

SIMULAÇÃO DE SISTEMAS EM TEMPO REAL: UMA ABORDAGEM UTILIZANDO SCILAB, X2C E ARDUINO

JOÃO PEDRO DE SÁ MOREIRA¹, LUCAS M. S. PEREIRA², MARCELO SARAIVA COELHO³

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

² Graduando em Engenharia de Controle e Automação, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Campus Cubatão, lucas.matheus@ifsp.edu.br

³ Mestrado em Engenharia Elétrica, Professor do Instituto Federal de São Paulo, Campus Cubatão, mcoelho@ifsp.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.05.03-3 Controle de Processos Eletrônicos, Retroalimentação

RESUMO: O uso de simulações em tempo real para testar estratégias de controle em processos é benéfico por não depender de instalações físicas e recursos reais para a realização de ensaios. O termo “Hardware-in-the-loop” pode ser aplicado para englobar metodologias que envolvem este tipo de técnica. Na literatura, muitos são os trabalhos que discutem métodos para implementar simulações em tempo real utilizando como base o software de computação numérica MATLAB, que pelo fato de ser pago, não é acessível em todos os casos. Com isto posto, o objetivo deste trabalho é apresentar uma forma de implementar em hardware microcontrolador modelos matemáticos de processos visando a simulação de suas dinâmicas em tempo real utilizando o Scilab, que é um software de computação numérica gratuito. O modelo escolhido para implementação foi o de pressão média arterial de pacientes hipotensos quando submetidos a infusão de Fenilefrina, já o hardware foi um Arduino Due e os ensaios com o modelo embarcado foram realizados através de um sistema supervisorio se comunicando via MODBUS com a placa. A implementação foi bem sucedida, resultando em uma simulação em hardware muito próxima daquela obtida diretamente em software, o que valida o uso da técnica.

PALAVRAS-CHAVE: Arduino, MODBUS, Pressão arterial média, Scilab, Sistema embarcado, X2C.

REAL-TIME SYSTEM SIMULATION: AN APPROACH USING SCILAB, X2C AND ARDUINO

ABSTRACT: The use of real-time simulations to test processes control strategies is beneficial because it does not depend on physical facilities and real resources to carry out tests. The term “Hardware-in-the-loop” can be applied to encompass methodologies that involve this type of technique. In the literature there are a lot of works discussing methods to implement simulations in real time using the numerical computation software MATLAB, which, due to the fact that it is paid, is not accessible in all cases. With this in mind, the objective of this work is to present a way to implement process mathematical models in microcontrolled hardware aiming at simulating their dynamics in real time using Scilab, which is a free numerical computing software. The model chosen for implementation was the mean arterial pressure of hypotensive patients when undergoing infusion of Phenylephrine, where as the hardware was a Arduino Due and the tests with the embedded model were carried out through a supervisory system communicating via MODBUS with the board. The implementation was successful, resulting in a hardware simulation very close to that obtained directly in software, which validates the use of the technique.

KEYWORDS: Arduino, MODBUS, Mean arterial pressure, Scilab, Embedded System, X2C.

INTRODUÇÃO

Simulações em tempo real com sistemas embarcados podem apresentar um potencial para testar estratégias de controle de processos sem a necessidade de possuir plantas físicas. Uma das formas de classificar esta técnica é através do termo “Hardware-in-the-loop” (HIL), que CHEN *et al.* (2018) define como a tecnologia prática para testar métodos teóricos e Ireno (2014) expande ao dizer que a

HIL substitui o sistema físico por um modelo matemático capaz de simular o comportamento real da planta. Seguindo esta linha, uma possibilidade é embarcar em um hardware processador o modelo matemático da dinâmica de uma planta para simulá-la em tempo real. E sem a dependência da planta física, os ensaios não serão limitados por restrições orçamentárias e terão altos graus de repetibilidade.

Para desenvolver, testar e posteriormente embarcar em hardware o modelo matemático de um processo, podem ser utilizados softwares de computação numérica. Para esta e outras aplicações, o MATLAB tem o uso bastante difundido, conforme exemplificado em al-Daffaie *et al.*(2018) que implementa e embarca em hardware um modelo de controlador de temperatura de um dissipador térmico feito em MATLAB, BAO *et al.*(2019) que faz algo semelhante mas controlando um modelo de veículo autônomo submarino e TAUT *et al.* (2019) que modela e controla um motor DC sem escovas. Porém, embora bastante robusto e eficiente, o MATLAB é um software pago, e por isso nem sempre é acessível.

Uma alternativa existente é o software Scilab, que é *open source* e apresenta funcionalidades semelhantes às do MATLAB. Quando unificado com as bibliotecas X2C, o Scilab também é capaz de embarcar modelos matemáticos em hardware. Deste modo, este trabalho tem como objetivo demonstrar como o Scilab em conjunto com o X2C podem ser utilizados para criar aplicações de simulação em tempo real embarcadas em hardware.

MATERIAL E MÉTODOS

O Scilab possui um ambiente voltado para programação orientada a blocos gráficos conhecido como “XCOS”(VIEIRA *et al.*, 2019). O XCOS pode ser utilizado para a construção gráfica do modelo matemático a ser embarcado no hardware processador. Porém, para realizar este embarque, o modelo gráfico deve ser convertido para linguagem C/C++. Esta conversão pode ser feita automaticamente com o X2C, que é um pacote de ferramentas desenvolvido pela LCM (<https://x2c.lcm.at>), voltado para geração de códigos de controle em tempo real para microprocessadores. O X2C é compatível tanto com o MATLAB quanto com o Scilab e apresenta uma versão educacional gratuita para universidades e escolas.

Portanto, utilizando o XCOS com o X2C, foi implementado um modelo de primeira ordem correspondente a uma parcela da dinâmica de pressão média arterial de pacientes hipotensos quando submetidos a infusão da droga Fenilefrina, conforme definido por WASSAR *et al.* (2014) e representado na Figura 1. Este modelo já foi implementado em hardware para simulações em tempo real por COELHO *et al.* (2020) porém, o estudo foi feito utilizando MATLAB, e por conta disto, o atual projeto busca reproduzir os resultados utilizando ferramentas mais acessíveis como o Scilab e X2C. Na Figura 1, o bloco realçado em vermelho representa a função de transferência que simula a resposta da pressão arterial média, e para o presente trabalho, foi esta a parte implementada em hardware.

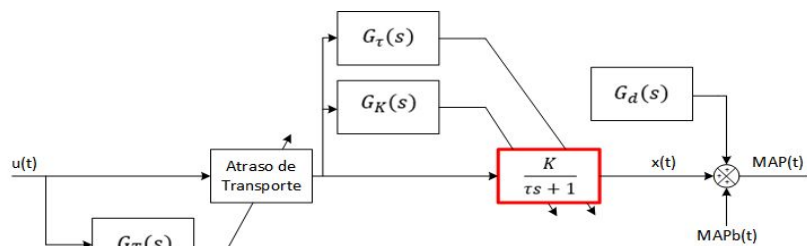


FIGURA 1. Diagrama de blocos da dinâmica da pressão arterial média de pacientes hipotensos na aplicação de Fenilefrina (com bloco da função de transferência principal em vermelho).

Note que embora o bloco em vermelho seja modelado como uma resposta de primeira ordem, os seus parâmetros principais (ganho estático K , constante de tempo τ e atraso de transporte) são determinados dinamicamente por outras funções de transferência. Por conta disto, nota-se que a dinâmica de primeira ordem deve ser implementada de tal forma que estes parâmetros possam ser definidos externamente ao bloco.

Todo o processo de implementação, embarque em hardware e análise do modelo empregado é apresentado no fluxograma da Figura 2.

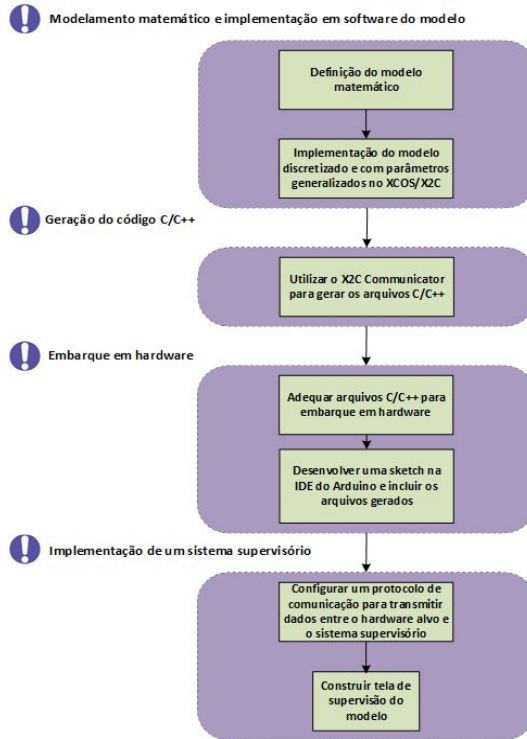


FIGURA 2. Fluxograma de implementação do modelo.

Vale ressaltar que quaisquer funções contínuas do modelo deverão ser discretizadas antes de serem implementadas no X2C. Deste modo, a Figura 3 apresenta o modelo da função de transferência de primeira ordem com parâmetros externamente definíveis implementada no XCOS. O modelo apresenta 3 entradas, sendo a “Inport” o sinal de entrada da função de transferência, “Inport1” o valor do ganho estático K e “Inport2” o valor da constante de tempo τ . Os dois blocos denominados de “integradores” foram configurados para atuar analogamente a integradores no domínio s ($\frac{1}{s}$) sob a taxa de amostragem de 0.1s. As linhas vermelhas referem-se apenas aos sinais de base de tempo (0.1s), e os azuis são conexões padrões entre os blocos.

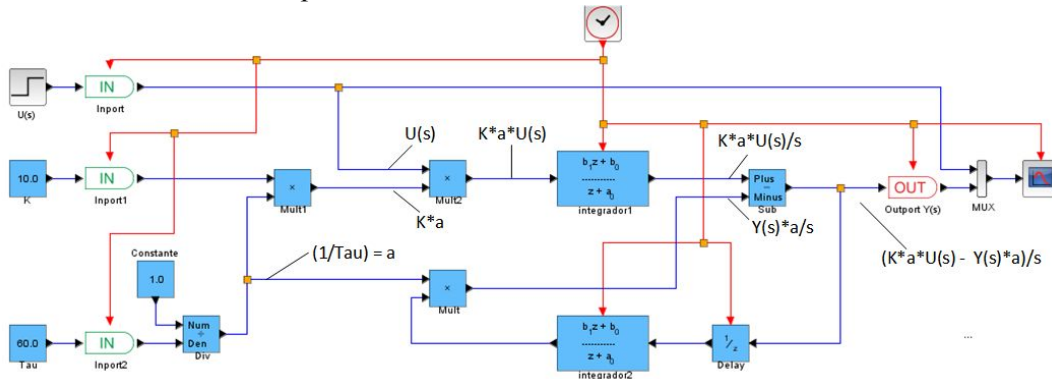


FIGURA 3. Implementação do modelo no XCOS e X2C.

Para facilitar a visualização do sistema da Figura 3 como uma função de transferência de primeira ordem, considere uma abordagem contínua e note que as relações matemáticas utilizadas determinam que na entrada do “integrador1”, o sinal será:

$$K * a * U(s) \quad (1)$$

K = ganho estático da função de primeira ordem;

$$a = \frac{1}{\tau}$$

$U(s)$ = sinal de entrada da planta.

Esse sinal passa pelo “integrador1” e se torna:

$$\frac{K*a*U(s)}{s} \quad (2)$$

Ressaltando que a saída do modelo é representada por $Y(s)$, considere a ação da realimentação da saída na entrada do “integrador2” e a multiplicação por a logo na sequência. O resultado desta operação será subtraído da parcela em (2) no bloco “Sub”, resultando em $Y(s)$. Logo:

$$Y(s) = \frac{K*a*U(s)}{s} - \frac{Y(s)*a}{s} \quad (3)$$

$$Y(s) \left(\frac{s+a}{s} \right) = \frac{K*a*U(s)}{s} \quad (4)$$

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K*a}{s+a} \quad (5)$$

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K/\tau}{s + \frac{1}{\tau}} \quad (6)$$

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (7)$$

A geração dos arquivos com o modelo na linguagem C/C++ é feita através da ferramenta “Communicator” do X2C. O hardware escolhido para a implementação foi uma placa Arduino Due, que é equipada com o microcontrolador Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3. Deste modo, a própria IDE do Arduino pode ser utilizada para o desenvolvimento de uma *sketch* que utilize os arquivos gerados. Para a análise da simulação em tempo real, foi utilizado um sistema supervisorio desenvolvido no Indusoft Web Studio – versão educacional - se comunicando através do protocolo MODBUS RTU (com auxílio da biblioteca SimpleMODBUSSlave_DUE).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 apresenta um diagrama que resume a relação entre os dispositivos utilizados na construção final do projeto. Um potenciômetro foi instalado para simular a leitura de um sinal analógico (o valor de tensão do potenciômetro é convertido para uma escala numérica que pode ser utilizada como o sinal de entrada para a planta dentro de limites estabelecidos pelo usuário), enquanto o Arduino Due e o sistema supervisorio definem uma relação mestre/escravo em uma rede MODBUS.

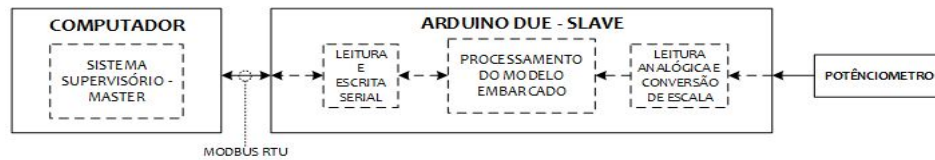


FIGURA 4. Diagrama da relação lógica do projeto.

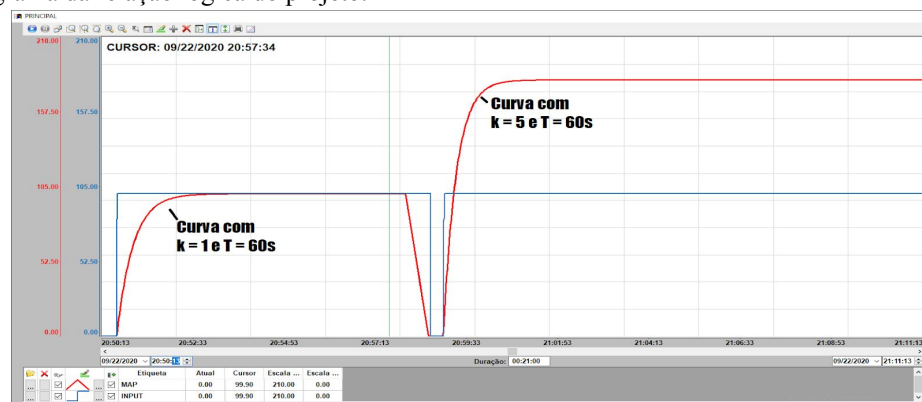


FIGURA 5. Supervisorio desenvolvido para analisar a resposta do modelo implementado em hardware

O sistema supervisorio consistiu em apenas um gráfico de tendência (*trend*) que criou um histórico da tag associada a saída do sistema (bloco OUT na Figura 3). Os valores da simulação em tempo real no hardware foram obtidos através desta *trend* utilizando o cursor (Figura 5). Vale ressaltar que o sistema supervisorio pode atender tags de leitura e escrita, que podem alterar a dinâmica do processo em tempo real, caso necessário. Na Figura 5 são vistas as curvas de respostas para $K = 1$ e $K = 5$ com $\tau = 60s$.

Para validar a fidelidade da resposta em tempo real do modelo em hardware, foi feita uma comparação com a resposta obtida na simulação do XCOS em um ensaio para um degrau de 100, uma constante de tempo τ de 60s e para K igual a 1, 5 e 10. A Tabela 1 apresenta os resultados do teste.

TABELA 1. Comparação entre a resposta do modelo no XCOS com o modelo em hardware para diferentes K

Tempo	K = 1 e $\tau = 60s$		K = 5 e $\tau = 60s$		K = 10 e $\tau = 60s$	
	Resposta XCOS	Resposta Hardware	Resposta XCOS	Resposta Hardware	Resposta XCOS	Resposta Hardware
$T_0 + 0s$	0.06	1.48	0.04	4.51	0.05	5.66
$T_0 + 30s$	39.37	39.97	196.91	200.69	393.75	389
$T_0 + 60s$	63.30	63.65	316.53	318.30	633.054	629.8
$T_0 + 90s$	77.79	77.97	388.95	388.88	777.89	775.43
$T_0 + 120s$	86.56	86.63	432.78	433.25	865.55	863.7
$T_0 + 150s$	91.86	91.84	459.324	459.03	918.64	917.88
$T_0 + 300s$	99.33	99.24	496.67	496.19	993.35	992.29

T_0 : valor inicial da simulação.

O erro em $T_0 + 0s$ elevado na resposta do modelo em Hardware, acontece devido a imprecisão do tempo inicial captada pelo cursor na interface do sistema supervisor, provocada por um intervalo mínimo de milissegundos durante a execução do projeto.

CONCLUSÕES

Conclui-se que o objetivo inicial de implementar em hardware e simular em tempo real um modelo matemático da dinâmica de uma planta foi obtido com sucesso. O X2C, em conjunto com o SCILAB foram capazes de gerar os arquivos em linguagem C/C++ necessários para o embarque em hardware, que por sua vez foi realizado através da IDE do Arduino. A comparação entre a resposta simulada via XCOS e a resposta em tempo real do modelo em hardware apresentou uma coerência satisfatória entre as duas implementações, o que confirma potencial para uso de testes de plantas simuladas em tempo real, seja para aplicações práticas ou educacionais.

Para trabalhos futuros, deseja-se prosseguir com a implementação do modelo completo de pressão média arterial e eventualmente testar estratégias de controle para este modelo.

REFERÊNCIAS

- AL-DAFFAIE, Husamaldeen et al. Temperature control of a heat sink based on hardware in the loop. **2018 15th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, SSD 2018**, p. 366–370, 2018.
- BAO, D. et al. Hardware-in-the-Loop Simulation Applied to AUV Control. **Proceedings 2018 Chinese Automation Congress, CAC 2018**, p. 1009–1013, 2019.
- CHEN, Zhongyuan et al. Development of an educational interactive hardware-in-the-loop missile guidance system simulator. **Computer Applications in Engineering Education**, v. 26, n. 2, p. 341–355, 2018.
- COELHO, M.S. et al. Real-time simulation device for mean arterial pressure of hypotensive patient subjected phenylephrine infusion. **Electronics Letters**, v. 56, n. 17, p. 865–868, 2020.
- IRENO, Thiago Santos de Melo. **APLICAÇÃO DA METODOLOGIA MODEL-BASED DESIGN NO PROJETO E TESTE DE SISTEMAS DE CONTROLE**. 2014. Universidade Federal de Ouro Preto, 2014.
- TAUT, Marius Alexandru; CHINDRIS, Gabriel; PITICA, Dan. Real-Time System with Integrated PID Algorithm Used for DC Motor Control. **Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology**, v. 2019- May, p. 1–6, 2019.
- VIEIRA, Eros B. et al. Application of Scilab/Xcos for process control applied to chemical engineering educational projects. **Computer Applications in Engineering Education**, v. 27, n. 1, p. 154–165, 2019.
- WASSAR, Taoufik et al. Automatic control of arterial pressure for hypotensive patients using phenylephrine. **International Journal of Modelling and Simulation**, v. 34, n. 4, p. 187–198, 2014.