



UMA PROPOSTA DE SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA A COMPUTAÇÃO QUÂNTICA: USANDO O IBM-Q COMPOSE COMO RECURSO DIDÁTICO PARA PORTAS LÓGICAS, CIRCUITOS E ALGORITMO QUÂNTICO

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2022.3968

João Pedro Barbosa Albuquerque - joao.barbosa.albuquerque@itec.ufpa.br
Universidade Federal do Pará

Maria Lúcia de Moraes Costa - marialuccosta@gmail.com
Universidade Federal do Pará

WILSON RICARDO MATOS RABELO - rabelo@ufpa.br
Universidade Federal do Pará

Resumo: A utilização da plataforma da computação quântica em nuvem (quantum cloud) da empresa IBM, através de sua IDE, chamada de IBM-Q Compose, se tornou imprescindível para disciplinas e minicursos na área da computação quântica. O IBM-Q Compose é uma IDE de desenvolvimento que fornece além da simulação local, a conexão entre os usuários e os processadores quânticos, onde se deseja executar circuitos e algoritmos quânticos. Neste trabalho exploramos uma proposta de sequência didática via projetos como atividades a serem trabalhadas na disciplina de computação quântica para aplicação nas engenharias e/ou ciências básicas. O foco principal é abordar conceitos importantes, do ponto de vista pedagógico, da computação quântica utilizando a IDE IBM-Q Compose da plataforma IBM. Na primeira parte deste trabalho, revisamos rapidamente conceitos como qubits, portas lógicas, circuitos e algoritmo quântico. Na segunda parte, propomos uma sequência didática via projetos na IDE para alunos e/ou professores trabalharem conjuntamente os conceitos, tais como: (1) a preparação de estado quânticos, (2) portas quânticas e suas atuações no espaço estados de múltiplos qubits, (3) algoritmo quântico através do teleporte de estados quânticos, e por fim, (4) análise das leituras (medidas) sobre os qubits utilizando vários gráficos disponíveis na IDE da plataforma. Concluímos o nosso trabalho analisando a plataforma da IBM referente a vários aspectos, como: a instalação, as características e sua utilização por parte de alunos e/ou professores. O nosso trabalho demonstra que essa sequência didática pode ser útil para os professores que usando o IBM-Q Compose, poderá trabalhar com os alunos os conceitos abstratos da computação quântica em chips quânticos totalmente gratuitos.





Palavras-chave: Sequência Didática. IBM-Q Compose. IBM Q. Computação Quântica.



UMA PROPOSTA DE SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA A COMPUTAÇÃO QUÂNTICA: USANDO O IBM-Q COMPOSE COMO RECURSO DIDÁTICO PARA PORTAS LÓGICAS, CIRCUITOS E ALGORITMO QUÂNTICO

João Pedro Barbosa Albuquerque – joao.barbosa.albuquerque@itec.ufpa.br
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Elétrica
Rua Augusto Corrêa, 01 - Guamá
66075-110 – Belém – PA

Maria Lúcia M. Costa – luciacosta@ufpa.br
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Física
Rua Augusto Corrêa, 01 - Guamá
66075-110 – Belém – PA

Wilson R. M. Rabelo – rabelo@ufpa.br
Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia
Rua Augusto Corrêa, 01 - Guamá
66075-110 – Belém – PA

Resumo: A utilização da plataforma da computação quântica em nuvem (quantum cloud) da empresa IBM, através de sua IDE, chamada de IBM-Q Compose, se tornou imprescindível para disciplinas e minicursos na área da computação quântica. O IBM-Q Compose é uma IDE de desenvolvimento que fornece além da simulação local, a conexão entre os usuários e os processadores quânticos, onde se deseja executar circuitos e algoritmos quânticos. Neste trabalho exploramos uma proposta de sequência didática via projetos como atividades a serem trabalhadas na disciplina de computação quântica para aplicação nas engenharias e/ou ciências básicas. O foco principal é abordar conceitos importantes, do ponto de vista pedagógico, da computação quântica utilizando a IDE IBM-Q Compose da plataforma IBM. Na primeira parte deste trabalho, revisamos rapidamente conceitos como qubits, portas lógicas, circuitos e algoritmo quântico. Na segunda parte, propomos uma sequência didática via projetos na IDE para alunos e/ou professores trabalharem conjuntamente os conceitos, tais como: (1) a preparação de estados quânticos, (2) portas quânticas e suas atuações no espaço estados de múltiplos qubits, (3) algoritmo quântico através do teleporte de estados quânticos, e por fim, (4) análise das leituras (medidas) sobre os qubits utilizando vários gráficos disponíveis na IDE da plataforma. Concluímos o nosso trabalho analisando a plataforma da IBM referente a vários aspectos, como: a instalação, as características e sua utilização por parte de alunos e/ou professores. O nosso trabalho demonstra que essa sequência didática pode ser útil para os professores que usando o IBM-Q Compose, poderá trabalhar com os alunos os conceitos abstratos da computação quântica em chips quânticos totalmente gratuitos.

Palavras-chave: Sequência Didática. IBM-Q Compose. IBM Q. Computação Quântica.

1 INTRODUÇÃO

No passado, a computação quântica chamava atenção por propor soluções teóricas para problemas considerados inviáveis com o uso de computadores convencionais. Entretanto, atualmente constatamos avanços consideráveis em direção a uma computação escalável, e assim, tornando-se uma realidade nos laboratórios de várias empresas de tecnologias. Paralelamente a esse crescimento do número de qubits nos chips quânticos, algumas empresas de tecnologia vêm demonstrando, para alguns problemas bem específicos, o que a literatura convencionou chamar de *vantagem quântica* (ARUTE e BABBUSH, et al, 2019).

Outro ponto que vem ganhando interesse é o serviço de computação quântica em nuvem (Quantum Computing Service) e, se tornando um recurso computacional cada vez mais utilizado pelas grandes empresas de tecnologias como a *Google Quantum AI* (Google, 2022), *Microsoft Azure Quantum* (Azure Quantum, 2022), *Amazon Braket / Amazon Quantum Solutions* (Amazon Braket, 2022), *D-Wave* (D-wave, 2022) e a *IBM-Q Experience* (IBM Q, 2022), para citar apenas algumas. Essas empresas fornecem um conjunto de chips quânticos que podem ser acessados remotamente via internet, também chamadas de quantum cloud, por empresas comerciais parceiras de diversas áreas. Dentre esses serviços de quantum cloud vamos destacar a plataforma da IBM (IBM Q, 2022), onde ela fornece um conjunto de chips quânticos gratuitos que podem ser acessados via nuvem para fins científicos, educacionais, além dos chips comerciais, que são pagos, voltados para as empresas. Portanto, gratuitamente podemos executar projetos educacionais e científicos nos processadores de 5-qubits da IBM, além dos servidores clássicos (computadores convencionais de alto desempenho) para simular circuitos quânticos.

Neste trabalho elaboramos uma proposta de sequência didática via projetos para a disciplina de computação quântica ministradas nas engenharias e/ou ciências básicas, por meio da aplicação de seus conceitos utilizando a IDE IBM-Q Compose da plataforma IBM (IBM Q, 2022). Na primeira parte deste trabalho, revisamos rapidamente conceitos como qubits, portas lógicas e circuitos quânticos e algoritmo quântico. Na segunda parte, propomos uma sequência didática via projetos na IDE para alunos e/ou professores trabalharem conceitos abstratos de computação quântica, tais como: (1) a preparação de estados quânticos, (2) portas quânticas e suas atuações no espaço estados de múltiplos qubits, (3) algoritmo quântico através do teleporte de estados quânticos, e por fim, (4) análise das leituras (medidas) sobre os qubits utilizando vários gráficos disponíveis na IDE da plataforma. Por fim, discutimos a nossa proposta de abordagem de conceitos da computação quântica via IDE e, finalizamos com as conclusões.

2 AMBIENTAÇÃO DOS CONCEITOS BÁSICOS

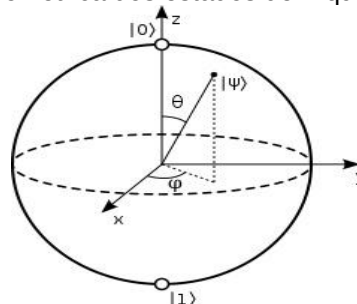
2.1 O quantum bit

A unidade básica na ciência da informação quântica é o quantum bit ou qubit. O qubit é a informação codificada nos estados quânticos de um sistema físico de 2-níveis NIELSEN e CHUANG, 2010). Matematicamente, os qubits são descritos por um vetor bidimensional arbitrário no espaço Hilbert complexo de dimensão finita. Para um dado sistema quântico escolhemos uma base vetorial padrão que são dois estados distinguíveis: $|0\rangle$ e $|1\rangle$ também conhecida como base padrão da computação quântica. Assim, um qubit pode ser escrito como uma superposição (combinação linear) de estados da base computacional e formam uma base ortonormal nesse espaço vetorial. Isto é, podemos escrever: $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ onde



α e β são as amplitudes de probabilidades dos respectivos estados da base, com $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. Uma visão geométrica do qubit é mapear os estados quânticos possíveis sobre a superfície de uma esfera de raio unitário. Isto é, mapeamos as amplitudes de probabilidades possíveis α e β em função dos ângulos θ e φ como: $|\psi\rangle = \cos\frac{\theta}{2} |0\rangle + e^{i\varphi} \sin\frac{\theta}{2} |1\rangle$, como observa-se na Figura 1.

Figura 1 – Representação geométrica dos estados de 1-qubit na Esfera de Bloch.



Fonte: Figura retirada de RABELO e COSTA, 2018.

2.2 Portas lógicas e circuitos quânticos

Na Tabela 1, listamos as principais portas lógicas de 1 e 2-qubits (NIELSEN e CHUANG, 2010). Nesta tabela colocamos suas denominações, as notações, as representações matriciais e sua atuação na base computacional padrão, respectivamente.

Tabela 1 – Lista de portas lógicas de 1 e 2-qubits (RABELO e COSTA, 2018).

	NOME	NOTAÇÃO	REPRESENTAÇÃO MATRICIAL	ATUAÇÃO NA BASE COMPUTACIONAL
Portas de 1-qbit	Identidade		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$ 0\rangle \rightarrow 0\rangle$ $ 1\rangle \rightarrow 1\rangle$
	Porta NOT		$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$ 0\rangle \rightarrow 1\rangle$ $ 1\rangle \rightarrow 0\rangle$
	Porta Y		$\begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}$	$ 0\rangle \rightarrow i 1\rangle$ $ 1\rangle \rightarrow -i 0\rangle$
	Porta Z		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$	$ 0\rangle \rightarrow 0\rangle$ $ 1\rangle \rightarrow - 1\rangle$
	Porta de Hadamard		$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$	$ 0\rangle \rightarrow \frac{ 0\rangle+ 1\rangle}{\sqrt{2}}$ $ 1\rangle \rightarrow \frac{ 0\rangle- 1\rangle}{\sqrt{2}}$
	Porta de fase		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}$	$ 0\rangle \rightarrow 0\rangle$ $ 1\rangle \rightarrow i 1\rangle$
			$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{bmatrix}$	$ 0\rangle \rightarrow 0\rangle$ $ 1\rangle \rightarrow -i 1\rangle$
	Porta de T		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\pi/4} \end{bmatrix}$	$ 0\rangle \rightarrow 0\rangle$ $ 1\rangle \rightarrow e^{i\pi/4} 1\rangle$
			$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/4} \end{bmatrix}$	$ 0\rangle \rightarrow 0\rangle$ $ 1\rangle \rightarrow e^{-i\pi/4} 1\rangle$
Porta de 2-qbits	Porta CNOT - Not-Controlado		$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	$ 00\rangle \rightarrow 00\rangle$ $ 01\rangle \rightarrow 01\rangle$ $ 10\rangle \rightarrow 11\rangle$ $ 11\rangle \rightarrow 10\rangle$
Operação	Medida na base computacional padrão (Z)			
	Barreira de evolução		A barreira evita a evolução do q-bit através da linha	

Fonte: Figura retirada de RABELO e COSTA, 2018.

Na tabela acima chamamos atenção para a porta lógica Hadamard (porta H). Essa porta atua em um único qubit. Sua representação matricial e atuação na base computacional $|0\rangle$ e $|1\rangle$ é dada, respectivamente, por:

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} ; |0\rangle \mapsto H \mapsto \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + |1\rangle) ; |1\rangle \mapsto H \mapsto \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle - |1\rangle) .$$





Observe que, essa porta lógica converte o qubit que estar no estado $|0\rangle$ ou $|1\rangle$ em uma superposição (combinação) de estados quânticos da base computacional, $(|0\rangle \pm |1\rangle)/\sqrt{2}$. Também ressaltamos que isso representa uma mudança de paradigma de computação, visto que, não podemos realizar essa tarefa com bits clássicos.

2.3 Teleporte quântico da informação

O protocolo de teleporte quântico consiste na transferência de um estado quântico desconhecido (apenas uma cópia de um qubit desconhecido) entre duas partes A e B, chamadas de Alice e Bob, utilizando emaranhamento quântico pré-compartilhado e comunicação clássica (NIELSEN e CHUANG, 2010). Sua aplicabilidade encontra-se na transmissão de informação quântica, protocolos de criptografia quântica e a transferência de informação entre processadores quânticos. Vale ressaltar que nos últimos anos alguns grupos de pesquisa realizaram avanços importantes na área da comunicação quântica via satélite. Assim, abrindo as possibilidades para execução de protocolos de informação quântica para longas distâncias (KHATRI, BRADY et al, 2021), (GIBNEY, 2016).

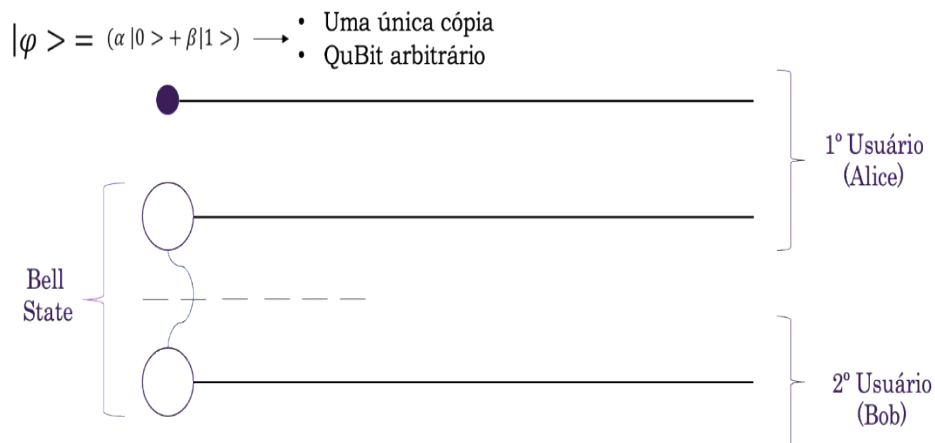
Sobre o teleporte também é importante enfatizar: (1) Não temos a transferência de matéria e sim a *transferência da informação quântica* entre emissor e receptor. (2) A transmissão da informação entre as partes é limitada pela velocidade da comunicação clássica, logo, não temos transmissão de informação acima da velocidade da luz.

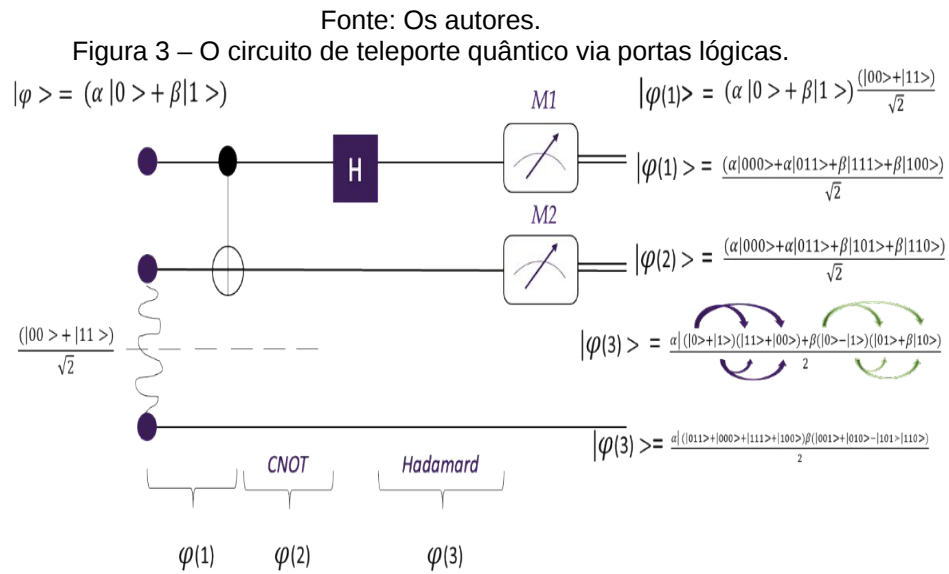
2.4 Teleporte via portas lógicas

Neste momento é importante o professor chamar atenção dos alunos que, Alice não pode realizar uma cópia de seu qubit ou estado quântico. Na literatura, já é bem conhecido o teorema da não clonagem de estados quânticos desconhecidos. Logo, como Alice deve transferir essa informação quântica para o Bob, se ela possui apenas um qubit desconhecido? A resposta para essa pergunta é usando o protocolo de teleporte quântico da informação.

O teleporte quântico da informação pode ser realizado via portas lógicas (NIELSEN e CHUANG, 2010). Na Figura 2, temos uma diagramação simples de um circuito quântico, onde as três linhas representam a evolução temporal para cada qubit. Observe que, a tarefa de Alice é transferir um único qubit arbitrário (desconhecido), $|\psi\rangle$, da primeira linha (partícula de Alice) para a última (partícula de Bob). Para isso, é essencial termos um estado de Bell (estado quântico de 2-qubits emaranhados) antes de começarmos o teleporte quântico. É importante mencionar que, Alice (emissor) possui dois qubits, um é o qubit arbitrário e o outro é um qubit emaranhado (correlacionado quanticamente) com o Bob. E o Bob (receptor) possui apenas um qubit.

Figura 2 – Configuração inicial do circuito de teleporte quântico.

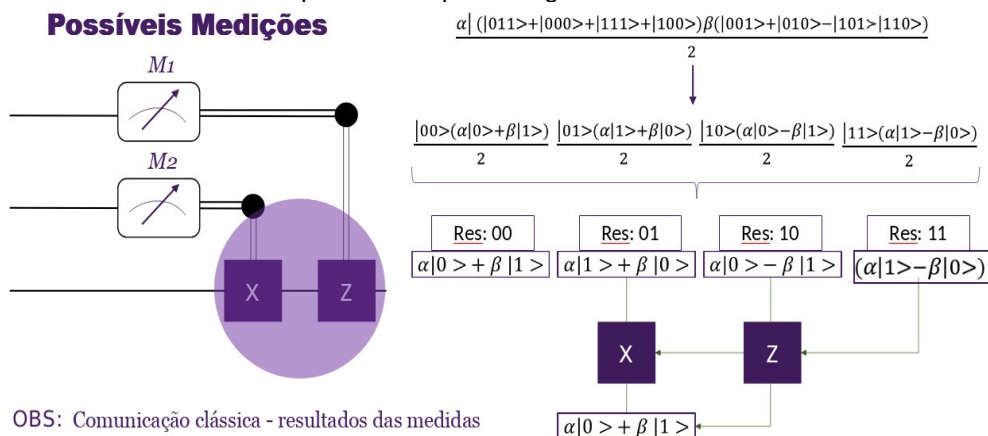




Fonte: Os autores.

Na Figura 3, temos o circuito de teleporte através de portas lógicas. Observe que, Alice faz operações nos seus dois qubits através de uma porta CNOT (veja a Tabela 1) e, posteriormente, aplica uma porta lógica de Hadamard sobre o qubit a ser transferido. Posteriormente, Alice realiza duas medidas (na Figura 3 é representado pelos medidores M1 e M2) sobre seus qubits. Também colocamos a evolução teórica do circuito através dos estados: $|\varphi(1)\rangle$, $|\varphi(2)\rangle$, $|\varphi(3)\rangle$. Essa parte teórica também é trabalhada passo a passo na Figura 3. Na mecânica quântica, as medidas destroem a superposição de estados quânticos dos qubits e, portanto, emergindo apenas os resultados dessas medidas que são bits clássicos de informação, que neste caso, com quatro possibilidades possíveis: 00, 01, 10 e 11. E por fim, Alice comunica o resultado de suas medidas (os dois bits clássicos) para o Bob, na Figura 4 representado por linhas duplas após os medidores M1 e M2. Essa comunicação é realizada através de um canal clássico (e-mail, smartphone, etc.). O procedimento foi finalizado para Alice. Entretanto para Bob, ele precisa ainda conhecer os resultados das medidas de Alice para recuperar o qubit desconhecido. Observe que, na Figura 4, dependendo do resultado, ele não faz nada se o resultado de Alice for 00 ou, aplica uma porta X, se o resultado for 01. Se o resultado for 10, ele aplica uma porta lógica Z. E se o resultado de Alice for 11, Bob aplicará sobre seu qubit uma porta X e Z. Observe também na Figura 4 que Bob recupera o qubit desconhecido após realizar suas operações sobre seu qubit.

Figura 4 – Alice realiza as medidas (medidores M1 e M2) sobre seus qubits. O circuito de teleporte quântico via portas lógicas.



Fonte: Os autores.

3 UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA O IBM-Q COMPOSE

Vamos agora implementar uma sequência didática do teleporte quântico de informação utilizando como referencial teórico o circuito da seção anterior. Nessa sequência didática, vamos explorar conceitos básicos da computação quântica, tais como: portas, circuitos e algoritmos quânticos, além da análise dos resultados obtidos.

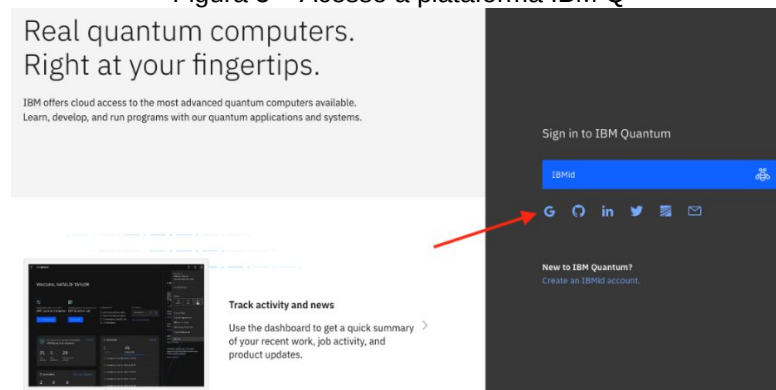
Para a proposta deste trabalho, vamos utilizar a plataforma de computação quântica da IBM. Tecnicamente, essa plataforma vem com uma interface similar a uma "IDE" (integrated development environment) chamada de IBM Q Compose. Nessa IDE o usuário possui um leque de opções, entre as quais: projeto de circuitos e/ou algoritmos, execução de circuito e/ou algoritmos em simuladores e chips quânticos, análise dos resultados via gráficos e a possibilidade de programação em OPENQASM e/ou Qiskit.

Vamos agora enumerar os passos necessários para o uso dessa IDE IBM-Q Compose e uma aplicação, que neste caso, o teleporte quântico.

- **Passo-1: Inscrição na quantum cloud**

Primeiramente, para o usuário que não tem inscrição na plataforma *IBM Q Experience*. Acesse o link: <https://quantum-computing.ibm.com/>. Faça o seu login com a sua conta Google (gmail), entre outros disponíveis, veja a Figura 5:

Figura 5 – Acesso a plataforma IBM Q

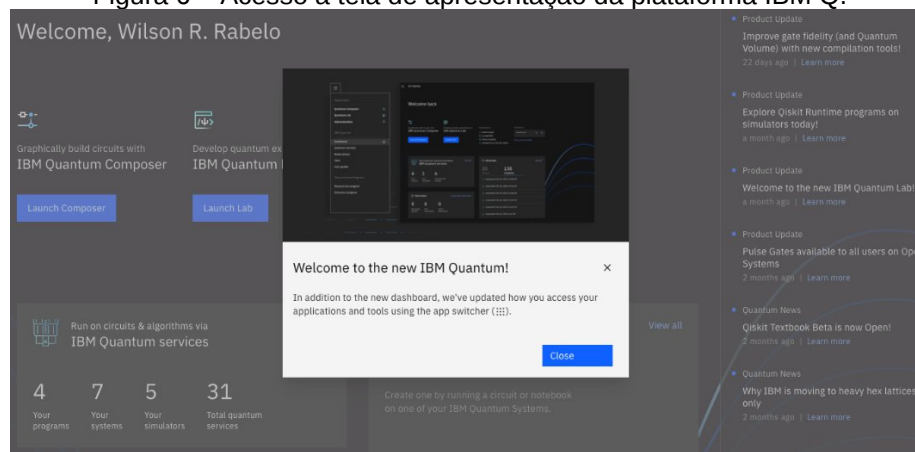


Fonte: Imagem de captura do IBM-Q Compose (IBM Q, 2022).

- **Passo-2: Tela de apresentação**

Na Figura 6 abaixo, temos a tela de apresentação da IDE para o usuário, demonstrando os recursos da plataforma, o IBM Q Compose e o Quantum Lab.

Figura 6 – Acesso a tela de apresentação da plataforma IBM Q.



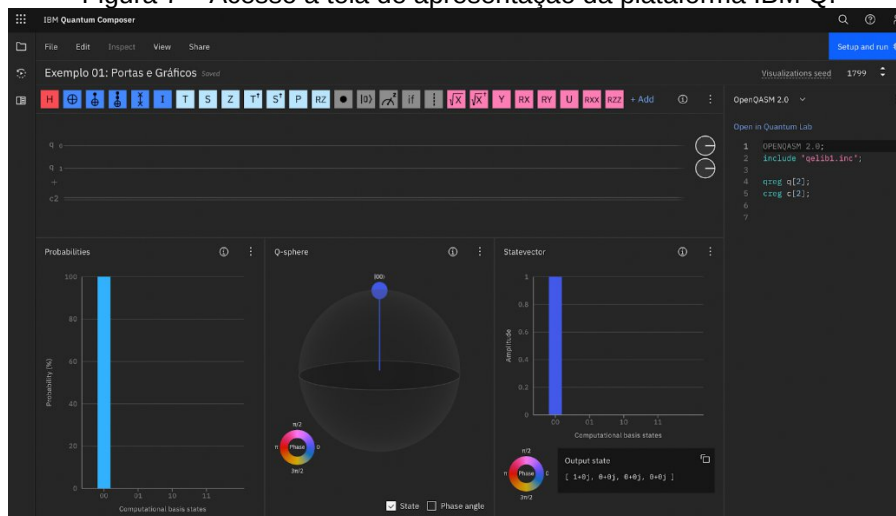
Fonte: Imagem de captura do IBM-Q Compose (IBM Q, 2022).

- **Passo-3: Recursos disponíveis na IDE**

Na Figura 7, o usuário encontra todos os recursos disponíveis do IBM-Q Compose. As portas lógicas quânticas disponíveis na parte superior da figura, ou seja, as portas lógicas H, X, Y, T, S etc. Essas portas podem ser arrastadas e colocadas em cada linha do circuito. Lembrando que, cada linha representa a evolução temporal de um qubit da esquerda para a direita. Ao final de cada linha temos a indicação da fase dos qubits. Ao lado direito da IDE, temos o ambiente de programação com a codificação em OPENQASM e/ou Qiskit.

Como podemos observar pela Figura 7, no canto superior direito, a IDE permite três possibilidades: (1) simular os circuitos localmente no seu Desktop (ou tablet/smartphone); (2) simular em servidores convencionais da IBM ou (3) executar os circuitos em chips quânticos de 5-qubits supercondutores (IBM Q, 2022). Portanto, um processo no IBM Q consiste basicamente: (a) especificar as portas lógicas e, portanto, o circuito quântico para um dado problema através da IDE IBM Q Compose; (b) executar o circuito de interesse no simulador e/ou chip quântico disponível; (c) Analisar a obtenção dos resultados via leituras ou medidas sobre os qubits através dos gráficos (parte inferior da Figura 7) disponíveis na IDE. São três tipos: (1) Gráfico de barras para representar a distribuição de probabilidades dos estados quânticos resultante; (2) Gráfico Q-esfera, esse representa a distribuição de estados da base, com sua respectiva fase, e por fim, (3) O gráfico de barras para representar o estado final dos qubits com suas respectivas amplitudes de probabilidades.

Figura 7 – Acesso a tela de apresentação da plataforma IBM Q.



Fonte: Imagem de captura do IBM-Q Compose (IBM Q, 2022).

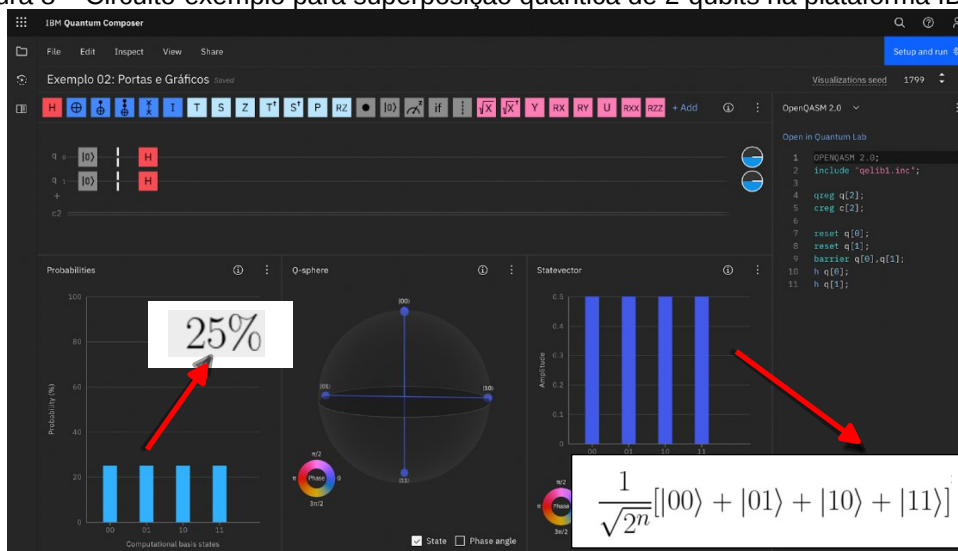
- **Passo-4: Projeto (1) Montando superposição de estados quânticos**

Na Figura 8, propomos o primeiro circuito-exemplo para os alunos. Nesta proposta, o foco é construir superposições de qubits e analisar os resultados para o estado quântico resultante, como também, os resultados da distribuição de probabilidades para esse sistema composto através dos gráficos da IDE.

Primeiramente, aluno deve inicializar os dois qubits no estado padrão, $|0\rangle$. Posteriormente, o aluno deve colocar a barreira de evolução nos qubits, e assim, garantir que os estados comecem no $|0\rangle$. Existem várias portas lógicas que podem colocar os qubits em estados de superposição da base computacional. Entretanto, podemos adotar a mais simples, a porta lógica de Hadamard, com representação dada por H (veja a Tabela 1). Os alunos colocam essas portas nas duas linhas dos qubits. Observe que, através de uma

simulação local, temos o gráfico de barras azul, na parte inferior direita da Figura 7, que apresenta os 2-qubits em estado quântico em superposição da base computacional. Esse estado quântico é colocado na Figura 8. Também a IDE fornece, via simulação local, o gráfico em barras da distribuição de probabilidades para esse estado quântico, na parte inferior esquerda. Os alunos podem notar que realizando muitas medidas ou rodando várias vezes esse experimento em um chip quântico real, a simulação local da IDE fornece 25% de chance em obter os estados: $|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle$ para cada um.

Figura 8 – Circuito-exemplo para superposição quântica de 2-qubits na plataforma IBM Q.



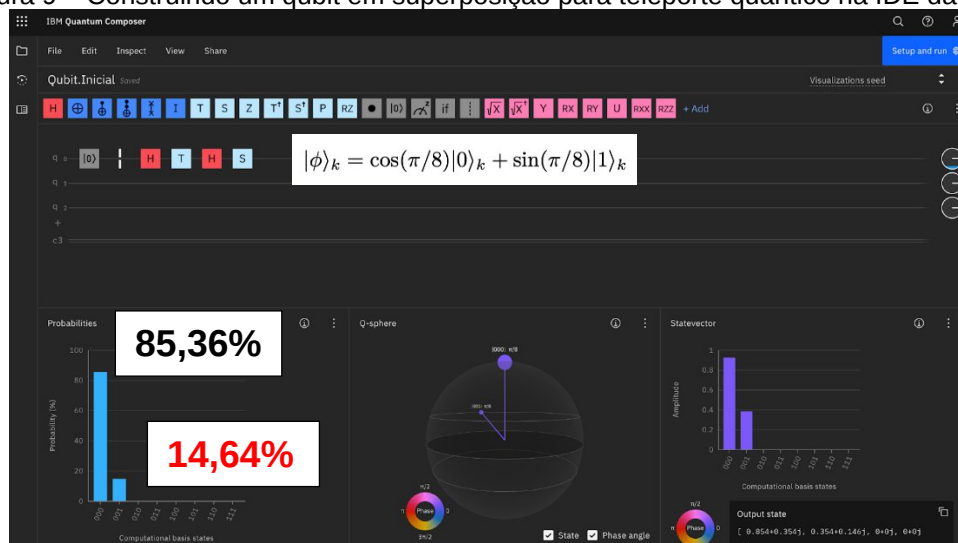
Fonte: Imagem de captura do IBM-Q Compose (IBM Q, 2022).

- **Passo-5: Projeto (2) Construindo um teleporte quântico na IDE**

Na IDE IBM-Q Compose da plataforma, os alunos podem implementar o teleporte quântico via circuito da Figura 3. Para realizar o protocolo escolhemos o seguinte qubit a ser teleportado, por parte dos alunos:

$$|\phi\rangle_k = \cos(\pi/8)|0\rangle_k + \sin(\pi/8)|1\rangle_k$$

Figura 9 – Construindo um qubit em superposição para teleporte quântico na IDE da IBM.



Fonte: Imagem de captura do IBM-Q Compose (IBM Q, 2022).

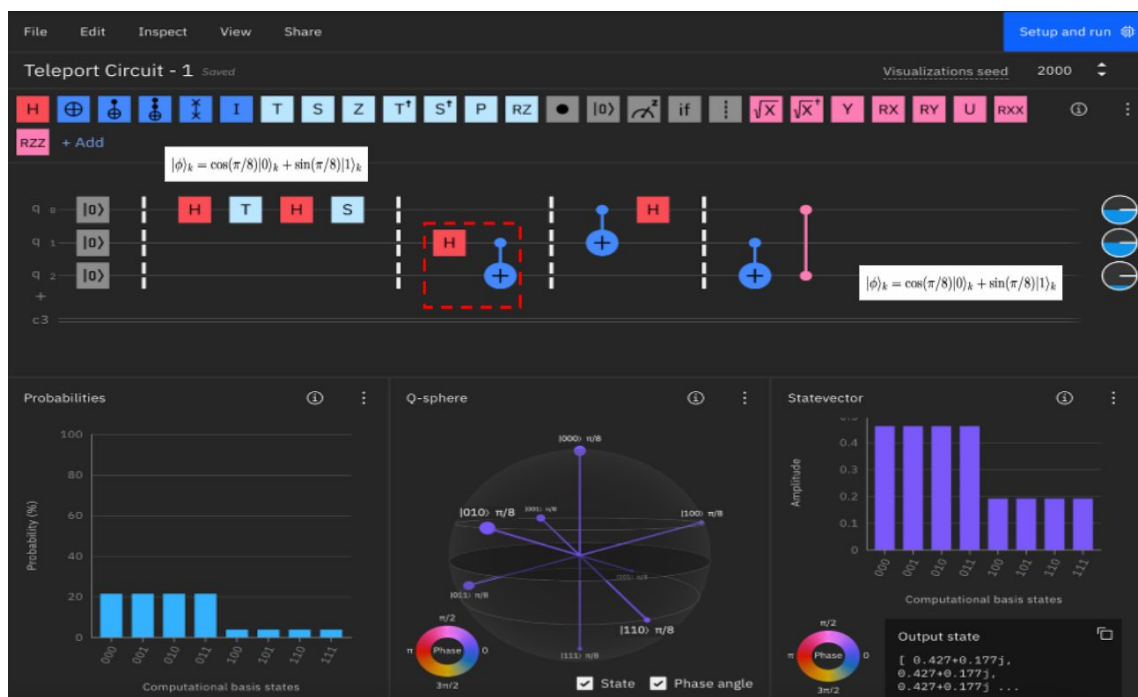




Para a preparação desse estado quântico em superposição de estados, os alunos devem aplicar as seguintes portas lógicas de 1-qubit: H, T e S (Tabela 1), respectivamente, como podemos ver na Figura 9. Observe a utilidade desta IDE no auxílio para os alunos, visto que, a simulação local é realizada à medida que os alunos arrastam as portas para a linha especificada. Também a própria IDE fornece as estimativas teóricas para esse estado, ou seja, $|\alpha|^2 = 0,85$ ou 85% de se obter o estado $|0\rangle$ e $|\beta|^2 = 0,15$ ou 15% de se obter o estado $|1\rangle$. Portanto, os alunos podem comparar as estimativas teóricas com os resultados via simulação local da IDE, isto é, o gráfico de barras na parte inferior da Figura 9.

Após a especificação do qubit de entrada, $|\phi_k\rangle$, realizamos o protocolo de teleporte usando o circuito da Figura 3. Esse circuito é colocado na Figura 10 abaixo. Note que, o primeiro passo, por parte dos alunos é preparar o qubit de entrada (linha q_0). Observe que esse qubit possui o rótulo k e a sequência de portas para cria-lo, dado por: H, T, H e S. Alice deseja transferir a informação do qubit q_0 para o qubit do Bob, qubit da última linha que é o q_2 . Na figura 10, o retângulo vermelho representa o emaranhamento quântico pré-compartilhado que será criado através das portas H e mais uma porta lógica CNOT (veja Tabela 1), criando o estado de Bell, entre q_1 (Alice) e q_2 (Bob). As demais portas representam as operações quânticas do protocolo de teleporte da Figura 3. Alice aplica sobre os seus qubits as portas lógicas de 2-qubits, a CNOT e a Z-controlada. E por fim, observamos as estimativas das medidas para o último qubit que são corretamente avaliados através dos gráficos fornecidos pela simulação local da IDE.

Figura 10 – O teleporte quântico na IDE da IBM.



Fonte: Imagem de captura do IBM-Q Composer (IBM Q, 2022).

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Como podemos observar na análise acima, os alunos podem utilizar vários recursos disponíveis do IBM-Q Compose. As características principais desta IDE são várias, entre as quais podemos citar: (1) os alunos não necessitam de nenhuma instalação em sua máquina pessoal (Desktop, tablet ou smartphone). Os alunos precisam apenas de um cadastro simples na plataforma IBM Q Experience. (2) A IDE do IBM-Q Compose é intuitiva e utiliza um sistema de "drag and drop" para a montagem dos circuitos, ou seja, basta o usuário arrastar a porta lógica de interesse para uma das linhas horizontais para a montagem do circuito quântico e a evolução temporal do circuito é da esquerda para direita. (3) Simulação local do circuito quântico, podendo ter a possibilidade de executar seus circuitos em chips quânticos de 5-qubits. Também temos um ambiente de programação com a codificação em OPENQASM e/ou Qiskit (framework baseado em Python).

Por fim, o uso da sequência didática acima permitirá os alunos simularem circuitos quânticos simples e complexos, onde o professor poderá explorar conceitos importantes para a computação quântica, tais como: preparação de estado quântico, portas quânticas e suas atuações no espaço estados dos qubits, algoritmos quânticos e leituras (medidas) dos qubits utilizando vários gráficos da IDE.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se uma proposta de ensino da computação quântica por meio da aplicação de seus conceitos usando a IDE IBM-Q Compose da plataforma IBM (IBM Q, 2022). Primeiramente, revisamos rapidamente conceitos como qubits, portas lógicas e circuitos quânticos e algoritmo quântico (teleporte de informação quântica).

Posteriormente, propomos uma sequência didática via projetos na IDE para os alunos trabalharem conceitos de computação quântica, tais como: (1) a preparação de estado quânticos, (2) portas quânticas e suas atuações no espaço estados de múltiplos qubits, (3) algoritmo quântico através do teleporte de estados quânticos, e por fim, (4) análise das leituras (medidas) sobre os qubits utilizando vários gráficos disponíveis na IDE da plataforma. Concluímos que, a IDE disponibilizada pela plataforma e os projetos realizados neste trabalho podem auxiliar o professor e alunos nos recursos pedagógicos importantes da IDE, e assim, explorar vários conceitos básicos da computação quântica. Na visualização gráfica, a IDE IBM-Q Compose pode auxiliar na discussão dos resultados obtidos de circuitos simples e complexos, voltados para o ensino da computação quântica.

REFERÊNCIAS

ARUTE, F., Arya, K., BABBUSH, R. *et al.* Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. **Nature** **574**, 505–510 (2019).
<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>

Google Quantum AI, Quantum Cloud da Google. Disponível em:
<https://quantumai.google/>. Acesso em: 23 abril 2022.

Azure Quantum, Quantum Cloud da Microsoft. Disponível em:
<https://azure.microsoft.com/pt-br/services/quantum/>. Acesso em: 23 abril 2022.

Amazon Braket, Quantum Cloud da Amazon, Disponível em:
<https://aws.amazon.com/pt/braket/>. Acesso em: 23 abril 2022.

D-Wave, Computador Quântico da Empresa D-Wave. Disponível em:
<https://www.dwavesys.com/company/about-d-wave/>. Acesso em: 23 abril 2022.

IBM Q, Computador Quântico da Empresa IBM. Disponível em:
<https://www.ibm.com/quantum-computing/>. Acesso em: 23 abril 2022.

NIELSEN, Michael Aaron.; CHUANG, Isaac. **Quantum Computation and Quantum Information**. Cambridge: Cambridge University Press. 2010.

RABELO, Wilson R.; COSTA, Maria Lúcia M. Uma abordagem pedagógica no ensino da computação quântica com um processador quântico de 5-qubits. **Rev. Bras. Ensino de Física**, São Paulo, v. 40, n. 4, 2018.

KHATRI, S., BRADY, A.J., DESPORTE, R.A. *et al.* Spooky action at a global distance: analysis of space-based entanglement distribution for the quantum internet. **npj Quantum Inf** **7**, 4 (2021).

GIBNEY, E. Chinese satellite is one giant step for the quantum internet. **Nature** **535**, 478–479 (2016).

A TEACHING SEQUENCE PROPOSAL FOR QUANTUM COMPUTING: USING IBM-Q COMPOSE AS A TEACHING RESOURCE FOR LOGIC GATES, CIRCUITS AND QUANTUM ALGORITHM

Abstract: *The use of the quantum computing platform in the cloud (quantum cloud) from the IBM company, through its IDE, called IBM-Q Compose, has become essential for disciplines and courses in the field of quantum computing. IBM-Q Compose is a development IDE that provides, in addition to local simulation, the connection between users and quantum processors, where you want to run quantum circuits and algorithms. In this work we explore a proposal for a didactic sequence via projects as activities to be worked on in the quantum computing discipline for application in engineering and/or basic sciences. The main focus is to address important concepts, from a pedagogical point of view, of quantum computing using the IBM-Q Compose. In the first part of this work, we briefly review concepts such as qubits, logic gates, circuits, and quantum algorithms. In the second part, we propose a didactic sequence via projects in the IDE for students and/or teachers to work together on concepts, such as: (1) the preparation of quantum states, (2) quantum gates and their performance in the space of multiple qubits states, (3) quantum algorithm through the teleportation of quantum states, and finally, (4) analysis of the measurements on the qubits using various graphs available in the platform's IDE. We conclude our work by analyzing the IBM platform regarding several aspects, such as: installation, characteristics, and its use by students and/or teachers. Our work demonstrates that this didactic sequence can be useful for teachers who use IBM-Q Compose, i.e., they will be able to work with students about the abstract concepts of quantum computing and still logging into unrestricted access quantum chips of 5-qubits.*

Keywords: *Didactic Sequence. IBM-Q Compose. IBM Q. Quantum Computing.*