

Estudo sobre o Teleporte Quântico

Lucas da Mata Guimarães

14 de novembro de 2025

Resumo

Este estudo apresenta os princípios fundamentais do teletransporte quântico, uma técnica que permite a transferência do estado quântico de uma partícula de um local para outro, sem a necessidade de deslocamento físico da matéria. Apresentando três aplicações conceituais deste protocolo e o que podemos inferir a partir destas em relação a viabilidade do teleporte quântico. Discutindo qual a contribuição do **emaranhamento quântico** e as implicações do **Teorema No-Cloning** (Não-Clonagem) da computação quântica trazem para o modo como transferimos informações.

Conteúdo

1	Introdução ao Teletransporte Quântico	2
2	Princípios Fundamentais	2
2.1	O Qubit e o Estado Quântico	2
2.2	Mais de um Qubit	2
2.3	Emaranhamento Quântico (Entanglement)	2
3	O Processo de Teletransporte	3
4	Experimento	3
4.1	Teleporte Quântico de 1 Qubit	3
4.2	Teleporte Quântico Superposição	5
4.3	Teleporte Quântico N Qubits	8
5	Conclusão	10
Referências		11

1 Introdução ao Teletransporte Quântico

O teletransporte quântico é um fenômeno fascinante da mecânica quântica, que se distingue da ficção científica por não envolver o teletransporte de matéria ou energia, mas sim a transferência de informação quântica, que nomeamos estado quântico, de um sistema para outro. Essa informação é codificada em qubits (bits quânticos).

2 Princípios Fundamentais

2.1 O Qubit e o Estado Quântico

Um qubit é a unidade básica de informação quântica, que pode ser um dos estados $|0\rangle$ ou $|1\rangle$, ou estar em superposição, isto é, ter uma chance α de estar no estado $|0\rangle$ e β de estar no estado $|1\rangle$. Formalmente representamos um estado quântico pela seguinte fórmula:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (1)$$

Onde $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. O objetivo do teletransporte é transferir o valor de (α, β) de um local (Alice) para outro (Bob).

Quando encontramos um estado que possui a seguinte forma,

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle \quad (2)$$

dizemos que temos um **estado em superposição**, isto é, quando medirmos o valor deste estado, temos uma chance de termos $|0\rangle$ ou $|1\rangle$.

2.2 Mais de um Qubit

Para representar um qubit, utilizamos a representação de estado como $|0\rangle$ e $|1\rangle$, que mostra todos os estados possíveis desse qubit, mas e quando trabalhamos com mais de um?

Tomemos como exemplo, utilizar dois qubits, assim, representamos seus estados possíveis como, $|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$ e $|11\rangle$. Mostrando todas as combinações que podemos encontrar desses dois qubits. De um modo geral, a equação do estado é semelhante a equação 1:

$$|\psi\rangle = \alpha|00\rangle + \beta|01\rangle + \gamma|10\rangle + \delta|11\rangle \quad (3)$$

Onde novamente, $|\alpha|^2 + |\beta|^2 + |\gamma|^2 + |\delta|^2 = 1$.

2.3 Emaranhamento Quântico (Entanglement)

O teletransporte quântico é impossível sem um par de partículas emaranhadas compartilhado entre os dois comunicadores, Alice e Bob. O estado emaranhado mais comum é o Estado de Bell Φ^+ :

$$|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) \quad (4)$$

Aqui, podemos ver que, mesmo trabalhando com 2 qubits, o a equação 4 é menor que a equação 3. Isso é devido ao emaranhamento, pois, os dois qubits assumem sempre

o mesmo valor, isto é, os únicos estados possíveis de se encontrar nosso sistema após o emaranhamento são $|00\rangle$ e $|11\rangle$.

Este emaranhamento atua como um **canal quântico** para a transferência de informação.

3 O Processo de Teletransporte

O processo envolve três etapas principais:

1. **Medição de Bell por Alice:** Alice realiza uma medição conjunta (Medição de Bell) no seu qubit de entrada ($|\psi\rangle$) e em uma das partículas do par emaranhado. Esta medição destrói o estado original $|\psi\rangle$ (devido ao Teorema No-Cloning), mas codifica a informação necessária para a reconstrução. O resultado é um dos quatro estados de Bell.
2. **Comunicação Clássica:** Alice envia o resultado da sua medição (2 bits de informação clássica) para Bob.
3. **Reconstrução por Bob:** Bob aplica uma operação unitária de correção (uma das quatro transformações de Pauli, I, X, Y, Z) na sua partícula emaranhada, com base nos 2 bits de informação clássica recebidos, o que a transforma no estado original $|\psi\rangle$.

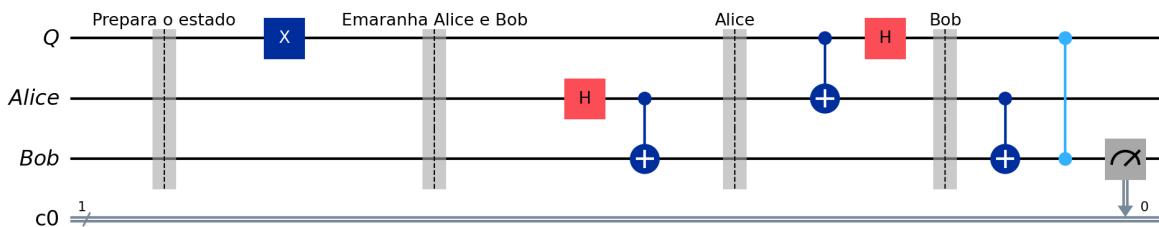
4 Experimento

Os experimentos a seguir, têm como intuito analisar a capacidade do teleporte quântico, transferindo a informação de um qubit para outro. Foram realizados para cada experimento duas simulações e uma execução utilizando a IBM Plataforma Quantum. A codificação foi realizada utilizando a SDK Qiskit.

4.1 Teleporte Quântico de 1 Qubit

O seguinte circuito foi desenvolvido para analisar o protocolo de teleporte quântico do estado de um qubit.

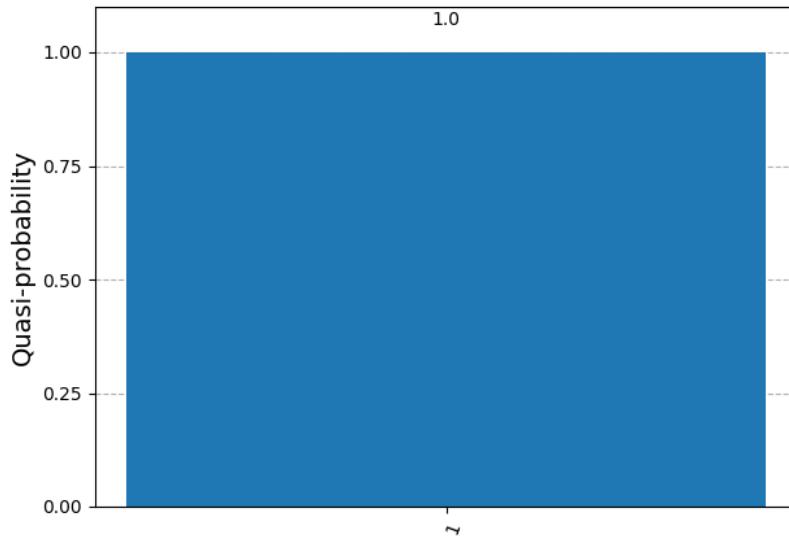
Figura 1: Circuito: Teleporte Quântico de 1 qubit



Na configuração apresentada, preparamos o qubit Q , com o estado $|1\rangle$, e queremos passar esse estado para o qubit Bob , primeiro, vamos simular o circuito.

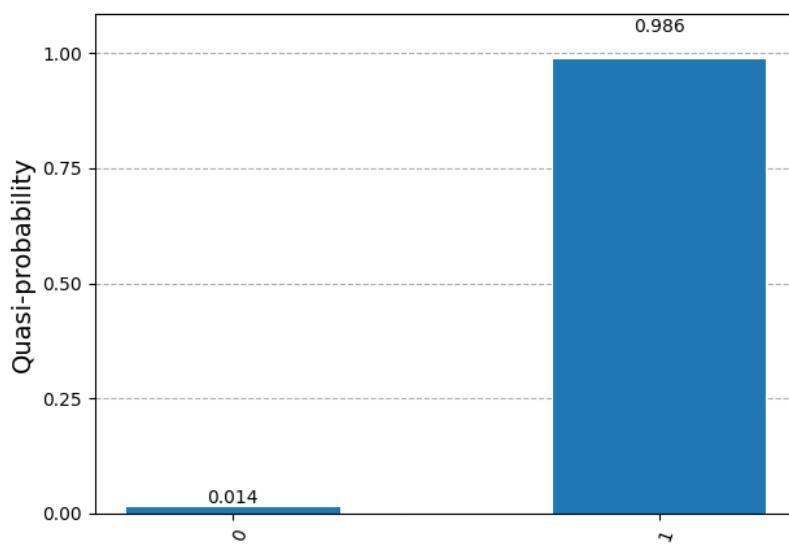
Quando simulamos o circuito sem considerar o ruído encontramos o seguinte cenário.

Figura 2: Resultados na simulação sem ruído



Agora quando levamos em consideração o ruído que encontramos em computadores quânticos, temos os seguintes resultados na simulação.

Figura 3: Resultados na simulação com ruído

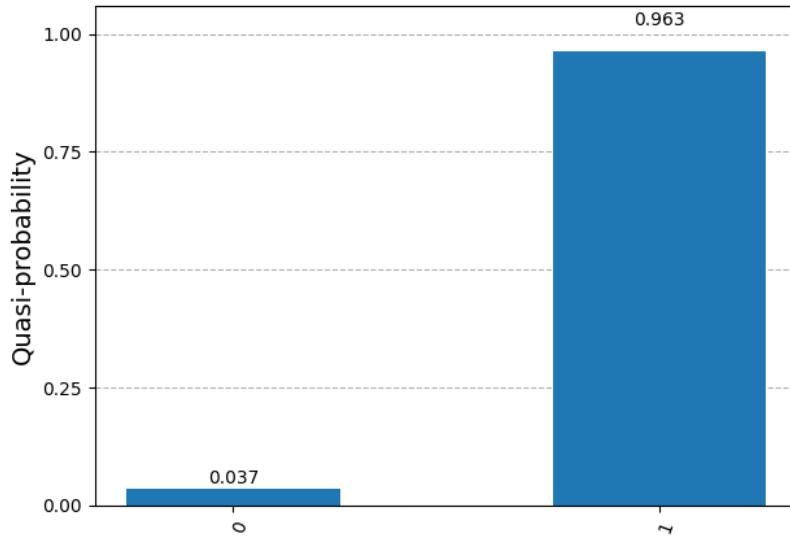


Quando consideramos o ruído, começamos a ver que em algumas de nossas medições

encontramos o estado $|0\rangle$ no qubit *Bob*, porém o ruído é tão pequeno que o desconsideramos.

Para comparação, o circuito foi executado em um computador quântico disponibilizado pela IBM, e os resultados encontrados se assemelham à simulação com ruído.

Figura 4: Resultados na execução na Plataforma IBM Quantum



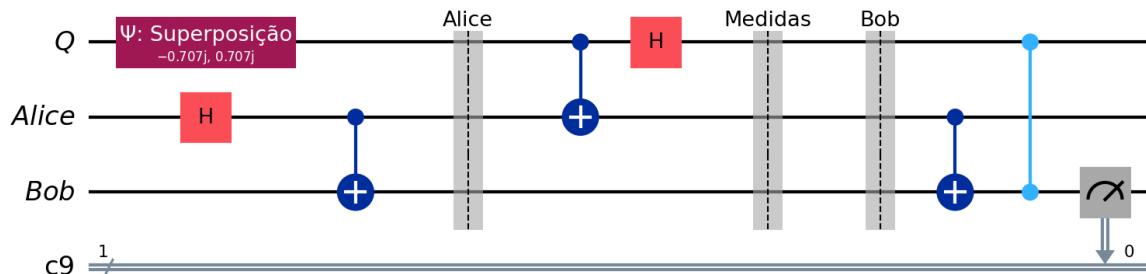
Para as análises feitas, foram realizados 1000 testes, para ter uma coleta relevante e confiável da informação. Isso nos mostra que na simulação com ruído 3, medimos o estado $|1\rangle$ um total de 986 vezes, e na execução em um computador quântico 4, medimos o estado $|1\rangle$ um total de 963 vezes.

4.2 Teleporte Quântico Superposição

A computação quântica, tem como principais fundamentos a superposição quântica, logo seria vantajoso conseguirmos fazer o teleporte deste estado.

Para isso, o seguinte circuito foi proposto.

Figura 5: Circuito: Teleporte Quântico em Superposição

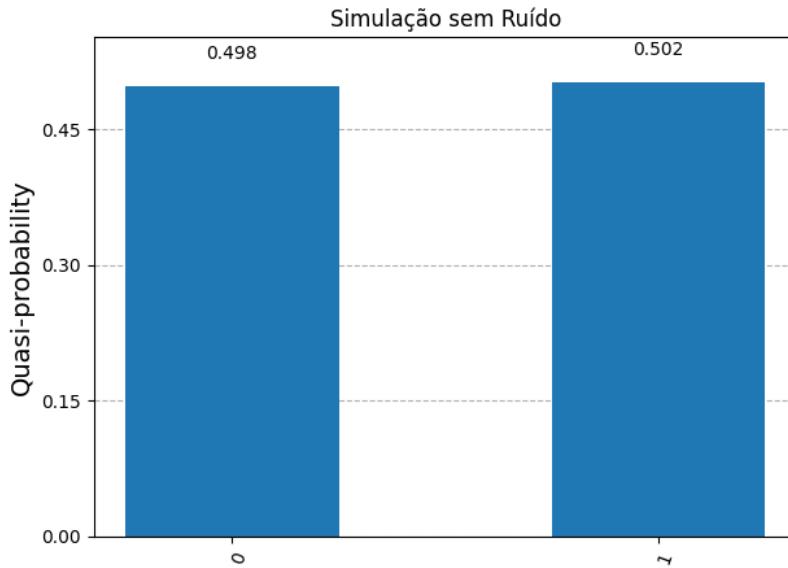


Na figura acima 5, preparamos no qubit Q o seguinte estado de superposição,

$$|\phi\rangle = \frac{-i}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{i}{\sqrt{2}}|1\rangle. \quad (5)$$

A simulação desconsiderando o ruído do circuito 5, serve para vermos se o circuito é teoricamente viável, e para este os resultados encontrados foram.

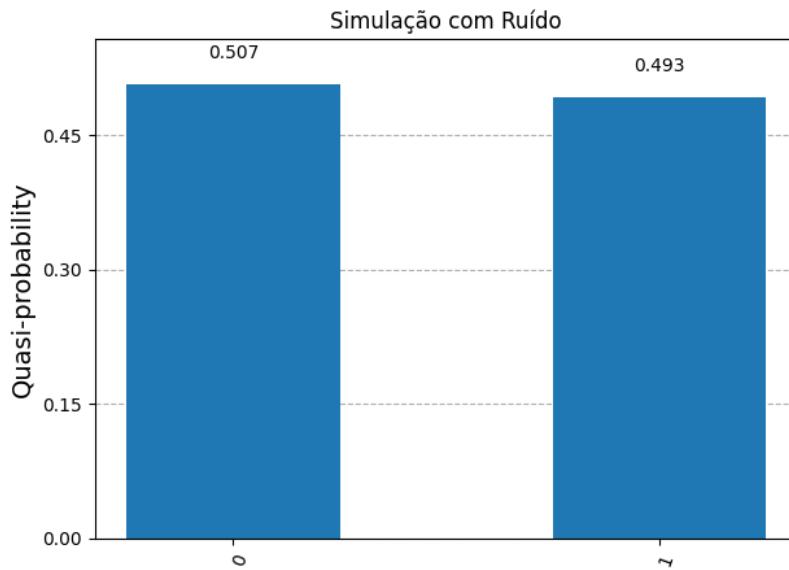
Figura 6: Resultados na simulação sem ruído



Os resultados nos indicam que o circuito é viável, visto que, temos uma distribuição de mais ou menos 50% entre os estados $|0\rangle$ e $|1\rangle$, que representa superposição desejada.

Quando levamos em consideração o ruído, encontramos o seguinte resultado.

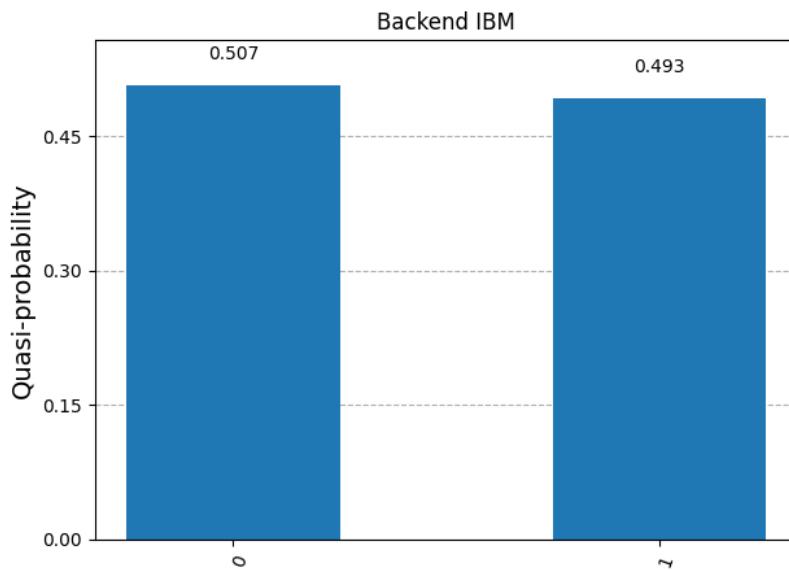
Figura 7: Resultados na simulação com ruído



Nesta situação, o ruído se mistura com os resultados possíveis, visto que ao medirmos apenas um qubit os estados possíveis são apenas $|0\rangle$ e $|1\rangle$.

Ao executarmos o circuito em um computador quântico, os resultados obtidos foram.

Figura 8: Resultados na execução na Plataforma IBM Quantum

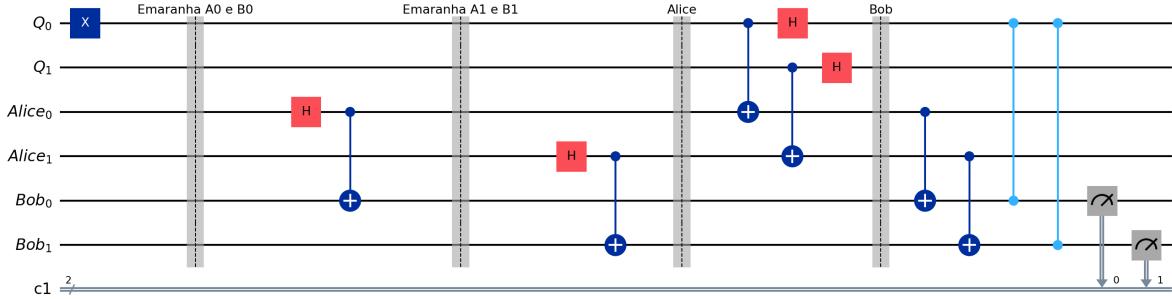


Assim como na análise com ruído 7, o ruído característico de um computador quântico, se mescla aos resultados possíveis ao utilizarmos de um computador quântico real.

4.3 Teleporte Quântico N Qubits

Para uma Comunicação ser viável precisamos passar mais de um bit ou qubit por vez, para analisar essa situação, o seguinte circuito de teleporte quântico de 2 qubits foi elaborado.

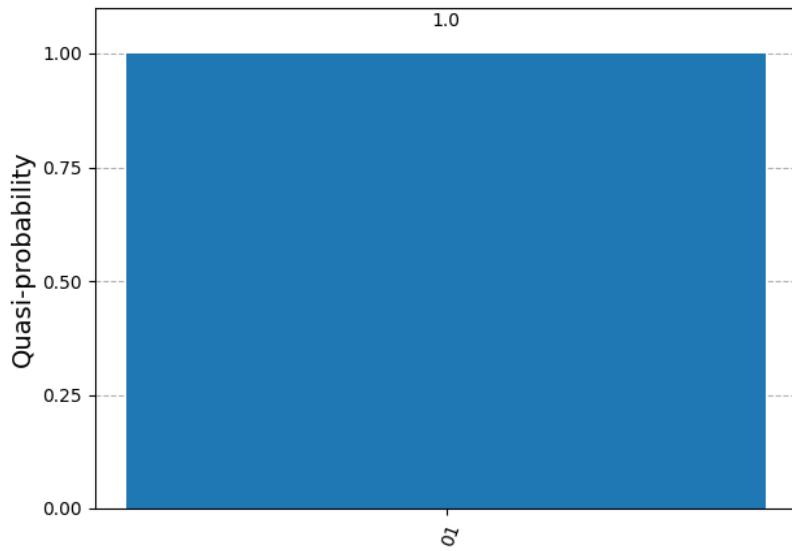
Figura 9: Circuito: Teleporte Quântico 2 Qubits



Neste circuito preparamos o estado $|01\rangle$ nos qubits de Q para ser teleportado para Bob_0 e Bob_1 .

A viabilidade teórica desse circuito pode ser verificada na simulação sem ruído, que apresentou os seguintes resultados.

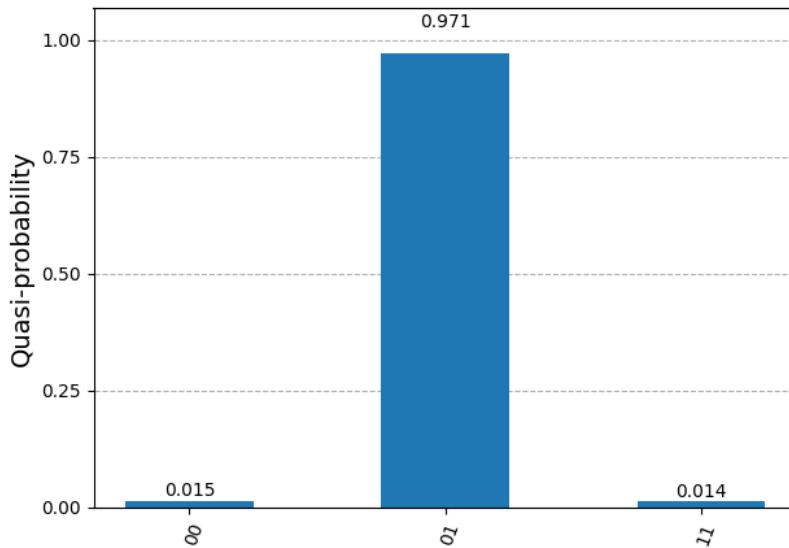
Figura 10: Resultados na simulação sem ruído



Comprovando que podemos teoricamente teleportar o estado de 2 qubits.

Quando adicionamos o ruído que ocorre normalmente em computadores quânticos os resultados encontrados são.

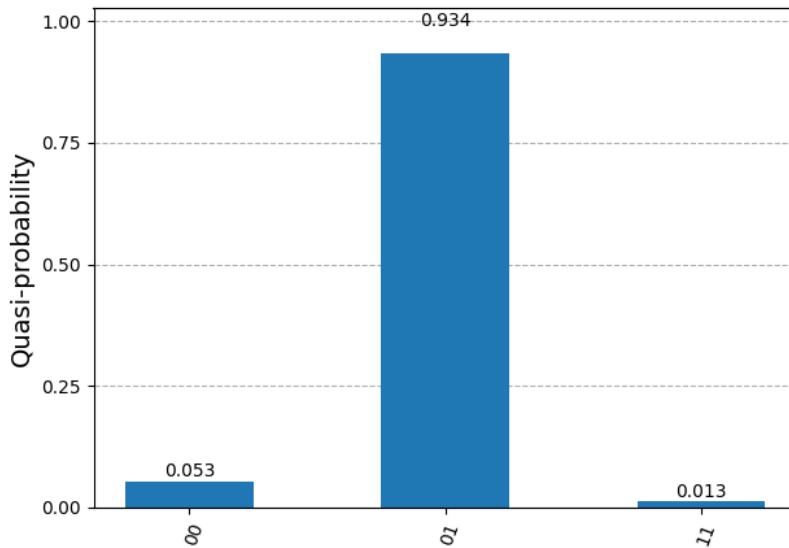
Figura 11: Resultados na simulação com ruído



Assim como visto nos casos anteriores onde adicionamos o ruído, ele adiciona uma leve flutuação do valor, porém continua claro qual o resultado verdadeiro. Uma ocorrência interessante nesta análise, é que o estado $|10\rangle$ nunca ocorreu durante os testes executados.

A título de comparação, o circuito foi avaliado em um computador quântico real, e os seguintes resultados foram encontrados.

Figura 12: Resultados na execução na Plataforma IBM Quantum



Assim como os resultados encontrados na simulação com ruído 11, aqui vemos que o estado $|10\rangle$ novamente não ocorre, e os resultados são novamente semelhantes à simulação

com ruído.

Esse fenômeno onde o estado $|10\rangle$ não ocorre tanto na simulação 11, quanto em um computador quântico real 12, necessita de um estudo próprio, pode vir a ser relativo ao emaranhamento entre os qubits $Alice_0 Bob_0$ e $Alice_1 Bob_1$, mas um estudo mais aprofundado se faz necessário.

5 Conclusão

As vantagens que os protocolos de comunicação quântica trazem ao jogo são a segurança e a eficiência (ou densidade de dados).

Na questão de segurança, o ganho advém do uso do emaranhamento quântico e do Teorema da Não-Clonagem.

Dentro do Teleporte Quântico, qualquer tentativa de medir ou interceptar o estado em trânsito colapsaria o estado quântico, destruindo assim a informação e alertando as partes envolvidas sobre a espionagem. Isso é usado como base para a Distribuição de Chaves Quânticas (QKD), que garante uma chave criptográfica mais segura.

Na Comunicação Densa, utiliza-se também um par de qubits emaranhados previamente compartilhados, para passar dois bits de informação clássica usando apenas um qubit entre as partes, explorando o par pré-compartilhado de qubits emaranhados.

Quando falamos de velocidade, podemos atrelar a eficiência ao protocolo.

No Teleporte Quântico, a velocidade de transferência do estado quântico é limitada pela velocidade de transmissão da informação clássica (os dois bits), necessária para que o receptor reconstrua o estado teleportado. O emaranhamento, de fato, não se limita pela velocidade da luz, sendo instantâneo. Mas o ponto forte do protocolo está na transferência fiel do estado quântico, crucial para a Internet Quântica, permitindo estender as redes quânticas sem o risco de perda de decoerência que acontece em repetidores clássicos.

Dentro da Comunicação Densa, temos a vantagem na densidade de dados, permitindo o envio do dobro de informação clássica (dois bits) usando o canal quântico de um qubit. Isso traz uma maior densidade de dados para a comunicação.

Referências

- 1** Matthew Silverman, "Quantum Teleportation | PennyLane Demos",
https://pennylane.ai/qml/demos/tutorial_teleportation
- 2** IBM Quantum, "Quantum Teleportation",
<https://quantum.cloud.ibm.com/learning/pt/courses/basics-of-quantum-information-entanglement-in-action/quantum-teleportation>
- 3** Yanofsky, N. S.; Mannucci, M. A.
Quantum Computing for Computer Scientists. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.