

Aplicando Gamificação para Interpretação do Algoritmo de Deutsch-Jozsa via Plataforma Quantum FlyTrap

Gabriel Rosa¹, Vagner A. Seibert¹, Rafael R. Bastos¹, Helida Santos², Giancarlo Lucca³, Adenauer Yamin¹, Renata Reiser¹, Anderson Cruz⁴

¹LUPS – Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), Pelotas-RS, Brasil

{grosilva, rrbastos, vaseibert, reiser, adenauer}@inf.ufpel.edu.br

²C3 – Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande-RS, Brasil

helida@furg.br

³PGEEC – Universidade Católica de Pelotas (UCPEL), Pelotas-RS, Brasil

giancarlo.lucca@ucpel.edu.br

⁴IMD – Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal-RN, Brasil

anderson@imd.ufrn.br

Abstract. *The fundamentals of quantum computing are relevant to new technological developments, but its complex abstractions make it difficult to study and understand the algorithms in this field. In this sense, to consider the theoretical description, we seek gamification through virtual games supported by current platforms. Precisely, we use the online game Quantum FlyTrap to playfully introduce the Deutsch-Jozsa problem for the classification of Boolean functions.*

Resumo. *Os fundamentos da computação quântica são relevantes para novos desenvolvimentos tecnológicos, mas suas complexas abstrações dificultam o estudo e entendimento de algoritmos da área. Neste sentido, para considerar a descrição teórica, buscamos a gamificação via jogos virtuais com suporte em plataformas atuais. Precisamente, utilizamos jogo online Quantum FlyTrap para apresentar de forma lúdica o problema Deutsch-Jozsa para classificação de funções booleanas.*

1. Introdução

A computação quântica (CQ) é uma área que baseia-se em conceitos da física quântica, possibilitando solucionar alguns cálculos/problemas complexos de maneira mais rápida e eficaz que a computação clássica. Na CQ temos como unidade base de informação os qubits, os quais diferentemente dos bits clássicos, conseguem assumir os valores binários de 0 ou 1 simultaneamente [Sigov et al. 2022]. Através dessa definição, é possível aumentar o desempenho das operações via paralelismo, tendo em vista que podemos ter vários valores diferentes aplicados a alguma função ao mesmo tempo. Porém, um custo de maior complexidade espacial é exigido ao adicionar novos qubits [Lu et al. 2023].

Hoje em dia, a computação quântica obteve grandes avanços adentrando em diversas áreas, inclusive interligando-a com outras áreas, como por exemplo com a lógica

fuzzy [Pourabdollah et al. 2021]. Essa exploração de novos nichos inspira novas pesquisas a fim de entender essa abordagem inovadora, e pensar sua utilização em áreas de interesse. Sendo assim, demonstra-se necessária a busca por formas intuitivas para facilitar a compreensão dos complexos fundamentos da mecânica quântica.

Tendo em vista o ensino da CQ a outras pessoas, de maneira prática e atrativa, uma abordagem que tem avançado consideravelmente é a gamificação [Nadi-Ravandi and Batooli 2022]. Dentre as inúmeras estratégias de gamificação, a mais disseminada é o uso de medalhas de conquista [Hakulinen et al. 2013]. Apesar de geralmente não possuírem um valor, as medalhas criam um senso de recompensa, que traz uma sensação de satisfação pelo progresso adquirido [Kim and Castelli 2021].

Nessa linha, este artigo traz um mecanismo para a gamificação do estudo da computação quântica, focando na demonstração do algoritmo de Deutsch-Jozsa [Deutsch and Jozsa 1992], através do jogo Quantum FlyTrap¹. Neste jogo, utilizamos a seção do Virtual Lab em que é possível construir e observar, de maneira lúdica, importantes algoritmos e circuitos da computação quântica, como o de Deutsch-Jozsa.

O artigo foi dividido da seguinte forma. Primeiramente uma introdução aos conceitos da CQ são encontrados na Seção 2, incluindo o aprofundamento do conceito abordado no algoritmo de Deutsch-Jozsa, a superposição de estados básicos. Na Seção 3 é apresentado o problema de Deutsch, juntamente com a descrição do funcionamento do algoritmo de Deutsch-Jozsa. Na Seção 4, temos a apresentação da plataforma utilizada em conjunto com a simulação do algoritmo. Por fim, a última seção apresenta as considerações finais e uma breve discussão acerca dos trabalhos futuros.

2. Preliminares em Computação Quântica

A unidade de informação quântica, o qubit, representa a superposição de estados básicos e pode ser matematicamente descrita por uma combinação linear de estados básicos [Anton and Rorres 2002]. Estes, por sua vez, são descritos como vetores linearmente independentes, mutuamente ortogonais, normalizados e geradores do espaço vetorial complexo bidimensional $\mathcal{H}(\mathbb{C}^2)$. Na notação de Dirac [Dirac 1930] e na notação matricial, tem-se:

$$|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad e \quad |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

constituindo a base canônica do espaço de Hilbert, definido como um espaço vetorial complexo bidimensional. O estado genérico de um sistema quântico de um qubit (sistema quântico unidimensional) é representado pela expressão:

$$|\psi\rangle = \alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle, \quad (2)$$

indicando a superposição dos estados básicos $|0\rangle$ e $|1\rangle$, onde α_0 e α_1 são números complexos que denotam as respectivas amplitudes e satisfazem a condição de normalização: $\sum_{i \in \{0,1\}} |\alpha_i|^2 = |\alpha_0|^2 + |\alpha_1|^2 = 1$. Assim, a Equação (2) pode ser descrita pela expressão: $|\psi\rangle = \cos \frac{\theta}{2} |0\rangle + e^{i\phi} \sin \frac{\theta}{2} |1\rangle$, ($0 \leq \theta < \pi$, $0 \leq \phi < 2\pi$).

Em 1935, Einstein, Podolsky e Rosen fazem uma observação importante sobre os estados emaranhados da teoria quântica. Eles mostraram que a MQ prevê

¹Disponível em: <https://quantumflytrap.com>

que: se duas partículas interagem e, em seguida, são separadas, então a medição de uma das partículas determina os valores os quais as propriedades (como o momento e a posição) da outra partícula devam assumir [Einstein et al. 1935]. Este fato ocorre mesmo quando as partículas são separadas espacialmente ou não estão interagindo no momento da medição [Steeb and Hardy 2004]. Os estados emaranhados (que não podem ser fatorados pelo produto tensorial) desempenham um papel relevante na CQ e na informação quântica. Dentre os exemplos, tem-se o teletransporte e a codificação densa [Nielsen and Knill 1998], [Preskill 2002] e [McMahon 2000].

Considere a configuração do sistema de 2 qubits $|\psi\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2} (|00\rangle + |11\rangle)$. Quando a operação de medida é aplicada sobre o primeiro qubit, a função de onda colapsa em um dos dois possíveis estados $|00\rangle$ ou $|11\rangle$, com probabilidade $p = \frac{1}{2}$. Significa então que o valor do segundo qubit está determinado pelo resultado da medida do primeiro qubit, garantindo a existência de uma correlação entre os bits da base computacional.

Assim, a noção de emaranhamento é importante pois ilustra a influência de uma medida de forma singular para sistema quânticos. Ela também viabiliza a ocorrência da interferência na computação quântica, mostrando uma diferença fundamental entre computação probabilística e computação quântica.

Entretanto, o emaranhamento nem sempre pode ser visto desta forma [Steeb and Hardy 2004]. Observe, por exemplo, o caso onde o vetor de estado do sistema de dois qubits é dado pela expressão: $|\psi\rangle = \frac{1}{2} (|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle - |11\rangle)$. Nenhuma correlação pode ser encontrada quando executa-se a operação de medida sobre o primeiro qubit. As novas possíveis configurações para este sistema, após a medida do primeiro qubit, são dadas pelos vetores de estados: $|\psi_0\rangle = |0\rangle \otimes \frac{\sqrt{2}}{2} (|0\rangle + |1\rangle)$ e $|\psi_1\rangle = |1\rangle \otimes \frac{\sqrt{2}}{2} (|0\rangle - |1\rangle)$, ou seja, não se pode observar correlação entre os bits.

3. Algoritmo de Deutsch-Jozsa

O algoritmo de Deutsch-Jozsa reporta-se ao Problema de Deutsch [Deutsch 1985], sendo considerado nesta sessão, na sua forma mais simples. Ele corresponde à solução para o problema de observação de uma função binária $f: \{0, 1\} \rightarrow \{0, 1\}$. Neste caso, verificam-se quatro situações possíveis, classificadas em dois conjuntos de funções:

- **constantes**, onde $f(x)$ independe do valor Booleano atribuído ao argumento x ; e
- **balanceadas**, onde $f(x)$ assume valores diferentes, dependentes do valor de x .

Em um computador clássico, para a classificação de uma função como constante, $f(0) = f(1)$, ou balanceada, $f(0) \neq f(1)$, duas observações são necessárias, no mínimo. No entanto, em um computador quântico, o algoritmo de Deutsch-Jozsa mostra-se capaz de executar esta verificação apenas com uma única observação.

Salienta-se que o ganho computacional torna-se mais evidente quando se considera o algoritmo de Deutsch-Jozsa, o qual corresponde à generalização do algoritmo de Deutsch-Jozsa para funções Booleanas $f: \{0, 1\}^m \rightarrow \{0, 1\}^m$, neste caso considerando-se n qubits ($m = 2^n$) [Nielsen and Chuang 2003]. Neste contexto, um computador clássico necessita executar $(\frac{2^n}{2} + 1)$ vezes a função f , no pior caso, para obter a resposta. Em contrapartida, em um computador quântico, a solução é determinada após uma única execução da função f , quando aplica-se o algoritmo de Deutsch-Jozsa.

O algoritmo de Deutsch-Jozsa pode modelar, por exemplo, o sorteio via moeda que caracteriza-se pela seguinte questão: Como saber se determinada moeda é honesta ou viciada? Ou seja, se os lados da moeda são diferentes ou iguais, respectivamente. No caso clássico, a função f avalia os dois lados da moeda em duas observações, e no quântico, uma única avaliação simultânea é realizada.

3.1. Descrição do Operador U_f do Algoritmo de Deutsch-Jozsa

O objetivo do algoritmo de Deutsch-Jozsa é verificar se uma função desconhecida computa uma função constante ou balanceada. Ou seja, considera-se uma “caixa preta” ou “oráculo”, o qual computa uma função booleana $f: \{0, 1\} \rightarrow \{0, 1\}$ desconhecida.

Primeiro será contextualizado o problema clássico, logo após será definida a construção matricial de U_f na seção 3.2 e a apresentação da solução quântica, através de três etapas na seção 3.3. Na Tabela 1, veja o conjunto $\mathcal{F} = \{f_i\}_{i \in \{0,1,2,3\}}$ de configurações para a função f , incluindo a definição e correspondente classificação de cada f_i . Na abor-

Tabela 1. Classificação da função Booleana f

Configurações de f	$x = 0$	$x = 1$	Tipo de função	Definições de f
f_0	0	0	equilibrada	$f_0(x) = 0$ (constante zero)
f_1	0	1	balanceada	$f_1(x) = x$ (identidade)
f_2	1	0	balanceada	$f_2(x) = \neg x$ (negação Booleana)
f_3	1	1	equilibrada	$f_3(x) = 1$ (constante um)

dagem clássica, essa computação é equivalente a porta XOR , dada por $p XOR q = p \oplus q$, onde \oplus indica a operação “módulo 2”, cuja expansão é dada por:

$$\begin{aligned} XOR(0, 0) &= 0 & XOR(0, 1) &= 1 \\ XOR(1, 0) &= 1 & XOR(1, 1) &= 0 \end{aligned}$$

Este problema não tem solução clássica, em apenas uma execução da função f . A metodologia para se obter a configuração dos estados e processos quânticos que modelam o algoritmo de Deutsch-Jozsa propõe uma solução via execução única da função f .

3.2. Construção Matricial do Operador U_f

Na representação do domínio, consideramos um registrador quântico de 2 qubits, indicado por $\alpha|00\rangle + \beta|01\rangle + \gamma|10\rangle + \delta|11\rangle$, sendo a expressão da base dada pelos vetores:

$$|00\rangle = (1000)^t \quad |01\rangle = (0100)^t \quad |10\rangle = (0010)^t \quad |11\rangle = (0001)^t \quad (3)$$

Dado o operador Booleano $f: \{0, 1\} \rightarrow \{0, 1\}$, busca-se modelar a execução simultânea do operador $XOR(f(0), f(1))$. Na definição do operador unitário U_f que implementa f , consideramos a transformação dos estados básicos dada por:

$$\begin{aligned} |00\rangle \rightarrow U(|00\rangle) &= |0, f(0)\rangle & |01\rangle \rightarrow U(|01\rangle) &= |0, \neg f(0)\rangle \\ |10\rangle \rightarrow U(|10\rangle) &= |1, f(1)\rangle & |11\rangle \rightarrow U(|11\rangle) &= |1, \neg f(1)\rangle \end{aligned} \quad (4)$$

As funções $f_0, f_1: \mathcal{F} \rightarrow \{0, 1\}$ são definidas por:

$$f_0 = \begin{cases} 1, & \text{se } f_i(0) = 1, \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases} \quad f_1 = \begin{cases} 1, & \text{se } f_i(1) = 1, \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (5)$$

Aplicando as funções definidas pelas expressões na Eq. (5), temos os seguintes vetores:

$$\begin{pmatrix} (1-f_0) & f_0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^t = \begin{cases} U(|00\rangle) = |00\rangle \text{ se } f_0 = 0; \\ U(|00\rangle) = |01\rangle \text{ se } f_0 = 1. \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} f_0 & (1-f_0) & 0 & 0 \end{pmatrix}^t = \begin{cases} U(|01\rangle) = |01\rangle \text{ se } f_0 = 0; \\ U(|01\rangle) = |00\rangle \text{ se } f_0 = 1. \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & (1-f_1) & f_1 \end{pmatrix}^t = \begin{cases} U(|10\rangle) = |10\rangle \text{ se } f_1 = 0; \\ U(|10\rangle) = |11\rangle \text{ se } f_1 = 1. \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & f_1 & (1-f_1) \end{pmatrix}^t = \begin{cases} U(|11\rangle) = |11\rangle \text{ se } f_1 = 0; \\ U(|11\rangle) = |10\rangle \text{ se } f_1 = 1. \end{cases} \quad (9)$$

Salienta-se que é fácil verificar que cada vetor nas expressões das Equações (6)–(9) satisfazem as condições de ortonormalidade. Portanto, todas as possibilidades para a evolução do sistema correspondente ao operador U_f estão expressas na notação matricial:

$$U_f = \begin{pmatrix} (1-f_0) & f_0 & 0 & 0 \\ f_0 & (1-f_0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (1-f_1) & f_1 \\ 0 & 0 & f_1 & (1-f_1) \end{pmatrix} \quad (10)$$

E, o operador U_f , definido pela Equação (10), é um operador unitário.

3.3. Execução do Algoritmo de Deutsch-Jozsa

Na resolução do problema, usando o algoritmo de Deutsch, utiliza-se a seguinte sequência de quatro passos, supondo a inicialização do sistema físico pelo estado quântico $|0\rangle \otimes |1\rangle$.

$$\mathbf{1^\circ \text{ Passo}} \text{ Aplica-se } H^2 \text{ em } |\Psi_0\rangle: \Psi_1 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

A fatoração do estado $|\Psi_1\rangle$, descrita na notação de Dirac, resulta em:

$$|\Psi_1\rangle = \frac{1}{2}(|00\rangle - |01\rangle + |10\rangle - |11\rangle) = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \right) \left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle) \right) \quad (11)$$

$\mathbf{2^\circ \text{ Passo}}$ Aplica-se a matriz U_f ao estado $|\Psi_1\rangle$.

$$\Psi_2 = \begin{pmatrix} (1-f_0) & f_0 & 0 & 0 \\ f_0 & (1-f_0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (1-f_1) & f_1 \\ 0 & 0 & f_1 & (1-f_1) \end{pmatrix} \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} - f_0 \\ -\frac{1}{2} + f_0 \\ \frac{1}{2} - f_1 \\ -\frac{1}{2} + f_1 \end{pmatrix}$$

Logo $|\Psi_2\rangle$ depende tanto de f_0 como de f_1 , nas mesmas proporções e, resulta em:

$$|\Psi_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|0\rangle + \frac{1-2f_1}{1-2f_0} |1\rangle \right) \left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle) \right) \quad (12)$$

$\mathbf{3^\circ \text{ Passo}}$ Aplica-se $H \otimes I$ ao estado $|\Psi_2\rangle$.

$$\Psi_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{2} - f_0 \\ -\frac{1}{2} + f_0 \\ \frac{1}{2} - f_1 \\ -\frac{1}{2} + f_1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 - f_0 - f_1 \\ -1 + f_0 + f_1 \\ -f_0 + f_1 \\ f_0 - f_1 \end{pmatrix}.$$

E, obtém-se: $|\Psi_3\rangle = [(1 - f_0 - f_1)|0\rangle + (-f_0 + f_1)|1\rangle] \otimes \left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)\right)$. Uma observação dos estados $|\Psi_1\rangle$, $|\Psi_2\rangle$ e $|\Psi_3\rangle$ mostra que o valor do coeficiente do 2º qubit permanece inalterado, apesar das transformações executadas.

4º Passo Na execução da operação de medida, sobre o primeiro qubit, obtém-se:

(4.1) saída “0” com probabilidade $p_0 = (1 - f_0 - f_1)^2$, e estado $\left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - |01\rangle)\right)$;

(4.2) saída “1” com probabilidade $p_1 = (-f_0 + f_1)^2$, e estado $\left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|10\rangle - |11\rangle)\right)$.

Veja, na Figura 1, o comportamento do algoritmo, incluindo a evolução nos estados do algoritmo de Deutsch ($|\Psi_0\rangle$, $|\Psi_1\rangle$, $|\Psi_2\rangle$, $|\Psi_3\rangle$) graficamente descrito no modelo de circuitos.

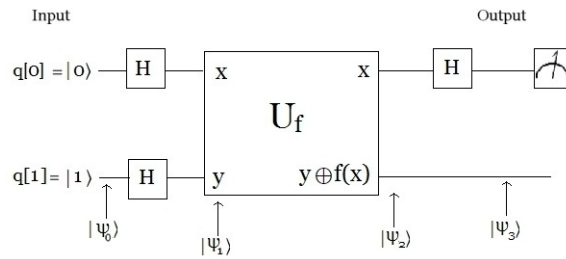


Figura 1. Circuito quântico para o algoritmo Deutsch-Jozsa.

Para cada um dos resultados descritos acima, tem-se uma avaliação para a função f de acordo com a expressão abaixo:

$$\begin{cases} f_0 = f_1 \rightarrow p_0 = 1 \text{ e } p_1 = 0 \rightarrow \text{saída 0 significa que } f \text{ é constante;} \\ f_0 \neq f_1 \rightarrow p_0 = 0 \text{ e } p_1 = 1 \rightarrow \text{saída 1 significa que } f \text{ é balanceada.} \end{cases} \quad (13)$$

A expressão algébrica para o operador U_f é também obtida por casos, considerando todas as configurações $f_i \in \mathcal{F}$, como visto na expressão a seguir:

$$U_f : |a, b\rangle \longrightarrow |a, b \oplus f(a)\rangle = \begin{cases} |a, b \oplus 0\rangle & \text{se } f = f_0 \\ |a, b \oplus a\rangle & \text{se } f = f_1 \\ |a, b \oplus \neg a\rangle & \text{se } f = f_2 \\ |a, b \oplus 1\rangle & \text{se } f = f_3. \end{cases} \quad (14)$$

A matriz correspondente a cada função está na Tabela 2.

Tabela 2. Representações para o operador U_f via função Booleana f

Configurações f	f_0	f_1	f_2	f_3
Exp. Algébrica f	$f_0(x) = 0$	$f_1(x) = x$	$f_2(x) = \neg x$	$f_3(x) = 1$
Exp. Dirac U_f	$ a, b \oplus 0\rangle$	$ a, b \oplus a\rangle$	$ a, b \oplus \neg a\rangle$	$ a, b \oplus 1\rangle$
Exp. Matricial U_f	$U_{f_0} = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix}$	$U_{f_1} = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & X \end{pmatrix}$	$U_{f_2} = \begin{pmatrix} X & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix}$	$U_{f_3} = \begin{pmatrix} X & I \\ I & X \end{pmatrix}$

4. Simulação via Plataforma Quantum FlyTrap

De acordo com a descrição do algoritmo de Deutsch-Jozsa, considera-se uma simulação para a interpretação do funcionamento e semântica do algoritmo. Neste trabalho, foca-se no simulador quântico da IBM, o *IBM Quantum Experience*², para descrever, criar e simular circuitos quânticos. Para demonstrar o funcionamento do algoritmo de Deutsch-Jozsa, utilizamos o jogo de simulação de circuitos quânticos denominado *Quantum FlyTrap*.

O *Quantum FlyTrap* é um *webgame*, composto por 33 fases que abordam os conceitos básicos da mecânica quântica, como a interferência e emaranhamento via polarização de cargas e variação de fases [Sigov et al. 2022]. Cada fase dispõe de elementos que podem ser movimentados e/ou rotacionados em uma grade de 13×10 quadrados. O objetivo de todas as fases é disparar 20 fótons até um detector de fótons, que é representado pelos *PAC-MAN*'s. Todos os componentes que aparecem nas fases são componentes reais utilizados nas construções de circuitos quânticos, como moduladores de fases ou divisores de feixes, polarizadores e não polarizadores. O jogo disponibiliza uma seção chamada VIRTUAL LAB, apresentando os componentes de todas as fases do jogo em conjunto, incluindo alguns extras, tais como portas quânticas, para criar seus próprios circuitos quânticos ou testar circuitos importantes para a comunidade.

A simulação considerou todas as possíveis entradas do algoritmo, para todas as configurações de portas U_f . Nas Figuras 2 e 3 temos a representação do caminho que os fótons irão percorrer por todo o circuito, sendo demonstrado através da linha pontilhada que tem como começo o triângulo posicionado na parte mais esquerda das imagens.

Nas imagens, o triângulo é o gerador de um único fóton. Os dois retângulos que não têm a representação de um reflexo são divisores de feixe não polarizadores. Já os dois retângulos mais escurecidos com a representação de reflexo são espelhos reflexores. Os dois quadrados no meio do circuito são os moduladores de fases que são controlados pelos valores das funções f_0 e f_1 , posicionadas na parte de cima do circuitos, e descritas na Seção 3, com valores de $\frac{\lambda}{2}$ ou 0.

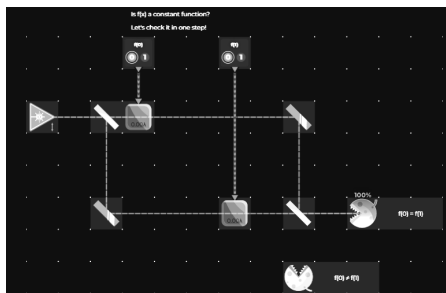


Figura 2. Caminho da Função Constante

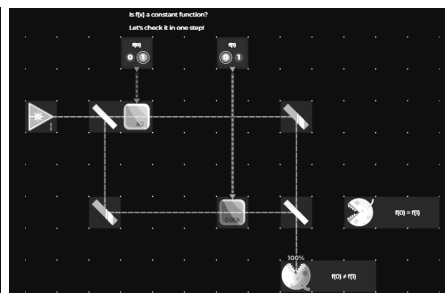


Figura 3. Caminho da Função Balanceada

Na sequência, temos a apresentação de uma partícula percorrendo todo o circuito, sendo as imagens das Figuras 4,5 e 6 com a função constante, e as imagens das Figuras 7, 8 e 9 com a função balanceada.

²Disponível em: <https://quantum-computing.ibm.com/>

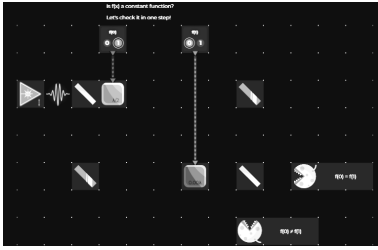


Figura 4. Primeira fase Ψ_0

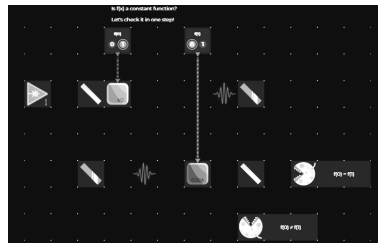


Figura 5. Segunda e terceira fases Ψ_1 e Ψ_2

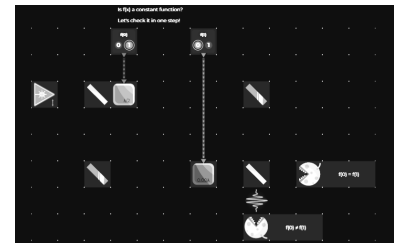


Figura 6. Quarta fase Ψ_3

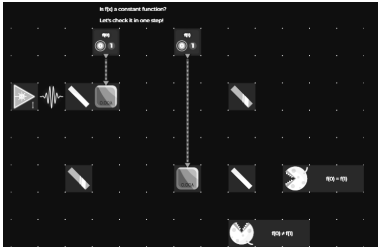


Figura 7. Primeira fase Ψ_0

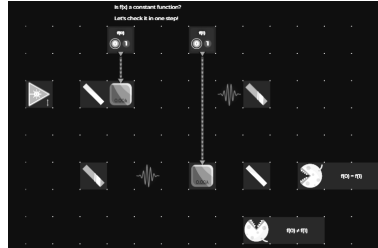


Figura 8. Segunda e terceira fases Ψ_1 e Ψ_2

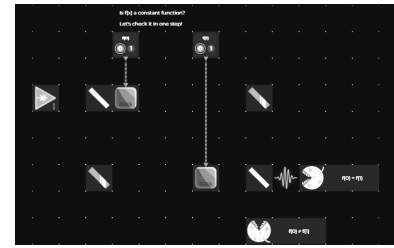


Figura 9. Quarta fase Ψ_3

Figura 10. Simulação do Algoritmo de Deutsch-Jozsa com dois resultados: Balanceada e Constante.

5. Conclusão

Neste trabalho, é notável como, apesar dos avanços e disseminação da computação quântica a outros setores, existe o grande desafio de ensinar seus conteúdos e fundamentos básicos para novos ingressantes nesta área de estudo. Assim, o uso de estratégias lúdicas, pode amenizar este desafio. O Quantum FlyTrap mostrou-se uma ferramenta interessante considerando essa problemática, pois alia os conceitos e funcionalidades da gamificação no ensino de parte deste conteúdo de alta complexidade. Destacou-se o uso do jogo demonstrando de forma lúdica e eficaz o funcionamento do algoritmo de Deutsch-Jozsa. Este algoritmo colabora com o conhecimento da classe de funções, viabilizando uma interpretação do comportamento da imagem destas funções, sem prévio computação de seus valores. Assim, reforça-se como a gamificação pode auxiliar no entendimento de conceitos complexos inerentes à CQ, além de trazer uma nova forma de entender a modelagem dos circuitos quânticos e do funcionamento de seus componentes.

Trabalhos futuros consideram a utilização desse jogo e seus componentes para modelar circuitos quânticos descritos em outras ferramentas, como o *IBM Quantum Experience*, trazendo assim uma visualização mais dinâmica de seu funcionamento. Outro aspecto possível de ser explorado é a implementação de outros algoritmos quânticos na ferramenta de VIRTUAL LAB do jogo, como por exemplo o algoritmo de Shor[Shor 1997].

Agradecimentos

Os autores agradecem as seguintes agências de fomento: CAPES, CNPq (309160/2019-7; 311429/2020-3, 3305805/2021-5, 150160/2023-2), PqG/FAPERGS (21/2551-0002057-1) e FAPERGS/CNPq (23/2551-0000126-8), PRONEX (16/2551-0000488-9).

Referências

[Anton and Rorres 2002] Anton, H. and Rorres, C. (2002). *Álgebra Linear com Aplicações*. Bookmann.

- [Deutsch 1985] Deutsch (1985). Quantum theory, the church-turing principle and the universal quantum computer. *PRSLA: Proc. R. Soc. Lond. A*, 400:97–117.
- [Deutsch and Jozsa 1992] Deutsch, D. and Jozsa, R. (1992). Rapid solution of problems by quantum computation. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 439(1907):553–558.
- [Dirac 1930] Dirac, P. A. M. (1930). *The Principles of Quantum Mechanics*. Clarendon Press, Oxford,.
- [Einstein et al. 1935] Einstein, A., Podolsky, B., and Rosen, N. (1935). Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical review*, 47(10):777.
- [Hakulinen et al. 2013] Hakulinen, L., Auvinen, T., and Korhonen, A. (2013). Empirical study on the effect of achievement badges in trakla2 online learning environment. In *2013 Learning and Teaching in Computing and Engineering*, pages 47–54.
- [Kim and Castelli 2021] Kim, J. and Castelli, D. M. (2021). Effects of gamification on behavioral change in education: A meta-analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(7):3550.
- [Lu et al. 2023] Lu, Y., Sigov, A., Ratkin, L., Ivanov, L. A., and Zuo, M. (2023). Quantum computing and industrial information integration: A review. *Journal of Industrial Information Integration*, page 100511.
- [McMahon 2000] McMahon, D. (2000). *Quantum Mechanics Demystified*. McGraw Hill, Cambridge University Press.
- [Nadi-Ravandi and Batooli 2022] Nadi-Ravandi, S. and Batooli, Z. (2022). Gamification in education: A scientometric, content and co-occurrence analysis of systematic review and meta-analysis articles. *Education and Information Technologies*, 27(7):10207–10238.
- [Nielsen and Knill 1998] Nielsen, M. and Knill, E. (1998). Complete quantum teleportation by nuclear magnetic resonance. (disponível via WWW em citeseer.ist.psu.edu/595490.html).
- [Nielsen and Chuang 2003] Nielsen, M. A. and Chuang, I. L. (2003). *Computação Quântica e Informação Quântica*. Bookman.
- [Pourabdollah et al. 2021] Pourabdollah, A., Acampora, G., and Schiattarella, R. (2021). Fuzzy logic on quantum annealers. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 30(8):3389–3394.
- [Preskill 2002] Preskill, J. (2002). Lecture notes - course information for physics/computer science/quantum computation. Caltech Particle Theory Group - California Institute of Technology - USA.
- [Shor 1997] Shor, P. W. (1997). Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer. *SIAM Journal on Computing*.
- [Sigov et al. 2022] Sigov, A., Ratkin, L., and Ivanov, L. A. (2022). Quantum information technology. *Journal of Industrial Information Integration*, 28:100365.
- [Steeb and Hardy 2004] Steeb, W. H. and Hardy, Y. (2004). *Problems and solutions in Quantum Computing and Quantum Information*. World Scientific, New Jersey.