

CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SANTO ANDRÉ
Mecatrônica Industrial

Dábarys Hirlen dos Santos
Elizabeth da Luz Lodovico
Rebeca Falconi Nunes

CONTROLE DE NÍVEL UTILIZANDO PID

Santo André

2021

Dábarys Hirlen dos Santos

Elizabeth da Luz Lodovico

Rebeca Falconi Nunes

CONTROLE DE NÍVEL UTILIZANDO PID

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Tecnologia em Mecatrônica Industrial da Fatec Santo André, orientado pelo Prof. Me. Luiz Vasco Puglia, como requisito parcial para obtenção do título de tecnólogo em Mecatrônica.

Santo André

2021

S237c

Santos, Dábarys Hirlen dos
Controle de nível utilizando PID / Dábarys Hirlen dos Santos,
Elizabeth da Luz Lodovico, Rebeca Falconi Nunes. - Santo André,
2021. – 33f: il.

Trabalho de Conclusão de Curso – FATEC Santo André.
Curso de Tecnologia em Mecatrônica Industrial, 2021.

Orientador: Prof. Me Luiz Vasco Puglia

1. Mecatrônica. 2. Controle. 3. Processos. 4. Automação. 5.
Tecnologia. 6. Desenvolvimento. 7. Controlador PID. 8. Projeto. I.
Lodovico, Elizabeth da Luz. II. Nunes, Rebeca Falconi. III. Controle
de nível utilizando PID.

629.892

Dábarys Hirlen dos Santos

Elizabeth da Luz Lodovico

Rebeca Falconi Nunes

CONTROLE DE NÍVEL UTILIZANDO PID

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à FATEC SANTO ANDRÉ como requisito parcial à obtenção de título de Tecnólogo em Mecatrônica Industrial.

Professor Orientador
Prof. Me. Luiz Vasco Puglia

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA

Presidente da Banca
Prof. Fernando Garup Dalbo
Fatec Santo André

Primeiro membro da Banca
Prof. Dr Flávio Augusto Barrella
Fatec Santo André

Segundo Membro da Banca
Prof^a. Me. Suely Midori Aoki
Fatec Santo André

Local: Fatec Santo André

Horário: 09h

Data: 06/12/2021

SANTO ANDRÉ

2021

A dedicatória é promulgada a Deus por nos fortalecer nos momentos de exaustão, aos nossos pais que se empenharam em cuidado, dedicação, incentivo e apoio constantes dados à nós ao longo dessa etapa e ao corpo docente da FATEC por acreditarem e investirem em um ótimo ensino.

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos são destinados ao Professor Mestre Luiz Vasco Puglia que nos direcionou pelo caminho do conhecimento e aprendizado, ao auxiliar docente Maurício José Oliveira, que nos ajudou bastante na confecção do protótipo e aos nossos colegas de classe que fizeram parte desta jornada, especialmente ao nosso colega e amigo Edson Utsumi que nos auxiliou grandemente como um quarto integrante. Agradecemos em especial ao Professor Fernando Garup Dalbo por nos prestigiar com palavras de sabedoria e pelas virtudes compartilhadas ao longo desse período.

“Se o dinheiro for a sua esperança de independência, você jamais a terá.
A única segurança verdadeira consiste numa reserva de sabedoria, de
experiência e de competência.”

HENRY FORD

RESUMO

O mundo tem se tornado um lugar cada vez mais tecnológico e essa evolução deve-se ao fato de que tudo pode ser automatizado: desde equipamentos e processos simples à células industriais. Neste contexto, o controle é um dos pilares mais importantes para sustentar qualquer automação. Diante de tal fato, o grupo decidiu, como projeto de conclusão do curso, confeccionar o protótipo de um reservatório de água que controle o nível através de um Controlador PID (Proporcional Integrativo Derivativo) de maneira analógica, ou seja, construindo um compensador. Neste projeto mostraremos quais são os componentes e competências necessárias para sua produção. Este trabalho apresentará também, brevemente, a história e o uso destes equipamentos, bem como o modelo a ser construído, suas especificações, o desenvolvimento da produção do protótipo e as conclusões obtidas, com o objetivo de tornar o controle do processo mais eficiente e automatizado.

Palavras-chave: Controle. PID. Automatizado.

ABSTRACT

The world has become an increasingly technological place and this evolution is due to the fact that everything can be automated: from simple equipment and processes to industrial cells. In this context, control is one of the most important pillars to support any automation. In view of this fact, the group decided, as a course conclusion project, to build a prototype of a water reservoir that controls the level through a PID Controller (Proportional Integrative Derivative) in analog way, that is, building a compensator. In this project we will show you which components and competences are necessary for its production. This work will also briefly present the history and use of this equipment, as well as the model to be built, its specifications, the development of the prototype production and the conclusions obtained, in order to make the process control more efficient and automated .

Keywords: Control. PID. Automated.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema de 1ª Ordem	19
Figura 2 - Sistema de 2ª Ordem	20
Figura 3 - Resposta Temporal de Sistemas de 2ª Ordem	21
Figura 4 - Arranjo de Routh-Hurwitz	22
Figura 5 - Estrutura do protótipo	26
Figura 6 - Estrutura do protótipo	28
Figura 7 - Compensador PID com Amplificadores Operacionais	31
Figura 8 - Projeto do Compensador integrado ao Controle	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grau de Amortecimento e sua resposta temporal	21
Tabela 2 - Erro de Estado Estacionário	24

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PID- Proporcional Integrativo Derivativo

SPD- Semiplano direito

SPE- Semiplano esquerdo

PCI- Placa de Circuito Impresso

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo 1- \int_0^{∞} - Integral

SUMÁRIO

1. Introdução	15
1.1 Objetivo	15
1.2 Motivação	16
1.3 Conteúdo	16
2. Fundamentação Teórica	17
2.1 Transformada de Laplace	18
2.2 Resposta Temporal	18
2.2.1 Sistema de 1ª Ordem	19
2.2.1.1 Constante de tempo	19
2.2.1.2 Tempo de Acomodação T_s	19
2.2.1.3 Tempo de Subida T_r	19
2.2.2 Sistema de 2ª Ordem	19
2.2.2.1 Sistema Super Amortecido	20
2.2.2.2 Sistema Criticamente Amortecido	20
2.2.2.3 Sistema Sub Amortecido	20
2.3 Estabilidade de Sistemas	22
2.3.1 Ganho	23
2.4 Erro de Estado Estacionário	23
2.5 Controlador PID	24
2.5.1 Controle Proporcional	24
2.5.2 Controle Integral	25
2.5.3 Controle Derivativo	25
2.5.4 Controladores Proporcionais Integrais-Derivativos	25

3. Desenvolvimento	25
3.1 Estrutura	25
3.2 Construção das placas de circuito impresso	26
3.3 Ligação dos circuitos	27
3.4 Testes e resposta temporal	27
3.5 Cálculos do Compensador PID	29
3.5.1 Implementação do Compensador PID	31
Conclusão	32
Sugestão para projetos futuros	32
Referências	33

1. INTRODUÇÃO

O mundo vive em transformação a todo momento e, naturalmente, o homem sempre busca melhorá-lo de modo a tornar tarefas cada vez mais fáceis de serem realizadas. Analisando os primórdios da humanidade é possível perceber que desde que o homem produziu o fogo pela primeira vez iniciou-se uma busca incessante do controle das coisas. Não era suficiente apenas criá-lo, o que mais importava era controlá-lo de modo que se pudesse acendê-lo mais facilmente e mantê-lo aceso conforme a necessidade.

Esse desafio fez com que se desenvolvessem ferramentas que auxiliaram a construir novos equipamentos ao longo dos anos, em um efeito cascata. Assim funciona a tecnologia: uma faísca dá a energia suficiente para iniciar uma revolução e a chave para o sucesso dela é saber controlá-la.

Neste contexto, faz-se imprescindível mencionar que uma das tarefas mais importantes de qualquer processo industrial é o controle de todas suas variáveis, sejam elas máquinas, pessoas, materiais ou resultados. Dentro dos processos industriais há uma subdivisão na qual se classificam processos em malha aberta e em malha fechada.

Em processos de malha fechada, a saída é a realimentação da entrada, ou seja, uma das maiores dificuldades deste tipo de atuação é conciliar o sinal da saída com a entrada e seu respectivo erro. Mediante a tal fato, questiona-se a possibilidade de se controlar a vazão de um reservatório, de modo que seu nível seja constante.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho apresenta, como objetivo principal, a comprovação da viabilidade de realização desta tarefa, demonstrando, a partir da construção de um protótipo, como controlar o nível do tanque analogicamente. Também identifica parâmetros necessários para o desenvolvimento do compensador que será de suma importância para o êxito do projeto.

1.2 MOTIVAÇÃO

A escolha desta proposta como trabalho de conclusão de curso deve-se a premissa de que uma boa parte da estrutura física já estava realizada, porém sem nenhuma integração, e portanto, inoperante. Além disso, há grande interesse dos integrantes do grupo pelo assunto, o qual faz parte de uma disciplina essencial na grade curricular da formação tecnológica, possibilitando realizar um projeto didático que beneficiará a instituição e os colegas.

1.3 CONTEÚDO

Esta monografia está dividida em duas etapas: a primeira refere-se à fundamentação teórica dos cálculos de todos os parâmetros que serão utilizados no protótipo, bem como suas respectivas justificativas. A segunda etapa apresenta a progressão do modelo físico, sua evolução e o resultado obtido.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Um sistema de controle é projetado para realizar tarefas específicas que geram como resultado uma necessidade primitiva que é, finalmente, suprida. Existem dois tipos de sistemas de controle, denominados controle de malha aberta e controle de malha fechada (ou realimentação).

Sistemas de controle de malha aberta realizam o processo aos quais são projetados, porém não tem a função de compensar qualquer perturbação durante seu funcionamento, ou seja, realizam a tarefa, mas não verificam se a variável de saída sofreu alguma alteração.

Em contrapartida, os sistemas de controle de malha fechada possuem uma realimentação que permite comparar o sinal de saída com o sinal de entrada, verificando se durante sua passagem pelo atuador, a variável foi alterada. Esta comparação é realizada pelo bloco somador que precede o atuador e através da subtração do valor de set point (valor desejado que é atribuído à variável) pelo valor da saída constata-se se há a necessidade de correção. A diferença obtida desta subtração é conhecida como erro.

O erro é corrigido quando se aciona o bloco denominado planta, o qual possui um compensador que fará tal correção. Este trabalho realizará a construção do compensador que permitirá manter o nível do tanque constante.

Ao longo do desenvolvimento desta monografia evidenciaremos os três parâmetros essenciais para determinar a eficiência e eficácia de tal protótipo, são eles:

- Obter a resposta transitória ideal, pois ela afeta a velocidade que o sistema utilizará para realizar o processo;
- Reduzir os erros em regime permanente com o objetivo de alcançar a exatidão do sistema;
- Alcançar a estabilidade para que haja adequação dos parâmetros anteriores.

Porém, antes de determinarmos tais parâmetros, definiremos conceitos fundamentais para tal compreensão, os quais serão apresentados a seguir.

2.1 Transformada de Laplace

Para modelar nosso sistema com o objetivo de encontrar a função que determinará a resposta temporal, devemos estabelecer uma relação entre a função de entrada e a função de saída. Esta associação pode ser feita através de equações diferenciais, porém não é desejável por ser bastante complexa e pelo fato de não ser possível representar a interconexão de vários subsistemas.

Assim, utilizaremos equações algébricas, as quais podem ser bem definidas como entrada, sistema e saída, através da Transformada de Laplace, definida como:

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt$$

Onde:

- $f(t)$ = função temporal em que $f(t)=0$ para $t<0$
- s = variável complexa de Laplace
- L = símbolo que indica transformação por Laplace de $f(t)$
- $F(s)$ = transformada de Laplace de $f(t)$

Encontra-se a resposta adequada da função realizando a transformada inversa de Laplace, ou seja, efetuando a operação inversa e utilizando a tabela das transformadas e inversas obtêm-se a chamada função de transferência.

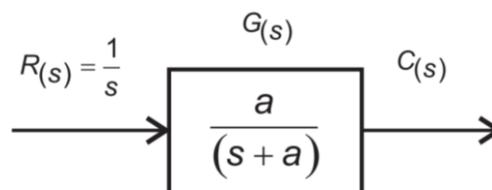
2.2 Resposta Temporal

Os pólos do sistema, ou seja, as raízes do denominador da função de transferência definem que tipo de resposta temporal o circuito possui e essa resposta é constituída de duas partes: a resposta natural, que está ligada com a função de transferência, e a resposta forçada, determinada pela excitação de entrada. Para conhecermos as características do sistema é necessário analisar a ordem e alguns parâmetros importantes que o compõem.

2.2.1 Sistema de 1ª Ordem

A figura 1 demonstra o modelo de sistemas de 1ª ordem, sem zeros e com entrada ($R(s) = 1/s$) a degrau unitário e com pólo em $-a$.

Figura 1: Sistema de 1ª Ordem



Fonte: Controle Clássico, 2016.

Os sistemas deste tipo possuem três parâmetros importantes, descritos abaixo:

2.2.1.1 - Constante de Tempo

É definida como o tempo necessário para a resposta ao degrau atingir 63% de seu valor final e é representada por $1/a$.

2.2.1.2 - Tempo de Acomodação T_s

Utiliza-se o cálculo de T_s para definir o tempo que a curva demora para chegar a uma faixa de 5% ou 2% de seu valor final. Para $T_s = 3/a$ encontra-se 5% de erro e para $T_s = 4/a$, 2% de erro.

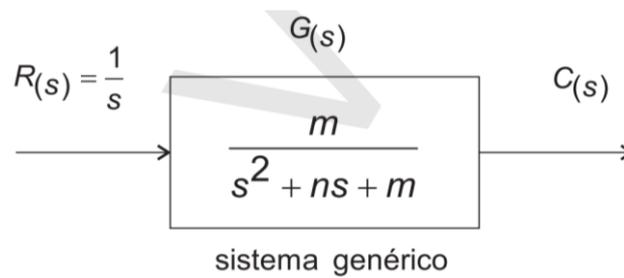
2.2.1.3 - Tempo de Subida T_r

É o tempo que o sinal demora para ir de 10% a 90% de seu valor final, sendo calculado pela diferença entre o tempo de 0,9 menos o tempo de 0,1 da função.

2.2.2 Sistema de 2ª Ordem

A figura 2 mostra o formato de um sistema genérico de segunda ordem, com entrada no degrau unitário.

Figura 2: Sistema de 2ª Ordem



Fonte: Controle Clássico, 2016.

Os pólos do sistema de segunda ordem, ou seja, as raízes da função do denominador, podem projetar três tipos de sistemas, os quais serão explicados abaixo:

2.2.2.1 Sistema Super Amortecido

Neste primeiro caso as raízes são reais e diferentes e o sistema possui o erro em regime com valor abaixo do valor de set point da variável.

2.2.1.2 Sistema Criticamente Amortecido

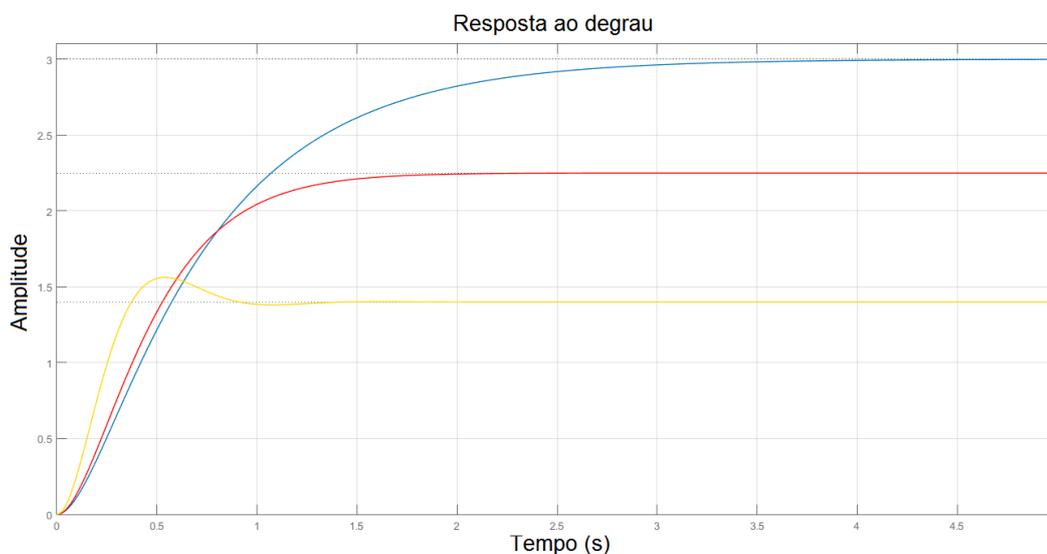
Possui duas raízes reais e iguais. Sistemas deste tipo possuem resposta mais rápida que a do primeiro tipo.

2.2.1.3 Sistema Sub Amortecido

Constituído de raízes complexas conjugadas com resposta oscilatória. Dentro de seu regime transitório há uma sobrelevação, também conhecida como overshoot.

A imagem 3 demonstra o comportamento de cada tipo de sistema, onde, o sistema super amortecido está representado na cor azul, o criticamente amortecido na cor vermelha e o sub amortecido na cor amarela.

Figura 3: Resposta Temporal de Sistemas de 2ª Ordem



Fonte: Controlador proporcional em sistemas de segunda ordem, 2016.

Existem dois parâmetros essenciais para caracterizar sistemas de segunda ordem conhecidos como frequência natural de oscilação e grau de amortecimento.

A frequência natural de oscilação é representada por ω_n e seu valor é a frequência que o sistema oscila com amplitude constante, portanto, sem amortecimento.

O grau de amortecimento é a divisão da frequência exponencial de decaimento pela frequência natural de oscilação e seu valor consegue determinar facilmente qual tipo de resposta o sistema apresentará. A tabela 1 descreve os valores do grau de amortecimento e sua respectiva resposta temporal.

Tabela 1: Grau de Amortecimento e sua resposta temporal

Grau de Amortecimento ζ	Resposta Temporal
> 1	Superamortecido
$= 1$	Amortecimento Crítico
$0 < \zeta < 1$	Sub Amortecido
$= 0$	Marginalmente Estável

Fonte: Autoria própria

2.3 Estabilidade de Sistemas

A estabilidade de um sistema é o critério mais importante para determinar sua qualidade pois um sistema instável não consegue obter uma resposta temporal e tampouco um erro de regime adequado.

Para verificar se o sistema possui estabilidade utiliza-se o método antigo, porém ainda usual mesmo com outros existentes, chamado Arranjo de Routh-Hurwitz. O objetivo do critério é determinar se há algum pólo da função em malha fechada no semiplano direito, caso haja, o sistema será instável.

O primeiro passo é construir a tabela ilustrada na figura 4 e realizar o cálculo de seus determinantes.

Figura 4: Arranjo de Routh-Hurwitz

s^5	a_5	a_3	a_1
s^4	a_4	a_2	a_0
s^3	$\frac{-\begin{vmatrix} a_5 & a_3 \\ a_4 & a_2 \end{vmatrix}}{a_4} = b_1$	$\frac{-\begin{vmatrix} a_5 & a_1 \\ a_4 & a_0 \end{vmatrix}}{a_4} = b_2$	$\frac{-\begin{vmatrix} a_5 & 0 \\ a_4 & 0 \end{vmatrix}}{a_4} = 0$
s^2	$\frac{-\begin{vmatrix} a_4 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{vmatrix}}{b_1} = c_1$	$\frac{-\begin{vmatrix} a_4 & a_0 \\ b_1 & 0 \end{vmatrix}}{b_1} = c_2$	$\frac{-\begin{vmatrix} a_4 & 0 \\ b_1 & 0 \end{vmatrix}}{b_1} = 0$
s^1	$\frac{-\begin{vmatrix} b_1 & b_2 \\ c_1 & c_2 \end{vmatrix}}{c_1} = d_1$	$\frac{-\begin{vmatrix} b_1 & 0 \\ c_1 & 0 \end{vmatrix}}{c_1} = 0$	$\frac{-\begin{vmatrix} b_1 & 0 \\ c_1 & 0 \end{vmatrix}}{c_1} = 0$
s^0	$\frac{-\begin{vmatrix} c_1 & c_2 \\ d_1 & 0 \end{vmatrix}}{d_1} = e_1$	$\frac{-\begin{vmatrix} c_1 & 0 \\ d_1 & 0 \end{vmatrix}}{d_1} = 0$	$\frac{-\begin{vmatrix} c_1 & 0 \\ d_1 & 0 \end{vmatrix}}{d_1} = 0$

Fonte: Elétrica com Scilab, 2018.

O segundo passo é analisar os sinais da primeira coluna e verificar se não há mudança entre eles. Caso tenha alguma troca de sinal, o sistema será considerado instável pois significa que o polo passou do SPE para o SPD.

2.3.1 Ganho

Dentro do conceito de estabilidade, existe um fator de extrema importância para determinar qual a faixa de valores que pode-se variar a resposta transitória, de modo que mantenha-se a estabilidade: o ganho.

Quando o ganho do sistema é variado, seus polos também variam e se essa variação não estiver dentro do range de valores que conseguem manter o sistema no semiplano esquerdo, o sistema se tornará instável.

Para calcular essa faixa de valores deve-se acrescentar um “K” no numerador e realizar os cálculos do arranjo de Routh-Hurwitz com essa variável, transformando em uma equação de primeiro ou segundo grau, isolando a variável e conseqüentemente, encontra-se a sua condição de estabilidade.

2.4 Erro de Estado Estacionário

O último dos três critérios principais para parametrizar um sistema refere-se ao erro, ou seja, a diferença entre o valor da saída e o da entrada desejada do sistema.

Em um sistema de malha fechada é essencial o cálculo do erro, pois é através dele que determina-se se o processo está funcionando como planejado. O ideal é obter sempre o erro com o valor igual a zero, porém na prática podem ocorrer perturbações que impedem o sistema de funcionar perfeitamente. Justifica-se então, a necessidade de um controle que corrija rapidamente este erro e torne o sistema mais eficiente.

Para calcular o valor do erro é preciso identificar qual o tipo do sistema estudado, para isso, convencionou-se utilizar excitações padrões que pudessem permitir a comparação dos sistemas. Não cabe a este trabalho explicar os cálculos realizados para determinar quais as fórmulas de cada um dos erros, todavia, verifica-se na tabela 2 qual o tipo do sistema e seu respectivo erro.

Tabela 2: Erro de Estado Estacionário

Entrada	Fórmula do erro em regime permanente	Tipo 0		Tipo 1		Tipo 2	
		Constante de erro estático	Erro	Constante de erro estático	Erro	Constante de erro estático	Erro
Degrau, $u(t)$	$\frac{1}{1+K_p}$	$K_p =$ Constante	$\frac{1}{1+K_p}$	$K_p = \infty$	0	$K_p = \infty$	0
Rampa, $tu(t)$	$\frac{1}{K_v}$	$K_v = 0$	∞	$K_v =$ Constante	$\frac{1}{K_v}$	$K_v = \infty$	0
Parábola, $\frac{1}{2}t^2 u(t)$	$\frac{1}{K_a}$	$K_a = 0$	∞	$K_a = 0$	∞	$K_a =$ Constante	$\frac{1}{K_a}$

Fonte: Engenharia de Sistemas de Controle, 2013

2.5 Controlador PID

Após analisar as características de um sistema e verificar sua resposta temporal, seu erro de estado estacionário e a estabilidade geralmente há a necessidade de implantar-se um compensador, ou seja, um controlador que corrija qualquer perturbação do processo autonomamente.

Um dos controladores mais utilizados na indústria é o PID pois é robusto, relativamente simples de configurar e bastante eficaz. Este algoritmo é composto por três coeficientes: Proporcional, Integrativo e Derivativo.

2.5.1 Controle Proporcional

O ganho proporcional do controlador refere-se a um amplificador com ganho ajustável, onde a magnitude do erro possui um valor proporcional ao da saída.

2.5.2 Controle Integral

A componente integral soma o termo de erro ao longo do tempo e independentemente se o valor do erro for grande ou pequeno, a componente integral aumentará lentamente.

2.5.3 Controle Derivativo

Neste tipo de controle, a derivada é proporcional à taxa de variação da variável de processo e geralmente é usada para que o sistema aumente a velocidade da resposta com mais ênfase quando houver mudanças no parâmetro de erro.

2.5.4 Controladores Proporcionais Integrais-Derivativos

O controlador PID é a junção dos três controladores, onde as desvantagens de cada um são compensadas pelas vantagens dos outros.

O ganho proporcional torna o sistema mais rápido, porém é necessário cuidado para não torná-lo instável. O coeficiente integral reduz o erro mas aumenta o valor da ultrapassagem. Ao configurar o termo derivativo, diminui-se a ultrapassagem, aumenta-se o ganho e faz-se com que o sistema seja sensível ao ruído.

Realizando a parametrização correta dos três termos, tem-se um controlador simples e extremamente eficiente.

3. DESENVOLVIMENTO

Após o entendimento da fundamentação teórica, inicia-se a confecção do protótipo, o qual será explicado nos tópicos seguintes.

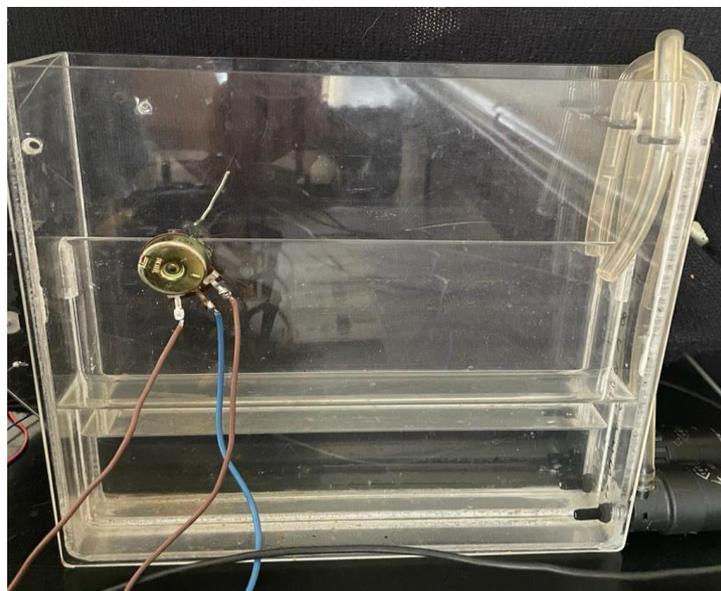
3.1 Estrutura

O primeiro passo foi a construção da estrutura que simulará o tanque. O grupo optou por construir dois compartimentos dentro do tanque: um é o tanque o qual será controlado o nível e o outro é o que armazenará a água retirada pela bomba de vazão.

Os materiais utilizados foram o acrílico por ser resistente, ideal para visualização de líquidos em seu interior e possui custo acessível.

Na figura 5 pode-se observar o tanque construído e seus dois compartimentos, o de nível e o de retorno:

Figura 5 : Estrutura do protótipo



Fonte: Autoria própria, 2021.

3.2 Construção das placas de circuito impresso

O segundo passo foi realizar a construção das placas de circuito impresso (PCI). Iniciou-se planejando o desenho do circuito e para realizá-lo foi utilizado o software *Fritzing*, onde é possível desenhar as trilhas do circuito e o programa gera o desenho a ser impresso.

Para passar o desenho para a placa de fenolite cobreada foi utilizado o método de transferência térmica: é importante realizar a limpeza da placa com palha de aço para garantir que não tenha impurezas que possam causar falhas na impressão, em seguida, com o circuito já impresso em papel fotográfico é necessário colocá-lo sobre a placa com o lado impresso virado para o cobre, utilizando um ferro de passar roupa como ferramenta de calor é necessário passá-lo sobre o papel em todas as direções. Em seguida vem a remoção do papel, para removê-lo basta lavar até que fique amolecido e se solte sozinho. Caso tenha alguma falha é possível utilizar uma caneta permanente de retroprojeto para corrigi-las.

O próximo passo é iniciar a corrosão, onde todo cobre que está exposto é dissolvido pelo corrosivo (que neste caso é o perclorato de ferro), com exceção da

área que estiver protegida pela tinta. Ao iniciar a corrosão, foi necessário fazer um furo na ponta da PCI e amarrar um barbante com o intuito de ajudar no manuseio, logo após, basta colocar o percloroeto dentro de uma vasilha de plástico e mergulhar a placa de fenolite.

Os materiais utilizados consistem em: percloroeto de ferro, caneta permanente para retroprojeter, palha de aço, ferro de passar, papel fotográfico, placas de fenolite cobreada e software Fritzing.

Para finalizar as PCI's basta realizar os furos nos lugares indicados no o circuito impresso, neste caso não foi utilizado o perfurador para placas, mas sim uma furadeira de bancada com brocas de 1mm.

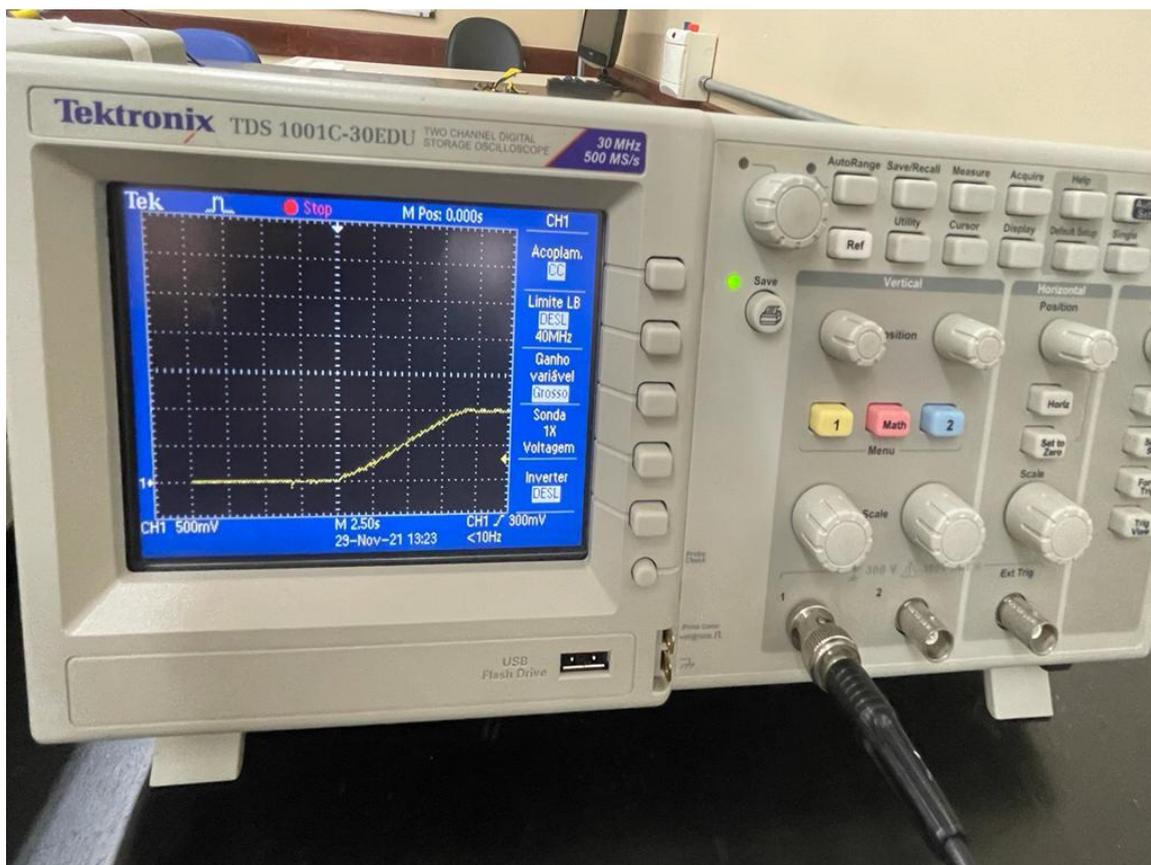
3.3 Ligação dos circuitos

Após a construção das plaquinhas foi necessário iniciar a ligação dos circuitos. Cada uma das trilhas da PCI é equivalente a um fio de condução, elas são basicamente listras de cobre condutoras de sinais e para realizar a ligação do circuito basta colocar os componentes nos furos feitos utilizando o auxílio do estanho e ferro de solda para fixar.

3.4 Testes e resposta temporal

Com o tanque de nível vazio aplicou-se um degrau para que a bomba começasse a enchê-lo até atingir o nível definido no set point. Conectou-se um osciloscópio ao potenciômetro do nível para verificar a resposta temporal do sistema. A figura 6 mostra o resultado do primeiro teste desta resposta temporal:

Figura 6 : Resposta do Sistema de 1ª Ordem



Fonte: Autoria própria, 2021.

Realizou-se então este procedimento por mais quatro vezes para encontrar-se uma média dos valores que nos darão a resposta temporal do sistema. Como demonstrado no tópico 2.2.1 a resposta temporal de um sistema de 1ª ordem é composta pelo coeficiente “a” cujo valor é encontrado de acordo com o cálculo abaixo:

- $0,632.8,5 = 1/a$ $1/a = 5,3$ segundos
- $a = 0,188$

Portanto, a função de transferência do sistema primitivo, ou seja, do sistema de primeira ordem é:

$$\frac{a}{(s + a)} = \frac{\square, \square \square \square}{(s + \square, \square \square \square)}$$

3.5 Cálculos do Compensador PID

Após encontrar a função de transferência deve-se iniciar os cálculos para construir o compensador. Para isso, utiliza-se a fórmula abaixo, na qual k é o ganho, s são os pólos da função e z são os zeros do sistema. Através do estudo do lugar das raízes, adotando os novos polos como $-0,188 \pm j0,188$, surgem as seguintes equações:

- $\Sigma\theta = 180^\circ$
- $\alpha_1 = \arctg 0,188 / 0,188 + 90^\circ = 135^\circ$
- $\alpha_2 = 90^\circ$
- $\alpha_3 = 180 - 135 - 90 = -45^\circ$

Logo, temos dois zeros com $22,5^\circ$

Ao encontrar o valor de alfa 3 deve-se então encontrar o valor de L , como demonstrado abaixo:

$$\operatorname{tg} \alpha_3 = \frac{0,188}{L} \quad \text{Portanto, } L = 0,454$$

Com isso, consegue-se determinar o valor dos polos z :

$$Z = - (0,188 + j0,454)$$

$$Z = - 0,64$$

Portanto, a equação primitiva do PID é a descrita abaixo:

$$PID = K \cdot \frac{(s + 0,64)^2}{s}$$

O próximo passo é calcular o valor de K , como descrito abaixo:

$$K = \frac{1 |180^\circ \cdot (-0,188 + j0,188) \cdot (0,188j)}{0,188(0,454 + j0,188) (0,454 + j0,188)}$$

$$K = 1,1 |36^\circ$$

Substituindo o valor de K , temos:

$$1,1 \frac{(s + 0,64)^2}{s} = 0,45 \frac{(1,56s + 1)}{s}$$

Com a função de transferência definida consegue-se calcular os valores dos resistores e capacitores necessários para implementar o sistema PID, como demonstrado a seguir:

$$\frac{0,45 (1,56s + 1)}{s} = \frac{R4}{R3 \cdot R1 \cdot C2} \left[\frac{(R1C1s + 1) (R2C2s + 1)}{s} \right]$$

Portanto:

$$R1 \cdot C1 = R2 \cdot C2 = 1,56$$

Adotando $C1 = C2 = 10\mu F$ e $R3 = 20k\Omega$:

$$R1 = R2 = \frac{15,6}{10\mu F}$$

$$R4 = R3 \cdot R1 \cdot C2 \cdot 0,45$$

Desta forma, chega-se nos seguintes valores:

- $R1 = R2 = 156K\Omega$
- $R3 = 20K\Omega$
- $R4 = 14K\Omega$
- $C1 = C2 = 10\mu F$

O último passo é calcular efetivamente os fatores do PID:

$$\frac{Kd \cdot (s^2 + (Kp/Kd)s + Ki/Kd)}{s} = \frac{0,45 (s + 0,1) \cdot (s + 0,64)}{s}$$

$$\frac{Kd \cdot (s^2 + (Kp/Kd)s + Ki/Kd)}{s} = \frac{0,45 (s^2 + 0,75s + 0,064)}{s}$$

$$Kd = 0,45 \quad Kp/Kd = 0,75 \quad Ki/Kd = 0,064$$

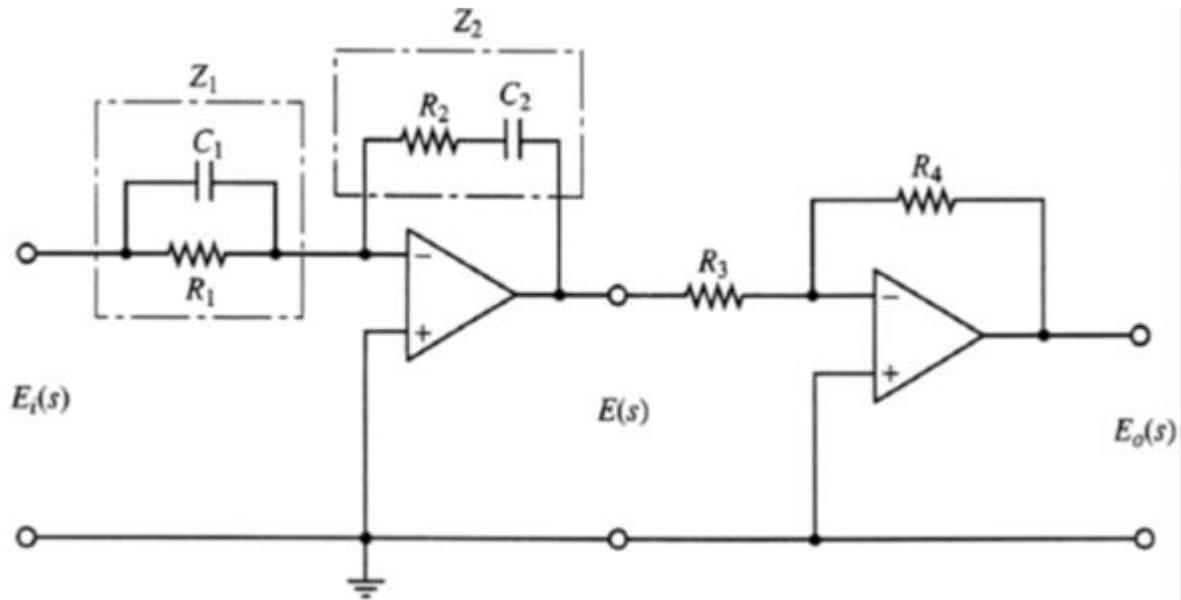
Portanto, os parâmetros do compensador serão:

- $Kd = 0,45$
- $Kp = 0,337$
- $Ki = 0,0288$

3.5.1 Implementação do compensador PID

Após encontrar os parâmetros ideais para construir o compensador, desenvolveu-se a montagem do circuito, a qual está demonstrada na figura 7

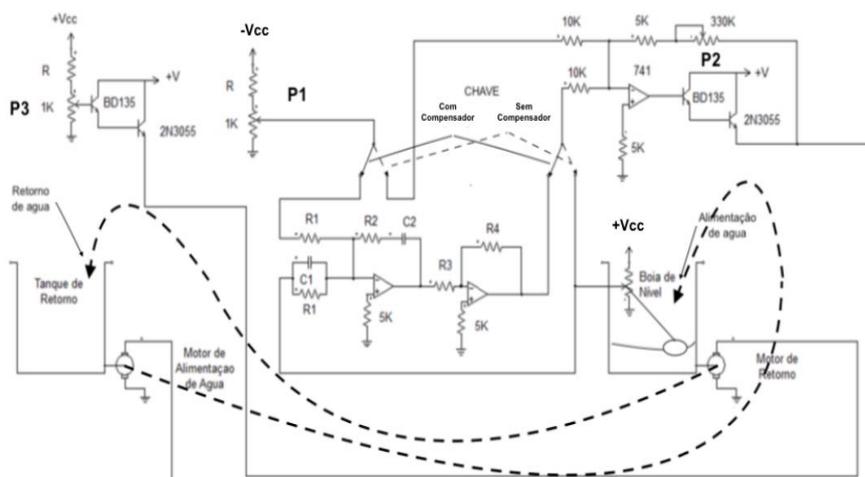
Figura 7: Compensador PID com amplificadores operacionais



Fonte: Engenharia de Controle Moderno, 2010.

A implementação do compensador com o circuito de controle de nível, com o de vazão e com as placas de alimentação dos motores está demonstrada na imagem 8:

Figura 8: Projeto do Compensador integrado ao Controle:



Fonte: Controle Clássico, 2016.

CONCLUSÃO

Este trabalho demonstrou o comportamento de um sistema de 1ª ordem que possui erro de estado estacionário e não consegue manter o nível de um reservatório no valor de set point, quando se tem vazão constante. Além disso, comprovou-se que com a implementação de um controlador Proporcional Integrativo Derivativo consegue-se corrigir este problema de modo que o sistema passe a ser de 2ª ordem, mantendo o nível desejado mesmo com o consumo de líquido, garantindo a eficiência do processo e a eficácia do sistema.

Conclui-se, portanto, que o controlador PID é uma excelente opção para qualquer tipo de processo industrial em que deseja-se obter controle da variável manipulada, com baixo custo e de modo satisfatório.

Sugestão para projetos futuros

Este trabalho teve o objetivo de desenvolver o controle de nível analogicamente, através de um controlador PID, a sugestão para projetos futuros refere-se à implementação de um controle digital que complemente o controle analógico, por exemplo através do microcontrolador Arduino, evidenciando as diferenças entre os dois controles, suas vantagens e desvantagens.

REFERÊNCIAS

MADEIRA, Daniel. “**Controlador proporcional em sistemas de segunda ordem**” Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/controlador-proporcional-em-sistemas-de-segunda-ordem/>> Acesso em: 04 de junho de 2021;

PUGLIA, Luiz Vasco. “**Controle Clássico**” Disponível em: <https://b77a0b1d-68d5-46dd-a11a-f8d0a486e17a.filesusr.com/ugd/ddaddf_579d49ef6c464730a90fbf9ef4c66b16.pdf> Acesso em: 30 de maio de 2021;

OGATA, Katsuhiko “**Engenharia de Controle Moderno**”. Editora Pearson Universidades, 30, novembro de 2010, 824p. 5ª edição;

NISE, Norman S “**Engenharia de Sistemas de controle**”. Editora LTC, Rio de Janeiro, 2013. 6ª edição;

“**Explicando a Teoria PID**” Disponível em: <ni.com/pt-br/innovations/white-papers/06/pid-theory-explained.html> Acesso em: Novembro, 2021.