Tema de Pesquisa: Simulação em tempo real e *hardware-in-the-loop* (HIL) com plataformas embarcadas de baixo custo.

Título: Plataforma de baixo custo para simulação em tempo real e testes *hardware-in-the-loop* baseada em microcontrolador com interfaces implementadas em periféricos.

Orientador(es): Maurício Beltrão Rossiter

Resumo:
Os simuladores comerciais de tempo real, que combinam processadores e FPGAs, atendem a um amplo espectro de aplicações, mas o custo e a complexidade restringem seu uso em laboratórios de ensino e nas etapas iniciais de desenvolvimento de controladores. As alternativas embarcadas de baixo custo ocupam outro ponto desse espaço de projeto: abrem mão de parte da fidelidade e da capacidade de processamento em troca de acessibilidade e transparência. Nessas plataformas, a interface com o controlador sob teste é frequentemente o fator limitante. Sinais digitais que mudam entre dois passos de cálculo, como o PWM, são mal representados quando amostrados apenas nos instantes de cálculo, o que provoca *aliasing*. Este trabalho propõe desenvolver e caracterizar uma plataforma de simulação em tempo real em um microcontrolador de dois núcleos, com o modelo da planta resolvido em passo fixo num núcleo dedicado e as interfaces delegadas aos periféricos. Contadores de hardware integram as entradas digitais ao longo de cada passo, e máquinas de estado programáveis geram os sinais de sensor. A partir de um emulador de motor CC com encoder já validado, a pesquisa pretende:

- generalizar a plataforma para modelos lineares em espaço de estados configuráveis e outras plantas acionadas por sinais digitais, como conversores CC-CC;
- incorporar entrada de conjugado de carga, saída analógica de corrente e injeção de falhas;
- caracterizar experimentalmente os limites da plataforma: pior tempo de execução, *jitter*, latência entre entrada e saída e fidelidade da ondulação;
- verificar a plataforma contra soluções analíticas e contra um simulador comercial de referência.

Como desdobramento, a plataforma será avaliada como recurso didático para o ensino de simulação em tempo real, com o estudante construindo e verificando o próprio emulador.

Bibliografia Consultada:

BACIC, M. On hardware-in-the-loop simulation. In: IEEE CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL, 44., 2005. *Proceedings* [...]. 2005. p. 3194–3198.

IEEE. *IEEE Std 2004-2025*: IEEE Recommended Practice for Hardware-in-the-Loop (HIL) Simulation-Based Testing of Electric Power Apparatus and Controls. New York: IEEE, 2025.

KRAUSE, N.; DI GIOIA, A.; BROWN, I. P. Multi-core microcontroller hardware in the loop system for electric machine control. In: IEEE ENERGY CONVERSION

CONGRESS AND EXPOSITION (ECCE), 2021. *Proceedings* [...]. 2021. p. 4711–4718.

YUSHKOVA, M.; SANCHEZ, A.; DE CASTRO, A. Oversampling techniques to improve the accuracy of hardware-in-the-loop switching models. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 38, n. 5, p. 6024–6035, 2023.

CAMACHO, J.; IBARRA, L.; PONCE, P. A model-based approach for amending the aliasing effect of real-time simulators of switching systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 41, n. 12, p. 21774–21783, 2026.

OJEDA-MANCERA, S. et al. Didactic hardware in the loop platform: a low-cost open-source approach. *IEEE Latin America Transactions*, v. 23, n. 10, p. 910–921, 2025.

BUTTAZZO, G. C. *Hard Real-Time Computing Systems*: predictable scheduling algorithms and applications. 3. ed. New York: Springer, 2011.

FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; WORKMAN, M. L. *Digital Control of Dynamic Systems*. 3. ed. Menlo Park: Addison-Wesley, 1998.