

Modelagem e controle de um sistema trocador de calor didático

Thanira Thomazini
Instituto Federal de Educação, Ciência
e Tecnologia do Rio Grande do Sul - IFRS
Av. São Vicente, 785,
Farroupilha, RS, Brasil
E-mail: thanirathomazini@gmail.com

Matias Rossato Muraro*
Instituto Federal de Educação, Ciência
e Tecnologia do Rio Grande do Sul - IFRS
Av. São Vicente, 785,
Farroupilha, RS, Brasil
E-mail: matias.muraro@farroupilha.ifrs.edu.br
*Orientador

Resumo—Este trabalho trata das atividades desenvolvidas na disciplina TCC-2 do curso de Engenharia de Controle e Automação do IFRS-Campus Farroupilha. Um dos problemas enfrentados por professores do curso Técnico em Automação Industrial e de Engenharia de Controle e Automação é a dificuldade de realização de aulas práticas para o estudo das disciplinas de Controle, Sistemas Supervisórios e Comunicação de Dados, promovendo poucas atividades de ensino prático para os discentes. O aprendizado dessas disciplinas é de grande importância e muito utilizado pelos profissionais das áreas de Engenharia e Técnicos em diversas áreas industriais, visto que o cenário atual se encontra na quarta revolução industrial. Sem a aplicação prática os estudantes não conseguem se envolver ativamente e efetivar seu conhecimento nessas matérias. Este artigo tem como objetivo a elaboração de uma bancada didática para o estudo de controle, onde será possível analisar e simular o funcionamento de sistemas de controle e estratégias de controle e ainda realizar a determinação e validação dos modelos dos sistemas. A planta em questão é com um trocador de calor, possibilitando assim o estudo prático dos mais variados tipos de controladores e estratégias de controle. Também possibilitará trabalhos futuros para ampliação da bancada didática para abranger não somente a disciplina de Controle, como também Sistemas Supervisórios, Comunicação de Dados, entre outras.

Palavras-chave—Metodologia ativa, plantas de controle, trocador de calor.

I. INTRODUÇÃO

Percorrendo a história, pode-se constatar que a primeira revolução industrial ocorrida nos meados de 1760 e 1850, durou aproximadamente 90 anos, com o aperfeiçoamento da máquina a vapor. Após, nos períodos de 1850 e 1945, com 95 anos de duração, define-se a segunda revolução industrial caracterizada por surgimento de máquinas, introdução de novos meios de produção, dando espaço para a inserção do aço, eletricidade e do petróleo nas indústrias. Quando Henry Ford introduziu mudanças no processo produtivo, tarefas antes feitas manualmente começaram a ser realizadas por máquinas a vapor [1].

Já a terceira revolução industrial estende-se por 60 anos, entre 1950 a 2010 com a implantação de computadores no chão de fábrica, controles eletrônicos, sensores e dispositivos que gerenciam quantidade significativas de variáveis. De 2010 aos dias atuais encontra-se a quarta revolução industrial onde a internet está presente na indústria e nos processos, em um

ambiente de interconexão de equipamentos e máquinas em rede, disponibilizando e trocando informações, aderindo assim a internet das coisas [1].

Portanto, com vista no cenário atual da indústria, pertencente a internet das coisas e aos avanços tecnológicos que estão acontecendo cada vez mais rápido, controle de processos, sistemas supervisórios, comunicação de dados e banco de dados são assuntos que precisam de mais atenção para se conseguir acompanhar o desenvolvimento da quarta revolução industrial.

Todos esses assuntos são pauta em disciplinas de Engenharia de Controle e Automação e do Curso Técnico em Automação Industrial e são amplamente utilizados em sistemas industriais, visto que a indústria é composta por um conjunto de processos que precisam ser informados, ajustados e executados para garantir o bom funcionamento e a produtividade em sua totalidade.

O uso de plantas reais em um curso da área industrial ou de engenharia agrega muito valor na formação dos estudantes, pois permite o contato com toda a instrumentação usada no controle e na supervisão do processo, além de incentivar o uso da planta em trabalhos práticos envolvendo modelagem e projeto de sistemas de controle, entre outros [2].

Durante a trajetória curricular, os estudantes apresentam dificuldades no aprendizado de sistemas de controle. Dificuldades provindas do nível de complexidade, abstração e também pela falta de aplicação experimental das matérias em questão. Uma das alternativas para contornar essa situação é o uso de metodologias ativas de aprendizagem, que é o conceito onde o estudandante envolve-se ativamente e o professor atua como orientador do processo de ensino. Fazendo com que o aluno se torne o principal agente de seu desenvolvimento [3].

Dessa forma, buscando auxiliar no processo de ensino e aprendizagem de controle do curso técnico e de graduação, esse projeto visa desenvolver uma planta para implementação de controle, de forma que possa-se aplicar metodologias ativas de ensino com a mesma. O objetivo específico deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema térmico de transferência de calor, onde se pode implementar diferentes controladores, estratégias de controle e aplicar técnicas de modelagem de sistemas. Esse desenvolvimento ocorrerá através

da construção de uma bancada didática, obtendo o modelo dinâmico e implementando controladores básicos e estratégias de controle.

O trabalho possui a seguinte estrutura:

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na seção II é apresentada a revisão bibliográfica, subdividida em metodologias ativas, transferência de calor, tipos de controladores e estratégias de controle. Já a seção III apresentará a proposta e as etapas de sua execução. Na seção IV será abordado implementação de controladores digitais no arduino, onde será controlado uma planta composta por circuitos elétricos/eletrônicos a partir dos controladores proporcional e proporcional e integral.

A. Metodologias ativas

Além de todo conhecimento exigido para cada profissional da área de exatas, o mercado atual busca engenheiros e técnicos com amplo discernimento, com a capacidade de liderar, trabalhar em equipe e também de resolver problemas. Por isso o modelo educacional para a formação de engenheiros(as), além de garantir os aprendizados específicos precisam propiciar experiências práticas para os estudantes, para que quando inserido em sua vida laboral possam ter sucesso no mercado de trabalho, que está cada vez mais rigoroso e concorrente.

As metodologias ativas de aprendizagem veem em direção a essas exigências, podendo ser uma alternativa para as metodologias atuais. É possível reconhecer metodologias ativas de Ensino Superior e Técnico como modelos de aprimorar o processo do ensino-aprendizagem utilizado por docentes na tentativa de guiar a formação analítica de futuros profissionais. Na qual os estudantes fazem tarefas e pensam sobre o que estão fazendo.

Para se envolver ativamente no processo de aprendizagem, o estudante deve ler, escrever, perguntar, discutir ou estar ocupado em resolver problemas e desenvolver projetos, na metodologia ativa o estudante deve realizar tarefas mentais de alto nível, como análise, síntese e avaliação [3].

Apesar dos resultados de simuladores em computadores serem parecidos com os resultados práticos obtidos numa planta didática, nota-se um maior interesse e entusiasmo por parte dos estudantes em realizar trabalhos em plantas reais do que em simuladores. O fator que contribui para isto é que os estudantes veem seus projetos realizados em teoria funcionando na prática, e que os cálculos que levaram a esses são válidos [2].

A área de ensino de Engenharia apresenta diversas oportunidades para a aplicação de metodologias ativas de aprendizagem, como aulas laboratoriais, trabalhos em equipe, visitas técnicas e desenvolvimento de projetos [3].

B. Transferência de calor

Transferência de calor é a troca de energia térmica devido à uma diferença de temperaturas no meio, então pode-se dizer que trocador de calor são equipamentos responsáveis

pela transmissão de energia térmica de um meio a outro, com a finalidade de aquecer ou resfriar algum fluido levando-o a uma determinada temperatura. Trocadores de calor são equipamentos que promovem a transferência de calor entre dois fluidos que escoam a diferentes temperaturas, normalmente separados por uma interface sólida. Estes equipamentos podem ser encontrados em diversos segmentos da indústria e também no uso pessoal [4].

O ar condicionado é um exemplo de trocador de calor utilizado em nosso cotidiano. Ele é composto por um sistema de serpentinas contendo gás refrigerante. Dessa forma, a serpentina é responsável por separar o ar do ambiente e o fluido refrigerante, impedindo que entrem em contato, evitando a mistura dos mesmos e possibilitando a troca de calor. Nesse sistema também há uma bomba que realiza a circulação do fluido. Por fim, o ar quente do ambiente entra no equipamento, perde calor para o fluido mais frio através da serpentina, dessa maneira o ar é devolvido para o ambiente a uma temperatura menor que entrou.

Assim sendo, existem diversas aplicações para os trocadores de calor na indústria, consequentemente diversos tipos de controladores e estratégias de controle podem ser utilizados.

C. Tipos de Controladores

Nesta seção será apresentado as seguintes ações de controle: proporcional, integral e derivativo.

- Proporcional

O controle proporcional se baseia em obter o sinal de saída do controlador como uma proporção do erro entre o valor setado ou de referência (*Setpoint* - SP) e o valor medido (*Process Variable* - PV). Como o nome sugere, em um controlador proporcional a ação de controle, é diretamente proporcional ao sinal de erro [5]. O controlador proporcional tende a produzir um erro em regime permanente [6].

Na Equação (1) é apresentado a ação de Controle Proporcional. Onde: K_p é o ganho proporcional, $e(t)$ o erro e $u_p(t)$ ação de controle.

$$u_p(t) = K_p \times e(t) \quad (1)$$

- Integral

A ação de controle é proporcional à integral do erro. Isso permite, para alguns sistemas, a obtenção de erro zero em regime permanente [6].

A Equação (2) apresenta a ação de Controle Integral. Onde: T_i é a constante de tempo do integrador.

$$u_i(t) = \frac{1}{T_i} \times \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2)$$

- Derivativo

A ação derivativa tem como propósito melhorar o comportamento transitório do sistema em malha fechada, devido a ação de controle ser proporcional a derivada do erro.

A Equação (3) representa a ação de Controle Derivativo. Onde: T_d é a constante de tempo do derivador.

$$u_d(t) = T_d \times \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

- **Proporcional, Integral e Derivativo (PID)**
O controle PID é o sistema de controle que utiliza a ação proporcional, integral e derivativa simultaneamente. Conforme Equação (4).

$$u_{pid}(t) = (u_p(t) + u_i(t) + u_d(t)) \quad (4)$$

D. Estratégias de Controle

Estratégias de controle são técnicas utilizadas para melhorar a estabilidade e a resposta transitória do sistema. Existem diversas estratégias de controle, dentre elas é possível citar: Controle Básico, Controle Cascata, Controle de Razão, Controle Seletivo, Controle Split-Range e Controle Antecipativo.

- **Controle de Realimentação de Saída:** é o controle comumente usado com o sistema realimentado (*feedback*) na saída. A Figura 1 demonstra um exemplo de aplicação da estratégia de controle de realimentação de saída.

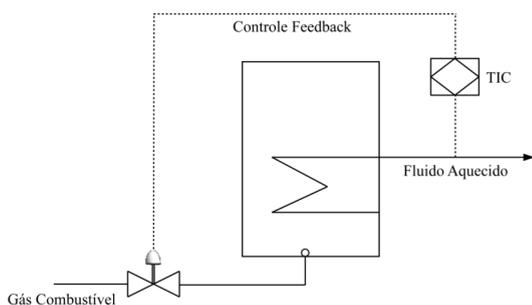


Figura 1: Exemplo de aplicação da estratégia de controle de realimentação de saída.

- **Controle Cascata:** é quando aplica-se dois controladores, um controlador em um *looping* interno, atuando sobre uma variável secundária e outro em um *looping* externo controlando a variável de saída, ocasionando, dessa forma, uma melhor resposta transitória da variável de saída. Sua utilização é conveniente quando a variável controlada não pode manter-se no valor desejado por melhores que sejam os ajustes do controlador, devido as perturbações que se produzem devido as condições do processo [7]. A Figura 2 demonstra um exemplo de aplicação da estratégia de controle cascata.
- **Controle de Razão:** Como o próprio nome apresenta, o objetivo dessa estratégia de controle é manter a razão entre duas variáveis constantes. Quando uma grandeza tem seu valor alterado devido ao diversas razões como mudança de *setpoint* ou atuação do seu controlador, o controlador da outra variável atua, de forma a manter a proporção entre as duas constante [7]. A Figura 3

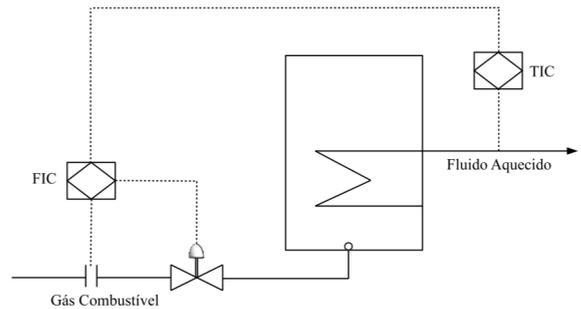


Figura 2: Exemplo de aplicação da estratégia de controle cascata.

demonstra um exemplo de aplicação da estratégia de controle de razão.

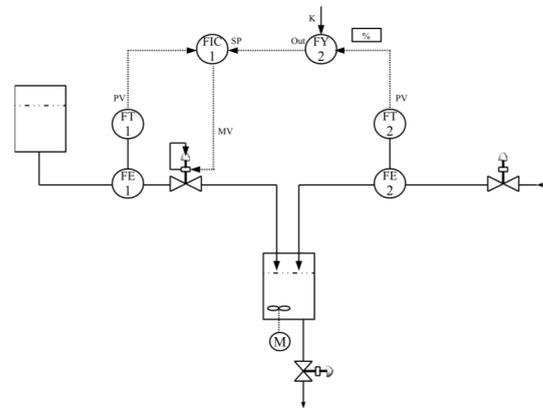


Figura 3: Exemplo de aplicação da estratégia de controle razão.

- **Controle Seletivo:** É aplicado quando a variável controlada deve ser limitada em um valor máximo ou mínimo, ou caso o número de variáveis controladas exceda o número de variáveis manipuladas. Podendo mudar qual é a referência de controle dependendo da operação do sistema [7]. A Figura 4 demonstra um exemplo de aplicação da estratégia de controle seletivo.
- **Controle Split-Range:** A estratégia de controle *split-range* ou range dividido, normalmente envolve mais de um atuador operados por um mesmo controlador. Nesse tipo de estratégia utiliza-se *range* de atuação. Por exemplo, se a planta contém dois atuadores, a estratégia poderá agir de forma a atuar dividindo em *ranges*, acionando um atuador quando o *range* estiver de 0 a 50% e os dois atuadores de 50 a 100%. A Figura 5 demonstra um exemplo de aplicação da estratégia de controle *split-range*.
- **Controle Antecipativo:** Mede uma ou mais variáveis de entrada, prediz seu efeito no processo e atua diretamente sobre a variável manipulada, como forma de manter a variável controlada no valor desejado. O valor da variável manipulada é alterado antes mesmo de que ocorra uma

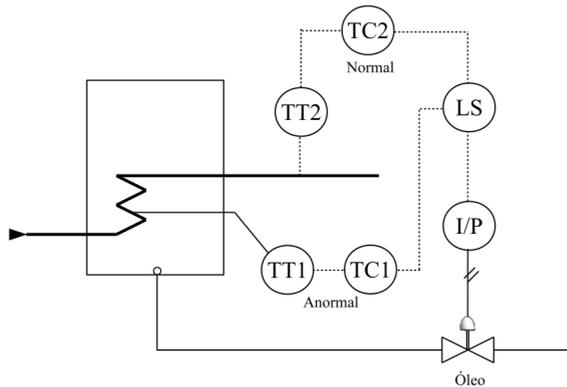


Figura 4: Exemplo de aplicação da estratégia de controle seletivo.

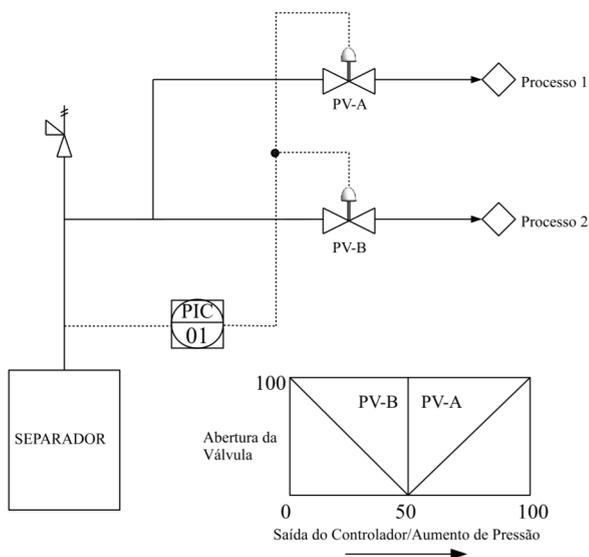


Figura 5: Exemplo de aplicação da estratégia de controle split-range.

variação considerável na variável controlada [7].

E. Ação Anti-Windup

O *Windup*, na estrutura PID, é ocasionado pelo fato de que quando há saturação no atuador, incrementos posteriores no sinal de controle não contribuirão para uma resposta mais rápida do sistema. Neste caso, a continuação da integração do erro do sistema faz com que o termo integral alcance valores elevados sem qualquer efeito sobre a saída da planta. O erro deve ter sinal negativo durante um longo intervalo de tempo para que o termo integral possa ser trazido de volta ao estado estacionário, o que ocasiona um elevado sobre-sinal e um tempo de acomodação relativamente longo. Neste caso, para que o sistema possa ter um desempenho satisfatório, alguma forma de mecanismo anti-*windup* deve ser implementada no controlador PID [8].

O diagrama de blocos de uma estrutura anti-*windup* é apresentado na Figura 6.

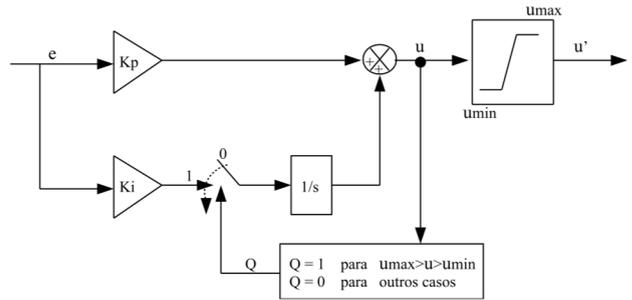


Figura 6: Controlador PI com ação anti-windup por integração condicional. Fonte: [9] Adaptado.

A ação anti-*windup* verifica a existência de saturação da ação de controle e age de forma a bloquear a ação integral, caso a saturação ocorra. Quando a ação de controle for maior que o máximo ou menor que o mínimo, o integrador é desligado, assim evitando o seu carregamento com a saturação da saída.

III. SISTEMA DESENVOLVIDO

Esse trabalho propõe o desenvolvimento de uma plataforma para emular um sistema de aquecimento a vapor, conforme apresentado na Figura 8. A bancada opera de maneira similar a um sistema trocador de calor a vapor, porém neste caso, o vapor será substituído pela circulação de água aquecida.

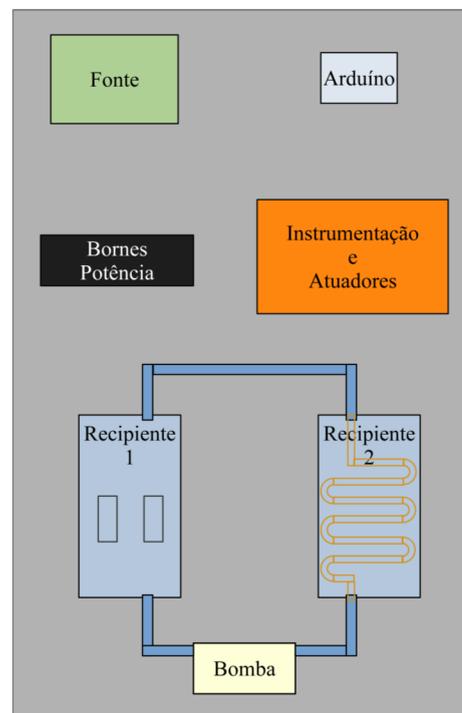


Figura 7: Layout da Bancada Didática.

Os componentes presentes na Figura 8 são apresentados a seguir.



Figura 8: Sistema desenvolvido.

- **Fonte:** é o equipamento responsável pela conversão da energia de corrente alternada para corrente contínua, recebendo 110V ou 220V AC (Corrente Alternada) e transformando em tensões de 5V e 12V CC (Corrente Contínua). Na bancada ela será responsável pela alimentação dos circuitos, do controlador e também dos atuadores.
- **Arduino:** é uma plataforma de desenvolvimentos de projetos eletrônicos projetada com um microcontrolador, contando com entradas e saídas e também com a possibilidade de programação em C/C++. No projeto o Arduino será empregado para inserir a programação dos controladores que se deseja utilizar.
- **Bornes de Potência:** local onde serão conectados as alimentações da parte de potência do sistema.
- **Instrumentação e atuadores:** placa responsável por gerir as ações dos atuadores e receber dados da instrumentação.
- **Bomba:** a bomba fará a circulação do fluido aquecido para que seja realizada a transferência de calor do recipiente 1 para o recipiente 2.
- **Recipiente 1:** consiste em um reservatório de água com duas resistências em seu interior, utilizadas para aquecer a água do mesmo. Essa parte do sistema emula a geração de vapor em uma caldeira.
- **Recipiente 2:** é o local onde é realizado o controle do processo, mantendo o recipiente a uma temperatura de referência, equivalente a uma planta industrial. Onde

também poderá ser aplicado diversos tipos e estratégias de controle. Os dois recipientes terão sensores de temperatura para se conseguir realizar o controle do processo.

- **Resistência:** Componente que fará o aquecimento da água no primeiro recipiente.

A Figura 9 representa de maneira ilustrativa o diagrama do processo de controle que ocorre na bancada, que tem como objetivo controlar a temperatura do recipiente 2.

Primeiramente define-se a temperatura de referência para o processo. A temperatura do Recipiente 2 é obtida através de um sensor, que envia essa informação para o microcontrolador. Que por sua vez calcula o erro, aplica a lei de controle e gera o sinal de controle. O transistor representa o atuador, com a função de amplificar o sinal PWM gerado pelo Arduino. A resistência gerará o aquecimento da água do reservatório 1. A bomba responsável pela circulação de água aquecida no recipiente 2 não é apresentada.

IV. IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLADORES DIGITAIS NO ARDUÍNO

Nesse seção será avaliada a capacidade de implementação de controladores digitais no Arduino. Para isso será utilizado o circuito apresentado na Figura 10. Esse circuito foi utilizado por ser simples de implementar, não necessitar de atuador externo nem de sensor e ter a capacidade de emular o aquecimento de um líquido em um recipiente.

Onde:

$R1 : 10K\Omega$. O resistor $R1$ representa a resistência de aquecimento;

$R2 : 100K\Omega$. O resistor $R2$ apresenta a perda de calor do reservatório para o ambiente;

$C1 : 1000\mu F$. O capacitor $C1$ representa o reservatório e a tensão presente sobre ele é equivalente a temperatura do líquido no reservatório;

$D1 : 0,7V$. O diodo $D1$ é utilizado para impedir o retorno da corrente para a fonte, quando a mesma estiver desligada, o que fisicamente representa que a planta perde energia somente para o ambiente, não retornando para a fonte, como ocorre em sistema aquecidos por resistência.

A função de transferência para o sistema da Figura 10 é apresentado na Equação (5). Essa equação é válida para a ação de controle variando entre 0 e 1, equivalente a razão cíclica do PWM (d).

$$\frac{V_{out}(s)}{d(s)} = \frac{4,3}{s + \frac{R_1 + R_2}{R_1 \times R_2 \times C_1}} \quad (5)$$

Onde: 4,3 representa a a tensão do pino do Arduino 5V menos a queda de tensão de 0,7V do diodo.

Cabe salientar, que essa é uma planta não linear, devido ao comportamento do circuito perder energia do capacitor somente pelo resistor $R2$, não se conseguindo retirar energia pelo resistor $R1$ quando a fonte esta desligada. Isso é equivalente ao que ocorre no sistema real, que perde energia

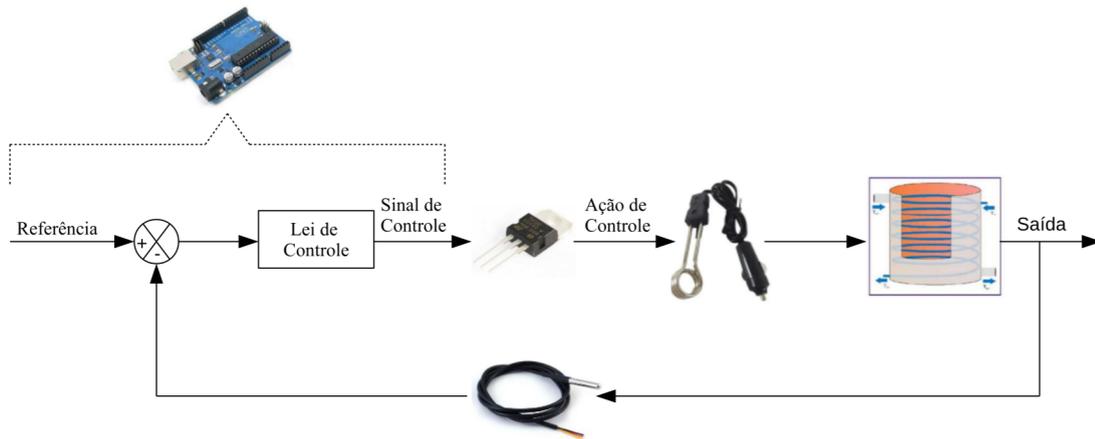


Figura 9: Planta de Controle.

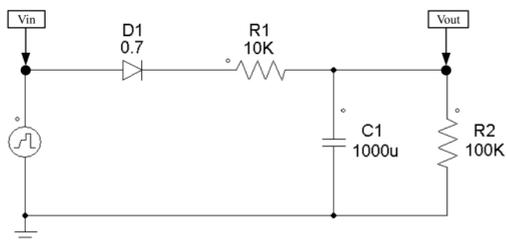


Figura 10: Representação do sistema de aquecimento.

somente para o ambiente, não se conseguindo retirar energia pela resistência de aquecimento. Ainda, o modelo é de primeira ordem, sendo coerente a planta real, cuja apresenta somente um elemento armazenador de energia predominante.

A seguir são apresentados gráficos com as respostas experimentais da tensão de saída da planta da Figura 10 para dois tipos de controladores, proporcional e proporcional integral com ação anti-*windup*. Para esses casos a frequência de amostragem é de $1Hz$. Essa frequência é utilizada devido a planta ter uma dinâmica lenta e para permitir a implementação de leis e estratégias de controle mais complexas juntamente com a utilização de periféricos de comunicação no Arduino.

A. Controle Proporcional

Para a realização do controle da planta da Figura 10 através de um compensador proporcional com o Arduino, foi utilizado a referência, ou *Setpoint*, de $2,5V$, com ação de controle podendo variar a razão cíclica do PWM entre 0 e 1. Para análise de desempenho desse controlador foram utilizados dois ganhos proporcionais diferentes: $K_p = 0,01$ e com $K_p = 1$. Os resultados obtidos para esses ganhos são apresentados nas Figuras 11 e 12, respectivamente.

Pode-se ver pelas Figuras 11 e 12 que, conforme esperado, o controlador proporcional resultou na existência de erro de regime permanente, não atingindo a referência de $2,5V$. Outra conclusão que se pode observar, é que quanto maior o ganho proporcional, menor é o erro em regime permanente, ou seja,

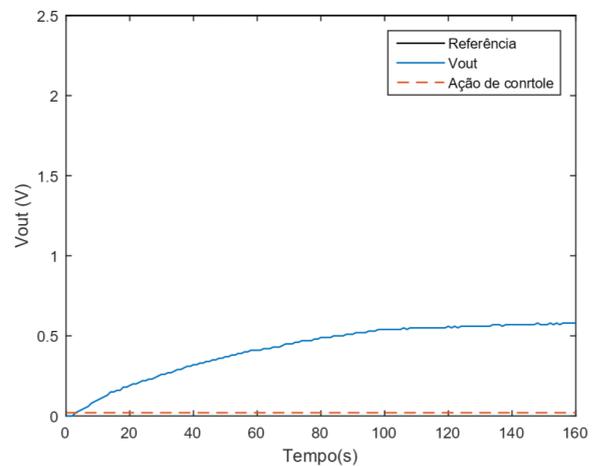


Figura 11: Saída do circuito da Figura 10 com $K_p = 0,01$.

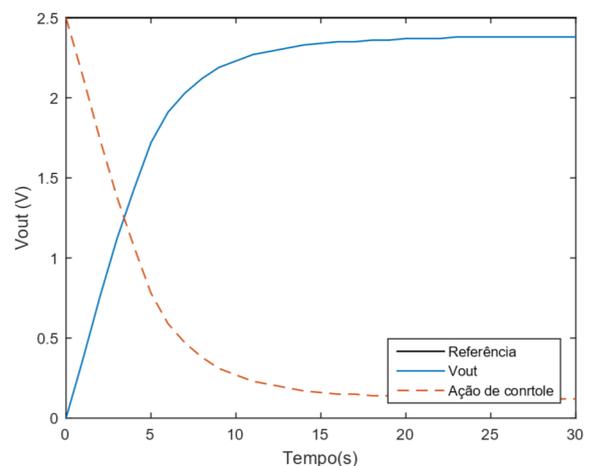


Figura 12: Saída do circuito da Figura 10 com $K_p = 1$.

com $K_p = 1$ o erro em regime permanente é menor do que com $K_p = 0,01$.

B. Controle Proporcional-Integral

Para a realização do controle da planta com compensador PI, os ganhos utilizados foram de $K_p = 1$ e $K_i = 0,1$. A Figura 13 apresenta a comparação do resultado da tensão de saída quando se utiliza o controlador PI com anti-windup por integração condicional e sem a ação anti-windup. A Figura 14 apresenta a comparação da ação de controle do sistema com anti-windup e sem a utilização do anti-windup.

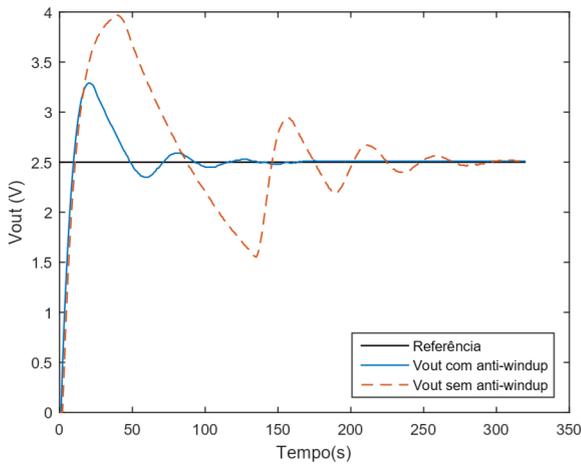


Figura 13: Comparação da tensão de saída do circuito da Figura 10 com e sem anti-windup, com $K_p = 1$ e $K_i = 0,1$.

Pode-se ver pela Figura 13, que como esperado, a resposta não apresentou erro em regime permanente e com a utilização da técnica anti-windup se obteve um melhor desempenho na resposta transitória.

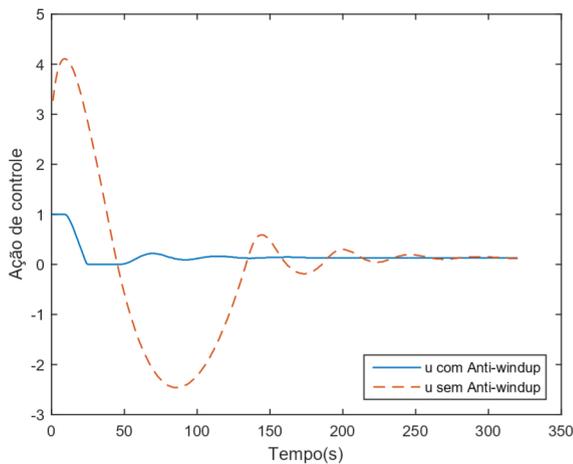


Figura 14: Comparação da ação de controle do circuito da Figura 10 com e sem anti-windup, com $K_p = 1$ e $K_i = 0,1$.

Na Figura 14 é possível perceber que com a utilização da técnica do anti-windup a ação de controle ficou limitada entre 0 e 1, ocorrendo o bloqueio do integrador ao ultrapassar esses intervalos, que é o momento onde a saturação acontece. Pelos resultados apresentados nessa seção, se pode verificar que é possível a implementação de compensadores digitais utilizando a plataforma Arduino. Isso, se mostrou valido para baixos valores de frequência de amostragem.

V. DETERMINAÇÃO DO MODELO DO SISTEMA TROCADOR DE CALOR

A determinação do modelo do sistema foi realizada em duas etapas: Determinação e validação do modelo do sistema térmico do Reservatório 1, determinação e análise do modelo do sistema completo.

A. Determinação do modelo térmico do Reservatório 1

1) Modelo de aquecimento:

Para o modelo de aquecimento do sistema térmico do Reservatório 1 é proposto utilizar o modelo apresentado por [10], mostrado na Equação (6).

$$G(S) = \frac{K \cdot e^{-\theta \cdot S}}{\tau \cdot S + 1} \quad (6)$$

Onde K é o ganho, τ é a constante de tempo e θ é o atraso.

Para se obter o modelo da planta, é necessário fazer primeiramente o levantamento da resposta ao degrau da temperatura do Recipiente 1. Essa resposta ao degrau consiste em se aplicar uma tensão constante na planta, habilitando as resistências em sua tensão máxima, e observar a evolução temporal da temperatura do líquido no recipiente.

A Figura 15 mostra o comparativo da resposta ao degrau da planta real e do modelo simulado no Software PSIM, cuja determinação será apresentada a seguir. Pode-se observar que matematicamente a planta atingirá $100^\circ C$, o que não ocorreu na planta real, uma vez que não foi permitido que o líquido chegasse a essa temperatura para que o mesmo não entrasse em ebulição e para não afetar os componentes que não suportam essa temperatura.

Os resultados experimentais presentes na Figura 15, são utilizados para determinação do modelo como segue.

O valor da constante K pode ser obtido através da Equação (7).

$$K = \frac{\Delta T}{\Delta D} \quad (7)$$

Onde ΔT é a diferença entre a máxima temperatura que pode ser atingida, $100^\circ C$ e a temperatura inicial da água no momento do ensaio, $23,19^\circ C$. E ΔD é a variação de degrau aplicado, que varia de 0 a 1, nesse caso se esta utilizando razão cíclica como entrada, que para esse ensaio é mantida no valor máximo, assim obtendo o valor de K dado por (8).

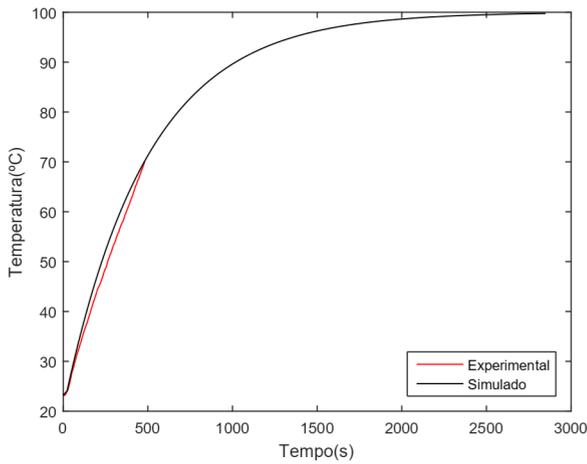


Figura 15: Comparativo do resultado experimental e modelo para a temperatura do reservatório 01 para aquecimento.

$$K = 76,81 \quad (8)$$

O valor da constante de tempo τ é obtida através da Equação de aquecimento no domínio do tempo, apresentada em (9), na qual o atraso não foi considerado.

$$T(t) = K \cdot e^{-\tau \cdot t} + T(0) \quad (9)$$

Onde $T(t)$ é a temperatura no instante t , ou temperatura instantânea. E $T(0)$ é a temperatura inicial do sistema. Através do gráfico apresentado na Figura 15, a temperatura final é $T(t = 482) = 70,19^\circ C$. Assim obtendo-se o valor para τ dada por (10) e seu inversor dado por (11).

$$\tau = 2,035 \cdot 10^{-3} \quad (10)$$

$$\frac{1}{\tau} = 491 \quad (11)$$

A determinação do tempo morto, atraso (θ) foi feita graficamente, encontrando-se a diferença entre o instante da aplicação do degrau e o momento em que a temperatura do reservatório começa a aumentar. Encontrando um valor de $\theta = 17$.

2) Modelo de resfriamento

Após obter o modelo de aquecimento do Reservatório 01, o modelo de resfriamento foi obtido. Esse modelo de resfriamento constitui em após chegar na temperatura máxima desejada de aquecimento ($70^\circ C$), retirar a tensão aplicada na planta, desabilitando as resistências, e observar a evolução temporal da temperatura do líquido. A Figura 17 mostra o comparativo do resfriamento da planta real e do modelo, onde os resultados experimentais são utilizados para determinar o modelo.

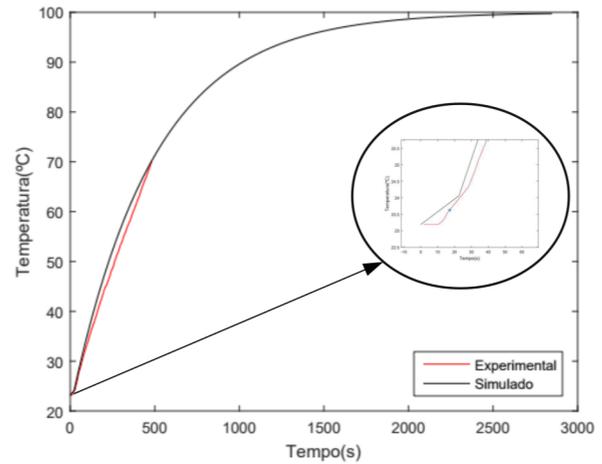


Figura 16: Análise para encontrar o valor do atraso.

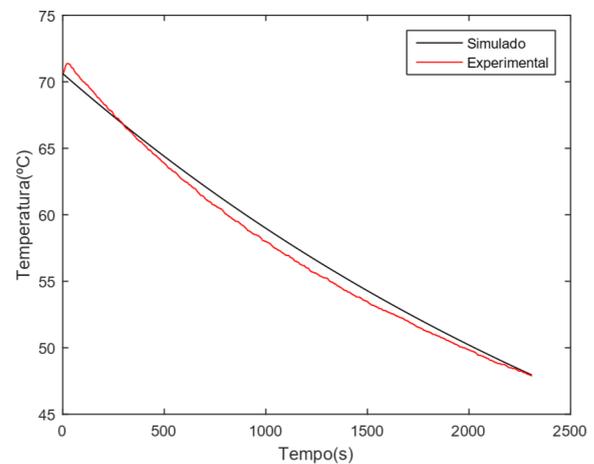


Figura 17: Comparativo do resultado experimental e modelo da temperatura do Reservatório 1 para o resfriamento.

Para determinar o modelo de resfriamento também é utilizado o modelo da Equação (9), seguindo o mesmo procedimento feito para o aquecimento. Nesse caso foi alterado o valor de $T(0)$ para $T(f)$ que é a temperatura mínima que o sistema irá atingir, ou seja, a temperatura ambiente, conforme Equação (12).

$$T(t) = K \cdot e^{-\tau \cdot t} + T(f) \quad (12)$$

Realizando o mesmo procedimento que anteriormente obteve-se um valor de K mostrado na Equação (13).

$$K = 47,30 \quad (13)$$

Através do gráfico apresentado na Figura 17, a temperatura final para o resfriamento é $T(t = 2310s) = 47,88^\circ C$. Assim obtendo-se o valor para τ dada por (14) e seu inversor dado por (15).

$$\tau = 0,2814 \cdot 10^{-3} \quad (14)$$

$$\frac{1}{\tau} = 3553 \quad (15)$$

Após obtido todos os valores das constantes através das análises do modelo de aquecimento e resfriamento, realizou-se a simulação no Software PSIM, simulando o modelo através do circuito eletrônico, apresentado na Figura 18. Dessa forma, a função de transferência que representa o sistema do reservatório 1 é dada pela Equação (16).

$$\frac{T_{out}(S)}{d(S)} = e^{-\theta S} \times \frac{R_2}{R_1 \cdot R_2 \cdot CS + (R_1 + R_2)} = e^{-17S} \times \frac{0,002036}{S + 0,002318} \quad (16)$$

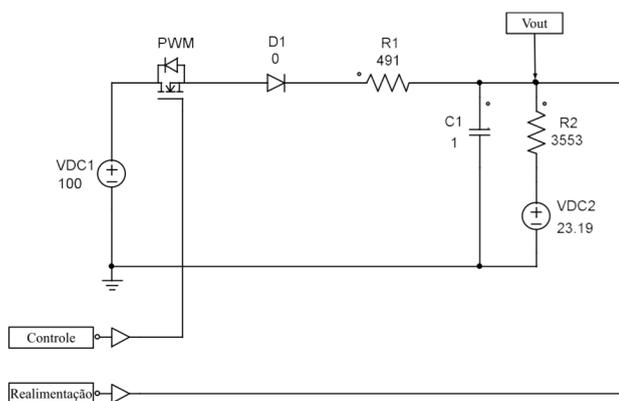


Figura 18: Circuito simulado no PSIM para comparativo do sistema físico.

B. Validação do modelo para o Reservatório 01

Para validar o modelo é proposto utilizar compensadores na planta e no modelo de forma a comparar suas respostas e verificar a similaridade da resposta obtida através de simulação com as respostas experimentais.

1) Validação com Compensador Proporcional:

Para essa análise, foi utilizado um ganho proporcional $K_p = 0,25$. Os resultados experimentais e de simulação são apresentados na Figura 19, na qual pode-se observar que o comportamento dinâmico do modelo com controlador P representou adequadamente a planta real com o mesmo controlador.

2) Validação com Compensador Proporcional Integral:

Para essa análise, foi utilizado um compensador PI com ganhos, $K_p = 0,25$ e ganho integral, $K_i = 0,0005$, com a função anti-*windup* ativa.

Os resultados experimentais e de simulação são apresentados na Figura 20, na qual pode-se observar que

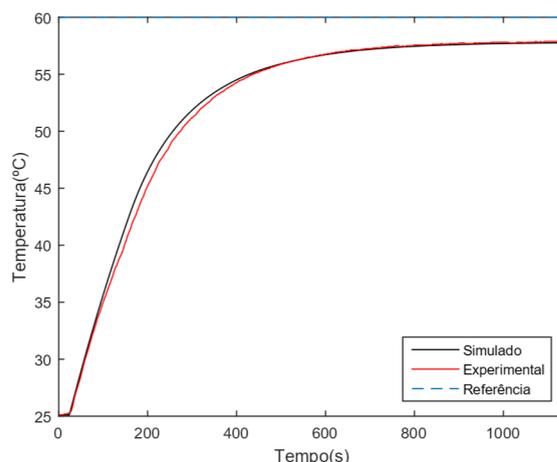


Figura 19: Comparativo do resultado experimental e modelo da temperatura do Reservatório 1 com controle proporcional.

a resposta em malha fechada do modelo com o controle proporcional integral teve um comportamento similar a planta com o mesmo controlador.

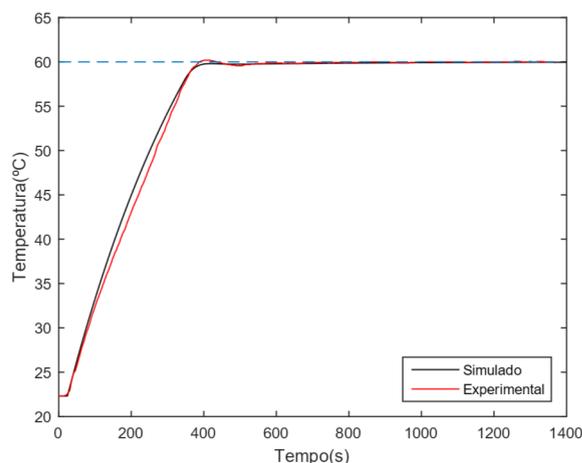


Figura 20: Comparativo do resultado experimental e modelo da temperatura do Reservatório 1 com controle proporcional-integral.

3) Validação com compensador Proporcional Integral com Step:

Para essa análise um degrau na referência de temperatura é realizado, passando de $50^{\circ}C$ para $60^{\circ}C$ em 600 segundos. Nessa análise o mesmo compensador PI do item anterior foi utilizado. Os resultados experimentais e de simulação são apresentados na Figura 21. Pode-se observar que houve uma pequena diferença do desempenho transitório após o step, no entanto essa pequena diferença não invalida o modelo, permitindo que o compensador faça a temperatura atingir o valor de referência de maneira adequada.

Através dos resultados obtidos nessa seção, pode-se verificar que o modelo para aquecimento e resfriamento desenvolvido representa de maneira adequada o sistema do Reservatório 1.

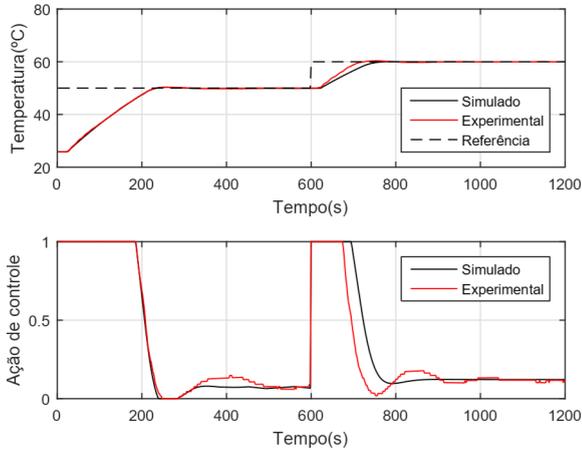


Figura 21: Comparativo do resultado experimental e modelo da temperatura do Reservatório 1 com controle proporcional-integral com step na referencia.

C. Determinação do modelo térmico do sistema completo

A segunda etapa de análises ocorreu nos dois recipientes juntos, onde foi levantado os modelos de aquecimento e resfriamento do sistema completo.

Para isso o primeiro Reservatório foi aquecido a $60^{\circ}C$ com o compensador PI utilizado no item anterior, o controle foi mantido ativo e foi acionado a bomba de circulação para ocorrer a transferência de calor do Reservatório 1 para o Reservatório 2. O comportamento da temperatura de ambos os reservatórios são apresentado nas Figuras 22 e 23, juntamente com o comportamento das temperaturas dos diferentes modelos propostos, os quais serão determinados a seguir.

1) Modelo de aquecimento

No entanto, para representar o sistema, inicialmente foi proposto utilizar um modelo de segunda ordem com os mesmos parâmetros do Reservatório 1, obtidos na seção anterior, conforme apresentado na Figura 24. Pode-se verificar pelas Figuras 22 e 23 que esse modelo não representou adequadamente o sistema, principalmente para a temperatura do Reservatório 1. Ainda, pode-se verificar nos resultados experimentais que além do atraso de transporte entre o acionamento da bomba e a elevação de temperatura do Reservatório 2, existe a diminuição da temperatura do Reservatório 1 sem ocorrer a elevação de temperatura do Reservatório 2, indicando a existência de um sistema intermediário de armazenamento de energia. Foi considerado que esse sistema é decorrente das tubulações e do trocador de calor. Assim, um modelo

de terceira ordem é proposto, conforme apresentado na Figura 25.

A Figura 25 apresenta o modelo de terceira ordem para o sistema, os valores dos componentes foram ajustados por tentativa-erro de forma a obter comportamentos similares da temperatura durante o aquecimento em ambos os Reservatórios. Nas Figuras 22 e 23 se pode verificar que o modelo de terceira ordem representa o sistema de maneira adequada.

Para se poder escrever uma função de transferência linear para o modelo apresentado na Figura 25, é proposto transferir todos os atrasos para a entrada do modelo, ou seja, na razão cíclica, conforme apresentado na Figura 26.

Pode-se ver nas Figuras 22 e 23 que modelo de terceira ordem com a transferência do atraso para a entrada do modelo representa o sistema de maneira adequada, permitindo o estudo e análise de controladores no sistema de aquecimento.

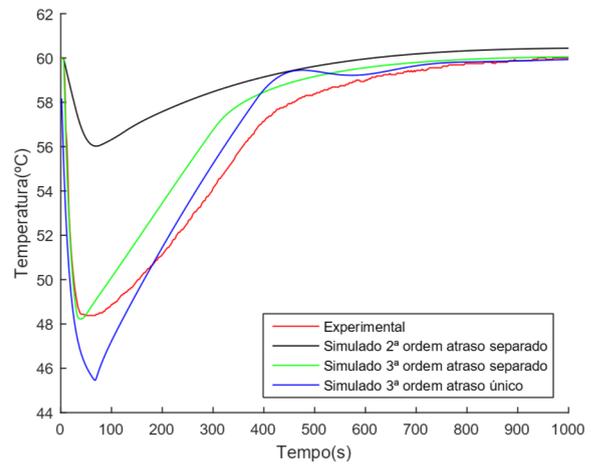


Figura 22: Temperatura do Reservatório 1 para o levantamento do modelo do sistema completo.

2) Modelo de resfriamento:

Após a análise do modelo de aquecimento realizou-se o resfriamento do sistema. Pode-se analisar através as Figuras 27 e 28 que para o resfriamento, o modelo de terceira ordem com atraso único não representou adequadamente o sistema, tanto para o recipiente 01 quanto para o 02. No entanto, isso não causa maiores problemas no estudo e desenvolvimento de compensadores, visto que a ação de controle somente tem a capacidade de inserir energia no sistema, não possuindo meios de causar a retirada de energia, ou seja, o resfriamento somente é realizado por perda de energia para o ambiente. Nesse caso, a mínima ação de controle que o compensador poderá solicitar é zero, ou seja, causando o desligamento completo das resistências. Assim, a função de transferência que representa o sistema é dado pela Equação (17).

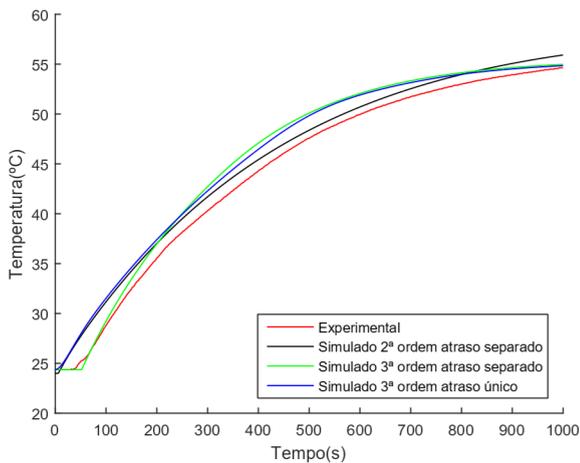


Figura 23: Temperatura do Reservatório 2 para o levantamento do modelo do sistema completo.

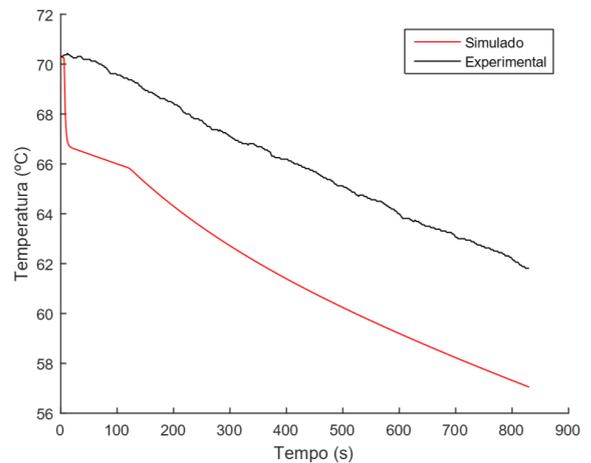


Figura 27: Comparação modelo de resfriamento do Reservatório 01 com os resultados experimentais.

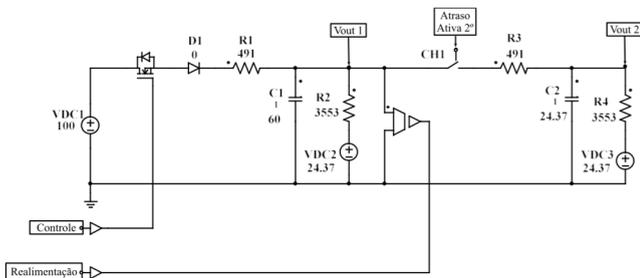


Figura 24: Circuito 2ª ordem com atrasos separados.

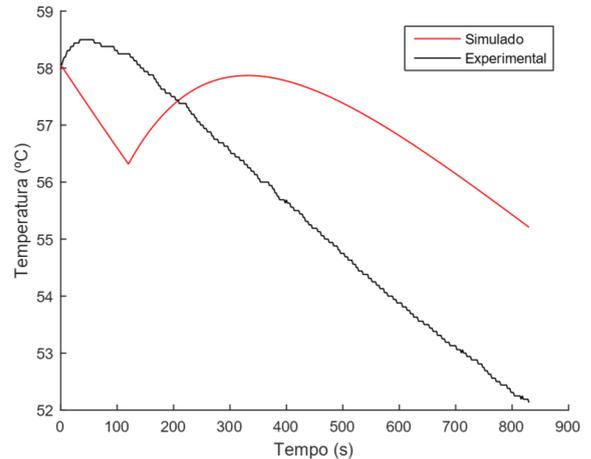


Figura 28: Comparação modelo de resfriamento do Reservatório 02 com os resultados experimentais.

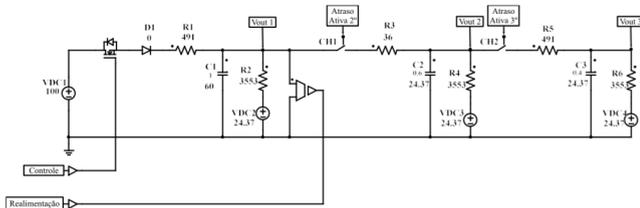


Figura 25: Circuito 3ª ordem com atrasos separados.

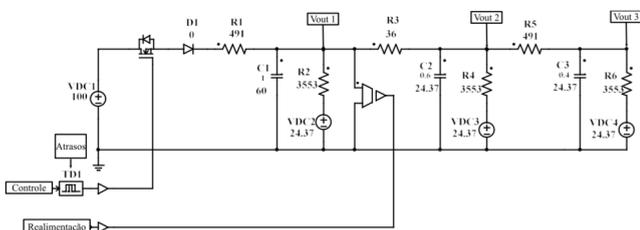


Figura 26: Circuito 3ª ordem com atraso único.

$$\frac{T_{out}(S)}{d(S)} = e^{-66S} \times 100 \times \frac{0,02071S^2 + 0,001734S + 5,68e-05}{S^3 + 0,08605S^2 + 0,0006714S + 7,756e-07} \quad (17)$$

VI. PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM COMPENSADOR PARA O SISTEMA COMPLETO

Através do modelo do sistema obtido na seção anterior, se propõe a utilização de um compensador que atenda a característica de não causar a saturação da ação de controle. Ou seja, mantém o sistema de controle operando na região linear, de forma que se possa comparar a resposta experimental com a obtida no Sisotool, cujo não realiza a saturação da ação de controle. Dessa forma, o compensador selecionado é do tipo PI com $K_p = 0,04$ e $K_i = 0,00004$.

Na Figura 29 se pode verificar a resposta real do sistema e a resposta obtida através da simulação do sistema pela Equação (17) com o mesmo compensador no programa PSIM. Pode-se verificar que a resposta simulada apresenta um comportamento similar a resposta real.

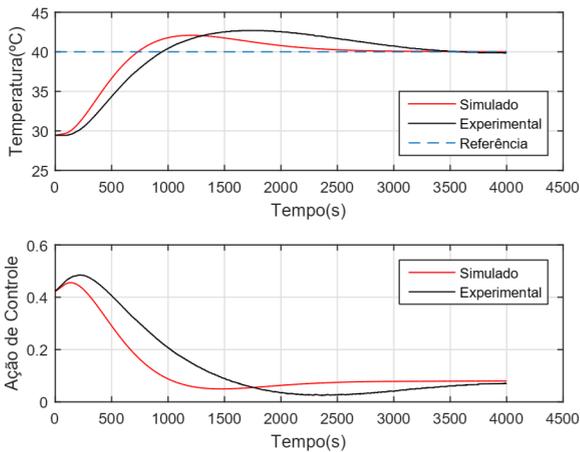


Figura 29: Comparação da resposta do sistema real com simulado utilizando o modelo da Equação (17).

Visando obter uma melhor aproximação entre a resposta simulada com a real, o modelo do sistema foi alterado para a Equação (18), a obtenção desse modelo foi realizado alterando o tempo de atraso e o ganho do sistema.

Na Figura 30 é apresentado o desempenho do comportamento do sistema real e simulado considerando o modelo da Equação (18), pode-se verificar que houve uma melhoria na similaridade do comportamento transitório tanto da temperatura de saída, quanto da ação de controle.

$$\frac{T_{out}(S)}{d(S)} = e^{-150S} \times 83 \times \frac{0,02071S^2 + 0,001734S + 5,68e - 05}{S^3 + 0,08605S^2 + 0,0006714S + 7,756e - 07} \quad (18)$$

A Figura 31 e 32 mostram a análise de Bode em malha aberta e fechada, respectivamente, obtidos para o modelo apresentado na Equação (18) e o compensador proposto nessa seção.

VII. CONCLUSÃO

Esse trabalho buscou realizar a montagem de uma bancada didática que representa um sistema térmico de trocador de calor, além de analisar e comparar os desempenhos reais ao obtidos pelos modelos e simulações. Também foi proposto a validação da planta através de compensadores, onde esses foram ajustados através da ferramenta Sisotool e implementados digitalmente. Os resultados de simulações do modelo foram satisfatórios, apresentando resultados semelhantes aos do sistema real.

Para que os compensadores possam ser ajustados ou novos compensadores serem implementados, pode ser realizado uma interface para integrar as informações e resultados com o Software Matlab/Simulink, permitindo e facilitando a implementação e comparação dos resultados.

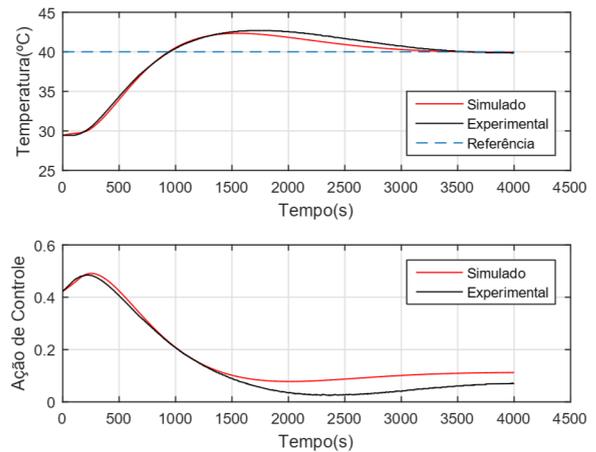


Figura 30: Comparação da resposta do sistema real com simulado utilizando o modelo da Equação (18).

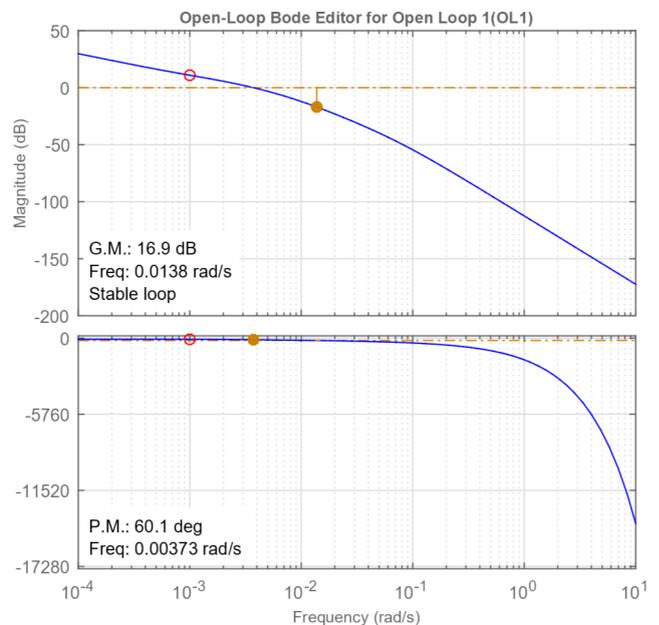


Figura 31: Bode em malha aberta da simulação do sistema após nova análise, utilizando a Equação (18).

Também poderá ser implementado uma interface de comunicação entre o usuário e o sistema, para facilitar a operação. Outra melhoria possível de realização é implementar outros tipos de compensadores, que não foram possíveis de implementar devido a falta de tempo hábil decorrente das dificuldades encontradas.

REFERÊNCIAS

- [1] R. S. . J. D. Zuchi, "As revoluções industriais até a indústria 4.0," *Revista Interface Tecnológica*, vol. 15, no. 2, pp. 480 – 491, 2018.

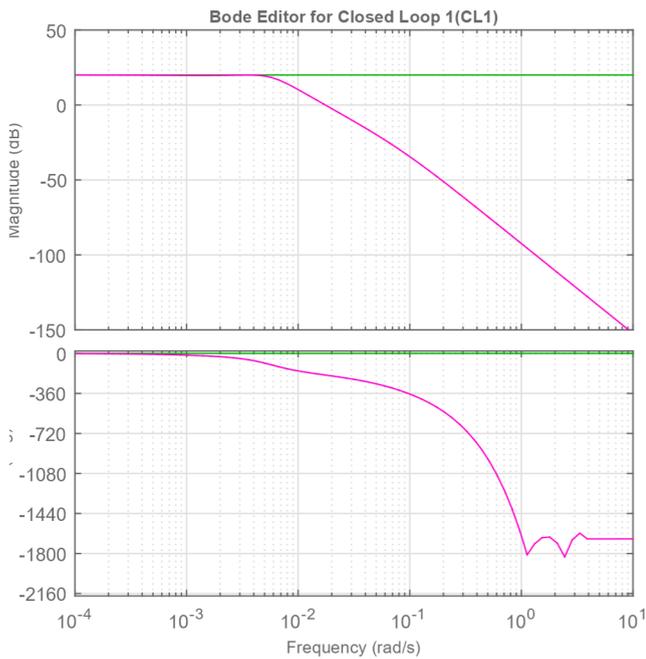


Figura 32: Bode em malha fechada da simulação do sistema após nova análise, utilizando a Equação (18).

- [2] P. A. M. . F. K. Junior, "Uso de trocador de calor como ferramenta didática para o ensino de modelagem e sistemas de controle," *Ensino de Engenharia*, vol. 25, no. 2, pp. 3–9, 2006.
- [3] E. F. B. . D. G. de Moura, "Metodologias ativas de aprendizagem no ensino de engenharia," in *International Conference on Engineering and Technology Education*, 2014, pp. 110–116.
- [4] F. P. I. . D. P. D. T. L. B. A. S. Lavine, *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*, 6th ed. LTC, 2011.
- [5] K. Ogata, *Engenharia de Controle Moderno*. Pearson, 2011, vol. 5.
- [6] L. Campestrini, "Sintonia de controladores pid descentralizados baseada no método do ponto crítico," 2006.
- [7] S. C. Rios. (2017) Estratégias de controle. [Online]. Available: <https://docplayer.com.br/39161160-Sumario-estrategias-de-controle.html>
- [8] D. P. A. Christian Bohn, "An analysis package comparing pid anti-windup strategies," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 15, pp. 34–40, 1995.
- [9] A. Ghoshal and V. John, "Anti-windup schemes for proportional integral and proportional resonant controller," p. 6, 06 2010.
- [10] P. A. M. F. K. Junior, "Uso de trocador de calor como ferramenta didática para o ensino de modelagem e sistemas de controle," *Revista de Ensino de Engenharia*, vol. 25, no. 2, pp. 3 – 9, 2006.