



Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Trabalho Prático - 4

RELATÓRIO FINAL - TCPI

João Pedro Miranda Marques - 2017050495

Rodrigo Pimentel Faria - 2017050126

Pedro Ian Mota Moraes - 2013024716

30 de Agosto de 2021

Sumário

Descrição do Processo	3
Estrutura de Controle Final	4
Controladores	10
Conclusão	13

Descrição do Processo

Para o presente trabalho, propõe-se aplicar o controle de temperatura e umidade de um ambiente fechado em constante umidificação. Durante as simulações, utilizando uma caixa fechada e um umidificador ligado constantemente, as variáveis supracitadas serão manipuladas com um microcontrolador ESP32. O processo deve ser multivariável e terá como entradas as seguintes grandezas:

- Temperatura do ambiente (°C);
- Umidade relativa do ar (%).

Para a estabilização das variáveis de entrada, é necessário um exaustor para troca de ar com o ambiente externo, além de manipular a potência da fonte de calor. No ambiente simulado, as saídas definidas são:

- Velocidade de rotação da ventoinha (% PWM);
- Potência da Lâmpada de Filamento (% PWM).

Estrutura de Controle Final

A definição da estrutura de controle para o processo analisado é influenciada pela presença de perturbações externas. No presente trabalho não há como medir todos os distúrbios, mas foi possível obter a temperatura ambiente e a saturação da umidade.

Para projetar o controlador da planta foi utilizado o método de síntese direta com o complemento do método do lugar das raízes para calcular os termos do controlador PID.

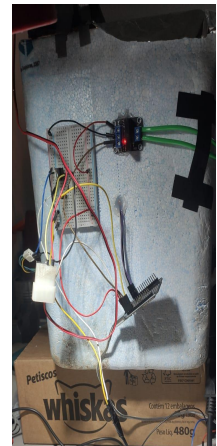
Além das informações dispostas nos relatórios anteriores, vê-se a necessidade de encontrar, também, a função de transferência do ventilador de computador, a qual será incorporada no modelo da planta. Para isso, será realizada a aquisição de dados após ligada a ventoinha no sistema com temperatura e umidade saturadas.

Ao final, o sistema completo é composto de duas malhas, de temperatura e umidade, acopladas.

Na abordagem para o projeto do controlador, percebeu-se que houve um equívoco no processo de medição das respostas relevantes para o sistema. Por isso, as funções de transferência devem ser novamente calculadas. Uma nova planta foi construída, melhorando falhas que foram percebidas durante o processo.

As alterações incluem uma ventoinha extra, um umidificador de ar mais potente e um duto para canalizar o ar umidificado. Além disso, foi substituída a utilização de papel ofício por papel alumínio devido ao grande aquecimento da planta, o que causou danos irreparáveis na caixa de isopor e no bocal da lâmpada de aquecimento. A umidade também foi um fator, pois o papel ofício absorve a umidade, o que acabou provocando sua degradação, tornando-o inutilizável para testes contínuos.

A planta final pode ser analisada nas imagens a seguir:



Imagens 1 e 2: Maquete da Sauna Construída *in locus*; circuito embarcado na maquete.



Imagens 3 e 4: Interior da Maquete com a Ventoinha Extra na parte superior; Ventoinha Lateral.

Foram feitas as seguintes medições:

- Resposta da umidade quando aplicado um degrau de 100% na potência da ventoinha Figura 2;
- Resposta da temperatura quando aplicado um degrau de 100% na potência da fonte de calor (lâmpada incandescente) - figura 3;
- Resposta da temperatura (saturada) quando aplicado um degrau de 100% na potência da ventoinha - figura 4;

- Resposta da umidade e temperatura quando aplicado um degrau de 100% na potência da ventoinha - figura 5;
- Resposta da umidade quando aplicado um degrau de 100% na potência da lâmpada - figura 6.

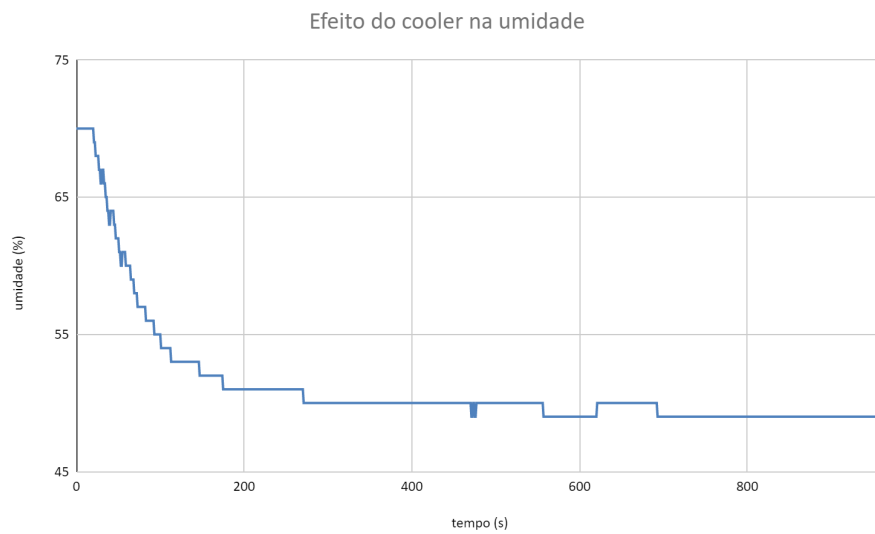


Figura 1: Comportamento da umidade quando aplicado um degrau de 100% na potência da ventoinha.

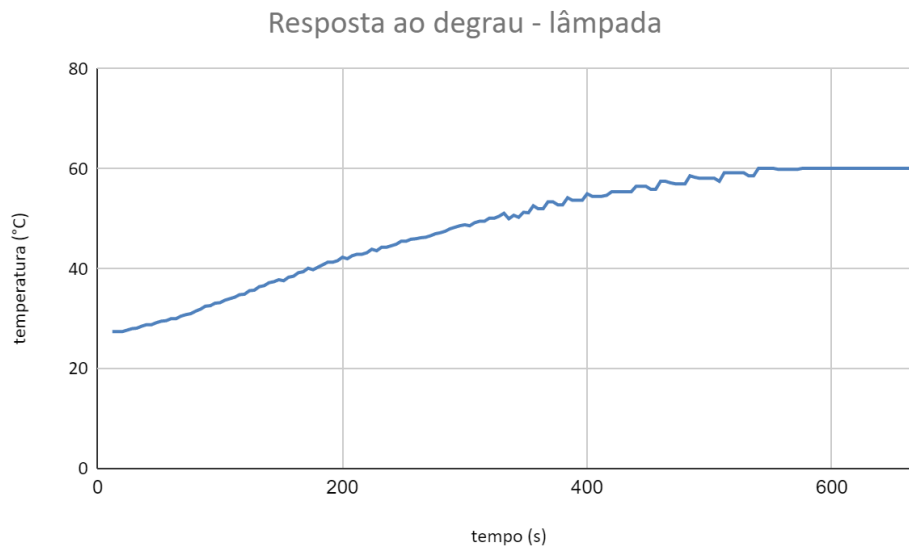


Figura 2: Comportamento da temperatura quando aplicado um degrau de 100% na potência da lâmpada.

Efeito da ventoinha na temperatura

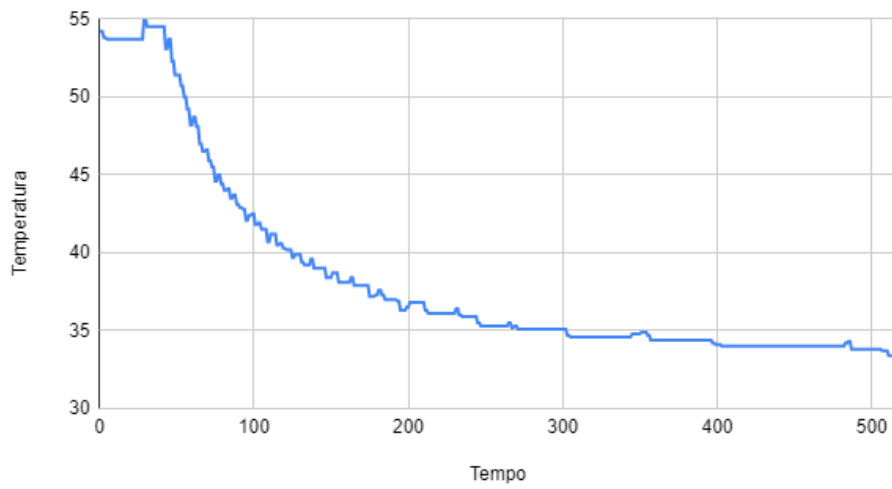


Figura 3: Comportamento da temperatura com a ação do cooler.

Resposta do sistema saturado à ação o cooler

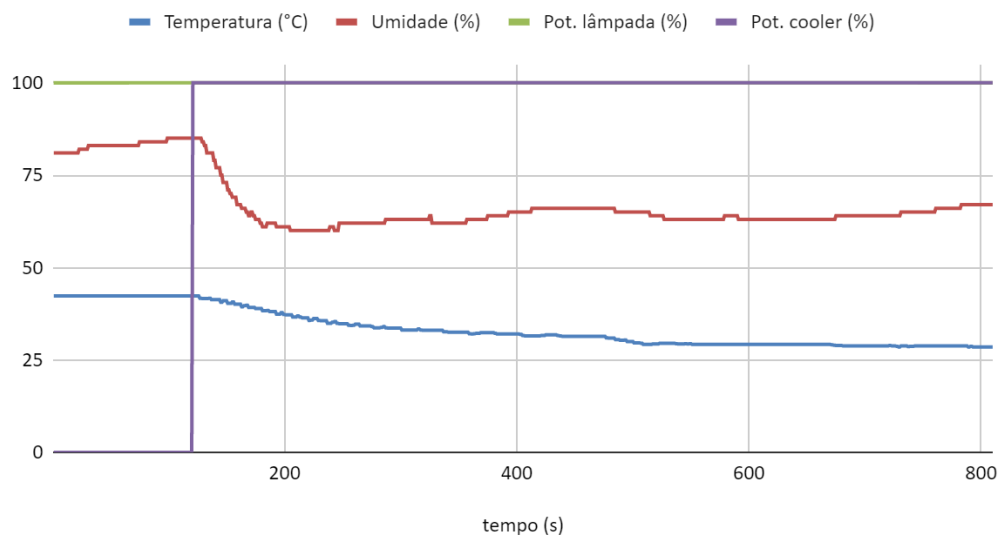


Figura 4: Visualização do efeito da aplicação da entrada de controle na ventoinha.

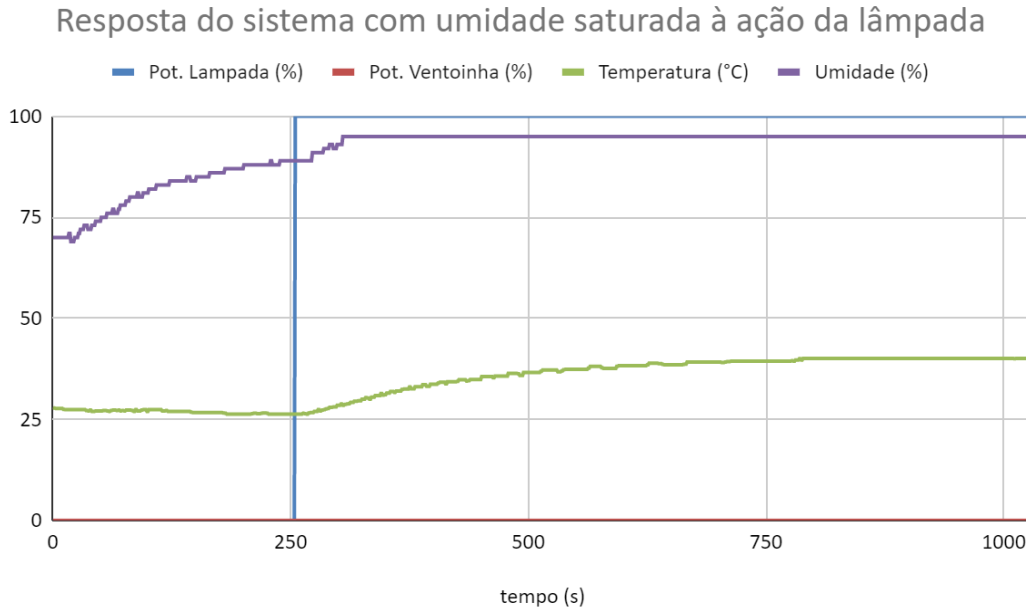


Figura 5: Visualização da ação da fonte de calor na umidade do sistema (não interfere).

Feitas as medições indicadas acima, as funções de transferência foram determinadas de forma empírica, analisando os resultados dessas medições e validando no Simulink. Assim, montando a estrutura abaixo, podemos visualizar o acoplamento das malhas.

$$\begin{pmatrix} Temperatura (s) \\ Umidade (s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{0.256}{37s+1} & \frac{0.207}{63s+1} \\ 0 & \frac{0.22}{29s+1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Pot. Lâmpada (W) \\ PWM Ventoinha (%) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 23.4 & 98 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Temp. Ambiente (°C) \\ Umidade Ambiente (%) \end{pmatrix}$$

Os coeficientes da matriz de perturbações G_d foram determinados a partir de medições realizadas antes de cada teste, feitas em ambiente controlado, e são respectivamente: temperatura ambiente e saturação da umidade com nenhuma ação de controle.

A Matriz de Ganhos Relativos, RGA, foi encontrada após os cálculos aplicados à matriz G, que multiplica as variáveis de entrada da planta.

$$RGA = \begin{pmatrix} 0.24 & 0.94 \\ -0.81 & 1 \end{pmatrix}$$

Desse cálculo, tira-se que o PWM da ventoinha é a entrada mais eficaz para realizar o controle de ambas saídas e que a potência da lâmpada não deve ser usada para o controle da umidade. Por isso, o PWM da ventoinha será usado para o controle da umidade e a potência da lâmpada para auxiliar no controle da temperatura (visto que o acoplamento evidenciado pelo cálculo foi baixo - isso deve-se ao fato de que para reduzir a temperatura apenas reduzindo a potência dissipada, não remove o calor do ambiente ativamente e dependeria apenas da dissipação passiva, como convecção, etc).

Controladores

O primeiro controlador, referente à malha de potência da lâmpada e temperatura da sauna, possui a função de transferência, calculada através do método de síntese direta:

$$G_{Aq}(s) = \frac{9.25s^2 + 3.95s + 0.1}{0.256s^2 + s}$$

O segundo controlador, referente à malha de percentagem do PWM de alimentação da ventoinha e da umidade relativa do ar ambiente, também calculada por meio do método de síntese direta, é:

$$G_{Um}(s) = \frac{5.8s^2 + 3.1s + 0.1}{0.22s^2 + s}$$

Com as medições e análises feitas, nota-se que não será necessária a implementação de um Preditor de Smith, visto que o atraso da planta é insignificante para a implementação deste surtir algum efeito expressivo.

Com o auxílio do *software Simulink*, foram realizadas as simulações da ação do controlador com as malhas desacopladas, como demonstrado na figura a seguir:

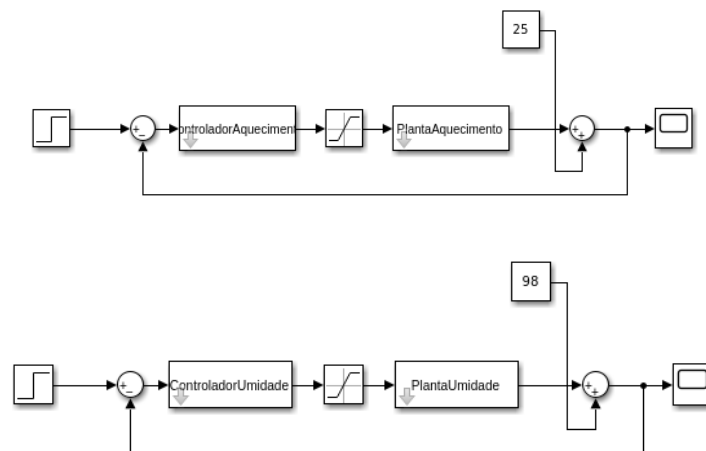


Figura 6: Diagrama de Bloco das Malhas Desacopladas Controladas.

Os códigos e modelos desenvolvidos para a realização dos cálculos e simulações podem ser encontrados no anexo fornecido, identificados como “SimulacaoControlador.slxc” e “VariaveisP4Grupo.m”.

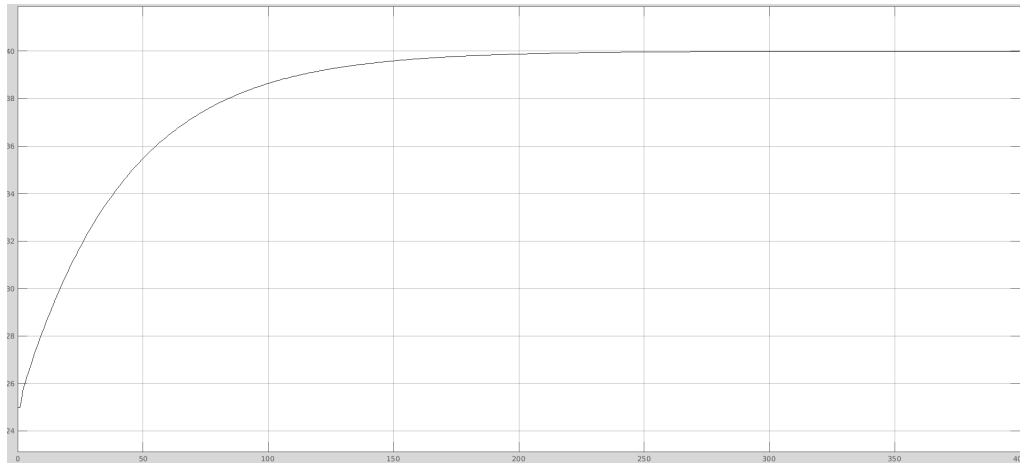


Figura 7: Resposta ao Degrau da Temperatura.



Figura 8: Resposta ao Degrau da Umidade.

Ao analisar a resposta ao degrau do sistema, os controladores aparentam estar de acordo com o esperado. Com a reformulação das funções de transferência, uma adaptação da estrutura de controle também foi feita. Portanto, será adicionado o *feedforward* entre as malhas acopladas, pois a ação da ventoinha afeta, além da umidade, a temperatura da planta. Foi utilizado um *feedforward* para que essa ação de resfriamento - quando a ventoinha é acionada - seja considerada e prevista no controle da planta de aquecimento. Assim, a nova simulação segue o

diagrama abaixo. Foram estipulados *setpoints* para umidade e temperatura desejadas e as respostas obtidas estão indicadas nas figuras 10 e 11.

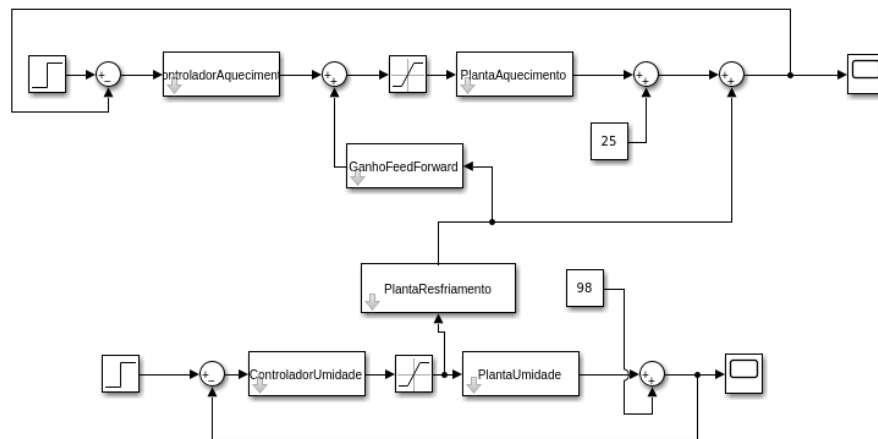


Figura 9: Diagrama do Sistema de Controle Completo.

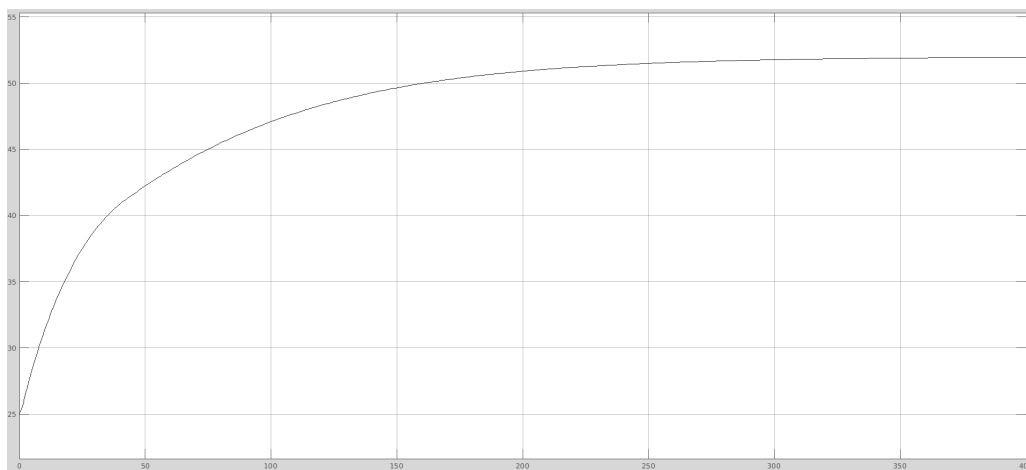


Figura 10: Resposta ao Degrau da Temperatura

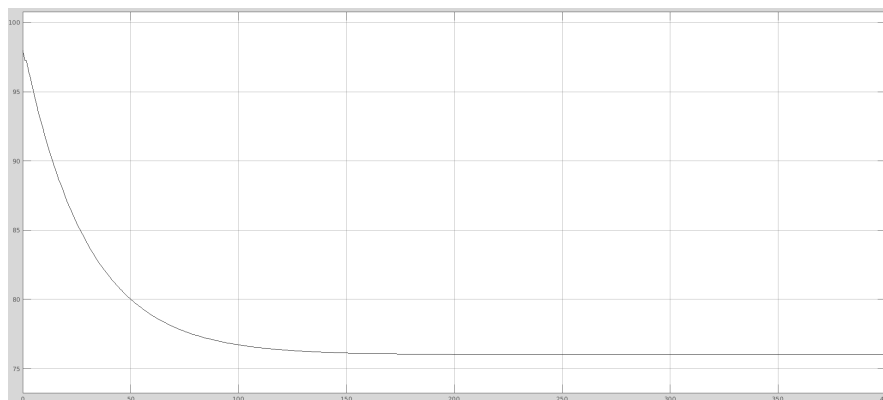


Figura 11: Resposta ao Degrau da Umidade

Por fim, foram realizados os testes com a planta in locus. Neste caso, os *setpoints* foram:

- Umidade: 70%
- Temperatura: 30°C

Os controladores foram implementados no MCU escolhido (ESP32) e o código pode ser visto no documento anexo a este relatório, identificado como “TPFinal.ino”. Os resultados podem ser vistos na figura abaixo:

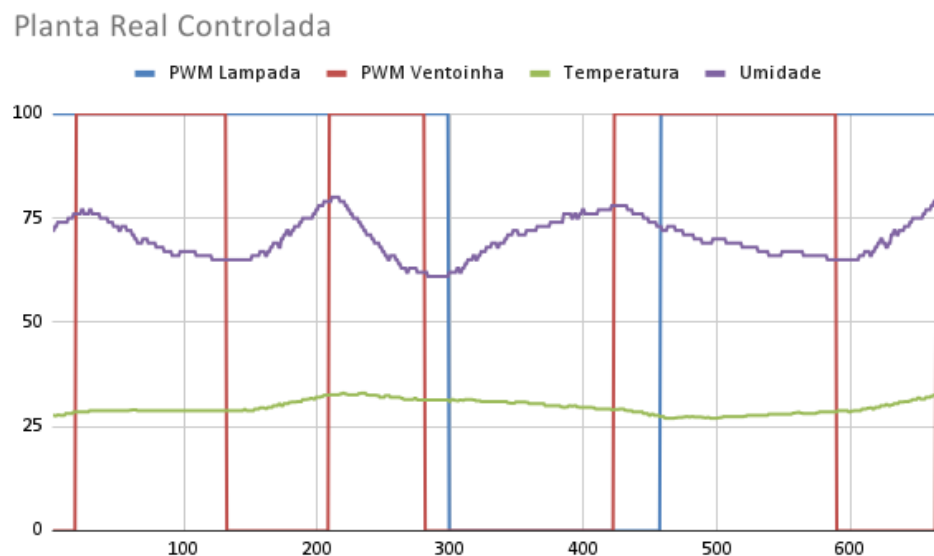


Figura 12: Saídas e entradas da planta Real Controlada

Conclusão

Pelas respostas obtidas na simulação da planta, pode-se concluir que o resultado foi satisfatório, o controlador rejeitou as perturbações e garantiu erro nulo no seguimento de referência em regime permanente no Simulink.

Com as malhas desacopladas, a resposta de cada malha atingiu os *setpoints* com exatidão. Porém, ao fazer o acoplamento, foram encontradas limitações físicas. Para a temperatura, o limite foi que a potência que a lâmpada é capaz de dissipar não é suficiente para reagir ao efeito que o fluxo de ar úmido tem de retirar calor do ambiente. Ou seja, acoplar as malhas resulta na redução da faixa de aplicação do controlador, pois mesmo que a saída de controle

fique saturada no nível máximo, a lâmpada não dissipa calor suficiente para aumentar a temperatura da caixa acima de 55°C quando o fluxo de ar úmido e frio é constante. Assim, o setpoint máximo para a configuração acoplada não deve exceder esse valor.

Nos testes *in locus* foi observado o mesmo comportamento das malhas acopladas no Simulink, ou seja, o setpoint máximo para a temperatura não pode exceder 55°C. Quando os setpoints obedecem a essa limitação, o desempenho do sistema é satisfatório e para o seguimento de referência, consegue manter os valores das saídas em torno dos setpoints especificados. Durante todos os testes, o umidificador - que tem intensidade variável - foi mantido constante em 25%.

Concluindo, pode-se considerar que o resultado deste trabalho foi um sucesso, considerando as limitações físicas dos componentes disponíveis.

Ao final deste trabalho, foram levantadas algumas hipóteses que poderiam melhorar e/ou complementar o projeto desenvolvido, são elas:

- Ter como entrada controlada a ação do umidificador, junto com as duas utilizadas neste trabalho, podendo regular o fluxo de ar umidificado para dentro da câmara;
- Revestimento interno completo da caixa de isopor com papel alumínio, permitindo o uso de uma fonte de calor mais potente;
- Utilizar uma configuração *push-pull* das ventoinhas, sendo uma delas posicionada no duto do umidificador. Dessa forma, o fluxo de ar pela planta seria melhorado, aumentando o efeito das ventoinhas no controle do sistema;
- Utilizar uma fonte mais potente para fornecer energia para as ventoinhas. A fonte disponível era ligeiramente subdimensionada para operar as duas em velocidade máxima.