Ano 11 – Número/vol. 30– novembro/2019

ISSN: 1984-4751

Revista Tecnologias na Educação

Apoio ao Aprendizado em Arquitetura e Organização de Computadores: Um Estudo Comparativo entre Simuladores Computacionais

Guilherme Álvaro Esmeraldo[1],

Cícero Samuel Rodrigues Mendes[2],

Lucas Fontes Cartaxo[3],

Edson Barbosa Lisboa[4]

RESUMO

Este artigo apresenta um estudo comparativo de simuladores utilizados para apoio à disciplina de arquitetura e organização de computadores, a fim de identificar, de acordo com um conjunto de métricas preestabelecidas, suas potencialidades e deficiências no processo de ensino-aprendizagem, bem como se possibilitam a aquisição de habilidades práticas, as quais são fundamentais para o exercício da profissão. De acordo com os resultados, pôde-se constatar que a maioria dos simuladores não atendem às métricas utilizadas e que há necessidade de maiores esforços com o objetivo de tratar aspectos de acessibilidade e metodológicos.

Palavras-chave: Organização e Arquitetura de Computadores. Apoio Pedagógico. Simulador. Estudo Comparativo.

1. Introdução

Arquitetura e Organização de Computadores (AOC) é uma disciplina presente em cursos técnicos, tecnológicos e de engenharias, tanto na área de computação, quanto em elétrica/eletrônica. Em geral, seu conteúdo apresenta uma complexidade crescente em função

[1]IFCE – Instituto Federal do Ceará – guilhermealvaro@ifce.edu.br
[2]IFCE – Instituto Federal do Ceará – mr.samuelmendes@gmail.com
[3]IFCE – Instituto Federal do Ceará – lfonteesc@gmail.com
[4]IFS – Instituto Federal de Sergipe – edson.lisboa@academico.ifs.edu.br

do nível de detalhamento e abrangência a serem consideradas na abordagem pedagógica adotada. Além disso, por se tratar de uma disciplina fundamental em tais áreas, deve estar alinhada às novas tendências tecnológicas, como computação paralela e internet das coisas (GHAFARIAN, 2016).

Em AOC, uma abordagem metodológica adequada mescla os aspectos teóricos com um conjunto de experimentos que visam, além de sedimentar o conteúdo, o desenvolvimento de habilidades práticas imprescindíveis para os desafios demandados no exercício profissional (BLACK, 2016). Os aspectos práticos da disciplina podem ser desenvolvidos utilizando laboratórios especializados, os quais pressupõem a disponibilidade de hardware real (componentes eletrônicos, ferramentas, placas de circuitos, modernos equipamentos de testes e medições, etc.), o que podem encarecer o ambiente e necessitar de apoio técnico especializado para a sua montagem e manutenção. Para contornar este problema, como uma alternativa aos laboratórios físicos, na literatura tem-se optado pelo uso de simuladores computacionais como ferramenta de apoio ao aprendizado em AOC.

Os simuladores são ambientes virtuais de aprendizagem que podem emular computadores completos e viabilizam o estudo de sua programação e de seus componentes, e respectivas funções e interconexões. Os simuladores computacionais têm sido utilizados no aprendizado em AOC, ao longo dos anos, por permitirem a aplicação dos conceitos aprendidos em sala de aula em cenários que se assemelham aos reais, através do emprego de abstrações, além de possibilitarem o estudo assíncrono e dinamizar o aprendizado ao oferecerem configurações rápidas e resultados instantâneos (ESMERALDO, LISBOA, 2017).

Ainda na literatura, estão disponíveis diferentes simuladores computacionais, sendo que cada um deles possui suas próprias particularidades (KURNIAWAN; ICHSAN, 2017). Entre eles, estão os de:

1. Sistema completo (PENNA; FREITAS, 2013), que são os que incluem todos os componentes do computador, como processador, memórias, barramentos e periféricos de entrada/saída;

2. Ferramentas com propósitos específicos, tais como para simulação de componentes específicos, como os de memória cache (CORDEIRO et al., 2003), simulação de

circuitos digitais em geral, como o apresentado em (DONZELLINI; PONTA, 2007), e desenvolvimento de projetos profissionais de hardware, como o exposto em (KLEITZ, 2006).

Para apoiar o processo de ensino-aprendizagem, a metodologia ideal deve empregar o uso de bons simuladores que apresentem cenários próximos aos reais, mas que possibilitem a interação com o hardware real para o desenvolvimento de habilidades práticas plenas. Black (2016) afirma que o contato com os componentes eletrônicos físicos incentiva o aprendizado de todas as fases de desenvolvimento de um sistema computacional digital e de seus periféricos.

Nesse contexto, este trabalho apresenta um estudo comparativo entre simuladores computacionais presentes no estado da arte, com o objetivo de explorar suas potencialidades e deficiências para apoio aos processos de ensino-aprendizagem em Arquitetura e Organização de Computadores.

O artigo está dividido da seguinte maneira: a próxima seção apresenta os recursos metodológicos utilizados para a realização deste estudo; A Seção 3 descreve as métricas utilizadas para comparação entre simuladores; Na Seção 4, são sumarizados os resultados da análise comparativa; e, por fim, a Seção 5 apresenta as conclusões finais.

2. Materiais e Métodos

A Sociedade Brasileira de Computação (SBC) definiu um conjunto de diretrizes curriculares para cursos na área de Computação, as quais sugerem os principais tópicos para a disciplina de Arquitetura e Organização de Computadores (ROCHA et al., 2005). De uma forma geral, esses tópicos estão divididos em três grupos: 1) a estrutura dos componentes dos computadores, suas funções e modelos de interconexões; 2) a programação do computador em linguagem de máquina (baixo nível), considerando o conjunto de instruções do computador, a localização dos dados em memória e os diferentes modelos de operações de entrada/saída de dados; e 3) diferentes aspectos concernentes ao desempenho computacional. Neste trabalho, realizou-se inicialmente, com base nesses três grupos de tópicos, uma pesquisa bibliográfica

sobre a utilização de simuladores computacionais para apoio à disciplina de Organização e Arquitetura de Computadores.

Visando refinar os resultados da pesquisa, optou-se por selecionar simuladores de sistemas completos (PENNA; FREITAS, 2013), em que, ao final desta etapa, selecionou-se um total de 16 simuladores, os quais foram divididos em quatro categorias, de acordo com seu objetivo:

- 10 deles foram desenvolvidos exclusivamente para apoio educacional: BIPIDE (VIEIRA; RAABE; ZEFERINO, 2009), COMPSIM (ESMERALDO; LISBOA, 2017), CPU SIM (SKRIEN, 2001), DIMIPSS (FELIX; SOUZA; CARVALHO, 2006), MARIE (NULL; LOBUR, 2003), MARS (VOLLMAR; SANDERSON, 2006), SIMAEAC (VERONA; MARTINI; GONÇALVES, 2009), SIMUS (SILVA; BORGES, 2017), SOIS (CRUZ et al., 2008) e YASS (MUSTAFA, 2013);

- 4 deles suportam a execução de sistemas operacionais completos: BOCHS (BOCHS, 2017), GEM5 (BUTKO et al., 2012), MARSS (PATEL et al., 2011) e SIMICS (MAGNUSSON et al., 2002) ;

- 1 deles é descrito em linguagem de descrição de hardware (HDL) para execução direta em plataformas de hardware reconfigurável: CMIPS (HEXSEL; CARMO, 2013); e

- O último foi criado para suportar a execução de aplicações de computação intensiva, as quais necessitam de alto desempenho e precisão dos resultados: ESESC (ARDESTANI; RENAU, 2013).

A próxima etapa consistiu em definir um conjunto de métricas para análise e comparação dos simuladores. Observa-se que, na literatura, há trabalhos que comparam os simuladores computacionais sob diferentes características, como os apresentados em (PENNA; FREITAS, 2013) (NIKOLIC et al., 2009) (AKRAM; SAWALHA, 2016) (WOLFFE et al., 2002) (VIEIRA; RAABE; ZEFERINO, 2009). Nesses trabalhos, as métricas apontadas, em sua grande maioria, tratam de dois tipos de aspectos, relacionados: 1) aos simuladores em si, como desempenho e precisão de simulação, uso de abstrações na codificação de software dos componentes simulados, interfaces gráficas e licenças de

distribuição de software; e 2) ao suporte a recursos mais avançados de simulação, como simulação de diferentes arquiteturas de hardware, projeto de circuitos digitais e recursos de computação paralela. Assim, neste artigo, considerando um curso básico de AOC, definiu-se um conjunto de métricas para comparação dos simuladores, com base nos estudos comparativos da literatura, nos tópicos apontados pela SBC e no suporte educacional (a seção a seguir descreve cada uma das métricas propostas).

Ao final, realizou-se uma análise de cada um dos simuladores selecionados, sob face das métricas de comparação elencadas na etapa anterior. O objetivo consistiu em destacar aqueles com maior potencial de apoio ao processo de ensino-aprendizagem em AOC, bem como identificar quais métricas são fundamentais e aquelas que necessitam de maiores esforços para caracterização de um simulador mais adequado.

3. Métricas de Comparação

As métricas de comparação adotadas neste trabalho abrangem:

- Macrogrupos de conteúdos que devem ser trabalhados na disciplina de AOC, segundo a SBC, que são o estudo dos componentes do computador, programação em nível de máquina e análise de desempenho (ressalta-se que cada um desses grupos de tópicos permitiu criar um grupo individual de métricas);

- Aspectos de simulação, visto que, como o simulador tem sido adotado como uma alternativa aos laboratórios especializados, compreende-se que o mesmo torna-se parte fundamental no processo de ensino-aprendizagem;

- Suporte ao desenvolvimento das habilidades práticas, as quais considera-se fundamentais para o exercício da profissão;

- Aspectos de acessibilidade e usabilidade, importantes para permitir o uso do simulador por diferentes tipos de públicos e com diferentes níveis de habilidades;

- Suporte ao processo de ensino-aprendizagem, no qual caracteriza-se o modelo pedagógico proposto pelo uso do simulador.

Essas métricas foram divididas em 7 grupos, cujas descrições são dadas a seguir:

Grupo 1. Componentes do Computador

Id.	Métrica	Descrição
G1.1	**Plataforma computacional**	Presença dos principais componentes de um computador no simulador, como processador, memórias principal e cache, barramento e periféricos.
G1.2	**Granularidade**	Detalhes das características dos componentes do computador no simulador, como, por exemplo, componentes internos do processador (registradores, unidade de controle e ULA), estruturas internas de memórias (blocos, linhas e colunas, endereçamento de linha e coluna) e diferentes mecanismos de mapeamento em memórias cache (direto e por conjunto)
G1.3	**Parametrização**	Presença de mecanismos que permitam a configuração das características dos componentes do computador no simulador.

Fonte: Autores

Grupo 2. Programação em Baixo Nível

Id.	Métrica	Descrição
G2.4	**Programação em Assembly**	Possibilidade de programação em linguagem de baixo nível do computador no simulador.
G2.5	**Identificação de erros no programa**	Presença de mecanismos que realizem análise e apresentem diferente tipos de erro (léxicos, sintáticos e/ou semânticos), se presentes no programa em linguagem de baixo nível.
G2.6	**Ferramentas de suporte à codificação em baixo nível**	Presença de mecanismos que simplifiquem a codificação de novos programas em baixo nível. São exemplos desses recursos: editores de código, mecanismos auxiliares de programação e de refatoração de código, entre outros.

Fonte: Autores

Grupo 3. Simulação

Id.	Métrica	Descrição

G3.7	**Modos de simulação**	Suporte de diferentes modos de simulação, como, por exemplo, simulação passo-a-passo ou contínua, para que o estudante possa optar entre simulação detalhada ou com maior desempenho.
G3.8	**Visualização do programa**	Mecanismos para visualização do estado do programa durante uma simulação, como, por exemplo, visualização dos conteúdos das variáveis, estruturas de dados e da pilha do programa.
G3.9	**Visualização de componentes**	Visualização dos estados dos componentes do computador no simulador, como os conteúdos dos registradores do processador, dados armazenados nos diferentes endereços de memória, linhas acessadas na memória cache, entre outros.
G3.10	**Visualização de comunicação**	Visualização dos processos de comunicação entre os componentes do computador no simulador, como por exemplo, tipos de operações sendo realizadas no barramento e dados trocados entre processador, memórias e periféricos.
G3.11	**Animação do caminho de dados**	Uso de animações gráficas do caminho de dados do computador no simulador, visando simplificar a compreensão das funções e estruturas internas dos componentes do computador.

Fonte: Autores

Grupo 4. Análise de Desempenho

Id.	Métrica	Descrição
G4.12	**Perfis de simulação**	Mecanismo para registro da sequência de eventos gerados pelos componentes do computador no simulador, durante uma simulação, para verificação detalhada de gargalos de desempenho.
G4.13	**Estatísticas de simulação**	Mecanismo para sumarização dos eventos gerados pelos componentes do computador no simulador, durante uma simulação, para verificação em alto nível de gargalos de desempenho.

Fonte: Autores

Grupo 5. Apoio ao Desenvolvimento de Habilidades Práticas

Id.	Métrica	Descrição
G5.14	**Integração com hardware físico**	Integração do computador no simulador com hardware físico, visando estabelecer cenários mais complexos para o aprendizado em AOC e em projetos de sistemas

		computacionais.

Fonte: Autores

Grupo 6. Acessibilidade e Usabilidade

Id.	Métrica	Descrição
G6.15	**Interface gráfica**	Presença de interface com componentes e controles gráficos que permitam simplificar a interação com o simulador. Os componentes gráficos podem ser utilizados desde a configuração do computador até a realização de simulações no simulador.
G6.16	**Personalização da interface**	Suporte de mecanismos para ajustes da interface gráfica, como a personalização de cores e do tamanho da fonte de texto do ambiente de simulação.

Fonte: Autores

Grupo 7. Processo de Ensino-Aprendizagem

Id.	Métrica	Descrição
G7.17	**Metodologia de ensino-aprendizagem**	Disponibilidade de proposta de metodologia pedagógica de uso do simulador para apoio ao aprendizado em AOC.
G7.18	**Materiais didáticos complementares**	Disponibilidade de mídias alternativas de apoio ao aprendizado em AOC por uso do simulador, como tutoriais, slides de aulas, videoaulas, exemplos de programas em linguagem de baixo nível, etc.
G7.19	**Canal de apoio**	Disponibilidade de canal de comunicação para fomentar discussões entre participantes do projeto do simulador e usuários (docentes e estudantes), para compartilhamento de experiências, materiais didáticos, projetos, aplicações práticas, entre outros.

Fonte: Autores

4. Discussão e Análise dos Resultados

O Quadro 1, a seguir, sumariza o resultado do estudo comparativo entre simuladores. No Quadro 1, os simuladores estão dispostos, na coluna mais à esquerda, em grupos

relacionados aos seus objetivos principais: S1) educacional, S2) suporte a sistema operacional, S3) descrito em HDL e S4) suporte à computação intensiva. Nas demais colunas, estão dispostos os grupos de métricas (G1 ao G7), com as respectivas métricas.

Quadro 1. Comparativo entre simuladores de sistemas completos.

SIMULADOR		Métricas																		
		G1			G2			G3					G4		G5	G6		G7		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Educacional (S1)	BIPIDE	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓
	COMPSIM	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	CPU SIM	-	-	-	✓	✓	✓	-	✓	✓	-	-	-	-	-	✓	✓	-	✓	-
	DIMIPSS	-	-	-	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	-	-	✓	-	-	-	-
	MARIE	-	-	-	✓	✓	-	✓	-	✓	-	✓	✓	-	-	✓	-	-	✓	-
	MARS	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	✓	-	-	✓	✓
	SIMAEAC	-	-	-	✓	-	-	✓	-	✓	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-
	SIMUS	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	-	-	✓	-
	SOIS	✓	-	-	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	-	-	✓	-	✓	-	-	-	-
	YASS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	-	-	-	-	✓	-	-	-	-
Suporte a sistema operacional (S2)	BOCHS	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	✓
	GEM5	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	-	✓
	MARSS	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	-	✓
	SIMICS	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	-	✓	-	-	✓	-	-	-	✓
HDL(S3)	CMIPS	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	-	-	-	-	-
Comp. Intensiva (S4)	ESESC	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	-	✓

Legenda: ✓ = suporta a métrica; - = não suporta a métrica.

Fonte: Autores

Analisando o Quadro 1, pode-se constatar que os macrotópicos da disciplina de AOC, que são o estudo dos componentes do computador, programação em nível de máquina e análise de desempenho, apontados pela SBC e, neste estudo, cobertos pelos grupos de métricas G1, G2 e G4, respectivamente, são parcialmente tratados pelos simuladores.

Os simuladores do grupo S1, não suportam, de uma forma geral, as métricas do grupo G1. Eles buscam estabelecer um compromisso entre o detalhamento dos componentes simuláveis e os aspectos de simulação para favorecer o processo de aprendizado pelo acompanhamento da execução do sistema computacional, cujas métricas estão presentes e parcialmente cobertas no grupo G3 (Simulação). Por outro lado, os simuladores dos demais grupos (S2 ao S4) suportam todas as métricas do G1, objetivando fidelizar as características

do hardware simulado para favorecer seus objetivos individuais (suportar execução de sistemas operacionais, execução em hardware e simulação de aplicações de alto de desempenho e precisão, respectivamente). Com isso, nos grupos S2 ao S4, prejudica-se o suporte às métricas do grupo G3.

Analisando o grupo de métricas G2, percebe-se que todos os simuladores avaliados suportaram a métrica 4 (Programação em Assembly), o que mostra uma preocupação no aprendizado dos tópicos de arquitetura de computadores e suporte à execução de aplicações reais em nível de máquina. As métricas 5 e 6, do grupo G2, estão diretamente associadas ao suporte ao aprendizado em programação em nível de máquina, sendo estas quase que completamente suportadas pelos simuladores em S1 e não suportados pelos demais grupos.

O suporte à análise de desempenho, um dos três macrogrupos de tópicos elencados para a disciplina de AOC pela SBC, tratada pelas métricas do grupo G4, é favorecido pelos simuladores em S2 ao S4. Percebe-se, nesse sentido, uma carência de recursos para aprendizado em otimização de desempenho computacional nos simuladores em S1.

Já o suporte ao desenvolvimento de habilidades práticas, através da integração do simulador com dispositivos físicos de hardware, coberto pela métrica 14, em G5, está sendo tratado por apenas 3 simuladores, sendo dois deles do grupo S1 (COMPSIM e SIMUS) e um do S3 (CMIPS). Observa-se que, para a integração, foram consideradas as diferentes abordagens, sendo elas: execução do simulador em sistema computacional embarcado (SIMUS), uso de plataforma aberta de prototipação como periférico (COMPSIM) e execução em FPGA (CMIPS). Esses resultados remetem à necessidade de mais esforços para suportar essa área pelos simuladores, visto que está diretamente relacionada à aplicação dos conceitos da disciplina de AOC e desenvolvimento das respectivas habilidades práticas.

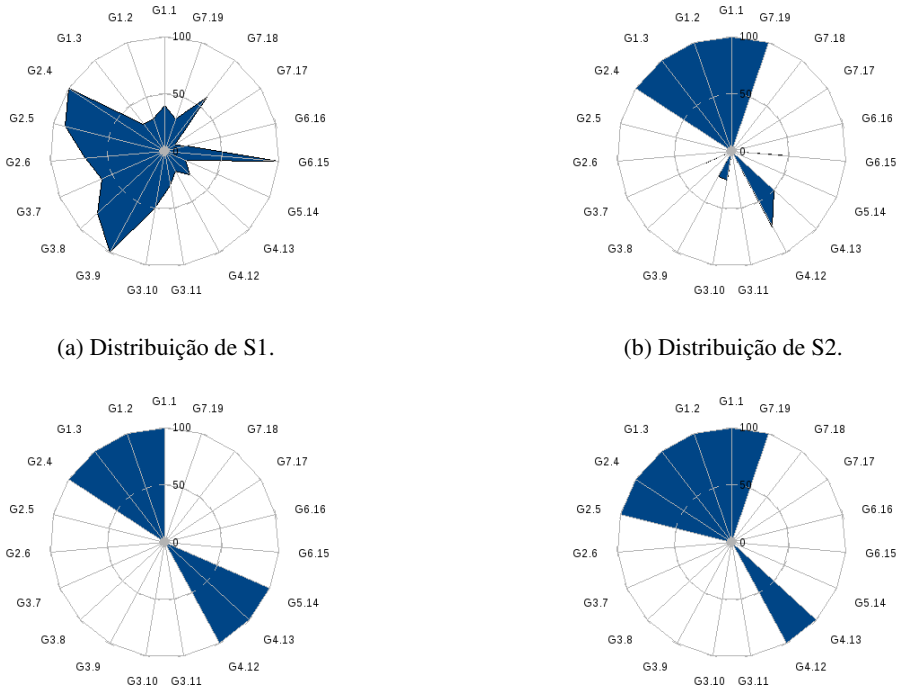
Em termos de acessibilidade e usabilidade (métricas do grupo G6), todos os simuladores em S1 e metade dos em S2 incluem interfaces gráficas e, de uma forma geral, não são personalizáveis. Nesse sentido, percebe-se que, para todos os simuladores, são necessários mais estudos na área de Interação Homem-Máquina (IHM), pois ressalta-se que o uso de interfaces gráficas é um recurso importante que pode simplificar e maximizar as habilidades de uso do simulador, bem como trazer um feedback mais rápido e natural sobre as

ações realizadas. Da mesma forma, a personalização da interface permite aumentar os níveis de compreensão das operações do simulador além de trazer experiências mais agradáveis.

Analisando o último grupo de métricas (G7), o qual está relacionado diretamente ao processo de ensino-aprendizagem, percebe-se uma grande deficiência, pois os simuladores, em quase sua totalidade, não oferecem uma metodologia de apoio ao uso de simulador nas aulas da disciplina de AOC. Os materiais didáticos complementares, na grande maioria, tratam de aspectos de simulação e/ou estão relacionados diretamente ao simulador, e não em aprendizagem em AOC, bem como muitos dos simuladores não oferecem canais de comunicação, em que poderiam ser estabelecidos diálogos com desenvolvedores e entre usuários, para maximizar o aprendizado, compartilhar experiências do uso do simulador, bem como sugerir e discutir modificações e inclusão de novos recursos (de interface gráfica, de programação, de simulação, pedagógicos, entre outros).

A Figura 1 traz gráficos de rede que tratam cada grupo de simuladores e o percentual de atendimento a cada métrica dos grupos G1 ao G7.

Figura 1. Gráficos de rede: distribuição de métricas por grupos de simuladores.



(a) Distribuição de S1.

(b) Distribuição de S2.

(c) Distribuição de S3.

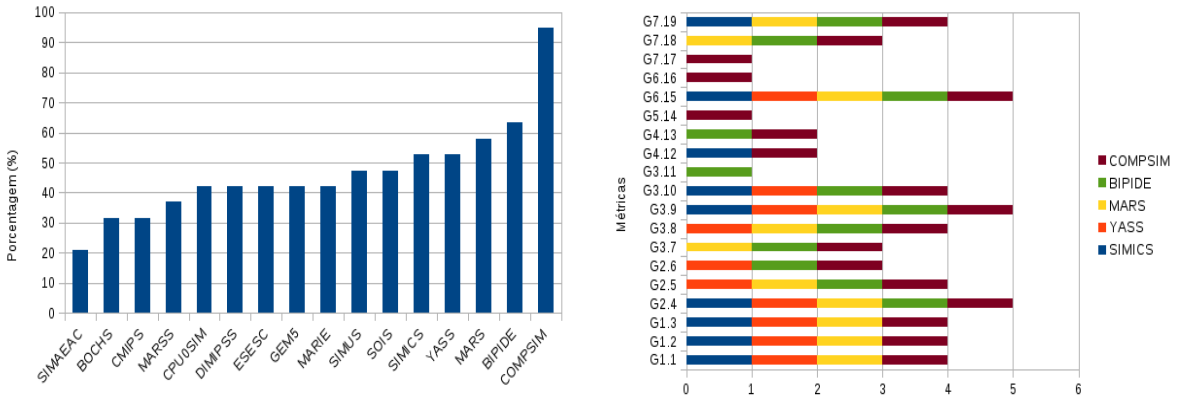
(d) Distribuição de S4.

Fonte: Autores

No gráfico da Figura 1(a), observa-se que a maior parte dos simuladores do grupo S1 buscaram atender às métricas contidas nos grupos G2 (programação em baixo nível) e G3 (simulação), e, uma pequena parte, às métricas dos grupos G1 (componentes do computador), G6 (acessibilidade e usabilidade) e G7 (processo de ensino-aprendizagem). Ao analisar os gráficos das Figuras 1(b), 1(c) e 1(d), percebe-se que os simuladores dos grupos S2, S3 e S4 buscaram atender às métricas dos grupos G1 (componentes do computador), às métricas 12 e 13 do G4 (análise de desempenho), e à métrica 4 (programação em Assembly) do grupo G2. Dessa análise, percebe-se que os simuladores do grupo S1, ao incluírem um maior número de recursos didáticos, tornam-se melhores candidatos para apoio às disciplinas de AOC. Entretanto, percebe-se que, de uma forma geral, esse grupo apresenta várias deficiências – tais como, a ausência de maior granularidade dos componentes simulados, suporte à análise de desempenho e integração com hardware físico – sendo assim necessário realizar uma análise individual dos simuladores.

A Figura 2(a) apresenta um gráfico de barras, onde pode-se visualizar a distribuição de porcentagens de métricas atendidas pelos simuladores.

Figura 2. Simuladores versus métricas atendidas.



(a) Distribuição de métricas atendidas pelos simuladores (b) Métricas atendidas pelos simuladores melhores avaliados.

Fonte: Autores

Na Figura 2(a), o gráfico dispõe os simuladores analisados em ordem crescente de acordo com a porcentagem de atendimento às métricas. No gráfico, dentre os simuladores, apenas 5 deles atenderam a mais de 50% das métricas propostas, onde um deles pertence ao grupo S2 — SIMICS (52,6%) —, e quatro ao grupo S1, YASS (52,6%), MARS (57,8%), BIPIDE (63,1%) e COMPSIM (94,7%). Já a Figura 2(b) apresenta um gráfico de barras empilhadas, onde pode-se verificar quais métricas foram atendidas por cada um desses cinco simuladores.

Na Figura 2(b), as métricas 4 (programação em Assembly), 9 (visualização dos estados dos componentes) e 15 (interface gráfica) foram atendidas pelos 5 simuladores e, consequentemente, podem ser caracterizadas como fundamentais a um bom simulador para apoio à disciplina de AOC. Por outro lado, analisando as métricas que tiveram menor cobertura, percebe-se a existência de lacunas no apoio ao processo de ensino-aprendizagem e, consequentemente, necessitam de emprego de maiores esforços, visto que, as métricas 11 (animação do caminho de dados) e 16 (personalização da interface) estão ligadas à acessibilidade, bem como as métricas 14 (integração com hardware físico) e 17 (metodologia de ensino-aprendizagem) estão diretamente relacionadas à abordagem pedagógica em AOC.

5. Conclusões

Arquitetura e organização de computadores é uma disciplina com conteúdos extensos e complexos, bem como necessita de laboratórios especializados para suporte ao desenvolvimento das habilidades práticas. Visando dirimir a dificuldade em compor tais laboratórios, que são caros e necessitam de apoio técnico especializado, na literatura, tem-se optado pelo uso dos simuladores computacionais. Este trabalho realizou um estudo comparativo entre diferentes tipos de simuladores de sistemas completos, que são aqueles que incluem todos os componentes do computador, sob grupos de métricas, elaboradas a partir de estudos comparativos da literatura, nos tópicos base da disciplina, apontados pela SBC, e em aspectos de suporte educacional.

Os resultados mostraram que as métricas propostas neste estudo estão parcialmente tratadas pelos grupos de simuladores estudados. Os simuladores educacionais apresentaram grande potencial em suporte à programação em baixo nível e simulação do computador, enquanto que os demais apresentaram granularidade nos componentes do computador e suporte à análise de desempenho. Dentre os simuladores que trataram a maior parte das métricas, destacaram-se, como métricas predominantes, o suporte à programação em baixo nível, visualização dos estados dos componentes e interface gráfica, enquanto que observou-se a necessidade de mais estudos para suportar aspectos de acessibilidade dos simuladores e metodológicos da disciplina.

6. Referências Bibliográficas

AKRAM, A.; SAWALHA, L. **x86 computer architecture simulators: a comparative study**. IEEE 34th International Conference on Computer Design (ICCD), 2016.

ARDESTANI, E. K.; RENAU, J. ESESC: **A fast multicore simulator using time-based sampling**. 2013 IEEE 19th International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA), 2013. p. 448-459.

BLACK, M. Export to arduino: a tool to teach processor design on real hardware. **Journal of Computing Sciences in Colleges**, 31(6), 2016. p.21-26.

BOCHS. **The Bochs IA-32 Emulator Project**, 2017. Disponível em: <http://bochs.sourceforge.net>. Acesso em: 12 out. 2019.

BUTKO, A.; GARIBOTTI, R.; OST, L.; SASSATELLI, G. **Accuracy evaluation of gem5 simulator system**. 7th International Workshop on Reconfigurable and Communication-Centric Systems-on-Chip (ReCoSoC), 2012. p. 1-7.

CORDEIRO, E. S.; STEFANI, I. G.; SOARES, T. C.; MARTINS, C. A. **DCMSim: Didactic cache memory simulator**. 33rd Annual Frontiers in Education. Vol. 2, 2013. p. F1C 14-19.

CRUZ, E. H. M.; FOLEISS, J. H.; ASSUNÇÃO, G. P.; GONÇALVES, R. A. L. **Ferramenta de Simulação de Processador para Ensino de Graduação e Pesquisa Científica**. Anais SULCOMP, v. 4, 2008.

DONZELLINI, G.; PONTA, D. A simulation environment for e-learning in digital design. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 54(6), 2007. p. 3078-3085.

ESMERALDO, G.; LISBOA, E. B. Uma Ferramenta para Exploração do Ensino de Organização e Arquitetura de Computadores. **International Journal of Computer Architecture Education**, v. 6., 2017. p. 68-75.

FELIX, A.; POUSA, C.; CARVALHO, M. DIMIPSS: **Um simulador didático e interativo do MIPS**. Workshop sobre Educação em Arquitetura de Computadores, 2006. p. 49-52.

GHAFARIAN, R. Microelectronics packaging technology roadmaps, assembly reliability, and prognostics. **Facta universitatis-series: Electronics and Energetics**, 29(4), 2016. p.543-611.

HEXSEL, R. A.; CARMO, R. cMIPS – uma Ferramenta Pedagógica para o Estudo de Arquitetura. **International Journal of Computer Architecture Education**. v.2, n.1, 2013. p. 29 -32.

KLEITZ, W. **Digital Electronics with VHDL, Quartus II Version**. Pearson Prentice Hall, 2016.

KURNIAWAN, W.; ICHSAN, M. H. H. **Teaching and learning support for computer architecture and organization courses design on computer engineering and computer science for undergraduate: A review**. 4th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI), 2017. p. 1-6.

MAGNUSSON, P. S.; CHRISTENSSON, M.; ESKILSON, J.; FORSGREN, D.; HALLBERG, G.; HOGBERG, J.; WERNER, B. Simics: A full system simulation platform. **Computer**, 35(2), 2002. p. 50-58.

MUSTAFA, B. YASS: A System Simulator for Operating System and Computer Architecture Teaching and Learning. **European Journal of Science and Mathematics Education**, v. 1, n. 1, 2013. p. 34-42.

NIKOLIC, B.; RADIVOJEVIC, Z.; DJORDJEVIC, J.; MILUTINOVIC, V. A. Survey and Evaluation of Simulators Suitable for Teaching Courses in Computer Architecture and Organization. **IEEE Transactions on Education**, Vol. 52, No. 4, 2009.

NULL, L.; LOBUR, J. MarieSim: The MARIE computer simulator. **Journal on Educational Resources in Computing (JERIC)**, 3(2), 1, 2003.

PATEL, A.; AFRAM, F.; CHEN, S.; GHOSE, K. **MARSS: a full system simulator for multicore x86 CPUs**. 2011 48th ACM/EDAC/IEEE Design Automation Conference (DAC), 2011. p. 1050-1055.

PENNA, P. H. M. M.; FREITAS, H. C. Análise e Avaliação de Simuladores de Sistemas Completos para o Ensino de Arquitetura de Computadores. **International Journal of Computer Architecture Education (IJCAE)**, v. 2, no. 1, 2013. p 13-16.

ROCHA, M. da G. B.; NICOLETTI, M. do C.; FABBRI, S. C. P. F.; BARROS, E. N. da S.; FRERY, A. C. **Currículo de Referência da SBC para Cursos de Graduação em Bacharelado em Ciência da Computação e Engenharia de Computação**. Relatório Técnico, Sociedade Brasileira de Computação (SBC), 2005.

SILVA, G. P.; BORGES, J. A. dos S. O Simulador SimuS na Plataforma Raspberry Pi. **International Journal of Computer Architecture Education (IJCAE)** v. 6, n. 1, 2017. p. 36-45.

SKRIEN, D.CPU Sim 3.1: A tool for simulating computer architectures for computer organization classes. **Journal on Educational Resources in Computing (JERIC)**, 1(4), 2001. p. 46-59.

VERONA, A. B.; MARTINI, J. A.; GONÇALVES, T. L. SIMAEAC: Um Simulador Acadêmico para Ensino de Arquitetura de Computadores. **Varia Scientia**, v. 9, n. 16, 2009. p. 139-148.

VIEIRA, P. V.; RAABE, A. L. A.; ZEFERINO, C. A. **Bipide: Ambiente de desenvolvimento integrado para utilização dos processadores bip no ensino de programação**. XX Simpósio Brasileiro de Informática na Educação (SBIE), 2009.

VOLLMAR, K.; SANDERSON, P. **MARS: an education-oriented MIPS assembly language simulator**. Proceedings of the 37th SIGCSE technical symposium on Computer science education (SIGCSE), Vol. 6, 2006. p. 239-243.

Recebido em Novembro 2019

Aprovado em Novembro 2019

W
O
L
F
F
E

.

S