

Systematic Review: Integrating Neural Networks and Quantum Computing using Qiskit

Larissa Schonhofen¹, Cecília Botelho¹, Giancarlo Lucca², Adenauer Yamin⁴,
Helida Santos³, Renata Reiser⁴

¹Laboratório de Sistemas Ubíquos e Paralelos
Universidade Federal de Pelotas (UFPEL) – Pelotas, RS – Brasil

²Mestrado em Engenharia Eletrônica e Computação
Universidade Católica de Pelotas (UCPEL) – Pelotas, RS – Brasil

³Centro de Ciências Computacionais
Universidade Federal do Rio Grande (FURG) – Rio Grande, RS - Brasil

⁴Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Universidade Federal de Pelotas (UFPEL) – Pelotas, RS – Brasil

{lssilva, csbotelho, adenauer, reiser}@inf.ufpel.edu.br,
helida@furg.br, giancarlo.lucca@ucpel.edu.br

Abstract. *This study proposes a systematic review that analyzes the applications and future prospects of integrating neural networks with quantum computing, focusing on one of the most utilized frameworks in the literature, Qiskit. By exploring how Qiskit is used to enhance these integrations, we aim to provide a more detailed understanding of the emerging capabilities and the challenges faced by researchers in the field. The study emphasizes significant results to identify current and future advancements in these areas.*

Resumo. *Este estudo propõe uma revisão sistemática que analisa as aplicações e as perspectivas futuras da integração de redes neurais com computação quântica, com um foco especial no uso de um dos frameworks mais utilizados na literatura, o Qiskit. Ao explorar como o Qiskit é utilizado para potencializar essas integrações, esperamos proporcionar uma compreensão mais detalhada das capacidades emergentes e dos desafios enfrentados pelos pesquisadores na área. O estudo destaca resultados importantes para identificar os avanços atuais e futuros nestes campos.*

1. Introdução

A computação quântica tem como intuito melhorar nossa capacidade de processar informações, explorando propriedades exclusivas da mecânica quântica, como superposição e emaranhamento. Qubits, as unidades básicas de informação quântica, podem existir simultaneamente em múltiplos estados graças à superposição e realizar cálculos complexos mais rapidamente através do emaranhamento, o que permite a execução de múltiplas operações simultâneas [Nielsen and Chuang 2000].

Paralelamente, as redes neurais, inspiradas pela estrutura e funcionamento do cérebro humano, têm sido fundamentais na evolução da inteligência artificial. Elas modelam complexas relações de dados através de camadas de neurônios artificiais, permitindo

que sistemas aprendam e tomem decisões de maneira autônoma. As redes neurais são aplicadas em uma variedade de contextos, desde o reconhecimento facial e de voz até a análise preditiva em finanças e saúde. E ainda, a integração entre computação quântica e redes neurais visa potencializar a eficiência dos algoritmos de aprendizado de máquina.

Este estudo apresenta uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) sobre trabalhos que exploram essa integração usando o Qiskit [IBM 2023], um framework open-source desenvolvido pela IBM para a programação e simulação de computadores quânticos. O Qiskit foi escolhido por ser gratuito, acessível e altamente flexível, permitindo simulações eficientes de múltiplos qubits e o processamento de circuitos quânticos complexos. Sua integração com a linguagem Python e bibliotecas consolidadas para análise de dados facilita sua aplicação em experimentos, incentivando o estudo e consequentemente, o desenvolvimento de novos algoritmos quânticos.

O trabalho está organizado da seguinte forma: Na Seção 2, detalhamos o processo de revisão sistemática da literatura. Na Seção 3, "Resultados e Discussões", apresentamos os artigos selecionados e discutimos os critérios utilizados para a seleção, as tendências observadas e as aplicações práticas dos estudos. Por fim, na Seção 4, "Conclusão", analisamos como os trabalhos selecionados respondem às questões de pesquisa propostas, avaliando o impacto potencial da integração de redes neurais com computação quântica e destacando as conclusões extraídas do estudo.

2. Metodologia

A presente Revisão Sistemática da Literatura foi conduzida no software Parsifal. A primeira etapa do estudo envolveu a definição do título e do objetivo da pesquisa, conforme apresentados no título e resumo do presente estudo.

2.1. Definição das Questões de Pesquisa

Em sequência, foram definidas as seguintes questões de pesquisa, a fim de nortear quais assuntos seriam discutidos em relação aos artigos finais selecionados:

1. Quais são as aplicações atuais da integração de redes neurais e computação quântica usando o framework Qiskit?
2. Como as redes neurais, implementadas dentro de sistemas de computação quântica usando Qiskit, estão sendo aplicadas para enfrentar desafios específicos em campos como aprendizado de máquina e processamento de dados?
3. Quais são os avanços recentes na integração de redes neurais com a computação quântica e como esses avanços podem influenciar o desenvolvimento futuro desse campo?
4. Quais são os desafios e limitações enfrentados ao integrar redes neurais com a computação quântica usando Qiskit, e como esses desafios estão sendo abordados na literatura?

2.2. Definição da String de Busca e Bibliotecas Digitais

Posteriormente, foram definidas as palavras-chave do estudo: "Redes Neurais", "Aprendizado de Máquina"(como sinônimo), "Qiskit" e "Quantum". Essas palavras-chave serviram de base para a criação da seguinte string de busca:

(("Quantum") AND ("Qiskit") AND ("Neural Networks"OR "Machine Learning"))

A string de busca foi utilizada para filtrar os artigos nas bibliotecas digitais: ACM Digital Library, IEEE Xplore, ScienceDirect e Scopus. Após a coleta inicial dos estudos nas bibliotecas, os artigos foram exportados diretamente para o Parsifal, totalizando 431 estudos selecionados na etapa de importação.

2.3. Processo de Seleção dos Estudos

Após a busca nas bases de dados e a submissão dos 431 artigos, uma série de etapas foram realizadas para filtrar os estudos, conforme ilustrado no fluxograma apresentado na Fig. 1.

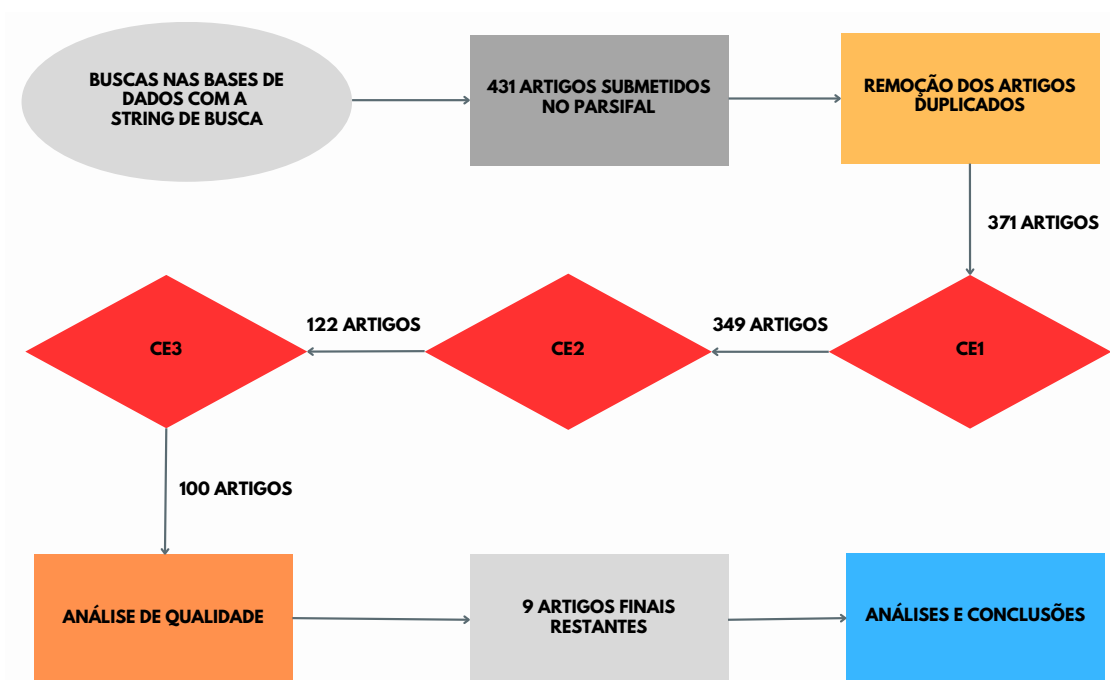


Figura 1. Fluxograma das Etapas da Revisão Sistemática da Literatura

Primeiramente, foram removidos os estudos duplicados, priorizando a contabilização dos artigos nas bases de dados em que foram originalmente publicados. Em seguida, todos os artigos passaram pelos seguintes critérios de exclusão (CE):

- CE1 - Critério que exclui estudos publicados antes do ano de 2020.
- CE2 - Critério que exclui estudos que não são sobre redes neurais ou aprendizado de máquina.
- CE3 - Critério que exclui estudos que não utilizam o framework Qiskit.

Na etapa seguinte, conforme apresentado no fluxograma, os estudos foram submetidos a uma análise de qualidade, detalhada em uma seção específica, para reter apenas aqueles que obtiveram pontuação máxima. Por fim, restaram 9 artigos, que foram analisados para concluir o estudo e responder às questões de pesquisa definidas inicialmente.

2.4. Prevalência das Bibliotecas Inicialmente e após os Critérios de Exclusão

Após a aplicação dos critérios de exclusão, foi possível comparar os artigos iniciais com os artigos que passaram pelos filtros CE1, CE2 e CE3. Na Fig. 2, o gráfico à esquerda

mostra a porcentagem de estudos importados de cada biblioteca digital, enquanto o gráfico à direita representa a porcentagem dos artigos restantes após a aplicação dos critérios de exclusão. Observa-se que, inicialmente, a biblioteca ACM Digital Library (verde) lidera em porcentagem de artigos importados. Após a aplicação dos critérios de exclusão, a biblioteca Scopus (azul) prevalece, seguida pela IEEE Xplore (amarelo).

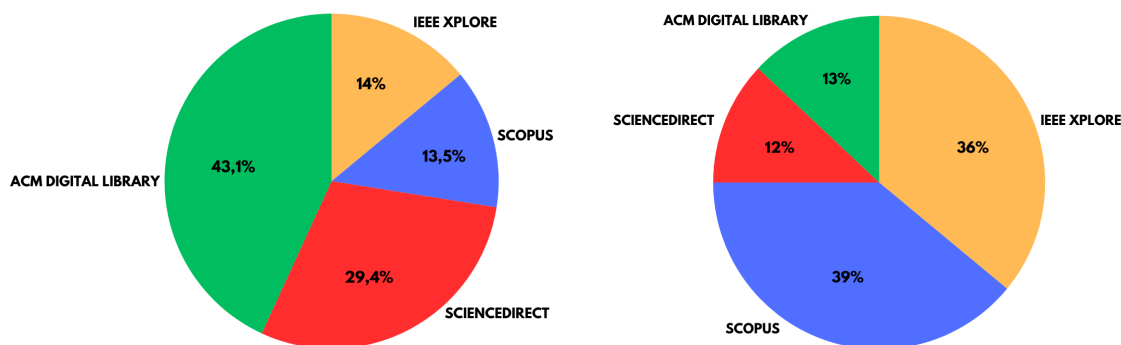


Figura 2. Porcentagem por Bibliotecas de Artigos Iniciais e Artigos Restantes após CEs

A Fig. 3 mostra a quantidade de estudos importados inicialmente por cada biblioteca, representado pela barra azul, e a quantidade final selecionada após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, representado pela barra vermelha. Observa-se que a biblioteca com maior proporção de artigos aceitos em comparação ao número submetido inicialmente foi a Scopus, seguida pela IEEE Xplore. A ACM Digital Library, embora tenha sido a que mais importou artigos na primeira etapa, não manteve o mesmo desempenho após a aplicação dos CEs.

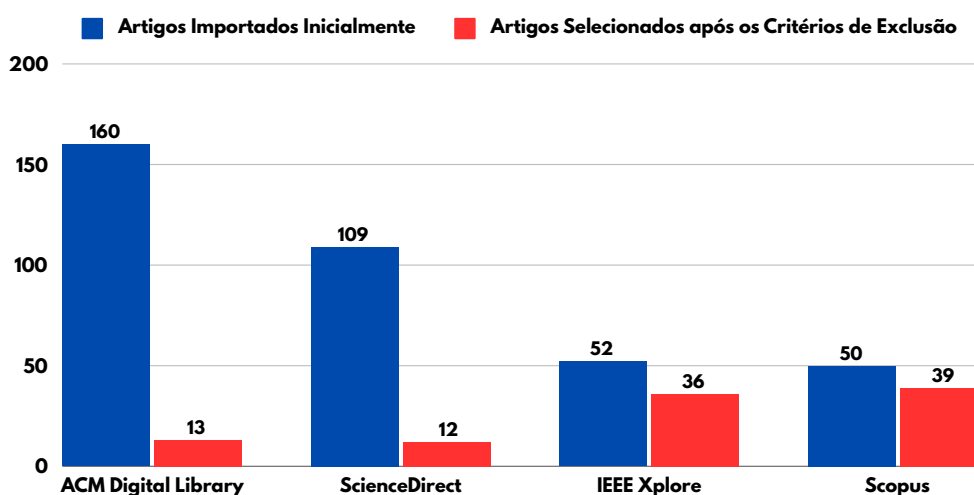


Figura 3. Relação dos Artigos Importados e Restantes após CEs

2.5. Análise de Qualidade e Avaliação Metodológica

A análise de qualidade foi conduzida por meio de sete perguntas, cada uma abordando aspectos essenciais para a avaliação dos artigos. Foram aceitos apenas os artigos com a

pontuação máxima de sete, cada pergunta adicionava 1 ponto ao score do artigo caso a resposta fosse positiva, e 0 caso contrário. As perguntas foram as seguintes:

1. O estudo explora a integração de redes neurais com as tecnologias de computação quântica?
2. O estudo utiliza o Qiskit para a implementação?
3. O estudo apresenta uma metodologia clara e detalhada?
4. O estudo inclui a verificação dos modelos de redes neurais e computação quântica implementados?
5. A metodologia é descrita com detalhes suficientes para permitir a replicação do estudo?
6. O estudo avalia o desempenho das soluções integradas de redes neurais e computação quântica usando métricas relevantes (precisão, eficiência computacional, etc.)?
7. O estudo discute os desafios e limitações encontrados durante a integração de redes neurais com computação quântica?

Ao final dessa etapa, foram selecionados nove estudos que obtiveram pontuação máxima de sete na classificação de análise de qualidade. As respostas às perguntas foram contabilizadas de acordo com o número de respostas positivas e negativas para cada artigo. Esses dados serão posteriormente avaliados e discutidos na Sessão de Resultados e Discussões, com o objetivo de identificar lacunas e sugerir melhorias para futuros estudos na área.

2.6. Tabela com os Artigos Resumidos

Para reunir dados gerais sobre os estudos selecionados ao final do processo, foram criadas três tabelas, apresentadas na sessão de Resultados e Discussões, que possuem as seguintes legendas:

- **REF:** Número de **referência** atribuído a cada artigo, de 1 a 9.
- **ANO:** **Ano** de publicação do artigo.
- **OBJETIVOS:** Resumo sobre o **objetivo** principal da pesquisa.
- **CA:** Disponibilização em **código aberto** das implementações desenvolvidas.
- **APLICAÇÕES:** **Áreas do conhecimento** que o estudo abrange.
- **MÓDULO QUÂNTICO:** Especifica a computação executada via **módulo quântico** da rede neural híbrida.
- **PLATAFORMAS:** **Plataformas** onde as redes neurais foram testadas.
- **RESULTADOS:** Um resumo dos **resultados** obtidos no estudo.
- **CONCLUSÕES:** Síntese da **conclusão** final do estudo.

2.7. Nuvem de Palavras dos Trabalhos Selecionados

Para coletar mais informações sobre os artigos finais, os dados destes foram analisados utilizando o software RStudio com o pacote Bibliometrix. A Fig. 4 apresenta a nuvem de palavras gerada, que ilustra a frequência das palavras-chave mencionadas nos artigos selecionados. O tamanho das palavras na nuvem é proporcional à sua frequência de ocorrência.

Observa-se que os termos *Neural Networks* e *Machine Learning* aparecem com maior destaque, o que é consistente com o foco principal da pesquisa. Os termos *Alzheimers Disease* e *COVID-19* indicam uma ênfase na área da saúde, com dois dos nove

estudos finais abordando essas condições, sugerindo um potencial para futuras pesquisas nesse campo. Além disso, termos como *Augmentor*, relacionado a técnicas de aumento de dados, *MNIST Dataset*, um conjunto de dados padrão para reconhecimento de dígitos manuscritos, e *tket*, um compilador de circuitos quânticos, refletem a diversidade de ferramentas e métodos empregados nas pesquisas sobre redes neurais quânticas.

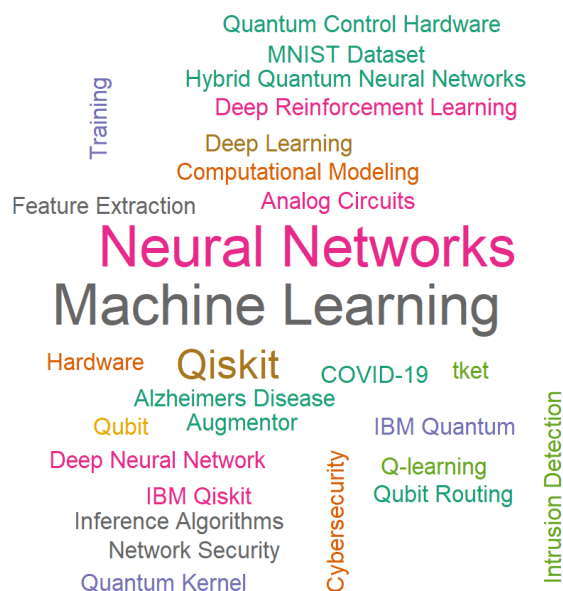


Figura 4. Núvem de Palavras gerada com as Palavras-chave dos Artigos Finais Selecionados

3. Resultados e Discussões

Esta seção apresenta uma análise detalhada dos artigos selecionados através do processo de revisão sistemática descrito anteriormente. Aqui, abordaremos os resultados obtidos e as implicações práticas e teóricas de nossas descobertas. Inicialmente, introduzimos os primeiros resultados com uma lista dos artigos que passaram pela etapa de análise de qualidade, seguida de uma discussão sobre as tendências observadas, as aplicações práticas dos estudos e os desafios identificados no campo da computação quântica e redes neurais.

3.1. Detalhamento dos Trabalhos Selecionados

Para um melhor entendimento do trabalho realizado, iniciamos apresentando os trabalhos selecionados após conduzir as etapas de seleção (Ver Fig.1). A seguir, apresentamos o título do trabalho e a referência correspondente. É importante destacar que o número atribuído a cada um dos trabalhos é o mesmo utilizado nas avaliações seguintes. Precisamente, nas tabelas Tab. 1, Tab. 2 e Tab. 3 um panorama geral dos estudos é apresentado.

1. **A Quantum Activation Function for Neural Networks: Proposal and Implementation** [Kumar et al. 2021]
2. **A Quantum Generative Adversarial Network-based Intrusion Detection System** [Rahman et al. 2023]
3. **Automated Detection of Alzheimer's via Hybrid Classical Quantum Neural Networks** [Shahwar et al. 2022]

4. **COVID-19 detection on IBM quantum computer with classical-quantum transfer learning**[Acar and Yilmaz 2020]
5. **Deep Q-learning with hybrid quantum neural network on solving maze problems**[Chen et al. 2024]
6. **Quantum Inspired Image Classification: A Hybrid SVM Framework**[Patel et al. 2024]
7. **Scaling Qubit Readout with Hardware Efficient Machine Learning Architectures**[Maurya et al. 2023]
8. **Using Reinforcement Learning to Perform Qubit Routing in Quantum Compilers**[Chen et al. 2024]
9. **When Machine Learning Meets Quantum Computers: A Case Study**[Jiang et al. 2021]

3.2. Análise dos Trabalhos Seleccionados

Nesta subsecção, apresentamos a análise dos trabalhos seleccionados. Para facilitar a compreensão, os resultados são organizados em três tabelas distintas: Tab. 1, Tab. 2 e Tab. 3. Cada tabela é estruturada de acordo com as seções descritas anteriormente na metodologia do estudo. Conforme apresentados na Tab. 1, os estudos apresentaram objetivos com enfoques diferenciados, abordando uma grande gama de problemas relacionados a áreas distintas. Essa diversidade de temas é observada também na Nuvem de Palavras apresentada e discutida anteriormente na Fig. 4.

Tabela 1. Apresentação dos Objetivos dos Artigos

REF	ANO	OBJETIVOS
1	2021	Propor uma nova função de ativação não linear quântica.
2	2023	Explorar e implementar um sistema de detecção de intrusão.
3	2022	Desenvolver um modelo de aprendizado de máquina híbrido clássico-quântico para detecção automatizada de Alzheimer usando ressonâncias magnéticas.
4	2021	Investigar a detecção do COVID-19 a partir de imagens de tomografia computadorizada, utilizando tanto computação clássica quanto quântica.
5	2024	Investigar o potencial do aprendizado profundo quântico para resolver problemas de aprendizado por reforço, como labirintos.
6	2024	Propor um algoritmo híbrido quântico-clássico para classificação de imagens utilizando um kernel quântico.
7	2023	Melhorar a precisão e escalabilidade de leitura de qubits em processadores quânticos supercondutores usando redes neurais eficientes em hardware.
8	2022	Desenvolver um procedimento de roteamento de qubits usando uma versão modificada do paradigma de aprendizado por reforço profundo, visando minimizar a profundidade do circuito adicionado por portas SWAP.
9	2021	Investigar como projetar e implementar um circuito quântico para acelerar a fase de inferência de uma rede neural treinada.

De acordo com a Tab. 2 os estudos exploraram o uso da parte quântica em diferentes etapas das redes neurais, demonstrando o potencial de diferentes formas de aplicações. Como ponto negativo é possível ver que a grande maioria dos estudos não disponibilizou código aberto. Levando em conta a importância em disponibilizar os códigos utilizados no estudo para o público, quando ponderada a questão da replicabilidade e testagem dos modelos, é um ponto de indicação de melhoria para futuras publicações.

Tabela 2. Detalhamento das Aplicações das Redes Neurais nos Estudos

REF	CA	APLICAÇÕES	MÓDULO QUÂNTICO	PLATAFORMAS
1	N	Computação Neuromórfica	Função de ativação.	Hardware IBM Qiskit
2	N	Cibersegurança	Geração e discriminação de dados, explorando a superposição na etapa de classificação.	Qiskit Pythoch
3	N	Deteccção de Doenças	Circuitos quânticos em camadas intermediárias, aprimorando a deteccção de padrões.	Qiskit-Aer PennyLane
4	N	Deteccção de Doenças	Modelo quântico segue o pré-treinamento clássico, ajudando a melhorar a classificação.	Hardware IBM Qiskit-Aer PennyLane Cirq
5	N	Aprendizado por Reforço	Decisões de navegação, explorando a superposição em situações de aprendizado por reforço.	Hardware IBM Qiskit PyTorch
6	N	Classificação de Imagens	Separação e classificação de dados.	Hardware IBM Qiskit Augmentor
7	N	Leitura de Qubits	Leitura e processamento de qubits interagindo aprendizado de máquina.	Datasets da IBM Qiskit-Aer Hardware FPGA
8	S	Roteamento de Qubits	Roteamento de qubits para otimização de compiladores quânticos.	Qiskit CQC's t ket Cirq
9	S	Fase de Inferência	As operações de inferência são realizadas em um circuito quântico.	Qiskit

Na Tab. 3 apresentada a seguir é possível constatar que apesar da maioria dos estudos abordarem áreas diferentes de aplicação, grande parte deles apresentou resultados positivos e conclusões favoráveis ao uso das redes neurais híbridas, quando comparadas as redes neurais clássicas. Esse dado é importante pois mostra o quanto essas duas temáticas em conjunto podem se potencializar e trazerem bons retornos, mesmo ao lidarem com diferentes problemas de pesquisa como os abordados nos estudos finais apresentados.

Tabela 3. Resultados e Conclusões dos Estudos

REF	RESULTADOS	CONCLUSÕES
1	Resultados promissores de precisão de classificação em conjuntos de dados clássicos e de alta dimensão.	A função apresenta vantagens de velocidade quando implementada em hardware quântico.
2	A qGAN (Rede Adversarial Generativa Quântica) implementado com Qiskit e PyTorch no Google Colab convergiu eficazmente, gerando distribuições que se aproximaram dos dados originais.	O uso de redes neurais quânticas apresentou potencial para superar as limitações dos sistemas de aprendizado de máquina clássicos.
3	O modelo alcançou uma precisão de treinamento de 99,1% e uma precisão de classificação de 97,2%.	A implementação demonstrou melhorias significativas na classificação eficiente e precisa das imagens de ressonância.
4	O modelo híbrido de aprendizado de transferência quântica alcançou um aumento médio de desempenho de 5% a 9% em comparação com modelos clássicos.	Vantagens significativas em precisão e eficiência na detecção de COVID-19 usando pequenos conjuntos de dados de imagens de tomografia computadorizada.
5	Redes neurais híbridas demonstraram capacidade promissora, superando modelos puramente clássicos em alguns aspectos.	Melhoria de performance em problemas desafiadores de aprendizado profundo com aplicações práticas a curto prazo.
6	O modelo HQCSVM (Máquina de Vetores de Suporte Quântico-Clássica Híbrida), apresentou uma precisão de 98%, superando modelos clássicos.	Vantagens significativas para a classificação de imagens com conjuntos de dados pequenos.
7	A abordagem proposta melhora a precisão da leitura dos qubits em 16,4% e reduz a latência de inferência em comparação com métodos tradicionais.	Melhoria significativa da precisão e a escalabilidade da leitura de qubits em sistemas quânticos.
8	O sistema DQN (Rede Neuronal Profunda de Q) proposto supera as abordagens convencionais de roteamento de qubits em termos de desempenho em cenários realistas e com tamanhos de arquitetura próximos.	Abordagens baseadas em aprendizado por reforço podem oferecer melhor adaptação e desempenho na compilação de circuitos quânticos.
9	O estudo mostra como implementar redes neurais em circuitos quânticos, destacando a codificação eficiente de dados.	Potencial para aceleração computacional quântica na fase de inferência.

3.3. Resultados Observados nas Etapas de Seleção dos Artigos

Com relação aos anos de publicação dos artigos, a Fig. 5 apresenta os estudos importados inicialmente pela linha azul e os estudos restantes após a aplicação dos critérios de exclusão representados pela linha vermelha. É possível constatar que em ambos os casos, há uma tendência geral de constante subida no gráfico desde 2020, indicando potencial de crescimento nas pesquisas da área para os próximos anos.

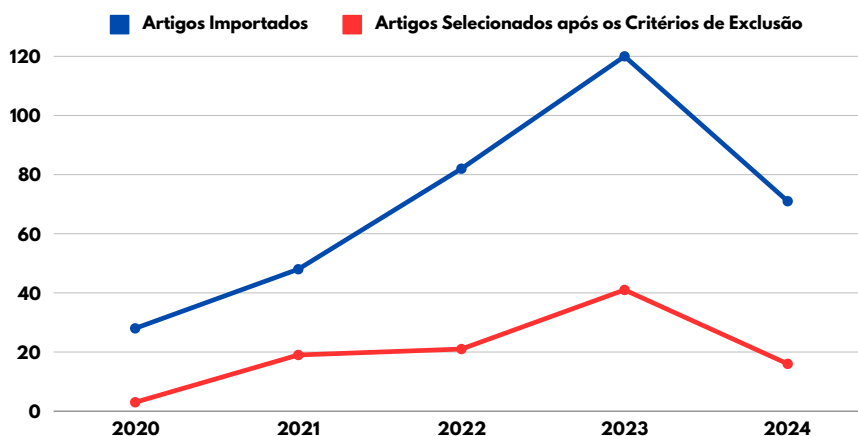


Figura 5. Anos de Publicação dos Artigos Submetidos e Restantes após os CEs

Referente a etapa de análise de qualidade dos artigos, a Tabela. 4 abaixo apresenta a relação do número de respostas positivas e negativas atribuídas a cada pergunta. É possível observar que a pergunta que faz referência a discussão dos desafios e limitações encontrados no decorrer do estudo obteve maior número de respostas negativas, seguida da pergunta que aborda a validação e verificação das redes neurais propostas nos estudos.

Tabela 4. Perguntas utilizadas para Análise de Qualidade

PERGUNTAS	SIM	NÃO
O estudo explora a integração de redes neurais com tecnologias de computação quântica?	66	34
O estudo avalia o desempenho das soluções integradas de redes neurais e computação quântica usando métricas relevantes?	62	38
O estudo apresenta uma metodologia clara e detalhada?	76	24
Utiliza o framework Qiskit para implementação?	71	29
O estudo inclui validação ou verificação dos modelos implementados de redes neurais e computação quântica?	49	51
A metodologia é descrita em detalhes suficientes para permitir a replicação do estudo?	69	31
O estudo discute os desafios e limitações encontrados durante a integração de redes neurais com computação quântica?	26	74
TOTAL	419	281

A falta de validação dos resultados de pesquisa ou na discussão dos desafios encontrados durante o desenvolvimento do estudo são falhas no processo geral da pesquisa e

sinalizam pontos de melhorias para futuros artigos. Como aspectos positivos observados estão o grande número de aceites em perguntas referentes ao detalhamento e clareza das metodologias dos estudos e replicabilidade, indicando que a grande maioria dos artigos selecionados estavam nivelados em uma base metodológica de qualidade.

3.4. Análise Conclusiva das Questões de Pesquisa

Esta subseção vai detalhar como os artigos selecionados na revisão sistemática responderam às questões de pesquisa elaboradas ao início do estudo.

Aplicações Atuais:

- Os estudos demonstraram aplicações variadas, como melhoramento de sistemas de segurança através de redes adversariais generativas quânticas e avanços no diagnóstico médico. Essas aplicações validam a capacidade das redes neurais quânticas de resolver problemas complexos em diversos setores.

Resolução de Desafios Específicos:

- Os artigos abordaram como as redes neurais quânticas estão sendo utilizadas para superar desafios de eficiência e precisão em tarefas computacionais. Por exemplo, a implementação de circuitos quânticos variacionais ajudou a reduzir o número de parâmetros necessários e acelerar o processamento de dados.

Avanços Tecnológicos:

- Vários estudos discutiram inovações como novas funções de ativação quântica e melhorias nos modelos de redes neurais híbridas, demonstrando um progresso técnico significativo que pode influenciar futuros desenvolvimentos em computação quântica e aprendizado de máquina.

Desafios e Limitações:

- A literatura revisada expõe desafios críticos, como as limitações dos dispositivos NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum), termo que se refere a atual geração de computadores quânticos que possuem um número limitado de qubits e sofrem com problemas como níveis altos de ruídos e erros de decoerência. Outro desafio abordado nos estudos referente a aplicação das redes neurais quânticas é a complexidade no treinamento de modelos eficientes, causada pela necessidade de técnicas sofisticadas para diminuição de erros e pela dificuldade na otimização de parâmetros. Os estudos propõem métodos para mitigar essas questões, destacando avanços no design de circuitos quânticos e na simulação computacional, a fim de maximizar a utilidade dos dispositivos NISQ em redes neurais.

4. Conclusão

Esta revisão sistemática explorou o potencial e os avanços da integração de redes neurais com computação quântica com o uso do framework Qiskit. Os estudos revisados demonstraram aplicações promissoras que vão desde a segurança cibernética até avanços no campo da saúde, como diagnósticos médicos mais precisos. As redes neurais híbridas, em particular, mostraram uma superioridade em termos de precisão e eficiência comparadas às redes neurais convencionais destacando-se como um avanço significativo no campo da inteligência artificial.

Através deste estudo, confirmou-se a importância de continuar pesquisas na área a fim de superar desafios técnicos e metodológicos ainda presentes, como as limitações dos dispositivos NISQ e os obstáculos no treinamento de modelos eficientes. Com a contínua evolução das tecnologias quânticas e o desenvolvimento de novas metodologias e técnicas de otimização, o futuro da integração de redes neurais e computação quântica parece promissor.

Agradecimentos

Os autores agradecem as seguintes agências de fomento: CAPES, CNPq (309160/2019-7; 311429/2020-3; 150160/2023-2), PqG/FAPERGS (21/2551-0002057-1; 24/2551-0001396-2) e FAPERGS/CNPq (23/2551-0000126-8) PRONEX (16/2551-0000488-9).

Referências

- Acar, E. and Yilmaz, İ. (2020). Covid-19 detection on ibm quantum computer with classical-quantum transfer learning. *medRxiv*.
- Chen, H.-Y., Chang, Y.-J., Liao, S.-W., and Chang, C.-R. (2024). Deep-q learning with hybrid quantum neural network on solving maze problems. *Quantum Machine Intelligence*, 6(2):1–8.
- IBM (2023). Qiskit. Disponível em: <https://qiskit.org/>. Acesso em: 03 de julho 2023.
- Jiang, W., Xiong, J., and Shi, Y. (2021). When machine learning meets quantum computers: A case study. In *Proceedings of the 26th Asia and South Pacific Design Automation Conference, ASPDAC '21*. ACM.
- Kumar, S., Dangwal, S., Adhikary, S., and Bhowmik, D. (2021). A quantum activation function for neural networks: Proposal and implementation. In *Proceedings of the 2021 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, pages 1–8. IEEE.
- Maurya, S., Mude, C. N., Oliver, W. D., Lienhard, B., and Tannu, S. (2023). Scaling qubit readout with hardware efficient machine learning architectures. In *Proceedings of the 50th Annual International Symposium on Computer Architecture, ISCA '23*, pages 1–13. ACM.
- Nielsen, M. A. and Chuang, I. L. (2000). *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press.
- Patel, H., Kamthekar, S., Prajapati, D., and Agarwal, R. (2024). Quantum inspired image classification: A hybrid svm framework. In *Proceedings of the 2024 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI)*, pages 1–7. IEEE.
- Rahman, M. A., Shahriar, H., Clincy, V., Hossain, M. F., and Rahman, M. (2023). A quantum generative adversarial network-based intrusion detection system. In *2023 IEEE 47th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC)*, pages 1810–1815. IEEE.
- Shahwar, T., Zafar, J., Almogren, A., Zafar, H., Rehman, A. U., Shafiq, M., and Hamam, H. (2022). Automated detection of alzheimer's via hybrid classical quantum neural networks. *Electronics*, 11(5).