

# UMA ABORDAGEM EXPLORATÓRIA SOBRE ALGORITMOS E SOFTWARES DOS COMPUTADORES QUÂNTICOS DA SPINQ

MARIANA GODOY VAZQUEZ MIANO

Fatec AMERICANA - MINISTRO RALPH BIASI - Coordenadoria de Análise e Desenvolvimento de Sistemas  
mariana.miano@fatec.sp.gov.br

AN EXPLORATORY APPROACH TO ALGORITHMS AND SOFTWARE OF SPINQ QUANTUM COMPUTERS

Eixo Tecnológico: *Informação e Comunicação*

## Resumo

O SpinQ Gemini, lançado em 2020, foi o primeiro computador quântico desktop para uso no ensino, possui dois qubits, opera em temperatura ambiente e seu hardware é baseado em espectrômetro de ressonância magnética nuclear (NMR). Seu software SpinQuasar é utilizado para controlar o computador e para demonstração de computação quântica, possuindo experimentos reais e simulados [1]. O SpinQuasar é um software cliente de computação quântica utilizado para controlar os computadores quânticos Gemini e Triangulum. Possui vários experimentos quânticos reais e simulados, oferecendo suporte pela internet e adequado para educação profissional e pesquisas científicas [2]. A pesquisa tem os seguintes objetivos específicos: em relação ao SpinQ Gemini, detalhar e estudar o algoritmo quântico variacional e HHL que estão presentes no SpinQ Gemini, assim como discutir suas funcionalidades e aplicações; em relação ao software SpinQuasar, explorar o sistema operacional dos computadores quânticos da SpinQ, suas diversas funções e diferentes aplicações. A metodologia consiste em pesquisar o funcionamento do sistema operacional SpinQuasar e os algoritmos quânticos conhecidos disponibilizados no SpinQ Gemini. Materiais de pesquisa incluem artigos científicos sobre os algoritmos quânticos do SpinQ Gemini e o uso do SpinQuasar como plataforma de aprendizagem, assim como os diferentes recursos quânticos disponíveis. Como Resultados da pesquisa, observou-se que o uso do software SpinQuasar, utilizado no computador quântico SpinQ Gemini representa um diferencial no desenvolvimento de computadores quânticos, pois com uma interface robusta e interativa gerencia qubits e algoritmos quânticos de forma eficiente, contribuindo para o desenvolvimento da Computação Quântica. Como destaque dos algoritmos quânticos, o HHL mostrou-se exponencialmente mais rápido para a resolução de sistemas de equações lineares e *machine learning*.

**Palavras-chave:** *SpinQuasar, HHL, Gemini, Triangulum, computadores quânticos.*

## Abstract

The SpinQ Gemini, launched in 2020, was the first desktop quantum computer for use in education. It has two qubits, operates at room temperature, and its hardware is based on a nuclear magnetic resonance (NMR) spectrometer. Its SpinQuasar software is used to control the computer and to demonstrate quantum computing, with real and simulated experiments [1]. SpinQuasar is a quantum computing client software used to control the Gemini and Triangulum quantum computers. It has several real and simulated quantum experiments, offering support over the internet and is suitable for professional education and scientific research [2]. The research has the following specific objectives: in relation to the SpinQ Gemini, to detail and study the variational quantum algorithm and HHL that are present in the SpinQ Gemini, as well as discuss their functionalities and applications; in relation to the SpinQuasar software, to explore the operating system of the SpinQ quantum computers, their various functions and different applications. The methodology consists of researching the functioning of the SpinQuasar operating system and the known quantum algorithms available in SpinQ Gemini. Research materials include scientific articles on SpinQ Gemini quantum algorithms and the use of SpinQuasar as a learning platform, as well as the different quantum resources available. As a result of the research, it was observed that the use of the SpinQuasar software, used in the SpinQ Gemini quantum computer, represents a differential in the development of quantum computers, since with a robust and interactive interface it manages qubits and quantum algorithms efficiently, contributing to the development of Quantum Computing. As a highlight of the quantum algorithms, HHL proved to be exponentially faster for solving systems of linear equations and machine learning.

**Key-words:** *SpinQuasar, HHL, Gemini, Triangulum, quantum computers.*

## 1. Introdução

Uma das ferramentas disponíveis dentro do Gemini é a computação em nuvem. Para a computação em nuvem, é utilizado o *Variational Quantum Eigensolver* (VQE), que se trata de um algoritmo quântico variacional (VQAs) [1].

O acesso ao primeiro computador quântico baseado em nuvem ocorreu em 2016, porém limitações como ruído e número de qubits dificultou a implementação de algoritmos quânticos. Os VQAs surgiram para obter vantagem quântica, possuindo métodos de aprendizado de máquinas, como redes neurais; utilizam a caixa de ferramentas da otimização clássica para a mitigação de ruído [3]. A principal vantagem deste algoritmo é fornecer uma estrutura geral para resolução de uma variedade de problemas, com elementos básicos que a maioria dos VQAs possuem.

Para desenvolver um VQA, o primeiro passo é definir uma função de custo que codifica a solução para o problema. Indica-se então uma ansatz, que é uma operação quântica que depende de um conjunto de parâmetros contínuos ou discretos que podem ser otimizados. Por fim, a ansatz é treinada em um loop híbrido quântico-clássico, para resolver a tarefa de otimização. Sabe-se que muitas tarefas de otimização utilizam informações no gradiente da função de custo que pode ajudar a acelerar e garantir a convergência do otimizador.

A vantagem principal do VQA é que ele permite a programação orientada a tarefas, ou seja, fornece uma estrutura que pode ser usada para lidar com uma vasta gama de tarefas, além de permitir a computação quântica universal.

O primeiro VQA proposto foi o *Variational Quantum Eigensolver* (VQE), baseado no princípio variacional, que busca otimizar um limite superior para o valor mais baixo possível de um observável em relação a uma função de onda experimental, ou seja, fornece um hamiltoniano e uma função de onda experimental  $|\psi\rangle$ . O VQE é um método que utiliza uma abordagem computacional híbrida quântica-clássica para encontrar autovalores de um hamiltoniano e foi proposto como alternativa diante dos algoritmos quânticos que necessitam de hardware quântico não alcançável no momento [4][5].

A principal característica que distingue o VQE de outros VQAs é que ele está restrito a encontrar o estado próprio de um observável quântico. Assim, o processo de codificação do hamiltoniano é característico do VQE.

O VQE é um algoritmo baseado no funcional de Rayleigh-Ritz, um princípio variacional. Ao fornecer um hamiltoniano  $\hat{H}$  e uma função de onda experimental  $|\psi\rangle$ , a energia do estado fundamental deste hamiltoniano,  $E_0$ , é limitada por

$$E_0 \leq \frac{\langle \psi | \hat{H} | \psi \rangle}{\langle \psi | \psi \rangle} \quad (1)$$

Desta forma, o objetivo do VQE é encontrar uma padronização de  $|\psi\rangle$  para que o valor do hamiltoniano seja minimizado. Este valor estabelece um limite superior para a energia do estado fundamental e, idealmente, deveria ser indistinguível dela até o nível de precisão desejado. Para converter esta tarefa de minimização em um problema para execução em um computador quântico de forma viável, é necessário inicialmente estabelecer uma função de onda ansatz, que pode ser realizada em um dispositivo quântico através de uma série de portas quânticas.

Os principais componentes do algoritmo são: construção e representação hamiltoniana, codificação de operadores, estratégia de medição e agrupamento, ansatz e preparação de estado, otimização de parâmetros e mitigação de erros.

O algoritmo HHL, nomeado em homenagem aos seus criadores Harrow, Hassidim e Lloyd, é um dos algoritmos quânticos mais importantes e com potencial para revolucionar diversos campos da ciência e tecnologia. Ele foi criado em 2009 para resolver sistemas de equações lineares com grande eficiência, utilizando as propriedades únicas da computação quântica.

### Anais da VIII Mostra de Docentes em RJJI

Um problema de sistema linear, conhecido como LSP, pode ser representado como o seguinte:  $Ax = b$ , onde  $A$  é  $Nb \times Nb$  matriz Hermitiana, com  $x$  e  $b$  vetores  $Nb$ -dimensionais. Para simplificar, assume-se  $Nb = 2 nb$ , onde  $nb$  é o número de qubits no circuito quântico e  $Nb$  é o número total de combinações de qubits,  $nb$ . Na representação matricial, os qubits são representados por suas combinações totais ( $Nb \times Nb$ ), ou seja, para  $Nb$  número de incógnitas, são necessários  $nb$  qubits para resolver as incógnitas. Equações fictícias podem ser adicionadas de outra forma para converter o sistema que satisfaça esta suposição [3].

Para solucionar os problemas de sistema linear, o algoritmo HHL tem 5 componentes principais: preparação de estado, estimativa de fase quântica (QPE), rotação ancilla bit, estimativa de fase quântica inversa (IQPE) e medição.

A matriz  $A$  é simulada através da codificação hamiltoniana, codificando-a como hamiltoniana de uma porta unitária. A simulação hamiltoniana é usada para transformar a matriz Hermitiana em um operador unitário, para ser aplicado. Uma matriz Hermitiana é uma matriz que é igual à sua matriz adjunta (transposta seguida de conjugação complexa), ou seja, se  $A$  é uma matriz Hermitiana, então ela é definida como  $A = A^\dagger = (A^T)^*$  onde  $A^T$  é a transposta de  $A$ .

A matriz  $A$  a ser resolvida no LPS é assumida como Hermitiana. Isso é possível se  $A$  for esparsa e eficientemente computável por linha, o que significa que tem no máximo  $s$  entradas diferentes de zero por linha e, dado um índice de linha, essas entradas podem ser computadas no tempo  $O(s)$ . Sob essas suposições, a simulação hamiltoniana quântica permite ser simulada no tempo.

A preparação do estado quântico no algoritmo HHL consiste em uma etapa fundamental para o funcionamento do algoritmo, que codifica o sistema de equações lineares a ser solucionado em um estado quântico, utilizando os qubits do computador quântico. Há 3 etapas para a preparação desse estado. A primeira etapa é a codificação das variáveis do sistema de equações lineares, que pode ser realizada de diversas maneiras, como por exemplo, utilizando a codificação binária ou a codificação de fase; a segunda etapa é a codificação dos coeficientes, que codifica os coeficientes das equações lineares em qubits. A terceira etapa é a criação do estado inicial, onde são criados um estado quântico inicial e um estado de superposição uniforme em todos os qubits. A quarta fase é a aplicação de operações quânticas ao estado inicial para gerar um estado final que representa o sistema de equações lineares [5].

O algoritmo HHL tem diversas aplicações, porém, a mais conhecida é na área de *machine learning*, que tem recebido grandes investimentos nos últimos anos. Muitos problemas tradicionais de aprendizado de máquina estão relacionados à otimização, com a solução de equações lineares. Como o algoritmo HHL é exponencialmente mais rápido que o algoritmo clássico para resolver equações lineares com matrizes Hermitianas esparsas, então o algoritmo HHL acelera as etapas de otimização no aprendizado de máquina clássico. Assim, algoritmos quânticos a algoritmos tradicionais de aprendizado de máquina têm sido aplicados conjuntamente para melhorar os algoritmos, indicando assim a direção da pesquisa do aprendizado de máquina quântica [6].

O aprendizado de máquina se beneficia do alto paralelismo da computação quântica para otimizar as máquinas tradicionais de aprendizagem. A proposta do algoritmo HHL promove diretamente o desenvolvimento da direção do aprendizado de máquina quântica.

Alguns algoritmos de aprendizado de máquina quântica, baseados em problemas de sistemas lineares, usam algumas das técnicas do algoritmo HHL, em maior ou menor grau. Isso ocorre não apenas através de algoritmos quânticos para lidar com partes complexas de algoritmos clássicos, mas para ajudar a como mapear com eficiência os dados clássicos no algoritmo original de aprendizado de máquina para os estados quânticos.

*Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ*

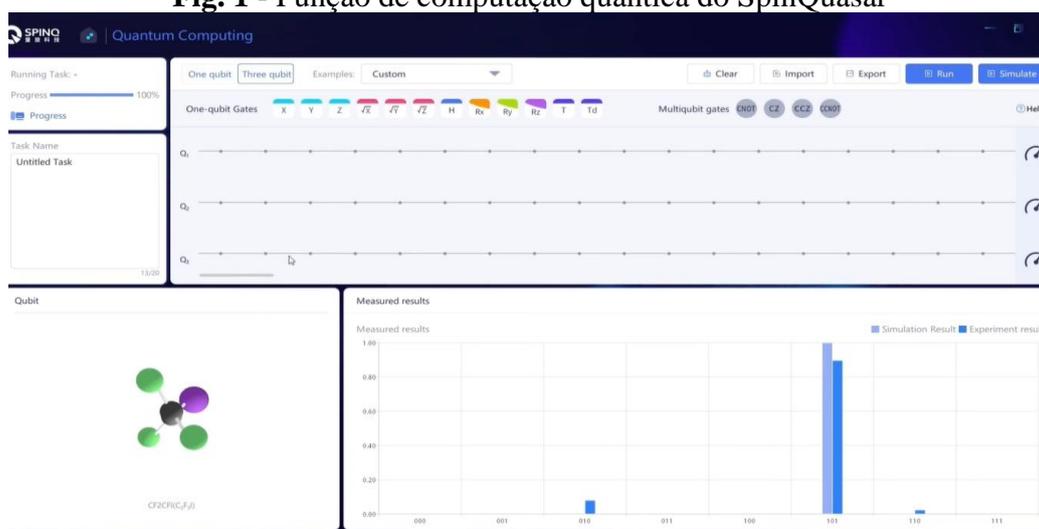
O SpinQuasar é um software cliente de computação quântica utilizado para controlar os computadores quânticos Gemini e Triangulum, operando na demonstração da computação quântica e sua customização. Possui vários experimentos quânticos reais e simulados, oferece acesso à internet, sendo adequado para a educação profissional e pesquisas científicas simples [2]. É um software otimizado para a educação em computação quântica, bem como implementação de computação quântica personalizada. Oferece suporte ao acesso para o hardware de computação quântica em vários terminais de rede, assim como uma biblioteca de interfaces para apoiar os desenvolvedores no acesso às funções da computação quântica. Pode executar algoritmos quânticos complexos de 3 qubits (transformada quântica de Fourier, algoritmo de busca Grover, adição e subtração quântica) e operações com portas quânticas. Spinquasar fornece vários experimentos quânticos reais e simulados, além de oferecer suporte a visitas de usuários finais pela internet.

O SpinQuasar possui diversos recursos que se sobressaem em suas aplicações específicas, em geral, ele é uma ferramenta robusta que pode ser usada para uma variedade de práticas como a análise de dados, aprendizado de máquina ou simulação de sistemas complexos.

Dentre suas funcionalidades, ele é composto por cinco módulos: o módulo de computação quântica (com alguns exemplos integrados de algoritmos quânticos bem conhecidos, como o algoritmo de Grover), o módulo de espectroscopia NMR, o módulo de calibração de instrumentos (que permite que os usuários calibrem estados pseudo-puros), o módulo de gerenciamento de tarefas e o módulo de biblioteca dinâmica. Esses módulos podem ser facilmente acessados na página inicial do SpinQuasar [1].

A demonstração da função de computação quântica disponível no software é apresentada na figura 1 [7], que possui 4 áreas. A área de operações localizada na parte direita superior, caracterizada pelas portas quânticas disponíveis para uso, em diversas cores diferentes; a área de resultados, localizada na parte direita inferior, caracterizada pelos gráficos de amostragem; a área de informações, localizada da parte esquerda superior, composta por dois blocos, que mostra o progresso da tarefa em execução e por último, a área onde a estrutura de um modelo de amostra permanece em exibição até ser alterado.

**Fig. 1 - Função de computação quântica do SpinQuasar**



Fonte: (Switchscience, 2022).

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ

A figura 2 apresenta uma aba de verificação de temperatura do software, possibilitando checar se a temperatura dos ímãs está estável. O software é programado para manter a temperatura em aproximadamente 35° Celsius.

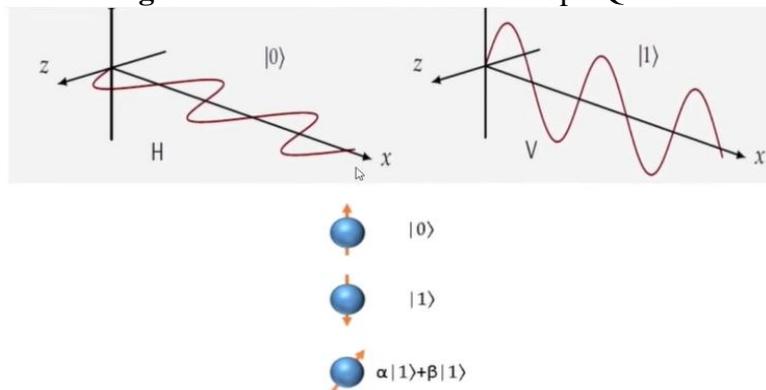
Fig. 2 - Aba de calibragem do SpinQuasar



Fonte: (Switchscience, 2022).

O Triangulum provê conhecimento quântico básico na sua função conhecimento, apresentado na figura 3. Essa aba inclui textos e exemplos sobre Ressonância Magnética Nuclear (NMR), computação quântica e computação quântica básica com NMR.

Fig. 3 - Aba de conhecimento do SpinQuasar



Quantum state and quantum superposition

A quantum state is the state of a qubit. We often use dirac symbol ( $| \rangle$ ) to represent quantum states in quantum mechanics. For example,  $|0\rangle$  is 0 state,  $|1\rangle$  is 1 state. For a two-level pure state system: unlike a classical bit which can only be 0 or 1 at a certain time, a qubit can be in the superposition of 0 and 1 at a

Fonte: (Switchscience, 2022).

No SpinQ Gemini, o usuário pode usar a interface de computação quântica do SpinQuasar para acessar a função de computação quântica. Este sistema envolve os pulsos calibrados nas portas quânticas. Os usuários podem arrastar as portas quânticas para os circuitos e pressionar “executar”, que o computador quântico de dois qubits começará a funcionar. O resultado final será mostrado na forma de matriz de densidade. Há ainda um simulador silencioso, embutido no sistema para que se possa comparar facilmente os resultados experimentais com os resultados teóricos [1].

*Anais da VIII Mostra de Docentes em RJI*

No SpinQ Triangulum [8] é fornecido aos usuários uma interface, em sua maior parte igual à versão do Gemini. Os circuitos quânticos, bem como as portas quânticas disponíveis, são mostrados na metade superior da interface. Uma lista suspensa fornece aos usuários algoritmos integrados. Os botões “Executar” e “Simular” à direita dos circuitos podem ser usados para iniciar os experimentos no processador quântico ou no simulador quântico embarcado. Os resultados são fornecidos no canto inferior direito. Os usuários podem clicar ou desligar os rótulos de medição à direita das linhas, que significam qubits. O experimento ou simulação fornecerá apenas os resultados da medição para os qubits escolhidos pelos usuários.

## 2. Materiais e métodos

### 2.1. Materiais

Os materiais de pesquisa incluem artigos científicos sobre o desktop quântico e seus algoritmos e o uso do SpinQuasar como plataforma de aprendizagem, com os diversos recursos quânticos disponíveis, assim como demonstrações dos computadores SpinQ Gemini e Triangulum.

### 2.2. Metodologia

A metodologia do projeto consiste em pesquisas teóricas e exploratórias sobre os algoritmos quânticos conhecidos, disponibilizados no SpinQ Gemini e o funcionamento do sistema operacional SpinQuasar no SpinQ Triangulum.

## 3. Resultados e Discussão

Em relação às pesquisas dos algoritmos variacional (VQA/VQE) e HHL, são apresentadas na tabela 1 suas funcionalidades e aplicações, comparativamente.

**Tab. 1** - Comparação dos algoritmos

Algoritmo	Funcionalidade	Aplicações
VQA/VQE	Utiliza métodos de aprendizado de máquinas e ferramentas da otimização clássica para a mitigação de ruído	Aprendizado de máquina; Correção de erros; Otimização
	Encontra o estado próprio de um observável quântico utilizando uma abordagem computacional híbrida quântica-clássica	Computação em nuvem; Espectroscopia de Emaranhamento
HHL	Resolve sistemas de equações lineares ao utilizar as propriedades da computação quântica	Aprendizado de máquina

Fonte: (Autor, 2025)

O computador quântico Gemini é capaz de demonstrações de diferentes algoritmos quânticos para estudo e pesquisa utilizando o software SpinQuasar. Destaca-se o algoritmo VQE, que

possui como aplicação a computação em nuvem, por possuir métodos de aprendizagem de máquina e mitigação de ruídos, e por se tratar de um VQA, utiliza uma abordagem computacional híbrida quântico-clássica. Em contrapartida, o algoritmo HHL tem como aplicações resolver sistemas de equações lineares e *machine learning*, sendo exponencialmente mais rápido e podendo ser utilizado como base para a criação de novos algoritmos quânticos.

O SpinQuasar representa um grande marco no desenvolvimento de computadores quânticos, com uma interface robusta e amigável. Navegar pelas complexidades deste tipo de hardware se torna simples, sua capacidade de gerenciar qubits e algoritmos quânticos de forma eficiente facilitam a pesquisa e o desenvolvimento na computação quântica, simplificando a interação com essa tecnologia. Há grandes expectativas de que no futuro ela seja aplicada em diversas áreas, aprimorando funcionalidades que antes eram limitadas pelos computadores tradicionais, e abrindo novas possibilidades.

#### 4. Considerações finais

Embora o algoritmo HHL traga muitas vantagens e um futuro promissor para o aprendizado de máquina, vale lembrar que alguns algoritmos de aprendizado de máquina quântico baseados no algoritmo HHL têm como suporte algoritmos clássicos de aprendizado de máquina existentes, com substituição das partes mais complexas de cálculo pela computação quântica, melhorando assim sua eficiência computacional.

Neste processo, é preciso considerar não apenas como usar o algoritmo HHL, mas também como preparar efetivamente os dados do algoritmo clássico em um estado quântico, ou seja, a quantização da informação clássica. Portanto, a tecnologia para mapear dados clássicos em estados quânticos ainda precisa de melhorias quanto à otimização do algoritmo HHL. Em termos de aplicação tem-se em especial o aprendizado de máquina.

Quanto ao funcionamento do software SpinQuasar, uma área a ser analisada é a segurança computacional do sistema, pois com seu recurso de acesso multiterminal via compartilhamento por nuvem, torna-se uma ferramenta poderosa. Porém, como qualquer outra funcionalidade que tem acesso à internet, torna-se vulnerável a diversas formas de ataque, uma vez que não foram encontradas informações apresentando o tipo de segurança e sistemas preventivos usado no sistema. Pode ocorrer a interceptação de comunicação, visando ferir a integridade de testes e medições utilizando o sistema operacional SpinQuasar, assim como ataques de negação de serviço, visto que o sistema depende da nuvem para compartilhar suas funcionalidades com os usuários.

Acredita-se ter atingido os objetivos desta pesquisa, uma vez que a área ainda é muito recente e está em pleno desenvolvimento. A busca pela Supremacia Quântica entre os principais países desenvolvedores dessa tecnologia, como China, Canadá, Alemanha e Rússia, gera dificuldades na obtenção de informações tecnológicas dos produtos desenvolvidos, especialmente no formato acadêmico-científico.

#### Referências

[1] HOU, S. Y. et. al., SpinQ Gemini: a desktop quantum computing platform for education and research, **EPJ Quantum Technol**, v.8 , p. 1-23, 2021.

[2] SPINQUASAR·QUANTUM COMPUTING SOFTWARE - **SpinQ**. Disponível em: <<https://www.spinquanta.com/products-solutions/spinQuasar>>. Acesso em: 7 abr. 2024.

*Anais da VIII Mostra de Docentes em RJJ*

- [3] CERREZO, M. et al. Variational quantum algorithms. **Nature reviews. Physics**, v. 3, n. 9, p. 625–644, 2021.
- [4] RAVI, G. S. et al. VAQEM: A variational approach to quantum error mitigation. **IEEE International Symposium on High-Performance Computer Architecture (HPCA)**. IEEE, 2022.
- [5] TILLY, J. et al. The Variational Quantum Eigensolver: A review of methods and best practices. **Physics reports**, v. 986, p. 1–128, 2022.
- [6]. MIANO, M. G. V, OLIVEIRA, A. Desempenho de algoritmos quânticos e clássicos em treinamento de machine learning supervisionado. **Revista Tecnológica da Fatec Americana**, v. 09, n. 02, p. 81 – 99, 2021.
- [7] SWITCHSCIENCE, **Demo Video - Triangulum - 3-qubit デスクトップ型NMR量子コンピュータ**. 2022. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=aHKFg8GeVvA>>. Acesso em: 7 abr. 2024.
- [8] FENG, G. et al. SpinQ Triangulum: A commercial three-qubit desktop quantum computer. **IEEE Nanotechnology Magazine**, v. 16, n. 4, p. 20–29, 1 ago. 2022.