

## EXTENSÃO DA BIBLIOTECA QISKIT: MAPEANDO SISTEMAS FLEXÍVEIS VIA COMPUTAÇÃO QUÂNTICA

CECILIA BOTELHO<sup>1</sup>; GABRIEL RAMIRES<sup>2</sup>; RENATA REISER<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Pelotas – [cscbotelho@inf.ufpel.edu.br](mailto:cscbotelho@inf.ufpel.edu.br)

<sup>2</sup> Universidade Federal de Pelotas – [ugaramires@inf.ufpel.edu.br](mailto:ugaramires@inf.ufpel.edu.br)

<sup>3</sup> Universidade Federal de Pelotas – [reiser@inf.ufpel.edu.br](mailto:reiser@inf.ufpel.edu.br)

### 1. INTRODUÇÃO

A computação quântica (CQ) e a lógica fuzzy (LF) são duas áreas de pesquisa que têm ganhado destaque em seus respectivos campos, por modelarem soluções para problemas complexos, envolvendo incerteza e imprecisão. Enquanto a CQ se baseia na teoria da mecânica quântica para representar dados com propriedades relevantes (superposição e emaranhamento) e processar informações de forma paralela e exponencialmente mais rápida, a LF busca representar conceitos imprecisos via manipulação de conjuntos fuzzy conforme (Zadeh, 1975).

A CQ utiliza qubits, unidades básicas de informação quântica, que podem estar em estados de superposição e emaranhados, permitindo que múltiplas computações e operações de medida sejam realizadas simultaneamente de acordo com (Nielsen & Chuang, 2000).

Já a LF mapeia a incerteza e a imprecisão para conjuntos lógicos, permitindo a representação de conceitos que não são facilmente quantificáveis em valores binários. Em vez de considerar apenas os estados "verdadeiro" ou "falso", a lógica fuzzy trabalha com graus de pertinência, o que possibilita a modelagem de incerteza e a tomada de decisões em situações onde haja grande hesitação de especialistas e/ou ambiguidade na expressão da linguagem natural.

Neste trabalho, de caráter inovativo, exploramos a biblioteca Qiskit da IBM como uma ferramenta central para simulações da intensidade de emoções usando algoritmos quânticos. O Qiskit [IBM 2023] nos permite investigar como os circuitos quânticos podem ser aplicados para modelar e analisar situações do mundo real, considerando a incerteza e a imprecisão inerentes a essas situações.

Como parte deste estudo, modelamos um estudo de caso específico no qual foram construídos dois circuitos quânticos distintos. No primeiro caso, as primeiras entradas utilizaram portas controladas que não possuíam sobreposição de estados, representando um cenário de estados clássicos para o problema do policial e prisioneiros. Em contraste, no segundo caso, geramos sobreposições e emaranhamento entre os qubits para simular um ambiente quântico neste contexto. E, na sequência, comparamos os resultados obtidos nos dois casos, analisando a diferença de desempenho e a capacidade dos circuitos quânticos em lidar com a incerteza e a complexidade dos problemas modelados. Por fim, realizamos uma análise dos histogramas gerados via simulação dos circuitos quânticos, identificando padrões e insights para as distribuições de probabilidade.

### 2. METODOLOGIA

O objetivo central deste estudo é analisar o dilema da teoria dos jogos conhecido como "Dois Policiais e um Prisioneiro" (PP-P) reportado por Nowak e May (1993), usando uma abordagem multidisciplinar que envolve teoria dos jogos, lógica fuzzy e computação quântica. Para realizar uma análise abrangente, foram construídos dois modelos: um baseado na teoria dos jogos clássica e o outro um

circuito quântico utilizando a interface gráfica do Qiskit, descrevendo as interações para o modelo PP-P.

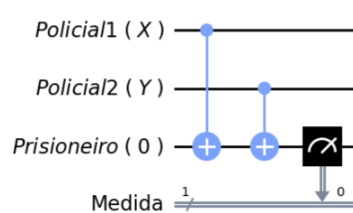
O circuito quântico foi projetado evolução temporal indicando quatro unidades de tempo e complexidade espacial com sobreposição de três qubits. Um desses qubits atua como um qubit de controle e é onde ocorre a operação de medida. A partir desta modelagem, conduzimos uma análise dos possíveis estados de entrada e suas respectivas dinâmicas. Esta análise foi informada e estendida a partir de pesquisas anteriores (Raghuvanshi & Perkowski, 2010). e também considerou diferentes cenários emocionais para os policiais. No modelo quântico, adicionamos uma camada de complexidade através da introdução dos conceitos de sobreposição quântica e emaranhamento. Para calcular as probabilidades de cada estado possível, foram empregadas medidas tanto no modelo clássico quanto no quântico. No caso deste último, particular atenção foi dada aos estados emaranhados devido às suas propriedades especiais. Vale ressaltar que nossos modelos foram construídos sob certas suposições, como estados emocionais iniciais fixos para os policiais.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

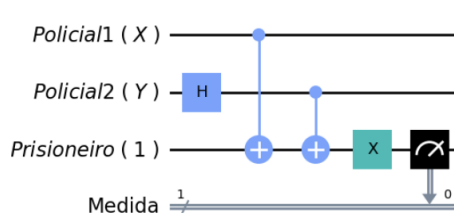
Neste estudo, prosseguimos com a modelagem e interpretação da interação entre os agentes, estendendo os resultados apresentados em (Raghuvanshi & Perkowski, 2010). A primeira modelagem é visualmente representada na **Figura 1**, que exibe o circuito gerado através da interface gráfica do Qiskit. Este circuito serve como um modelo fundamental para entender as complexas interações entre os agentes, representados por qubits (qubit - unidade de informação quântica).

E, a evolução temporal descrita em quatro unidades de tempo precede a execução da operação de medida em ambos os circuitos, veja nas **Figuras 1 e 2**.

A complexidade espacial é igual a 03 qubits sendo que no último qubit ocorre a operação de medida. Analisando o comportamento das possíveis interações, os estados estão descritos na **Tabela 1**.



**Figura 1**



**Figura 2**

**Tabela 1. Evolução temporal do comportamento dos policiais e prisioneiro**

	$S_0$	$S_1$	$S_2$	Interpretação do Comportamento
1	$ 100\rangle$	$ 100\rangle$	$ 101\rangle$	$p=1, S_f =  101\rangle$ Prisioneiro colabora
2	$ 110\rangle$	$ 111\rangle$	$ 110\rangle$	$p=1, S_f =  110\rangle$ Prisioneiro não colabora
3	$ 010\rangle$	$ 011\rangle$	$ 011\rangle$	$p=1, S_f =  011\rangle$ Prisioneiro colabora
4	$ 000\rangle$	$ 000\rangle$	$ 000\rangle$	$p=1, S_f =  000\rangle$ Prisioneiro não colabora

Desta análise, conclui-se que o prisioneiro colabora sempre que o humor dos policiais difere. Se ambos policiais são muito amigáveis ou se ambos estão muito irritados, não ocorre a colaboração.

Em relação às medidas do terceiro qubit, observam-se quatro cenários:

- A medida do terceiro qubit em estado  $|1\rangle$  retorna o estado final  $S_F=|101\rangle$ , com uma probabilidade  $p=1$  (100%) de que o prisioneiro colabore. Isso ocorre porque os dois primeiros qubits têm valores não-coincidentes.
- A medida do terceiro qubit em estado  $|0\rangle$  retorna o estado final  $S_F=|110\rangle$ , com uma probabilidade  $p=1$  (100%) de que o prisioneiro não colabora. Isso ocorre porque os dois primeiros qubits têm valores coincidentes em  $|1\rangle$ .
- A medida do terceiro qubit em estado  $|1\rangle$  retorna o estado final  $S_F=|011\rangle$ , com uma probabilidade  $p=1$  (100%) de que o prisioneiro não colabora. Isso ocorre porque os dois primeiros qubits têm valores coincidentes em  $|0\rangle$ .
- A medida do terceiro qubit em estado  $|0\rangle$  retorna o estado final  $S_F=|000\rangle$ , com uma probabilidade  $p=1$  (100%) de que o prisioneiro não colabora. Isso ocorre porque os dois primeiros qubits têm valores coincidentes em  $|0\rangle$ .

Além disso, sempre que o terceiro registrador muda do estado  $|0\rangle$  para o estado  $|1\rangle$ , observamos a colaboração do prisioneiro. Isso ocorre porque os policiais têm comportamentos contrários em relação à variável "irritação".

Tabela 2. Evolução temporal do comportamento dos agentes

N	S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>
1	$ 011\rangle$	$\frac{\sqrt{2}}{2}( 011\rangle +  001\rangle)$	$\frac{\sqrt{2}}{2}( 010\rangle +  001\rangle)$	$\frac{\sqrt{2}}{2}( 010\rangle +  001\rangle)$	$\frac{\sqrt{2}}{2}( 011\rangle +  000\rangle)$
2	$ 111\rangle$	$\frac{\sqrt{2}}{2}( 111\rangle +  101\rangle)$	$\frac{\sqrt{2}}{2}( 010\rangle +  101\rangle)$	$\frac{\sqrt{2}}{2}( 010\rangle +  100\rangle)$	$\frac{\sqrt{2}}{2}( 011\rangle +  101\rangle)$
3	$ 101\rangle$	$\frac{\sqrt{2}}{2}( 101\rangle +  111\rangle)$	$\frac{\sqrt{2}}{2}( 101\rangle +  110\rangle)$	$\frac{\sqrt{2}}{2}( 100\rangle +  111\rangle)$	$\frac{\sqrt{2}}{2}( 101\rangle +  110\rangle)$
4	$ 001\rangle$	$\frac{\sqrt{2}}{2}( 001\rangle +  011\rangle)$	$\frac{\sqrt{2}}{2}( 001\rangle +  010\rangle)$	$\frac{\sqrt{2}}{2}( 001\rangle +  010\rangle)$	$\frac{\sqrt{2}}{2}( 000\rangle +  011\rangle)$

No próximo circuito, apresentado na Figura 2, tem-se uma sobreposição aplicada ao segundo qubit, interpretando um estado fuzzy para um dos policiais. Ou seja, para o policial (X) tem-se os seguintes graus de pertinência  $f_A(x)=0.5$  e  $f_B(x)=0.5$ .

Neste contexto, para a variável de entrada "irritação", A é o conjunto fuzzy que modela o termo linguístico "menos" irritação e B é o conjunto fuzzy que modela o termo linguístico "mais" irritação. Assim, reinterpretemos o comportamento de aceitação (colaboração) pelo prisioneiro representado sempre pelo terceiro registrador em  $|1\rangle$ . A **Tabela 2** apresenta um resumo da evolução dos estados neste segundo circuito. Ao analisar os resultados na quarta coluna, temos:

- A medida do estado  $\frac{\sqrt{2}}{2}(|011\rangle + |000\rangle)$ , no terceiro qubit em estado  $|1\rangle$ , resulta no estado  $|011\rangle$  com probabilidade de 50%. Isso modela o comportamento de colaboração quando o humor dos policiais é contraditório. Se o terceiro qubit for medido em estado  $|0\rangle$ , o resultado é o estado  $|000\rangle$  com uma probabilidade de 50%, indicando a não colaboração do prisioneiro, pois ambos os policiais são amáveis (pouco irritados).
- A medida do estado  $\frac{\sqrt{2}}{2}(|011\rangle + |101\rangle)$ , no terceiro qubit em estado  $|1\rangle$ , resulta no mesmo estado com uma probabilidade de 100%. Isso modela a colaboração quando o humor dos policiais é contraditório em ambos os estados básicos.
- A medida do estado  $\frac{\sqrt{2}}{2}(|101\rangle + |110\rangle)$ , no terceiro qubit em estado  $|1\rangle$ , resulta no estado  $|101\rangle$  com uma probabilidade de 50%. Isso modela o comportamento de colaboração pois o humor dos policiais é contraditório. Se o terceiro qubit for medido em estado  $|0\rangle$ , o resultado é o estado  $|100\rangle$ .

com uma probabilidade de 50%, para colaboração do prisioneiro, pois os policiais têm humor contraditório.

- A medida do estado  $\frac{\sqrt{2}}{2} (|000\rangle + |011\rangle)$ , no terceiro qubit em estado  $|1\rangle$ , resulta no estado  $|011\rangle$  com uma probabilidade de 50%. Isso modela o comportamento de colaboração do prisioneiro quando o humor dos policiais é contraditório. Se o terceiro qubit for medido em estado  $|0\rangle$ , o resultado é o estado  $|000\rangle$  com uma probabilidade de 50%, para não colaboração do prisioneiro, pois ambos os policiais estão muito irritados.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste estudo, exploramos e contrastamos cenários clássicos e quânticos utilizando a biblioteca IBM Qiskit. Em um primeiro momento, focamos em um ambiente clássico, usando portas controladas que não induziram sobreposição de estados. Posteriormente, adentrarmos no universo da mecânica quântica, gerando sobreposições e emaranhamentos nos qubits para simular cenários mais complexos. Os histogramas gerados serviram como uma ferramenta visual eficaz para comparar os dois cenários, revelando que a computação quântica oferece uma dispersão mais ampla de probabilidades, graças à superposição e ao emaranhamento de estados.

Esta pesquisa destacou as nuances e as complexidades adicionais introduzidas pela computação quântica em comparação com a abordagem clássica. Ficou evidente que a mecânica quântica permite modelagens mais ricas e diversificadas, o que nos encoraja a seguir explorando novas formas de análise e interpretação. Especificamente, vemos um potencial significativo em combinar a computação quântica com outros domínios, como a lógica fuzzy, para desenvolver sistemas híbridos mais avançados. Um exemplo seria a aplicação desses princípios em robótica emocional, abrindo portas para futuras investigações e contribuições em sistemas que integrem essas duas grandes áreas do conhecimento.

**Agradecimentos:** Financiamento parcial das agências: 1. FAPERGS/CNPq Processo 23/2551-0000126-8, Ed.07/2022; 2. FAPERGS PqG Processo 21/2551 0002057-1 3.CNPq/MCTI/SEMPI Processo 409696/2022-6 Ed. 26/2022

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

RAGHUVANSHI, A. and Perkowski, M. (2010). **Fuzzy quantum circuits to model emotional behaviors of humanoid robots**. In: IEEE Congress on Evolutionary Computation, pages 1–8.

ZADEH, L. A. (1975). **The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning I**. Information Sciences, 8:199–250.

NIELSEN, M. A. and Chuang, I. L. (2000). **Quantum Computation and Quantum Information**. Cambridge University Press.

IBM(2023). **Qiskit**. Disponível em: <https://qiskit.org/>. Acesso em: 3 de agosto 2023

NOWAK, M. A. and May, R. M. (1993). **The spatial dilemmas of evolution**. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 3(01): pages 35–78.