

15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM PROCESSO DE CONTROLE DE TEMPERATURA INDUSTRIAL

HENRIQUE BACH MENEGATTO¹, MARCELO SARAIVA COELHO²,

¹ Graduando em Bacharelado de Engenharia de Controle e Automação, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Campus Cubatão, henrique.bach@aluno.ifsp.edu.br.

² Doutor profissional em Engenharia Elétrica, professor do IFSP, Campus Cubatão, mcoelho@ifsp.edu.br
Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.05.03-3 Controle de Processos Eletrônicos, Retroalimentação

RESUMO: A temperatura é uma das principais variáveis a ser controlada dentro de um processo industrial. Dentre os diversos métodos de controle de temperatura, um dos mais encontrados no ambiente industrial é o aplicado em trocadores de calor, sendo o do tipo casco e tubo um dos mais utilizados, principalmente na indústria química. Pensando nisso, o presente trabalho tem por objetivo desenvolver o modelamento matemático do sistema de controle de temperatura deste trocador, por meio da ferramenta de simulação Matlab/Simulink, embarcando o processo e o controlador em protótipo de *hardware*. Foram realizados uma série de testes para validar o modelo, e também ensaios para confirmar que o sistema embarcado em *hardware* apresenta o mesmo comportamento do que foi simulado em *software*.

PALAVRAS-CHAVE: modelamento matemático; trocadores de calor; controle de temperatura

MODELING AND SIMULATION OF AN INDUSTRIAL TEMPERATURE CONTROL PROCESS

ABSTRACT: Temperature is one of the main variables to be controlled within an industrial process. Among the various temperature control methods, one of the most used in the industrial environment is that applied to heat exchangers, with the shell and tube type being one of the most widely used, especially in the chemical industry. This work aims to develop the mathematical modeling of the temperature control system for this exchanger, using the Matlab/Simulink simulation tool, embedding the process and the controller in a hardware prototype. A series of tests were performed to validate the model, and tests to confirm that the embedded system in hardware presents the same behavior as that simulated in software.

KEYWORDS: mathematical modeling; heat exchanger; temperature control

INTRODUÇÃO

Os trocadores de calor desempenham um papel significativo na operação de diversos processos, como por exemplo fábricas de produtos químicos, plantas petroquímicas, unidades de recuperação de calor, dentre outros processos químicos (Kasmir, 2015; Zhang, 2012). Existem diversos tipos de trocadores de calor, sendo o trocador de calor do tipo casco e tubo um dos mais utilizados, pois podem operar em altas pressões, são fáceis de fabricar em uma grande variedade de tamanhos e configurações, além de sua construção facilitar a desmontagem para manutenção e limpeza (Padhee et al., 2011).

De acordo com Souza (2013), um trocador de calor do tipo casco e tubo consiste em um casco cilíndrico com tubos em seu interior, em que um dos fluídos de trabalho escoia pelo casco e o outro pelos tubos do feixe, sendo a troca de calor realizada através das paredes dos tubos. De acordo com Garcia

(2005), o controle da temperatura de saída de um trocador de calor pode ser realizado pela variação de um ou mais das seguintes variáveis: vazão do fluido de entrada, temperatura do fluido de entrada, vazão de entrada do fluido sendo aquecido ou temperatura de entrada do fluido sendo aquecido. Este controle é realizado utilizando um controlador, sendo o PID (Proporcional-Integral-Derivativo) um dos mais utilizados na indústria (cerca de 95% das malhas de controle utilizam esta técnica), além de ser um método flexível e simples (Raut; Vaishnav, 2012). A equação do controlador PID do tipo não interativo é apresentada a seguir.

$$MV = K_p \times \left(e(t) + K_i \times \int e(t) dt + K_d \times \frac{de}{dt}(t) \right) \quad (1)$$

onde,

MV – Variável manipulada;

K_p – Ganho proporcional;

K_i – Ganho integral;

K_d – Ganho derivativo;

e(t) – Erro.

Neste sentido, o presente trabalho tem por objetivo desenvolver um sistema simulador do processo de um trocador calor do tipo casco e tubo para ser embarcado em *hardware* e simulado em tempo real. Para isso, o modelo do processo foi implementado em um *software* de simulação, com o objetivo de realizar uma série de simulações para verificar o seu funcionamento para posteriormente, utilizando o código C++ deste modelo, ser embarcado em *hardware*.

MATERIAL E MÉTODOS

O processo proposto foi baseado no trabalho de Garcia (2005) e consiste em um trocador de calor do tipo casco e tubo, uma válvula para alterar a vazão do fluido de entrada (fluido no casco), um conversor de corrente para pressão (que funciona como um atuador da válvula), um sensor (neste caso, um termopar do tipo J) e um transmissor de temperatura para fechar a malha de controle, além do controlador responsável por realizar o controle da vazão do fluido de entrada, conforme esquematizado na Figura 1.

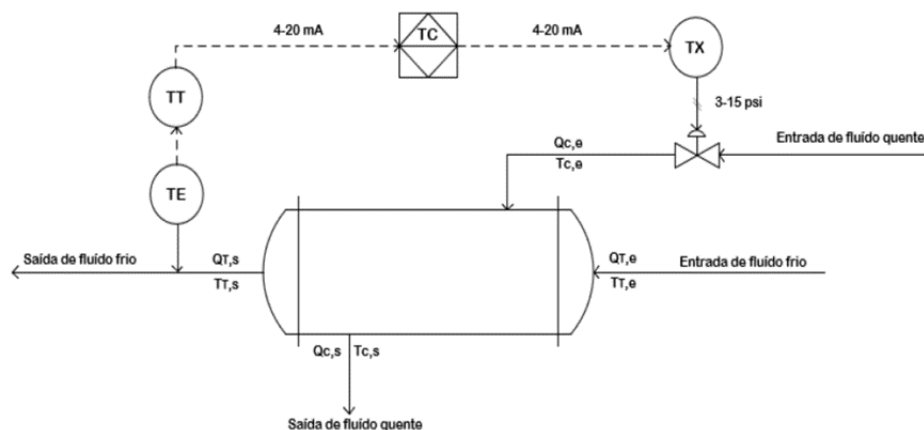


Figura 1: Diagrama de controle de temperatura do trocador de calor

Fonte: Moreira e Lião (2022)

A primeira etapa do projeto consistiu em realizar a modelagem matemática do processo no software de simulação Matlab/Simulink 2020b. Para isso, dividiu-se o processo em dois subsistemas: Controlador PID e Trocador de Calor. Inicialmente foi desenvolvido o Controlador PID. Para isso, utilizou-se o bloco “Discret PID Controller”, disponível no Simulink, que tem a função de implementar um controlador PID. Para que ele funcione corretamente, foi necessário realizar a configuração de alguns parâmetros, sendo eles: limites de saturação (neste caso de 0 a 100) e o tipo de controlador, neste caso PID com estrutura do tipo não interativo, cuja equação discretizada é apresentada na Equação 2. Os

valores dos ganhos do controlador e o valor do filtro derivativo foram enviados ao controlador por meio de um sistema supervisório.

$$MV = K_p \times \left(1 + \left(K_i \times T_s \times \frac{1}{z-1} \right) + \left(K_d \times \frac{N}{1+N \times T_s \times \frac{1}{z-1}} \right) \right) \quad (2)$$

onde,

T_s – Sample time;

N – Coeficiente do filtro derivativo;

Além do bloco do “Discret PID Controller”, foi necessário realizar uma conversão do valor do SP (set point), que está em °C, e da PV (variável controlada), que está em mA, para porcentagem. Junto a isto, foram inseridos dois *switchs*, que são responsáveis por alterar a ação do controlador e definir a saída do controlador, que pode ser feita de forma manual ou automática. Por fim, foi realizada uma conversão da MV de porcentagem para corrente (4-20 mA). Subsistema do Controlador PID pode ser observado na Figura 2.

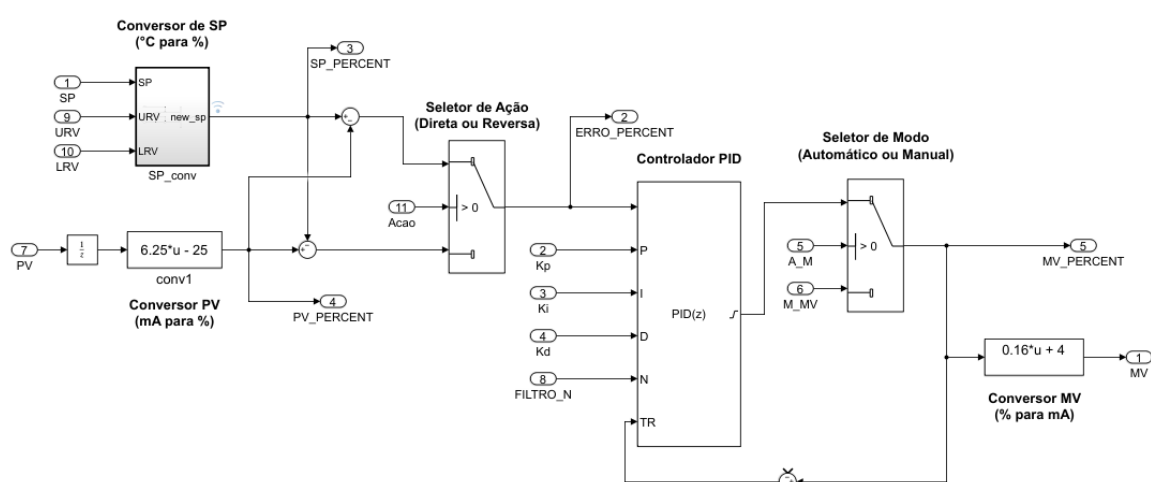


Figura 2: Controlador PID modelado no Matlab/Simulink

Fonte: Autores (2024)

Além da modelagem do controlador PID, foi desenvolvido o modelo do processo, o qual contempla o trocador de calor do tipo casco e tubo, o sensor e transmissor de temperatura, o conjunto conversor I/P (corrente para pressão) e a válvula de controle. Este subsistema possui como entrada todos os parâmetros construtivos do trocador de calor (por exemplo o número de tubos do trocador de calor), os parâmetros químicos dos fluidos que passam pelo casco e pelos tubos (viscosidades, massas específicas, calores específicos, dentre outros) e os parâmetros operacionais da válvula (rangeabilidade, coeficiente de vazão, dentre outros). A saída deste subsistema é a temperatura do fluido nos tubos em mA. A Figura 3 apresenta os componentes deste subsistema.

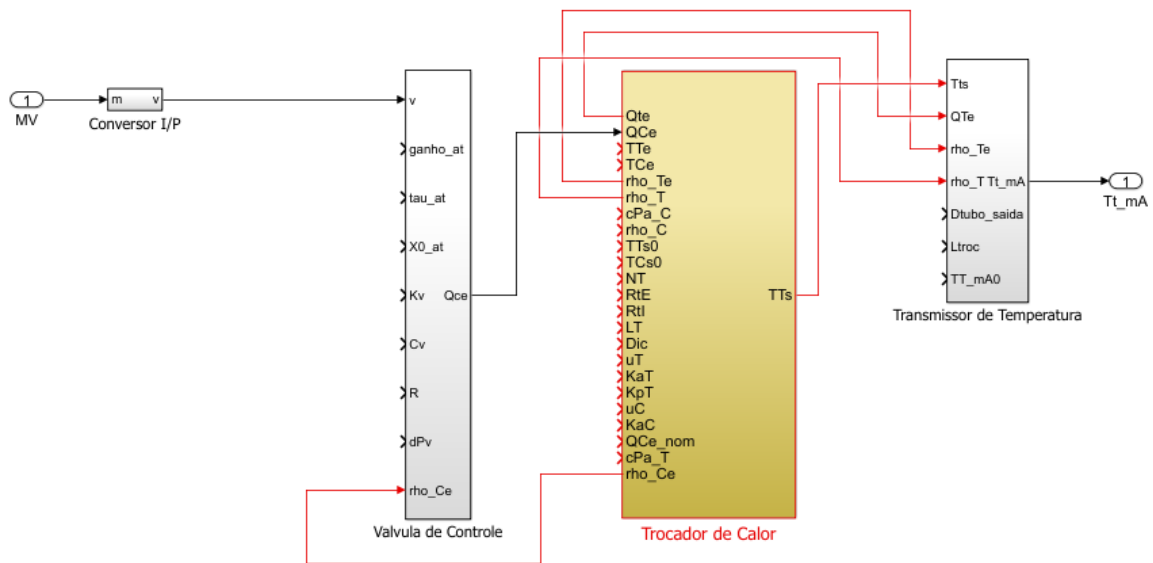


Figura 3: Processo do trocador de calor modelado no Matlab/Simulink
Fonte: Autores (2024)

Os modelos desenvolvidos para o controlador e para o processo foram convertidos em códigos em linguagem C/C++ para possibilitar o embarque em uma plataforma de hardware, neste caso um microcontrolador Arduino DUE, conforme apresentado na Figura 4. Para a geração destes códigos utilizou-se a ferramenta Embedded Coder, que permite a geração de códigos em linguagem C ou C++ legíveis, compactos e rápidos para processadores embarcados (MATHWORKS; 2024).

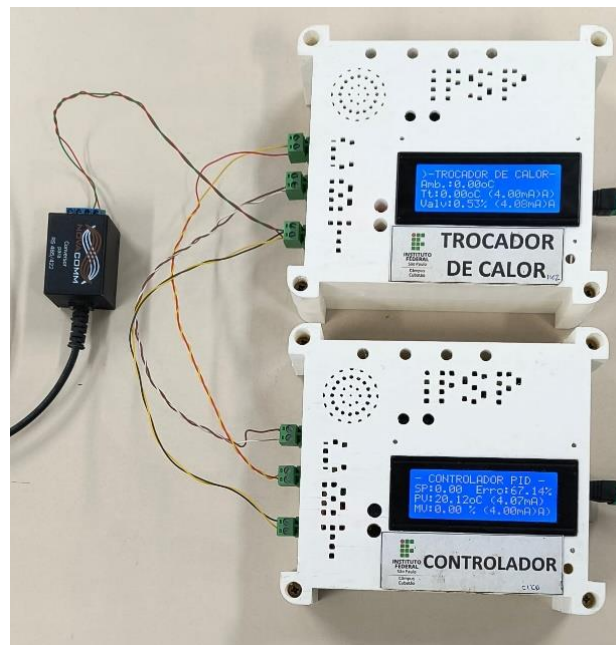


Figura 4: Plataforma de *hardware* do sistema controlador-trocador
Fonte: Autores (2024)

Para permitir a visualização dos resultados obtidos na simulação, assim como configurar os parâmetros do processo (temperatura ambiente, temperatura do fluido, abertura da válvula, dentre outros) e do controlador (ganhos do controlador e valor do filtro derivativo) desenvolveu-se um sistema supervisor utilizando o *software* AVEVA Edge Educational v20.0, conforme mostrado na Figura 5.

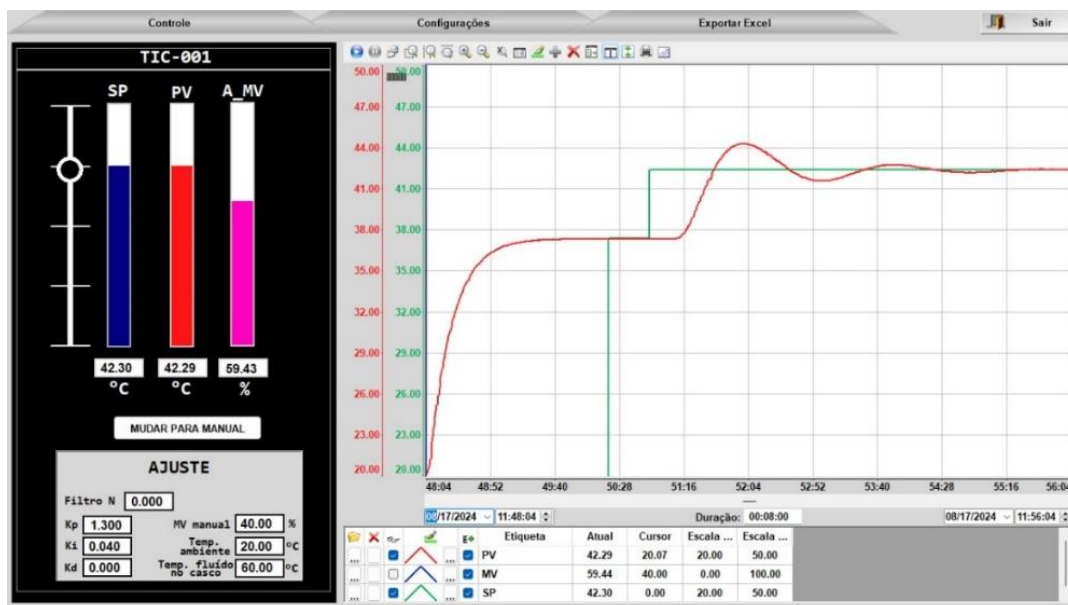


Figura 4: Sistema supervisório para monitorar sistema controlador-trocador

Fonte: Autores (2024)

Feita a geração dos modelos em C++ e a sua implementação *hardware*, assim como o desenvolvimento do sistema supervisório, foi possível realizar uma série de ensaios para validar os modelos gerados, comparando os resultados obtidos na plataforma com aqueles simulados em *software*. Os ensaios realizados para validar o modelo, assim como a comparação dos resultados, serão demonstrados a seguir.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, foi determinado a curva de reação do processo. Para a determinação desta curva considerou-se que a temperatura ambiente do processo é de 20°C e a temperatura do fluido é de 60°C. O ensaio consistiu em abrir a válvula em 20% e esperar a temperatura estabilizar. Após estabilizar, aplicou-se um degrau de 20% na entrada do processo, ou seja, ajustou-se o valor da válvula para 40% e esperou-se a temperatura estabilizar. Os resultados obtidos na simulação e no hardware podem ser observados na Figura 5.

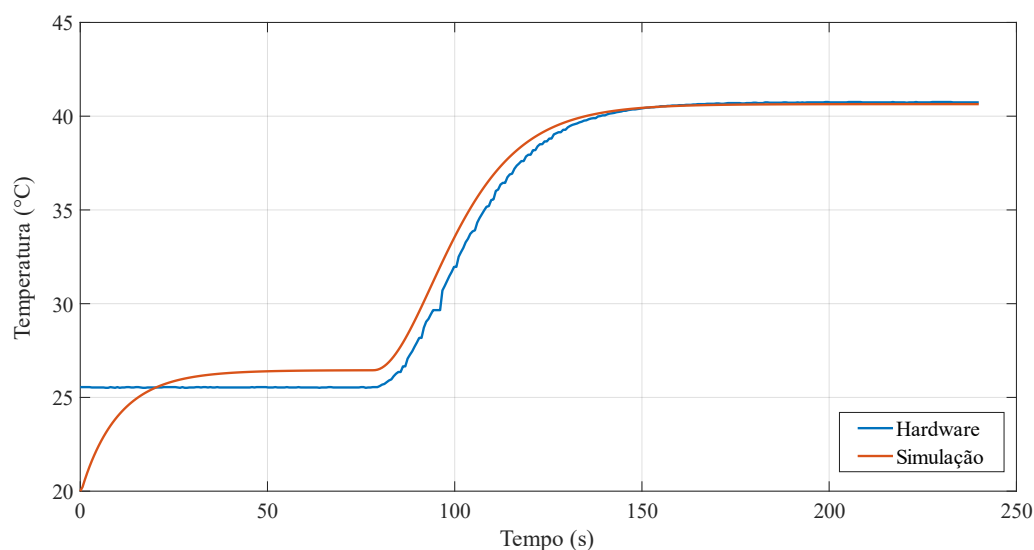


Figura 5: Comparação da curva de reação simulada e em *Hardware*

Fonte: Autores (2024)

Como pode ser observado nos gráficos, ambos os resultados foram bem próximos, uma vez que, para 20% de abertura de válvula, a temperatura se estabilizou em aproximadamente 26°C. Além disso, após o degrau na entrada o comportamento do processo foi bastante similar, uma vez que foram necessários aproximadamente 2 minutos para a temperatura estabilizar em aproximadamente 41°C em ambos os casos.

Por fim, foi realizado um ensaio de controle em malha fechada do sistema. Para isso, foi necessário calcular os ganhos do controlador PID, neste caso, utilizando o método IMC-Skogestad. Após calcular estes ganhos e realizar um ajuste fino nos valores, obteve-se um K_p igual a 1.3 e um K_i igual a 0.04. Tendo os ganhos do controlador, abriu-se a válvula de controle em 40% e esperou-se a temperatura estabilizar (neste caso, a temperatura estabilizou-se em 38.2°C). Após isso, aplicou-se um degrau no *Set-Point* de 4°C (ou seja, desejava-se que a temperatura se estabilizasse em 42.2°C) e observou-se a temperatura do processo. Os resultados obtidos na simulação e na plataforma de *hardware* podem ser observados na Figura 6.

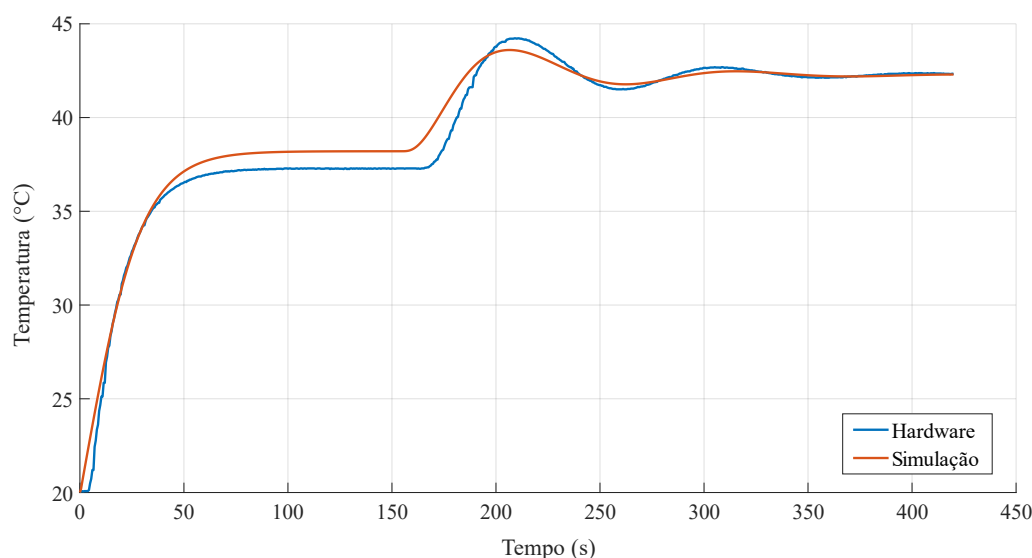


Figura 6: Comparação do ensaio simulado e em *Hardware* do controle em malha fechada do sistema
Fonte: Autores (2024)

Os resultados obtidos para os ganhos do controlador se mostraram bastante satisfatórios, uma vez que a saída do processo apresentou um erro de regime permanente (diferença entre a saída do sistema e a referência) praticamente nulo, além de possuir *overshoot* (máxima diferença entre a saída e a entrada durante o período transitório) de aproximadamente 3.1%. Além disso, como pode ser observado no gráfico, a resposta do processo simulado e do *hardware* foram bastante próximos, apresentado um erro máximo de aproximadamente 1°C na estabilização e no valor de pico.

CONCLUSÕES

O presente trabalho desenvolveu e validou um sistema de controle de temperatura utilizando um trocador de calor do tipo casco e tubo, modelado no Matlab/Simulink e embarcado em um microcontrolador Arduino DUE. Os resultados das simulações e dos testes em *hardware* apresentaram resultados bastante satisfatórios, demonstrando que o sistema de controle projetado consegue cumprir a sua função de controlar a temperatura de saída do trocador de calor. Além disso, a comparação dos resultados demonstrou uma forte correlação, comprovando a precisão do modelo matemático e a eficácia da implementação do modelo no microcontrolador.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

H.B.M: conceitualização; metodologia; desenvolvimento, implementação e teste de *software*; análise dos dados e experimentos; discussão dos resultados e redação do trabalho.

M.S.C: teste de *software*; análise dos dados; discussão dos resultados e revisão do trabalho.

REFERÊNCIAS

GARCIA, Claudio. **Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos** Vol. 1. Edusp, 2005.

KASMIR, Jenifer; JOSHI, Sandeep M. **Experimental study of a shell and tube heat exchanger for performance enhancement**. In: 2015 International Conference on Technologies for Sustainable Development (ICTSD). IEEE, 2015. p. 1-3.

MATHWORKS. **Code Generation by Using Embedded Coder**. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/ecoder/gs/code-generation-workflows-with-embedded-coder.html>>. Acesso em: 12 julho 2024.

MOREIRA, João Pedro de Sá; LIÃO, Mariana de Moraes Ribeiro. **PROTÓTIPO DE SIMULADOR DE SISTEMAS DE CONTROLE INDUSTRIAIS BASEADO EM SOFTWARE EMBARCADO**. 2022. 114 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Instituto Federal de São Paulo, Cubatão, 2022.

NISE, Norman S.; DA SILVA, Fernando Ribeiro. **Engenharia de sistemas de controle**. LTC, 2002.

PADHEE, Subhransu; KHARE, Yuvraj Bhushan; SINGH, Yaduvir. **Internal model based PID control of shell and tube heat exchanger system**. In: IEEE Technology Students' Symposium. IEEE, 2011. p. 297-302.

RAUT, Kiran H.; VAISHNAV, S. R. **A study on performance of different PID tuning techniques**. In: Proceedings. 2012. p. 250-254.

SOUZA, Monique Silveira. **Análise Térmica de um Trocador de Calor do tipo Casco e Tubos para Resfriamento do Resíduo de uma Unidade de Destilação Atmosférica**. 2013.

ZHANG, Xiaodong et al. **Research on the modeling and simulation of shell and tube heat exchanger system based on MPCE**. In: 2012 4th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. IEEE, 2012. p. 328-331.