

SIMULAÇÃO DE CONTROLE DE SISTEMA TÉRMICO: ESTUDO DE CASO DE UMA ESTUFA DE SECAGEM

Alison Terrim Dutra¹; Gerson Bessa Gibelli²

Discente do curso de Engenharia de Energia¹; Docente do curso de Engenharia de Energia²;
alison.ufgd@gmail.com¹; gersongibelli@ufgd.edu.br²;

RESUMO – Desde a revolução industrial até o presente momento, muito foi desenvolvido em termos de sistemas de controle, desde o mais simples (*On/Off*) até o mais sofisticado (PID). Este artigo tem como objetivo apresentar comparações entre os resultados obtidos por meio de ensaios reais de uma estufa de secagem e os resultados obtidos através de simulações utilizando o *Xcos-Scilab*, sendo que para a construção do modelo térmico foram utilizadas as variáveis descritas no ensaio real de controle *On/Off*. Os resultados levam em consideração o sistema de aquecimento da estufa *On/Off* sem histerese e com histerese.

Palavras-chave: Sistema térmico. Controle *On/Off*. *Scilab*. *Xcos*.

ABSTRACT – Since the industrial revolution until the present moment, much has been developed in terms of control systems, from the simplest (*On/Off*) to the most sophisticated (PID). This article aims to present comparisons between the results obtained through real tests of a drying oven and the results obtained through simulations using *Xcos-Scilab*, considering that for the construction of the thermal model the variables described in the real test were used *On/Off* control. The results take into account the *On/Off* drying oven heating system without hysteresis and with hysteresis.

Keywords: Thermal system. *On/Off* control. *Scilab*. *Xcos*.

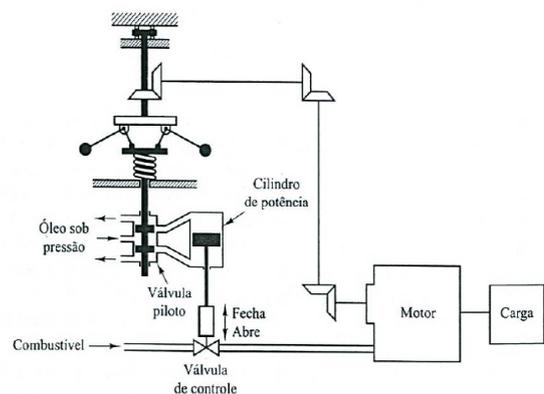
1 INTRODUÇÃO

Não é possível imaginar a sociedade moderna sem os sistemas de controle. O acionamento de foguetes, peças metálicas sendo usinadas automaticamente e entre outros tantos exemplos podem ser listados como sistemas de controle. Mas não são somente nessas aplicações idealizadas pelo homem que se encontram os sistemas controlados automaticamente. A própria natureza possui inúmeros modelos de controle automático, como o corpo humano, que possui, por exemplo, o pâncreas, responsável por regular o nível de açúcar no sangue (NISE, 2013).

O primeiro trabalho significativo de controle automático surge exatamente durante o marco zero da revolução industrial, no século XVIII, no qual James Watt projeta um regulador centrífugo para controlar a velocidade de uma máquina a vapor conforme apresentado na Figura 1 o esquema de um sistema de controle de velocidade. Já em 1922, Minorsky desenvolveu trabalhos de controles automáticos para pilotagem de embarcações. Dez anos mais tarde, Nyquist desenvolve um sistema não muito complexo, para determinar a estabilidade de sistemas de malha fechada e Hazen em 1934, dá partida aos trabalhos com servomecanismos. Na década de 1940, métodos de resposta em frequência, principalmente baseados no

diagrama de Bode, possibilitaram projetos de controle linear de malha fechada que satisfaziam o desempenho almejado. Muitos desses sistemas utilizavam controladores PID (*Proporcional, Integral, Derivativo*) para controle de pressão, temperatura e entre outros (OGATA, 2010).

Figura 1. Sistema de controle de velocidade.



Fonte: (Ogata, 2010).

Segundo Nise (2013), na contemporaneidade, os sistemas de controles automáticos possuem um vasto campo de aplicações, como no caso de navios que utilizam componentes elétricos, hidráulicos e mecânicos que em resposta ao rumo desejado, geram comandos de leme. Nos controles de processos também se encontram aplicações como controles de nível de líquidos, dosagem de produtos químicos em tanques, etc.

Pensando neste contexto de controle automático, que é intrínseco ao cotidiano da humanidade, será apresentado neste

trabalho, a comparação dos resultados obtidos pela simulação do controle de sistema térmico por meio da interface Xcos-Scilab e o trabalho desenvolvido por Petinari (2018) de um controle *On/Off* (liga/desliga) da estufa de secagem.

1.1 SISTEMA TÉRMICO E CONTROLE

Segundo Moran *et al.* (2005), os sistemas térmicos são relacionados com o armazenamento, conversão e transferência de energia, possuindo diversas aplicabilidades.

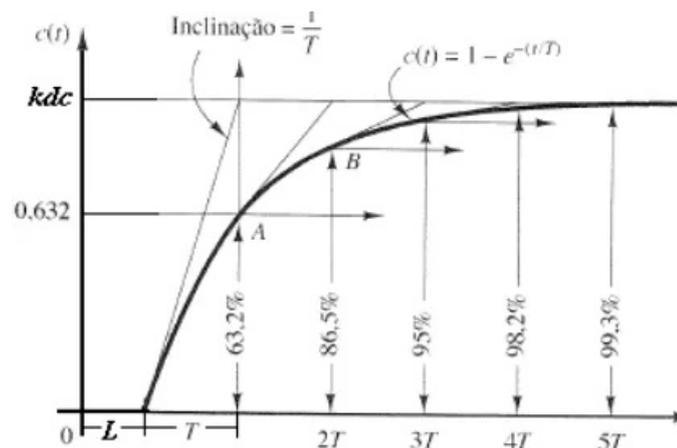
Ogata (2010), acrescenta que os sistemas térmicos são aqueles que de uma substância para outra ocorre uma transferência de calor, sendo que essa transferência se dá de três formas elementares: condução, convecção e

radiação. Em controle, um sistema térmico é considerado um sistema de primeira ordem, na qual a relação entre entrada e saída é definido através da Equação 1.1.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts+1} \quad (1.1)$$

De modo que $R(s)$ diz respeito a entrada do sistema, $C(s)$ a saída e T_s é a constante de tempo, cuja a função é apresentar com que velocidade o sistema analisado responderá a uma entrada. Desta forma, quando aplicado um sinal na entrada do sistema, o resultado será uma curva exponencial, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2. Curva de resposta de um sistema de primeira ordem.



Fonte: (OGATA, 2010).

1.2 ESTUFA DE SECAGEM

De acordo com Cardoso (2017), uma estufa de secagem é utilizada, como o

próprio nome sugere, para a secagem de algum produto, como por exemplo, madeira. Uma estufa é composta basicamente por um

sistema de controle que tem como finalidade regular a temperatura requerida em seu interior.

A Figura 3 apresenta a estufa de secagem utilizada no trabalho desenvolvido por Petinari (2018), sendo desenvolvido um sistema de controle *On/Off* por meio do microcontrolador arduino. O sistema foi analisado, levando-se em consideração duas lógicas: com a histerese e outra por meio de uma lógica melhorada, que se mostrou mais estável, com erro inferior a 5%.

Figura 3. Estufa de secagem - Nova Ética.



Fonte: (PETINARI, 2018).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A função de transferência pode ser representada utilizando diagramas de blocos, conforme exemplo da Figura 4, com saída definida como $c(t)$ e entrada definida como $r(t)$ e a função de transferência no interior, representando o sistema (NISE, 2013).

Figura 4. Diagrama de blocos de um sistema.



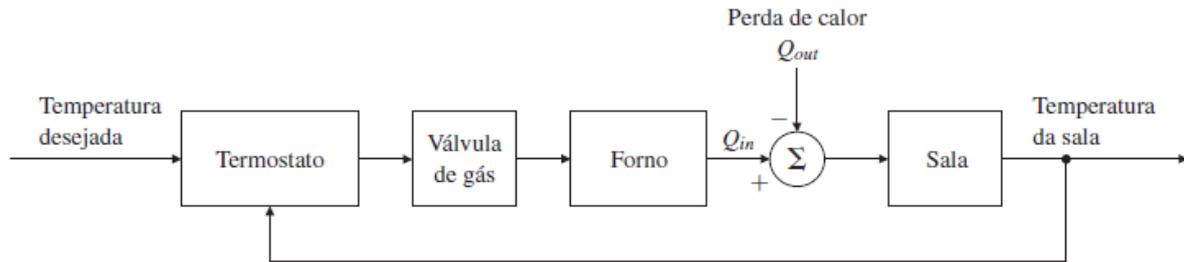
Fonte: (NISE, 2013).

2.1 CONTROLE DE MALHA ABERTA E FECHADA

De acordo com Ogata (2010), em controle, podem ser considerados dois tipos de malha: aberta e fechada. Na malha aberta não existe a presença de um compensador (como controladores PID e outros) em função da variável de saída, isto é, sem realimentação.

Já em malha fechada acontece uma comparação entre a variável controlada (como pressão, temperatura, vazão, etc) e a variável de referência (*setpoint*), gerando um valor de erro para compensar o sinal da saída.

Como exemplo prático, pode-se referenciar a malha na Figura 5, que mostra o sistema de aquecimento do forno, onde a temperatura está sendo constantemente mensurada pelo sensor conectado ao microcontrolador, ou seja, é a realimentação do sistema.

Figura 5. Diagrama de blocos em malha fechada.

Fonte: (FRANKLIN *et al.*, 2013).

2.2 SISTEMA DE PRIMEIRA ORDEM

Para Aguirre (2004) *apud* Melo (2007) deve ser considerado para a representação de um sistema térmico de 1ª ordem, a Equação 2.1:

$$H(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (2.1)$$

Sendo que:

K : representa o ganho do sistema; e

τ : representa a constante de tempo.

Já o ganho K , Melo (2007) é definido pela Equação 2.2 como:

$$K = \frac{y(\infty) - y(0)}{A} \quad (2.2)$$

Sendo que:

$y(\infty)$: representa a temperatura em regime permanente;

$y(0)$: representa a temperatura inicial; e

A : representa a amplitude do sistema.

A temperatura no instante dado pela constante de tempo τ do sistema é estabelecida conforme a Equação 2.3:

$$y(\tau) = 0,632 * (y(\infty) - y(0)) + y(0) \quad (2.3)$$

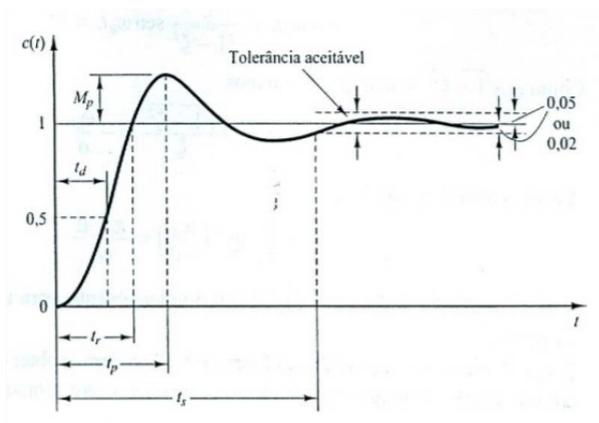
Segundo Melo (2007), o valor de 0,632 diz respeito ao tempo que o sistema leva para atingir 63,2 % da variação total do degrau aplicado em sua entrada.

Uma estufa tende a demorar um determinado período para alcançar a temperatura que se deseja, dessa forma é importante conhecer a resposta transitória do sistema a um degrau unitário, sendo que essa resposta depende da entrada do sistema. Assim, para se conhecer a resposta transitória, é utilizado o sistema em repouso como premissa, isto é, com todas as suas variáveis de saída e respectivas derivadas iguais à zero. A observação da resposta transitória permite identificar algumas características que explicam o comportamento do sistema até que ele alcance o regime permanente, ou seja,

período em que teoricamente não haverá oscilações (OGATA, 2010).

Ainda para Ogata (2010), a primeira característica que deve ser analisada é o tempo de subida (t_r), que nada mais é que o período que a resposta leva para atingir seu valor final. Sabendo que o sistema não é completamente estável, tem-se um sobressinal (M_p) que indica em porcentagem o quanto a resposta ultrapassou seu valor final. Já o tempo de duração desse sobressinal é o chamado tempo de pico (t_p). O tempo de acomodação (t_s), corresponde ao período para que o sistema se estabilize e entre em regime permanente. Conforme apresentado na Figura 6, a resposta em regime permanente pode variar de 2 % a 5 %.

Figura 6. Resposta em degrau unitário.



Fonte: (OGATA, 2010).

De acordo com Tillmann *et al.* (1998), as estufas precisam ser avaliadas quanto a estabilidade de temperatura, ventilação, taxa de fluxo de ar, o tempo para a recuperação

da temperatura quando inseridas as amostras, etc.

2.3 TIPOS DE CONTROLES

Os tipos de controle de processo amplamente difundidos em sistemas de controle são: *On/Off* e PID (Proporcional, Integrativo e Derivativo). O sistema *On/Off* é o mais simples, sendo que a premissa desse sistema se baseia no acionamento ou não dos atuadores a depender da resposta do sinal (duas lógicas são assumidas: 1, o sistema está acionado ou 0, o sistema está desligado). Exemplificando, quando a variável a ser controlada possui um *setpoint* e ele encontra-se abaixo, o sistema é acionado e quando o valor controlado se encontra acima do *setpoint*, o sistema é desligado (MARIANO *et al.*, 2013).

Já os controles PID consistem na aplicação ao sistema de um sinal de excitação proporcional ao erro, mais a função derivativa deste, além de sua função integral, fornecendo resposta rápida e baixo erro de regime permanente.

2.4 PROPRIEDADES TÉRMICAS

Diferentemente do regime permanente, onde não ocorre variação das propriedades do fluido ao longo do tempo, no regime transiente ocorreram variações no decorrer do tempo. No caso do estudo em questão, o ar presente na estufa sofrerá

mudanças de temperatura ao longo do tempo que, por exemplo, influenciará em sua densidade.

Como já mencionado, a temperatura é uma variável que está sendo controlada dentro de uma estufa de secagem. A temperatura é uma grandeza escalar que traduz o grau de agitação das partículas dentro de um sistema. No caso de uma estufa vazia que contém somente ar, quanto mais quente, mais desordem molecular existirá e conseqüentemente maior será a temperatura.

Como fonte de calor, a estufa estudada utiliza resistência elétrica blindada e aletada, que converte a energia elétrica em energia térmica por meio do efeito Joule.

Atkins (2011), vai além, definindo outra propriedade térmica importante por meio da Equação 2.4 sendo a capacidade térmica (C), que nada mais é do que a quantidade de energia necessária que um corpo precisa liberar ou absorver para que possa variar sua temperatura.

$$C = \frac{q}{\Delta T} = \frac{J}{K} \quad (2.4)$$

Onde,

q , a quantidade de energia absorvida ou rejeitada (J: Joule);

ΔT , a variação de temperatura (K: Kelvin).

Por fim, a condutância térmica do material (G) representada pela Equação 2.5 está relacionada com a característica do meio onde ocorrerá a taxa de transferência de calor (Lei de *Fourier*, aplicada à condução de calor). No caso de uma estufa, o isolamento apropriado, vai reduzir ao mínimo a taxa de transferência de calor para o ambiente.

$$G = \frac{Q}{\Delta T} = \frac{W}{K} \quad (2.5)$$

Sendo,

Q , é a taxa de transferência de calor por condução (W: Watts);

ΔT , é a variação de temperatura (K: Kelvin).

3 METODOLOGIA

Como ferramenta computacional utilizada para a elaboração das simulações que serão apresentadas, foi utilizado a plataforma *open source Scilab* versão 5.5.2, sendo um programa de computação científica e visualização, inteiramente gratuito, com código fonte aberto no qual apresenta soluções de problemas numéricos em uma fração de tempo, em razão de suas centenas de funções matemáticas (CAMPOS FILHO, 2010).

O *Scilab* foi lançado em 1994 e desde então tem registrado mais de 100 mil downloads todos os meses ao redor no

mundo. Na Figura 7 é possível visualizar o console do *Scilab* versão 5.5.2, no qual podem ser inseridos os comandos e gerados as respostas numéricas e gráficas.

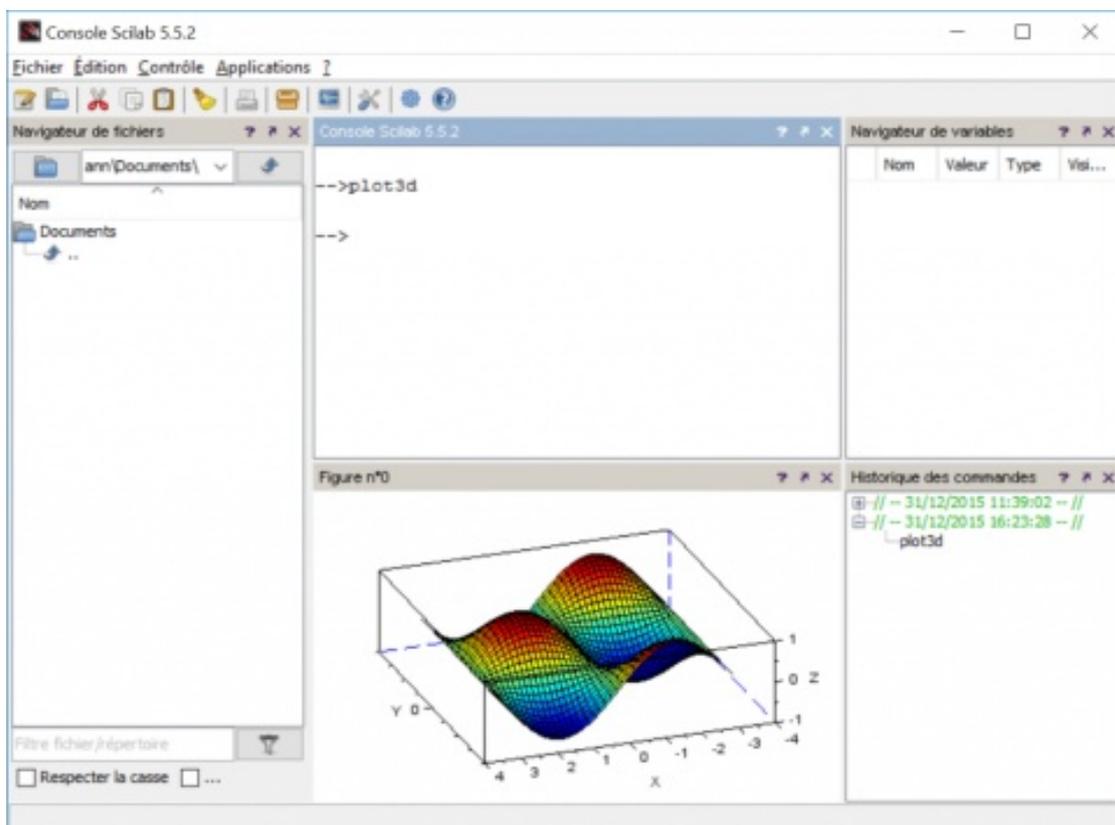
3.1 XCOS - SCILAB

A plataforma do *Scilab* possui uma ferramenta denominada *Xcos* (conforme mostrado no exemplo da Figura 8), sendo este um ambiente de simulação gráfica que permite a simulação de sistemas dinâmicos tanto contínuos quanto discretos. A versão utilizada para o *Scilab-Xcos* foi a 5.5.2.

Ao abrir o programa de simulação *Scilab*, será possível notar uma série de **Figura 7. Console do *Scilab*.**

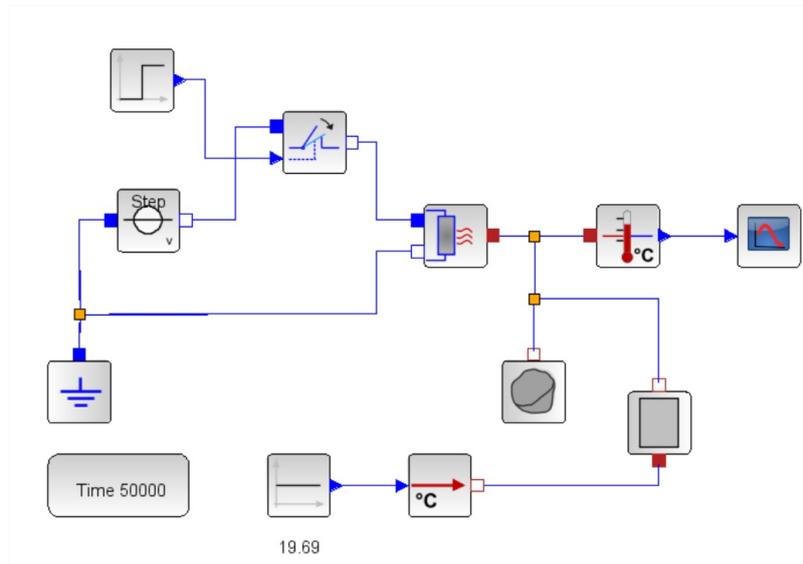
ícones presentes no canto superior direito da tela, conforme apresentado nas Figuras 7 e 9.

Dessa forma, para que seja possível realizar as simulações, faz-se necessário a abertura dessa interface efetuando dois cliques sobre o ícone identificado. Também é possível abrir a interface, escrevendo no *prompt* de comando *Xcos* seguido de um *enter*.



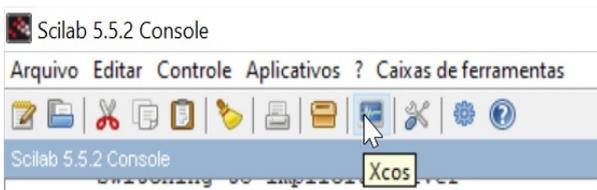
Fonte: (SCILAB, 2023).

Figura 8. Modelo de simulação gráfica: Xcos.



Fonte: Próprio autor.

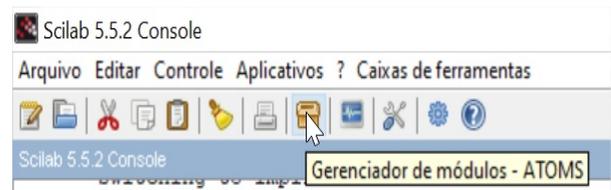
Figura 9. Ícone para abrir o Xcos.



Fonte: (SCILAB, 2023).

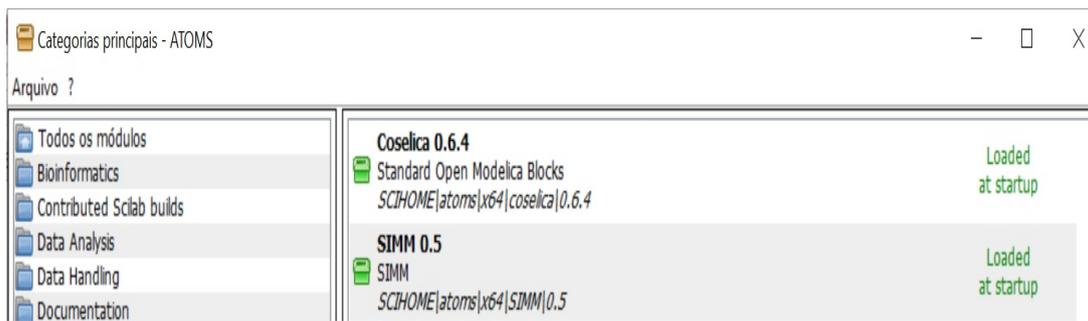
Dentro do *Scilab* é possível buscar no gerenciador de módulos (*ATOMS*) um conjunto de blocos desenvolvidos para áreas/problemas específicos (Figura 10), assim é imprescindível que seja acessado o *ATOMS* para que seja realizado o *download* dos módulos necessários ao desenvolvimento das simulações.

Figura 10. Gerenciador de módulos - *ATOMS*



Fonte: (SCILAB, 2023).

Para a simulação do sistema térmico de primeira ordem, de uma estufa de secagem para controle de temperatura, foram necessários baixar no gerenciador *ATOMS*, os módulos *Coselica* (versão 0.6.4) e *SIMM* (versão 0.5) apresentados na Figura 11, como orientado em modelo de sistema semelhante elaborado pela *Scilab Enterprises*.

Figura 11. Módulos para sistema térmico.

Fonte: (SCILAB, 2023).

3.2 CONDIÇÕES DO MODELO

Para simular o comportamento térmico que foi apresentado por Petinari (2018), foram coletadas algumas informações apresentadas nos ensaios e introduzidas nos blocos do modelo, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Principais informações utilizadas.

Modelo estufa – (Nova Ética)	400/4ND
Tensão corrente alternada – (Vca)	220 Vca
Potência da resistência blindada e aletada – (W)	1580 W
Temperatura Inicial em Celsius – (°C)	19,69 °C
Temperatura máxima em Celsius – (°C)	414,65 °C
Temperatura em função da constante de tempo da estufa – (t)	269,27 °C
Tempo correspondente a temperatura $y(t)$ - (s)	2291 segundos

Fonte: Próprio autor.

Segundo Petinari (2018), não houve mudanças significativas nos ensaios com o recirculador de ar ligado e desligado, dessa forma, no modelo não será considerado a interferência do recirculador de ar.

Com base na Equação 3.1, a Capacidade Térmica (C) do sistema modelado foi definida, como:

$$C = \frac{1580 * 2291}{(542,42 - 292,84)} = 14.503,48 \frac{J}{K} \quad (3.1)$$

Isto quer dizer que para variar 1 Kelvin no interior da estufa são necessários adicionar ao sistema 14,5 quilojoules.

Já a condição que se refere a isolamento do sistema, a condutância térmica do material (G) é calculada com base na Equação 3.2.

$$G = \frac{1580}{687,8 - 292,84} = 4,0 \frac{W}{K} \quad (3.2)$$

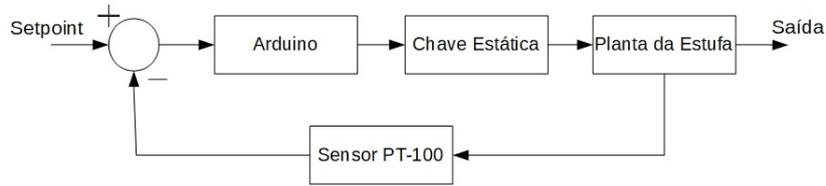
Esses resultados que representam condições importantes do sistema térmico também foram informados aos respectivos blocos.

3.3 MODELO TÉRMICO DE UMA ESTUFA

O modelo *On/Off* de uma estufa de secagem no Xcos foi baseado no conceito

fundamental do sistema, esboçado no diagrama de blocos, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12. Diagrama de blocos do sistema.



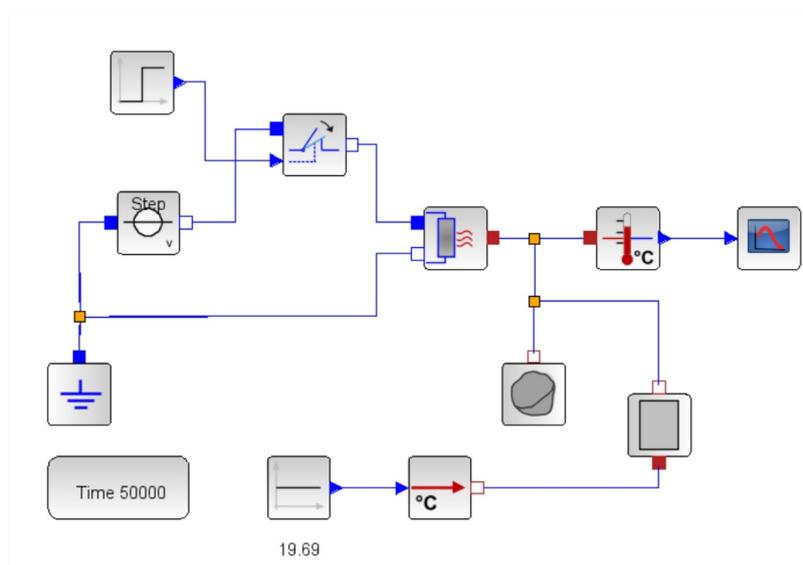
Fonte: (PETINARI, 2018).

Neste trabalho não está representado nos modelos de blocos os ruídos anotados no trabalho elaborado por Petinari (2018).

Foram construídos dois modelos térmicos da estufa de secagem, sendo um sem realimentação (malha aberta – Figura

13) e outro com realimentação (malha fechada com histerese – Figura 14).

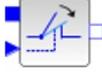
Figura 13. Modelo térmico estufa sem realimentação.



Fonte: Próprio autor.

Os principais blocos utilizados no modelo apresentado na Figura 13, estão apresentados nas Tabelas 2 e 3 a seguir.

Tabela 2. Blocos utilizados no modelo térmico.

MBS_Step (Degrau unitário)		height [-] : Height of step <input type="text" value="1"/> offset [-] : Offset of output signal <input type="text" value="0"/> startTime [s] : Output = offset for time < startTime <input type="text" value="0"/>
MEAI_IdealClosingSwitch (Chave estática)		Ron [Ohm] : Closed switch resistance <input type="text" value="0.00001"/> Goff [S] : Opened switch conductance <input type="text" value="0.00001"/>
MEAS_StepVoltage (Fonte de tensão)		V [V] : Height of step <input type="text" value="220"/> offset [V] : Voltage offset <input type="text" value="0"/> startTime [s] : Time offset <input type="text" value="0"/>
MEAB_Ground (aterramento)		-
IREP_TEMP (duração da simulação)		Durée de la simulation <input type="text" value="15000"/> Nombre de points <input type="text" value="150000"/> Grille affichée (1 oui, 0 non) <input type="text" value="1"/> Affichage des courbes pendant la simulation (1 oui, 0 non) <input type="text" value="0"/>
ISCOPE (gráfico)		Number of superposed curves <input type="text" value="1"/> Tamanho do buffer <input type="text" value="200"/>
MBS_Constant (valor constante)		k [-] : Constant output value <input type="text" value="19.69"/>

Fonte: Próprio autor.

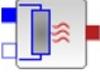
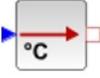
Os blocos da Tabela 2 representam as condições de controle como resposta ao degrau unitário e temperatura inicial do modelo. Também são encontrados os blocos que representam a fonte de tensão (fornecedora de energia ao resistor) e a chave estática (que estabelece ou interrompe a corrente elétrica fornecida ao resistor). Além disso, foram utilizados blocos gráficos responsáveis por gerar o comportamento ao longo do tempo, bem como o bloco que delimita o tempo para simulação.

Na Tabela 3, os blocos representam o comportamento térmico do sistema, uma vez que podem ser notados o bloco que modela a resistência térmica da estufa, a capacidade térmica do sistema e a condutância térmica.

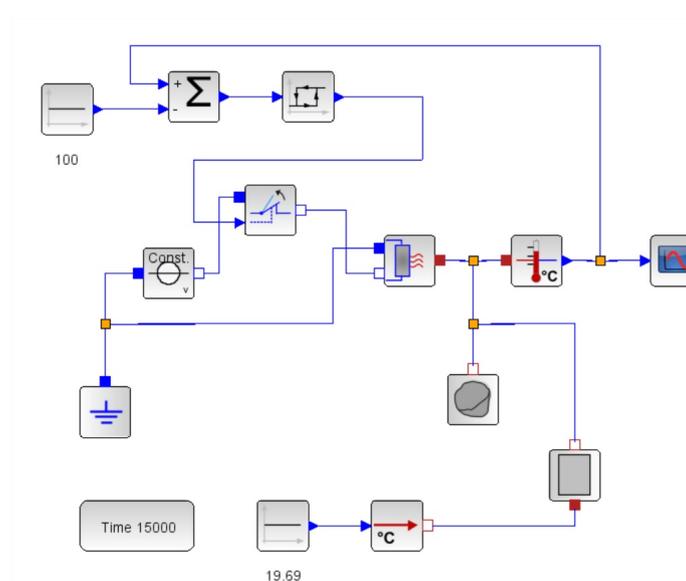
Alguns blocos representam a conversão de temperatura e o sensor de temperatura.

Os blocos adicionados ao modelo térmico da estufa de secagem com realimentação, apresentados na Figura 14 e na Tabela 4, contém o bloco de comparação, sendo este responsável por comparar o valor atual de temperatura da estufa, a partir do sinal enviado pelo sensor de temperatura, com o *setpoint* definido para o sistema, que no caso é um bloco de temperatura constante. Além disso, o bloco de histerese representa a variação da temperatura ao longo do tempo em torno do *setpoint*.

Tabela 3. Blocos utilizados no modelo térmico.

MEAB_HeatingResistor (Resistência)		R_ref [Ohm] : Resistance at temperature T_ref <input type="text" value="30.63"/> T_ref [K] : Reference temperature <input type="text" value="373.13"/> alpha [1/K] : Temperature coefficient of resistance <input type="text" value="0"/>
TH_HeatCapacitor (Capacidade térmica)		C [J/K] : Heat capacity of part (= cp*m) <input type="text" value="14503.48"/> steadyStateStart [:] : true, if component shall start in steady state <input type="text" value="0"/> T_start [K] : Initial temperature of part (in Kelvin) <input type="text" value="292.84"/>
MTH_ThermalConductor (Condutância térmica do material)		G [W/K] : Constant thermal conductance of material <input type="text" value="4"/>
MTHC_TemperatureSensor (sensor de temperatura)		-
MTHC_PrescribedTemperatu (conversor Celsius para Kelvin)		-

Fonte: Próprio autor.

Figura 14. Modelo térmico estufa com realimentação.

Fonte: Próprio autor.

O modelo de bloco histerese disponível para sistemas contínuos na biblioteca utilizada, permite definir um valor para que o sistema continue a aquecer além do *setpoint*. Após atingir esse valor o sistema abre a chave e interrompe o

aquecimento até que a temperatura atinja o *setpoint* definido. Essa variação ocorre de forma permanente no tempo desde que o sistema esteja acionado.

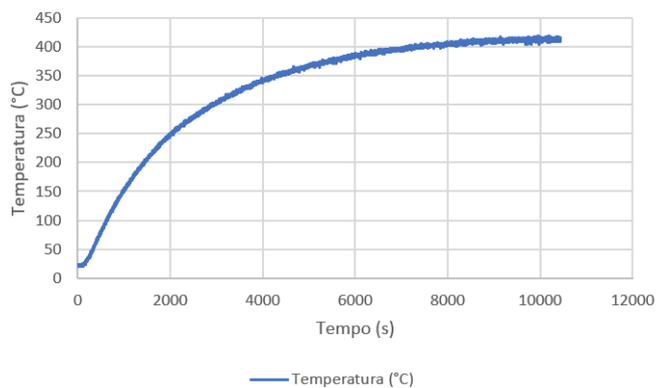
Tabela 4. Blocos utilizados no modelo térmico.

CBN_Hysteresis (histerese do sistema)		uOn [-] : Switch on when $u \geq u_{On}$ <input type="text" value="2.5"/> uOff [-] : Switch off when $u \leq u_{Off}$ <input type="text" value="-2.5"/> yOn [-] : Output when switched on <input type="text" value="1"/> yOff [-] : Output when switched off <input type="text" value="0"/> y_start [-] : Start value of output <input type="text" value="0"/>
MBM_Add ()		k1 [-] : Gain of upper input <input type="text" value="1"/> k2 [-] : Gain of lower input <input type="text" value="-1"/>
MBS_Constant (setpoint)	 100	k [-] : Constant output value <input type="text" value="100"/>

Fonte: Próprio autor.

4 RESULTADOS

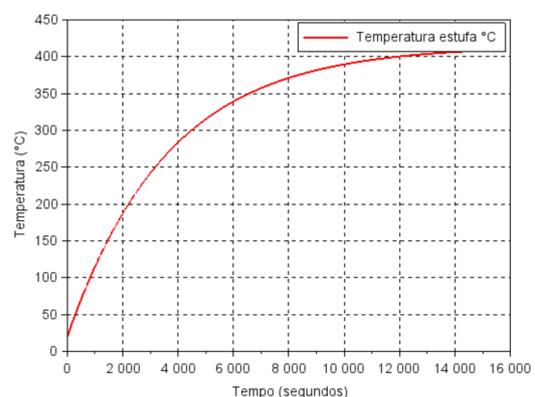
O ensaio real de aquecimento da estufa de secagem realizado por Petinari (2018), apresentou a curva típica para um sistema de primeira ordem (Figura 15).

Figura 15. Ensaio de aquecimento (Real).

Fonte: (PETINARI, 2018).

Para o ensaio de resfriamento apresentado na Figura 17, foi elaborado por Petinari (2018) através de um aquecimento programado até 300 °C e após desligar o sistema, a curva de temperatura ao longo do tempo foi reduzindo até o equilíbrio térmico do sistema com o ambiente.

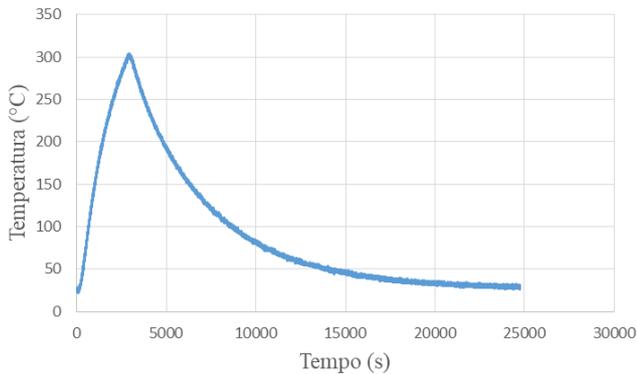
A Figura 16 apresenta a curva do modelo térmico da estufa no Xcos, sendo possível observar uma semelhança entre a curva do modelo no Xcos em relação ao ensaio real.

Figura 16. Modelo de aquecimento (Xcos).

Fonte: Próprio autor.

No modelo computacional (Xcos), a curva de resfriamento obteve um comportamento semelhante ao ensaio real, conforme apresentado na Figura 18.

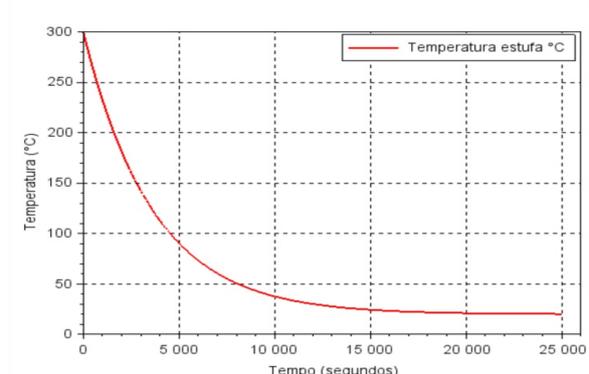
Figura 17. Modelo resfriamento (Real).



Fonte: (PETINARI, 2018)

Analisando o sistema com a realimentação, ou seja, quando o sinal de temperatura da estufa é comparado com o *setpoint* de temperatura do sistema, surge a histerese (variação da temperatura ao longo

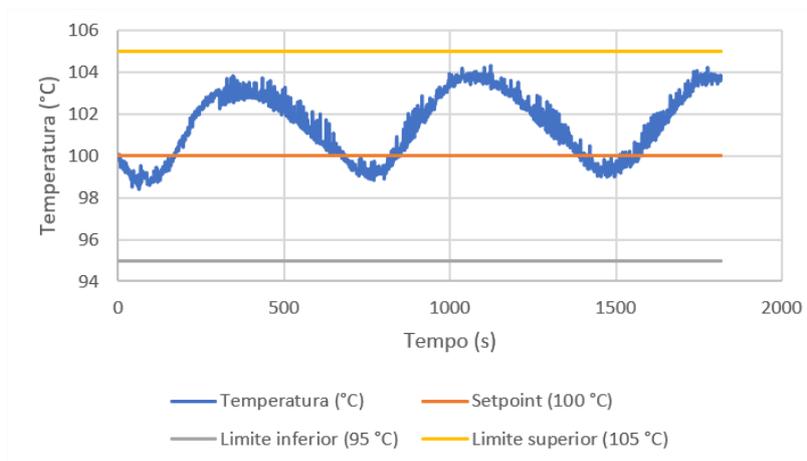
Figura 18. Modelo resfriamento (Xcos).



Fonte: Próprio autor.

do tempo em torno do *setpoint* de temperatura), conforme apresentado na Figura 19 em um dos ensaios com histerese por Petinari (2018).

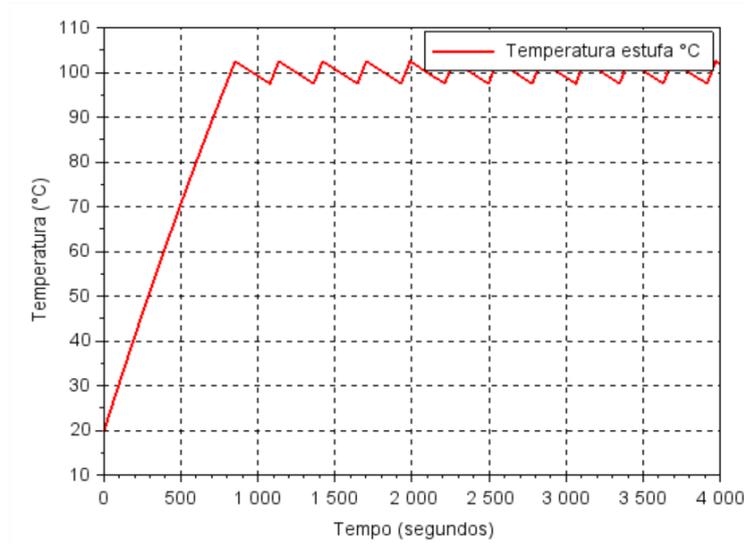
Figura 19. Curva de Temperatura com *Setpoint* a 100 °C.



Fonte: (PETINARI, 2018)

O modelo térmico da estufa no Xcos contendo o sistema com histerese apresentou comportamento oscilante entre as temperaturas máxima e mínima durante o tempo da simulação, demonstrando que o

modelo computacional está funcionando corretamente (Figura 20).

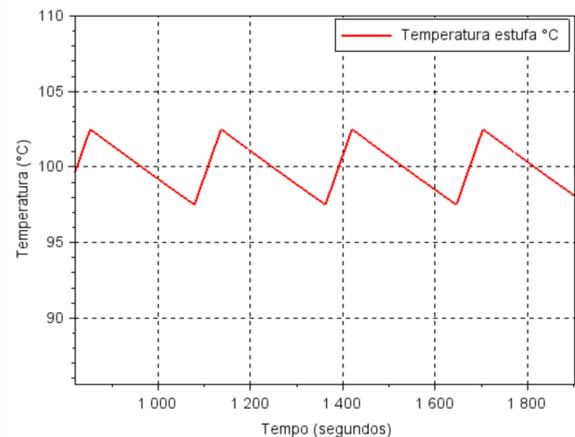
Figura 20. Curva de Temperatura com aquecimento e *setpoint* a 100 °C (Xcos).

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 21 destaca-se o comportamento do sistema, após entrar em regime o processo *On/Off* que se estabelece em torno de uma histerese de 2,5 °C, sendo que a chave estática fornece corrente a resistência enquanto o sinal de realimentação informa que a temperatura é maior ou igual a 100 °C e menor ou igual a 102,5 °C. Esse processo permanece constante ao longo do tempo, desde que não se altere as condições especificadas no modelo.

Observa-se que em todos os resultados obtidos via modelo Xcos, tanto sem a realimentação quanto com a realimentação, o tempo de resposta para aquecer, resfriar e manter a temperatura em torno de uma temperatura específica (100 °C) apesar de seguir o comportamento do sistema, não apresentou o mesmo tempo a resposta em relação ao que se observou nos ensaios reais, sendo possível que essa

diferença esteja atrelada a inércia térmica do sistema.

Figura 21. Curva de Temperatura com aquecimento e *setpoint* a 100 °C com histerese 2,5 °C.

Fonte: Próprio autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados simulados utilizando a ferramenta *Xcos* do *Scilab* 5.5.2, comparado com os ensaios reais de uma estufa de secagem seguiu o mesmo comportamento, apesar dos tempos de respostas serem diferentes entre os modelos e os ensaios reais, uma vez que a inercia térmica do sistema real não foi assimilada pelos dois modelos desenvolvidos (com e sem histerese).

Além disso, incertezas oriundas do experimento realizado por Petinari (2018), podem ter levado a erros nos cálculos dos parâmetros de capacidade térmica e condutância térmica, variáveis importantes para determinar respostas semelhantes ao ensaio real.

Desta forma, para trabalhos futuros, a condição de inércia térmica ou até mesmo a possibilidade de revisar os cálculos de capacidade térmica e condutância térmica podem favorecer a redução das divergências relacionadas a velocidade das respostas.

REFERÊNCIAS

- ATKINS, P.; PAULA, J. **Físico-Química: fundamentos**. 5ª ed. Rio de Janeiro. 2011.
- CAMPOS FILHO, Frederico F. **Fundamentos de SCILAB**. Belo Horizonte: Departamento de Ciências da Computação do ICEX, 2010.
- CARDOSO, Gabryel Fagundes. **Programação de um CLP para Controle de uma Estufa de Secagem de Madeiras**. Lages (SC), 2017. REPOSITÓRIO DE RELATÓRIOS - Engenharia Elétrica, n. 1, 2017.
- FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D. EMAMI-NAEINI, A. **Sistemas de Controle para Engenharia**. 6ª ed. Porto Alegre, Bookman, 2013.
- MARIANO, Daniel Teodoro Gonçalves *et al.* **Desenvolvimento de um sistema de controle em malha fechada para um braço robótico do tipo puma**. 2013.
- MELO, Marcelo Marques. **Modelagem de uma Estufa Térmica**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Viçosa - MG, 2007.
- MORAN, *et al.* **Introdução à Engenharia de Sistemas Térmicos: Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor**. Rio de Janeiro: LTC, 2005.
- NISE, Norman S. **Engenharia de sistemas de controle**. 6.ed. LTC. Rio de Janeiro, 2013.
- OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 5.ed. Pearson Prentice Hall. São Paulo, 2010.
- Open Source. **Scilab**, 2023. Disponível em: <<https://www.scilab.org/about/scilab-open-source-software>>. Acesso em: 07 de fev. de 2023.
- PETINARI, Vinicius Decarli. **Aplicação do arduino no controle da estufa de secagem**. 2018. TCC (Graduação em Engenharia de Energia) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados.
- Scilab/Xcos pour l'enseignement des sciences de l'ingénieur. **Scilab Enterprises**, 2013. Disponível em: <https://www.scilab.org/sites/default/files/livr_et_Xcos.pdf>. Acesso em: 23 de fev. de 2023.

TILLMANN, M. Â., CÍCERO, S. M. **Avaliação de estufas do tipo convecção gravitacional e mecânico de ar forçado na precisão da determinação do grau de umidade de sementes.** Revista Brasileira de Sementes, v.20, n. 1, 153-159. 1998.