

Projeto e Experimentação de um Filtro Acelerador para um Sensor Dinâmico de Temperatura Sujeito a Parâmetros Incertos ^{*,**}

Wilton Gustavo Gomes da Costa ^{*}
Victor Leonardo Yoshimura ^{*} Fábio Iaione ^{*}

^{*} Faculdade de Computação, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Laboratório de Sistemas Computacionais de Alto Desempenho, Av. Costa e Silva, s/nº, Bairro Universitário, Campo Grande, MS. CEP: 79070-900 (e-mail: victor@facom.ufms.br).

Abstract: This paper deals with a filter design method for speeding up the steady-state response of a thermal sensor subject to first-order dynamic behaviour and parameter uncertainties. In order to solve the problem, the implementation of a lead filter is proposed, whose parameters aim the sensor device bandwidth widening. The design validation is made by computational simulation and implementation is made with Operational Amplifiers and experimental data are obtained with an Arduino-based platform.

Resumo: O presente trabalho lida com o projeto de um filtro para acelerar a resposta em regime de um sensor térmico sujeito a comportamento dinâmico de primeira ordem e a possíveis incertezas. Com a finalidade de resolver o problema, é proposta a implementação de um filtro avanço de fase, cujos parâmetros visam o aumento da largura de banda do dispositivo sensor. A validação do projeto é feita por simulação, realizada em ambiente computacional, e a implementação é feita com Amplificadores Operacionais, sendo os dados experimentais extraídos com uma plataforma baseada em Arduino.

Keywords: dynamic thermal sensor; lead filter; passband; settling time; parametrical uncertainties.

Palavras-chaves: sensor dinâmico de temperatura; filtro avanço de fase; banda passante; tempo de acomodação; incertezas paramétricas.

1. INTRODUÇÃO

O uso de sensores é essencial para o funcionamento de diversos dispositivos industriais, médicos, aeroespaciais, entre muitos outros. Um sensor pode ser descrito como um dispositivo capaz de gerar um sinal, geralmente elétrico, proporcional a outro que, em geral não pertence ao domínio elétrico.

A respeito do funcionamento de sensores, é muito frequente considerar que a leitura da variável medida ocorre instantaneamente, puramente por transmissão direta. Enquanto isto é verdade para muitos dispositivos, como divisores resistivos, e outros, mesmo com a presença de elementos parasitas, existem diversos exemplos onde esta assunção não é razoável, dentre os quais pode-se citar: sensores de força (Kaczmarek, 2008), sensores que fazem uso do efeito Hall (LEM, 2008) e sensores de temperatura (Texas Instruments, 2017; Kojima et al., 2018). Outros sensores dinâmicos são encontrados em aplicações biomédicas (Lu

et al., 2019) e em detecção de variáveis ambientais (Tetelin and Pellet, 2006).

Os exemplos mencionados mostram uma classe de sensores que são ditos dinâmicos, ou seja, há alguma equação diferencial regendo a relação entre a variável medida e a saída do sensor. Contudo, não é próprio dizer que estes dispositivos possuem algum tipo de atraso nesta relação, pois ao excitá-los a saída desenvolve-se de imediato, mas não apresenta o valor final instantaneamente. Os trabalhos de Schmalzel and Rauth (2005) e de Pallàs-Areny and Webster (2001) fornecem uma boa visão geral de sensores dinâmicos e mostram que uma grande quantidade deles pode ser modelada como sistemas de primeira ou de segunda ordem, sem zeros.

Quanto ao modelo que se empregará para o sensor, é importante determinar o tempo de acomodação, relacionado à constante de tempo, em sistemas de primeira ordem, ou à atenuação, em sistemas de segunda ordem. Se o sistema apresentar comportamento de segunda ordem com zero, o estudo mais detalhado de Franklin et al. (2003) deve ser considerado. Ainda, se este tempo não for suficientemente baixo, deve-se determinar qual configuração de

^{*} O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

^{**}O presente trabalho foi realizado com apoio da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS/MEC – Brasil.

polos torna-se interessante para levar este parâmetro a um valor aceitável.

Outra questão que tange não somente a sensores, mas a diversos dispositivos em Engenharia é a incerteza paramétrica envolvida. De fato, ao constituir qualquer máquina, não se pode afirmar o valor exato de massas, momentos de inércia, resistências, capacitâncias, etc. Desta forma, determinar o tempo de acomodação nos sensores anteriormente citados torna-se uma tarefa mais difícil pois pode-se assumir que, em uma linha de produção, o posicionamento dos polos irá variar.

Dentre os trabalhos que procuraram melhorar o desempenho dinâmico de sensores tem-se: a comparação de um método baseado em modelo discreto com outro, usando redes neurais, para a correção de erros em sensores de gases foi feita por Roj (2016); Güther et al. (2013) aplicaram os dados lidos de um sensor de temperatura veicular a um filtro de Kalman, o qual realizou uma predição de estado. No entanto, o filtro foi implementado em Matlab® o que, para muitas aplicações, não é prático.

Este artigo apresenta o projeto e a experimentação de um filtro usando Amplificadores Operacionais (AmpOps) com o intuito de reduzir o tempo de acomodação de sensores dinâmicos tornando, assim, a leitura mais rápida e com uma técnica mais facilmente implementável. Além disto, um projeto é desenvolvido para a acelerar a resposta de um sensor de temperatura amplamente utilizado em circuitos eletrônicos. Simulação computacional com o uso do Scilab® (Scilab Enterprises, 2012) e experimentação com o auxílio de uma plataforma baseada em Arduíno para a extração de dados são realizadas para a verificação da eficácia do método.

O restante do texto está dividido da seguinte forma: a Seção 2 mostrará o desenvolvimento teórico do filtro acelerador com a inclusão de incertezas; a Seção 3 contém o desenvolvimento de uma plataforma e os resultados experimentais de um filtro acelerador aplicado ao sensor de temperatura LM35; por fim, a Seção 4 trará as conclusões do presente trabalho.

Notação: Padrão. Será utilizado $\text{step}(t)$ para representar a função degrau unitário, s para indicar a variável de uma Transformada de Laplace (TL) e uma variável com circunflexo, $\hat{\cdot}$, indica que a mesma é um sinal ou sistema após a aplicação da TL.

2. O FILTRO ACELERADOR

Nesta seção, será estabelecido com maior clareza o problema a ser abordado, qual seja, a presença de dinâmica incerta em sensores de temperatura. Após isto, uma solução baseada em um filtro para aumentar a banda passante do dispositivo sensor será apresentada e analisada. Por fim, será feita uma discussão sobre possíveis implementações do filtro proposto em circuitos a AmpOp.

2.1 Sensores de Temperatura com Dinâmica Incerta

A classe de sensores considerada possui dinâmica linear com Função Transferência (FT) reduzida à primeira ordem da forma

$$\hat{s}(s) = \frac{b \pm \varepsilon_b}{(a \pm \varepsilon_a)s + 1}. \quad (1)$$

onde $a > 0$ é a constante de tempo do sensor (valor nominal), $b > 0$ é o ganho estático do sensor (valor nominal) e ε_a e ε_b são as respectivas incertezas envolvidas no sensor. Observe, ainda, que o valor de $a \pm \varepsilon_a$ está também relacionado à largura de banda do sensor.

Neste sensor, é razoável supor que a entrada, \hat{x} , é um degrau no domínio do tempo, ou seja,

$$\hat{x}(s) = \frac{X}{s}. \quad (2)$$

no qual X é o valor da temperatura aplicada. Assim, a resposta da saída do sensor, após o uso da Transformada Inversa de Laplace (TIL), será

$$y_s(t) = X(b \pm \varepsilon_b)\text{step}(t) - (a \pm \varepsilon_a)(b \pm \varepsilon_b)e^{-t/(a \pm \varepsilon_a)} \quad (3)$$

2.2 Filtragem Proposta

Observe que não é possível montar uma estrutura em *feedback* para melhorar o comportamento dinâmico do sensor. Assim, deve-se montar o filtro na saída do sensor, conforme Figura 1.

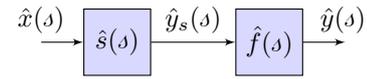


Figura 1. Configuração série para o filtro acelerador.

O filtro deverá substituir o valor da constante de tempo $a \pm \varepsilon_a$, considerado muito alto. Assim, a FT mais simples e que é capaz de realizar tal função é a de um dispositivo conhecido por compensador avanço de fase, dada por

$$\hat{f}(s) = \frac{a_f s + 1}{b_f(\tau s + 1)}, \quad (4)$$

onde τ é o valor desejado para a constante de tempo do sensor. Ainda, atribua-se $a_f = a$ e $b_f = 1$. Assim, a FT do sensor filtrado é

$$\hat{f}(s)\hat{s}(s) = \frac{(as + 1)(b \pm \varepsilon_b)}{((a \pm \varepsilon_a)s + 1)(\tau s + 1)}. \quad (5)$$

Para verificar o valor que o sensor irá disponibilizar em sua saída, aplica-se o Teorema do Valor Final (TVF) a (5), com entrada degrau, chegando a

$$y(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \hat{f}(s)\hat{s}(s)\hat{x}(s) = X(b + \varepsilon_b). \quad (6)$$

Ou seja, o erro na sintonia da constante de tempo do sensor, ε_a , não influencia na leitura final do sistema sensor-filtro, apenas o erro na sintonia do ganho do sensor, ε_b . Além disto, ao efetuar o cálculo de $y(t)$, o coeficiente da exponencial referente ao pólo mais lento, $\frac{1}{a \pm \varepsilon_a}$, torna-se

$$\lim_{s \rightarrow \frac{-1}{a \pm \varepsilon_a}} ((a \pm \varepsilon_a)s + 1)\hat{f}(s)\hat{s}(s)\hat{x}(s) = \frac{\mp \varepsilon_a(b \pm \varepsilon_b)X}{\left(1 - \frac{\tau}{a \pm \varepsilon_a}\right)} = \mp \frac{\varepsilon_a(a \pm \varepsilon_a)(b \pm \varepsilon_b)}{a \pm \varepsilon_a - \tau} X, \quad (7)$$

o que mostra que, mesmo que o filtro não sintonize perfeitamente os valores de τ e $a \pm \varepsilon_a$, o que é bastante provável,

a parcela da resposta no tempo associada ao expoente $\frac{1}{a \pm \varepsilon_a}$ é reduzida, em comparação com o correspondente em (3), pois

$$\frac{\varepsilon_a}{a \pm \varepsilon_a - \tau} \ll 1 \quad (8)$$

2.3 Realizações Possíveis para a Filtragem

Como (4) é uma FT apenas própria, pode-se reescrevê-la como a soma de um termo constante com uma função racional estritamente própria, da forma

$$\hat{f}(s) = \frac{1}{b_f} \left(\frac{1 - \frac{a_f}{\tau}}{\tau s + 1} + \frac{a_f}{\tau} \right), \quad (9)$$

ou seja, uma implementação com três AmpOps: um Passa-Baixa (PB), um somador e um amplificador inversor, conforme Figura 2.

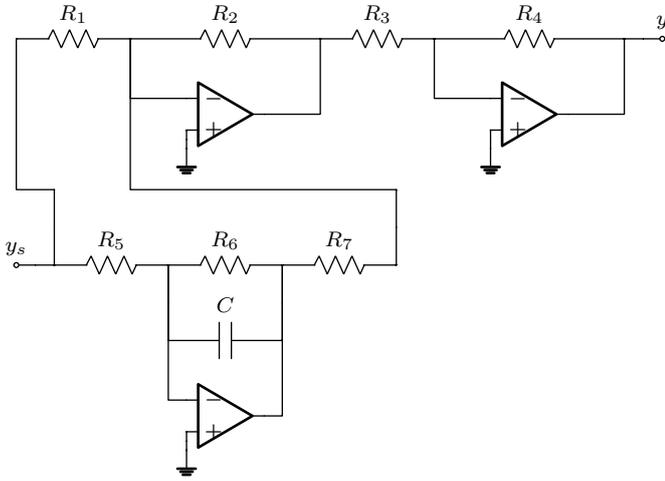


Figura 2. Filtro acelerador com três AmpOps.

Para que a largura de banda do circuito aumente e acelere a leitura disponível pelo sensor, deve-se impor

$$\tau < a_f = a, \quad (10)$$

o que mostra que a parcela PB manterá o sinal negativo no circuito da Figura 2. Assim, os parâmetros de projeto para o filtro acelerador são

$$a_f = \frac{R_2 R_6 C}{R_1} = \frac{(R_5 + R_6) R_6 C}{R_5}, \quad (11a)$$

$$b_f = \frac{R_3}{R_4}, \quad (11b)$$

$$\tau = R_6 C. \quad (11c)$$

A implementação do filtro descrito por (4) pode também ser feita com o circuito mais simples da Figura 3, cujos parâmetros são

$$a_f = R_3 C_1 \quad (12a)$$

$$b_f = \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3} \quad (12b)$$

$$\tau = R_4 C_2 \quad (12c)$$

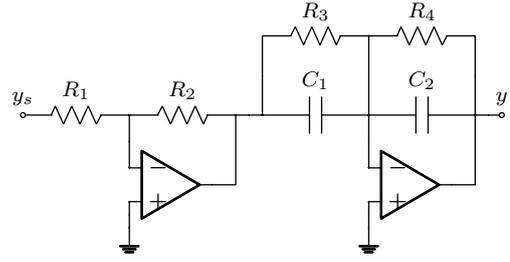


Figura 3. Filtro acelerador com dois AmpOps.

3. PROJETO E EXPERIMENTAÇÃO DO FILTRO ACELERADOR

Nesta seção, será descrito o projeto desenvolvido para um sensor de temperatura específico, o LM35. Para tanto, em primeiro lugar, serão descritas suas características dinâmicas e, então, o posicionamento do polo e do zero do filtro é determinada. Resultados de simulação são apresentados, bem como é descrita a plataforma que foi utilizada para a aquisição de dados experimentais.

3.1 Características do Sensor Empregado

A resposta em (1) pode ser utilizada para modelar o LM35, um sensor de temperatura amplamente utilizado. Sua FT é, na verdade, de segunda ordem mas com fator de amortecimento bastante elevado, o que lhe confere um comportamento muito próximo ao de primeira ordem.

De acordo com as especificações técnicas disponibilizadas pela Texas Instruments (2017), tem-se:

- Constante de tempo: 60s;
- Incerteza envolvida na constante de tempo: não disponível (será desprezada);
- Ganho do sensor: 10mV/°C;
- Incerteza no ganho do sensor: $\pm 1\%$.

É importante ressaltar que a constante de tempo não aparece explicitamente nas especificações técnicas disponíveis. Há, porém, um gráfico da resposta ao degrau de temperatura mostrando que o valor de saída atinge 95% do valor final em 180s, com o ar parado no entorno do sensor. Isto permite concluir a constante de tempo acima pelo critério de que, neste percentual do valor de saída, o tempo decorrido corresponde a três vezes a constante de tempo (Franklin et al., 2003).

3.2 Projeto do Filtro

O projeto será feito de tal forma a reduzir a constante de tempo a 30s, ou seja, a FT desejada para o filtro é

$$\hat{f}(s) = \frac{60s + 1}{30s + 1} \quad (13)$$

Ainda, não se deseja inserir qualquer ganho adicional ao circuito. Dada a simplicidade, o filtro será implementado com o circuito da Figura 3 com:

- $R_1 = R_4 = 30k\Omega$;
- $R_2 = R_3 = 60k\Omega$;
- $C_1 = C_2 = 1mF$

O AmpOp escolhido para o projeto foi o LM324, cuja alimentação é de 15V, fornecida externamente.

ao LM35. Após a temperatura registrada atingir o regime permanente, a estação foi afastada para assim proceder ao experimento de resfriamento do sensor.

Os dados obtidos pela plataforma foram enviados para o computador via porta USB, em formato CSV e estão disponíveis na Figura 7 e na Figura 8.

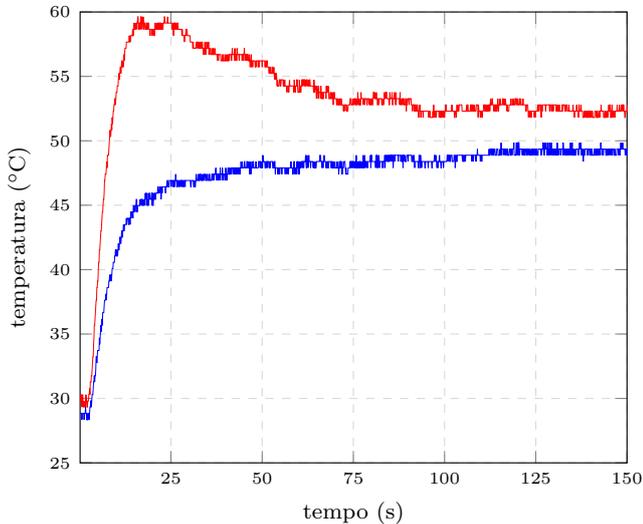


Figura 7. Resultado experimental para o aquecimento do sensor: saídas do sensor (azul) e do filtro (vermelho).

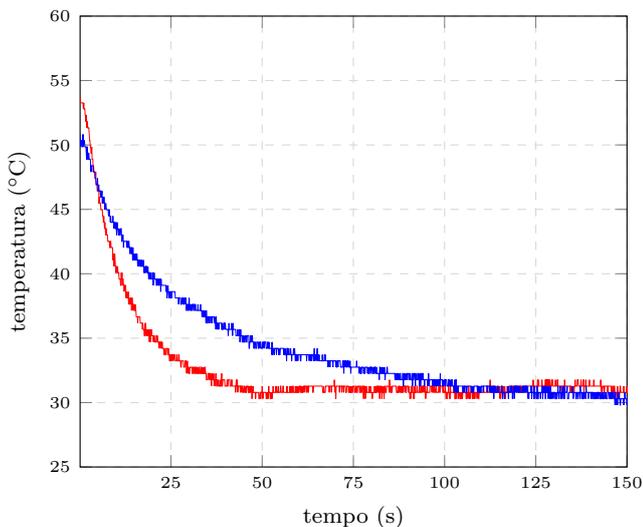


Figura 8. Resultado experimental para o resfriamento do sensor: saídas do sensor (azul) e do filtro (vermelho).

4. CONCLUSÕES

O experimento de resfriamento do sensor foi bem sucedido, mostrando o efeito esperado de aceleração da leitura do sensor. Entretanto, no experimento do aquecimento do sensor, houve um *overshoot* de cerca de 9°C, enquanto o valor de regime apresentou-se em 50°C na saída do sensor, isto pode ser devido ao fato de que mesmo o AmpOp utilizado possui comportamento dinâmico (Sedra and Smith, 2012) e, portanto, não se pode descartar comportamento de segunda ordem subamortecido não

modelado no circuito implementado. Houve, também, a presença de erro estático em torno de 2,5°C.

Outro fator que pode ter contribuído para a diferença entre os resultados de simulação e os experimentais é o fato de o projeto prever ar parado no entorno do sensor, enquanto este se movia na experimentação. De acordo com a folha de dados (Texas Instruments, 2017), isto altera o posicionamento de polos do sensor.

Os resultados preliminares são promissores para a implementação proposta e mostram a simplicidade em relação ao trabalho anterior de Güther et al. (2013). Com a finalidade de evitar os problemas verificados nos experimentos desenvolvidos, as atividades futuras se concentrarão tanto em detalhes da implementação analógica (escolha de outros modelos de AmpOp, inserção de *buffers*, ajuste de ganhos e constantes de tempo), quanto no desenvolvimento de filtros aceleradores digitais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos colegas do Laboratório de Sistemas Computacionais de Alto Desempenho (LSCAD) pelo suporte no desenvolvimento dos experimentos envolvidos neste trabalho e ao revisor anônimo, que apontou importantes melhorias ao texto.

REFERÊNCIAS

- Franklin, G.F., Powell, J.D., and Emami-Naeini, A. (2003). *Sistemas de Controle para Engenharia*. Bookman, Porto Alegre, 6 edition.
- Güther, T., Bönicke, H., Ament, C., Augustin, S., and Fröhlich, T. (2013). A model-based temperature estimator for improving sensor dynamics in vehicle exhaust systems. In *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 3852–3857.
- Kaczmarek, Z. (2008). Elastic bar transfer functions determination using one-point strain measurements. *Sensors and Actuators A: Physical*, 147(1), 121–126. doi:10.1016/j.sna.2008.04.020. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424708002446>.
- Kojima, E.H., Iaione, F., and Yoshimura, V.L. (2018). Sistema para automação da calibração de sensores de temperatura. In *Anais do Congresso Brasileiro de Automática*. João Pessoa. doi:10.20906/CPS/CBA2018-0516.
- LEM (2008). *CAS/CASR/CKSR series Current Transducers*. LEM, Selvazzano Dentro. URL www.lem.com.
- Lu, R., Haider, M.R., Gardner, S., Alexander, J.I.D., and Massoud, Y. (2019). A Paper-Based Inkjet-Printed Graphene Sensor for Breathing-Flow Monitoring. *IEEE Sensors Letters*, 3(2), 1–4. doi:10.1109/LSENS.2018.2885316.
- Pallàs-Areny, R. and Webster, J.G. (2001). *Sensors and Signal Conditioning*. Wiley, New York, 2 edition.
- Roj, J. (2016). Correction of Dynamic Errors of a Gas Sensor Based on a Parametric Method and a Neural Network Technique. *Sensors*, 16(8), 1267. doi:10.3390/s16081267. URL <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/8/1267>.

Schmalzel, J. and Rauth, D. (2005). Sensors and signal conditioning. *IEEE Instrumentation Measurement Magazine*, 8(2), 48–53. doi:10.1109/MIM.2005.1438844.

Scilab Enterprises (2012). *Scilab: Free and Open Source software for numerical computation*. Scilab Enterprises, Orsay, France. URL <http://www.scilab.org>.

Sedra, A.S. and Smith, K.C. (2012). *Microeletrônica*. Pearson, São Paulo, 5 edition.

Tetelin, A. and Pellet, C. (2006). Modeling and optimization of a fast response capacitive humidity sensor. *IEEE Sensors Journal*, 6(3), 714–720. doi:10.1109/JSEN.2006.874446.

Texas Instruments (2017). *LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors*. Texas Instruments, Dallas. URL www.ti.com.

Apêndice A. CÓDIGO PARA A PLATAFORMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

```
//Sensor de temperatura usando o LM35

const int LM35 = A0; // Define o pino que
  le a saida do LM35
const int LM35AMPOP = A1; // Pino que le a
  saida do AmpOp na saida do LM35
float temperatura; // Guarda a temperatura
  medida pelo sensor
float temperaturaAmpOp; // Armazena a
  temperatura medida no ampop
float temperaturaAmbiente = 24;
int iteracao = 0;
int cabo = 0 ;

// Funcao que sera executada ao ligar ou
  resetar o Arduino

void setup ( ) {
  Serial.begin(9600); // Comunicacao serial
}

// Funcao que sera executada continuamente

void loop ( ) {
  temperatura = 25.00;
  while ((iteracao<=1500) && cabo==0 ) {
    iteracao ++;
    temperatura = (float(analogRead(LM35))*5/
      (1023))/0.01;
    temperaturaAmpOp = (float(analogRead
      (LM35AMPOP))*5/(1023))/0.01;
    Serial.print( temperatura );
    Serial.print(" ");
    Serial.print(temperaturaAmpOp);
    Serial.print(" ");
    Serial.println(iteracao);
    delay(100);
  }
  cabo=1;
}
```

Apêndice B. SCRIPT PARA A SIMULAÇÃO DO FILTRO ACELERADOR

```
//Parâmetros de simulação

a=65; // Cte de tempo do sensor
b=.99; // Ganho do sensor
tau=30; // Cte de tempo desejada
af=60; // Sintonia da cte de tempo do
  // sensor
t=linspace(0,150,1501);
  // Def. do tempo de simulação

//Definição do sensor e do filtro

S=syslin('c',-1/a,b/a,1,0); // Sensor no
  // esp. de estado
F=syslin('c',-1/tau,(tau-af)/tau,1/tau,
  af/tau) // Filtro no esp. de estado

//Simulação e exportação de dados

ysa=csim(50*ones(t),t,S,20);
  // Saída do sensor, aquecimento
yfa=csim(yss,t,F,-600);
  // Saída do filtro, aquecimento
ysr=csim(20*ones(t),t,S,50);
  // Saída do sensor, resfriamento
yfr=csim(ysr,t,F,-3000);
  // Saída do filtro, resfriamento
M=[t' yss' yfs' ysr' yfr'];
csvWrite(M,"sim.csv")
  // Exportação para csv
```