

Resultados Iniciais de uma *Rapid Review* sobre Tecnologias de Apoio à Engenharia de Sistemas de Software Quântico

Bruno D. de Paiva, Alexandre C. Esteves, Rafael M. de Mello, Guilherme H. Travassos

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) - Rio de Janeiro - RJ - Brasil

{bdantas, ght}@cos.ufrj.br, alexandre.cysne@ppgi.ufrj.br,
rafaelmello@ic.ufrj.br

Abstract. *According to the SWEBOK, the engineering of software products concerns performing different processes, including requirements and programming, among others. Despite evolving the field's evidence-based technologies, contemporary software systems like quantum software systems usually demand further technologies to tackle their unique challenges. Therefore, this work presents the emerging results of a rapid review of the technologies supporting the engineering of quantum software under the perspective of SWEBOK. The initial sample suggests a significant gap and a lack of comprehensive research elements for creating robust technologies to support the engineering of quantum software systems.*

Resumo. *De acordo com o SWEBOK a engenharia de produtos de software diz respeito à execução de diversos processos, incluindo requisitos e programação, entre outros. Apesar da evolução das tecnologias baseadas em evidência, sistemas de software contemporâneos, incluindo software quântico, geralmente exigem tecnologias adicionais para enfrentar os seus desafios. Portanto, este trabalho apresenta os resultados emergentes de uma rapid review sobre tecnologias que apoiam a engenharia de software quântico sob a perspectiva do SWEBOK. A amostra inicial sugere uma lacuna significativa e uma falta de elementos de investigação abrangentes para a criação de tecnologias robustas para apoiar a engenharia de sistemas de software quântico.*

1. Contexto e Problemática

O ciclo de vida da engenharia de software abrange fases desde a concepção até a descontinuação do produto, sendo aplicado com o intuito de criar produtos inovadores e eficientes, priorizando sua qualidade [Bosch, 2021]. Uma visão consolidada do entendimento sobre o ciclo de engenharia dos produtos de software pode ser encontrada no *Software Engineering Body of Knowledge (SWEBOK¹)*, um corpo de conhecimento em Engenharia de Software [Bourque e Fairley, 2014] que se mantém em contínua atualização.

Porém, ainda que haja um entendimento consolidado das disciplinas e atividades previstas no ciclo de engenharia de produtos de software, faz-se necessária a evolução das práticas e tecnologias de apoio relacionadas, visando atender às características disruptivas de sistemas de software contemporâneos. Dentre tais características, podemos destacar a sensibilidade ao contexto [Amalfitano et al. 2021] e a *computação quântica* [Sing et al. 2023].

¹ <https://www.computer.org/education/bodies-of-knowledge/software-engineering>

Computação quântica é referida como um paradigma emergente que é construído utilizando os princípios da *mecânica quântica* [Upama, 2022]. A *computação quântica* promove a construção de sistemas de software contemporâneos que oferecem benefícios próprios, mas também apontam para novos desafios a serem enfrentados [Singh et al. 2023]. A necessidade de uma abordagem prática e adaptável destaca a importância de alinhar o progresso técnico com as demandas, garantindo sua integração eficaz em cenários do mundo real e potencializando seu impacto em diversos setores [Singh et al. 2023].

Há grandes expectativas em relação à aplicação da *computação quântica* para o desenvolvimento de software em diferentes domínios, incluindo as áreas científica e financeira. No entanto, mesmo diante de perspectivas promissoras, existem os desafios existentes à *engenharia de software quântico* [Moguel et al. 2020], que pode ser definida como o desenvolvimento de sistemas de software que seguem lições e conhecimentos obtidos a partir da engenharia de software na *computação quântica* [Piattini 2020].

Considerando a crescente demanda por *software quântico* e, conseqüentemente, por sua engenharia, este trabalho apresenta o plano de um estudo secundário baseado em *rapid review* visando *caracterizar o estado da arte da engenharia de software quântico*. Devido à abrangência temática e os desafios de investigação em área emergente e relevante, buscamos neste trabalho também discutir a viabilidade da estratégia de pesquisa e apresentar resultados preliminares da *rapid review* com base na análise de conteúdo de sete estudos primários escolhidos aleatoriamente dentre os selecionados. Os resultados iniciais apontam para a existência de lacunas no conhecimento atual da *engenharia de software quântico* e a falta de elementos que direcionam o desenvolvimento de pesquisas necessários para a criação de tecnologias robustas e apropriadas para apoiar a *engenharia de sistemas de software quântico*, contrastando com as expectativas do *SWEBOK*. Em futuro próximo, esperamos que os resultados da *rapid review* indiquem a viabilidade de aumentar a cobertura de áreas da Engenharia de Software oferecendo *tecnologias de software quântico* baseado em evidência, e, principalmente, apontar as lacunas e oportunidades de pesquisas e desenvolvimento em prol da *engenharia de software quântico*.

2. Plano do Estudo

Este estudo foi influenciado pela estratégia de *rapid review*, que tem como objetivo principal prover evidências em um problema de forma mais rápida e eficiente em termos de recursos quando comparada a uma revisão sistemática de literatura convencional [Cartaxo 2018].

O objetivo desta *rapid review* consiste em *caracterizar as tecnologias de software desenvolvidas com base em evidência que contribuem para a engenharia de software quântico, sob a perspectiva do ciclo de engenharia preconizado pelo SWEBOK*. A motivação para o estudo resulta da expectativa de prover uma investigação abrangente quanto ao suporte existente às diferentes fases do ciclo de desenvolvimento de software, com base no *SWEBOK*. Neste sentido, levamos em consideração as seguintes suposições:

Suposição 1. *O interesse na engenharia de software quântico tem aumentado, porém ainda não foi possível observar eventuais disponibilidades ou adaptações nas atividades essenciais da engenharia de software (como por exemplo engenharia de requisitos) para apoiar a construção de software quântico.*

Suposição 2. As pesquisas tendem a focar em assuntos específicos da engenharia do software quântico, por exemplo teste de software quântico, sem observar o ciclo de construção como um todo e de que maneira estas tecnologias e práticas podem ser integradas em prol da construção de software quântico de qualidade.

2.1. Características do Estudo

A fim de compreender a evolução da *engenharia de software na computação quântica*, é essencial analisar como o desenvolvimento de novas tecnologias têm impactado diferentes disciplinas e atividades na área. Por isso, escolhemos fundamentar nosso estudo nas 15 áreas de conhecimento do *SWEBOK*. A Tabela 1 apresenta os principais direcionamentos da *rapid review*, incluindo a pergunta de pesquisa, de onde se derivam os demais. Para a determinação da *string* de busca, foi utilizado o modelo PICO [Santos et al. 2007] focando na população (*Quantum Software*), intervenção (*SWEBOK*) e resultado (*Evidence Based*). Seis critérios de inclusão foram estabelecidos para selecionar os artigos retornados pela *string* de busca na *Scopus*, base escolhida para a seleção dos artigos deste trabalho dada sua notória estabilidade, precisão e abrangência.

Tabela 1. Direcionamentos do Estudo

Pergunta de Pesquisa	RQ1: Quais as tecnologias de software apresentam evidência de viabilidade de utilização na construção de software quântico de qualidade considerando o ciclo de engenharia preconizado pelo SWEBOK?	
String de Busca	Inicial	("QUANTUM PROGRAM" OR "QUANTUM SOURCE") AND ("ENGINEERING" OR "REQUIREMENT*" OR "PROCESS*" OR "DESIGN*" OR "METHOD" OR "CONSTRUCTION" OR "TEST*" OR "VERIFIC*" OR "VALIDAT*" OR "MAINTENANCE")
	Final	("QUANTUM PROGRAM" OR "QUANTUM SOURCE" OR "QUANTUM CODE") AND ("ENGINEERING" OR "REQUIREMENT*" OR "PROCESS*" OR "DESIGN*" OR "METHOD" OR "CONSTRUCTION" OR "TEST*" OR "VERIFIC*" OR "VALIDAT*" OR "MAINTENANCE" OR "EVOLUTION" OR "PRACTICE" OR "MODEL*" OR "PRACTICE*" OR "MANAG*" OR "ECONOMICS" OR "LANGUAGE" OR "COMPILER" OR "FUNDAMENTAL") AND ("PRIMARY STUDY" OR "EMPIRICAL" OR "EXPERIMENT*" OR "CONTROL* STUDY" OR "SURVEY" OR "INTERVIEW" OR "CASE STUDY" OR "FOCUS GROUP" OR "ACTION RESEARCH" OR "OBSERVATION*" OR "ETHNOGRAPH*" OR "MAPPING STUDY" OR "RAPID REVIEW" OR "*SYSTEMATIC REVIEW" OR "SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW" OR "SECONDARY STUDY" OR "SYSTEMATIC MAPPING")
Critério	Inclusão	1. O artigo deve estar no contexto de engenharia de software quântico
		2. O artigo deve endereçar ao menos um tópico do capítulo 1 ao 12 do SWEBOK
		3. O artigo deve reportar um estudo empírico
		4. O artigo deve fornecer dados para responder à pergunta de pesquisa
		5. O artigo deve ser escrito na língua inglesa
		6. O artigo deve ter sido publicado antes de 2024

Todos os direcionamentos do estudo foram devidamente discutidos semanalmente entre os autores deste artigo cujo critério de parada era um consenso mútuo a fim de

promover a abrangência e qualidade dos resultados. Como resultado, houve uma considerável evolução da *string* de busca inicial até a sua evolução final (Tabela 1). Os três primeiros critérios de inclusão apresentados na tabela foram aplicados sobre o título, resumo e palavras-chave dos artigos retornados. Os demais critérios foram aplicados com base na leitura completa dos artigos pré-selecionados. Para a organização dos artigos, foi utilizada a ferramenta JabRef².

2.2. Processo de extração de dados

Para a extração dos dados dos artigos selecionados após leitura completa, foi elaborado um *formulário de extração* de modo que fosse possível extrair a informação necessária para responder a pergunta de pesquisa com base no texto integral de cada artigo correspondente a cada campo. A Tabela 2 apresenta o extrato dos dados extraídos a partir de um dos artigos selecionados [Khan et al. 2022].

Tabela 2. Extrato do formulário de Extração do artigo de Kahn et al. 2022.
Extração completa em: <https://bit.ly/qse-rapid-review>

Campo	Conteúdo Extraído
SWEBOK Category	Software Engineering Management
Type of Study	Semi-structured Interview
Study Subject	26 practitioners across 10 countries
Study RQ's	RQ1: Do agile practices best suited for developing quantum software?
Study Characteristics	Interview instrument: Following the guidelines by Robinson [45], we developed [...]
Threats to Validity	Internal validity: Internal validity is the extent to which particular factors affect the methodological [...]
Quantum Software Technology	In line with this, Gonzalez and Paradela [22] conceptualised a hybrid project management [...]
Benefits	The QSE processes can benefit from well-developed iterative agile practices for team collaboration, [...]
Problems	Not Mentioned
Challenges	Small portion of the interview participants find themselves underprepared due to lack of a [...]
Strategies	Not mentioned

3. Execução do protocolo

A execução deste protocolo, iniciada em 28 novembro de 2023, se deu seguindo o processo apresentado na Figura 1:

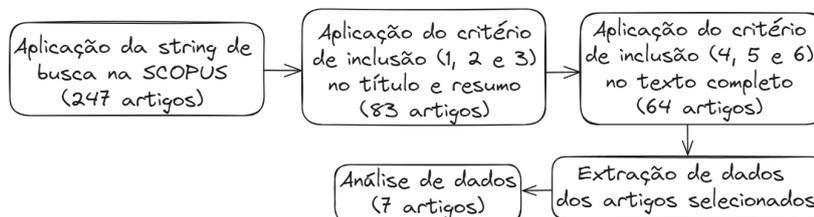


Figura 1. Procedimento de execução do protocolo

Este é um trabalho em progresso em área emergente, por isso o conjunto de artigos a serem analisados foi selecionado aleatoriamente para análise de conteúdo dentre os 64 artigos obtidos após leitura completa, disponível em: <https://bit.ly/qse-rapid-review>. O

² <http://www.jabref.org/>

objetivo desta análise amostral foi avaliar se a estratégia de pesquisa é viável, considerando a novidade e abrangência da área.

4. Análise de Conteúdo

Realizamos a análise de conteúdo [Strauss e Corbin, 2015] sobre os sete artigos disponibilizados no final da Seção 4. Foi utilizada a ferramenta QDA Miner³ para auxiliar na codificação e categorização dos textos. O processo de codificação seguiu os princípios de Strauss e Corbin (2015), no qual a etapa de *codificação aberta* foi realizada inicialmente a fim de identificar conceitos, propriedades e dimensões do dado, para posteriormente definir e criar categorias pertinentes ao fenômeno de interesse. Neste estudo, a nomeação das categorias foi baseada nas categorias e conceitos apresentados nos 12 primeiros capítulos do SWEBOK visando garantir consistência na organização temática das tecnologias identificadas.

A Figura 2 exemplifica a codificação de um trecho de um dos artigos selecionados para análise [El Aoun et al., 2021]. O processo de codificação primeiramente permitiu extrair trechos específicos do artigo, e os codificar de forma livre, a fim de compreender o que o trecho selecionado representava (Figura 2.a), como *participantes (subjects)*, *amostra (sample)*, dentre outros. Em seguida, os códigos foram agrupados através da ferramenta em categorias baseadas no SWEBOK. Por exemplo, para o SWEBOK definições do estudo, como *amostragem*, *objetos de estudo*, *perguntas de pesquisa*, *participantes* se enquadram na categoria de *fundamentos da engenharia* (Figura 2b). Neste sentido, também endereçamos códigos relacionados à *falta de pesquisa (lack of research)* a esta mesma categoria, uma vez que se trata de uma categoria relacionada à elementos de pesquisa.

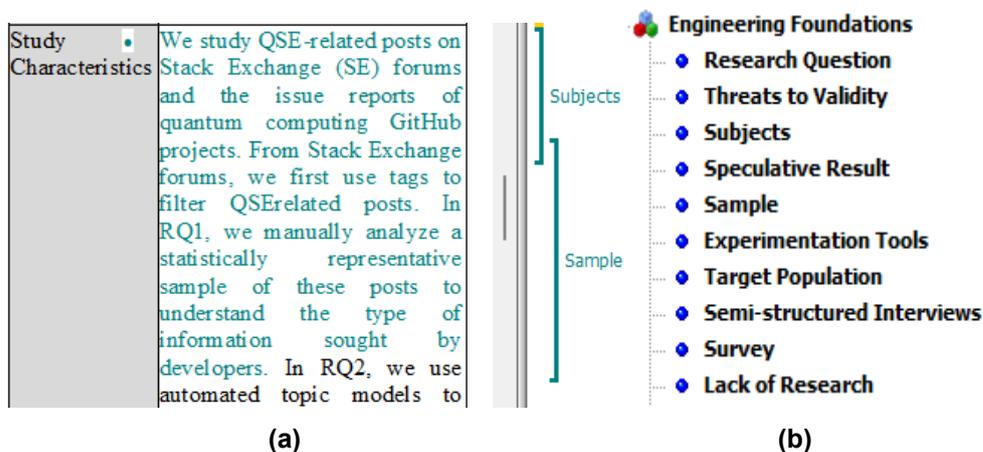


Figura 2. Trecho de codificação do Artigo de El Aoun et al. (2021) (a) e Extrato de códigos da categoria *Engineering Foundations* (b)

4.1 Análise Quantitativa

O processo de análise quantitativa dos códigos e categorias encontrados na amostra analisada foi realizado utilizando a linguagem de programação *Python* por meio do *Google Colab*, tendo como base as codificações realizadas através do *QDA Miner*. Nós

³ <https://provalisresearch.com/products/qualitative-data-analysis-software/freeware/>

contabilizamos a frequência de cada código obtido, além do número de casos (artigos) em que estes códigos apareceram, observável na Tabela 3.

Tabela 3. Extrato dos códigos mais frequentes do QDA Miner. A frequência completa se encontra neste site: <https://bit.ly/qse-rapid-review>

Categoria	Código	Contagem	% Código	Casos	%Casos
Engineering Foundations	Lack of Research	18	10,30%	7	100,00%
Software Engineering Processes	Lack of Proficiency	12	6,90%	5	71,40%
Computing Foundations	Quantum Computing Characteristics	6	3,40%	5	71,40%
Software Construction	Circuit Construction	7	4,00%	4	57,10%
Engineering Foundations	Research Question	10	5,70%	4	57,10%
Engineering Foundations	Threats to Validity	3	1,70%	3	42,90%

A Figura 3 apresenta a distribuição de artigos analisados que cobrem as categorias identificadas na análise. Com base na Tabela 3 e na Figura 3, é possível notar que a categoria com o maior número de casos é a *Engineering Foundations*, responsável por englobar as características de estudos, como amostragem, objetivos, dentre outros.

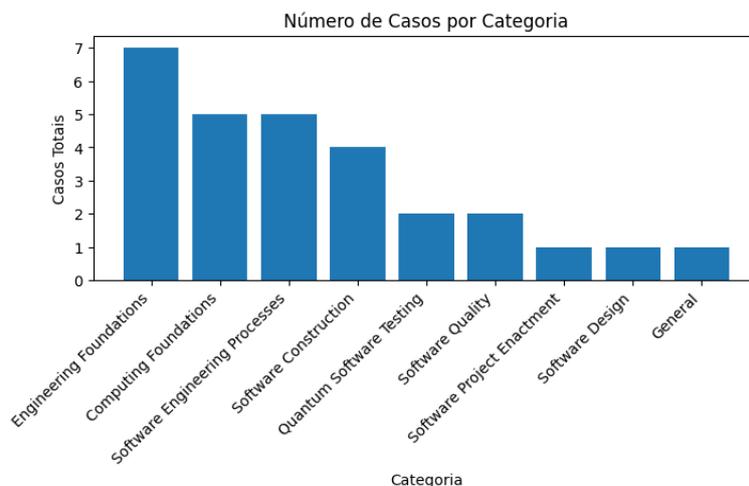


Figura 3. Correlação entre artigos e categorias.

A Figura 4 apresenta a distribuição de artigos analisados por código desta categoria. Apesar de ser uma amostra inicial, chama atenção termos encontrados artigos na área de *engenharia de software quântico* que não possuem uma definição completa dos elementos básicos de um protocolo de pesquisa. De fato, apenas um elemento do protocolo do estudo (questão de pesquisa) é apresentado na maioria dos artigos analisados. O material completo de análise, exemplificado neste artigo, encontra-se disponível em: <https://bit.ly/qse-rapid-review>.

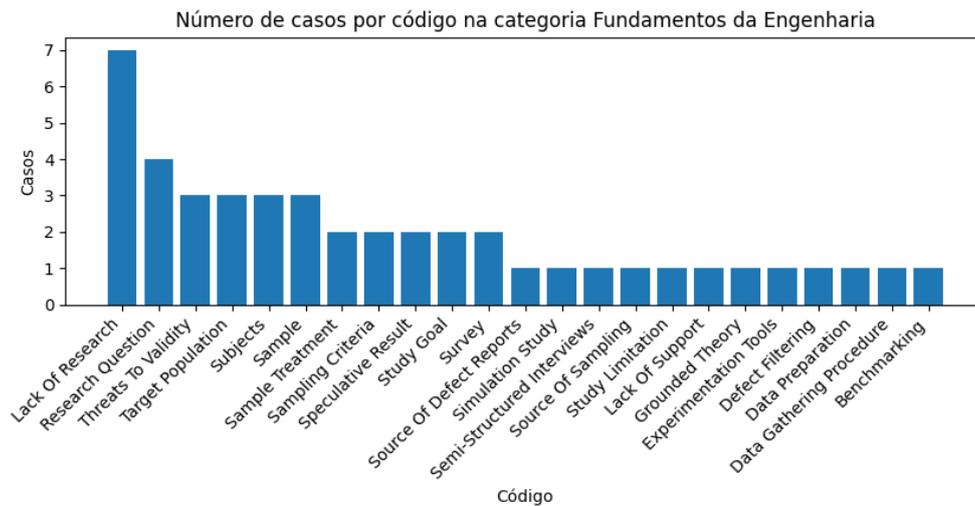


Figura 4. Número de casos por código na categoria Fundamentos da Engenharia.

5. Ameaças à Validade

Para mitigar o viés inerente ao pesquisador, adotamos uma abordagem de revisão em pares, seguida pela validação dos outros pesquisadores. Essa prática não só fortalece a integridade da análise, mas também enriquece a validade dos resultados. Além disso, é importante destacar a dependência das áreas do conhecimento estabelecidas pelo *SWEBOK*, cuja consolidação e atualização recente fornecem uma base sólida para esta pesquisa, que ao serem utilizadas como referência aumenta a consistência e a comparabilidade dos resultados, contribuindo para a robustez da análise.

Quanto à seleção da amostra, é crucial ressaltar que nossa intenção não é apenas obter uma versão mínima dos resultados, mas sim garantir uma representação abrangente e significativa do panorama atual. Para garantir a robustez de nossos achados iniciais, os sete artigos selecionados foram submetidos a uma análise minuciosa realizada por pares de pesquisadores, respeitando os critérios de inclusão e exclusão. Assim, a seleção dos sete artigos e sua análise demonstrou-se adequada para alcançar os objetivos propostos.

6. Considerações Finais

Este artigo apresentou o plano de uma *rapid review* visando *caracterizar o estado da arte em tecnologias para engenharia de software quântico*. Também apresentou uma amostra da análise dos resultados obtidos a partir da execução deste plano. A viabilidade do protocolo se mostra positiva pois foi capaz de mapear toda tecnologia baseada em evidência voltada para *sistemas de software quânticos* em cada artigo analisado.

A leitura dos 64 artigos selecionados indica a existência de ao menos uma tecnologia para *engenharia de software quântico* disponível e de alguma avaliação desta tecnologia, seja experimental ou não. A experiência obtida a partir da análise de dados da amostra de sete artigos indica que o nível de codificação aplicado é adequado, revelando conceitos relevantes da pesquisa e da prática em *engenharia de software*. Além disso, entendemos que os resultados iniciais demonstram que o uso das áreas do *SWEBOK* como critério de categorização dos dados codificados é adequado, ajudando a revelar potenciais lacunas e oportunidades de pesquisa sobre o tema investigado. Apesar das lacunas de conteúdo identificadas nos artigos, todos são cobertos suficientemente por esta categorização. Além disso, os resultados iniciais obtidos sugerem que nossas suposições iniciais podem ser pertinentes.

O próximo passo imediato será, portanto, dar continuidade à análise de conteúdo dos artigos selecionados, permitindo identificar quais áreas do *SWEBOK* têm recebido atenção destacada no apoio tecnológico à *engenharia de software quântico*, bem como o nível de evidência disponível sobre este apoio. Entendemos que a conclusão deste estudo permitirá a identificação de importantes lacunas de pesquisa e fomentar a concepção de novas tecnologias baseadas em evidência para a *engenharia de software quântico*, especialmente para as áreas do *SWEBOK* menos abordadas. No entanto, para alcançar esses objetivos, é crucial enfrentar diversos desafios, como a complexidade inerente dos *sistemas quânticos*, a escassez de profissionais qualificados neste campo e a falta de padrões estabelecidos para a *engenharia do software quântico*. Portanto, é necessário investir em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias que possam superar esses desafios e promover avanços significativos na área de *engenharia de software quântico*.

Agradecimentos

Prof. Travassos é Pesquisador CNPq (305701/2022-3) e CNE FAPERJ (E-26/201.170/2021), os quais apoiam esta pesquisa.

Referências

- Corbin, J., Strauss, A. 2015. “Basics of Qualitative Research: Techniques and Procedures for Developing Grounded Theory”. Sage, 4th Ed.
- Wohlin, C., et al. 2012. “Experimentation in Software Engineering”, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Moguel, E., et al. 2021. “A Roadmap for Quantum Software Engineering: Applying the Lessons Learned from the Classics”. CEUR Workshop Proceedings, Volume 2705, pp. 5-13.
- Piattini, M., et al. 2020. “The Talavera Manifesto for quantum software engineering and programming,” in Proc. Quantum Softw. Eng. Program., pp. 1–5.
- Bourque, P. and Fairley, R.E. eds., Guide to the Software Engineering Body of Knowledge, Version 3.0, IEEE Computer Society, 2014.
- Santos, C. M., et al. (2007). The pico strategy for the research question construction and evidence search. *Revista Latino-Americana de Enfermagem*, 15(3):508–511
- Cartaxo, B., Pinto, G., and Soares, S. (2018). The role of rapid reviews in supporting decision-making in software engineering practice. *ACM Int. Conf. Proceeding Ser.*
- Amalfitano, D., Matalonga, S., and Travassos, G. H. (2021). Introduction to the special issue on engineering context-aware software systems. *Info and Software Technology*, 132:106509.
- Bosch, J. (2001). Software product lines: organizational alternatives. In *Proceedings of the 23rd International Conference on Software Engineering. ICSE 2001*, pp. 91–100.
- Singh, J. and Bhangu, K. S. (2023). Contemporary quantum computing use cases: Taxonomy, review and challenges. *Arch of Computat Methods in Eng*, 30(1):615–638.
- Upama, P. B., et al. (2022). Evolution of quantum computing: A systematic survey on the use of quantum computing tools. In *2022 IEEE 46th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC)*, pp. 520–529.
- Khan, A. A., et al. (2023). Agile practices for quantum software development: Practitioners’ perspectives. In *2023 IEEE International Conference on Quantum Software (QSW)*, pp. 9–20
- El aoun, et al. (2021). Understanding quantum software engineering challenges an empirical study on stack exchange forums and github issues. In *2021 IEEE International Conference on Software Maintenance and Evolution (ICSME)*, pp. 343–354.