

## A SEGURANÇA DA INFORMAÇÃO NOS CIRCUITOS QUÂNTICOS DA PLATAFORMA IBM-Q

### INFORMATION SECURITY IN THE QUANTUM CIRCUITS OF THE IBM-Q PLATFORM

Mauricio Messias de Souza

Faculdade de Tecnologia de Americana – Ministro Ralph Biasi  
[mauricio.souza9@fatec.sp.gov.br](mailto:mauricio.souza9@fatec.sp.gov.br)

Mariana Godoy Vazquez Miano

Faculdade de Tecnologia de Americana – Ministro Ralph Biasi  
[mariana.miano@fatec.sp.gov.br](mailto:mariana.miano@fatec.sp.gov.br)

#### Resumo

A criação e manutenção de circuitos quânticos funcionais e livres de erros é crucial para a segurança da informação. Esses circuitos quânticos podem ser comprometidos por erros de implementação ou interferências externas, o que pode levar a falhas na execução dos algoritmos e comprometer a criptografia dos dados. Esse artigo tem como objetivo demonstrar o desenvolvimento de circuitos quânticos simples utilizando a plataforma Qiskit da IBM e os testes de integridade para verificar sua resistência a interferências externas, com verificações de consistência e correção de erros e avaliando como esses mecanismos melhoram ou afetam a criptografia dos dados.

**Palavras-chave:** Circuitos quânticos, Qiskit, IBM-Q, Segurança, Criptografia.

#### Abstract

*The creation and maintenance of functional, error-free quantum circuits is crucial to information security. These quantum circuits can be compromised by implementation errors or external interference, which can lead to failures in the execution of the algorithms and compromise data encryption. This article aims to demonstrate the development of simple quantum circuits using IBM's Qiskit platform and integrity tests to verify their resistance to external interference, with consistency checks and error correction and evaluating how these mechanisms improve or affect the encryption of data.*

**Keywords:** *Quantum circuits, Qiskit, IBM Quantum, Security, Cryptography.*

## 1. Introdução

Os circuitos quânticos são parte fundamental do desenvolvimento dentro da computação quântica e garantir a sua integridade e bom funcionamento perante a tantos tipos diferentes de interferência é um grande desafio. A proposta deste artigo é desenvolver circuitos quânticos mais simples e testá-los para verificar sua integridade/resistência às interferências externas, implementando verificações de consistência e correção de erros e avaliando como esses mecanismos melhoram a segurança.

A IBM é uma das principais empresas no desenvolvimento de computação quântica, a empresa possui a plataforma online IBM-Q, onde os usuários podem simular circuitos quânticos em servidores clássicos e quânticos, executar e testar códigos, entre outros recursos e Interfaces de Programação de Aplicações(API's). São disponibilizadas as principais portas quânticas: Pauli-I, Pauli-X, Pauli-Y, Pauli-Z, Hadamard, Fase, T, CNOT (MIANO et al, 2023). A interface utiliza o software Qiskit, que é um kit de desenvolvimento de software de código aberto. Nele está incluso um kit de ferramentas de código aberto (SDK), biblioteca de circuitos e de informações quânticas, primitivos, Qiskit Runtime, Qiskit Transpiler (QISKIT, 2024).

O plano de testes de segurança tem como objetivo garantir a integridade, funcionalidade e segurança dos circuitos em ambientes suscetíveis a erros de implementação e principalmente às interferências externas, testando circuitos quânticos simples, verificando a eficácia de mecanismos de correção de erros e a resistência contra interferências que possam comprometer a execução correta dos algoritmos quânticos, o que acarretaria na quebra de integridade das informações que trafegam pelos circuitos.

O presente artigo aborda diferentes seções fundamentais para compreender a aplicação e análise de circuitos quânticos. A seção "Princípios básicos" faz a introdução aos conceitos essenciais da computação quântica e suas operações elementares. Em "Introdução e visão geral", apresenta-se uma perspectiva do desenvolvimento e relevância da computação quântica no cenário atual. A parte "Qiskit e integração com computação quântica" explora como essa ferramenta é utilizada para implementar e simular circuitos quânticos. A seção "Vulnerabilidades em circuitos quânticos" discute possíveis falhas e desafios relacionados à segurança dos circuitos. Em "Metodologia", detalha-se a implementação dos circuitos

Hadamard e portas CNOT em Python, utilizando o Visual Studio Code, ferramentas do Qiskit e acesso ao serviço de computação quântica da IBM Kyoto (127 qubits). As seções “Resultados e Discussão” e “Considerações finais” realizam o fechamento do assunto abordado demonstrando a sua aplicabilidade e relevância.

## 2. Referencial Teórico

Esta seção tem como propósito apresentar uma visão geral do conteúdo que será explorado nos experimentos, os quais serão desenvolvidos com base nas exemplificações e discussões abordadas nos tópicos seguintes. A intenção é fornecer uma introdução que contextualize as experiências realizadas, facilitando a compreensão dos conceitos e resultados discutidos ao longo do texto.

### 2.1. Princípios básicos, introdução e visão geral

O bit é o conceito fundamental da computação e da informação clássica. A computação e a informação quântica são construídas sobre um conceito análogo, o bit quântico, ou qubit para abreviar (LEON et al, 2022), pode-se definir qubit como uma unidade que armazena informação, porém essa informação é um par de números complexos  $\alpha$  e  $\beta$  que satisfazem a condição  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ . Para obter o valor armazenado em um qubit realiza-se um processo chamado de medição. O resultado da medição de um qubit tem probabilidade  $|\alpha|^2$  de ser 0 e probabilidade  $|\beta|^2$  de ser 1. O qubit pode estar em dois estados diferentes ao mesmo tempo sendo que esses estados são identificados por  $|0\rangle$  e  $|1\rangle$ , o processo de medição interfere no estado do qubit de tal forma que, quando o resultado da medição é 0, o novo estado do qubit é  $|0\rangle$  e, quando o resultado é 1, o novo estado do qubit é  $|1\rangle$ , e essa alteração no estado do qubit provocada pelo processo de medição é chamada de colapso de função de onda.

Mudanças que ocorrem em um estado quântico podem ser descritas usando a linguagem da computação quântica. Diferentemente à maneira como um computador clássico é construído a partir de um circuito elétrico contendo fios e portas lógicas, um computador quântico é construído a partir de um circuito quântico contendo fios e portas quânticas feitas para

transportar e manipular as informações quânticas. Em um computador clássico, os fios são usados para transportar informações ao redor do circuito, enquanto as portas lógicas realizam manipulações das informações, convertendo-as de uma forma para outra, considerando, por exemplo, portas lógicas clássicas de bit único, a porta Hadamard:

$$H \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} [1 \ 1 \ 1 \ -1]$$

Esta porta é algumas vezes descrita como sendo uma porta “raiz quadrada de”, na medida em que transforma um  $|0\rangle$ , em  $(|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$ , “na metade do caminho” entre  $|0\rangle$  e  $|1\rangle$ , e transforma  $|1\rangle$  em  $(|0\rangle - |1\rangle)/\sqrt{2}$ , que também está “na metade do caminho” entre  $|0\rangle$  e  $|1\rangle$ . Entretanto,  $H^2$  não é uma porta. Uma álgebra simples mostra que  $H^2=I$ , e assim aplicar H duas vezes a um estado não causa alteração. A porta Hadamard é uma das portas quânticas mais úteis e utilizadas (TONELI, 2022).

## 2.2. Qiskit e integração com computação quântica

O Quantum Information Software Development Kit(Qiskit) se trata de uma estrutura computacional de código aberto desenvolvida para funcionar em diferentes linguagens de programação como Python, Swift e JavaScript, fornecendo as ferramentas necessárias para a criação de algoritmos quânticos, seguindo um modelo de circuito para computação quântica universal, e a sua execução em dispositivos quânticos reais usando o acesso remoto aos hardwares disponibilizados através do IBM QE. Além disso, o Qiskit permite emular um computador quântico em processador clássico local, como um laptop ou um desktop comum, permitindo a testagem de algoritmos quânticos simples em qualquer computador doméstico, sem a necessidade de acesso à internet ou criação de uma conta no IBM QE (JESUS, 2021).

Na IBM Quantum Platform é possível acessar os sistemas por meio dos planos de acesso disponíveis, onde todos os sistemas que a IBM oferece são mostrados para o usuário, atualmente há apenas dois processadores disponíveis nos simuladores, o processador Heron com 133 qubits sendo uma atualização do Egret com o mesmo tamanho do processador Eagle trazendo inovações substanciais na entrega de sinal anteriormente implantadas no Osprey. Esses sinais são necessários para permitir o controle rápido e de alta fidelidade de dois qubits e de um qubit.

São entregues com cabeamento flexível de alta densidade, também disponível na plataforma da IBM com o processador Eagle com 127 qubits incorporando tecnologias de empacotamento mais escaláveis do que as gerações anteriores. Os sinais passam por múltiplas camadas de chip para permitir E/S de alta densidade sem sacrificar o desempenho.

Na plataforma é possível utilizar diferentes sistemas situados em diversos escritórios da IBM espalhados pelo mundo. O processador Heron está disponível para uso apenas em Torino, na Itália. O processador Eagle está disponível nas estações de Sherbrooke, Brisbane, Kyiv, Rensselaer, Quebec, Kawasaki, Osaka, Cleveland, Nazca, Kyoto e Cusco (IBM, 2024).

### **2.3. Vulnerabilidades em circuitos quânticos**

O ruído está presente em todos os sistemas de computação. No entanto, é uma força a ser considerada para sistemas quânticos. Na verdade, o ruído é tão difundido que é impossível ter uma discussão significativa sobre computação quântica prática sem uma consideração aprofundada de seus efeitos. O ruído pode vir de uma variedade de fontes, nunca há apenas uma única fonte de ruído em qualquer sistema quântico e determinar quais são as fontes e quais são suas contribuições relativas é um problema difícil. Possíveis fontes são interação indesejada com o ambiente (tanto eventos distintos quanto decadência inevitável de estados quânticos), interação indesejada entre qubits ou operações de controle imperfeitas. Cada uma delas introduz erro com características significativamente diferentes (RESCH; KARPUZCU, 2022).

Isso resulta em cálculos imprecisos e na execução incorreta de algoritmos, essa interferência é um dos maiores desafios para o desenvolvimento de computadores quânticos funcionais, pois afeta diretamente a capacidade de escalar sistemas quânticos com muitos qubits e de executar operações complexas com precisão. Para mitigar esses problemas, são desenvolvidas técnicas como a correção de erros quânticos e a mitigação de ruído, que tem como objetivo aumentar a fidelidade das operações e garantir que os resultados dos algoritmos sejam mais confiáveis pois qualquer falha na integridade dos qubits ou nas operações quânticas pode comprometer a execução de algoritmos sensíveis, como os de criptografia (MIANO; OLIVEIRA, 2023). O ruído, erros de implementação e interferências externas podem corromper estados quânticos, levando a resultados imprecisos ou mesmo à quebra da segurança

de sistemas que dependem desses algoritmos para proteger os seus dados, colocando em risco a confidencialidade e integridade de informações processadas por computadores quânticos.

### 3. Metodologia

Foram realizadas a implementação dos circuitos Hadamard e portas CNOT, na linguagem Python, utilizando o software Visual Code com as ferramentas do Qiskit e conectado ao serviço de computação quântica da IBM Kyoto de 127 qubits. Cada um deles foi desenvolvido de maneira específica a atuar usando elementos diferentes da computação quântica. Na figura 1 observa-se parte do circuito com a porta Hadamard.

Figura 1 – Circuito Hadamard

```
#Circuito de Hadamard
from qiskit import QuantumCircuit
from qiskit.primitives import Sampler
from qiskit.visualization import plot_histogram

qc = QuantumCircuit(1, 1)
qc.h(0)
qc.measure(0, 0)

sampler = Sampler()
trabalho = sampler.run(qc, shots=1024)
resultado = trabalho.result()
contagem = resultado.quasi_dists[0].binary_probabilities()

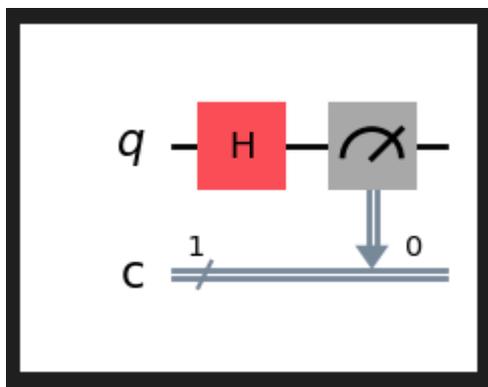
print('resultados da superposição:', contagem)
plot_histogram(contagem)
#Desenho do circuito
# qc.draw(output = 'mpl')
```

Fonte: IBM-Qiskit

O circuito Hadamard é um exemplo básico de como criar superposição quântica. Um qubit é inicializado, mantendo-se no estado “ $|0\rangle$ ” como padrão, então logo em seguida atribui-se a ele uma porta Hadamard (“h”), que o coloca em uma superposição dos estados “ $|0\rangle$ ” e “ $|1\rangle$ ”. O circuito é simulado utilizando o “Sampler” e com 1024 medições é possível ver uma distribuição de aproximadamente 50/50 entre 0 e 1, refletindo a superposição criada pela porta Hadamard. Na sequência, o “Sampler” executa o circuito no simulador e coleta as contagens

das medições. A esquematização desse circuito pode ser observada na figura 2.

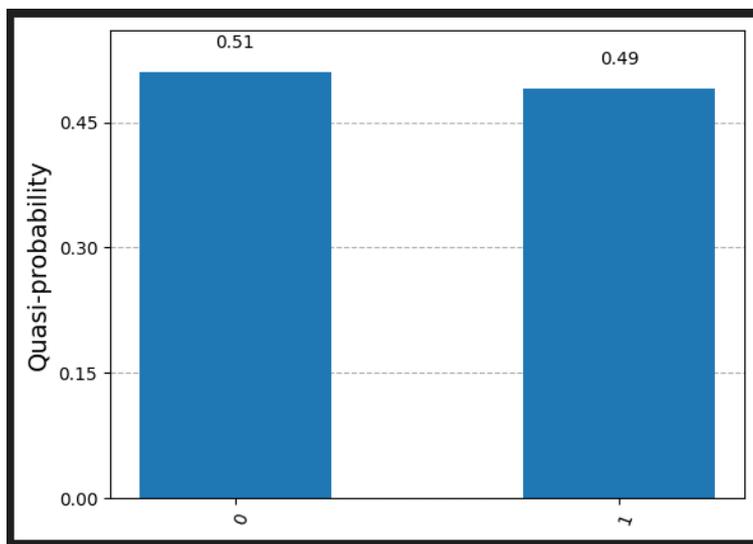
Figura 2 – Esquematização gráfica do circuito Hadamard



Fonte: IBM-Qiskit

De acordo com os princípios da computação quântica, a porta Hadamard transforma o estado “ $|0\rangle$ ” em “ $|1\rangle$ ”, criando uma probabilidade de 50% para medir “0” e 50% para medir “1”, logo após a aplicação da porta, o qubit é medido, e o resultado reflete essa superposição que pode ser vista na figura 3.

Figura 3 – Tabela da leitura de superposição Hadamard



Fonte: IBM-Qiskit

A medição colapsa o estado quântico em “|0>” ou “|1>” com igual probabilidade, a tabela demonstra que após a leitura o qubit que estava em superposição lhe foi atribuído o valor de “0” demonstrando um dos princípios fundamentais de computação quântica. O segundo circuito implementado representa a utilização de portas CNOT essenciais para a construção de operações lógicas quânticas. O código desenvolvido pode ser observado na figura 4.

Figura 4 – Código portas CNOT

```
#Circuito de Portas CNOT
from qiskit import QuantumCircuit
from qiskit.primitives import Sampler
from qiskit.visualization import plot_histogram

qc = QuantumCircuit(2, 2)

qc.x(0)
qc.cx(0, 1)

qc.measure(0, 0)
qc.measure(1, 1)

sampler = Sampler()
trabalho = sampler.run(qc, shots=1024)
resultado = trabalho.result()
contagem = resultado.quasi_dists[0].binary_probabilities()

print("Resultados da Medição:", contagem)
plot_histogram(contagem)
#Desenho do Circuito
#qc.draw(output = 'mpl')
```

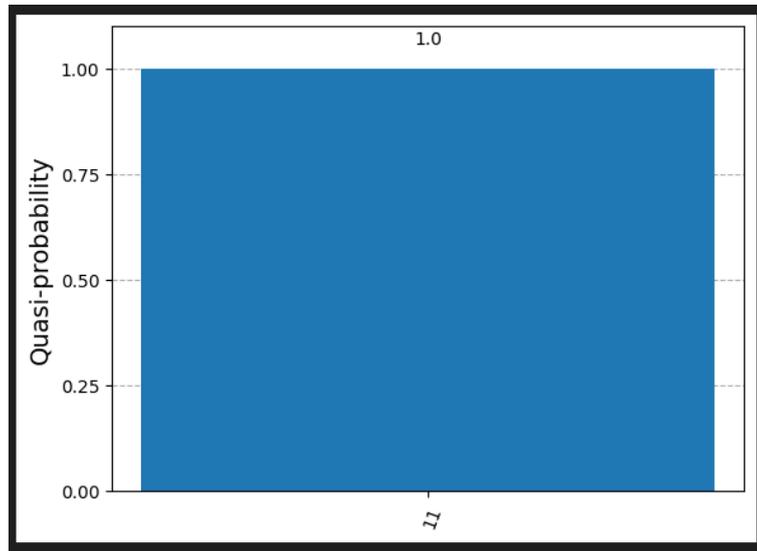
Fonte: IBM-Qiskit

O código cria um circuito quântico simples com duas operações principais: uma porta X e uma porta CNOT, primeiro cria-se dois qubits e dois bits clássicos, onde os qubits são as unidades de informação quântica, enquanto os bits clássicos armazenam os resultados das medições, a porta “x” é aplicada ao primeiro qubit (nomeado “q0”), invertendo seu estado de “|0>” para “|1>”, significando que, após essa operação, o qubit “q0” estará no estado |1>.

A porta CNOT (nomeada “cx”) é uma porta de dois qubits, onde o primeiro qubit (“q0”) é o controle e o segundo qubit (q1) é o alvo, ela age da seguinte maneira: se o qubit de controle estiver no estado “|0>” nada acontece com o qubit alvo, mas se o controle estiver em “|1>” o alvo tem seu estado invertido, indo de “|0>” para “|1>” por exemplo, ou vice e versa.

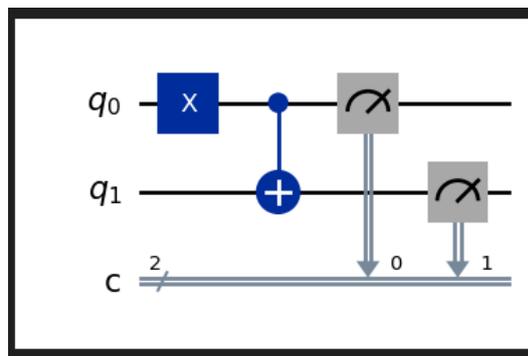
Finalmente, ambos os qubits são medidos, mostrando que resultado da simulação é  $|11\rangle$ , refletindo a ação combinada das portas como pode ser observado na figura 5 e a representação gráfica do circuito apresentado pela figura 6.

Figura 5 – Resultado da medição das portas CNOT



Fonte: IBM-Qiskit

Figura 6 – Esquemática gráfica do circuito de portas CNOT



Fonte: IBM-Qiskit

Para a simulação de uma interferência nos circuitos, foi utilizado um teste de ruído artificial. Na figura 7 temos o código que interfere no funcionamento de um circuito pré-estabelecido, podendo ser ajustado para que a interferência seja bem significativa ou não.

Figura 7 – Código de inserção de ruído artificial

```
#Teste de Ruído Manual
from qiskit import QuantumCircuit
from qiskit.primitives import Sampler
from qiskit.visualization import plot_histogram
import numpy as np

#Circuito a ser utilizado
qc = QuantumCircuit(1, 1)
qc.h(0)
qc.measure(0, 0)

def add_ruído(conts, nv_ruído=0.01):
    cont_ruído = {}
    for outcome, cont in conts.items():
        ruído = nv_ruído * np.random.rand()
        cont_ruído[outcome] = cont * (1 - ruído) + ruído * 1024
    return cont_ruído

sampler = Sampler()
trabalho = sampler.run([qc], shots=1024)
resultado = trabalho.result()
conts = resultado.quasi_dists[0].binary_probabilities()

cont_ruído = add_ruído(conts, nv_ruído=0.05)

print("resultados com ruído aplicado artificialmente:", cont_ruído)
plot_histogram(cont_ruído)
#Desenho do Circuito
#qc.draw(output = 'mpl')
```

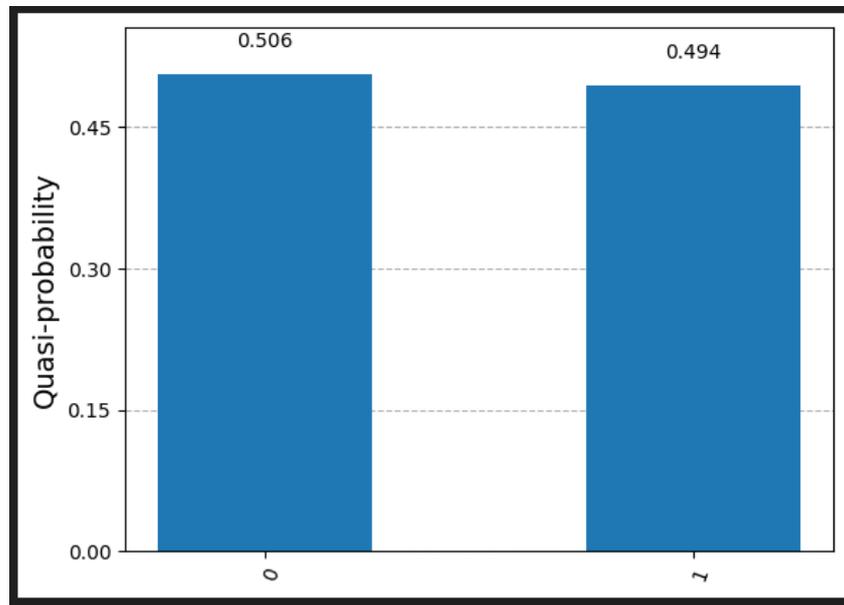
Fonte: IBM-Qiskit

Implementou-se uma função “add\_ruído()” para simular o ruído de despolarização manualmente, alterando as probabilidades dos circuitos afetados e assim modificando a sua leitura, o parâmetro “nv\_ruído” ajusta o grau de ruído que a simulação vai aplicar no circuito desejado.

#### 4. Resultados e Discussões

Com testes preliminares utilizando o ruído artificial, tem-se uma grande interferência no circuito Hadamard (apresentado na seção 3). A figura 8 apresenta a leitura dos qubits do código Hadamard sem alterações.

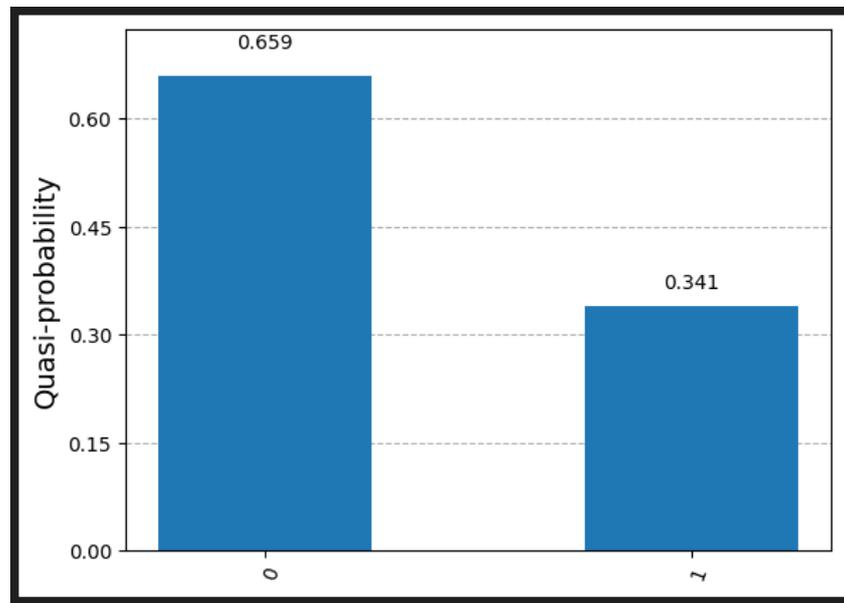
Figura 8 – Circuito Hadamard sem interferência



Fonte: IBM-Qiskit

Na figura 9 apresenta-se a leitura do mesmo circuito, porém com a interferência artificial aplicada.

Figura 9 – Circuito Hadamard com interferência

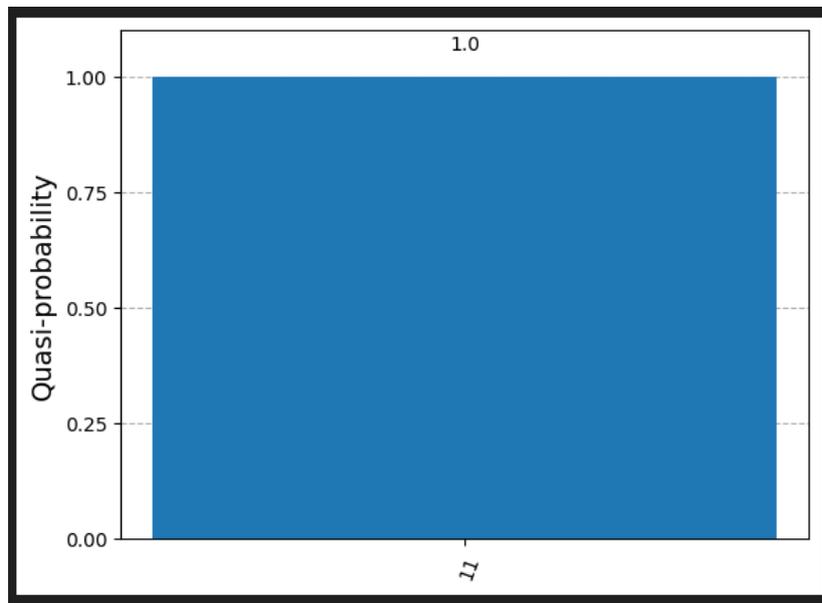


Fonte: IBM-Qiskit

Pode-se observar uma diferença entre as leituras realizadas, demonstrando como essa interferência pode comprometer significativamente o desempenho e a precisão dos cálculos, pois em um sistema quântico, operações extremamente delicadas são realizadas em estados de superposição e entrelaçamento, que são muito sensíveis à perturbações externas. O ruído que pode surgir de interações indesejadas com o ambiente, erros nas portas lógicas quânticas ou erros de medição, tende a despolarizar os qubits, corrompendo as informações armazenadas, isso resulta em resultados imprecisos ou probabilidades de medição distorcidas, afetando diretamente a eficiência dos algoritmos Hadamard.

Em contrapartida, circuitos com operações de transformação específicas não sofrem com o ruído artificial aplicado. Na figura 10 verifica-se as leituras do circuito de portas CNOT.

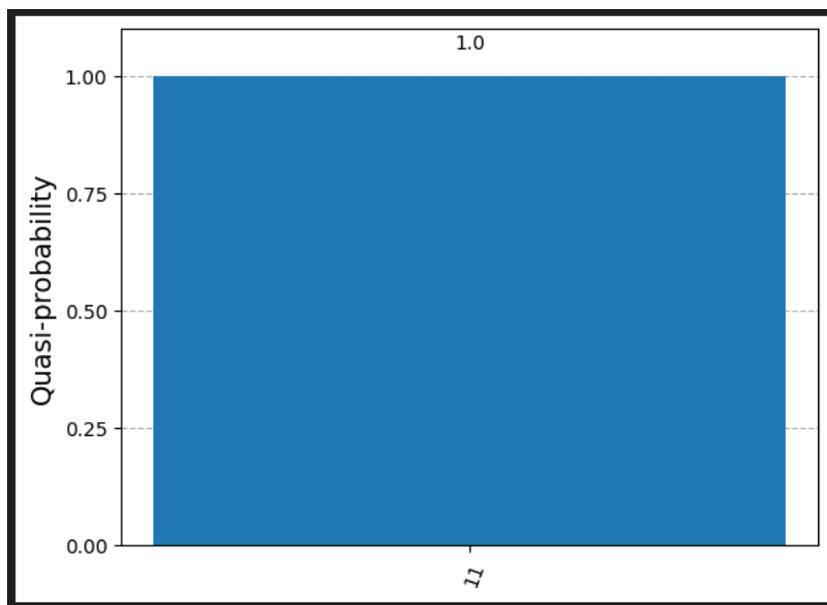
Figura 10 – Circuito de portas CNOT sem interferência



Fonte: IBM-Qiskit

Em comparação com as leituras afetadas pelo ruído na figura 11, nota-se que não há diferença no resultado. Embora essa porta seja mais suscetível a diversos outros tipos de interferência por fazer o uso de 2 qubits, ela não é alterada quando exposta ao ruído gerado artificialmente via código.

Figura 11 – Circuito de portas CNOT com interferência



Fonte: IBM-Qiskit

Ao se adicionar ruído artificial, os estados superpostos podem colapsar indevidamente, e o entrelaçamento entre os qubits pode ser corrompido, resultando em medições imprecisas, como pode ser observado no circuito Hadamard (figura 9) enquanto outros têm uma resistência a tipos específicos de interferência, como nos circuitos de portas CNOT (figura 11). Esse experimento oferece uma visão sobre os desafios práticos que os algoritmos quânticos enfrentam em sistemas físicos e a importância de técnicas de mitigação de ruído e correção de erros para alcançar resultados confiáveis.

A metodologia utilizada é adequada para ilustrar como a interferência pode afetar a segurança e precisão dos cálculos quânticos. No entanto, uma análise crítica revela algumas limitações que valem a pena serem observadas. Os testes em ambientes simulados, mesmo sendo capazes de modelar elementos de ruído e falhas, não reproduzem completamente as complexidades de um sistema quântico real, e em um ambiente físico, os fatores de ruído podem ser mais imprevisíveis e resultar de interações mais complexas com o ambiente, visto que erros de calibração de hardware, flutuações de temperatura e instabilidades operacionais são características dos sistemas físicos que não aparecem em simulações, influenciando principalmente o funcionamento correto dos circuitos e abrindo portas para possíveis falhas na

segurança e confiabilidade dos mesmos. Essas discrepâncias entre simulações e o comportamento de hardware real podem limitar a generalização dos resultados.

Em conclusão, a vulnerabilidade dos circuitos Hadamard e portas CNOT ao ruído mostra como as operações quânticas, apesar de muito promissoras, ainda enfrentam grandes desafios que afetam diretamente a cibersegurança dos computadores quânticos. O ruído pode comprometer a precisão dos algoritmos, distorcendo medições e corrompendo o entrelaçamento de qubits, elementos essenciais para a execução confiável de operações quânticas seguras, como foi mostrado nos circuitos Hadamard. O impacto do ruído na superposição pode gerar resultados inesperados, enquanto as portas CNOT, apesar de mais robustas a certos tipos de interferências, podem propagar erros quando não corrigidos. Essas vulnerabilidades enfatizam a necessidade de desenvolver técnicas de mitigação de ruídos para garantir que a computação quântica atinja seu pleno potencial de maneira segura e confiável, garantindo dessa forma, a segurança dos sistemas quânticos, especialmente em aplicações críticas como criptografia e proteção de dados. É fato que os algoritmos criptográficos atuais são resistentes a fortes ameaças à segurança cibernética, uma vez que cientistas e pesquisadores de segurança da informação desenvolveram métodos criptográficos que destroem ataques utilizando os computadores clássicos mais sofisticados, no entanto, essa resistência se tornará ineficaz para os computadores quânticos.

Embora a computação quântica represente um avanço significativo e uma ameaça aos métodos tradicionais de criptografia, ela também enfrenta grandes desafios que podem comprometer a sua segurança e eficácia, devido à complexidade e à sensibilidade de seus sistemas, que são suscetíveis à interferências e ruídos. Há questões sobre como a integridade e a execução correta dos algoritmos quânticos podem ser garantidas diante dessas vulnerabilidades. A capacidade dos computadores quânticos de manipular estados superpostos e entrelaçados os torna poderosos, mas também vulneráveis a perturbações externas que podem causar erros significativos. Esses erros podem impactar na confiabilidade dos cálculos e na segurança dos sistemas, exigindo assim o desenvolvimento de mecanismos robustos de correção de erros e protocolos de proteção para garantir a resiliência dos sistemas quântico (TOM, 2023).

## 5. Considerações Finais

O uso de ruído artificial em simulações quânticas realizadas com o IBM Qiskit permite uma análise aprofundada de como as interferências externas podem afetar o desempenho e a precisão de circuitos quânticos. Os circuitos com portas Hadamard são significativamente mais sensíveis ao ruído, com alterações perceptíveis nos resultados das medições devido à despolarização dos qubits. Em contrapartida, circuitos que utilizam portas CNOT mostraram-se mais resistentes a esse tipo de interferência, mantendo a precisão nas leituras. Esses testes reforçam a necessidade de técnicas de mitigação de ruído e correção de erros para garantir a confiabilidade de algoritmos quânticos em cenários reais, onde as flutuações ambientais são inevitáveis.

Esta área de estudo ainda é relativamente nova e está em expansão, tanto na academia quanto na indústria. A literatura científica disponível sobre o tema é limitada e em constante evolução, refletindo o caráter emergente da computação quântica como um todo. Por ser uma tecnologia que está se consolidando, há poucos estudos de longo prazo que possam oferecer uma compreensão completa de como diferentes tipos de ruído afetam o desempenho e a segurança dos sistemas quânticos. Esse panorama evidencia a necessidade urgente de pesquisas que aprofundem o conhecimento sobre a interferência e os desafios associados à manutenção da precisão e integridade em operações quânticas.

O desenvolvimento de técnicas robustas de correção de erros e mitigação de ruído é mais do que essencial para a viabilidade da computação quântica em aplicações práticas e comerciais. Esses experimentos evidenciam a importância de desenvolver e implementar técnicas eficazes de correção de erros e mitigação de ruído, essenciais para garantir a confiabilidade e segurança dos sistemas quânticos em aplicações práticas. A evolução contínua dessas soluções será crucial para o avanço da computação quântica e sua adoção em contextos de cibersegurança e processamento de dados em larga escala.

Essa progressão contínua será fundamental para garantir a confiabilidade dos sistemas e consolidar a computação quântica como uma ferramenta desenvolvida para resolver problemas complexos e ainda mais desafiadores, especialmente no que diz respeito à cibersegurança.

### Referências

- IBM, IBM Quantum Documentation — Processor types. 2024. Disponível em: <<https://docs.quantum.ibm.com/guides/processor-types>>. Acesso em: 15 nov. 2024.
- JESUS, G. F. DE et al. Computação quântica: uma abordagem para a graduação usando o Qiskit. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 43, 2021.
- LEON, N. P. DE et al. Materials challenges and opportunities for quantum computing hardware. Science (New York, N.Y.), v. 372, n. 6539, p. eabb2823, 2021. Disponível em: <<https://par.nsf.gov/servlets/purl/10353296>>. Acesso em: 18 nov. 2024
- MIANO, M G. V. et al. Comparação de desempenho do algoritmo de Deutsch-Jozsa nas linguagens quânticas Silq e Qasm. Revista Tecnológica da Fatec Americana, v. 11, n. 01, p. 47–67, 2023.
- MIANO, M. G. V.; OLIVEIRA, A. S. Implementação de algoritmo quântico em linguagem funcional e multiparadigma aplicado à segurança da informação. Revista Tecnológica da Fatec Americana, v. 10, p. 57-73, 2023.
- QISKIT. Disponível em: <https://www.ibm.com/quantum/qiskit>. Acesso em: 19 maio 2024.
- RESCH, S.; KARPUZCU, U. R. Benchmarking Quantum Computers and the Impact of Quantum Noise. ACM Computing Surveys, v. 54, n. 7, p. 1–35, 30 set. 2022.
- TOM, J. J. et al. Quantum Computers and Algorithms: A Threat to Classical Cryptographic Systems. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), v. 12, n. 5, jun. 2023.
- TONELI, D. A. Desenvolvimento de um tutorial para o ensino de computação quântica — Universidade Federal de São Paulo – UNIFESP: [s.n.]. 2022. Acesso em: 08 set. 2024.