

Modelagem Inicial de Cristais Fotônicos via Qiskit

Gisele Bosso de Freitas e Clovis Caface

Resumo— Este trabalho apresenta uma abordagem inicial para simulação de cristais fotônicos com circuitos quânticos digitais na plataforma Qiskit. Foram representados fenômenos como bandas proibidas, confinamento de luz, luz lenta e refração negativa por meio de cadeias de qubits acoplados. Além das simulações ideais, foram realizadas execuções ruidosas com técnicas de mitigação, incluindo dynamical decoupling e gate-level twirling. Os resultados mostraram que os efeitos permanecem qualitativamente reconhecíveis, indicando a robustez da proposta e seu potencial para ensino e aplicações exploratórias em óptica quântica.

Palavras-Chave— Circuitos quânticos, Óptica, Propagação de fótons, Simulação.

Abstract— This work presents an initial approach to simulating photonic crystals using digital quantum circuits on the Qiskit platform. Phenomena such as photonic band gaps, light confinement, slow light, and negative refraction were modeled through coupled qubit chains. In addition to ideal simulations, noisy executions with mitigation techniques, including dynamical decoupling and gate-level twirling, were performed. Results showed that qualitative effects remain recognizable, demonstrating the robustness of the proposal and its potential for educational and exploratory applications in quantum optics.

Keywords— Quantum circuits, Optics, Photon propagation, Simulation.

I. INTRODUÇÃO

Cristais fotônicos são estruturas periódicas compostas por materiais dielétricos ou metalodielétricos com dimensões comparáveis ao comprimento de onda da luz, capazes de manipular sua propagação por meio de efeitos de interferência. Tais estruturas produzem bandas proibidas, ou *photonic band gaps*, que correspondem a faixas de frequência em que determinados comprimentos de onda não se propagam, em analogia às bandas eletrônicas em semicondutores [1], [2], [3]. O arranjo periódico entre regiões de diferentes índices de refração permite a formação de modos propagantes e modos proibidos, possibilitando fenômenos como confinamento de luz em escalas submicrométricas, inibição de emissão espontânea e construção de guias de onda de baixa perda [4], [5], [6], [7].

Estudos clássicos sobre cristais fotônicos destacam três tópicos centrais: o confinamento ultraforte da luz em volumes próximos ao comprimento de onda, o controle da dispersão em frequência — que viabiliza o fenômeno da luz lenta (*slow light*) — e a dispersão espacial anômala, relacionada à refração negativa e à formação de imagens quase perfeitas [8], [9]. Avanços tecnológicos em litografia e fabricação de materiais nanométricos têm possibilitado a implementação prática de cavidades ópticas de alto fator de qualidade, guias integrados

e dispositivos de memória baseados em manipulação de luz, consolidando os cristais fotônicos como plataformas versáteis para óptica avançada [4], [6], [10]. A Fig. 1 ilustra essas propriedades.

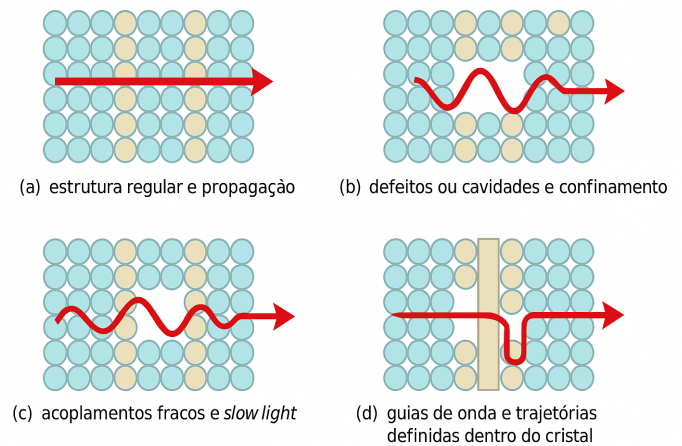


Fig. 1. Propriedades fundamentais de cristais fotônicos.

Embora a literatura atual explore principalmente cristais fotônicos como suporte físico para computação quântica ou sua análise via métodos clássicos e numéricos [4], [11], a interseção entre fotônica e simulações quânticas digitais permanece pouco investigada. A novidade deste trabalho reside em inverter essa perspectiva, utilizando circuitos quânticos digitais para representar fenômenos ópticos característicos, como bandas proibidas, confinamento e interferência anômala. Para isso, adotamos a plataforma Qiskit [12], que oferece recursos de simulação e execução em processadores quânticos reais. Nosso objetivo é explorar a viabilidade dessa abordagem em cenários simples, destacando seu potencial tanto para aplicações educacionais quanto para a construção de modelos conceituais em óptica quântica.

II. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho consiste na construção de circuitos quânticos que representem propriedades físicas de cristais fotônicos. Nessa abordagem, os qubits simulam as células da estrutura periódica, e suas interações modelam os acoplamentos entre modos ópticos. A construção dos circuitos foi feita em Qiskit, iniciando com uma excitação em $\lvert\psi_0\rangle$ e propagação por superposição (H) e acoplamento entre qubits adjacentes com CX . Para representar *slow light*, as portas $R_{XX}(\theta)$ com ângulos pequenos foram usadas no lugar de CX .

Os circuitos foram desenvolvidos com base nos seguintes modelos:

- **Modelo base (propagação uniforme):** Um circuito com cinco qubits é criado. Aplica-se uma porta X no qubit inicial (simulando a presença de um fóton), seguida de portas H (superposição) e portas CX entre qubits adjacentes, simulando a propagação periódica da luz.
- **Simulação de *slow light*:** Utiliza-se a porta $R_{XX}(\theta)$ com $\theta < \pi$ entre pares de qubits, representando acoplamentos fracos e, portanto, propagação retardada da luz.
- **Inserção de defeito funcional:** A remoção de uma conexão específica (como a omissão da CX(2,3)) representa a introdução de uma cavidade ou defeito estrutural que interrompe a propagação da luz.
- **Refração negativa:** Fenômenos de interferência anômala são simulados com caminhos alternativos e a aplicação de fases controladas, por meio das portas CZ e $p(\phi)$.

A execução foi feita com o *backend* FakeOsaka, com técnicas de supressão de ruído (*decoupling* e *twirling*).

III. MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO

A. Cristais Fotônicos e Estrutura de Banda

Cristais fotônicos possuem bandas proibidas (*band gaps*) [3], regiões em que certos comprimentos de onda não podem se propagar. Essas propriedades podem ser modeladas usando redes de modos acoplados, análogas a sistemas de partículas quânticas em potenciais periódicos.

A dinâmica da propagação da luz em cristais fotônicos pode ser modelada por analogia com cadeias de osciladores acoplados, nas quais os modos ópticos discretos se comportam como cavidades ressonantes interligadas. Essa analogia permite a formulação de uma hamiltoniana efetiva que descreve a evolução temporal dos fótons no sistema.

A equação que representa os modos acoplados é a hamiltoniana

$$\hat{H} = \sum_{j=1}^N \omega_j \hat{a}_j^\dagger \hat{a}_j + \sum_{\langle j,k \rangle} g_{jk} \left(\hat{a}_j^\dagger \hat{a}_k + \hat{a}_k^\dagger \hat{a}_j \right), \quad (1)$$

comum em modelos do tipo *tight-binding*, onde \hat{a}_j^\dagger e \hat{a}_j são os operadores de criação e aniquilação no modo j , ω_j é a frequência ressonante local, e g_{jk} define o acoplamento entre os modos adjacentes. Esse modelo captura o fenômeno físico da interferência coerente entre modos, fundamental para a formação de bandas proibidas (*photonic bandgaps*), fenômeno amplamente discutido na referência [3].

A hamiltoniana

$$\hat{H} = \sum_{j=1}^N \frac{\omega}{2} \sigma_z^{(j)} + \sum_{j=1}^{N-1} J \left(\sigma_x^{(j)} \sigma_x^{(j+1)} + \sigma_y^{(j)} \sigma_y^{(j+1)} \right) \quad (2)$$

descreve uma versão simplificada dessa dinâmica em termos de qubits, representando os modos ópticos por estados de dois níveis. A hamiltoniana do tipo XY capta a interação entre spins em uma cadeia linear, com os termos $\sigma_x^{(j)} \sigma_x^{(j+1)}$ e $\sigma_y^{(j)} \sigma_y^{(j+1)}$ simulando o acoplamento coerente entre modos ópticos. Neste contexto, o parâmetro J controla a intensidade do acoplamento: valores pequenos de J correspondem ao

regime de *slow light*, no qual a propagação da luz é retardada por interferência [8].

A Equação

$$R_{XX}(\theta) = \exp \left(-i \frac{\theta}{2} \sigma_x \otimes \sigma_x \right), \quad (3)$$

associada à porta $R_{XX}(\theta)$, implementa experimentalmente esse acoplamento em circuitos quânticos. Valores pequenos de θ simulam interações fracas, modelando regimes com velocidade de grupo reduzida, enquanto valores maiores se aproximam da propagação livre.

O estado inicial $|\psi_0\rangle$ é descrito como

$$|\psi_0\rangle = |0\rangle^{\otimes(i-1)} \otimes |1\rangle \otimes |0\rangle^{\otimes(N-i)} \quad (4)$$

e corresponde à excitação localizada de um único qubit, análogo à presença de um fóton em um modo específico do cristal. A evolução temporal desse estado, regida por

$$|\psi(t)\rangle = e^{-i\hat{H}t} |\psi_0\rangle, \quad (5)$$

simula a propagação quântica do fóton pelas células da estrutura periódica. Já

$$P_j = |\langle 1_j | \psi(t) \rangle|^2 \quad (6)$$

fornece a probabilidade de detecção do fóton em cada posição após o tempo t , e pode ser comparada com o padrão esperado de interferência construtiva e destrutiva, análogo às bandas permitidas e proibidas dos cristais fotônicos reais [?].

Dessa forma, a equivalência entre as quantidades físicas — como índice de refração periódico e acoplamento entre qubits — permite que circuitos quânticos digitais implementados no Qiskit simulem qualitativamente o comportamento óptico de cristais fotônicos unidimensionais.

B. Representação com Qubits

Para simular a propagação da luz em cristais fotônicos, utilizamos qubits como representações dos modos ópticos discretos associados a diferentes regiões do cristal. Cada qubit simula uma célula da estrutura periódica, e as interações entre modos adjacentes — que fisicamente ocorrem devido à continuidade e modulação do índice de refração — são modeladas por portas quânticas de dois qubits, como CNOT (CX) ou RXX, que introduzem acoplamentos e correlações entre os estados. A criação de estados de superposição representa as trajetórias possíveis dos fótons no meio, enquanto as interferências entre esses caminhos são simuladas pelas composições de portas.

A correspondência entre os principais fenômenos físicos estudados em cristais fotônicos e os blocos funcionais utilizados nos circuitos quânticos pode ser descrita de forma conceitual. A modulação periódica do índice de refração equivale a uma cadeia de qubits com acoplamentos uniformes, enquanto a formação de bandas proibidas, ou *band gaps*, corresponde a estados quânticos bloqueados por interferência. O fenômeno de *slow light* é representado por acoplamentos fracos entre qubits, que introduzem um retardo de fase, e os defeitos funcionais são simulados pela omissão de interações específicas ou pela substituição de portas em determinados pontos da cadeia. Já as cavidades ópticas aparecem como estados localizados que

não se propagam além do ponto de confinamento, e a refração negativa, associada a efeitos superprismáticos, é modelada pela interferência destrutiva seletiva em trajetórias alternativas.

Além da correspondência qualitativa, a Tabela I apresenta algumas operações específicas implementadas com o Qiskit para simular esses efeitos, conectando modelos físicos com elementos computacionais.

TABELA I

CORRESPONDÊNCIA ENTRE FENÔMENOS ÓPTICOS, MODELOS FÍSICOS E PORTAS QUÂNTICAS EM QISKIT.

Fenômeno Óptico	Equação/ Modelo	Porta no Qiskit
Superposição de caminhos	$\frac{1}{\sqrt{2}}(0\rangle + 1\rangle)$	H
Propagação uniforme	Interações entre vizinhos (modelo tight-binding)	CX, RXX($\pi/2$)
Band gap/ reflexão	Bloqueio seletivo por fase ou ausência de caminho	Z, CZ, ausência de porta
Defeito estrutural	Quebra de simetria local no acoplamento	Omissão de interação (ex: CX)
Luz lenta	Acoplamento fraco: $g_{jk} \ll 1$	RXX(θ), com $\theta < \pi/4$
Refração negativa/ interferência	Fase controlada entre caminhos	CZ, U1(ϕ), P(ϕ)

A seguir, exemplificamos algumas dessas representações por meio de circuitos. O primeiro circuito (Figura 2) simula a propagação livre em uma estrutura periódica sem defeitos. Um fóton é iniciado no qubit q_0 e a propagação ocorre por meio de portas de superposição e acoplamentos CNOT.

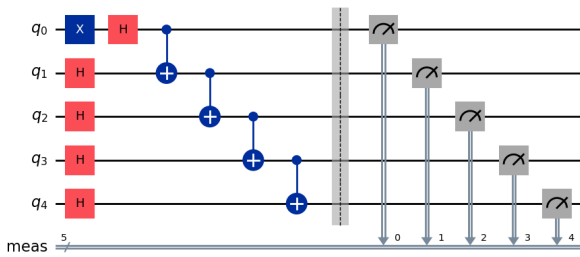


Fig. 2. Circuito quântico simulando a propagação uniforme da luz em um cristal fotônico periódico.

Caso se deseje simular a desaceleração da luz (*slow light*), basta substituir as portas CX por RXX(θ) com ângulos pequenos, representando acoplamentos fracos, como na Figura(3).

A introdução de defeitos é feita pela omissão de portas específicas, enquanto a refração negativa pode ser modelada com portas CZ e U1 para controlar a interferência entre caminhos possíveis. Na Figura(4) é possível ver o circuito quântico que modela esta situação.

A simulação de refração negativa e efeitos superprismáticos foi realizada por meio da introdução de fases controladas

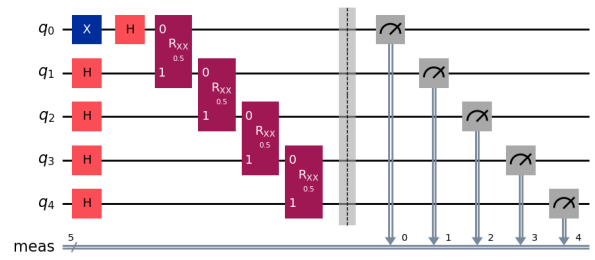


Fig. 3. Circuito quântico simulando a redução na velocidade de propagação.

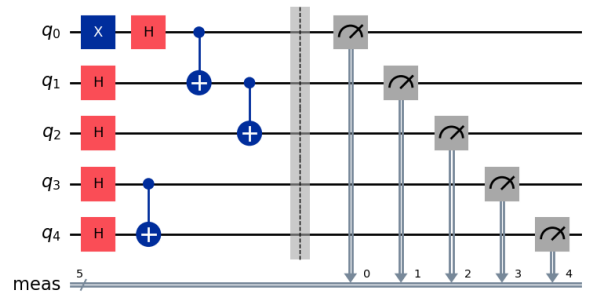


Fig. 4. Circuito quântico simulando a luz que não se propaga, podendo ficar confinada em uma determinada região do cristal.

em caminhos alternativos da propagação. Na Figura 5, os qubits q_0 e q_1 são preparados em estados de superposição pelas portas Hadamard, criando múltiplas trajetórias possíveis para a excitação. Em seguida, a aplicação de portas CNOT estabelece correlações entre os modos, enquanto a porta de fase U($0,0,\pi/4$) introduz uma diferença relativa que ajusta a interferência entre eles. O resultado é a supressão seletiva de determinados estados e o realce de outros, padrão análogo ao comportamento observado em cristais fotônicos submetidos à refração negativa, nos quais pequenas variações espectrais ou angulares geram fortes mudanças na direção de propagação. Dessa forma, o circuito quântico reproduz qualitativamente os efeitos superprismáticos, evidenciando a capacidade de manipular interferência destrutiva em arquiteturas digitais.

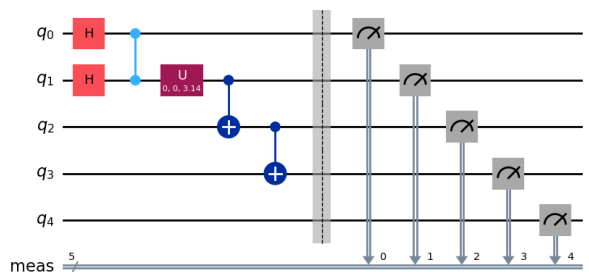


Fig. 5. Circuito quântico para simulação de refração negativa e efeitos superprismáticos, onde a porta de fase controlada induz interferência destrutiva seletiva entre caminhos.

Esses ajustes simples no circuito permitem mapear diretamente os fenômenos ópticos desejados, com resultados observáveis nos histogramas de medição discutidos na seção

seguinte.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações realizadas com circuitos quânticos no Qiskit possibilitaram explorar, de forma conceitual, fenômenos característicos dos cristais fotônicos, como propagação periódica da luz, desaceleração em meios estruturados, confinamento óptico e interferência anômala. A construção dos circuitos baseou-se em analogias diretas entre os elementos estruturais dos cristais fotônicos e os componentes dos circuitos quânticos digitais. Os resultados obtidos a partir das medições, representados por histogramas de probabilidades, permitiram uma interpretação qualitativa desses efeitos.

No primeiro circuito, foi implementada uma cadeia de cinco qubits com acoplamentos uniformes entre eles, simulando uma estrutura periódica sem defeitos. O fóton foi iniciado no primeiro qubit, e sua propagação foi modelada por meio da aplicação de portas de superposição e acoplamento entre os qubits adjacentes. O histograma na Fig. 6 resultante mostrou uma distribuição ampla dos estados finais, evidenciando que a “luz” se espalhou pela estrutura, comportamento análogo à propagação em uma banda permitida de um cristal fotônico real.

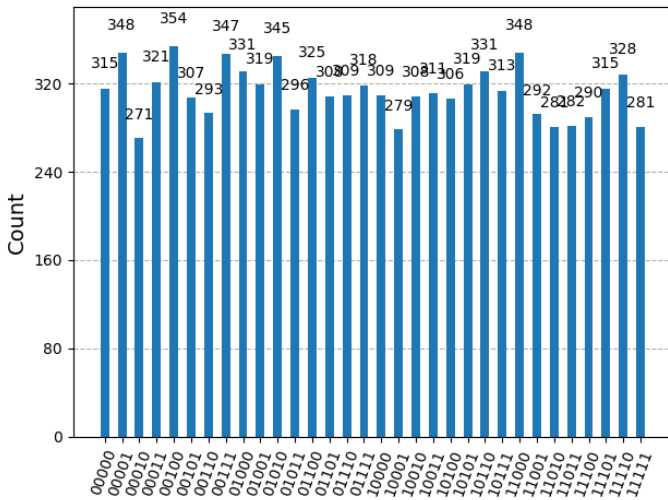


Fig. 6. Distribuição de probabilidade da medição do circuito base. O espalhamento indica propagação eficiente da luz.

A seguir, a propagação foi modificada pela introdução de acoplamentos fracos com a utilização da porta $RXX(\theta)$ com parâmetro de rotação reduzido. Essa mudança representa uma diminuição na taxa de transferência entre os modos do cristal, simulando o fenômeno da luz lenta (*slow light*), comumente observado nas bordas de bandas proibidas. Os resultados na Fig. 7 mostraram uma maior concentração de probabilidade nos estados correspondentes aos primeiros qubits, sugerindo que a propagação foi significativamente desacelerada. Tal comportamento é desejado em aplicações que requerem amplificação de interação luz-matéria ou controle de tempo de trânsito óptico.

Em uma terceira simulação, um defeito funcional foi inserido ao se omitir a conexão entre dois qubits da cadeia,

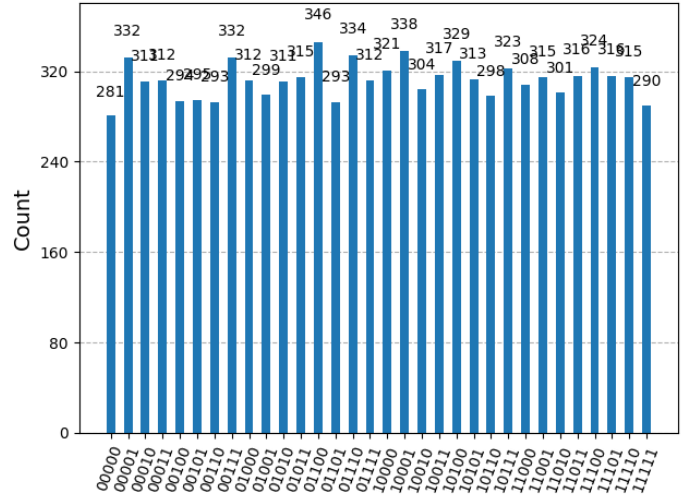


Fig. 7. Simulação de luz lenta: distribuição menos espalhada, indicando redução na velocidade de propagação.

criando uma descontinuidade na periodicidade da estrutura. Essa modificação bloqueou a propagação da luz para os qubits posteriores ao defeito, produzindo estados confinados nos qubits anteriores. O histograma obtido (Fig. 8) refletiu claramente esse confinamento, sendo possível interpretar esse comportamento como a formação de uma cavidade óptica com alto fator de qualidade (Q), onde a luz permanece aprisionada por mais tempo. Esse resultado reforça a correspondência entre falhas controladas na estrutura e a geração de modos localizados, fundamentais para o funcionamento de lasers, sensores e chaves ópticas.

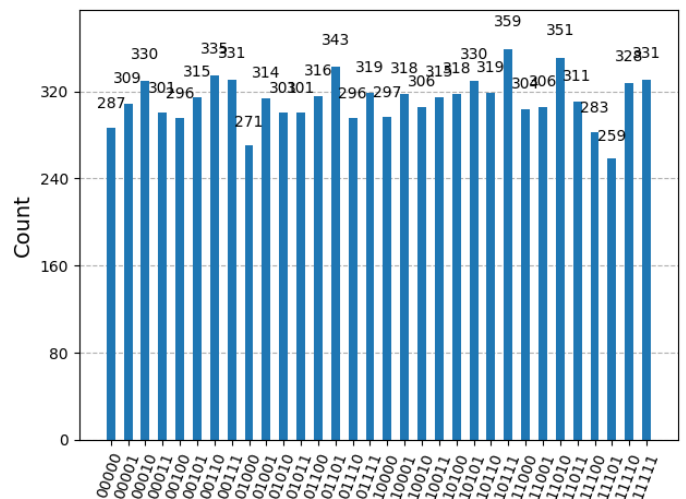


Fig. 8. Simulação de cavidade óptica: a ausência de propagação além do defeito representa confinamento da luz.

Na última simulação, buscou-se representar fenômenos de dispersão anômala, como refração negativa e efeitos superprismáticos. Foram introduzidas portas de fase e acoplamentos controlados, como CZ e $p(\pi)$, simulando interferência seletiva entre caminhos distintos da luz. O histograma final, na Fig. 9, apresentou um padrão de distribuição fortemente assimétrico,

com supressão de certos estados e realce de outros, o que evidencia a existência de interferência destrutiva em determinadas trajetórias. Tais resultados são compatíveis com os efeitos descritos por Notomi (2010) e Joannopoulos et al. (2008), onde a estrutura periódica e seus defeitos geram controle angular e espectral preciso sobre os modos ópticos propagados.

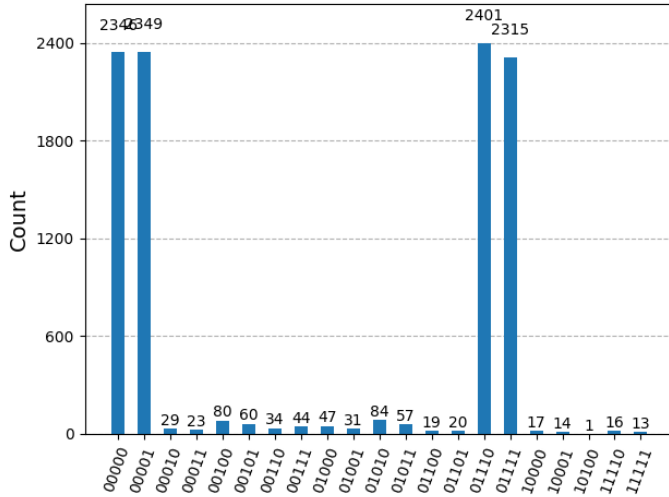


Fig. 9. Padrão interferente obtido com fases controladas, simulando efeitos prismáticos em cristais fotônicos.

Além das simulações ideais, os circuitos foram também executados no backend *FakeOsaka*, com mitigação de ruído configurada no *sampler*. Foram habilitadas as rotinas de *dynamical decoupling*, utilizando a sequência XY4, e de *gate-level twirling* com número de randomizações automáticas. Cada circuito foi amostrado com 10^4 disparos, e as distribuições de saída foram obtidas a partir dos histogramas de medição. Mesmo sob tais condições ruidosas, os padrões qualitativos permaneceram reconhecíveis, o que confirma a robustez da abordagem e sua aplicabilidade em cenários práticos de demonstração.

De modo geral, os circuitos quânticos desenvolvidos neste trabalho mostraram-se eficazes na captura simplificada de propriedades complexas de cristais fotônicos, incluindo bandas proibidas, confinamento, luz lenta e refração negativa. Esses resultados estão em consonância com os efeitos discutidos na literatura clássica, como em Notomi [8] e Joannopoulos e colaboradores [4], nos quais a periodicidade e os defeitos estruturais são associados ao controle angular e espectral preciso da propagação óptica. A transposição desses conceitos para circuitos quânticos digitais reforça o caráter interdisciplinar da proposta, abrindo novas possibilidades para a integração entre óptica e computação quântica, tanto no contexto educacional quanto na construção de protótipos conceituais em óptica quântica.

V. CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou que circuitos quânticos digitais podem ser utilizados para representar qualitativamente fenômenos característicos de cristais fotônicos, como bandas proibidas, confinamento, luz lenta e refração negativa. A implementação em Qiskit permitiu construir analogias diretas entre

modos ópticos discretos e qubits acoplados, evidenciando que mesmo modelos simples capturam efeitos centrais da fotônica.

Além das simulações ideais, a execução em ambiente simulado com backend ruidoso mostrou que, ao aplicar técnicas de mitigação como *dynamical decoupling* na sequência XY4 e *gate-level twirling* com randomizações automáticas, os padrões qualitativos permaneceram estáveis mesmo sob imperfeições experimentais. Esse resultado reforça a robustez da abordagem e sua aplicabilidade em contextos reais de ensino e demonstração.

Em consonância com os efeitos descritos na literatura clássica [8], [4], a proposta confirma que a periodicidade e os defeitos estruturais podem ser transpostos com fidelidade para a computação quântica digital, oferecendo uma via inovadora para a integração entre óptica e informação quântica.

Como continuidade deste trabalho, propõe-se a investigação de algoritmos variacionais, como o Variational Quantum Eigensolver (VQE), aplicados a simulações mais rigorosas de estruturas de banda em cristais fotônicos. Além disso, o avanço dos hardwares quânticos poderá permitir análises quantitativas mais precisas, ampliando o escopo das aplicações e fortalecendo a conexão entre teoria, simulação digital e experimentação em sistemas ópticos reais.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao apoio institucional da UEMASUL e aos colegas da Liga Acadêmica de Computação e Informação Quântica da UEMASUL (LACIQU).

REFERÊNCIAS

- [1] F. P. de Almeida Filho, *Cristais Fotônicos e Bandas Fotônicas*, Monografia de Bacharelado, Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2024.
- [2] E. Yablonovitch, "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics," *Physical Review Letters*, vol. 58, no. 20, pp. 2059–2062, 1987.
- [3] S. John, "Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices," *Physical Review Letters*, vol. 58, pp. 2486–2489, 1987.
- [4] J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn, and R. D. Meade, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*, Princeton: Princeton University Press, 2008.
- [5] M. Notomi, Manipulating light with strongly modulated photonic crystals, *Reports on Progress in Physics*, vol. 73, 096501, 2010.
- [6] S.-Y. Lin, E. Chow, V. Hietala, P. R. Villeneuve, and J. D. Joannopoulos, "Experimental demonstration of guiding and bending of electromagnetic waves in a photonic crystal," *Science*, vol. 282, no. 5387, pp. 274–276, 1998.
- [7] S. John, "Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices," *Physical Review Letters*, vol. 58, pp. 2486–2489, 1987.
- [8] M. Notomi, Manipulating light with strongly modulated photonic crystals, *Reports on Progress in Physics*, vol. 73, 096501, 2010.
- [9] E. Cubukcu, K. Aydin, E. Ozbay, et al., "Negative refraction by photonic crystals," *Nature*, vol. 423, pp. 604–605, 2003.
- [10] E. Kuramochi, "Manipulating and trapping light with photonic crystals from fundamental studies to practical applications," *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 4, pp. 11032–11049, 2016.
- [11] J. D. Joannopoulos, P. Villeneuve, and S. Fan, "Photonic crystals: Putting a new twist on light," *Nature*, vol. 386, pp. 143–149, 1997.
- [12] IBM Quantum, "Qiskit Documentation." [Online]. Available: <https://qiskit.org>.