

# Aprendizado Prático de Subsistemas de Entrada/Saída em Projetos de Sistemas Computacionais com Suporte do Simulador CompSim

Guilherme Álvaro Esmeraldo<sup>1</sup>, Edson Lisboa<sup>2</sup>, Lucas Cartaxo<sup>1</sup>, Cícero Samuel Mendes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratório de Sistemas Embarcados e Distribuídos – LEDS/IFCE  
Instituto Federal do Ceará – *Campus Crato*

<sup>2</sup>Laboratório de Estudos Avançados em Eletrônica – LEA/IFS  
Instituto Federal de Sergipe – *Campus Aracaju*

guilhermealvaro@ifce.edu.br, edson.lisboa@academico.ifs.edu.br, {lfonteesc, mr.samuelmendes}@gmail.com

**Resumo:** No estudo de projetos de sistemas computacionais, o tema Subsistemas de Entrada/Saída inclui conceitos complexos e extensos, que não são tratados de forma adequada pelos simuladores computacionais presentes na literatura. Este artigo apresenta uma proposta de uso do simulador computacional CompSim para suportar os processos de ensino-aprendizagem práticos em Subsistemas de Entrada/Saída. Para o desenvolvimento do trabalho aqui proposto, realizou-se um levantamento bibliográfico de aspectos de subsistemas de entrada/saída, e de como os simuladores e sistemas computacionais reais os tratam. Com isso, formulou-se mecanismos que simplificam a criação e conexão de novos periféricos ao sistema computacional virtual do CompSim. A abordagem proposta tem sido empregada em diferentes cursos e os resultados mostram a efetividade do processo de ensino-aprendizagem.

**Palavras-chave:** *Subsistema de Entrada/Saída; Aprendizado Prático; Simulador CompSim.*

## 1. Introdução

Em cursos técnicos e superiores nas áreas de computação e engenharia eletrônica, há disciplinas que tratam de aspectos de projetos de sistemas computacionais, tal como a de Arquitetura e Organização de Computadores (AOC)[1][2]. Nessas disciplinas, geralmente, os conteúdos trabalhados incluem desde as estruturas e comportamento dos componentes do computador até sua programação em linguagem de baixo nível.

Nesses conteúdos, um dos aspectos mais importantes se refere à interação do sistema computacional com seus periféricos. Essa interação envolve diversos elementos como interfaces, barramentos, modelos e protocolos de comunicação, módulos de entrada/saída e os próprios periféricos. Esses conceitos são considerados complexos e não triviais, bem como têm sido frequentemente abordados de forma puramente conceitual e com uso de abstrações [3].

Na literatura tem-se optado pela utilização de simuladores para apoio ao aprendizado dos diferentes aspectos de projetos de sistemas computacionais [4]. Os simuladores são ferramentas que buscam representar cenários reais no projeto de sistemas computacionais e têm como principais benefícios a abstração dos diferentes recursos do computador, não necessitarem de laboratórios de hardware e técnicos especializados, bem como permitem configuração e *feedback* rápidos nas simulações.

Vários estudos, como os apresentados em Pena e Freitas [5] e Esmeraldo et al. [7], realizaram comparativos entre simuladores da literatura, onde consideraram determinadas métricas comparativas, como, por exemplo, alto desempenho, suporte de interface gráfica, disponibilidade de documentação, distribuição livre, entre outras. Observa-se todavia que os simuladores: ou não apresentam todos os recursos didáticos necessários para apoio à disciplina [5]; ou, devido à adoção de abstrações, não abordam

adequadamente conteúdos importantes [3]; ou, por focarem em determinados componentes do computador, há a necessidade de se utilizar mais de um simulador [4]; ou buscam fidelizar as características dos componentes do computador, tornando-se complexos de configurar e interagir [6].

Nesse sentido, este artigo apresenta um novo recurso do simulador CompSim [11], o qual vem com a proposta de apoiar o aprendizado e exploração, de forma prática, da interação entre o computador e os periféricos. Esse recurso consiste de uma interface de Entrada/Saída (E/S) padronizada que permite conectar, de forma simplificada e automatizada, o sistema computacional simulado à diferentes periféricos, com objetivo de apoiar a realização de experimentos que envolvam desde o projeto de periféricos virtuais e físicos até sistemas computacionais completos reais.

## 2. Fundamentação Teórica

Dispositivos de E/S são fundamentais em sistemas computacionais, pois possibilitam a interface para a interação entre o sistema e o ambiente exterior. Tais interações podem se configurar entre homem-máquina (IHM), máquina-máquina (IMM) e de comunicação [8]. Portanto, dispositivos periféricos apresentam grandes variações com relação às funcionalidades, tecnologias empregadas, diferentes taxas de transmissão de dados, além de tamanho e formato dos dados na comunicação. Essa heterogeneidade inviabiliza que o processador trate diretamente as particularidades de cada dispositivo periférico. Assim, o projeto de subsistemas de E/S é uma solução integrada de *hardware* e *software* para cada dispositivo específico a ser conectado ao sistema.

De uma forma geral, um Subsistema de E/S é composto por dois submódulos: Módulo de E/S, também conhecido como Controlador, e o próprio periférico, também conhecido como dispositivo externo. A Figura 1 ilustra esses dois elementos e como estão relacionados.

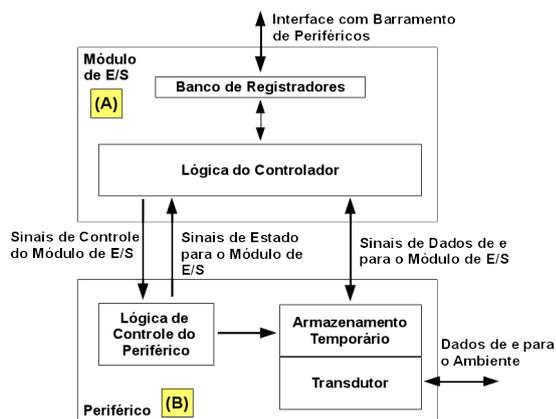


Figura 1. Subsistema de E/S.

O Módulo de E/S, que faz interface com o barramento de periféricos, possui um Banco de Registradores – que armazenam dados, informações de controle, comandos e estados – e a Lógica do Controlador das funções do periférico, como pode ser visto na Figura 1(A). Já o periférico, ilustrado na Figura 1(B) contém: 1) Lógica de Controle do Periférico, que se encarrega de interpretar comandos enviados pelo Módulo de E/S e faz com que a função relativa ao comando seja executada; 2) Transdutor, que é necessário para fazer as devidas conversões entre sinais de natureza diferentes (e.g. conversão entre sinal elétrico proveniente do sistema computacional em uma forma de energia compatível com o ambiente externo, tais como ondas magnéticas ou sonoras); e 3) Armazenamento temporário, que está associado ao Transdutor para que os dados possam ser transferidos entre o periférico e o Módulo de E/S.

Evidentemente, que os Subsistemas de E/S variam com a natureza e complexidade do periférico. Desta forma, percebe-se que o estudo, compreensão e desenvolvimento não são atividades imediatas. Assim, plataformas virtuais têm surgido como um mecanismo para otimizar tanto os processos de ensino-aprendizagem quanto para aumentar o desempenho no desenvolvimento de *software* e *hardware*, em projetos de sistemas computacionais, tal como será apresentado a seguir.

### 3. O Simulador CompSim

CompSim é um simulador de sistema completo – são tipos de simuladores que incluem todos os componentes do computador –, o qual inclui uma plataforma de *hardware* simulável, conhecida por “Mandacaru”, a qual inclui os seguintes componentes computacionais de simulação: 1) CPU: um processador de 16-bits, com arquitetura mista (RISC e CISC), composta por 16 instruções para realização de operações de transferência de dados, lógicas e aritméticas, desvio de fluxo de programa e de entrada/saída com periféricos. Possui ainda os seguintes submódulos: banco de registradores, contador de instrução, unidade de controle, unidade lógica e aritmética e subsistema de tratamento de interrupções de *software* e *hardware*; 2) Memória cache: é utilizada para otimizar o desempenho dos programas

(aproveitando as características de localidade espacial e temporal) e suporta diferentes tipos de configuração, como de políticas de mapeamento, de substituição, entre outras; 3) Memória RAM: é utilizada para armazenamento de dados, instruções e pilha dos programas que serão executados no simulador; 4) Barramentos: o simulador inclui dois barramentos, sendo um de Sistema, que permite a comunicação entre o processador e as memórias Cache e RAM, e um de Periféricos, que permite que o processador se comunique com o Subsistema de Entrada/Saída; 5) Subsistema de Entrada/Saída: inclui uma interface padronizada com módulos de entrada/saída, que possibilita a comunicação do processador com diferentes tipos de periféricos.

O simulador também conta com uma interface gráfica para configurar os componentes virtuais da plataforma Mandacaru, ajustar parâmetros de simulação e suportar a codificação de aplicações em baixo nível (*Assembly*).

A Figura 2 mostra a interface gráfica do CompSim, na qual pode-se visualizar os seguintes componentes gráficos: A) Editor de código; B) Processador; C) Memória cache; D) Memória RAM; e E) Componentes de controle de configuração e execução de simulação.

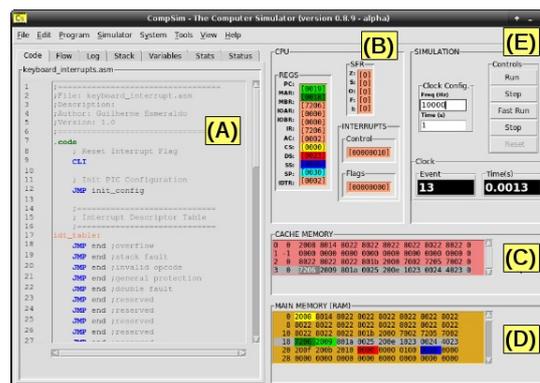


Figura 2. Interface Gráfica do CompSim.

#### 3.1 Subsistema de Entrada/Saída

O Subsistema de E/S, presente na plataforma de *hardware* virtual do CompSim, permite que novos periféricos sejam conectados automaticamente ao barramento de periféricos. Para tanto, cada periférico deve incluir dois arquivos: 1) o primeiro (arquivo com extensão “.csd”) contém uma especificação de sua interface, a qual inclui as seguintes definições: número(s) da(s) porta(s) de entrada/saída; número da interrupção (IRQ), caso o periférico suporte; dados para instanciar o componente de *software* (nome do pacote e da classe de software); e uma curta descrição textual do respectivo periférico; 2) o segundo arquivo inclui o programa que será utilizado para emular o comportamento do periférico (o código-fonte do programa, com extensão “.py”, descrito na linguagem Python).

Desta forma, ao se criar uma plataforma computacional no simulador CompSim, seu Subsistema de E/S buscará pelos arquivos de descrição de interface de componente (“.csd”) e, de forma automatizada,

instanciará os respectivos componentes de *software* (“*.py*”), que serão conectados ao barramento virtual de periféricos (esse processo é ilustrado na Figura 3). Com isso, os novos periféricos já estarão prontos para interação com restante dos componentes de *hardware* do sistema computacional simulado.

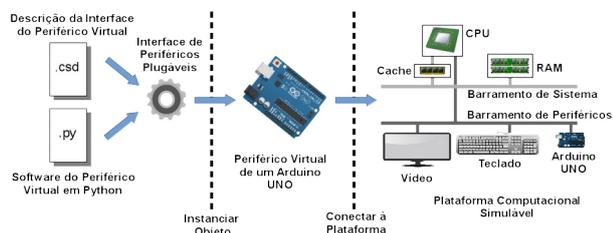


Figura 3. Criação de um periférico plugável e conexão à plataforma virtual.

O CompSim inclui um assistente para dar suporte à criação de novos periféricos, chamado de “*Device Interface Creator*” (ilustrado na Figura 4). Basicamente, ele consiste de um formulário, que deve ser preenchido, pelo projetista, com as informações da interface do novo periférico. Em seguida, o assistente gera automaticamente os respectivos arquivos “*.csd*” e “*.py*”, ou, em outras palavras, cria o respectivo Módulo de E/S. Deste ponto em diante, para concluir a criação do novo periférico, o projetista deve apenas focar no desenvolvimento de seu comportamento funcional, ao complementar sua codificação no arquivo-fonte “*.py*”.

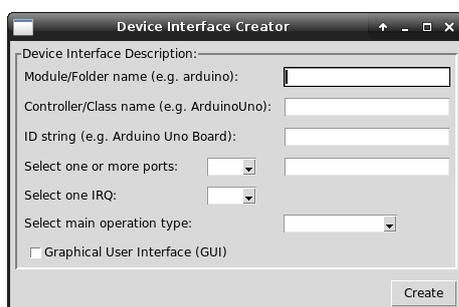


Figura 4. Assistente de criação de interface de periféricos.

Atualmente, o CompSim conta oficialmente com os periféricos Teclado, Vídeo e Arduino UNO, como podem ser vistos nas Figuras 5(A), (B) e (C), respectivamente. Os periféricos Teclado e Vídeo foram definidos como virtuais (desenvolvidos apenas em *software*), pois emulam os comportamentos dos reais. Cabe ressaltar, que o periférico Teclado possui duas versões, onde diferem pelo mecanismo de interação com o processador (um por *polling* e o outro por interrupções). Já o periférico Arduino UNO é dividido em dois submódulos, sendo que: o primeiro (*software*) implementa, em *software*, o Módulo de E/S e permite integração do dispositivo ao barramento de periféricos; e o segundo submódulo, que é o periférico propriamente dito, consiste de uma *board* física da plataforma aberta de prototipação Arduino modelo UNO [9]. Desta forma, é possível criar cenários de projetos de sistemas computacionais onde pode-se realizar a simulação da

plataforma computacional virtual interagindo com hardware real. Com o apoio do Arduino UNO, é possível criar, de forma simplificada, diferentes periféricos físicos para a plataforma virtual, com apoio de diferentes componentes eletrônicos, tais como resistores, capacitores, chaves, *leds*, *displays*, sensores, motores, entre outros.



Figura 5. Periféricos do CompSim.

#### 4. Metodologia

Após um levantamento do estado da arte em simuladores computacionais, verificou-se que o tema Subsistemas de E/S ou não é tratado adequadamente – na maioria dos simuladores utiliza-se abstrações que, em certa medida, tratam os conceitos fundamentais tangencialmente – ou não é abordado.

Nesse sentido, para o desenvolvimento do Subsistema de E/S do simulador CompSim, inicialmente, foi necessário realizar um levantamento teórico aprofundado sobre o tema de E/S em projetos de sistemas computacionais. Nesse estudo, avaliou-se a arquitetura de diferentes processadores, multiprocessadores e microcontroladores reais, onde levantou-se suas principais características relacionadas à E/S. Em seguida, buscou-se aplicar abordagens de modularização (desenvolvimento baseado em componentes, padrões de projeto, entre outros) para definir a interface dos componentes de *software* que modelam os periféricos. Com isso, foi possível simplificar o desenvolvimento de novos periféricos e torná-los automaticamente conectáveis ao barramento virtual de periféricos do CompSim.

Para avaliação dos mecanismos definidos para o Subsistema de E/S proposto, foram desenvolvidos exemplos de periféricos (ver seção anterior), os quais são utilizados como base na criação de novos. Uma vez que se pode disponibilizar, aos estudantes, os códigos-fonte dos periféricos apresentados na seção anterior, é possível tomá-los como base e utilizar seus principais conceitos de interface na criação de novos periféricos.

Por fim, a avaliação do suporte ao processo de ensino-aprendizagem é realizada através da aplicação de uma rubrica [10], onde os estudantes avaliam o suporte educacional e a experiência de uso do simulador. Da mesma forma, os professores das disciplinas avaliam se o suporte do simulador favorece diferentes aspectos pedagógicos.

#### 5. Discussão

O Simulador CompSim tem sido utilizado por estudantes de diferentes turmas de um curso de Técnico em Eletrônica e de um bacharelado em Sistemas de Informação. Com o Subsistema de E/S do CompSim, os estudantes lidam de maneira prática com os conceitos de

E/S na criação de diferentes tipos de periféricos virtuais (software) e físicos (*software* e *hardware*), bem como nos aspectos de sua programação, através da criação dos respectivos *device drivers*.

Entre os periféricos criados pelos estudantes, é possível agrupá-los em três categorias básicas, com respectivos exemplos: 1) Periféricos virtuais: sintetizadores de sons com uso do *buzzer* do computador, emuladores de periféricos, tais como *display* de 7 segmentos, *display* LCD 16x2, teclados numéricos, chaves e botões, e um Arduino UNO virtual; 2) Periféricos físicos analógicos: com o suporte da *board* do Arduino UNO e componentes eletrônicos, foi possível criar periféricos físicos para interação do usuário com os programas que executam no simulador, tais como saída digital em *leds* e *displays* de 7 segmentos, entrada de dados digitais pelo uso de teclados numéricos e chaves tácteis, e entrada analógica pelo uso de potenciômetros e sensores (luz, temperatura e umidade); 3) Periféricos físicos digitais: com suporte de uma *board* do Arduino UNO e uma *board* com FPGA (lógica digital reconfigurável), foi possível criar dispositivos digitais, tais como contadores digitais e registradores (*buffer*, deslocamento e carregamento paralelo de dados).

Ao final das disciplinas, um total de 54 estudantes se voluntariou para avaliar o processo de aprendizado de Subsistemas de E/S pelo uso dos recursos do CompSim. Numa escala de 1 a 4, eles destacaram positivamente que: 1) favoreceu o aprendizado de conceitos em E/S pelo desenvolvimento do pensamento de alto nível (méd. 3,8, desv. pad. 0,5); 2) dinamizou o ambiente de laboratório (méd. 3,8, desv. pad. 0,4); 3) adequou-se aos conteúdos curriculares dos respectivos cursos e ao nível escolar (méd. 3,7, desv. pad. 0,5); e 4) a disponibilidade de materiais complementares, tais como componentes eletrônicos e exemplos de códigos-fonte, permitiu auxiliar o aprendizado no uso do simulador e dos conteúdos curriculares (méd. 3,7, desv. pad. 0,4). Do ponto de vista pedagógico, foi possível constatar um aumento significativo na motivação, participação em aulas práticas, produtividade e desempenho geral das turmas, além da redução da evasão nas disciplinas.

## 6. Conclusões

Este artigo apresenta uma proposta de uso do simulador CompSim para suporte ao aprendizado de conceitos de Subsistemas de E/S em projetos de sistemas computacionais. O simulador proposto inclui uma plataforma virtual de hardware e uma interface de software de E/S que permite conectar novos periféricos (virtuais e físicos), de forma automatizada, à plataforma.

Durante as práticas laboratoriais, os estudantes são estimulados a criar periféricos diversificados, utilizando diferentes recursos (e.g. linguagem de programação Python, Arduino UNO e componentes eletrônicos), e com isso aplicar os conceitos aprendidos nas aulas teóricas. Os resultados mostraram que a abordagem proposta trouxe resultados efetivos no processo de

ensino-aprendizagem em Subsistemas de E/S, além de aumentar a motivação e participação, e reduzir a evasão.

## Bibliografia

- [1] ACM. Association for Computing Machinery; IEEE Computer Society. (2013) Curriculum Guidelines for Undergraduate Degree Programs in Computer Science.
- [2] Zorzo, A. F.; Nunes, D.; Matos, E.; Steinmacher, I.; Leite, J.; Araujo, R. M.; Correia, R.; Martins, S. (2017) Referenciais de formação para os cursos de graduação em computação. In: Sociedade Brasileira de Computação (SBC), 153p.
- [3] Larraza-Mendiluze, E.; Garay-Vitoria, N. (2014) Approaches and tools used to teach the computer input/output subsystem: A survey. *IEEE Transactions on Education* 58(1): 1-6. DOI: [10.1109/TE.2014.2310711](https://doi.org/10.1109/TE.2014.2310711).
- [4] Fernandes, S. R.; Silva, I. S. (2017) Relato de Experiência Interdisciplinar Usando MIPS. *International Journal of Computer Architecture Education (IJCAE)* 6(1): 52-61.
- [5] Penna, P. H.; Freitas, H. C. (2013) Análise e Avaliação de Simuladores de Sistemas Completos para o Ensino de Arquitetura de Computadores. *International Journal of Computer Architecture Education (IJCAE)* 2(1): 13-16.
- [6] Duenha, L.; Azevedo, R. (2016) Utilização dos Simuladores do MPSoCBench para o Ensino e Aprendizagem de Arquitetura de Computadores. In: *International Journal of Computer Architecture Education (IJCAE)* 5(1): 26-31.
- [7] Esmeraldo, G. A. R. M.; Mendes, C. S. R. ; Cartaxo, L. F.; Lisboa, E. B. (2019) Apoio ao Aprendizado em Arquitetura e Organização de Computadores: Um Estudo Comparativo entre Simuladores Computacionais. *Revista Tecnologias na Educação* 31: 1-17.
- [8] Stallings, W. (2017) *Computer Organization and Architecture*. 10th Edition. Pearson.
- [9] Badamasi, Y. A. (2014). The working principle of an Arduino. In: Proc. 2014 11th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO), p. 1-4. IEEE.
- [10] Yuan, M.; Recker, M. (2015) Not all rubrics are equal: A review of rubrics for evaluating the quality of open educational resources. *The International Review of Research in Open and Distributed Learning* 16(5): 16-38.
- [11] COMPSIM. CompSim – The Computer Simulator. Disponível em: <<http://compsim.crato.ifce.edu.br/>>. Acesso em: 20 maio 2020.