UNICESUMAR - CENTRO UNIVERSITÁRIO DE MARINGÁ

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS TECNOLÓGICAS E AGRÁRIAS

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

BANCADA DIDÁTICA PARA CONTROLE MULTIVARIÁVEL DE NÍVEL E TEMPERATURA

MAICON DOUGLAS LELES DA SILVA

MARINGÁ – PR

2019

MAICON DOUGLAS LELES DA SILVA

BANCADA DIDÁTICA PARA CONTROLE MULTIVARIÁVEL DE NÍVEL E TEMPERATURA

Artigo apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da UNICESUMAR – Centro Universitário de Maringá - como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Controle e Automação, sob a orientação do Prof. Me. Murillo Vilela Magan.

MARINGÁ – PR

2019

MAICON DOUGLAS LELES DA SILVA

BANCADA DIDÁTICA PARA CONTROLE MULTIVARIÁVEL DE NÍVEL E TEMPERATURA

Artigo apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da UNICESUMAR – Centro Universitário de Maringá - como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Controle e Automação, sob a orientação do Prof. Me. Murillo Vilela Magan.

Aprovado em: 02 de dezembro de 2019.

BANCA EXAMINADORA

_____

Murillo Vilela Magan – (Mestre, UniCesumar)

_____

Igor Henrique Do Nascimento Oliveira - (Mestre, UniCesumar)

À minha esposa, Hellen,

Aos meus pais, Maria Claudete e Reinaldo,

Aos meus sogros, Inez e Anderson,

Eu dedico este Trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela sua graça, bondade, misericórdia, privilégio e oportunidade de desfrutar deste momento ímpar, guiando-me, concedendo-me sabedoria, paciência e humildade, durante todo este percurso.

Sou imensamente grato à minha esposa, Hellen, pelo seu amor, seu carinho, sua amizade e seu companheirismo, além de sempre ter me apoiado e compreendido todos os meus momentos de ausência na dedicação a este trabalho, encorajando-me a nunca desistir dos meus objetivos.

Sou muito grato também aos meus pais, Maria Claudete e Reinaldo, que me ensinaram a tomar as decisões certas, sempre ao meu lado, fornecendo-me todo o suporte para eu chegar até aqui.

Fica também o meu agradecimento aos meus sogros, Inez e Anderson, que sempre me apoiaram, auxiliando-me nas horas mais difíceis, com palavras de ânimo e sabedoria.

Agradeço ao meu orientador, Me. Murillo Magan, e ao professor Me. Igor Oliveira, que, ao longo desta caminhada, compartilharam seus conhecimentos e lições da vida, fazendo com que eu olhasse de forma diferente para as coisas mais simples.

Fica aqui declarada a minha gratidão ao Guilherme Guimarães e amigos do laboratório de acionamentos elétricos da UniCesumar, pelo companheirismo, apoio, conselhos e motivação para a conclusão deste trabalho.

Por fim, agradeço à instituição UniCesumar, por ter disponibilizado o ambiente e os insumos utilizados nesta pesquisa.

“O homem sem Deus é como o vento, nunca saberá de onde vem nem para onde vai”.

Vanderléia de Jesus Nunes

BANCADA DIDÁTICA PARA CONTROLE MULTIVARIÁVEL DE NÍVEL E TEMPERATURA

Maicon Douglas Leles da Silva

RESUMO

Este trabalho tem por finalidade o desenvolvimento de uma bancada didática de controle de nível e temperatura multivariável em dois tanques reservatórios, com o propósito de trazer uma aplicação industrial para o campo didático, para o uso de futuros discentes em disciplinas envolvendo o controle de processos. Foram consideradas a implementação em sistema de nível e temperatura monovariável bem como a interação entre elas, tornando o sistema multivariável. Para o acionamento dos atuadores e mensuração das variáveis de processos, foram desenvolvidos um circuito de condicionamento de sinais, para adequar os sinais dos sensores a níveis aceitos pelo controlador; dois circuitos de drivers Push-Pull, para o acionamento das bombas; e um circuito de disparo utilizando-se o TCA785, para se alterar o ângulo de disparo no tiristor, controlando-se a tensão e, consequentemente, a potência na resistência. Para o projeto dos controladores, foram utilizados dois métodos: o projeto de controlador PID com pré-filtro, em que foi obtido um modelo matemático aproximado de primeira ordem que representa a planta e, posteriormente, foi realizado o projeto dos controladores com as especificações transitórias desejadas, além da sintonia de controladores pelo método do relé realimentado, com a abordagem puramente experimental. Foram obtidos os resultados simulados e práticos dos dois métodos, e, então, comparados sob um aspecto qualitativo.

Palavras-chave: Controle Multivariável. Nível e Temperatura. Controle PID. Identificação de Sistemas. Sintonia de Controladores.

DIDACTIC BENCH FOR MULTIVARIABLE CONTROL OF LEVEL AND TEMPERATURE

ABSTRACT

The purpose of this work is the development of a didactic bench to control the level and multivariate temperature in two reservoir tanks. With the purpose of bringing an industrial application to the didactic field, for the use of future students in disciplines involving process control. It was considered the implementation in monovariable level and temperature system as well as the interaction between them, making the system multivariable. For the actuation of the actuators and measurement of the process variables were developed: a signal conditioning circuit, to adapt the sensor signals to levels accepted by the controller; two Push-Pull driver circuits, for the activation of the pumps; and a trip circuit using TCA785, to change the trip angle in the thyristor, controlling the voltage and, consequently, the power in the resistance. For the design of the controllers, two methods were used: the design of PID controller with pre-filter, in which an approximate mathematical model of first order was obtained that represents the plant and, subsequently, the design of controllers with the desired transitory specifications was performed; and the tuning of controllers by the method of the relay fed back, with the purely experimental approach. The simulated and practical results of the two methods were obtained and then compared under a qualitative aspect.

Palavras-chave: Multivariable control. Level and Temperature. PID control. Systems Identification. Controllers tuning.

Sumário

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. Objetivo geral 2
1.2. Objetivos específicos 2
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 2
2.1. Controlador PID 2
2.2. Ação proporcional (P) 3
2.3. Ação integral (I) 3
2.4. Ação derivativa (D) 3
2.5. Sintonia de controlador PID 4
2.6. Aplicação do controle PID 5
3. METODOLOGIA 5
3.1. Composição da bancada 6
3.2. Desenvolvimento do circuito eletrônico 9
3.2.1. Circuito de disparo TCA785 9
3.2.2. Condicionamento de sinal do sensor de nível 10
3.2.3. Condicionamento Do sinal sensor de temperatura 10
3.2.4. Driver Push-Pull 11
3.3. Modelagem 12
3.3.1. Combinações da planta 12
3.4. Método experimental 13
3.5. Projeto do controlador 17
3.6. Projeto pré-filtro 19
3.7. Sintonia de controlador método rele realimentado 20
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 23
5. CONCLUSÃO 26
5.1. Propostas futuras 27
REFERÊNCIAS 28
APÊNDICES 29
APÊNDICE A – LISTA DE MATERIAIS 29
APÊNDICE B – LAYOUT DA PLACA D CIRCUITO IMPESSO 30
APÊNDICE C – DIAGRAMA ELÉTRICO 31

1. INTRODUÇÃO

A partir da década de 1990, houve a necessidade crescente de desenvolver formas para se obter modelos matemáticos a partir de dados observados e não unicamente das equações que descrevem o fenômeno físico do processo. De acordo com Aguirre (2004), as possíveis razões para essa mudança seriam que, em primeiro lugar, geralmente os sistemas com os quais se necessitava lidar eram mais complexos, e, consequentemente, nem sempre era possível se escrever as equações básicas, procedimento este conhecido como modelagem fenomenológica ou modelagem baseada na física do processo.

Em segundo lugar, com o advento da informática, os computadores tornaram-se baratos e acessíveis, apresentando bom desempenho, viabilizando-se, assim, o seu uso para se processar dados coletados diretamente dos sistemas e, a partir de tais observações, desenvolver modelos matemáticos capazes de explicar a dinâmica dos processos, procedimento este conhecido como modelagem empírica ou identificação de sistemas. Ogata (2011) diz que, uma vez obtido o modelo matemático de um sistema, podem ser utilizadas várias ferramentas analíticas e de computação para efeito de análise e síntese.

A identificação de sistemas é uma área do conhecimento que estuda maneiras de se modelar e analisar sistemas a partir da observação (AGUIRRE, 2000). É um termo utilizado para se descrever as ferramentas matemáticas e que permitem construir modelos dinâmicos a partir de dados medidos.

Controlar um processo significa atuar sobre ele, ou sobre as condições a que o processo está sujeito, de modo a se atingir algum objetivo - por exemplo, pode-se considerar necessário ou desejável manter o processo sempre próximo de determinado estado estacionário, mesmo que efeitos externos tentem desvia-lo dessa condição. Esse estado estacionário pode ter sido escolhido por atender melhor aos requisitos de qualidade e segurança do processo.

Nesta pesquisa, considerou-se apenas a malha de nível do reservatório

Este trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo 2, apresenta-se o controlador PID: o princípio de funcionamento, métodos de sintonia e possíveis implementações descritas em artigos e livros; no capítulo 3,

comenta-se sobre o desenvolvimento da montagem da bancada, evidenciando-se os componentes eletrônicos e insumos utilizados; no capítulo 4, mostram-se a planta considerada para testes, os métodos utilizados para se encontrar a função de transferência, o projeto dos controladores e pré-filtro, bem como a implementação das técnicas; no capítulo 5, são apresentados os resultados e discussões; no capítulo 6, são apresentadas as conclusões e são propostos trabalhos futuros para continuidade da pesquisa.

1.1. OBJETIVO GERAL

Construir uma bancada didática, para aplicação de controle monovariável e multivariável de nível e temperatura.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Especificar a estrutura da bancada, os componentes;
- Dimensionar os componentes elétricos;
- Obter modelo matemático;
- Projetar controlador para planta monovariável de nível.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção foram contextualizados o controlador PID bem como suas ações proporcional, integral e derivativa. A sintonia de controlador é expressa de forma objetiva, mostrando-se também a aplicação desta pesquisa.

2.1. CONTROLADOR PID

Estima-se que mais de 90% de malhas de controle empregam controle PID (KNOSPE,2006). De acordo com CAMPOS e TEIXEIRA (2010), o

controlador proporcional, integral e derivativo (PID) gera a sua saída proporcionalmente ao erro, à integral do erro e à derivada do erro.

Muitas vezes com o ganho derivativo definido a zero. O controlador PID se baseia em três ações de controle: a ação proporcional, a integral e, por fim, a derivativa.

2.2. AÇÃO PROPORCIONAL (P)

O controle proporcional é uma ação de controle proporcional ao erro. Esse controle procura garantir melhor resposta no tempo da malha. Para se remover o sinal de proporcionalidade entre as duas variáveis em questão, deve-se admitir uma constante entre as mesmas. Esta constante é o ganho proporcional Kp.

2.3. AÇÃO INTEGRAL (I)

Em conformidade com CAMPOS e TEIXEIRA (2010), a ação integral produz um sinal de saída que é proporcional à magnitude e à duração do erro, ou seja, ao erro acumulado. Isso fornece uma alternativa para se corrigir o erro de offset gerado pela ação proporcional e acelera a resposta do sistema, permitindo que chegue ao regime estacionário mais rapidamente.

2.4. AÇÃO DERIVATIVA (D)

A ação derivativa fornece correção antecipada do erro, diminuindo o tempo de resposta e melhorando a estabilidade do sistema. Essa ação ocorre em intervalos regulares, denominado tempo derivativo. Esse parâmetro é inversamente proporcional à velocidade de variação da variável controlada. Isso indica que a ação derivativa não deve ser utilizada em processos nos quais o sistema deve responder rapidamente a uma perturbação, nem em processos que apresentem muito ruído no sinal medido, pois levaria o processo à instabilidade.

2.5. SINTONIA DE CONTROLADOR PID

O processo de selecionar parâmetros do controlador que garantam dada especificação de desempenho é conhecido como sintonia do controlador. Um método de sintonia muito conhecido, e bastante utilizado pela sua facilidade, de implementação foi sugerido por Ziegler e Nichols, em 1942 (ZIEGLER e NICHOLS, 1942) e se baseia na resposta ao degrau ou no valor de Kp que resulta em estabilidade marginal quando somente uma ação proporcional é utilizada.

Para se obter um controlador capaz de garantir que a resposta do sistema em malha fechada cumpra os requisitos desejados, faz-se necessário conseguir um modelo matemático do sistema a ser controlado - este é construído com base em hipótese e simplificações a respeito da dinâmica do sistema físico modelado- ou, por meio de métodos experimentais, encontrar constantes que, ao serem manipuladas matematicamente, podem projetar um controlador mesmo que não haja um modelo matemático do sistema.

Este trabalho foi baseado em dois métodos de modelagem, o método experimental e o método rele-realimentado. O primeiro método mencionado consiste em se obter um modelo aproximado de um sistema de primeira ordem por meio de uma análise gráfica, a partir da aplicação de um degrau à planta e à análise gráfica da resposta do sistema. Com a amplitude do degrau aplicado, podem-se medir a constante de tempo e o valor do regime permanente (valor final), a partir do qual a função de transferência pode ser obtida. Uma vez que a função de transferência é encontrada, podem-se projetar os controladores, levando-se em consideração o tempo de assentamento e a máxima ultrapassagem desejável.

O segundo método rele-realimentado consiste em se obter duas constantes importantes do sistema, aplicando-se um sinal pseudoaleatório na planta, onde a tendência do sistema é oscilar. Dessa forma, analisa-se graficamente a resposta do sistema buscando-se encontrar o ganho crítico K_{pu} e o período crítico P_u. Com essas duas constantes, Ziegler – Nichols e Tyreus – Luyben criaram uma tabela de sintonia, na qual é possível encontrar o valor das constantes de controle (ZIEGLER e NICHOLS, 1942).

2.6. APLICAÇÃO DO CONTROLE PID

Esta pesquisa tem por objetivo construir uma bancada didática para a aplicação das técnicas de controle em nível e temperatura, possibilitando configurá-la em uma planta monovariável ou multivariável. Para o controle monovariável, foram consideradas as plantas independentes de nível e temperatura, já para o controle multivariável foi considerado apenas um dos reservatórios, e este tem ligação com o outro reservatório e uma resistência elétrica, dessa forma, é possível mensurar e controlar o nível e a temperatura da água simultaneamente. Ainda que se varie o valor do setpoint, alterando-se, então, o valor do nível e da temperatura desejada, o sistema compensa-a pela entrada de água fria do outro reservatório. A temperatura também pode ser modificada por meio da variação da potência na resistência elétrica. Foi considerado, para o controle de nível dos reservatórios, o balanço das massas do processo, relacionando-se a vazão de entrada e a de saída, regulando-se, então, o volume de água que deverá ser aquecido no sistema.

Assim, para se atuar sobre as variáveis manipuladas da planta física e mensurar as variáveis controladas, foram utilizados os seguintes dispositivos: duas bombas fluídicas (uma para cada reservatório), para bombear a água até os respectivos reservatórios; duas válvulas manuais de vazão de entrada de água, para controlar a vazão de saída nos reservatórios; uma resistência elétrica, para aquecimento da água; dois transmissores de nível ultrassônico e um transmissor de temperatura na saída do reservatório inferior para monitorar a variação de temperatura da água. Foram desenvolvidas equações fenomenológicas (analíticas) que relacionam as variáveis de temperatura e de balanço de massa.

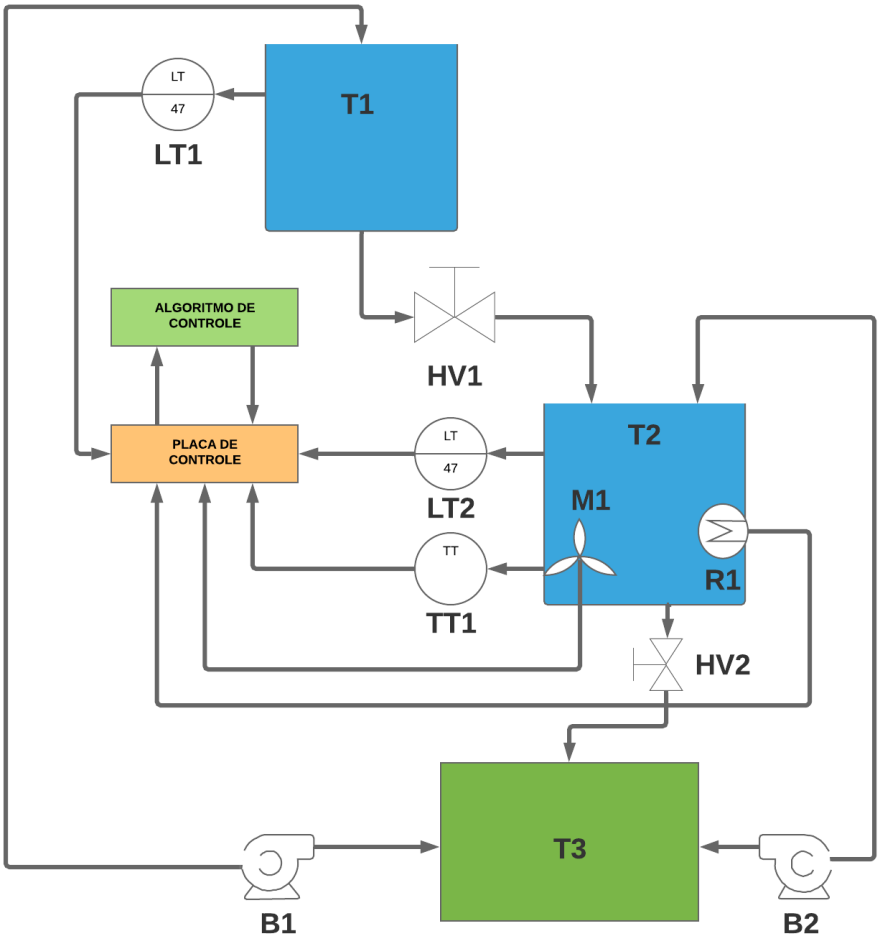
3. METODOLOGIA

Nesta seção, será abordada a metodologia utilizada para montagem da bancada, de forma simples e clara, detalhando-se os métodos e técnicas abordadas.

3.1. COMPOSIÇÃO DA BANCADA

A bancada desenvolvida foi composta por três reservatórios, nomeados como Reservatório 1 (T1), Reservatório 2 (T2) e Reservatório 3 (T3). O T1 possui capacidade de armazenamento de 60 Litros (L), utilizado para o abastecimento do sistema integrado, contendo duas bombas hidráulicas, nomeadas como Bomba 1 (B1) e Bomba 2 (B2) com capacidade de fluxo de 800L/h e tensão nominal de 24V em corrente contínua (CC), o que torna possíveis a variação da torração e vazão por meio da variação do *PWM (Pulse Width Modulation),* entre 0 a 255, correspondendo à vazão mínima e à máxima, respectivamente. As bombas são acionadas para levar a água até o T2 e o T3, respectivamente. O fluxograma do processo é mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma do processo.



Fonte: Autor, 2019.

Em que:

- B1: Bomba de Entrada do Tanque 1;
- B2: Bomba de Entrada do Tanque 2;
- M1: Misturador;
- R1: Resistência;
- T1: Tanque 1;
- T2: Tanque 2;
- T3: Tanque 3;
- LT1: Transmissor de Nível 1;
- LT2: Transmissor de Nível 2;
- TT1: Transmissor de Temperatura 1;
- HV1: Válvula Manual de Fluxo 1;
- HV2: Válvula Manual de Fluxo 2.

O T2 possui capacidade de armazenamento de 20L e contém tubulações com diâmetro de ½” e ¾” que conectam ao T1. No T2 foi inserida uma resistência (R1) de 6KW de potência, alimentada com tensão nominal de 220V em corrente alternada (AC); por meio da variação do *PWM,* entre 0 a 255, ocorre a variação por meio de um circuito de disparo com Circuito Integrado (CI) TCA785, do ângulo de disparo no tiristor, controlando a tensão e, consequentemente, a potência na carga.

O T2 foi projetado para ser um sistema modular, podendo ser configurado como um sistema monovariável (SISO), com apenas uma entrada e uma saída, ou multivariável (MIMO) com múltiplas entradas e múltiplas saídas. Dessa forma, o sistema pode ser configurado de três maneiras distintas: o controle de nível; o controle de temperatura; e o controle de nível e temperatura.

O T3 tem a capacidade de armazenamento de 20L e contém tubulações com diâmetro de ½” e ¾” que se conectam ao T1 e ao T2. A conexão entre T3 e T2 é por meio de uma válvula hidráulica esférica de fechamento rápido (HV1) com diâmetro de ¾”. A B2 faz o bombeamento de água para o T3, por meio da variação de um *PWM* entre 0 a 255, correspondendo à vazão mínima e à máxima, respectivamente.

Dessa forma, o T3 se torna um sistema monovariável, possibilitando o controle do nível; pode também ser acoplado a T2 por meio da HV1, tornando-se um sistema multivariável. A configuração deste último sistema é possível de duas formas: o controle de nível no T1 e T2; o controle de nível no T1 e T2 e o controle de temperatura no T2.

Para se mensurar as variáveis de nível e temperatura, foram utilizados dois sensores de nível ultrassônico (BANNER - T30UXIBQ8), com faixa de operação entre 200 a 2000mm, alimentados com tensão entre 10 a 30 Vcc. Os sensores retornam sinais de corrente como saída entre 4 a 20mA, proporcional aos níveis inferior e superior, respectivamente. Para se mensurar a variável de temperatura, utilizou-se um sensor Pt100 que, conectado a um transmissor de temperatura para cabeçote (NOVUS- TxBlock-USB), converte o sinal do Pt100 para sinais de corrente como saída entre 4 a 20 mA, proporcional às temperaturas mínima e máxima, respectivamente.

Foram desenvolvidos dois sistemas de segurança, para se evitar que o sistema ultrapasse a capacidade máxima de T2 e T3, isto é, exceda a quantidade de água suportada pelo sistema, e foram instalados dois sensores de nível digitais, que atuam no circuito de acionamento de B1 e B2, quando ultrapassar a quantidade de 18L de água em qualquer dos reservatórios, enviando sinal para o rele que realiza o desacionamento automático das bombas. O sistema voltará à sua operação quando o nível for inferior a 18L.

O outro sistema de segurança foi desenvolvido para se evitar danos ao resistor, após a obtenção da informação do fabricante da resistência por meio de correio eletrônico (e-mail); o dispositivo deve ser acionado depois de o preenchimento de 80% do seu corpo estar imerso na água. O sistema foi composto por um sensor de nível digital que aciona um contator permitindo que haja passagem de corrente elétrica, quando a resistência for acionada, toda vez que o nível de T2 for superior a 80%, que, em T2, corresponde a 15L.

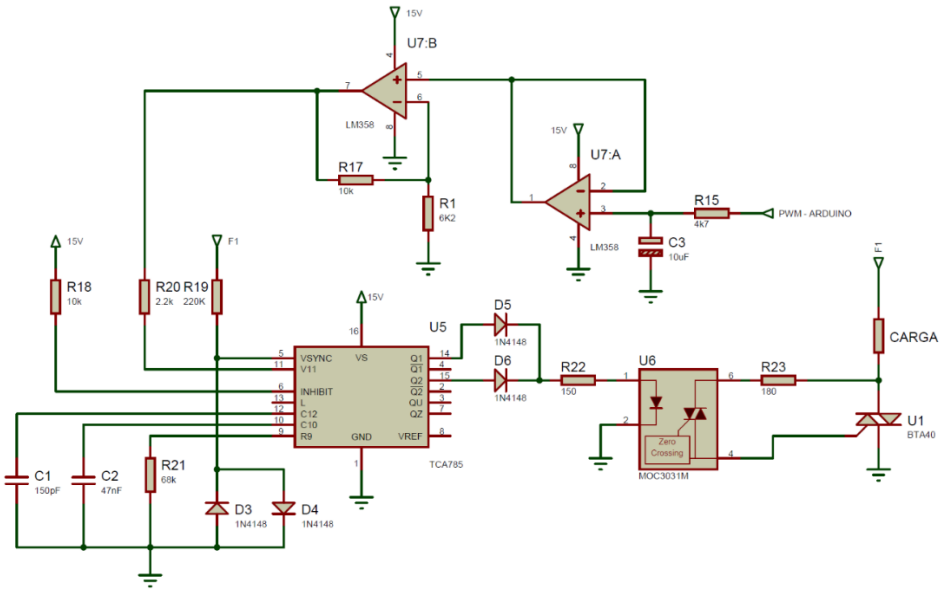
3.2. Desenvolvimento do circuito eletrônico

Para se conectar todos os dispositivos, foi necessário projetar uma placa de circuito impresso, com o intuito de interagir a planta física com computadores e softwares que realizam o processamento dos sinais. A placa foi projetada contendo um controlador Arduino UNO® que fará o processamento dos sinais e atuará diretamente na planta enviando comandos para acionar as bombas e a resistência.

3.2.1. CIRCUITO DE DISPARO TCA785

Um circuito de disparo com CI TCA785, que, sincronizado com a rede, realiza o fatiamento da senoide, foi implementando para se controlar a potência dissipada pela resistência. Este CI recebe um sinal de tensão variante de 0 a 13V, a qual, de acordo com sua variação, muda o ângulo de disparo proporcionalmente, dessa forma, o tiristor é ativado e desativado de acordo com os pulsos de disparo do CI, permitindo ou não a passagem de tensão na resistência, controlando sua potência. Na Figura 2, é possível observar o diagrama elétrico do circuito de disparo.

Figura 2 - Circuito de disparo do tiristor com TCA785.

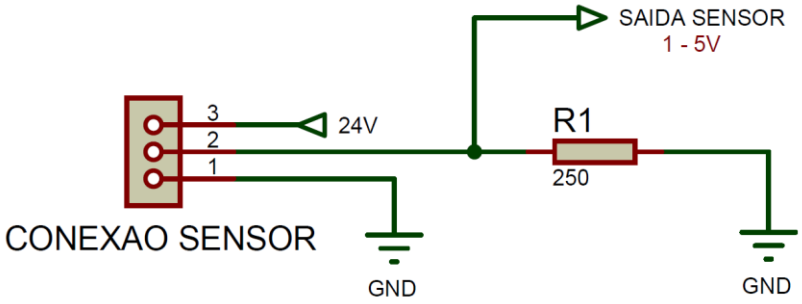


Fonte: Autor, 2019.

3.2.2. CONDICIONAMENTO DE SINAL DO SENSOR DE NÍVEL

Um circuito de condicionamento dos sinais foi implementado para tornar possível a leitura dos sinais dos sensores de nível pelo controlador. O sensor foi configurado para enviar um sinal de corrente entre 4 e 20mA, proporcional aos níveis inferior e superior, respectivamente. Dessa forma, este sinal de corrente foi convertido em tensão, por meio de um resistor com carga resistiva de 250Ω, ou seja, quando o nível for o menor possível, a tensão lida pelo controlador é de 1V, e, quando o nível for o maior possível, a tensão lida pelo controlador é de 5V. Na Figura 3 é possível observar o diagrama elétrico do circuito de condicionamento do sinal do sensor de nível.

Figura 3 - Diagrama elétrico do condicionamento do sensor de nível.



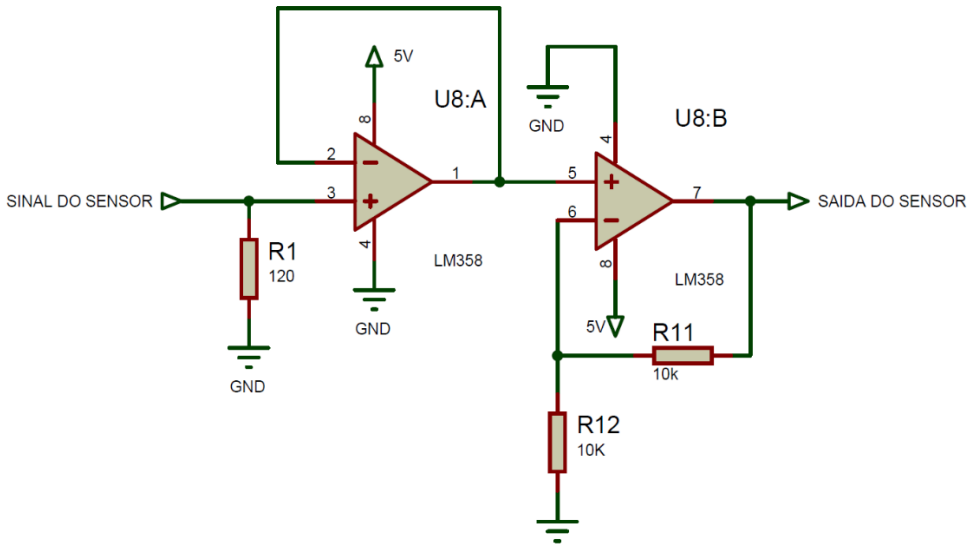
Fonte: Autor, 2019.

3.2.3. CONDICIONAMENTO DO SINAL SENSOR DE TEMPERATURA

Um circuito de condicionamento do sinal foi implementado para tornar possível a leitura do sinal do sensor de temperatura pelo controlador. O sensor envia um sinal de corrente muito pequena, o que torna necessária a utilização do transmissor de corrente *Tx-Block*. Para que esse sinal fosse convertido em um sinal de corrente de $4\ a\ 20mA$, o transmissor foi configurado para medir uma escala de $0\ a\ 50°C$, em que $4mA$ é a temperatura mais baixa e $20mA$, a temperatura mais alta. Dessa forma, o sinal de corrente é inserido em um buffer que apresenta alta impedância de entrada e baixa impedância de saída, fazendo

com que qualquer sinal recebido do sensor não sofra interferência do restante do circuito. Após esse processo, o sinal é, então, enviado para um circuito com amplificador operacional que aplica um ganho, adequando o sinal de entrada para uma saída linear com amplitude de 0 a 5V. Na Figura 4 é possível observar o diagrama elétrico do circuito de condicionamento do sinal do sensor de temperatura.

Figura 4 - Diagrama elétrico condicionamento do sensor de temperatura.

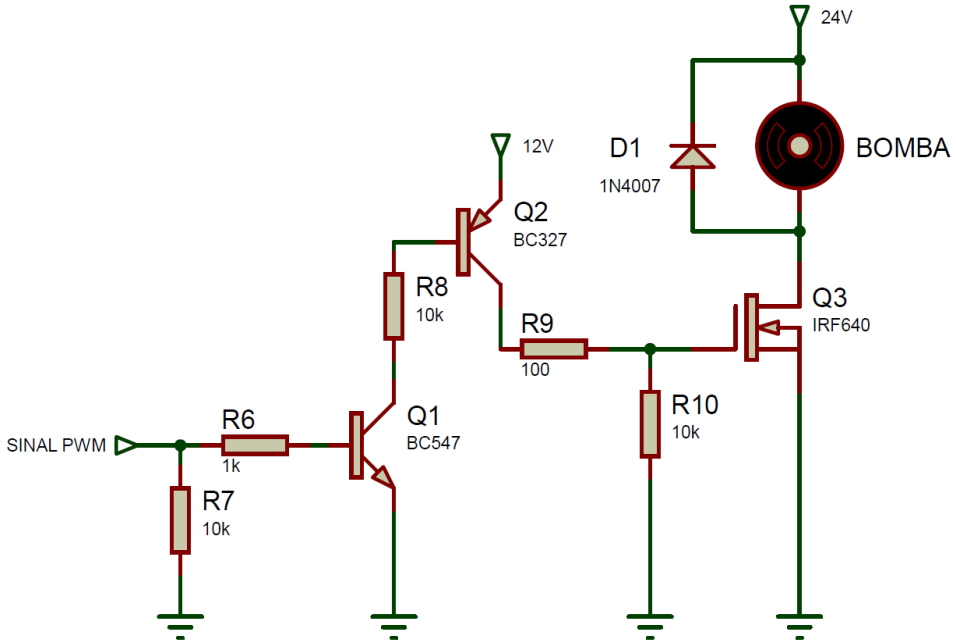


Fonte: Autor, 2019.

3.2.4. DRIVER PUSH-PULL

Dois circuitos *driver's* do tipo *Push-Pull* para acionamento das bombas também foram projetados. O sinal de controle possui amplitude de 5V, o circuito driver, ao receber este sinal, aplica ao *Gate* do mosfet IRF640 um sinal de 12V, permitindo passagem de corrente elétrica na bomba, acionada com 24V. Este circuito é fundamental, pois, com ele, é possível controlar, por meio da modulação por largura de pulso, cargas maiores, que consomem mais corrente. Na Figura 5 é possível observar o diagrama elétrico do circuito do *Driver* Push-Pull.

Figura 5 - Diagrama elétrico driver Push-Pull.



Fonte: Autor, 2019.

3.3. Modelagem

Neste trabalho, foi considerada apenas a configuração de controle monovariável do reservatório inferior, e, para se obter o modelo matemático do sistema, utilizou-se o método experimental, em que se aplicou um degrau de PWM com amplitude 100, e analisou-se a resposta do sistema. Este método permite que, por meio da análise gráfica da resposta ao degrau, encontre três variáveis importantes: o tempo em que o sistema reagiu ao degrau, o tempo em que o sistema atingiu 63% do valor de estabilização e o valor de estabilização. Com esses três dados, é possível obter uma representação do sistema física a um modelo aproximado de primeira ordem.

3.3.1. Combinações da planta

A bancada pode ser configurada de várias formas possíveis a fim de que se torne didática, sendo essas as combinações prováveis:

Controle monovariável:

- Nível reservatório inferior
- Nível reservatório superior
- Temperatura no reservatório inferior

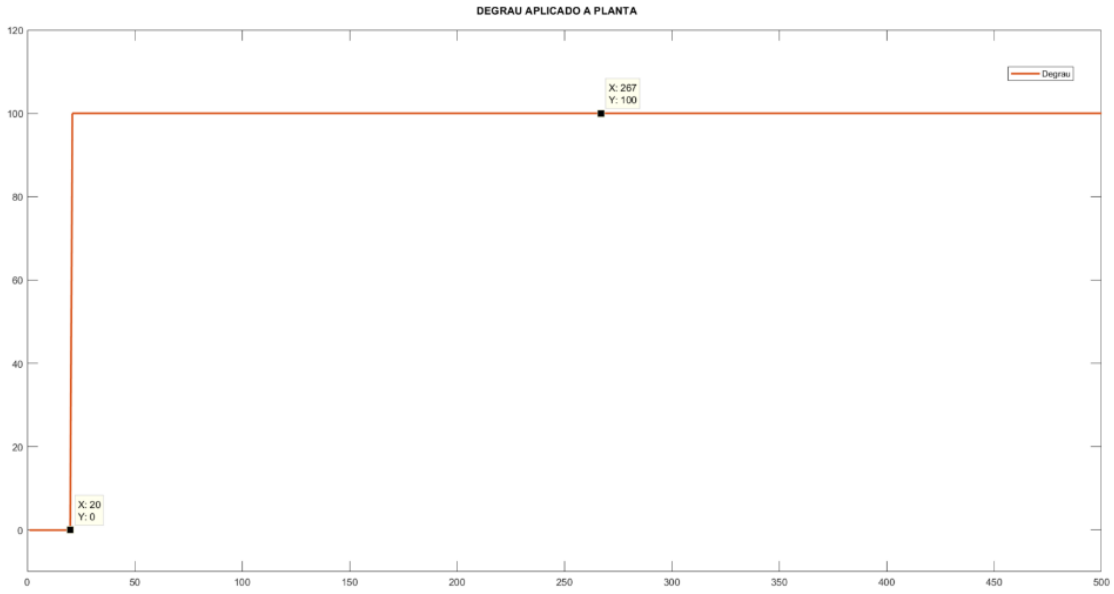
Controle multivariável:

- Níveis do reservatório inferior e superior
- Nível e temperatura no reservatório inferior
- Nível e temperatura no reservatório inferior e nível no reservatório superior

Na seção 3.2 será abordado o desenvolvimento dos circuitos eletrônicos utilizados para a leitura dos sensores e o acionamento dos atuadores B1, B2 e R1.

3.4. Método experimental

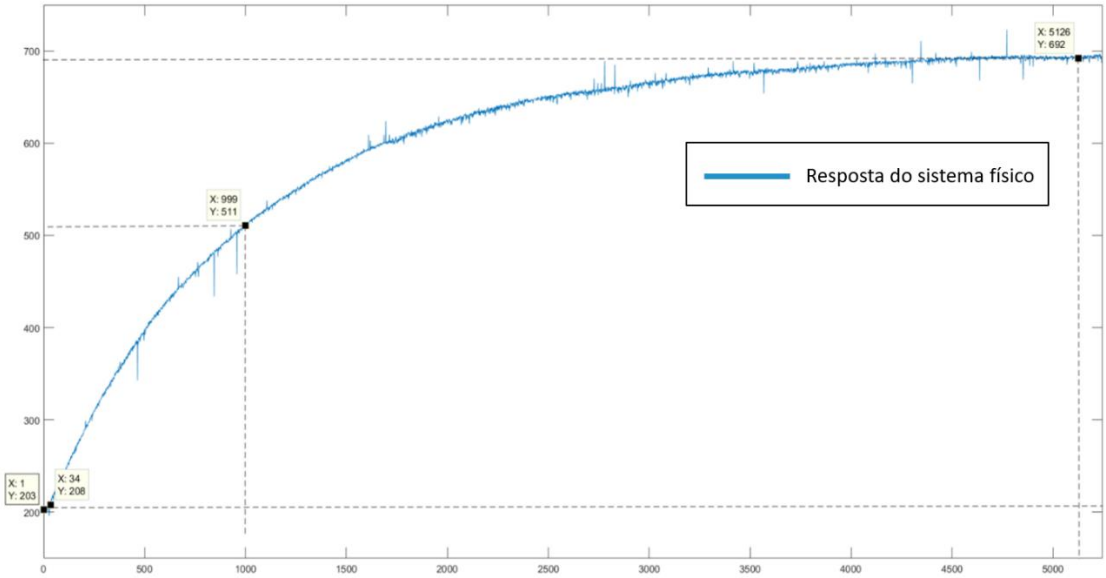
Figura 6 - Degrau aplicado ao sistema físico.



Fonte: Autor, 2019.

O controlador utilizado tem uma resolução de 10 bits, ou seja, quando um sinal de tensão com amplitude de 5V é aplicado à sua entrada analógica, o conversor analógico digital A/D converte este sinal em 1.024 partes, de tal forma que, cada bit equivale a 0.00488 Vcc. A resposta obtida ao degrau de PWM com amplitude de 100pode ser vista na Figura 7, em que a planta saiu de 204, estabilizando-se em 692 bits.

Figura 7 - Resposta ao degrau de amplitude 100.



Fonte: Autor, 2019.

Foi possível, por meio da análise gráfica, verificar que a planta se comporta como um sistema de primeira ordem. A equação que descreve sistema de mesma ordem é dada como

$$G(s) = \frac{K_{processo}}{\tau s+1} \qquad (1)$$

Em que

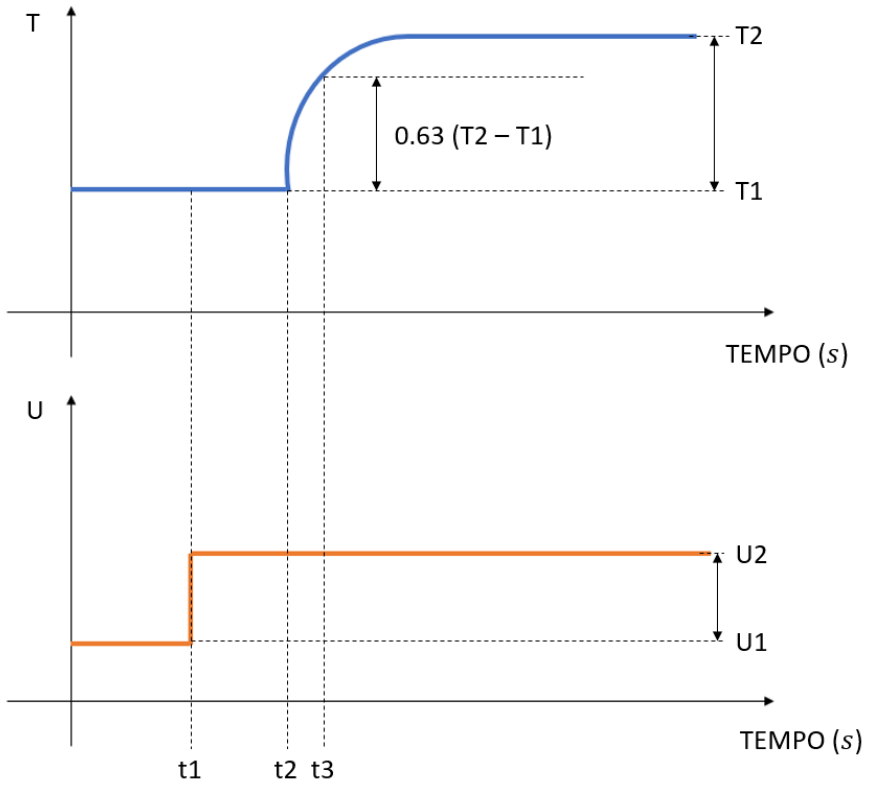
- $\boldsymbol{G(s)}$ é a relação entre a saída e a entrada do sistema;

- $\boldsymbol{K_{processo}}$ é a razão entre a variação da resposta e a variação do degrau aplicado;

- $\boldsymbol{\tau}$ é a constante de tempo, que pode ser obtida com a diferença entre o tempo em que o sistema leva para atingir 63% do valor final e o tempo em que o sistema reage ao degrau.

Em um processo genérico, em que T é a variável de processo e U, a variável manipulada, as constantes podem ser encontradas da seguinte forma:

Figura 8 - Variáveis da resposta a um degrau.



Fonte: Autor, 2019.

O $K_{processo}$ é encontrado da seguinte forma:

$$K_{processo} = \frac{\Delta P_V}{\Delta M_V} = \frac{T2-T1}{U2-U1} \quad (2)$$

$$K_{processo} = \frac{692-208}{100-0} = 4{,}89 \quad (3)$$

E a constante de tempo τ:

$$\tau = t3 - t2 \tag{4}$$

$$\tau = 999 - 34 = 965 \tag{5}$$

O tempo morto θ é a diferença entre o tempo em que o sistema leva para atingir 63% do valor final e o tempo em que se aplica o degrau. Dessa forma:

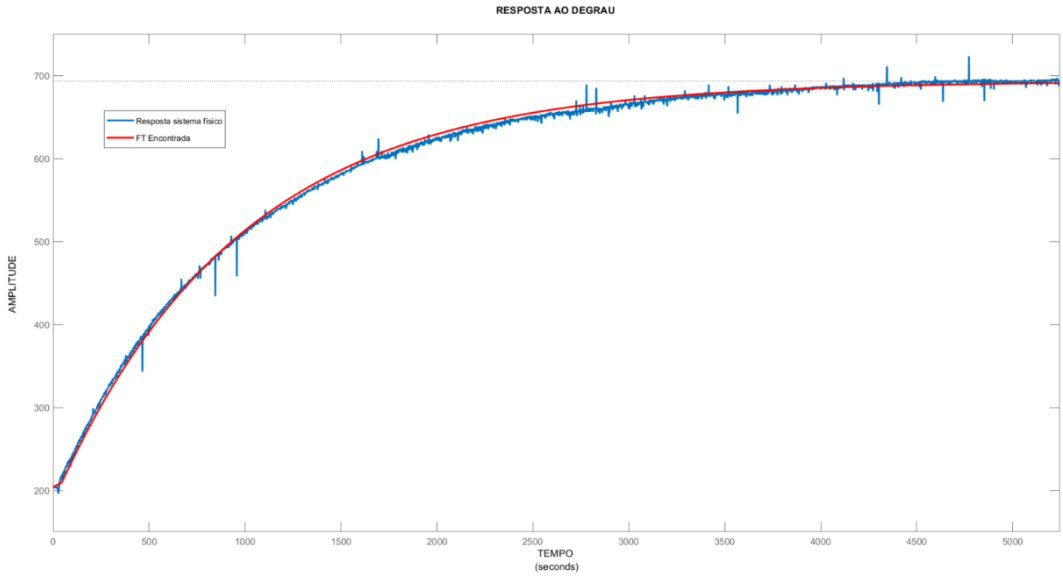
$$\theta = t2 - t1 = 34 - 20 = 14\ s \tag{6}$$

Portanto, o modelo matemático aproximado de primeira ordem que descreve o sistema é

$$G(s) = \frac{4{,}89}{965s+1} e^{-14s} \tag{7}$$

Aplicando o mesmo degrau PWM = 100, no modelo matemático encontrado e na planta, pode-se verificar na Figura 9, que a função de transferência encontrada descreve muito bem o sistema físico.

Figura 9 - comparação do sistema físico com o modelo matemático encontrado.



Fonte: Autor, 2019.

3.5. PROJETO DO CONTROLADOR

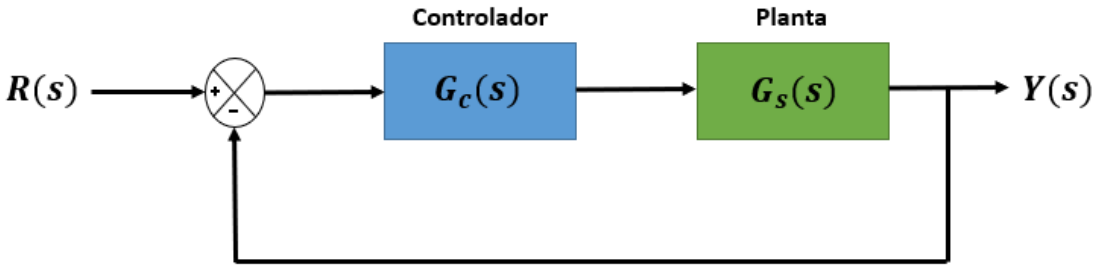
O controle proporcional, integral e derivativo (PID) pode ser aplicado em uma variedade de processos, tais como temperatura, fluxo e pressão. De acordo com OGATA (2003), a utilidade dos controles PID está na sua aplicabilidade geral à maioria dos sistemas de controle. Em particular, quando o modelo matemático da planta não é conhecido e, portanto, métodos de projeto analítico não podem ser utilizados, controles PID se mostram os mais úteis.

A equação que descreve um controlador PID pode ser expressa como

$$G_c(s) = K_p + K_d.s + \frac{K_i}{s} = \frac{K_d.s^2 + K_p.s + K_i}{s} \qquad (8)$$

A malha de controle do PID é expressa como

Figura 10 - Diagrama de blocos controlador PID.



Fonte: Autor, 2019.

A representação matemática do diagrama de blocos da Figura 9 em malha fechada é dada por

$$G(s) = \frac{G_c(s).G_s(s)}{1 + G_c(s).G_s(s)} \qquad (9)$$

Unificando-se a Equação 7 e a Equação 8 na Equação 9, tem-se

$$G(s) = \frac{4{,}89K_d s^2 + 4{,}89K_p s + 4{,}89K_i}{s^2(4{,}89K_d + 965) + s(4{,}89K_p + 1) + 4{,}89K_i} \quad (10)$$

Foram definidos, então, os parâmetros desejáveis do sistema para se obter os coeficientes. Tempo de assentamento $(T_s) = 180$ segundos, e porcentagem de ultrapassagem de $UP\% = 0.1\%$. Dessa forma, o fator de amortecimento (ξ) foi encontrado.

$$\xi = -\frac{\ln\left(\frac{0{,}1}{100\%}\right)}{\sqrt{\pi^2 - \ln^2\left(\frac{0{,}1}{100\%}\right)}} = 0{,}9103 \quad (11)$$

E a frequência natural não – amortecida (ω_n):

$$\omega_n = \frac{4}{180\,.\ 0{,}9103} = 0.0244\ rad/s \quad (12)$$

assim, foi determinado o polinômio característico desejado para segunda ordem, por meio das raízes: S_1 e S_2.

$$S_{1,2} = -0{,}9103\ .\ 0{,}0244 \pm j0{,}0244\sqrt{1 - 0{,}9103^2} \quad (13)$$

$$S_{1,2} = -0{,}02222 \pm j0{,}0101 \quad (14)$$

$$s^2 + 0{,}0444s + 0{,}0006 \quad (15)$$

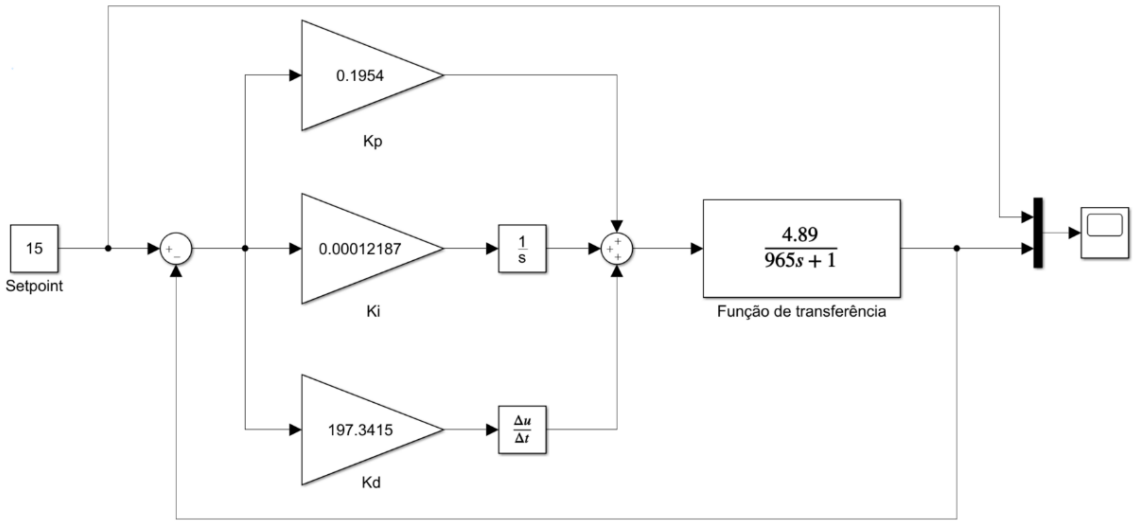
Igualando-se os coeficientes da Equação 10 com os coeficientes da Equação 15, tem-se

$$s^2 = s^2(4{,}89K_d + 965) \quad \rightarrow \quad K_d = 197{,}3415 \quad (16)$$

$$0{,}0444s = s\left(4{,}89K_p + 1\right) \quad \rightarrow \quad K_p = -0{,}1954 \qquad (17)$$

$$0{,}0006 = 4{,}89K_i \;\rightarrow\; K_i = 0{,}00012187 \qquad (18)$$

Figura 11 - Diagrama de blocos controlador PID sem pré-filtro.



Fonte: Autor, 2019.

3.6. PROJETO PRÉ-FILTRO

Substituindo-se as constantes K_p, K_i e K_d na Equação 10, tem-se:

$$G(s) = \frac{965(s^2+0{,}000990161s+0{,}000000617)}{1929{,}99s^2+1{,}955506s+0{,}000595944} \qquad (19)$$

Para se eliminar os zeros e trazer o numerador global para 0.024, foi projetado o filtro prévio $G_p(s)$:

$$G_p(s) = \frac{0{,}000000617}{(s^2+0{,}000990161s+0{,}000000617)} \qquad (20)$$

Assim, a função de transferência em malha fechada do sistema completo resulta em

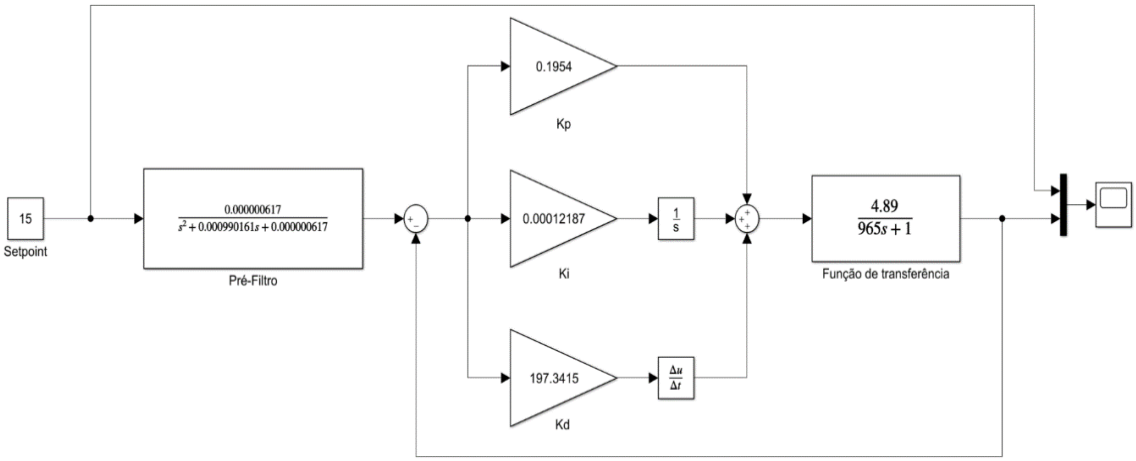
$$G(s) = G_p \frac{G_c \,.\, G(s)}{1+G_c \,.\, G(s)} \qquad (21)$$

$$G(s) = \left(\frac{0{,}000000617}{(s^2+0{,}000990161s+0.000000617}\right)\left(\frac{965(s^2+0{,}000990161s+0{,}000000617)}{1929{,}99s^2+1.955506s+0{,}000595944}\right) \qquad (22)$$

$$G(s) = \frac{0{,}000000617}{1929{,}99s^2+2{,}2665s+0{,}024} \qquad (23)$$

Dessa forma, o sistema se comporta apenas como a equação característica desejada, eliminando a interação dos zeros. Inserindo-se todas as respectivas funções de transferências nas malhas, tem-se que

Figura 12 - Diagrama de blocos controlador PID com pré-filtro.



Fonte: Autor, 2019.

3.7. SINTONIA DE CONTROLADOR MÉTODO RELE REALIMENTADO

Este é um método utilizado para se obter duas constantes importantes do sistema:

- Período máximo (P_u).
- Ganho máximo (K_{pu}).

Essas constantes podem ser encontradas sem perturbar fortemente o sistema. E, após serem obtidas, podem ser empregadas as equações de Ziegler

– Nichols em malha fechada ou Tyreus – Luyben. Para se realizar o teste, o controlador é colocado temporariamente no modo relé (ON-OFF). A perturbação cíclica limitada é ajustada entre a variável manipulada e a variável de processo.

Sendo

P_u: período máximo do ciclo;

a: média da amplitude da oscilação do sistema;

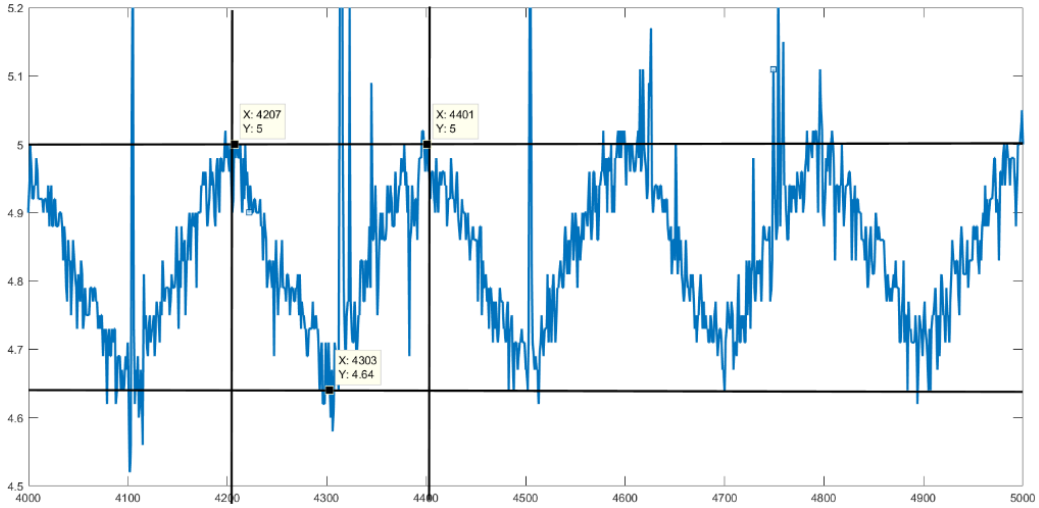
h: média do degrau de oscilação aplicado.

O ganho máximo Kpu é obtido:

$$Kpu = \frac{4\,.\,h}{3{,}14\,.\,a} \qquad (24)$$

A resposta oscilatória do sistema é, então, analisada e é possível verificar o período crítico P_u e o ganho crítico K_{pu}. Na Figura 12, podem-se observar a resposta do sistema e, consequentemente, as constantes mencionadas.

Figura 13 - Oscilação do sistema método rele-realimentado.



Fonte: Autor, 2019.

$$a = \frac{5-4{,}64}{2} = 0{,}16 \qquad (25)$$

A variação do degrau aplicado na planta foi de 90 e 190, como sendo o degrau inferior e o superior, respectivamente. Dessa forma, a variação é de 100 e seu valor médio é de $h = 50$.

$$K_{pu} = \frac{4\ .\ 50}{3{,}14\ .\ 0{,}16} = 396{,}82 \qquad (26)$$

$$P_u = 4401 - 4207 = 194 \qquad (27)$$

Com o ganho crítico (K_{pu}) e o período crítico (P_u), é possível utilizar a tabela de equações de Ziegler – Nichols em malha fechada ou Tyreus-Luyben para se encontrar os valores das constantes do controlador PID: K_p, T_i e T_d.

Tabela 1 - Ganhos Tyreus-Luyben e Ziegler e Nichols para o controlador PID.

CONTROLADOR	$\boldsymbol{K_p}$	$\boldsymbol{T_i}$	$\boldsymbol{T_d}$
Ziegler – Nichols	$0{,}6K_{pu}$	$0{,}5P_u$	$0{,}125P_u$
Tyreus – Luyben	$0{,}45K_{pu}$	$2{,}2P_u$	$0{,}158P_u$

Fonte: Autor, 2019.

Os ganhos encontrados para Ziegler e Nichols foram

$$K_p = 0{,}6\ .\ 396{,}82 = 238{,}09 \qquad (28)$$

$$T_i = 0{,}5\ .\ 194 = 97 \qquad K_i = \frac{1}{T_i} = \frac{1}{97} = 0{,}01030 \qquad (29)$$

$$T_d = K_d = 0{,}125\ .\ 194 = 24{,}25 \qquad (30)$$

E para Tyreus-Luyben foram

$$K_p = 0{,}45 \,.\, 396.82 = \ 178{,}56 \qquad (31)$$

$$T_i = 2{,}2 \,.\, 194 = 426{,}80 \qquad K_i = \frac{1}{T_i} = \frac{1}{426{,}80} = 0{,}002343 \qquad (32)$$

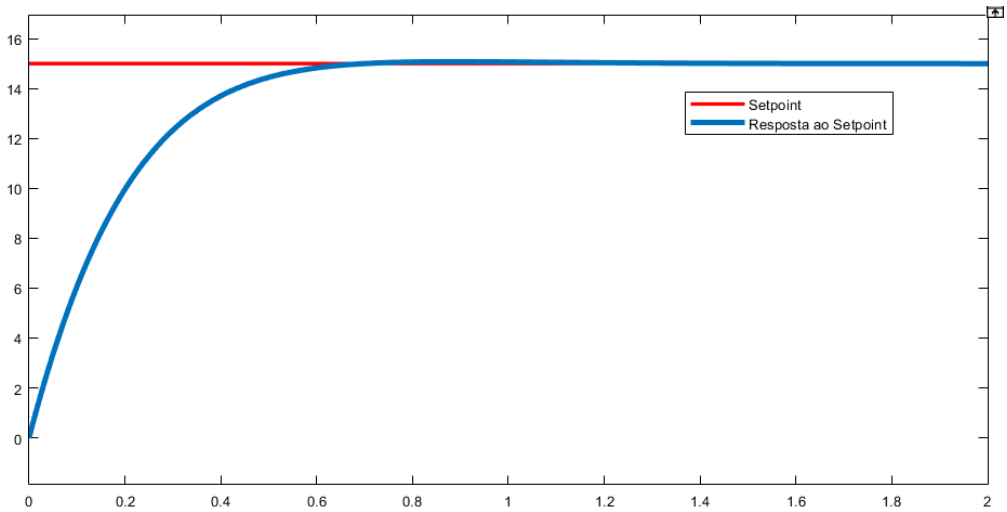
$$T_d = K_d = 0{,}158 \,.\, 194 = 30{,}652 \qquad (33)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a implementação simulada e prática da aplicação, notou-se que o método experimental apresentou bom resultado, e a função de transferência encontrada foi comparada com o sistema físico, possibilitando verificar que o modelo identificado descreve, de forma satisfatória, o sistema físico, conforme visto na Figura 9.

Os ganhos calculados na sessão 2.3 foram implementados, obtendo-se a seguinte resposta simulada:

Figura 14 - Resposta do sistema com controlador PID.

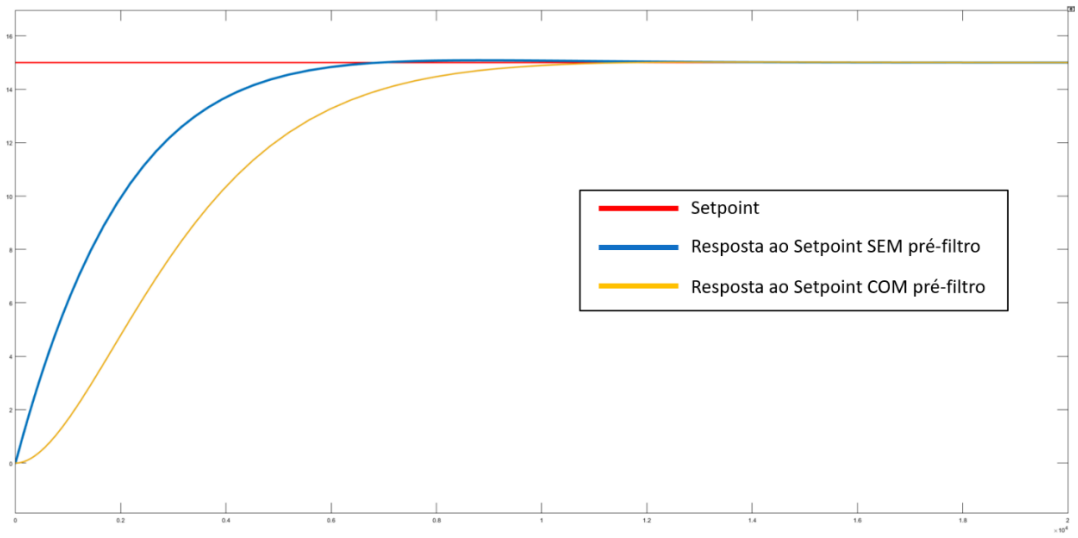


Fonte: Autor, 2019.

Simulando o sistema sem o pré-filtro, analisou-se que houve rápida estabilização, com o erro em regime permanente eliminado, porém com um

comportamento transitório mais lento que o especificado e também com uma ultrapassagem percentual maior. Por outro lado, com o pré-filtro tem-se a eliminação dos zeros e, por consequência, obtém-se o comportamento desejado para o sistema.

Figura 15 - Resposta ao degrau com e sem pré-filtro.

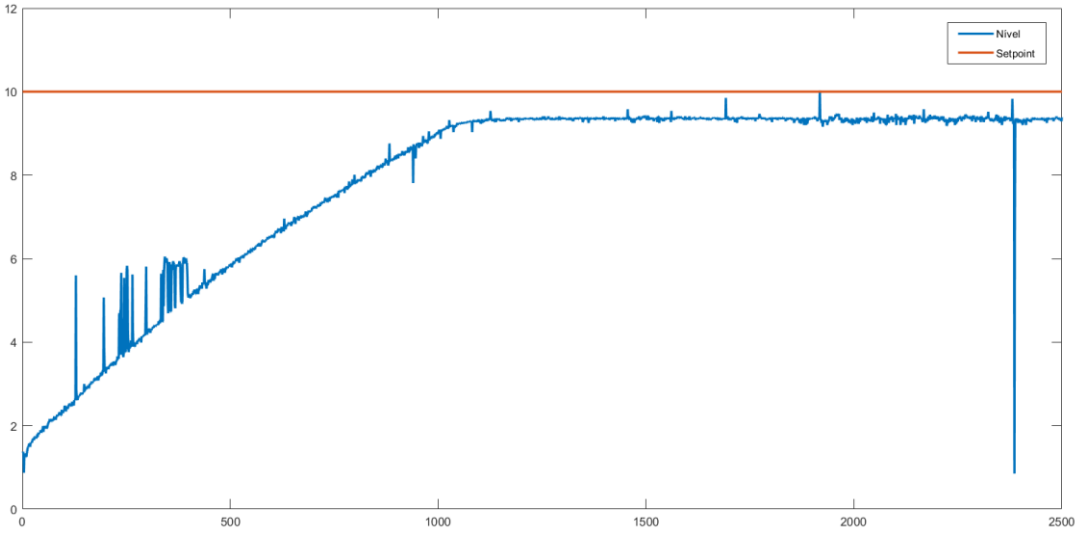


Fonte: Autor, 2019.

Pode-se visualizar que o sistema se estabilizou no setpoint escolhido, simulando-se no ambiente Matlab/Simulink. Ao se inserir os ganhos no sistema, verificou-se que os ganhos encontrados não atenderam ao esperado, pois a coleta dos dados se fez em uma região onde se levou muito tempo para estabilizar, dessa forma, a equação encontrada não representou o sistema.

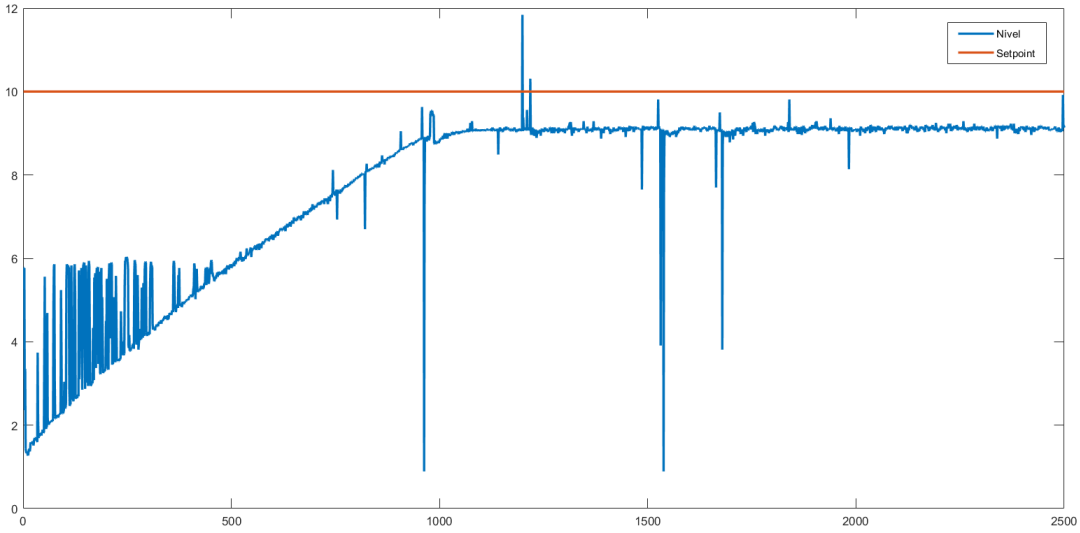
Com o método de rele-realimentado, foi obtido melhor resultado, e, nas Figuras 16 e 17, pode-se visualizar que, para a tabela de Ziegler e Nichols, o sistema se estabilizou em 9,6, ou seja, um erro de 0,4. Para a tabela de Tyreus-Luyben com o mesmo setpoint, a planta se estabilizou em 9,7, ou seja, um erro de 0,3.

Figura 16 - Resposta ao degrau do sistema com controlador PID ganhos Ziegler e Nichols.



Fonte: Autor, 2019.

Figura 1714 - Resposta ao degrau do sistema com controlador PID ganhos Tyreus-Luyben.



Fonte: Autor, 2019.

5. CONCLUSÃO

Foram utilizados três métodos de sintonia de controladores nesta proposta, dos quais, inicialmente, o projeto a partir da curva de reação do sistema mostrava-se o mais adequado, justamente por se saber que o sistema se comportava como de primeira ordem. Os cálculos realizados para se encontrar uma função de transferência que representasse a planta e os cálculos das constantes do controlador foram efetuados e aplicados.

No entanto, notou-se que a região linear que se considerou para se levantar a função de transferência não representava o sistema. Isso se deu pois o tempo que o sistema levou para se estabilizar não condizia com a realidade, em outras palavras, se se enviasse um sinal máximo para os atuadores e estes trabalhassem em sua maior potência, conseguiriam facilmente transbordar os reservatórios.

Notou-se, então, que a função de transferência não representava o sistema e que o método utilizado não controlaria o mesmo. Por outro lado, o método de rele-realimentado conseguiu fornecer melhor resultado, pois, com a oscilação do sistema em resposta a um sinal de entrada pseudoaleatório aplicado a sua entrada, foi possível obter duas constantes fundamentais para se aplicar o controle no sistema, o período crítico (P_u) e o ganho crítico (K_{pu}).

Com o ganho e o período crítico, Ziegler e Nichols e Tyreus-Luyben desenvolveram os cálculos para sintonizar as constantes do controlador. Aplicaram, - então, os dois métodos, e, a partir de ambos, obtiveram-se resultados similares. Ziegler e Nichols, por exemplo, com um sinal de entrada de 10 litros, estabilizaram em 9.6 litros, ou seja, um erro de 0,4 litros. Tyreus-Luyben, com o mesmo setpoint de 10 litros, apresentou um erro de apenas 0,3 litros, estabilizando em 9.7 litros.

Conclui-se que o método mais indicado para essa aplicação entre o método experimental, a tabela de Ziegler-Nichols e Tyreus-Luyben, foi o de rele realimentado com a tabela de Tyreus-Luyben.

5.1. PROPOSTAS FUTURAS

Para o controle de nível proposto por este trabalho, foi utilizado apenas o método experimental, seria de suma importância a aplicação de outras técnicas de sintonias de controlador em malha aberta e malha fechada, tais como

- ITAE;
- Ziegler-Nichols em Malha Fechada Modificado;
- Ziegler-Nichols em Malha Aberta.

Também a implementação de válvulas proporcionais em que será necessária a modelagem do instrumento de acordo com a diferença de pressão (montante e jusante) e suas características. A modelagem da medição de nível e de temperatura se tornaria mais simples de se obter, por meio de relações proporcionais emitidas pelos transmissores, mensurando-se as variáveis físicas e convertendo-se esses valores em sinais de corrente ou de tensão, lidos pelo controlador.

Como método de se aprofundar no conhecimento do controle realizado nesta proposta, seria importantíssima a modelagem do sistema no domínio da frequência, projetando-se outros controladores. Dessa forma, seria preenchida a janela existente neste trabalho, contribuindo para o crescimento e disseminação do conhecimento em todas áreas do controle industrial, da modelagem analítica dos processos à sintonia de controladores.

Outro fator importante é a construção de um sistema para transportar abancada, pois, quando esta está cheia de água, seu peso impossibilita que seja levada a outros ambientes como salas de aulas e/ou laboratórios. Uma alternativa seria a instalação de rodas, facilitando-se seu deslocamento.

Já para os reservatórios, faz-se necessária a troca dos baldes de polipropileno transparente por cilindro de aço, pois os atuais não suportam temperaturas altas e seu formato cônico dificulta os cálculos para se realizar o controle. Com os cilindros de aço, seria resolvido o problema enfrentado de temperatura e nível.

REFERÊNCIAS

AGUIRRE, Luis Antonio. **Introdução à identificação de sistemas–Técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais**. Editora UFMG, 2000.

CAMPOS, M. C. M. M. D.; TEIXEIRA, C. G. **Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais**. São Paulo: Blucher, 2010.

CHAI, T.; DRAXLER, R. R. **Root Mean Square Error (RMSE) or Mean Absolute Error (MAE)**. Geoscientific Model Development Discussions, 2014. Vol. 7, p. 1247-1250.

CLAVIJO, D. G. **Métodos de Subespaços para Identificação de Sistemas: Propostas de Alterações, Implementações e Avaliações.** Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 2008. 118 p.

FELÍCIO, Luiz Carlos. **Modelagem da dinâmica de sistemas e estudo da resposta.** [S.l: s.n.], 2010.

KNOSPE, Carl. Controle PID. **Revista IEEE Control Systems** , v. 26, n. 1, p. 30-31, 2006.

MAGAN, Murillo Vilela. **Identificação por Subespaços e Controle com Estrutura Variável e Modos Deslizantes com Chaveamento Suavizado da Posição Angular do Joelho do Paciente Paraplégico.** 2018. 137 páginas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2018.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 4ª. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2011.

OGATA, K. **Engenharia de Controlo Moderno**, 4ª edição. 2003.

ZIEGLER, John G.; NICHOLS, Nathaniel B. **Optimum settings for automatic controllers**. trans. ASME, v. 64, n. 11, 1942.

APÊNDICES

APÊNDICE A – LISTA DE MATERIAIS

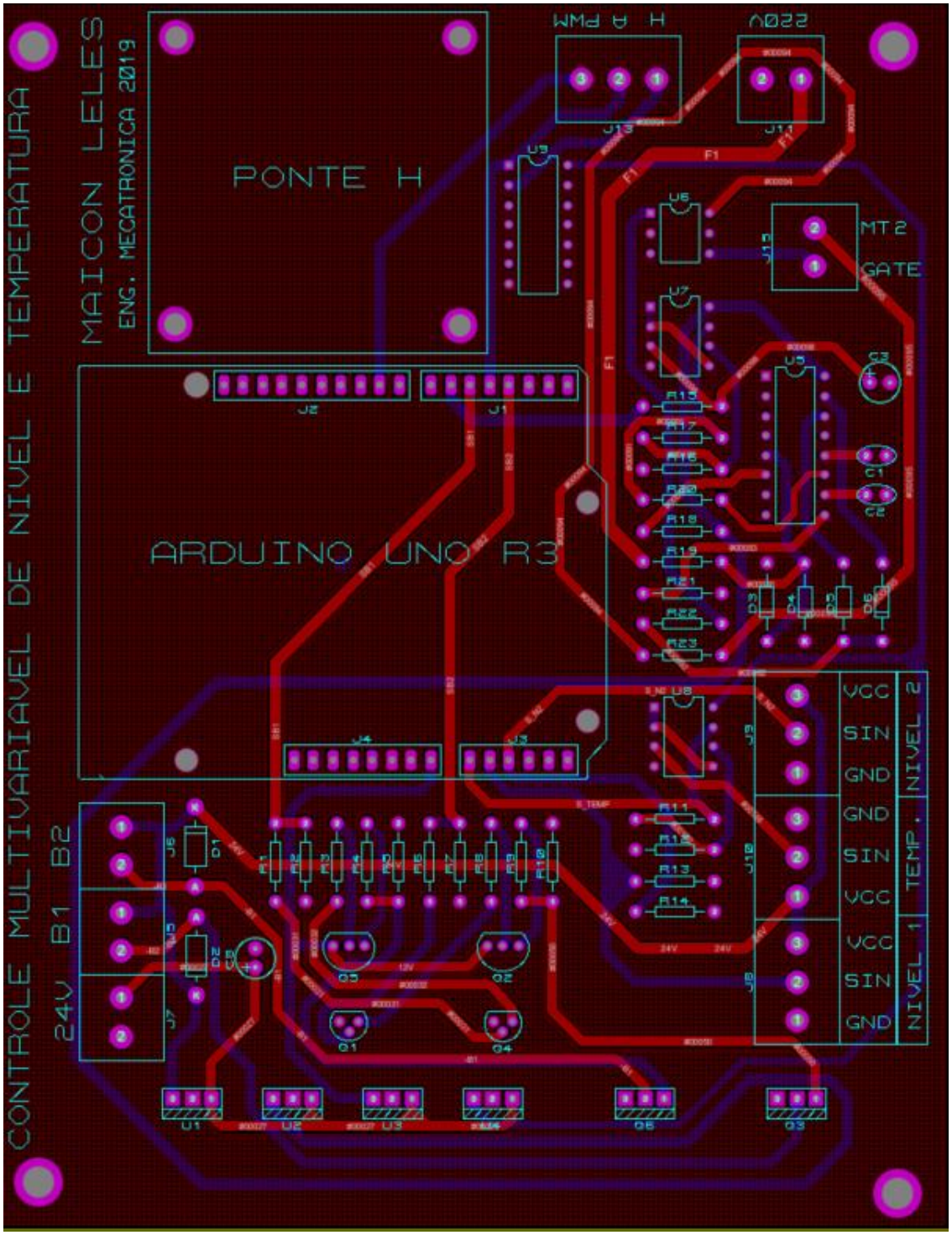
Tabela 2 - Lista de materiais.

QUANT.	DISCRIÇÃO	MODELO
2	Baldes Polipropileno Graduado	20 Litros
1	Botão retentivos	-
5	Botões Não Retentivos	-
1	Caixa Organizadora Polipropileno	60 litros
1	Chave Contatora	220V – AC – 40A
1	Cooler 100x100mm	12V – DC
1	Cooler 40x40mm	12V – CC
1	Disjuntor	220V – 5A
1	Fonte de Alimentação	24V – CC – 5A
2	Indicador Luminoso – Verde	220V – AC
1	Indicador Luminoso – Vermelho	220V – AC
1	Motor com Hélice (Misturador)	12V – CC
1	Potenciômetro	10KΩ
3	Reles	24V – CC
2	Resistências	220V – AC – 3kW
3	Sensor de Nível Digital	24V – CC
1	Sensor de Temperatura com Cabeçote	Rtd – Pt 100 – Aceptil
2	Sensores Ultrassônicos de Nível – Banner com range de 100 a 1000mm	T30UXIAQ8
1	Transmissor de Temperatura para Cabeçote	TxBlock
3	Válvulas Hidráulicas de Esfera Plástica	25mm

Fonte: Autor, 2019.

APÊNDICE B – LAYOUT DA PLACA D CIRCUITO IMPESSO

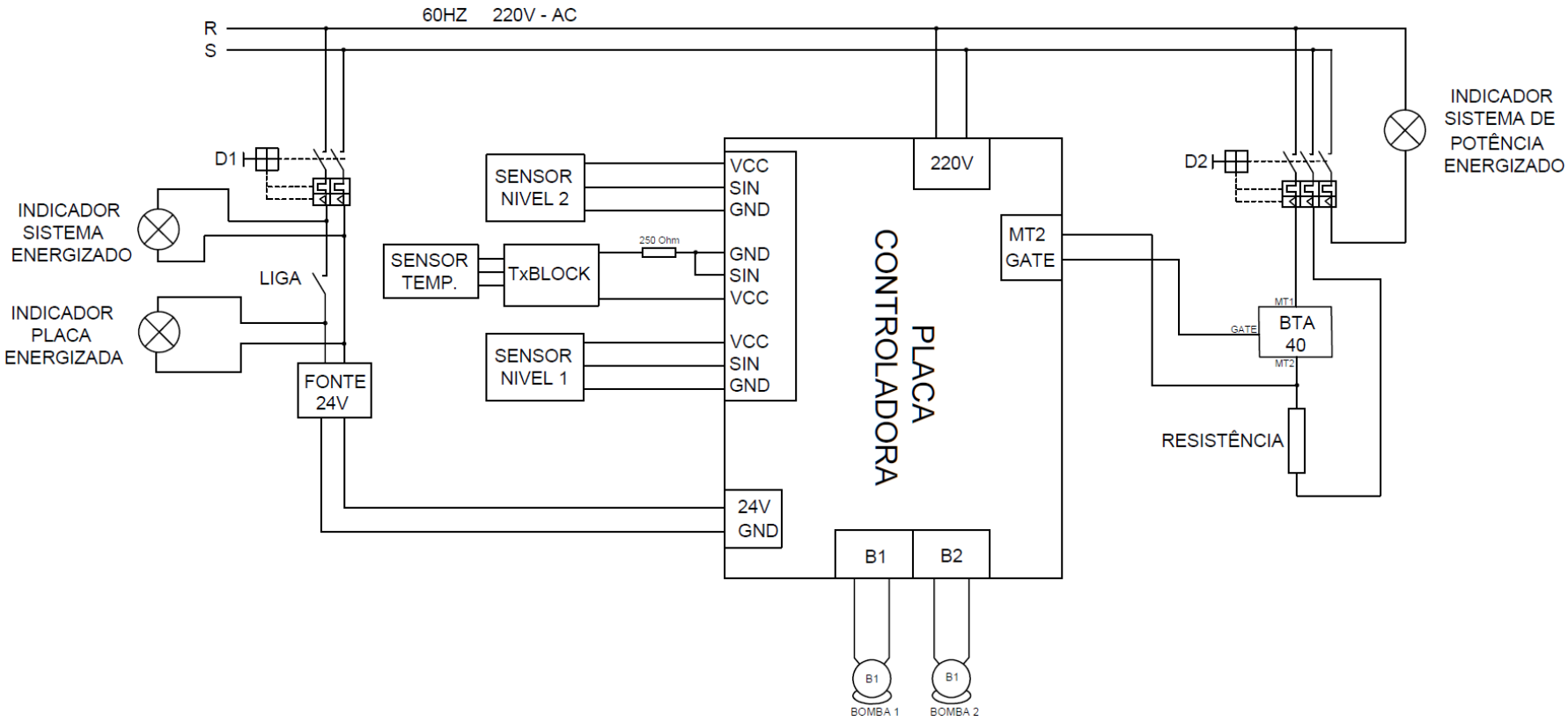
Figura 18 - Layout da placa de circuito impresso.



Fonte: Autor, 2019.

APÊNDICE C – DIAGRAMA ELÉTRICO

Figura 1915 - Diagrama elétrico da placa de controle.



Fonte: Autor, 2019.