



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

Autorizada pelo Decreto Federal nº 77.496 de 27/04/76  
Recredenciamento pelo Decreto nº 17.228 de 25/11/2016



PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
COORDENAÇÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

## XXVII SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UEFS SEMANA NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA - 2023

### IMPLEMENTAÇÃO DE CAMINHADA QUÂNTICA NO PROCESSADOR QUÂNTICO IBM Q EXPERIENCE.

**Aisis Rodrigues Barbosa<sup>1</sup>; Dagoberto da Silva Freitas<sup>2</sup>**

1. Bolsista PROBIC/UEFS, Graduando em Bacharelado em Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: [aisisb21@gmail.com](mailto:aisisb21@gmail.com)
2. Orientador, Departamento de Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: [dfreitas@uefs.br](mailto:dfreitas@uefs.br)

**PALAVRAS-CHAVE:** Passeios Aleatórios Quânticos; IBM-Q; Circuitos Quânticos

### INTRODUÇÃO

A computação quântica é uma área inovadora da ciência, que possui como principal objetivo potencializar a velocidade de processamento. As vantagens desse tipo de computador decorrem da possibilidade de utilização dos princípios intrínsecos da mecânica quântica, como a superposição de estados que permite um aumento potencial no armazenamento e processamento de informações, o emaranhamento que permite que dois estados estejam contatos independentemente da distância, dentre outros fundamentos.

Dentro desse campo, os passeios aleatórios quânticos desempenham um papel essencial. Nesse tipo de passeio, uma partícula representada por um qubit [3], segue uma trajetória probabilística através do espaço. Existem duas principais variantes: os passeios quânticos discretos, onde a partícula se move através do espaço em um dado tempo e tem suas probabilidades de movimentação influenciadas pela superposição quântica dos estados, e também temos os passeios quânticos contínuos, onde a partícula se move continuamente baseando-se em operadores evolutivo. Neste processo é importante lembrar que pode ocorrer interferências ou descoerências, causando a perda ou cancelamento de algum dos estados presente no circuito.

Um passeio aleatório ocorre como o resultado da sequência de passos tomados de forma aleatória [5]. Em sua variante clássica, o agente ou caminhante dá um passo único para à direita com uma dada probabilidade  $j$ , ou o agente pode se mover para a esquerda com probabilidade  $1-j$ . Na abordagem quântica, o agente consegue se mover simultaneamente tanto para a esquerda quanto para a direita, conforme as magnitudes de probabilidades.

No caso quântico o estado  $|\psi\rangle$  ao qual o passeio pertence está localizado no espaço de Hilbert, onde  $H = H_m \otimes H_p$ , com  $H_m = \mathbb{C}^2 = \{|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle\}$  e  $H_p = \ell^2(\mathbb{Z}) = \sum_{i \in \mathbb{Z}} a_i |i\rangle$  que são estados da moeda (relacionados ao operador moeda) e da posição (relacionado ao operador deslocamento), respectivamente.

O operador moeda está atuando diretamente no estado da moeda com o passar do tempo, sendo responsável por colocar o caminhante em superposição, permitindo que todos os estados possíveis sejam percorridos de forma simultânea. Por sua vez, o operador deslocamento atua no estado posição, se tornando responsável por mover o caminhante para a próxima posição. Como o trabalho está dando ênfase a um caminhante que tenha apenas dois graus de liberdade, podemos relacionar o operador de deslocamento condicional ( $S$ ) com duas operações, a de incrementar a posição da partícula em um, se o estado for  $|\uparrow\rangle$  e decrementa em um, se o estado for  $|\downarrow\rangle$ , portanto:

$$S = |\uparrow\rangle\langle\uparrow| \otimes \sum_{i \in \mathbb{Z}} |i+1\rangle\langle i| + |\downarrow\rangle\langle\downarrow| \otimes \sum_{i \in \mathbb{Z}} |i-1\rangle\langle i| \quad (1)$$

Como estaremos trabalhando com o operador moeda de porta única denominado Hadamard, onde é representada da seguinte forma matricial:

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

portanto o operador ( $U$ ) responsável pela evolução do passeio aleatório quântico é descrito da seguinte forma:

$$U = S(C \otimes I) = S(H \otimes I), \quad (3)$$

onde  $I$  é a matriz identidade. Logo se a partícula e a moeda iniciarem no estado  $|\psi_0\rangle$ , o estado do sistema após  $N$  passos na caminhada pode ser descrito como:

$$|\psi_N\rangle = U^N |\psi_0\rangle \quad (4)$$

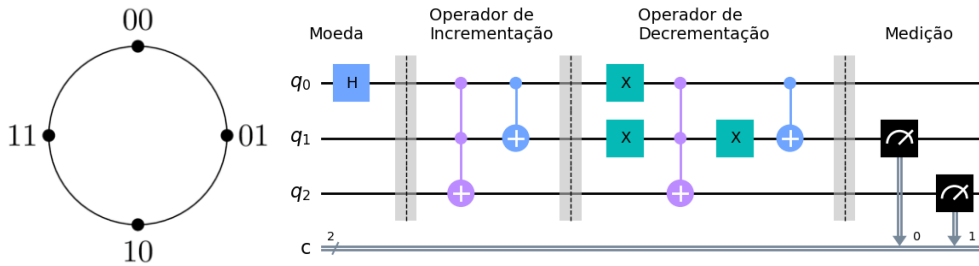
## MATERIAL E MÉTODOS

Para implementar algoritmos relacionados aos passeios aleatórios quânticos discretos baseados em moedas quânticas no ambiente do *IBM Quantum* (IBM Q) [2] vamos seguir os seguintes passos:

1. Primeiramente, é necessário ter uma conta na plataforma da *IBM* para ter acesso aos processadores, também é necessário realizar a instalação da biblioteca *open-source Qiskit* para a começar a ambientação na programação quântica [7];
2. Partindo da pesquisa em literatura, é analisado quais implementações de algoritmos de passeios aleatórios quânticos [1, 4] são possíveis na plataforma utilizando o *Qiskit* e o *IBM Q*;
3. A construção de tais algoritmos devem ser configuradas e analisadas para grafos cíclicos. Esses algoritmos montados, através de circuitos, devem possuir tanto o operador moeda quanto o operador deslocamento, já abordado em teoria;
4. Para o processamento dos algoritmos criados será utilizado, como modelo de processador real, o *ibm\_nairobi* (v1.3.3) de sete qubits e simulador selecionado foi o *ibmq\_qasm\_simulator* (v0.1.547), realizando 8192 medições (vezes rodadas) em ambos. Neste caso também será implantado um método, demonstrado em [6], que permite gerar automaticamente um modelo de ruído simplificado para um dispositivo real, esse modelo a ser gerado usa as informações de calibração informadas no *BackendProperties* do dispositivo, portanto para tal simulação utilizaremos o *Fake Guadalupe* de 16 qubits;
5. Com os resultados reportados em histogramas, relacionando a frequência e os qubits, será necessário realizar a análise e comparação dos dados das medidas feitas sobre o sistema quântico de interesse no simulador e no processador real, confrontado os resultados com os esperados pela teoria, uma vez que o comportamento das caminhadas quântica em grafos são descritos matematicamente.

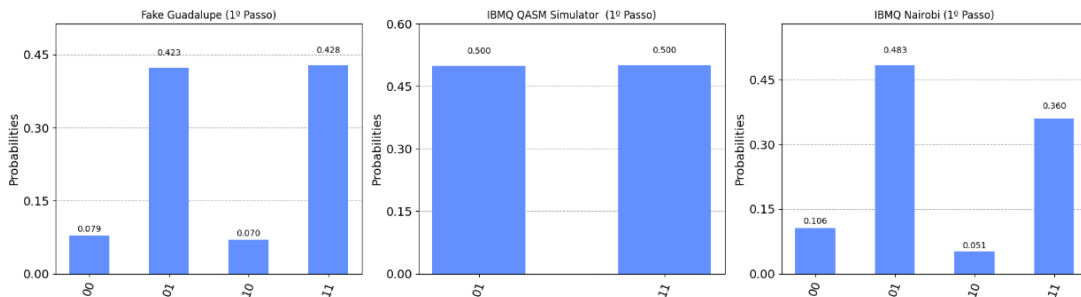
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O circuito quântico, *Fig.1*, implementado utiliza as descrições analisada em [1] para um grafo de quatro nós, uma vez que as permutações cíclicas do grafo são alcançadas através das incrementações (+) e decrementações (-) de passos que são construídas por portas CNOT e/ou CCNOT generalizadas.



**Figura 1** – Circuito quântico completo para a caminhada quântica em um ciclo de 4 nós [4].

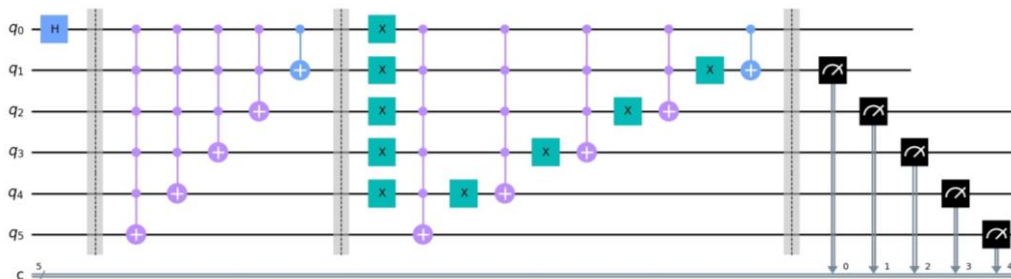
Os últimos qubits  $q_1$  e  $q_2$  são referentes ao estado posição no grafo e o qubit  $q_0$  é referente ao estado da moeda, ambos são iniciados no estado  $|0\rangle$ .



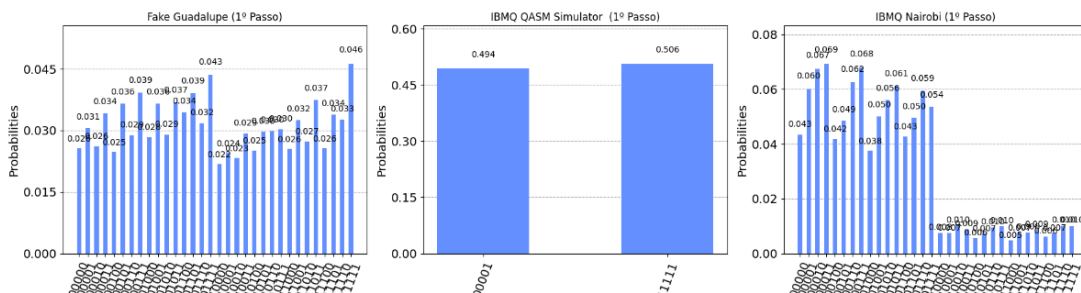
**Figura 2** – Resultados obtidos da plataforma IBM-Q, onde temos o gráfico da frequência relativa (histograma) após as medidas sobre os qubits  $q_1$  e  $q_2$ , com  $N = 8192$ , após um passo do caminhante.

Os resultados obtidos através deste circuito, foram apresentados com o auxílio do framework gratuito *Qiskit*, Fig.2. Ao medirmos  $q_1$  e  $q_2$ , o caminhante está no nó 01 e no nó 11, com probabilidade simétrica para ambos os lados. Os erros apresentados no processador real são mínimos e esperados, podendo ser relacionados a ruídos, medições imperfeitas relacionadas ao próprio computador quântico e/ou resquícius do aquecimento do qubit, o mesmo comportamento ocorre quando estamos trabalhando com *Fake Guadalupe*, uma vez que simulamos o mapa de erro desse processador.

Utilizando o mesmo esquema do circuito proposto na Fig. 1, podemos generalizar e implementar passeios aleatórios em grafos de 32 nós, Fig. 3.



**Figura 3** – Circuito quântico completo para a caminhada quântica em um ciclo de 32 nós.



**Figura 4** – Resultados obtidos da plataforma IBM-Q, onde temos o gráfico da frequência relativa (histograma), com  $N = 8192$ , após um passo do caminhante.

Com os resultados observados na *Fig. 4* o aumento dos nós nos grafos representa um aumento no número de portas utilizadas para analisar os estados possíveis do caminhante e como consequência os erros se tornam maiores, se processados em um computador quântico real, inviabilizando a leitura correta dos resultados, uma vez que os erros ultrapassam a margem padrão dado por  $E_{er} = \frac{1}{\sqrt{N}} \approx 0,01105$  [8].

Há erros associados a cada uma das portas lógicas utilizadas, podendo ser decorrentes de um canal despolarizante, seguido de um relaxamento térmico. Embora a tecnologia atual não suporte bem esse modelo de circuito, é de se esperar que à medida que o hardware de computação quântica avance o algoritmo possa ser otimizado. O ideal nesse caso seria tentar diminuir a quantidade de portas utilizadas para a criação dos circuitos quânticas, ou seja, tornar o circuito menor, ou aumentar o número de qubits que estão sendo trabalhado para o processamento do circuito.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo dos passeios aleatórios quânticos demonstra facetas intrigantes tanto sob a ótica teórica quanto a computacional, uma vez que as caminhadas quânticas podem funcionar bem como uma amplificação do algoritmo de busca, uma vez que sua dispersão cresce linearmente com o número de passos, ou seja, de uma série quadraticamente superior ao visto classicamente.

Teoricamente é viável adentrar nas propriedades relevante dos passeios aleatórios, pois no campo computacional torna-se possível empregar abordagens numéricas para ratificar resultados teóricos, proporcionando o uso de processadores quânticos reais ou modelos ruidosos de computadores reais com uma ambientação simplificada para a realização das simulações desejadas. Apesar dos erros é possível explorar a implementação de caminhadas quânticas mais rudimentares.

## REFERÊNCIAS

- [1] DOUGLAS, B. L.; WANG, J. B. Efficient quantum circuit implementation of quantum walks. *Physical Review A*, v. 79, n. 5, p. 052335, 2009.
- [2] IBM Quantum Team. IBM-Q Experience. Disponível em: <https://quantum-computing.ibm.com/composer>. Acessado em 26 de Julho de 2022.
- [3] NIELSEN, M. A.; CHUANG, I. L. *Quantum computation and quantum information*. 10th Ed. United Kingdom: Cambridge University Press, 2010.
- [4] OLIVIERI, P.; ASKARPOUR, M.; DI NITTO, E. Experimental implementation of discrete time quantum walk with the ibm qiskit library. In: 2021 IEEE/ACM 2nd International Workshop on Quantum Software Engineering (Q-SE). IEEE, 2021. p. 33-38.
- [5] PORTUGAL, R. *Quantum Walks and Search Algorithms*. 2nd Ed. New York: Springer, 2018.
- [6] QISKIT. Device backend noise model simulations. Disponível em: [https://qiskit.org/documentation/stable/0.19/tutorials/simulators/2\\_device\\_noise\\_simulation.html](https://qiskit.org/documentation/stable/0.19/tutorials/simulators/2_device_noise_simulation.html). Acesso em: 20 de Junho de 2023.
- [7] QISKIT. Disponível em: <https://github.com/Qiskit>. Acesso em: 20 de Junho de 2023.
- [8] RABELO, W. R. M; COSTA, M. L. M. Uma abordagem pedagógica no ensino da computação quântica com um processador quântico de 5-qubits. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 40, 2018.