malha.



Fonte: (Autores, 2020).

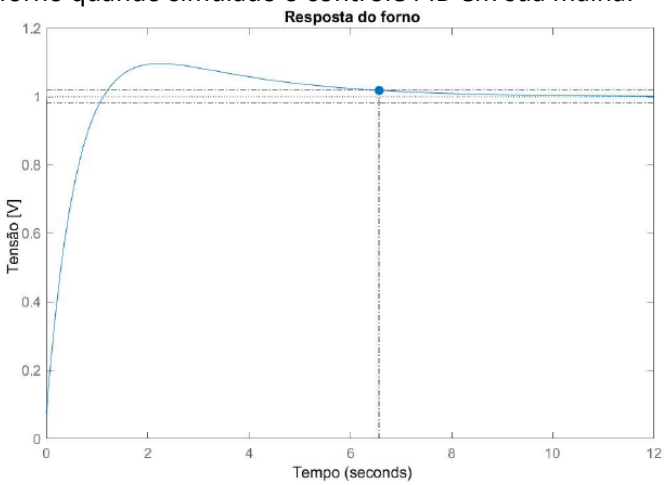
Através da resposta mostrada na Figura 12, o compensador foi capaz de ajustar o tempo de acomodação em 28,4 segundos e o sobressinal em 2,11%. No entanto, como visto, a resposta do sistema de compensação não foi tão rápida, é preciso um ajuste fino nos ganhos. Ajustando os valores em $K_p = 28$; $K_i = 10$ e $K_d = 1$ é encontrado $G_c(s)$ e $FT(s)$.

$$G_c(s) = \frac{1S^2+28S+10}{S} \quad (12)$$

$$FT(s) = \frac{9{,}2S^2+257{,}6S+92}{128{,}2S^2+258{,}6S+92} \quad (13)$$

Simulando a aplicação de um degrau a entrada do sistema controlado obtêm:

Figura 13. Resposta do forno quando simulado o controle PID em sua malha.



Fonte: (Autores, 2020).

No gráfico, o novo tempo de acomodação é de 6,56 segundos e o sobressinal em 9,64%, ou seja, uma resposta muito mais rápida que a anterior. Mesmo que o ganho seja maior, não haverá interferência no acionamento da parte de potência, pois 9,64% ainda é considero uma variação pequena do ganho para este tipo de sistema.

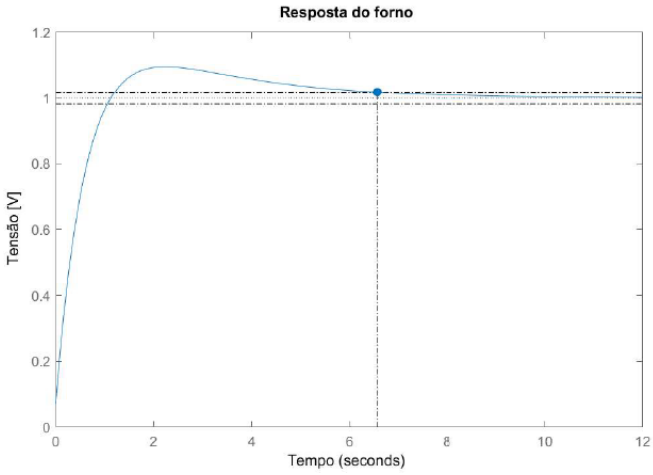
3.3. Discretização de sinais

Como já apresentado no tópico 2.4, através da transformada Z, é possível encontrar a função discretizada do controlador na equação (13). Foi utilizado um tempo de amostragem de 18µs, pois é o tempo ajustado no A/D do processador ARM.

$$FT(Z) = \frac{0{,}07176Z^2-0{,}1435Z+0{,}07173}{Z^2-2Z+1} \quad (14)$$

A baixo, é representado a curva do controlador discretizada, pode-se perceber a grande semelhança com a resposta do sistema linear da figura 13.

Figura 14. Resposta discretizada do forno quando simulado o controle PID em sua malha.



Fonte: (Autores, 2020).

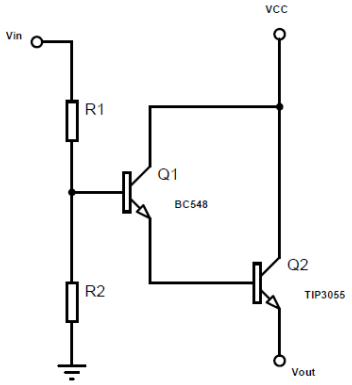
3.4. Controle digital

Como mostrado no Anexo A, o valor de limite da saída de U_k, ficou ajustado em 120, isso para que pudesse ser implementado a proporção de saída de sinal de PWM. A parcela de S_k é de extrema importância para a atualização e amortecimento do erro, assim que é alterado seu valor.

3.5. Circuito de potência

Após realizar o tratamento do sinal de erro do sistema, é necessário acionar as lâmpadas DC incandescentes. Para isso foi construído um sistema de potência capaz de suportar a corrente fornecida da fonte às lâmpadas.

Figura 15. Circuito de potência.



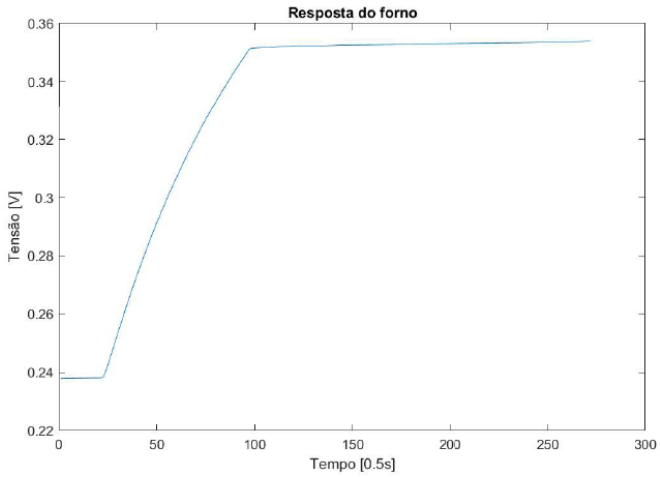
Fonte: (Autores, 2020).

No circuito da Figura 15, foi utilizado um transistor BC548 (o qual tem seu controle de VCE através da corrente de base), a fim de ajustar o acionamento do transistor TIP3055 (suporta maior potência). Definido a "sensibilidade" adequada deste sistema de potência, foi ajustado os valores em $1k\ \Omega$ e $100k\ \Omega$ para os resistores $R1$ e $R2$.

3. DISCUSSÃO

Neste tópico é discutido os valores dos testes realizados no laboratório. O primeiro teste foi realizado com o forno inicialmente em temperatura ambiente $0{,}237V$ $(23{,}7°C)$ com tampa fechada, e referência de $0{,}35\ V$ $(35°)$ no controle.

Figura 16. Teste 01 – forno em temperatura ambiente e referência de 0,35V (35°C) com tampa fechada.

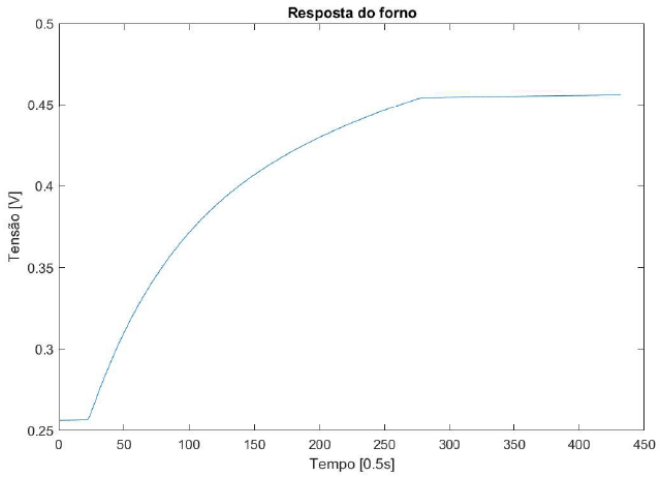


Fonte: (Autores, 2020).

Na figura 16, o sistema levou aproximadamente um tempo de 38,5 segundos em seu transitório até o valor final. Já com relação ao regime permanente, o valor fixado foi de $0{,}3523V$, ou seja, um erro de $0{,}0023V$. Isso mostra uma variação menor que $0{,}5°C$ na resposta do sistema.

O segundo teste também foi com o forno inicialmente em temperatura ambiente e tampa fechada, no entanto o valor de referência foi aumentado para $0{,}45V$ $(45°C)$.

Figura 17. Teste 02 – forno em temperatura ambiente e referência de 0,45V (45°C) com tampa fechada.

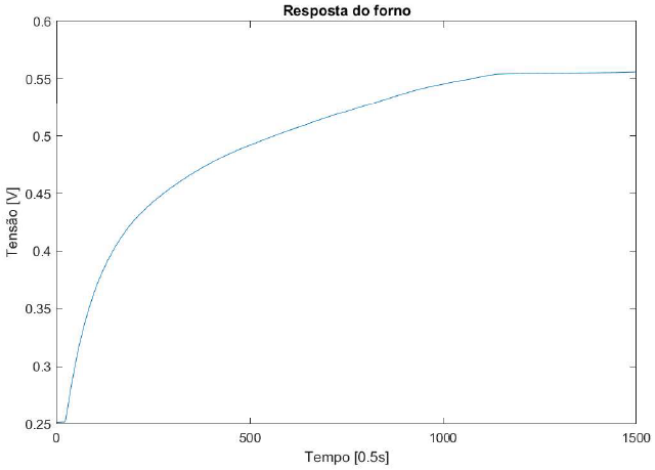


Fonte: (Autores, 2020).

Para este experimento o tempo de transitório foi de aproximadamente 128,5 segundos, e o valor final em regime permanente de $0{,}4548V$, o que dá um erro de $0{,}0048V$.

Ainda com a tampa fechada e temperatura inicial mantida, foi ajustado a referência para $0{,}55V$ $(55°C)$.

Figura 18. Teste 03 – forno em temperatura ambiente e referência de 0,55V (55°C) com tampa fechada.

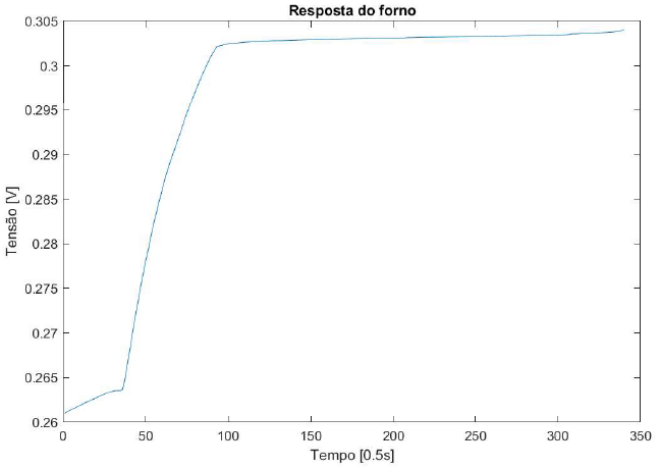


Fonte: (Autores, 2020).

Aqui o tempo de transitório da curva até à estabilização foi de aproximadamente 565,5 segundos, e o valor de regime permanente foi de $0{,}5544V$, ou seja, um erro de $0{,}0044V$.

Por fim, ainda com temperatura ambiente inicialmente, foi ajustado uma temperatura de $0{,}3V$ $(30°C)$ na referência com a tampa aberta.

Figura 19. Teste 04 – forno em temperatura ambiente e referência de 0,3V (30°C) com tampa aberta.



Fonte: (Autores, 2020).

Na figura 19, após passar 29,5 segundos, o valor no eixo Tensão $[V]$ se estabilizou em $0{,}3023V$, dando um erro de $0{,}0023V$ da referência.

Este experimento diz respeito à velocidade de regime transitório e permanente do sistema, ou seja, a velocidade de estabilização do sistema considerando perturbações externas, como a tampa aberta por exemplo.

CONCLUSÕES

No presente projeto desenvolveu-se um controlador digital PID a fim de controlar a temperatura de uma estufa/forno através de um modelo simplificado desses elementos, uma câmara isolante, lâmpada e um sensor de temperatura. Após a identificação do sistema e estimativa de sua função de transferência, elaborou-se o ajuste do controlador através da metodologia de Ziegler-Nichols para a implementação física e digital do controlador.

Com a realização dos testes, foi constatado que não é possível atingir os ganhos apontados na equação (12) para o PID digital, uma vez que precisou-se de ajustes nos limites do controlador digital, como apresentados no anexo A.

Ao final, concluiu-se que o controlador PID digital exerceu sua função de uma maneira eficaz, com a devida velocidade e pequeno erro em regime permanente.

AGRADECIMENTOS

Ao departamento de Engenharia Elétrica da Universidade do Oeste Paulista – Campus II, pelo apoio no desenvolvimento deste projeto.

REFERÊNCIAS

BARROS, Juliana de SG; ROSSI, Luiz A.; SARTOR, Karina. **Utilização do controlador PID como tecnologia eficiente em sistema de aquecimento de creche de suínos**. Rev. bras. eng. Viola. ambiente., Campina Grande, v. 19, n. 5, pág. 476-480, maio de 2015. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662015000500476&lng=en&nrm=iso>. acesso em 19 de agosto de 2020. http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n5p476-480.

COSTA, L. P. **Sintonia de um Controlador de Nível com Otimização por Enxame de Partículas.** Presidente Prudente, São Paulo – SP, 2019.]

DOS SANTOS, Orlem Lima. **Sistema de Controle de Temperatura para uma Estufa com Monitoramento via Aplicativo**. RCT - Revista de Ciência e Tecnologia, [S.l.], v. 3, n. 4, july 2017. ISSN 24477028. Disponível em: <https://revista.ufrr.br/rct/article/view/4004/2286>. Acesso em: 19 aug. 2020.

NISE, N. S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno.** 5 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

VASCONCELLOS, A. P. M. **Projeto de controladores PI e PID para um forno aquecedor de óleo de uma planta de tratamento de hidrocarbonetos.** Rio de Janeiro, SP. 2017. Projeto de graduação.