



ISSN: 2230-9926

Available online at <http://www.journalijdr.com>

IJDR

International Journal of Development Research

Vol. 11, Issue, 06, pp. 47504-47511, June, 2021

<https://doi.org/10.37118/ijdr.22079.06.2021>



RESEARCH ARTICLE

OPEN ACCESS

ESTUDO DE CASO SOBRE A MATURIDADE TECNOLÓGICA DA PLATAFORMA DE COMPUTAÇÃO QUÂNTICA Q SYSTEM ONE

Anderson Alves de Carvalho^{1*}, Augusto Stuchi Romera², Eduardo Meireles³, Henrico Hernandes Nunes dos Santos⁴, Osvaldo de Freitas Fogatti⁵, João Paulo Leonardo de Oliveira⁶, Carlos Sabino Caldas⁷ and Allynson Takehiro Fujita⁸

¹Mestrando em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para a Inovação (PROFNIT), Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), Frutal, Minas Gerais, Brasil; ²Mestrando em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para a Inovação (PROFNIT), Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), Frutal, Minas Gerais, Brasil; ³Doutor em Engenharia Urbana pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR). Coordenador e professor do Mestrado em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para a Inovação (PROFNIT), Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), Frutal, Minas Gerais, Brasil; ⁴Mestrando em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para a Inovação (PROFNIT), Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), Frutal, Minas Gerais, Brasil; ⁵Mestrando em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para a Inovação (PROFNIT), Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), Frutal, Minas Gerais, Brasil; ⁶Doutor em Engenharia Aeronáutica e Mecânica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Professor do Mestrado em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para a Inovação (PROFNIT), Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), Frutal, Minas Gerais, Brasil; ⁷Doutor em Comunicação pela Universidade Estadual Paulista (UNESP). Vice-coordenador e professor do Mestrado em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para a Inovação (PROFNIT), Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), Frutal, Minas Gerais, Brasil; ⁸Doutor em Química Analítica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP). Professor do Mestrado em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para a Inovação (PROFNIT), Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), Frutal, Minas Gerais, Brasil

ARTICLE INFO

Article History:

Received 11th March, 2021

Received in revised form

03rd April, 2021

Accepted 16th May, 2021

Published online 20th June, 2021

Key Words:

Computação quântica,
Maturidade tecnológica,
QTRL, QSystem One.

*Corresponding author:

Anderson Alves de Carvalho

ABSTRACT

Este estudo tem como objetivo avaliar a maturidade tecnológica da plataforma de computação quântica Q System One, projetada e disponibilizada ao público pela IBM, por meio da escala QTRL, criada pelo Jülich Supercomputing Centre. Para tal, por meio de revisão teórica, buscou-se analisar as definições, vantagens e desvantagens da escala TRL, originalmente proposta pela NASA, bem como da computação quântica. Também foi realizada pesquisa bibliográfica nas bases Scopus e Web of Science em busca de trabalhos relacionados à tecnologia Q System One. Dentre os resultados, notou-se que a tecnologia encontra-se em nível 3 da QTRL em função de questões técnicas e ambientais que limitam o desempenho e a disponibilidade da plataforma, embora atenda alguns requisitos do nível 4.

Copyright © 2021, Anderson Alves de Carvalho et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Citation: Anderson Alves de Carvalho, Augusto Stuchi Romera, Eduardo Meireles, Henrico Hernandes Nunes dos Santos et al. "Estudo de caso sobre a maturidade tecnológica da plataforma de computação quântica Q System One", *International Journal of Development Research*, 10, (11), 47504-47511.

INTRODUÇÃO

A competitividade das empresas de base tecnológica se mantém, em grande parte, graças à maturidade de suas tecnologias e à sua capacidade analítica frente aos ciclos de vida da inovação. Muitas tecnologias ainda em fase embrionária não são disponibilizadas no mercado devido a diversos fatores que extrapolam as possibilidades

de análise oferecidas por essas duas abordagens de medição. No entanto, os riscos relacionados ao desenvolvimento de uma tecnologia ainda em fase inicial podem ser drasticamente reduzidos à medida que o grau de maturidade dessa tecnologia aumenta e o conhecimento sobre seu ciclo de inovação se expande (RIBEIRO, 2019). Em se tratando de grandes corporações que desenvolvem a chamada tecnologia de ponta como sistemas aeroespaciais, telecomunicações, energia nuclear, entre outras, o desafio de obter sucesso no desenvolvimento de determinada tecnologia torna-se ainda maior. Por

mais promissora que uma tecnologia possa aparentar, não há como garantir sucesso e aceitação no mercado, uma vez que viabilizar sua produção em escala exige grandes investimentos e muitas vezes o conhecimento técnico-científico não é suficiente. A tecnologia da computação quântica se enquadra nesse cenário. Apesar dos avanços teóricos no campo científico, acumulados desde o início do século XX, e das previsões de se conceber máquinas capazes de realizar façanhas computacionais em escalas inimagináveis para os padrões tecnológicos atuais, ainda não foi possível viabilizar computadores aptos a resolver questões práticas do cotidiano, tampouco instalá-los em um ambiente empresarial ou doméstico (ZAPAROLLI, 2019). As limitações e os desafios que a atual geração de tecnologias enfrenta têm chamado as autoridades a investir mais em tecnologias emergentes promissoras, como as tecnologias quânticas (QT). Universidades, governos, grandes organizações e até mesmo a Comissão Europeia (CE) e outros países europeus anunciaram grandes investimentos para a comercialização de QT com o objetivo de abordar e mitigar alguns dos maiores desafios enfrentados pela era digital de hoje, dentre eles comunicação segura e poder de computação. (BASSI, 2019). Apesar de nenhuma das atuais tecnologias de semicondutores estar em um alto nível de prontidão tecnológica para entrar em pleno uso, seu estado inicial de desenvolvimento é promissor e aparentemente rentável, uma vez que projetos envolvendo novos métodos de construção de cabeçotes de leitura magnética e memórias de acesso magnético aleatório já foram absorvidos por indústrias multibilionárias (WICKENDEN, 2008), o que sugere uma embrionária movimentação do mercado de componentes quânticos para a indústria eletrônica.

Já os computadores quânticos estão sendo desenvolvidos com vistas aos mais variados fins. Por exemplo, desde soluções em segurança civil e nacional, como criptoanálise, até genética, doenças, ciência dos materiais e design (CORREALE et al., 2019). Todavia, enquanto os computadores quânticos ainda não estão disponíveis no mercado, tanto o desenvolvimento e modelagem de algoritmos para a programação quântica quanto a aplicação e análise de simulações e testes estão sendo desenvolvidos pela comunidade científica, uma vez que muitas das abordagens lógicas independem de um hardware quântico para sua aplicação (CARDOSO; REISER; COSTA, 2006). Paralelamente, corporações como Google, Intel, Microsoft e IBM estão em uma corrida contra o tempo para assumir a liderança e tornar seus projetos quânticos comercializáveis. Um exemplo de trabalho colaborativo intersetorial é o projeto IBM Quantum Network, que reúne dezenas de empresas, instituições acadêmicas, *startups* e organizações de pesquisa em um trabalho conjunto que objetiva o desenvolvimento da computação quântica de ponta por meio da tecnologia proprietária IBM Q (IBM, 2021). Com o objetivo de avaliar a maturidade tecnológica desta plataforma quântica da IBM, o presente trabalho apresenta uma revisão teórica acerca das escalas de maturidade propostas pela NASA e pelo centro de pesquisa computacional alemão JülichSupercomputing Centre (JSC), bem como conceitos da computação quântica e particularidades da plataforma Q System One da IBM. Os estudos foram motivados pela relevância das tecnologias e aparente escassez na produção teórica que relaciona níveis de maturidade tecnológica a sistemas quânticos.

METODOLOGIA

Quanto à natureza, a presente pesquisa possui caráter exploratório seguindo abordagens qualitativa e bibliográfica, com o objetivo de promover subsídios ao processo de compreensão e explanação do tema, por meio da análise dos conceitos, particularidades e maturidade da tecnologia em questão. Quanto aos procedimentos, buscou-se aplicar, em âmbito teórico, a escala de maturidade *Technology Readiness Level of Quantum Computing Technology* (QTRL), criada pelo JSC, à tecnologia Q System One da IBM. Para embasamento teórico, a busca pela produção acadêmica envolveu o acesso às bases Scopus e Web of Science. Também foram consultados os *websites* das empresas mantenedoras das tecnologias estudadas para coleta de definições, conceitos e informações acerca do atual estágio de maturidade tecnológica. As consultas às referidas

bases foram executadas pesquisando por “IBM Q” no campo “Título”. Os resultados foram planilhados no Microsoft Excel® 2016 disponibilizando as colunas “BASE”, “TÍTULO”, “AUTOR(ES)”, “ANO”, “RESUMO”, “CITAÇÕES”. Os registros em duplicidade, ou seja, com referências a artigos idênticos, foram concatenados. Após a leitura dos resumos, foram descartados os registros referentes a trabalhos com foco em temáticas divergentes daquelas abordadas na presente pesquisa. Posteriormente, os artigos alinhados com o tema proposto neste trabalho e com acesso aberto foram baixados, analisados e referenciados. Foram priorizados aqueles que ofereceram evidências sobre o processo de desenvolvimento da tecnologia Q System One. Os resultados da busca na Scopus retornaram 20 registros, enquanto na Web of Science, 18 registros.

REVISÃO TEÓRICA

Definições das escalas de maturidade TRL e QTRL: A sigla TRL, cunhada em 1974 nos Estados Unidos pela Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA), deriva da terminologia em inglês *Technology Readiness Level*, que em tradução literal significa Nível de Prontidão Tecnológica, embora também seja comumente utilizada para designar níveis de maturidade de determinada tecnologia (NASA, 2017; RIBEIRO, 2019). Segundo a NASA (2012), os TRLs são um tipo de sistema de medição de maturidade de uma tecnologia específica que permite sua classificação em 9 níveis, determinados a partir do andamento do projeto e dos parâmetros de cada estágio de desenvolvimento. Também conhecido como um *framework* de confiabilidade, os TRLs foram bem recebidos como prática na padronização das entregas de projetos aeronáuticos e mundialmente adotados por variedade expressiva de setores. Quase quatro décadas após seu surgimento, os TRLs foram formalizados na indústria por meio da norma ISO 16290:2013 (VALENTE, 2020). No Brasil, dois anos após a publicação da norma ISO que estabelece as definições dos TRLs, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou uma versão fiel da norma em língua portuguesa, contendo a seguinte definição:

“Esta Norma define Níveis de Maturidade Tecnológica (TRL). É aplicável principalmente aos materiais relativos aos sistemas espaciais, embora as definições possam, em muitos casos, ser usadas em um domínio mais amplo. A definição dos TRL estabelece as condições a serem atendidas em cada nível, possibilitando a curada avaliação do TRL (ABNT, 2021).” A Tabela 1 apresenta os nove níveis TRL desenvolvidos pela agência espacial americana. Segundo a NASA (2012), a partir da evolução do projeto, um nível mais elevado é obtido se, e somente se, todos os requisitos do nível desejado forem atendidos. Isso significa, por exemplo, que para uma tecnologia ser declarada TRL 5 não basta ela atender aos requisitos do TRL 4, é necessário que todos os do quinto nível sejam validados.

Em resumo, a validação de um nível mais baixo não qualifica a tecnologia para o nível superior. O domínio de implementação apresentado pela escala TRL permite aos usuários um entendimento comum do *status* da tecnologia, possibilitando a avaliação da sua maturidade e o gerenciamento de risco, o que auxilia os tomadores de decisão a visualizar com certa exatidão o quanto o resultado pretendido está distante (ROCHA, 2016). Em relação às tecnologias quânticas, a escala de maturidade denominada *Technology Readiness Level of Quantum Computing Technology* (QTRL), ou “Níveis de Maturidade Tecnológica da Computação Quântica”, desenvolvida pelo centro de pesquisa alemão JülichSupercomputing Centre (JSC) e ilustrada na Figura 1, apresenta-se como uma ferramenta que pode ser útil aos projetos que envolvem medidas de prontidão tecnológica. Segundo o JSC (2017), a escala QTRL consiste em nove níveis de preparação de tecnologia, em que QTRL1 rotula o nível mais baixo e QTRL9 o mais alto. A Tabela 2 apresenta uma descrição detalhada de cada nível QTRL. Pode-se notar considerável semelhança com a escala TRL.

Vantagens, limitações e alternativas aos TRLs: O uso das escalas de TRL expandiu-se para os mais variados setores da indústria em

função de sua importância no processo de escalada tecnológica dos projetos complexos. No entanto, ainda está em curso um grande esforço por parte da indústria e da academia na realização de estudos interpretativos da metodologia que visam adequações e adaptações para atender às particularidades de cada setor (VALENTE, 2020; RIBEIRO, 2019; OLECHOWSKI; EPPINGER; JOGLEKAR, 2015). Como apresentado por Ribeiro (2019), as adaptações vêm sendo executadas por importantes instituições ao redor do mundo como European Space Agency (ESA), European Commission (EC), Indústria do Petróleo e Gás (API 17N), Departamento de Defesa (DoD) e Departamento de Energia dos EUA (DoE), cada qual com suas próprias definições e ajustes na escala. A aplicação é tão diversa que é empregada até no desenvolvimento de equipamentos utilizados para validar a qualidade do mel orgânico e prever seu tempo de prateleira (RIBEIRO, 2019).

Considerando todo o ciclo de vida de um projeto, os níveis TRL apresentam vantagens variadas como (1) aumento no entendimento comum do estado de desenvolvimento da tecnologia; (2) auxílio na tomada de decisões relativas ao desenvolvimento, financiamento e transição da tecnologia; (3) facilitação do gerenciamento do progresso da atividade de P&D; (4) apoio à gestão de riscos inerente a todo o processo de desenvolvimento da tecnologia (ROCHA, 2016; RIBEIRO, 2019). Embora o padrão TRL venha sendo utilizado por profissionais ligados a funções de tomada de decisão em projetos milionários de grande complexidade, a evidência anedótica levanta preocupações sobre muitas das práticas relacionadas aos TRLs, principalmente aos desafios provocados por processos que envolvem complexidade do sistema, planejamento e revisão e validação da avaliação (OLECHOWSKI; EPPINGER; JOGLEKAR, 2015). A partir de pesquisa realizada por Olechowski, Eppinger e Joglekar (2015) e conforme dados apresentados na Tabela 3, foram levantadas 15 limitações recorrentes, agrupadas em 3 escopos de problemas.

Os desafios constantemente enfrentados pelas organizações na medição da maturidade de suas tecnologias tendem a continuar à medida que demandas, mercados e tecnologias se tornam mais complexos (ROCHA, 2016). Como visto, as escalas TRL também necessitam de melhorias para evoluir e se manter suficientemente adequadas aos novos projetos tecnológicos. Enquanto empresas como NASA e Google declaram fazer uso da TRL com pequenas adaptações, organizações como John Deere e Bombardier afirmam adotar práticas de TRL com significativos desafios e necessidades de melhorias (OLECHOWSKI; EPPINGER; JOGLEKAR, 2015). Novas métricas surgem como alternativas, porém, sem descartar os TRLs. Isso implica em implementar outras metodologias de maneira incremental ou paralela. São exemplos as escalas *System Readiness Level* (SRL) e *Innovation Readiness Level* (IRL) que se apresentam como complementos importantes às insuficiências apresentadas pela escala TRL. Como apontado por Moresi, Barbosa e Braga Filho (2017), o IRL figura como método plausível, ao passo que facilita o levantamento de várias estimativas como rendimento, incertezas, riscos, dificuldades e despesas de implementação de negócio. Já os SRLs podem colaborar nos desafios relacionados aos princípios de gerenciamento de engenharia de sistema, principalmente quando existem muitos fatores determinantes ao sucesso do sistema que impedem sua implementação no ambiente operacional durante o ciclo de vida do desenvolvimento (MORESI; BARBOSA; BRAGA FILHO, 2017).

Quando projetos tecnológicos envolvem o desenvolvimento de sistemas computacionais, estejam eles embarcados em um submarino nuclear estejam hospedados “na nuvem”, despontam as metodologias ágeis como alternativas a melhoramentos ligados às limitações do TRL. Figurando como soluções consolidadas no planejamento e na gestão de projetos de *software*, estas metodologias são norteadas pelos valores e prioridades do manifesto ágil, criado em 2001 por um grupo de profissionais veteranos na área de *software*, que buscava uma alternativa aos processos pesados de desenvolvimento orientados à documentação tradicional (HIGHSMITH, 2001; TELES, 2008). Os quatro valores norteadores do manifesto são (1) indivíduos e interações mais que processos e ferramentas; (2) *software* em

funcionamento mais que documentação abrangente; (3) colaboração com o cliente mais que negociação de contratos, e; (4) responder a mudanças mais que seguir um plano (BECK et al., 2001).

Desde então, o desenvolvimento ágil ganhou força tanto em empresas de *software* quanto em outros setores que buscam flexibilidade nos métodos de desenvolvimento de projetos. Atualmente, centenas de empresas de diferentes segmentos são signatárias do manifesto ágil como TV Globo, BNDES, IBM, Google, GE e muitas outras organizações como universidades, empresas e governos (AGILE MANIFESTO, 2021). As primeiras metodologias ágeis que surgiram foram o Extreme Programming (XP), composta por um pequeno conjunto de práticas que também giram em torno de alguns valores básicos (TELES, 2008), e o Scrum, definido como um *framework* para desenvolver, entregar e manter produtos complexos (SHWABER; SUTHERLAND, 2017). Estes artefatos destinados à gestão de projetos são anteriores ao manifesto ágil, no entanto foram incorporados a essa nova filosofia devido à elevada flexibilidade disponibilizada aos processos, métodos e técnicas empregados em um projeto complexo.

Outra prática que pode servir como alternativa aos TRLs na área da computação, mais especificamente no território brasileiro, é o programa MPS.BR - Melhoria do Processo do Software Brasileiro. O programa é mantido pela instituição Softex com apoio do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação (MCTI) e surgiu em dezembro de 2003 com o objetivo de melhorar a capacidade de desenvolvimento de *software*, serviços e as práticas de gestão de RH na indústria de Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC) (SOFTEX, 2021). Como ilustrado na Figura 2, o programa MPS.BR trabalha com 7 níveis de maturidade de *software* em uma escala que parte do nível básico (G) até o mais aprimorado (A). A escala de maturidade MPS.BR pode ser uma alternativa útil à TRL em se tratando de projetos que visam qualidade de *software*, já que sua documentação é ampla, compatível e aderente às normas internacionais ISO/IEC 12207 e ISO/IEC 15504 (BORIA; RUBINSTEIN; RUBINSTEIN, 2013).

Computação Quântica e o Q System ONE da IBM: Desde os primeiros estudos da física quântica, produzidos pelo físico alemão Max Planck, no ano de 1900 (TYSON, 2016; HAWKING; MLODINOW, 2005), pouco se colocou em prática em termos de produção industrial. Devido ao seu potencial de ruptura na evolução da teoria da informação, a exploração da física quântica e da superposição de estados quânticos e propriedades de emaranhamento têm sido estudadas com certo frenesi desde 1980. Embora a computação quântica ainda esteja em sua infância, muitos experimentos já foram realizados, protótipos foram desenvolvidos e a pesquisa nas áreas teórica e prática continua em um ritmo acelerado com apoio de governos nacionais, instituições de pesquisa e agências de financiamento militares (CORREALE et al., 2019).

Na computação clássica, a informação é reduzida à sua menor porção por meio do *bit*, que pode assumir apenas dois valores, sendo eles 0 e 1. As operações se dão por meio da álgebra booleana. Já na computação quântica, os estados quânticos são utilizados no lugar dos estados clássicos, o que substitui o *bit* pelo *bit* quântico, denominado *q-bit* ou *qubit*, ao passo que os valores 0 e 1 de um *bit* convencional são substituídos pelos vetores $|0\rangle$ e $|1\rangle$ (CARVALHO; LAVOR; MOTTA, 2007). No campo da física, os *qubits* de informação são representados pelo estado quântico de partículas subatômica, em que os *qubits* assumem simultaneamente os estados dos vetores 0 e 1. De acordo com exemplo citado por Wickenden (2008), o valor lógico 0 pode ser representado por um fóton polarizado horizontalmente e o valor lógico 1 pode ser representado por um fóton polarizado verticalmente. Este tipo de abordagem da computação quântica utiliza a tecnologia de fibras ópticas e emprega a luz como insumo básico para viabilizar o processamento da informação. Matematicamente, e como ilustrado na Figura 3, a superposição de estados de um *qubit* permite que a informação armazenada seja infinita no estado quântico, o que exige a realização de uma determinada medição para

Tabela 1. Descrições dos TRLs segundo a NASA

TRL	Descrição
1	Quando uma tecnologia está no TRL 1, a pesquisa científica está começando e esses resultados estão sendo traduzidos em pesquisas e desenvolvimentos futuros.
2	TRL 2 ocorre uma vez que os princípios básicos foram estudados e as aplicações práticas podem ser aplicadas a essas descobertas iniciais. A tecnologia TRL 2 é muito especulativa, pois há pouca ou nenhuma prova de conceito experimental para a tecnologia.
3	Quando a pesquisa e o projeto ativos começam, uma tecnologia é elevada para TRL 3. Geralmente, estudos analíticos e de laboratório são necessários neste nível para ver se uma tecnologia é viável e está pronta para prosseguir com o processo de desenvolvimento. Frequentemente, durante o TRL 3, um modelo de prova de conceito é construído.
4	Depois que a tecnologia de prova de conceito está pronta, a tecnologia avança para o TRL 4. Durante o TRL 4, vários componentes são testados entre si.
5	TRL 5 é uma continuação do TRL 4, no entanto, uma tecnologia que está em 5 é identificada como uma tecnologia de <i>breadboard</i> e deve passar por testes mais rigorosos do que a tecnologia que está apenas em TRL 4. As simulações devem ser executadas em ambientes que são tão próximos do real quanto possível. Assim que o teste do TRL 5 estiver concluído, uma tecnologia pode avançar para o TRL 6.
6	Uma tecnologia TRL 6 tem um protótipo ou modelo representacional totalmente funcional.
7	A tecnologia TRL 7 requer que o modelo ou protótipo de trabalho seja demonstrado em um ambiente espacial.
8	A tecnologia TRL 8 foi testada e "qualificada para voo" e está pronta para implementação em uma tecnologia ou sistema de tecnologia já existente.
9	Uma vez que uma tecnologia foi "comprovada em voo" durante uma missão bem-sucedida, ela pode ser chamada de TRL 9. (NASA, 2012).

Tabela 2. Descrições dos QTRLs segundo o JSC

TRL	Descrição
1	Uma tecnologia de computação quântica está em QTRL1 quando a estrutura teórica para computação quântica (anelamento) é formulada. Os estudos teóricos das propriedades básicas dos dispositivos de computação quântica avançam para a pesquisa aplicada e para o desenvolvimento.
2	A tecnologia chega ao QTRL2 uma vez que os princípios básicos do dispositivo foram estudados e os aplicativos ou algoritmos tecnologicamente relevantes são formulados. A tecnologia de computação quântica QTRL2 é especulativa, pois há poucos ou nenhum resultado experimental que apoie os estudos teóricos.
3	Qubits físicos imperfeitos fabricados, sendo eles os blocos de construção básicos dos dispositivos de computação quântica, estão em QTRL3. Os estudos de laboratório visam validar as previsões teóricas das propriedades dos qubit. Estudos teóricos e de laboratório são necessários para determinar se esses elementos básicos da tecnologia de computação quântica estão prontos para prosseguir no processo de desenvolvimento.
4	Durante o QTRL4, sistemas multi-qubit são fabricados e dispositivos clássicos para manipulação de qubit são desenvolvidos. Ambos os componentes da tecnologia de computação quântica são testados um com o outro.
5	A tecnologia de computação quântica QTRL5 compreende componentes integrados em um pequeno processador quântico sem correção de erros. Os dispositivos de computação quântica rotulados como QTRL5 devem passar por testes rigorosos, incluindo a execução de vários algoritmos para <i>benchmarking</i> .
6	Os componentes integrados em um pequeno processador quântico com correção de erros estão em QTRL6. Testes rigorosos e algoritmos de execução são repetidos para a tecnologia de computação quântica QTRL6.
7	A tecnologia de computação quântica QTRL7 é um protótipo de computador quântico que resolve problemas pequenos, mas relevantes para o usuário. O protótipo é demonstrado em um ambiente de usuário.
8	Uma versão escalável de um computador quântico concluída e qualificada por meio de teste e demonstração está em QTRL8.
9	Uma vez que os computadores quânticos excedem o poder computacional dos computadores clássicos para problemas gerais (e específicos), a tecnologia de computação quântica pode ser rotulada com QTRL9.

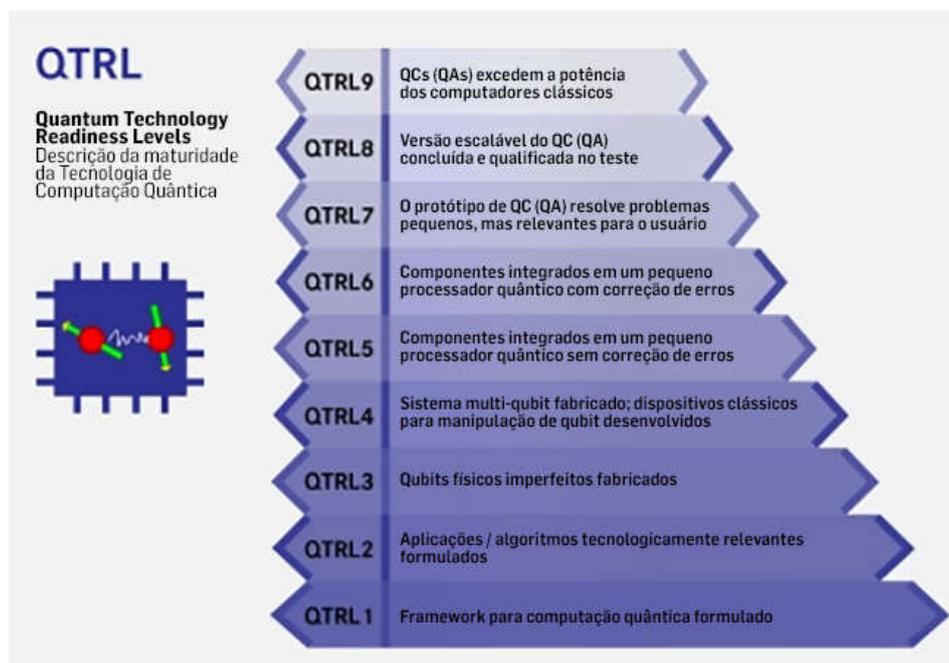


Figura 1. A escala QTRL - Nível de maturidade de tecnologia quântica. Por KristelMichielsen, Thomas Lippert - ForschungszentrumJülich. Tradução própria.

Tabela 3. Limitações encontrados nas atuais implementações TRL

No.	Desafio	Escopo	Limitação
1	Integração e conectividade	Complexidade do Sistema	As escalas TRL são designadas para avaliar cada componente tecnológico de maneira independente. No entanto, os componentes são integrados para funcionar como um sistema completo, o que ocasiona imprevistos de prazo e orçamento quando há necessidade de mudança de um componente que, por sua vez, implica na mudança de todos os seus vizinhos. A medição do TRL não oferece orientação de integração específica.
2	Maturidade de interface	Complexidade do Sistema	Os TRLs avaliam os próprios componentes, mas não avaliam explicitamente a maturidade das interfaces que conectam tais componentes. Problemas nas interfaces não previstas em termos de maturidade comprometem todo o sistema.
3	Escopo da avaliação	Complexidade do Sistema	Não esclarece como decidir qual abordagem adotar na avaliação do TRL e como essa decisão deve ser informada, seja por complexidade do sistema, pressões de custo do projeto ou o risco da operação.
4	Influência de novos componentes ou ambiente	Complexidade do Sistema	A maior parte das orientações do TRL é escrita no contexto de um novo projeto de desenvolvimento de sistema, no qual cada tecnologia de componente é avaliada no início e desenvolvida ao longo do ciclo de vida do sistema. Tais orientações desconsideram a prática de melhorias incrementais, pequenos ajustes para adequação a novos ambientes e a substituição de componentes antigos em sistemas legados visando desempenho adicional. Para manter esses tipos de projeto, as organizações sofrem com adequações ao procedimento de TRL.
5	Priorização de esforços em desenvolvimento tecnológico	Complexidade do Sistema	As avaliações de TRL atuais resultam em uma avaliação da maturidade de dezenas, ou mesmo centenas de tecnologias. Isso leva tempo e esforço. Mas a avaliação é apenas informação, não uma ação. O guia TRL publicado carece de procedimentos de como interpretar e agir com base nas informações do TRL.
6	Prontidão de sistema	Complexidade do Sistema	Não há uma medida do sistema capaz de indicar aos gerentes como o projeto como um todo está progredindo a partir de uma perspectiva de desenvolvimento de tecnologia. Também não existe um meio eficaz de exibir o portfólio de valores de prontidão do sistema. Essa visualização permitiria uma comparação de prontidão com outros projetos em um portfólio.
7	Visualização	Complexidade do Sistema	Visto que a avaliação do TRL pode envolver centenas de componentes, qual é a maneira mais informativa de revisar e tomar decisões com base nesses dados? Os dados do TRL devem ser agregados ou sobrepostos com outras informações? As avaliações de TRL exigem muito esforço e atenção, e seria ineficiente que os detalhes e a qualidade dos dados de TRL se perdessem em sua representação visual.
8	Alinhamento dos TRLs com <i>Gates</i> de desenvolvimento de sistema	Planejamento e Avaliação	Tem havido pouca discussão acadêmica sobre como projetar o mapeamento dos TRLs, como determinar a frequência das avaliações e como determinar os TRLs mínimos aceitáveis apropriados. Além disso, uma vez que esse mapeamento é estabelecido, ainda há uma falta de compreensão dos <i>trade-offs</i> e consequências do fracasso em atingir sob a meta TRL.
9	Renúncias	Planejamento e Avaliação	Não é incomum deixar de atingir o TRL mínimo aceitável para uma ou mais tecnologias. Nesse ponto, há opções: cancelar o projeto, atrasar o projeto ou reconhecer o risco e passar para a próxima fase. Algumas organizações chamam esta última opção de “dispensa”, enquanto outras referem-se à emissão de uma “dispensa”. Em ambos os casos, não existe um método comumente praticado para dar tal dispensa.
10	Planos de <i>backup</i>	Planejamento e Avaliação	Não existe um vocabulário padrão para discutir planos de <i>backup</i> com relação ao desenvolvimento e risco de tecnologias, e o conceito não está refletido nas diretrizes de avaliação de prontidão de tecnologia.
11	Esforço para progresso	Planejamento e Avaliação	Os profissionais perceberam que a maturidade atual dos TRLs não fornece nenhuma informação sobre como alcançar futuros TRLs. Em particular, falta uma compreensão do esforço, tempo e recursos necessários para avançar para o próximo TRL e os TRL subsequentes.
12	Confiança para progresso	Planejamento e Avaliação	Intimamente relacionado ao desafio anterior de esforço para progredir está a necessidade de uma medida da probabilidade de progresso para a frente na escala TRL. Essas medidas de confiança geralmente são baseadas no instinto e carecem de uma técnica de avaliação metódica.
13	<i>Roadmapping</i> produto	de Planejamento e Avaliação	Os <i>roadmaps</i> de produtos são usados como uma ferramenta de planejamento para mapear versões futuras do produto. Além de decidir se as tecnologias estão maduras o suficiente para o produto em desenvolvimento, também é necessário pensar em linhas de produtos futuros e garantir que as tecnologias apropriadas que atendam ao mercado esperado e às necessidades técnicas estejam disponíveis para esses produtos. Não há bases na tecnologia TRL que indique quando uma organização deve considerar uma tecnologia pronta para um produto futuro em seu <i>roadmap</i> .
14	Subjetividade da validação	da Validação da Avaliação	Os níveis de TRL não são perfeitamente distintos um do outro e, em se tratando de tecnologias complexas, pode ser difícil para avaliadores multidisciplinares chegarem a um acordo sobre o nível exato que foi alcançado. Como as tecnologias podem ser altamente complexas, às vezes é necessário que o líder de tecnologia (como a pessoa mais bem informada dos detalhes) avalie o nível de preparação da tecnologia. Isso cria uma oportunidade para parcialidade devido ao otimismo, competição por recursos, evitação de escrutínio ou simplesmente consciência de seus próprios custos irrecuperáveis.
15	Imprecisão da escala	Validação da Avaliação	As definições de TRL usam as palavras “demonstração”, “validação” e “comprovação”. Diferentes interpretações dessas palavras geram resultados diferentes. As diretrizes atuais do TRL não abordam como um desenvolvedor deve lidar com o cenários comuns que envolvem testes da tecnologia como aprovação e reprovação, operacional ou de alongamento, condições e requisitos de desempenho, entre outros.

Tabela 4. Aplicação dos níveis QTRL à tecnologia Q System One

QTRL	Definição	Evidências e observações
1	<i>Frame work</i> teórico da computação quântica é formulado	Arcabouço bem definido pela comunidade científica e assimilado pela equipe de desenvolvedores da tecnologia.
2	Criação de algoritmos e aplicações relevantes	IBM disponibiliza sua plataforma quântica (IBM Q Experience) na nuvem para acesso da comunidade de código aberto, contabilizando mais de 100.000 usuários, 6,7 milhões de experimentos e mais de 130 trabalhos publicados. Combinação de sistemas quânticos e clássicos.
3	Fabricação de <i>qubits</i> físicos imperfeitos	Montagem e operação do sist em aemlaboratório em janeiro de 2019. Produção de <i>qubits</i> altamente instáveis e necessidade de refrigeração do equipamento a 273,15 ° C negativos.
4	Fabricação de sistema de multi- <i>qubits</i> ; Desenvolvimento de equipamentos clássicos para manipulação de <i>qubits</i>	A plataformapossui 20 <i>qubits</i> . Ausência de equipamentos clássicos para manipulação de <i>qubits</i> .

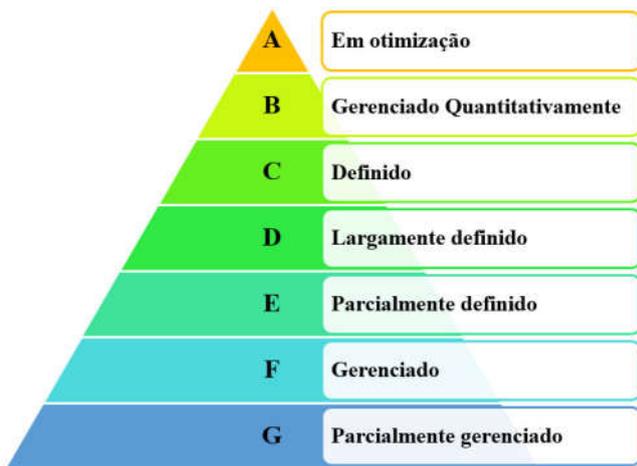


Figura 2. Os níveis de maturidade do programa MBS.BR

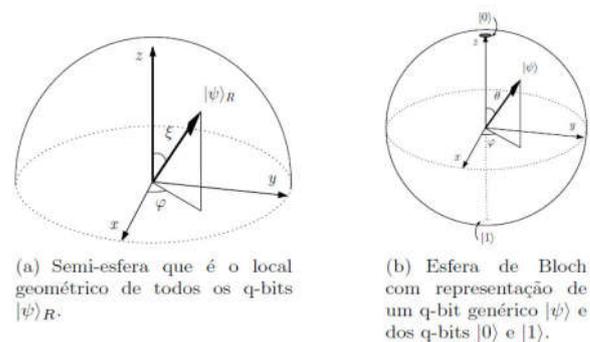


Figura 3. Esfera de Bloch (CARVALHO; LAVOR; MOTTA, 2007)

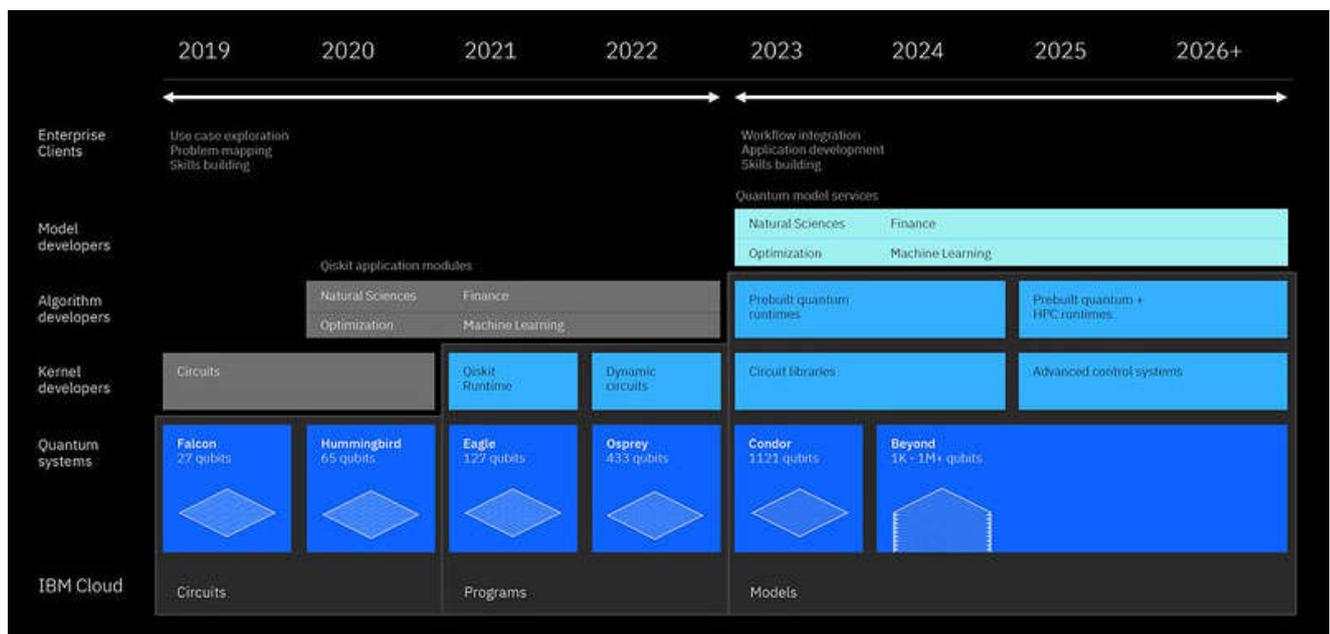


Figura 4. Roadmap tecnológico da plataforma IBM Quantum (WEHDEN; FARO; GAMBETTA, 2021)

que ela seja acessível no nível clássico (CARVALHO; LAVOR; MOTTA, 2007). No entanto, o ato de medir a informação por meio de instrumentos físicos (que por sua vez também possuem partículas quânticas) afeta o estado quântico, fazendo com que os qubits assumam estados definidos, passíveis de processamento. Enquanto a computação clássica se limita à atual programação em escala nanométrica, o que já é um grande feito em termos de engenharia, a computação quântica possui o potencial de expandir sua capacidade computacional em níveis subatômicos, o que teoricamente permitiria desempenho ilimitado. No entanto, o atual estágio de desenvolvimento em que se encontram os computadores quânticos está restrito às limitações de escalabilidade e de incoerência impostas por materiais e condições ambientais que demandam alto custo de implementação e operacional como o uso de supercondutores e temperatura ambiente próxima a -273°C (LIMA, 2020). Vale ressaltar que, apesar das promessas, os computadores quânticos ainda se limitam a manter sua eficiência superior apenas em contextos de cálculos específicos, ou seja, em situações que exigem a solução de problemas matemáticos exponenciais. Isso implica na necessidade de pré-programar as entradas para que os computadores quânticos efetuem operações complexas destinadas a um resultado previamente desejado. Esse processo difere da computação multitarefa dos computadores clássicos, que podem efetuar processamento paralelo visando a solução de diferentes problemas. Na atualidade, em termos de poder computacional, a Intel atingiu a marca de 49 qubits,

enquanto Google anunciou ter alcançado 72 qubits de potência (ALECRIM, 2019). Sob uma perspectiva otimista e comercialmente audaciosa, a IBM lançou em setembro de 2020 um roadmap de hardware (Figura 4) que prevê um caminho tecnológico capaz de alcançar a marca de 1.000 qubits em apenas 4 anos. Segundo Wehden, Faro e Gambetta (2021), cientistas da corporação, criar as condições certas para a computação quântica transformar o ecossistema de computação distribuída em um ambiente mais amplo ainda nesta década demanda esforços imensos em termos industriais. Enquanto a IBM planeja disponibilizar em 2023 serviços baseados no modelo quântico para mercados de finanças, ciências naturais e inteligência artificial, a companhia já disponibiliza ao público especializado uma solução menos robusta com poder computacional de 20 qubits, o Q System One. A IBM anunciou o produto como o primeiro sistema de computação quântica integrado para uso comercial no mundo. Segundo a companhia, O IBM Q System One é composto por uma série de componentes personalizados que trabalham para servir como avançado programa de computação quântica baseado em nuvem, que inclui: (1) Hardware Quantum projetado para ser estável e autocalibrado, oferecendo qubits de alta qualidade repetíveis e previsíveis; (2) Engenharia criogênica que fornece um ambiente quântico contínuo e isolado; (3) Eletrônica de alta precisão em fatores de forma compacta para controlar rigidamente grandes quantidades de qubits; (4) O firmware de Quantum para gerenciar o estado do sistema e permitir atualizações sem interrupções ou inatividade para os usuários; (5) Computação

clássica para fornecer acesso seguro à nuvem e execução híbrida de algoritmos quânticos.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir dos requisitos definidos pela escala proposta pelo JSC (2017) e da literatura especializada, sugere-se que o nível QTRL em que a tecnologia Q System One se encontra é o 3. Em interpretação ao QTRL4, conforme disposto na Tabela 2, entende-se que a tecnologia atende alguns de seus requisitos, porém, este nível ainda não foi atingido devido à ausência de equipamentos clássicos para a manipulação dos *qubits*. A Tabela 4 detalha cada uma das etapas propostas pela escala QTRL em função das evidências coletadas. A partir da aplicação dos níveis QTRL à tecnologia Q System One, nota-se que o QTRL1 foi superado com facilidade pelos desenvolvedores, devido ao considerável volume de conhecimento teórico disponível antes do início do projeto. O alcance do QTRL 2 foi facilitado estrategicamente devido à disponibilização da tecnologia para a comunidade de desenvolvedores, difundida a nível mundial e com expertise em projetos colaborativos. Como as linguagens de programação convencionais permitem a manipulação de portas lógicas modificadas virtualmente para as simulações quânticas, é dispensável ao desenvolvedor o conhecimento teórico da física quântica, consideravelmente denso e com longa curva de aprendizado. Ainda assim, a IBM disponibilizou novas linguagens, um *kit* de desenvolvimento e extensa documentação para que os desenvolvedores pudessem utilizar e dar suporte a outras áreas da ciência. Quanto ao nível atual em que se encontra o Q System One, existe um impedimento técnico para que esta tecnologia avance para o QTRL4. Há limitação devido à necessidade de se projetar equipamentos convencionais para tratar dos multi-*qubits*, o que tem se provado impossível com os materiais e condições ambientais atualmente disponíveis. Como apontado por Matsuo, Hattori e Yamashita (2019), existe uma forte restrição à estabilização dos *qubits* devido às estruturas quânticas da vizinhança, ou seja, de toda e qualquer matéria existente ao redor do equipamento, além da interferência da pressão atmosférica e do campo magnético da Terra. São altos os custos com resfriamento dos materiais, objetivando atingir a supercondutividade necessária, e o isolamento magnético do equipamento. Dessa forma, ainda não é possível miniaturizar o computador, tão pouco mantê-lo em um ambiente comercial. Já em relação às particularidades da escala QTRL, notou-se limitações similares às levantadas pela pesquisa de Olechowski, Eppinger e Joglekar (2015) na sua possível aplicação à tecnologia Q System One. Basicamente, em termos de documentação, nota-se as mesmas limitações que dizem respeito à complexidade do sistema (integração, interface, escopo, novos componentes e ambientes, esforços, prontidão de sistema e visualização), planejamento (gates de sistema, renúncias, *backup*, esforço, confiança e *roadmapping*) e validação da avaliação (subjetividades e imprecisão da escala). Acredita-se que tais limitações possam ser mantidas de maneira praticamente inalterada devido à grande similaridade na redação das definições entre as escalas TRL e QTRL.

CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS

Diante do exposto, entende-se que há um longo caminho a ser percorrido pelas corporações e instituições que investem tempo e dinheiro no desenvolvimento de tecnologias quânticas para que as mesmas atinjam a maturidade tecnológica necessária para lançamento no mercado. Saltar do nível 3 para o 9 exigirá avanços em toda a cadeia produtiva do segmento quântico, com implicações em capacitação profissional, extração e desenvolvimento de novas matérias primas, bem como novos avanços científicos. Apesar de o público ter aguardado cinco décadas entre o surgimento da primeira máquina de perfurar cartões, no final do século XIX, e o lançamento da primeira geração de computadores modernos, com o ENIAC em 1946, a IBM se beneficia do que parece ser um cenário mais promissor para a computação quântica, já que tem a seu favor uma comunidade mundial de desenvolvedores de código aberto e muitos

cientistas testando e otimizando seus sistemas quânticos. Como apontado por Wehden, Faro e Gambetta (2021), e de acordo com o *roadmap* da companhia, a IBM tem metas e estratégias bem definidas para disponibilizar soluções usuais a diferentes mercados em um período de dois anos. Se concretizadas suas expectativas, algoritmos, *kernel* e sistemas quânticos estarão aptos a executar com estabilidade e eficiência tarefas computacionais na casa dos milhares de *qubits*, o que poderá beneficiar diversos setores, principalmente aqueles que possuem demanda por análises fatoriais como aprendizagem de máquina, mercado financeiro e modelos científicos. A partir dos resultados obtidos neste trabalho, sobretudo com base nas descobertas de Olechowski, Eppinger e Joglekar (2015), nota-se uma necessidade latente de adequação e/ou melhorias na documentação da escala TRL da NASA quando esta é aplicada a projetos computacionais. Dados os avanços na área de engenharia de *software* e a prevalência das metodologias ágeis, que priorizam o desenvolvimento incremental cíclico ao invés do modelo sequencial, expõe-se uma considerável incompatibilidade entre o emprego da escala TRL, em sua forma nativa, a essa classe de projetos. Tais limitações são automaticamente transportadas para a escala QTRL, tendo em vista sua similaridade com a metodologia original, e potencializadas pela complexidade dos projetos de computação quântica. Escalas de maturidade de *software* especializadas como o MPS. BR podem servir como alternativas robustas às TRL considerando projetos computacionais que demandem definição de prontidão tecnológica. Como discutido, o projeto de computação quântica da IBM já está implementado e disponível para testes da comunidade. No entanto, sua maturidade tecnológica ainda é baixa, fato este que se desdobra na demanda por P&D e estudos científicos que corroborem com a elevação do nível de maturidade da computação quântica. Frente a essa problemática, projeta-se para um futuro próximo o desenvolvimento de estudos prospectivos que permitam agregar valor às informações do presente relacionadas ao estado da arte da computação quântica. Uma vez publicados, compreende-se que tais estudos possam subsidiar pesquisadores e profissionais do setor da computação quântica a fomentar seus processos de P&D, bem como acelerar o desenvolvimento tecnológico dessa indústria promissora.

REFERÊNCIAS

- Agile Manifesto. Independent Signatories of The Manifesto for Agile *Software* Development. Disponível em: <http://agilemanifesto.org/display/index.html>. Acesso em: 21 Fev. 2021.
- Alecrim, Emerson. Q System One é o computador quântico da IBM criado para empresas. Disponível em: <https://tecnoblog.net/274412/computador-quantico-ibm-q-system-one-ces19>. Acesso em 16 Fev. 2021.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT). NBR ISO 16290:2015. Sistemas espaciais: definição dos níveis de maturidade da tecnologia (TRL) e de seus critérios de avaliação. 2015. Disponível em: <http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=344747>. Acesso em: 17 Fev. 2021.
- Associação Brasileira DE Pesquisa E Inovação Industrial (Embrapii). Manual de Operação das Unidades Embrapii. 2020. Versão 6.0. Disponível em: <https://embrapii.org.br/institucional/manuais/manual-de-operacao-das-unidades-embrapii>. Acesso em: 19 Fev. 2021.
- Bassi, Angelo; Paternostro, Mauro. Quantum Technologies in Space - Policy White Paper. 2019. European Space Agency. Disponível em: <https://www.cosmos.esa.int>. Acesso em: 19 de Fev. 2021.
- Beck, Kent et al. Manifesto para Desenvolvimento Ágil de *Software*. 2001. Disponível em: <http://agilemanifesto.org/iso/ptbr/manifesto.html>. Acesso em: 20 Fev. 2021.
- Boria, L.; Rubinstein, V. L.; Rubinstein, A. A História da Tahini-Tahini: Melhoria de Processos de Software com Métodos Ágeis e Modelo MPS. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, Secretaria de Política de Informática, Brasília, 2013. Disponível em: <https://softex.br/mpsbr/livros>. Acesso em: 17 Mai. 2021.
- Cardoso, Marcos B.; Reiser, Renata HS; Costa, Antônio Carlos R. Uma Abordagem Funcional na Implementação do Algoritmo de

- Teleportação Quântica. TEMA-Tendências em Matemática Aplicada e Computacional, v. 7, n. 2, p. 237-248, 2006.
- Carvalho, L. M.; Lavor, C.; Motta, V. S. Caracterização matemática e visualização da esfera de Bloch: ferramentas para computação quântica. TEMA-Tendências em Matemática Aplicada e Computacional, v. 8, n. 3, p. 351-360, 2007.
- Highsmith, Jim. História: O Manifesto Ágil. 2001. Disponível em: <http://agilemanifesto.org/history.html>. Acesso em: 20 Fev. 2021.
- IBM. Quantum Computing. Disponível em: <https://www.ibm.com/quantum-computing>. Acesso em: 21 Fev. 2021.
- Jülich Supercomputing Centre (JSC). Technology Readiness Level of Quantum Computing Technology (QTRL). 2017. Disponível em: https://www.fz-juelich.de/ias/jsc/EN/Research/ModellingSimulation/QIP/QTRL/_node.html. Acesso em: 16 de Fev. 2021.
- Lima, Bruno Ignacio. Computação Quântica: Entenda o futuro dos computadores e suas principais aplicações. Disponível em: <https://www.oficinadnet.com.br/ciencia/31617-computacao-quantica-entenda-o-futuro-dos-computadores-e-suas-principais-aplicacoes>. Acesso em: 15 Fev. 2021.
- Matsuo, Atsushi; Hattori, Wakakii; Yamashita, Shigeru. Reducing the overhead of mapping quantum circuits to IBM Q system. In: 2019 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). IEEE, 2019. p. 1-5.
- Moresi, Eduardo Amadeu Dutra; BARBOSA, Jair Alves; BRAGA Filho, M. O. Modelos para analisar níveis de prontidão de inovação. In: Séptima Conferencia Iberoamericana DE Complejidad, Informática Y Cibernética-CICIC. 2017. p. 78-81.
- Nasa. Technology Readiness Level. 2012. Disponível em: https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/txt_accordion1.html. Acesso em: 17 Fev. 2021.
- Olechowski, Alison; Eppinger, Steven D.; JOGLEKAR, Nitin. Technology readiness levels at 40: A study of state-of-the-art use, challenges, and opportunities. In: 2015 Portland international conference on management of engineering and technology (PICMET). IEEE, 2015. p. 2084-2094.
- Ribeiro, N. M. Prospecção Tecnológica. vol. 2. Salvador: IFBA, FORTEC, 2019. (Coleção PROFNIT). Disponível em: <http://www.profnit.org.br/wp-content/uploads/2019/02/PROFNIT-Serie-Prospeccao-Tecnologica-Volume-2.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2020.
- Rocha, Daiane. Uma adaptação da Norma NBR ISO 16290:2015 aplicada em projetos do setor aeroespacial. 2016. 120f. Dissertação de Mestrado em Sistemas Espaciais, Ensaio e Lançamentos. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, São Paulo, 2016.
- Schwaber, Ken; Sutherland, Jeff. Um guia definitivo para o Scrum: As regras do Jogo. Outubro de 2017. Disponível em: <https://www.scrumguides.org/docs/scrumguide/v2017/2017-Scrum-Guide-Portuguese-Brazilian.pdf>. Acesso em: 20 Fev. 2021.
- Teles, Vinícius Manhães. Manifesto ÁGIL. Disponível em: https://www.desenvolvimentoagil.com.br/xp/manifesto_agil. Acesso em: 20 Fev. 2021.
- Tyson, Neil de Grasse; Goldsmith, Donald. Origens: catorze bilhões de anos de evolução cósmica. 9 ed. São Paulo: Planeta do Brasil, 2015.
- Valente, Mariana. Technology ReadinessLevel (TRL): conheça o framework de confiabilidade em projetos da NASA. 2020. Disponível em: <https://certi.org.br/blog/trl-desenvolvimento-projetos>. Acesso em: 17 Fev. 2021.
- Zaparolli, Domingos. A era dos qubits - Computadores da IBM e D-Wave abrem nova etapa do processamento quântico, mas ainda há muito o que evoluir. Revista Fapesp. Ed. 284. Out. 2019. Tecnologia, Computação. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br>. Acesso em 21 Fev. 2021.
- Wehden, Karl; FARO, Ismael; GAMBETTA, Jay. IBM's roadmap for building an open quantum software ecosystem. IBM Research Blog. 2021. Disponível em: <https://www.ibm.com/blogs/research/2021/02/quantum-development-roadmap>. Acesso em: 21 Fev. 2021.
- Wickenden, Dennis K. Semiconductor Devices: Moore Marches On. Johns Hopkins APL Technical Digest (Applied Physics, v. 28, n. 1, p. 30-39, 2008..
