

A IMPORTÂNCIA DO ENSINO DE LINGUAGENS DE BAIXO NÍVEL NO ENSINO DE SEGURANÇA DA INFORMAÇÃO

THE RELEVANCE OF LOW-LEVEL LANGUAGE TEACHING IN INFORMATION SECURITY EDUCATION

LA IMPORTANCIA DE LA ENSEÑANZA DE LENGUAJES DE BAJO NIVEL EN LA ENSEÑANZA DE LA SEGURIDAD DE LA INFORMACIÓN

Arthur Milani Pedro¹ (arthur.pedro@fatec.sp.gov.br)
Nathalia Maria Soares² (nathalia.soares@fatec.sp.gov.br)
João Emmanuel D'Alkmin Neves¹ (joao.neves11@fatec.sp.gov.br)

¹Fatec Araraquara - Prof. José Arana Varela

²Fatec Taquaritinga

Resumo

O presente artigo discute sobre a importância das linguagens de baixo nível, para o ensino de Segurança da Informação no âmbito do ensino superior. O ensino de linguagens de baixo nível em cursos de Segurança da Informação tem grande importância, já que o conhecimento desse tipo de programação leva a um maior entendimento de Arquitetura de Computadores e Sistemas Operacionais (SO). Essas matérias são de extrema importância para cursos de Tecnologia da Informação (TI), pois a partir delas é possível entender o funcionamento dos computadores e SOs de forma que, com tais conhecimentos, torna-se possível ter uma melhor compreensão de como os ataques podem ocorrer, assim facilitando o desenvolvimento de estratégias de defesa. Por meio de uma pesquisa exploratória quantitativa, a partir de um formulário on-line foram coletados os dados sobre a opinião da população estudada sobre o tema, transformados em gráficos e analisados, resultando em um relatório. Com a análise dos resultados, constatou-se que, por mais que a maior parte da população estudada não tenha conhecimento elevado sobre linguagens de baixo nível, consideram-se linguagens de baixo nível muito importante ou importante para o ensino de Segurança da Informação, além disso considera-se que deveria haver uma matéria sobre linguagens de baixo nível.

Palavras-chave: linguagens de baixo nível; segurança da informação; ensino superior.

Abstract

This article discusses the importance of low-level languages for teaching Information Security in higher education. Teaching low-level programming languages in Information Security courses is very important, since knowledge of this type of programming leads to a greater understanding of Computer Architecture and Operating Systems (OS). These subjects are extremely important for Information Technology (IT) courses, as they allow one to understand how computers and operating systems work, and with this knowledge, it becomes possible to better understand how attacks can occur, thus facilitating the development of defense strategies. Through an exploratory quantitative study, data on the opinion of the population studied on the topic was collected using an online form, transformed into graphs and analyzed, resulting in a report. Analysis of the results revealed that, although most of the studied population do not have advanced knowledge of low-level languages, they consider low-level languages very important or important for teaching Information Security, and furthermore, they believe there should be a subject dedicated to low-level languages.

Keywords: low-level languages; information security; higher education.

Resumen

Este artículo analiza la importancia de los lenguajes de bajo nivel para la enseñanza de la seguridad de la información en la educación superior. Enseñar lenguajes de programación de bajo nivel en los cursos de Seguridad de la Información es muy importante, ya que el conocimiento de este tipo de programación conduce a una mayor comprensión de la Arquitectura de Computadoras y los Sistemas Operativos (SO). Estas materias son extremadamente importantes para los cursos de Tecnologías de la Información (TI), ya que permiten comprender cómo funcionan las computadoras y los sistemas operativos, y con este conocimiento, se puede comprender mejor cómo pueden ocurrir los ataques, facilitando así el desarrollo de estrategias de defensa. Mediante un estudio cuantitativo exploratorio, se recopilaban datos sobre la opinión de la población estudiada acerca del tema utilizando un formulario en línea, se transformaron en gráficos y se analizaron, dando como resultado un informe. El análisis de los resultados reveló que, si bien la mayoría de la población estudiada no tiene conocimientos avanzados de lenguajes de bajo nivel, consideran que estos lenguajes son muy importantes o importantes para la enseñanza de la seguridad informática y, además, creen que debería haber una asignatura dedicada a ellos.

Palabras clave: lenguajes de bajo nivel; seguridad de la información; educación superior.

Introdução

Em um mundo cada vez mais globalizado, onde dados se consolidam como os ativos mais valiosos de uma empresa, torna-se evidente a demanda crescente por profissionais especializados em Segurança da Informação (SI). A partir dessa demanda originou-se uma discussão sobre os elementos necessários para uma melhor compreensão da SI e os conhecimentos necessários para desenvolvê-la de maneira eficiente. Estando os dados em sua maior parte armazenados em meios digitais, são conhecimentos necessários para a base da SI: entender o funcionamento da Arquitetura de Computadores e Sistemas Operacionais. Tomando estes fatores como base chegou-se a um item comum entre eles: as linguagens de programação de baixo nível, já que este tipo de linguagem dialoga com os fatores destacados, aprendê-las tem importância fundamental.

Partindo desse contexto, este trabalho traz o seguinte questionamento: como o ensino de linguagens de baixo nível pode melhorar a compreensão e habilidades de alunos de SI?

Baseando-se nessa problemática este trabalho busca observar as relações das linguagens de programação de baixo nível com disciplinas comuns nas graduações de SI, como Sistemas Operacionais e Arquitetura de Computadores, já que tais matérias desenvolvem uma interface entre questões de hardware e software por meio da interação do usuário com o SO, interação essa que é mais bem compreendida quando o funcionamento da arquitetura é entendido, de forma a demonstrar a importância das linguagens montadoras.

Além disso busca-se compreender o cenário atual do ensino de programação nos cursos de SI para entender o quão contente estão os discentes com as linguagens lecionadas, se os alunos entendem a importância das linguagens de baixo nível e se eles gostariam de ter como parte das disciplinas de programação, ou como uma disciplina por si só, conteúdo sobre tais linguagens.

Neste escopo, tem-se como objetivo analisar como o ensino de linguagens de baixo nível pode ajudar na formação de profissionais de SI a partir da opinião da população pesquisada em

relação à importância dessas linguagens no curso de e identificar as oportunidades e desafios relacionados ao tema.

Esta pesquisa justifica-se, pois o conhecimento das linguagens de baixo nível influencia a capacidade dos discentes de compreenderem temas como a arquitetura interna dos sistemas operacionais, a interação entre hardware e software e perícia forense em TI. Ao justificar a inclusão das linguagens de baixo nível no currículo de graduações em SI, a pesquisa pode fornecer uma base para o aprimoramento de projetos pedagógicos de cursos já existentes e para a criação de grades curriculares de cursos ainda em planejamento.

1 Referencial Teórico

As linguagens de baixo nível são as linguagens de programação compreendidas por humanos que estão mais próximas do hardware, tendo abaixo delas apenas o código de máquina (Dunne, 2018).

Atualmente a economia de recursos, principalmente energéticos, é um tema extremamente debatido e de grande importância, já que afeta vários pontos da vida moderna, incluindo o desenvolvimento com maior eficiência energética (Brown *et al.*, 2010). Sendo que uma das vantagens do desenvolvimento em linguagens de baixo nível é o baixo custo computacional e consequente eficiência energética desse tipo de programação, tem-se esse fator como uma característica extremamente favorável ao ensino de linguagens de baixo nível. Como forma de exemplificar tais características tem-se a Figura 1.

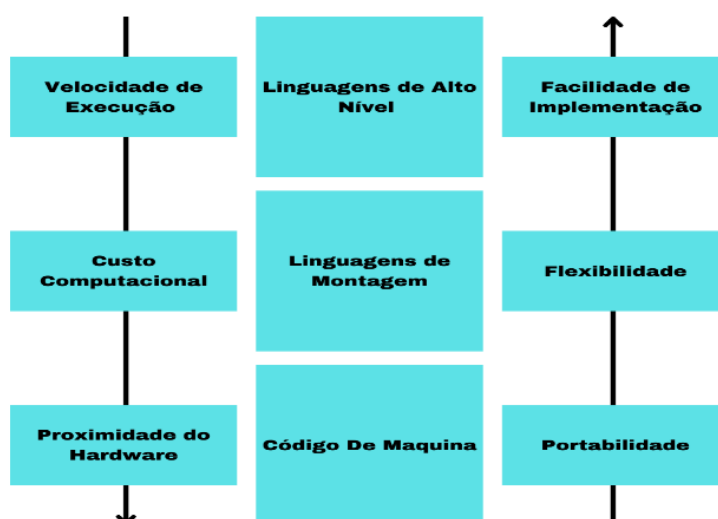


Figura 1 – Comparação linguagens de alto nível, baixo nível e código de máquina
Fonte: Elaborado pelos autores

Nos dias atuais, na maioria dos cursos de graduação na área de Ciência da Computação introduzem-se os conceitos de programação por meio de linguagens de alto nível de abstração,

como C, Java, Python e outras (Khan *et al.*, 2017), já que estas são as mais utilizadas atualmente no mercado de trabalho. Mesmo assim não se pode negar a importância das linguagens de baixo nível, tanto para o desenvolvimento de software quanto para a compreensão geral das disciplinas dos cursos de TI (Zilles, 2005), pois as linguagens de montagem são usadas atualmente para várias aplicações como por exemplo engenharia reversa e perícia forense em TI (Salleh, 2023).

Para que o ensino de linguagens de baixo nível seja mais eficiente, em vez de apenas dominar uma linguagem de montagem específica, é importante adotar uma abordagem baseada em princípios de funcionamento de tais linguagens, pois assim os alunos podem compreender a arquitetura do hardware, bem como linguagens de alto nível são traduzidas para linguagem de máquina e executadas (Li, 2010).

Através de exercícios práticos, os alunos podem aprender a escrever programas em linguagens de baixo nível e analisar os resultados obtidos, assim podendo aprender a usá-las para escrever algoritmos de descoberta de vulnerabilidades de softwares em sistemas embarcados e aplicar tais algoritmos em problemas reais (Li, 2010).

Por mais que o aprendizado de linguagens de baixo nível possa ser considerado algo difícil, diversas didáticas podem ser utilizadas para facilitar essa jornada (MCGRATH, 2021), por exemplo utilizando o Raspberry Pi, o que possibilita que os alunos sejam expostos a uma arquitetura moderna, no caso o processador ARM2 (similar àqueles que são encontrados em dispositivos móveis atuais), e tenham um contato maior com o hardware com o qual estão trabalhando, por exemplo por meio da General Purpose Input/Output (GPI/O) Interface do Raspberry, o que traz o aprendizado para mais perto dos discentes ao contrário de utilizar um IDE onde a interação com o hardware não é tão visível (Kawash *et al.*, 2016).

Na Figura 2 pode-se ver uma representação gráfica da GPI/O do Raspeberry Pi. Esse tipo de abordagem ajuda os discentes de SI a compreender as interações do hardware e do software, o que é de grande ajuda para identificar vulnerabilidades e ameaças em sistemas nos mais variados níveis da computação, já que os ataques nem sempre são realizados por meio de software (Chantzis *et al.*, 2021).

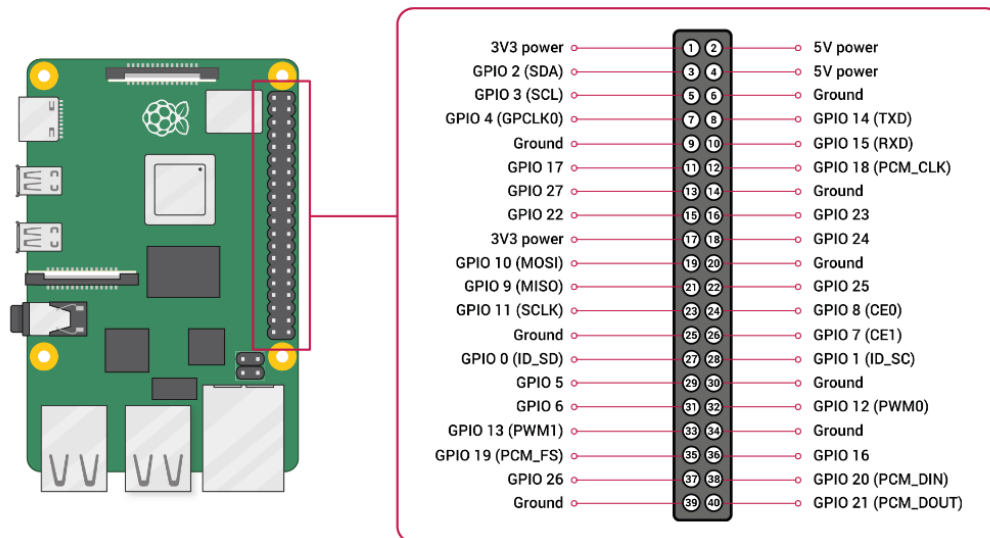


Figura 2 – General Purpose Input/Output Interface do Raspberry Pi
Fonte: Raspberry Pi

Outra didática com um maior custo-benefício, porém com menor interação direta com o hardware é o uso da virtualização por meio do emulador de processadores QUEMU, que roda em um computador comum com uma arquitetura x86 (Linux e Windows) onde uma aplicação emula um sistema ARM que é indistinguível de um sistema ARM físico, a desvantagem dessa didática é justamente a distância dos alunos com o hardware (Cadenas *et al.*, 2015).

As linguagens de baixo nível são de fundamental importância para os cursos de TI, pois auxiliam na compreensão do funcionamento dos SOs e criam uma base sólida para o aprendizado de linguagens de alto nível (Sprunt, 2005), além disso o ensino orientado para aplicações pode ajudar os alunos a compreender melhor o significado prático da linguagem de montagem e a aprimorar sua capacidade de aplicá-la em cenários do mundo real (Li, 2010).

A maior parte do processo de descoberta de bugs envolve interpretar e compreender linguagens de baixo nível. Explorar falhas de segurança requer um bom conhecimento de linguagens de montagem, já que a compreensão da maior parte dos exploits requerem a interpretação ou modificação de código existente nessas linguagens (Anley *et al.*, 2007).

Além disso o aprendizado de linguagens de baixo nível tem como uma de suas principais vantagens auxiliar o aprendizado dos estudantes em relação à arquitetura de computadores devido a sua proximidade do hardware (Sanders, 1984).

2 Materiais e Métodos

Para obter um embasamento teórico sólido foi feita uma revisão bibliográfica de artigos relacionados aos temas estudados, contemplando questões como: eficiência energética na

computação, diferentes didáticas para o ensino de linguagens de baixo nível, relações entre SI e linguagens de baixo nível e a demanda de profissionais proficientes em linguagens de baixo nível.

A Figura 3 resume os assuntos dos artigos utilizados na revisão bibliográfica, considerando que alguns artigos se encaixavam em mais de uma categoria.

Tema do artigo	Quantidade de artigos
Ensino	9
Relação com SI	2
Demanda	2
Eficiência energética	1

Figura 3 – Quadro de classificação e quantidade de artigos

Fonte: Elaborado pelos autores

Com o intuito de compreender o cenário atual do ensino de linguagens de programação nos cursos de graduação em SI e o quão satisfeitos os alunos de ditos cursos estão com o conteúdo a eles apresentados, foi realizada com os alunos de uma faculdade pública do estado de São Paulo uma pesquisa exploratória quantitativa a partir de um formulário do Microsoft Forms. Dado o formulário obtiveram-se os seguintes resultados.

A Figura 4 gerada a partir da pergunta “Qual semestre você está cursando?” apresenta um gráfico contendo o resultado da primeira pergunta do formulário.

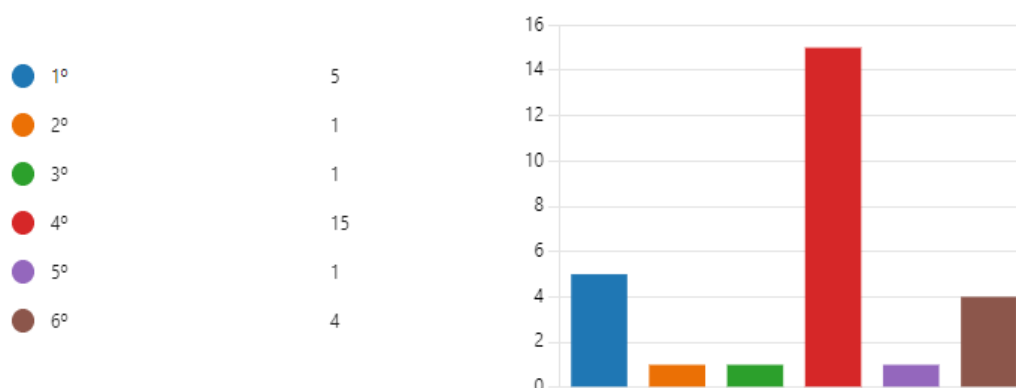


Figura 4 - Em qual semestre você está?

Fonte: Elaborado pelos autores

Para melhor compreender os discentes em relação à etapa do curso em que eles estão, e melhor estimar seu nível de conhecimento de TI de acordo com as matérias lecionadas em cada semestre do curso, e estimar quanto conhecimento acadêmico foi passado a tais alunos, elaborou-se tal questão, já que a progressão no curso afeta o conhecimento de TI dos discentes.

A Figura 5 demonstra um gráfico contendo os resultados da segunda pergunta do formulário.

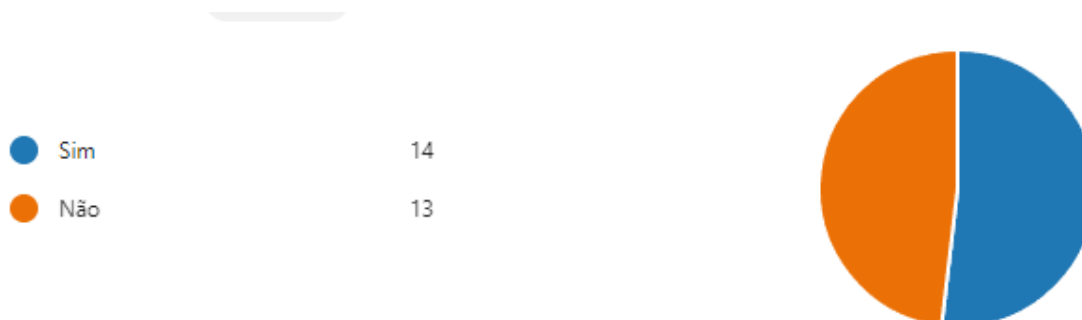


Figura 5 - Você trabalha com TI?

Fonte: Elaborado pelos autores

Para conhecer a população estudada em relação à sua área de atuação profissional, e assim melhor estimar sua proximidade com TI de acordo com a experiência laboral dos entrevistados e compreender o nível de conhecimento prático deles, aferiram-se quantas pessoas atuavam na área de TI.

A Figura 6 mostra os resultados obtidos com as respostas da terceira pergunta do formulário sobre a faixa etária dos discentes.

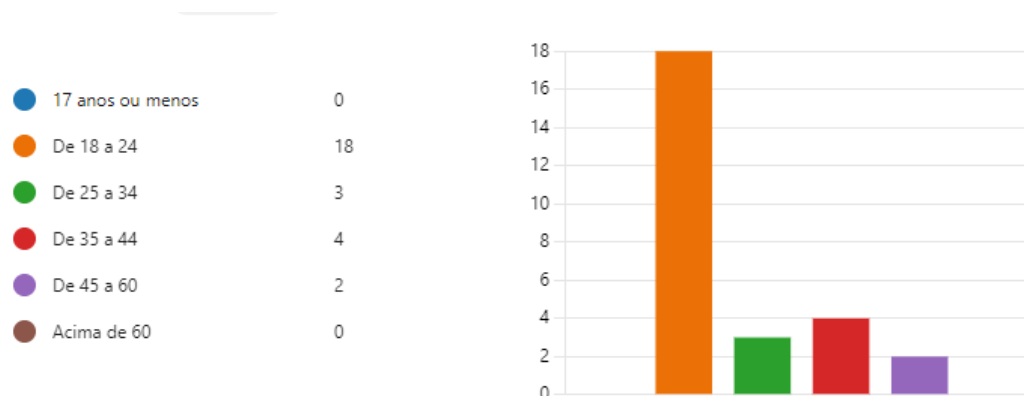


Figura 6 – Qual sua faixa etária?

Fonte: Elaborado pelos autores

Desenvolveu-se tal pergunta com a intenção de melhor compreender a população estudada em relação à sua idade, de forma a poder estimar os tipos de tecnologia aos quais foi exposta. Por exemplo, pessoas mais velhas têm uma maior tendência a terem aprendido linguagens de mais baixo nível, já que este tipo de linguagem era usado em maior escala no passado.

Na Figura 7 tem-se a representação gráfica das respostas dadas à quarta questão do formulário.

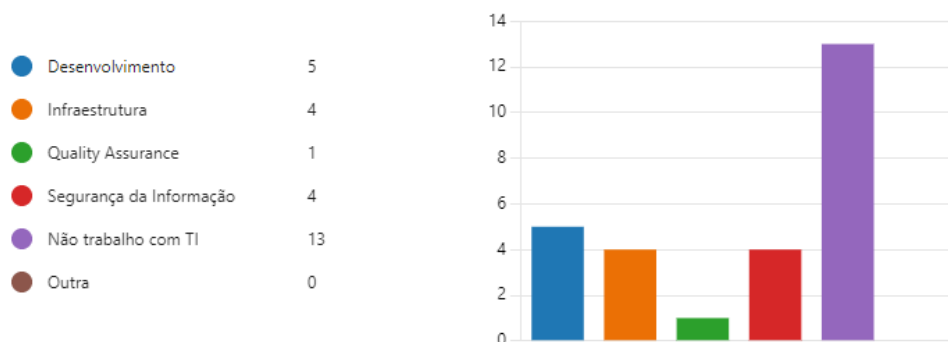


Figura 7 – Em qual das grandes áreas de TI você atua?
Fonte: Elaborado pelos autores

Com a intenção de compreender a população estudada em relação à sua área de atuação e melhor estimar os tipos de tecnologia com que elas trabalham, foi desenvolvida a quarta questão. Mesmo que a maior parte das respostas tenham sido de pessoas que não trabalham com TI, grande parte das que atuam na área trabalha com desenvolvimento, sendo assim devem ter conhecimento sobre a importância e especificidades de linguagens de baixo nível de forma geral.

Com a Figura 8 tem-se, em forma de gráfico, os resultados obtidos com a quinta questão do formulário utilizado na pesquisa.

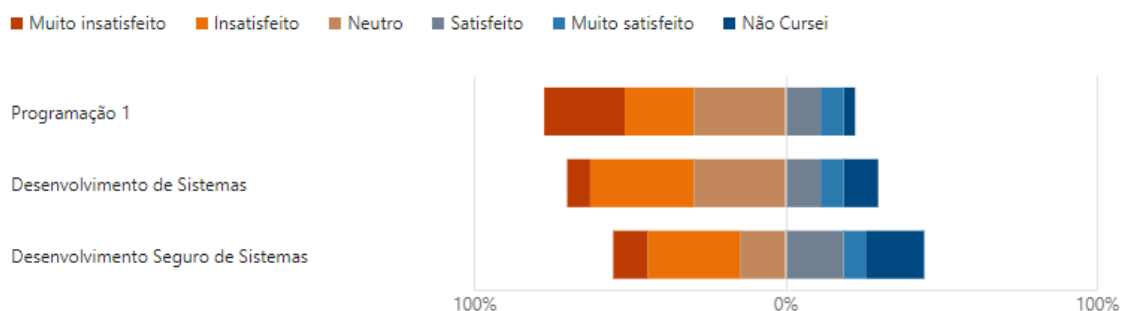


Figura 8 – Como você avaliaria sua experiência com as matérias relacionadas à área da programação?
Fonte: Elaborado pelos autores

Pergunta elaborada com a intenção de compreender o quão satisfeitos com as matérias relacionadas a programação os discentes estão. Grande parte dos alunos, 48,1%, disse estar muito insatisfeito ou insatisfeito com a matéria de programação enquanto apenas 18,5% disse estar satisfeito ou muito satisfeito. Em relação à matéria de Desenvolvimento de Sistemas 40,8% dos alunos disse estar muito insatisfeito ou insatisfeito e apenas 18,5% disse estar muito satisfeito ou satisfeito. Quando perguntados sobre a matéria de Desenvolvimento Seguro de Sistemas 40,7% dos alunos disse estar muito insatisfeito ou insatisfeito e 25,9% disse estar muito satisfeito ou

satisfeito. Dessa forma torna-se possível compreender o cenário do ensino de linguagens de programação em relação à população estudada e o quão contentes estão os discentes com o conteúdo a eles passado.

O gráfico apresentado na Figura 9 representa o resultado da sexta pergunta do formulário enviado aos discentes.

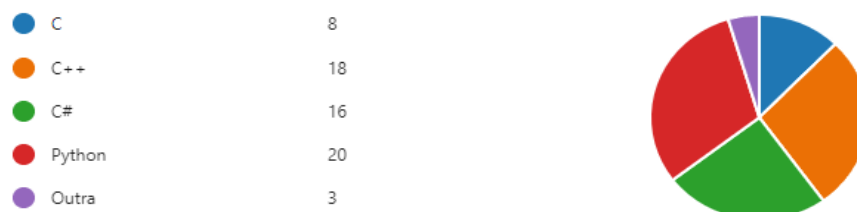


Figura 9 – Quais linguagens de programação você utilizou nas matérias relacionadas à programação? Caso necessário selecione mais de uma.

Fonte: Elaborado pelos autores

Com a finalidade de conhecer as linguagens de programação ensinadas aos alunos durante o curso de SI e para saber o quanto linguagens de baixo nível são ensinadas foi perguntado quais linguagens de programação os alunos haviam utilizado na graduação até então. A maior parte das linguagens de programação ensinadas, 76%, são de alto nível; isso considerando C como uma linguagem de baixo nível por conta de sua proximidade do hardware.

A Figura 10 representa as respostas coletadas com a sétima pergunta do formulário.

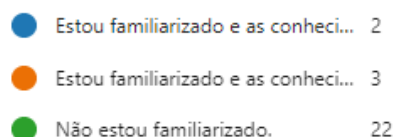


Figura 10 – Você está familiarizado com as linguagens de montagem (linguagens de baixo nível)? Se sim, as conheceu em aula ou estudando sozinho?

Fonte: Elaborado pelos autores

Para descobrir quantas pessoas conhecem sobre linguagens de montagem e como conheceram o tema, foi feita a pergunta: “Você está familiarizado com as linguagens de montagem (linguagens de baixo nível)? Se sim, as conheceu em aula ou estudando sozinho?”. A maior parte, 81%, disse não estar familiarizada com o tema, 7% disse estar familiarizado e ter conhecido em aula e 12% disse estar familiarizado e ter conhecido estudando sozinho. Considerando que uma parte dos alunos foi apresentada às linguagens de montagem em aula, pode-se especular que em

algumas abordagens das matérias do curso de SI os professores realizam interdisciplinaridade com linguagens de baixo nível.

A Figura 11 apresenta em forma de um gráfico de barras, com classificação média à sua esquerda, os resultados obtidos a partir das respostas coletadas da oitava pergunta do formulário.

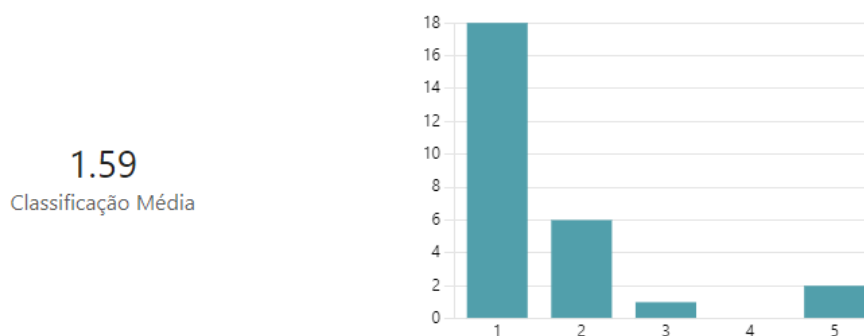


Figura 11 – Em uma escala de 1 a 5, sendo 1 muito pouco e 5 muito, o quanto você conhece sobre linguagens de montagem (linguagens de baixo nível)?

Fonte: Elaborado pelos autores

Para descobrir o quanto a população estudada conhece sobre linguagens de montagem, fez-se a pergunta: “Em uma escala de 1 a 5, sendo 1 muito pouco e 5 muito, o quanto você conhece sobre linguagens de montagem (linguagens de baixo nível)?”. A maior parte, 89%, disse ter muito pouco ou pouco conhecimento sobre o tema, 7% disse ter muito conhecimento sobre linguagens de baixo nível, este gráfico demonstra o quão pouco difundido o conhecimento desse tipo de linguagem de programação nos dias atuais é entre os estudantes de SI, enquanto no passado as linguagens de baixo nível eram mais utilizadas.

A Figura 12 apresenta o resultado da oitava pergunta representado graficamente por um gráfico de barras e a classificação média das respostas.

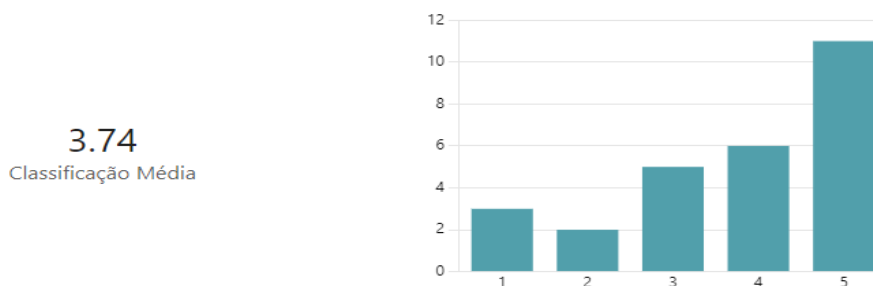


Figura 12 – Em uma escala de 1 a 5, sendo 1 muito pouco e 5 muito, o quão importante você considera as linguagens de montagem (linguagens de baixo nível), na formação de um profissional de SI?

Fonte: Elaborado pelos autores

Pergunta elaborada para examinar o quão importante os discentes consideram as linguagens de montagem para o curso de SI. Com uma classificação média de 3,74 entende-se que uma boa parcela das respostas reconhece a importância das linguagens de montagem para o curso, 63% dos discentes responderam que as linguagens de montagem são muito ou muito importantes, dessa forma pode se concluir que os estudantes reconhecem a importância das linguagens de baixo nível para o seu curso.

O gráfico de setores presente na Figura 13 representa os resultados obtidos com a décima pergunta do questionário.

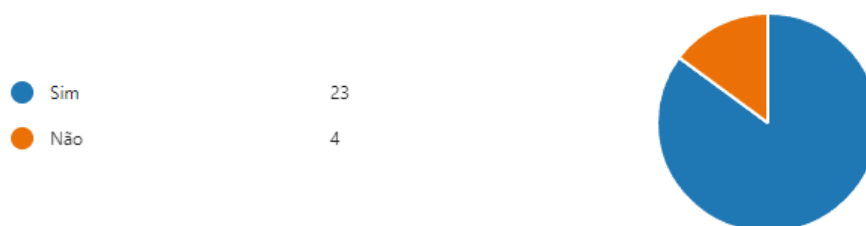


Figura 13 – Você considera que uma matéria sobre linguagens de montagem (linguagens de baixo nível) seria importante para o curso de SI?

Fonte: Elaborado pelos autores

Pergunta elaborada com a intenção de descobrir qual seria o nível de aceitação de linguagens de baixo nível como uma nova matéria no curso de SI. A proposta de uma nova disciplina sobre linguagens de baixo nível foi muito bem aceita, tendo 85% de aceitação, o que junto com o gráfico que representa a pergunta sobre o nível de importância de tais linguagens para SI torna-se notável que a proposta desse artigo foi bem aceita pelos discentes.

3 Resultados e Discussões

No corrente estudo, investigou-se o cenário atual do ensino de programação em cursos de nível superior de SI e a satisfação dos alunos com tal cenário, além da opinião destes sobre o conhecimento apresentado durante a graduação sobre linguagens de baixo nível e o quão importante os discentes consideram dito tipo de linguagem de programação. A amostra da pesquisa consistiu em 27 estudantes de um curso de SI de uma faculdade pública do estado de São Paulo, do 1º ao 6º semestre de estudo, com idades variando de 18 a 60 anos.

O objeto de estudo foi um questionário com objetivo de obter uma métrica sobre a aceitação dos alunos em relação ao assunto abordado. Primeiro, foram feitas perguntas sobre as disciplinas de programação, e as linguagens utilizadas em cada uma delas, a partir das quais os participantes comprovaram que a maior parte das linguagens de programação lecionadas no curso são de alto nível, mais especificamente 76% do total.

Também foi aferido o conhecimento dos alunos sobre linguagens de baixo nível e sua importância para a área de SI, sendo que 67% dos participantes responderam ter pouco conhecimento e 7% responderam ter muito conhecimento, mesmo que a maior parte dos alunos tenha dito ter pouco conhecimento uma boa parte deles, 63%, disse que o ensino dessas linguagens é muito importante para o seu curso.

As principais perguntas do questionário eram sobre o quão importante os alunos consideravam o ensino de linguagens de baixo nível na graduação e se eles gostariam de ter esse tipo de conteúdo na grade de seu curso. De acordo com as respostas, 63% dos alunos consideram o ensino de linguagens de baixo nível muito importante para o ensino de SI e 85% deles responderam que gostariam de ter uma matéria de linguagens de baixo nível na grade curricular. Quando foi feita a pergunta sobre o quão importante os discentes consideravam aprender alguma linguagem de montagem, com a medida de 1 a 5, 63% das pessoas responderam considerar o aprendizado desse tipo de linguagem importante.

Esses resultados evidenciam o reconhecimento da importância das linguagens de baixo nível para a SI, além de demonstrarem o quanto os próprios discentes gostariam de ter esse tipo de conhecimento lecionado durante sua graduação de forma que a inclusão desse conteúdo no curso em questão deve ser considerada.

Considerações Finais

A finalidade do trabalho está na compreensão do cenário atual do ensino de programação nos cursos de SI e principalmente da presença e relevância das linguagens de baixo nível nestes; partiu-se de uma análise da bibliografia disponível e de uma pesquisa exploratória quantitativa feita por meio de um questionário enviado para alunos de uma instituição de ensino superior público de Araraquara.

Para entender a maneira como as linguagens de baixo nível são vistas no contexto do ensino de SI foram definidos os seguintes objetivos: compreender o quanto as pessoas consideram esse tipo de linguagem importante, aferir o nível de conhecimento das pessoas sobre as linguagens de baixo nível e definir a importância desta como uma ferramenta para atingir maior eficiência no ensino de SI.

Com isso, a hipótese deste trabalho de que há grande importância no ensino de linguagens de baixo nível no ensino de SI, foi comprovada, por conta das respostas do formulário, que 63% dos alunos consideraram que o ensino de linguagens de baixo nível é muito importante ou importante e 85% da população estudada considerou que uma matéria específica desse tipo de linguagem deveria ser adicionada à grade do curso.

Os meios de coleta de dados utilizados possibilitaram que fosse criado um panorama geral do conhecimento das pessoas sobre os pontos debatidos. Dessa forma torna-se viável o desenvolvimento de projetos de implantação sobre o tema levando em consideração o que precisa

ser trabalhado para que o ensino de linguagens de baixo nível torne-se cada vez mais comum nos cursos de SI.

Popularização essa que se justifica devido à importância desse tipo de linguagem de programação para o curso, como foi evidenciado neste artigo tanto pela revisão bibliográfica, que aponta os benefícios interdisciplinares e estudos de casos reais que podem ser desenvolvidos com o ensino de linguagens de baixo nível, e pela interdisciplinaridade com as matérias de Arquitetura de Computadores e Sistemas Operacionais, como pelas respostas dadas ao questionário enviado aos discentes, no qual mais da metade deles, 63%, reconheceu a importância de linguagens de baixo nível e 85% foram a favor da inclusão de uma matéria sobre o tema na grade do curso.

Em pesquisas futuras, pode-se buscar determinar as linguagens de baixo nível que têm maior relevância para o curso de SI e, além disso, quais as melhores metodologias para o ensino de tal tema baseando-se nos dados apresentados na corrente pesquisa sobre o conhecimento geral dos alunos a respeito desse assunto.

Referências

- ANLEY, C.; HEASMAN, J.; LINDER, F.; RICHARTE, G. **The Shellcoder's Handbook Discovering and Exploiting Security Holes**. Indianapolis: Wiley Publishing, Inc, 2007.
- BROWN, D. J.; REAMS, C. Toward energy-efficient computing. **Communications of the ACM**, v. 53, n. 3, p. 50-58, 2010.
- CADENAS, J. O.; SHERRATT, R. S.; HOWLETT, D.; GUY, C. G.; LUNDQVIST, K. O. Virtualization for cost-effective teaching of assembly language programming. **IEEE Transactions on Education**, v. 58, n. 4, p. 282-288, 2015.
- CHANTZIS, F.; STAIS, I.; CALDERON, P.; DEIRMENTZOGLOU, E.; WOODS, B. **Practical IoT Hacking - The Definitive Guide to Attacking the Internet of Things**. San Francisco: No Starch Press, 2021
- DUNNE, R. **Windows 64-bit Assembly Language Programming Quick Start: Intel X86-64, SSE, AVX**. Estados Unidos da América: Gaul Communications, 2018
- KHAN, Y. D.; SHAKEEL, T.; FOX, R.; IQBAL, S. A Pedagogical Approach Towards Assembly Language. In: **Global Conference on Education and Research (GLOCER 2017)**, 2017, p. 44.
- KAWASH, J.; KUIPERS, A.; MANZARA, L.; COLLIER, R. Undergraduate assembly language instruction sweetened with the raspberry pi. In: **Proceedings of the 47th ACM Technical Symposium on Computing Science Education**, 2016, p. 498-503.
- LI, L. Xiao-dong. Discussion on the Role of Assembly Language Course in Information Security Training. In: **National Teaching Seminar on Cryptography and Information Security (2010NTS-CIS)**, 2010, p. 343-345.
- McGRATH, Mike. **Assembly x64 in Easy Steps: Modern Coding for MASM, SSE & AVX**, 3rd Edition. 3. ed. Estados Unidos da América: In Easy Steps Limited, 2021.

MOHD SALLEH, K. A. New demand on assembly language proficiency in performing binary reverse engineering tasks. **International Journal on Perceptive and Cognitive Computing**, v. 9, n. 2, p. 8-13, 2023.

RASPBERRY Pi hardware: GPIO and the 40-pin Header. Raspberry Pi, 2021. Disponível em: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html#gpio-and-the-40-pin-header>. Acesso em: 02 nov. 2023.

SANDERS, WILLIAM. Assembly Language for Kids: Commodore 64. Estados Unidos da América: Slawson Communications, 1984.

SPRUNT, B. The Pedagogical Advantages of Using the Pong Video Game for Problem Based Learning in an Introductory Assembly-Language Programming Course. **Computers in Education Journal**, v. 15, n. 4, p. 9, 2005.

ZILLES, C. SPIMbot: an engaging, problem-based approach to teaching assembly language programming. In: Proceedings of the 2005 workshop on Computer architecture education: held in conjunction with the 32nd **International Symposium on Computer Architecture**, 2005, p. 4-es.

Recebido em 01/12/2023

Aceito em 26/02/2024