

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E BIOMÉDICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Erik Chagas Rozal

**Desenvolvimento de Circulador de 3 Portas
Baseado em Cristal Fotônico com Ressonador
de Hexaferrite**

BELÉM – PARÁ

2026

Erik Chagas Rozal

Desenvolvimento de Circulador de 3 Portas Baseado em Cristal Fotônico com Ressonador de Hexaferrite

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Victor Dmitriev

BELÉM – PARÁ

2026

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos os meus companheiros engenheiros e cientistas que se dedicam a transformar o mundo por meio da tecnologia e da ciência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me dar o dom da vida e iluminação para que esse trabalho fosse possível.

Agradeço imensamente aos meus pais Edilberto e Nazaré por sempre estarem ao meu lado e me motivarem em todos os momentos da minha vida, não medindo esforços na dedicação e apoio ao meu sucesso. Obrigado por acreditarem em mim.

Agradeço ao meu irmão Edilberto Filho pelo apoio e amizade em todos os momentos da minha vida.

Agradecimentos especiais ao meu Orientador Professor Victor por acreditar em mim, por toda a paciência e por todos os ensinamentos ao longo da minha caminhada. Sua orientação foi fundamental para meu crescimento profissional e pessoal.

Agradeço também a todos os colegas do Laboratório de Nanofotônica e Nanoeletrônica da UFPA por todas as conversas e ensinamentos, em especial: Amanda Evangelista, Leno Martins, Gildenilson Mendes, Thiago Lima.

Agradeço a todos os amigos e colegas que me acompanharam durante minha graduação, em especial: José Frazão, Ana Carolina, Lucas Maxwel, Anderson Vieira, Josuel Cruz, Jardel Barros, Igor Aranha, Erik Kauã, Igor Silva, Tsuyoshi Farias, Marinaldo Lima.

Esse trabalho teve o suporte do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Pró-Reitoria de Pesquisa (PROPESP) e da Universidade Federal do Pará (UFPA).



EPÍGRAFE

*“O ser grande não é se empenhar em grandes causas:
grande é quem luta até por uma palha,
quando a honra está em jogo”
(William Shakespeare – Hamlet, 1623)*

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um novo circulador de três portas baseado em cristais fotônicos bidimensionais com rede triangular. O circulador é baseado em núcleo de hexaferrite, permitindo a ausência de magnetização externa devido a magnetização intrínseca do material ressonante. Na parte teórica deste trabalho é sugerido um método analítico aproximado para o projeto de ressonadores de hexaferrite. Através de ajustes realizados na cavidade ressonante que compõe o circulador proposto foi possível a obtenção de altos níveis de isolamento, baixas perdas de inserção e excelente largura de banda. Na frequência central de 102 GHz, o circulador projetado, apresenta uma largura de banda operacional de aproximadamente 1,4 GHz, considerando um nível de isolamento de -15 dB e perdas de inserção inferiores a -1 dB.

Palavras-chave: Nanofotônica. Dispositivos não recíprocos. Cristais fotônicos. Circulador. Hexaferrite.

ABSTRACT

In this work, a novel three-port circulator based on two-dimensional photonic crystals with a triangular lattice is presented. The circulator is based on a hexaferrite core, enabling operation with no need for external magnetization due to the intrinsic magnetization of the resonant material. In the theoretical part of this work, an approximate analytical method for the design of hexaferrite resonators is proposed. Through adjustments made to the resonant cavity that compose the proposed circulator, high isolation levels, low insertion losses, and excellent bandwidth were achieved. At the central frequency of 102 GHz, the designed circulator exhibits an operational bandwidth of approximately 1.4 GHz, considering an isolation level of -15 dB and insertion losses lower than -1 dB.

Key words: Nanophotonics. Non-reciprocal devices. Photonic crystals. Circulator. Hexaferrite.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Cristal fotônico e seus arranjos dimensionais em 1D, 2D e 3D	16
Figura 2 – Guia de ondas baseado em cristal fotônico.	18
Figura 3 – Cavidade ressonante com defeitos no centro da estrutura.	19
Figura 4 – Descrição de funcionamento de circulador.	21
Figura 5 – Exemplo de resposta em frequência para dispositivo de 3 portas.	22
Figura 6 – Diagrama da geometria em 2D do circulador e suas características.	25
Figura 7 – Diagrama de dispersão do guia de onda em cristal fotônico.	26
Figura 8 – Modo dipolo excitado no ressonador de hexaferrite.	28
Figura 9 – Cavidade ressonante e desdobramentos dos modos de dipolos rotativos no sentido horário e anti-horário.	29
Figura 10 – Desenho esquemático do circulador com suas partes modificáveis destacadas. a) Geometria completa do dispositivo. b) Figura ampliada do centro da cavidade ressonante e a numeração de sua geometria parametrizada.	30
Figura 11 – Algoritmo de otimização.	31
Figura 12 – Geometria final do circulador após o processo de otimização.	32
Figura 13 – Resposta em frequência do circulador.	33
Figura 14 – Perdas de transmissão em guia de onda de tamanho $20a$	33
Figura 15 – a) Componente E_z do campo elétrico na frequência central $f = 102$ GHz, b) destaque da região central da figura, evidenciando o ressonador operando no modo dipolar.	34
Figura 16 – Parametrização da geometria base do cristal fotônico.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação de circuladores da literatura.	35
Tabela 2 – Parâmetros da Hexaferrite	46
Tabela 3 – Parâmetros geométricos do circulador	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DC	Campo magnético constante
API	Application Programming Interface
Eq.	Equação
Fig.	Figura
GHz	Gigahertz
MEF	Método dos Elementos Finitos
PBG	Photonic Band Gap
THz	Terahertz

LISTA DE SÍMBOLOS

S	Matriz dos parâmetros-S
S_{ij}	Elementos da matriz dos parâmetros-S
ε_h	Permissividade dielétrica da hexaferrite
ε_f	Permissividade dielétrica da ferrite
H_{int}	Campo magnético interno
R	Raio do ressonador de hexaferrite
μ_{eff}	Permeabilidade efetiva da hexaferrite
N_z	Fator de desmagnetização
ω^+	Frequência ressonante do modo dipolo em sentido horário
ω^-	Frequência ressonante do modo dipolo em sentido anti-horário
a	Constante de rede
E_z	Componente z do campo elétrico
∇	Operador nabra
H_c	Campo coercivo interno da hexaferrite
ΔH	linha da ressonância ferromagnética
ε	Permissividade elétrica do meio
μ	Permeabilidade magnética
ε_0	Permissividade elétrica do vácuo
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo
c	Velocidade da luz no vácuo
κ	Elemento não diagonal do tensor de permeabilidade
γ	Razão giromagnética do elétron
ω_m	Frequência de magnetização do material

ω_i	Frequência de magnetização interna efetiva
α	Fator de amortecimento magnético
dB	Decibel

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Organização do Trabalho	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Cristal Fotônico	16
2.2	Estrutura do Circulador	17
2.2.1	Guia de Onda	17
2.2.2	Cavidade Ressonante	18
2.3	Hexaferrite	20
2.4	Circuladores	20
2.4.1	Parâmetros-S e Resposta em Frequência	21
2.4.2	Análise simplificada da matriz de espalhamento	22
3	MÉTODO PROPOSTO	24
3.1	Descrição do Problema	24
3.2	Determinação do Bandgap e Constante de Rede	25
3.3	Excitação do modo dipolo	26
3.4	Análise de desdobramentos	28
3.5	Otimização por Busca Aleatória e Refinamento Adaptativo	29
4	RESULTADOS	32
4.1	Circulador	32
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
5.1	Discussão	35
5.2	Conclusão	37
5.3	Sugestões Para Trabalhos Futuros	38
5.4	Trabalhos Desenvolvidos	38
	REFERÊNCIAS	39
6	APÊNDICES	43
6.1	APÊNDICE A – Equações de Maxwell	43
6.2	APÊNDICE B – Hexaferrite	46
6.3	APÊNDICE C – Cristal Fotônico: Parâmetros Gerais	47

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de sistemas capazes de transmitir e processar informações com maiores taxas de dados, menor consumo energético e maior imunidade a interferências eletromagnéticas impulsionou o estudo de materiais e estruturas [1] capazes de operar em faixas cada vez mais elevadas do espectro eletromagnético. Assim, as regiões da faixa de GHz e THz do espectro possibilitam a interação com comprimentos de onda na escala milimétrica, permitindo a miniaturização de dispositivos e favorecendo o desenvolvimento de componentes mais compactos, adequados para aplicações em sistemas modernos de telecomunicações, como redes 5G e 6G, radares e sensores de alta precisão.

Nesse sentido, à medida que as tecnologias eletrônicas tradicionais passaram a enfrentar limitações físicas na região de micro-ondas e altas frequências, nasce a necessidade de explorar novas abordagens para o controle e a propagação de sinais eletromagnéticos em faixas mais elevadas do espectro eletromagnético. É nesse contexto que nasce a nanofotônica, ramo da engenharia ótica e engenharia elétrica que estuda o desenvolvimento de materiais, estruturas e dispositivos com propriedades eletromagnéticas controláveis e de estruturas capazes de guiar, confinar e manipular a luz em escala nanométrica [2].

Nesse contexto, nas últimas décadas foram descobertos materiais capazes de controlar o fluxo de propagação e emissão de luz em nanoescala, viabilizando novas abordagens para a engenharia de dispositivos fotônicos integrados. Materiais como os cristais fotônicos permitem o controle da propagação da luz por meio da periodicidade espacial de suas propriedades dielétricas, análoga à organização atômica em cristais condutores. Adicionalmente, materiais magnéticos, como os ferrites, apresentam comportamento não recíproco quando submetidos a campos magnéticos externos, possibilitando a quebra da reciprocidade na propagação eletromagnética dentro de guias de ondas acoplados, enquanto materiais como a hexaferrite possui uma magnetização intrínseca que descarta a necessidade de campo magnético externo para tal operação. O estudo e a combinação dessas diferentes classes de materiais estabelecem a base física e tecnológica para o desenvolvimento de dispositivos fotônicos funcionais, como filtros, chaves, divisores de potência e circuladores [3–5].

Nesse sentido, os cristais fotônicos se mostram essenciais no campo da fotônica, sendo constituídos de arranjos dielétricos periódicos capazes de controlar a propagação eletromagnética ao longo da sua estrutura. De maneira análoga aos cristais condutores, nos quais a organização periódica dos átomos origina bandas de energia permitidas e proibidas para elétrons, a periodicidade presente nos cristais fotônicos pode gerar bandas proibidas fotônicas, impedindo a propagação óptica em determinados intervalos de

frequência. Essa propriedade permite o confinamento, o direcionamento e a manipulação da luz por meio da introdução de defeitos na estrutura, que criam canais de propagação dentro da banda proibida, como guias de onda.

Dessa forma, a interação dos cristais fotônicos com a luz possibilita o desenvolvimento de dispositivos que utilizam dessa propriedade para guiar sinais eletromagnéticos em sistemas modernos de telecomunicações, como os dispositivos não-recíprocos. Nesses dispositivos, a resposta à propagação eletromagnética depende do sentido de incidência da onda, de modo que a transmissão entre duas portas não é simétrica quando a entrada e a saída são invertidas. Essa característica é ideal para o desenvolvimento de isoladores e circuladores [6], que são essenciais na proteção de fontes e transmissões de sinais sem que haja reflexões indesejadas. Por isso, os cristais fotônicos são materiais cruciais para o desenvolvimento de dispositivos capazes de controlar o fluxo de sinal óptico de maneira seletiva e direcional.

O presente trabalho propõe o desenvolvimento de um circulador de três portas baseado em cristal fotônico com núcleo de hexaferrite operando em modo ressonante de modo dipolo na faixa de frequências de GHz. O projeto do dispositivo foi realizado a partir de uma série de estudos e análises da estrutura do cristal fotônico e ressonador. Posteriormente, foi realizado um procedimento de otimização de geometria do dispositivo para se tentar alcançar uma eficiência considerada ótima dentro da banda proibida da estrutura. A modelagem do circulador foi feita no software COMSOL Multiphysics [7], utilizando o Método dos Elementos Finitos (FEM) [8] para a realização de cálculos e simulações eletromagnéticas. As simulações foram conduzidas predominantemente em modelo 2D. Adicionalmente, foi realizada uma simulação tridimensional (3D) da estrutura com o objetivo de verificar a consistência dos resultados obtidos no modelo 2D.

1.1 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado como se segue.

No Capítulo 2 é feita uma revisão dos conceitos da nanofotônica e suas estruturas que são essenciais para o entendimento do projeto de circulador.

No Capítulo 3 é vista a metodologia de modelagem, desenvolvimento e otimização do dispositivo e de sua estrutura de cristal fotônico.

O Capítulo 4 mostra os resultados obtidos após a implementação do método de otimização proposto neste trabalho.

Por fim, no Capítulo 5, são mostradas as considerações finais desde trabalho, onde perpassa pela *discussão, conclusão e sugestão para trabalhos futuros*.

Em adicional, no Apêndice 6 é apresentado o detalhamento do material de hexa-

ferrite que compõe o núcleo do ressonador e dos parâmetros de geometria do dispositivo baseado em cristal fotônico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cristal Fotônico

Os cristais fotônicos (do inglês: *Photonic Crystals(PhC)*) são estruturas caracterizadas pela organização periódica de materiais com diferentes constantes dielétricas (como materiais dielétricos em conjunto com o ar), projetadas para afetar a propagação da radiação eletromagnética e o movimento de fótons. Essa periodicidade pode ocorrer em uma dimensão (1D), duas dimensões (2D) ou três dimensões (3D) (ver Fig. 1).

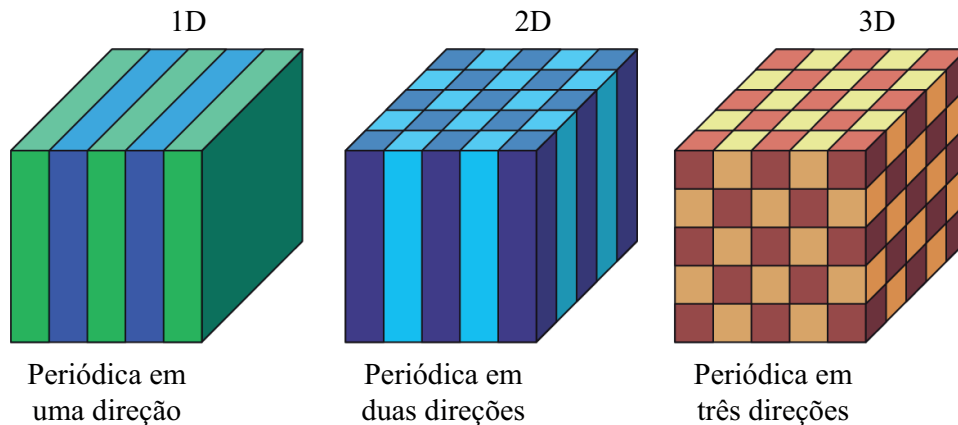


Figura 1 – Cristal fotônico e seus arranjos dimensionais em 1D, 2D e 3D

Fonte: John Joannopoulos (2008) [1] (Adaptado pelo autor).

Como resultado dessa periodicidade, para certas faixas de frequência, a propagação eletromagnética dentro da estrutura é absolutamente zero, o que é chamado de banda fotônica proibida (do inglês: *Photonic Band Gap (PBG)*). Quando a frequência da onda incidente está dentro dessa faixa, a energia não se propaga através do cristal, sendo refletida ou confinada. Além disso, ao introduzir defeitos (pequenas variações na geometria) na estrutura periódica, a periodicidade pode ser quebrada, o que permite a manipulação da luz no material. Esses fenômenos são explorados no desenvolvimento de dispositivos fotônicos capazes de filtrar, guiar ou aprisionar a radiação eletromagnética para um determinado fim.

A propagação e o confinamento de ondas eletromagnéticas em cristais fotônicos podem ser explicados por meio da Eletrodinâmica, sendo descritos matematicamente pelas equações de Maxwell (ver seção 6.1 dos Apêndices). Por meio de manipulações destas equações, pode-se determinar a equação de onda, denominada “equação mestra” (*master equation*) [1], que descreve as propriedades de propagação de ondas eletromagnéticas em cristais fotônicos:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\varepsilon(\vec{r})} \nabla \times \vec{H}(\vec{r}) \right) = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \vec{H}(\vec{r}), \quad (2.1)$$

onde

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \quad (2.2)$$

é a velocidade da luz no espaço livre. Os cálculos das equações referentes à propagação de ondas em cristal fotônico foram realizados utilizando o *software* COMSOL Multiphysics [7], que utiliza o método dos elementos finitos para a resolução numérica das equações de Maxwell.

Portanto, o estudo e a aplicação de cristais fotônicos ampliaram significativamente as possibilidades de projeto de dispositivos fotônicos, permitindo o desenvolvimento de componentes como filtros, acopladores, cavidades ressonantes e dispositivos não recíprocos. A combinação entre periodicidade estrutural e propriedades materiais adequadas estabelece um ambiente controlado para a propagação eletromagnética, possibilitando o ajuste fino das características de transmissão e confinamento conforme os requisitos da aplicação.

2.2 Estrutura do Circulador

Nesta seção são descritas algumas estruturas que são essenciais para o desenvolvimento de circuladores baseados em cristal fotônico, por serem responsáveis pelo controle da propagação, do confinamento e do acoplamento da radiação eletromagnética em meios periódicos.

2.2.1 Guia de Onda

Os guias de onda são estruturas projetadas para conduzir a energia eletromagnética ao longo de uma direção. Em cristais fotônicos, são criadas a partir da inserção de defeitos lineares na estrutura periódica [1], permitindo a passagem de sinal óptico na região de defeito para as frequências localizadas na faixa do PGB, nas quais o cristal fotônico é responsável por não permitir a propagação de ondas na região fora do guia. Na Fig. 2 pode-se observar um guia de ondas baseado em cristal fotônico em funcionamento.

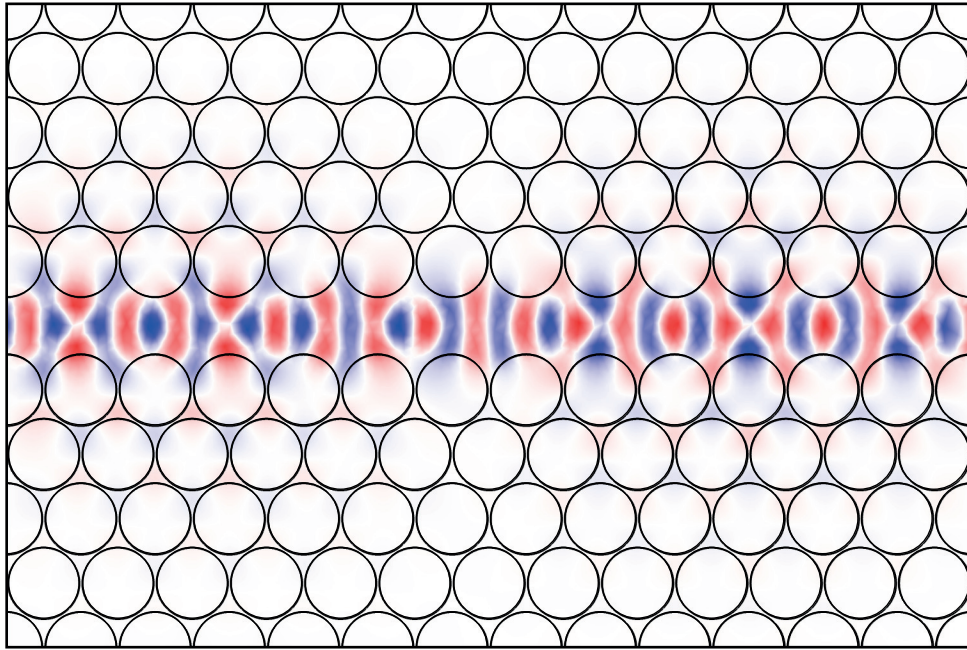


Figura 2 – Guia de ondas baseado em cristal fotônico.

Fonte: Autor.

2.2.2 Cavidade Ressonante

Cavidades ou ressonadores podem ser obtidos por meio da introdução de defeitos pontuais na estrutura periódica de um cristal fotônico [1, 9]. Nessas regiões onde a periodicidade é localmente alterada, surgem modos eletromagnéticos confinados, tais como modos monopolares, dipolares e quadrupolares. A Fig. 3 apresenta uma cavidade ressonante com defeitos no centro da sua estrutura, com seus furos de ar com diâmetros e posições alteradas em relação aos demais elementos da rede.

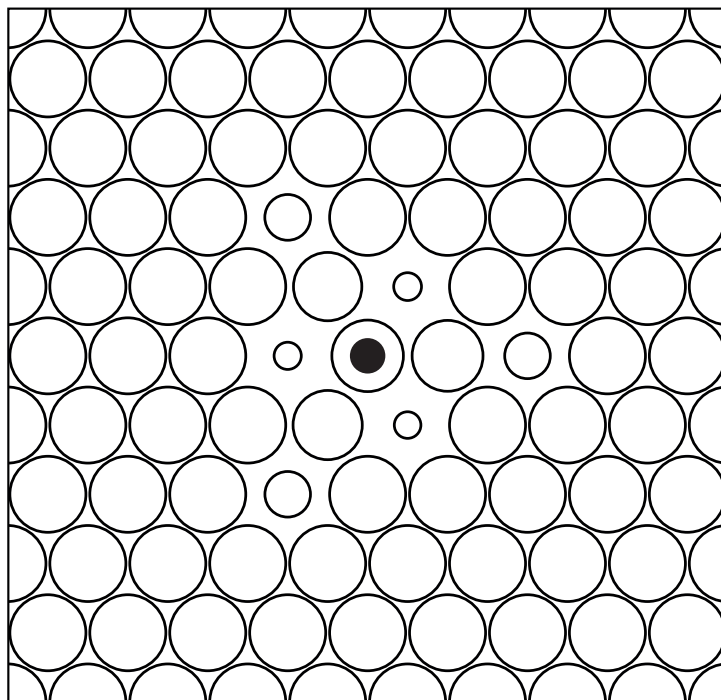


Figura 3 – Cavidade ressonante com defeitos no centro da estrutura.

Fonte: Autor.

2.3 Hexaferrite

Os materiais magnéticos apresentam propriedades que permitem manipular o comportamento de ondas eletromagnéticas. Quando magnetizados, esses materiais passam a exibir comportamento descrito por um tensor de permeabilidade que pode introduzir não reciprocidade na propagação das ondas, sendo por isso frequentemente utilizados em núcleos de cavidades ressonantes [10–12]. Um material magnético que vem sendo bastante estudado na utilização em dispositivos fotônicos é a hexaferrite [13–15].

As hexaferrites são caracterizados por apresentarem alta permissividade dielétrica relativa, $\varepsilon_h = (20 - 22)$, enquanto que em ferrites convencionais esse parâmetro assume valores típicos de $\varepsilon_f = (12 - 15)$. Além disso, a hexaferrite apresenta um campo magnético interno fixo H_{int} . Isso significa que, diferentemente dos núcleos constituídos de materiais de ferrite convencionais, o núcleos de ressonadores baseados em hexaferrite não necessitam de um campo magnético externo gerado por ímãs permanentes [16]. Essa característica permite a produção de dispositivos mais compactos, leves e de menor custo. No entanto, devido ao seu campo magnético fixo, a modificação dos parâmetros magnéticos do hexaferrite para fins de otimização do circulador sem magnetização externa se torna inviável. Ademais, sua maior permissividade dificulta o casamento de impedância entre o guia de onda em cristal fotônico (PhC) e o ressonador de hexaferrite. Na seção 6.2 dos Apêndices são apresentadas mais informações pertinentes sobre a hexaferrite utilizada no projeto do circulador, como seu tensor de permeabilidade.

2.4 Circuladores

Um *circulador* é um dispositivo passivo cuja principal característica é direcionar o sinal de entrada para a próxima porta [6]. Por exemplo, conforme ilustrado na Fig. 4, o sinal aplicado na *porta 1* interage com a cavidade ressonante central e é conduzido para a *porta 3*. No entanto, um sinal injetado na *porta 2* não retorna para a *porta 1*. Essa propriedade torna os circuladores úteis em sistemas que envolvem o acoplamento de transmissores e receptores a uma antena comum, permitindo o compartilhamento do mesmo canal físico ao mesmo tempo em que se mantém o isolamento entre os estágios de transmissão e recepção, impedindo a reflexão de sinais indesejados para componentes sensíveis do circuito.

Dessa forma, os circuladores são classificados como dispositivos *não recíprocos*, pois o comportamento do sinal depende do sentido de propagação entre as portas. Em um circulador ideal de três portas, o sinal aplicado na *porta 1* é direcionado para a *porta 3*, o sinal na *porta 2* é conduzido para a *porta 1*, e o sinal na *porta 3* é direcionado para a *porta 2*. Em contrapartida, em um dispositivo recíproco, a fração de potência transmitida entre duas portas seria a mesma independentemente do sentido de propagação, isto é, a

transmissão de *porta 1* para *porta 3* seria idêntica à transmissão de *porta 3* para *porta 1*.

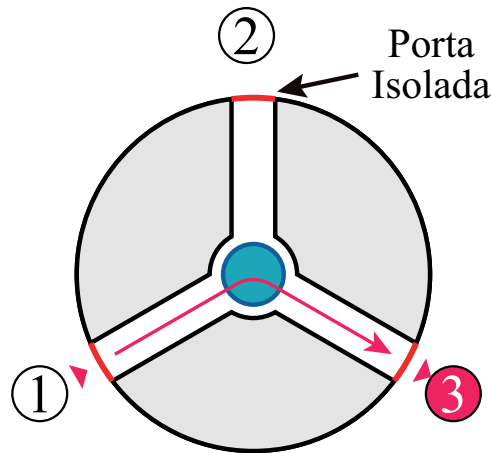


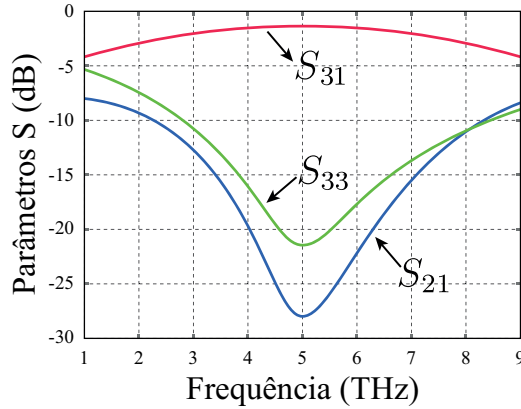
Figura 4 – Descrição de funcionamento de circulator.

Fonte: Autor.

2.4.1 Parâmetros-S e Resposta em Frequência

No estudo de dispositivos nanofotônicos, o desempenho pode ser avaliado por meio de sua resposta em frequência, a partir da qual se determinam os coeficientes de transmissão e reflexão associados a cada porta. Para o circulator ilustrado na Fig. 4, a resposta em frequência é representada de forma hipotética na Fig. 5. Para cada porta são analisadas três grandezas principais: a curva de *transmissão*, correspondente à potência encaminhada para a próxima porta no sentido de circulação; a curva de *isolamento*, que indica o nível de supressão do sinal na porta indesejada; e a curva de *reflexão*, relacionada à parcela de sinal refletida de volta à própria porta excitada.

Em altas frequências, sistemas multiportas são usualmente caracterizados por meio dos *parâmetros-S*, que relacionam as ondas refletidas às ondas incidentes no dispositivo [17]. Esses parâmetros podem ser organizados na forma de uma *matriz de espalhamento*, cuja ordem n corresponde ao número de portas do sistema, sendo cada elemento S_{ij} o coeficiente complexo que descreve a transmissão do sinal da porta j para a porta i , ou a reflexão quando $i = j$. Assim, em um dispositivo de três portas como o da Fig. 4, o parâmetro S_{33} representa a reflexão na porta 3, S_{31} descreve a transmissão do sinal da porta 1 para a porta 3, e S_{12} indica a transmissão do sinal da porta 1 para a porta 2, caracterizando o nível de isolamento em relação à porta não desejada.



Transmissão — Isolamento — Reflexão —

Figura 5 – Exemplo de resposta em frequência para dispositivo de 3 portas.

Fonte: Autor.

2.4.2 Análise simplificada da matriz de espalhamento

A matriz de espalhamento S relaciona as ondas incidentes a e refletidas b em um dispositivo de múltiplas portas segundo

$$b = Sa. \quad (2.3)$$

Cada elemento S_{ij} representa a razão entre a onda que sai pela porta i e a onda incidente na porta j , considerando as demais portas casadas. Para um circuito não recíproco de três portas, como o circulator analisado neste trabalho, a matriz geral pode ser escrita como

$$S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{pmatrix}. \quad (2.4)$$

No caso de um circulator com simetria radial de 120° , o dispositivo é invariável sob rotações no ângulo de simetria. Essa propriedade implica que o comportamento eletromagnético das três portas é equivalente por rotação, resultando nas seguintes relações de simetria:

$$S_{11} = S_{22} = S_{33}, \quad S_{12} = S_{23} = S_{31}, \quad S_{13} = S_{21} = S_{32}. \quad (2.5)$$

Assim, a matriz de espalhamento pode ser reescrita na forma cíclica:

$$S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{13} & S_{11} & S_{12} \\ S_{12} & S_{13} & S_{11} \end{pmatrix}. \quad (2.6)$$

Essa estrutura matricial reflete diretamente a simetria de 120° do dispositivo e descreve o regime de circulação quando um dos termos de transmissão é maximizado enquanto o termo oposto é minimizado, caracterizando o comportamento não recíproco do circulador.

3 MÉTODO PROPOSTO

No Capítulo anterior, foram discutidos os conceitos básicos de cristais fotônicos, materiais magnéticos e circuladores. Neste Capítulo, será abordado o procedimento de desenvolvimento, modelagem e otimização dos dispositivos fotônicos estudados neste trabalho.

3.1 Descrição do Problema

O dispositivo proposto neste trabalho consiste em um circulador de três portas com simetria radial de 120° , depositado sobre um substrato dielétrico de silício com permissividade elétrica relativa $\varepsilon_r = 11,56$, contendo furos de ar de raio $r = 0,48a$ distribuídos periodicamente ao longo de toda a estrutura. Além disso, o dispositivo possui um núcleo ressonante de hexaferrite modelado na forma de um cilindro envolvido por um furo de ar e posicionado no centro da junção em Y formada pelos três guias de onda, os quais são obtidos pela remoção de uma linha de furos da rede periódica triangular do cristal fotônico. A simetria rotacional de ordem três da estrutura permite que a análise seja realizada considerando a excitação de apenas uma das portas, sendo o comportamento das demais obtido por simetria. Na Fig. 6 está representada a geometria do circulador discretizada em função da constante de rede a e a ilustração de sua simetria radial.

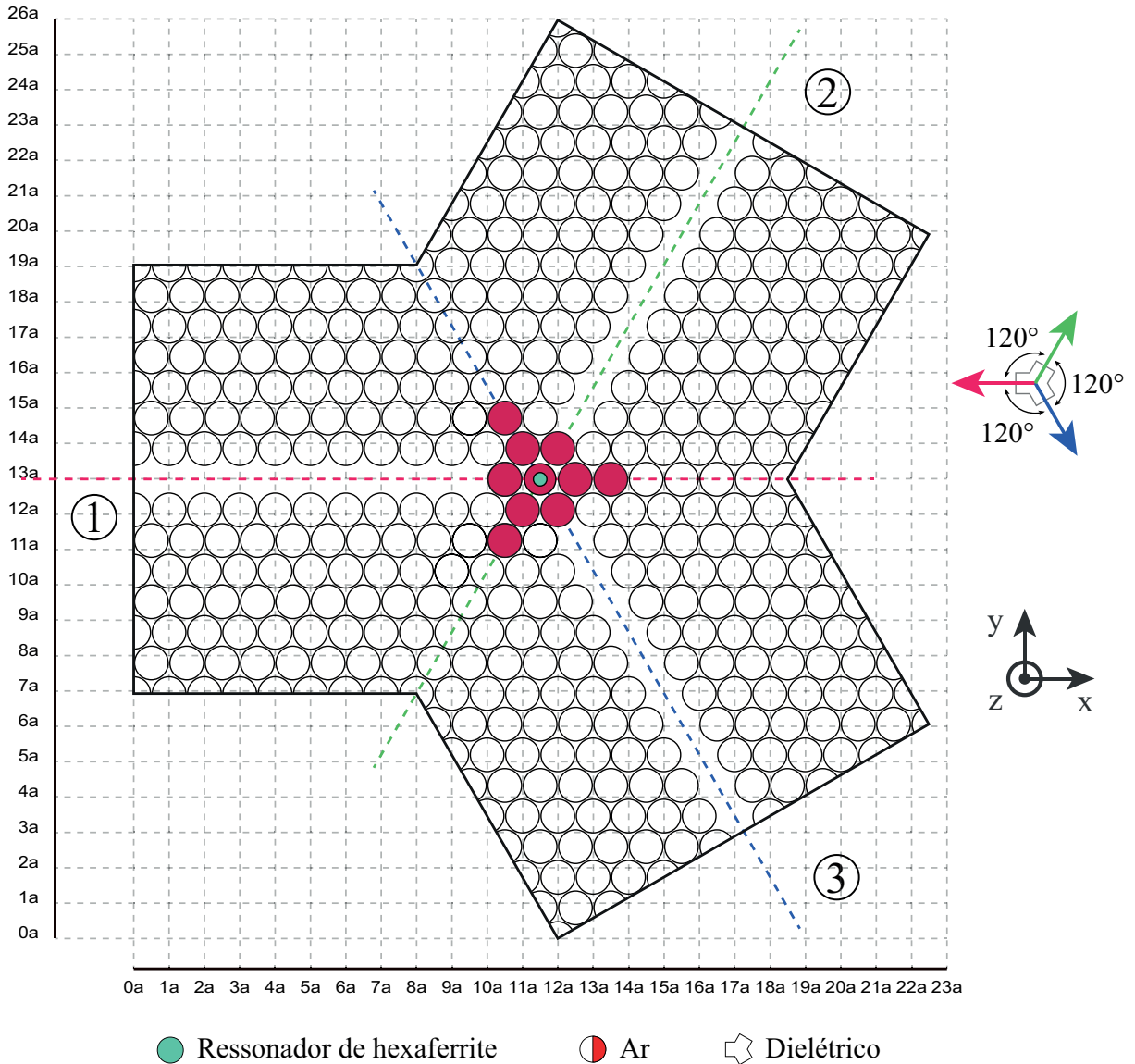


Figura 6 – Diagrama da geometria em 2D do circulator e suas características.

Fonte: Autor.

3.2 Determinação do Bandgap e Constante de Rede

A escolha do raio dos furos e da permissividade elétrica do substrato possibilita a determinação da região de bandgap normalizada da estrutura por meio do cálculo numérico da estrutura de bandas do cristal fotônico utilizando o software *MEEP* [18]. A partir dessa análise, foi identificada uma região de bandgap normalizada no intervalo $[0,454 - 0,538]$. Utilizando a definição de frequência normalizada em cristais fotônicos,

$$\tilde{f} = \frac{\omega a}{2\pi c} = \frac{f a}{c}, \quad (3.1)$$

foi definida a frequência central de operação como $f = 102$ GHz. Considerando o valor

central do intervalo de bandgap normalizado, determinou-se a constante de rede ideal como $a = 1,488$ mm.

A relação entre a frequência angular ω e o vetor de onda k é denominada relação de dispersão do material. As características de dispersão do guia de onda baseado em cristal fotônico (PhC) são apresentadas na Fig. 7. As curvas foram calculadas dentro da primeira zona de Brillouin, ao longo da direção y , com o vetor de onda variando de 0 a π/a . As linhas sólidas representam as curvas de dispersão correspondentes aos modos propagantes do guia de onda introduzido por defeito na estrutura periódica.

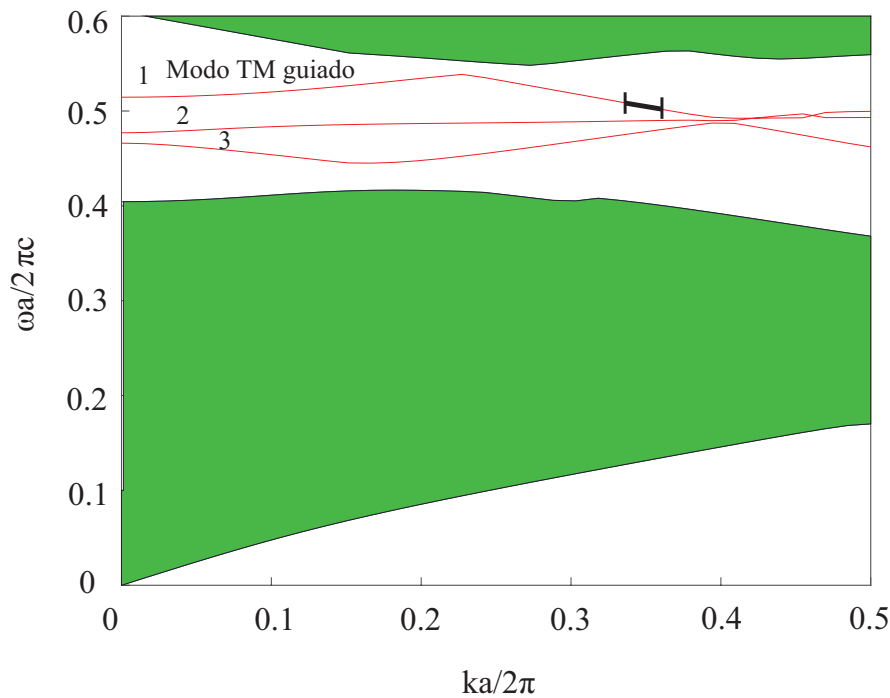


Figura 7 – Diagrama de dispersão do guia de onda em cristal fotônico.

Fonte: Autor.

A estrutura apresenta uma banda proibida no intervalo normalizado de 0,454 a 0,538 (em unidades de c/a), o que corresponde aproximadamente à faixa de frequências de 91,46 a 108,39 GHz para o valor de constante de rede adotado. De modo geral, um guia de onda inserido na região de bandgap pode suportar múltiplos modos guiados. Entretanto, para o regime de circulação do dispositivo proposto, é utilizado o modo TM par fundamental, identificado como modo 1.

3.3 Excitação do modo dipolo

A determinação do raio do núcleo de hexaferrite foi inicialmente realizada por meio de abordagem analítica baseada na condição de ressonância do modo dipolar fundamental do cilindro magnetizado. Considerando o material sob polarização magnética,

suas propriedades passam a ser descritas por um tensor de permeabilidade giromagnético, cujos elementos dependem do campo magnético interno H_{int} , da magnetização remanente $4\pi M_r$ e da frequência de operação f .

Desprezando inicialmente a separação espectral entre os modos dipolares contrarrotativos e introduzindo a permeabilidade efetiva do material μ_{eff} , o raio do ressonador pode ser estimado pela seguinte expressão,

$$R = \frac{1.84 c}{2\pi f \sqrt{\varepsilon_h \mu_{\text{eff}}}}, \quad (3.2)$$

onde ε_h representa a permissividade elétrica do hexaferrite, c é a velocidade da luz no vácuo e f é a frequência de operação desejada. O fator numérico 1.84 está associado à condição de ressonância do modo dipolar fundamental em uma cavidade cilíndrica.

Como a permeabilidade efetiva μ_{eff} depende do próprio raio por meio do fator de desmagnetização N_z e do campo magnético interno H_{int} , foi empregado o método de aproximações sucessivas para obtenção de um valor consistente. Inicialmente, assume-se $\mu_{\text{eff},0} = 1$, correspondente ao caso não magnetizado, obtendo-se um raio inicial R_0 . Em seguida, utilizando-se o valor estimado de R_0 , calcula-se o fator de desmagnetização N_z , o campo interno H_{int} e, conseqüentemente, os parâmetros magnéticos normalizados p e σ , que permitem determinar os elementos do tensor de permeabilidade e a nova estimativa $\mu_{\text{eff},1}$. Substituindo-se este valor na expressão da ressonância dada pela Eq. 3.2, obtém-se o raio R_1 .

O procedimento é repetido até que a diferença entre aproximações sucessivas se torne desprezível, indicando convergência. Para a frequência de operação escolhida e para os parâmetros magnéticos adotados, observou-se convergência já nas primeiras iterações, resultando em um raio aproximado de $R \approx 0,19$.

Esse valor analítico foi posteriormente validado por meio de simulações numéricas utilizando a API LiveLink for MATLAB acoplada ao COMSOL Multiphysics, nas quais o raio do núcleo foi varrido em torno do valor estimado. A análise espectral da cavidade permitiu identificar o aparecimento do modo dipolar dentro da região de bandgap, sendo selecionado o raio $r = 0,191$ por apresentar o modo dipolo aproximadamente no centro do intervalo espectral desejado. Na Fig. 8 é apresentado o modo dipolo excitado no núcleo de hexaferrite.

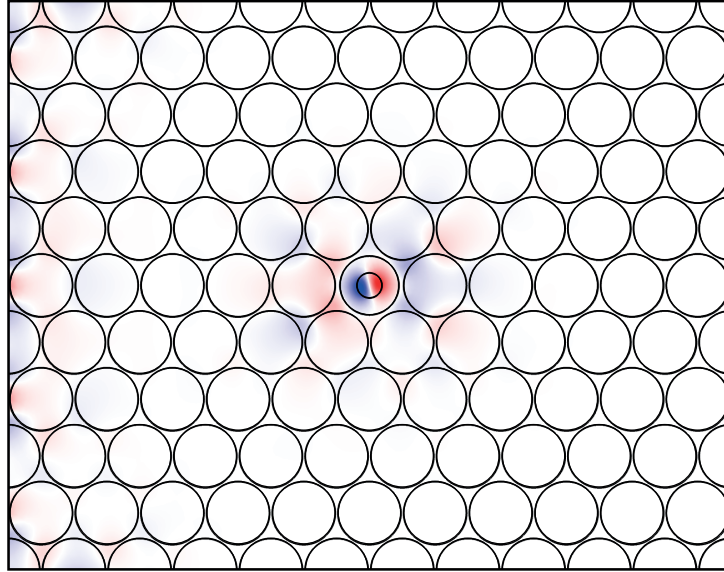


Figura 8 – Modo dipolo excitado no ressonador de hexaferrite.

Fonte: Autor.

3.4 Análise de desdobramentos

A análise do desdobramento de frequências ao longo do aumento do parâmetro k/μ é essencial para compreender os modos dipolares rotativos no ressonador magnetizado. Variando-se o parâmetro k/μ , observam-se dois picos distintos na resposta em frequência da estrutura do ressonador, em que cada pico é caracterizado por um dipolo girante excitado no núcleo. As frequências ω^+ e ω^- são caracterizadas pelos valores de frequência do dipolo girante em sentido anti-horário e horário, respectivamente. À medida que a giromagnetização do material cresce, a separação entre as frequências ω^+ e ω^- aumenta, modificando o regime de operação do dispositivo. A posição da frequência de trabalho em relação a essas curvas determina se o ressonador opera em regime predominantemente estacionário, rotativo ou intermediário, influenciando diretamente os níveis de isolamento e as perdas de inserção do circulador. Dessa forma, o estudo do comportamento do ressonador em função de k/μ permite definir a condição ótima de funcionamento e garantir uma boa largura de banda onde há a circulação desejada.

O desdobramento de frequências dos modos dipolo ω^+ e ω^- é mostrado na Fig. 9. Pela análise dessa figura, percebe-se que quanto maior o valor do parâmetro k/μ , maior é o desdobramento de frequências dos modos dipolo que giram em sentidos opostos. De modo geral, quanto maior o desdobramento de frequências dos modos dipolo, maior a largura de banda do dispositivo, conforme a teoria geral de circuladores [6].

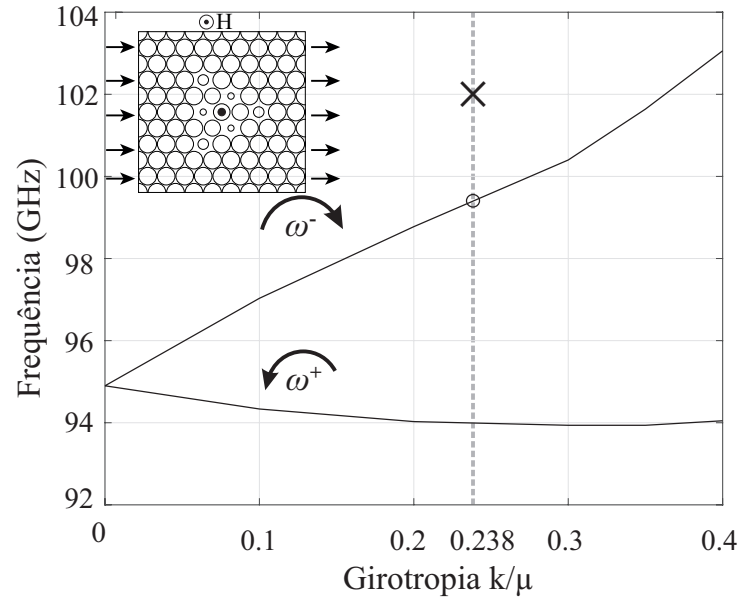


Figura 9 – Cavidade ressonante e desdobramentos dos modos de dipolos rotativos no sentido horário e anti-horário.

Fonte: Autor.

3.5 Otimização por Busca Aleatória e Refinamento Adaptativo

Com o objetivo de produzir a circulação dos sinais de entrada dos guias de onda foram introduzidos defeitos em furos próximos ao núcleo de hexaferrite, variando-se os seus raios e posições no eixo de simetria. Assim, a geometria da parte central do dispositivo foi parametrizada utilizando 11 parâmetros numéricos, de forma que fosse possível variar o comportamento do circulador de forma controlada para se observar sua resposta em frequência. Na Fig. 10 pode-se observar um desenho esquemático do circulador e suas partes modificáveis destacadas. É importante ressaltar que, para preservar a simetria radial de 120° da estrutura, as alterações realizadas nos furos de uma das regiões foram replicadas de forma idêntica nas demais divisões angulares de 120° do dispositivo.

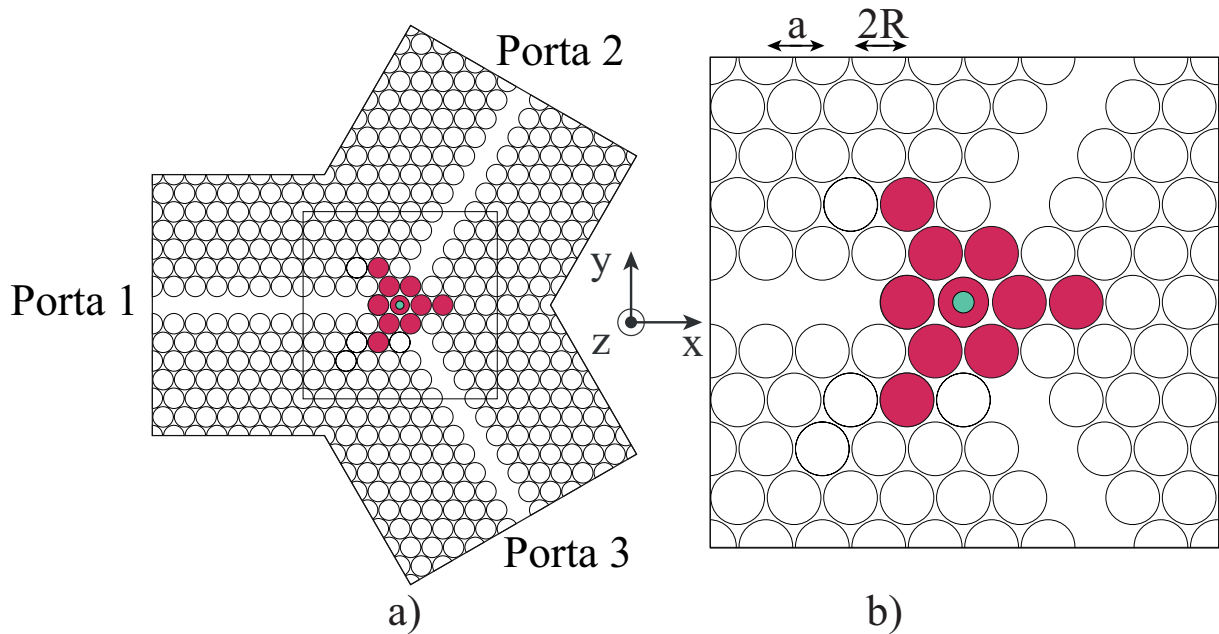


Figura 10 – Desenho esquemático do circulator com suas partes modificáveis destacadas. a) Geometria completa do dispositivo. b) Figura ampliada do centro da cavidade ressonante e a numeração de sua geometria parametrizada.

Fonte: Autor.

A otimização da geometria do circulator foi feita por meio de uma busca aleatória de parâmetros em uma região previamente estabelecida com refinamento adaptativo do espaço de simulação. Essa abordagem foi escolhida devido à natureza não linear do problema e ao elevado custo computacional das simulações eletromagnéticas realizadas pelo Método dos Elementos Finitos (FEM), cujo tempo médio de simulação inviabiliza o uso eficiente de métodos baseados em gradiente ou algoritmos populacionais de grande escala.

Inicialmente, definiu-se um intervalo amplo de variação para os principais parâmetros geométricos do dispositivo, incluindo os diâmetros e posições dos furos de ar próximos ao núcleo da estrutura. Dentro desses intervalos, conjuntos de parâmetros foram gerados aleatoriamente por meio de scripts desenvolvidos em MATLAB, sendo posteriormente enviados ao ambiente do COMSOL Multiphysics através da API LiveLink. Para cada configuração simulada, foram extraídos os parâmetros de espalhamento do dispositivo, especialmente os níveis de isolamento entre portas e as perdas de inserção na frequência central de operação.

A partir da análise dos resultados obtidos, foram identificadas regiões do espaço paramétrico associadas a uma melhor resposta eletromagnética. Essas regiões foram então utilizadas para redefinir intervalos de busca mais restritos, caracterizando um processo de refinamento adaptativo do domínio de simulação. O procedimento foi repetido iterativa-

mente até que se alcançasse parâmetros de resposta em frequência considerados ótimos. Na Fig. 11 está representado o fluxograma do algoritmo de otimização. Assim como ilustrado no fluxograma, o algoritmo pode ser executado quantas vezes forem necessárias até se alcançar o resultado desejado.

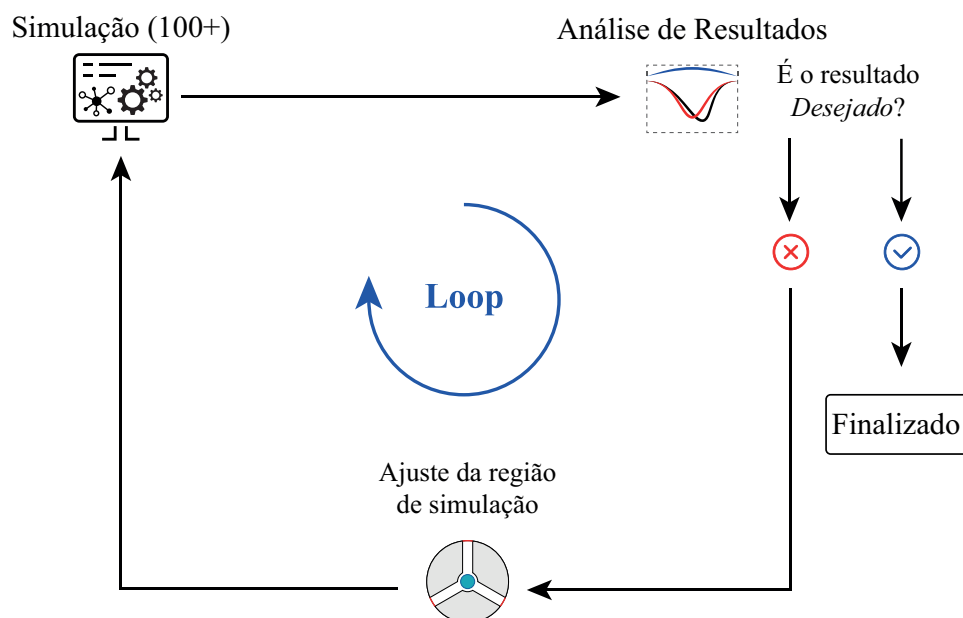


Figura 11 – Algoritmo de otimização.

Fonte: Autor.

4 RESULTADOS

No Capítulo anterior, foi visto o procedimento metodológico de otimização e modelagem do circulador. Neste Capítulo, são mostrados os resultados do procedimento para o dispositivo estudado. Na Seção 4.1, são mostrados os resultados referentes ao circulador baseado em cristal fotônico.

4.1 Circulador

Na Fig. 12a está representada a geometria final do circulador após o processo de otimização apresentado na Seção 3.5. Na Fig. 12b se pode observar um corte aproximado da estrutura central do circulador onde ocorreu o processo de otimização de geometria.

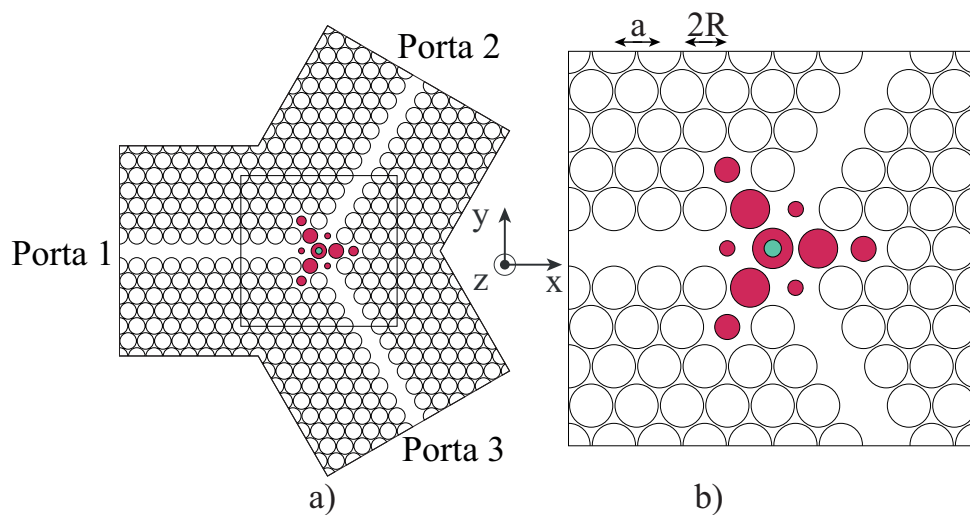


Figura 12 – Geometria final do circulador após o processo de otimização.

Fonte: Autor.

Em adicional, na seção 6.3 dos Apêndices são apresentadas informações mais detalhadas sobre os parâmetros de geometria do circulador otimizado e funcional. Na Fig. 13 é apresentada a resposta em frequência do circulador após o procedimento de otimização.

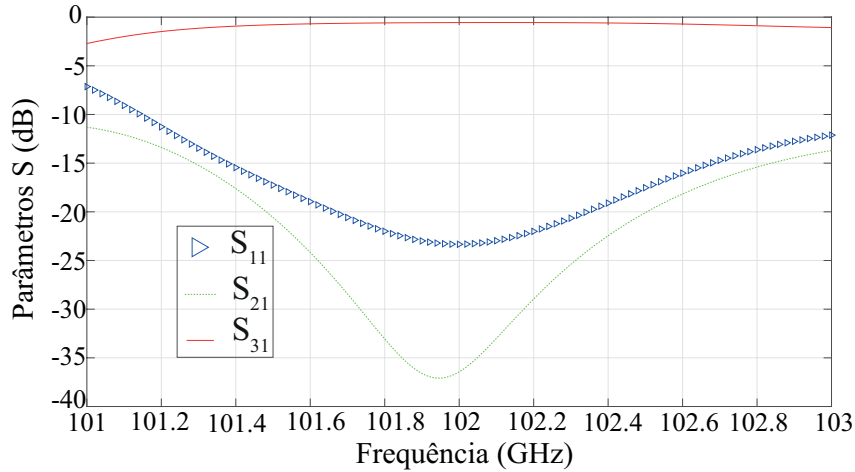
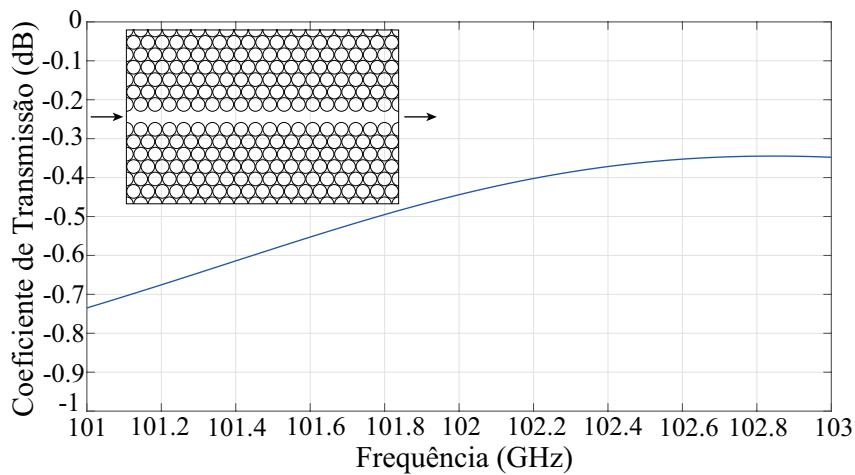


Figura 13 – Resposta em frequência do circulator.

Fonte: Autor.

A frequência central é de 102 GHz e a largura de banda é de 1.4 GHz com nível de isolamento de -15 dB. As perdas de inserção são menores que -1 dB. Realizando a simulação de guia de onda de comprimento $20a$, é possível indentificar as perdas de transmissão correspondentes à entrada e saída dos guias de onda do dispositivo. Assim, ao observar o gráfico da Fig. 14, podemos afirmar que as perdas do guia são responsáveis por cerca de metade das perdas de inserção do circulator.

Figura 14 – Perdas de transmissão em guia de onda de tamanho $20a$.

Fonte: Autor.

A estrutura do componente do campo elétrico E_z no circulator na frequência central 102 GHz é mostrada na Fig. 15.

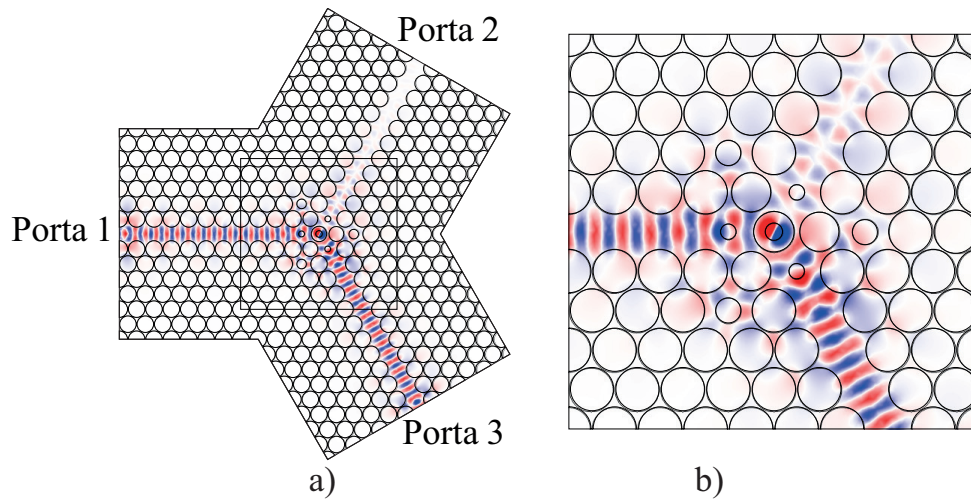


Figura 15 – a) Componente E_z do campo elétrico na frequência central $f = 102$ GHz, b) destaque da região central da figura, evidenciando o ressonador operando no modo dipolar.

Fonte: Autor.

Para validar os cálculos numéricos realizados em 2D, também foi realizada uma análise tridimensional (3D) do circulador de hexaferrite, com altura do dispositivo sendo de $h = 0,6a$. A comparação entre os resultados obtidos nas abordagens 2D e 3D mostra que as respostas em frequência do circulador nesses dois casos não apresentam diferenças significativas. No entanto, a modelagem em 2D reduz consideravelmente o tempo de cálculo, permitindo que a análise e a otimização do dispositivo sejam realizadas de forma mais eficientes.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Discussão

Diversas configurações de circuladores baseados em cristais fotônicos com ferrite propostas na literatura tendem a tornar o processo de fabricação mais complexo. Em contraste, a solução adotada neste trabalho, baseada na utilização de um único cilindro de hexaferrite posicionado no central da junção em Y, apresenta uma configuração estrutural simples, compacta e mais viável do ponto de vista construtivo.

Na Tabela 1 é possível se observar que o circulador proposto apresenta desempenho comparável aos dispositivos relatados na literatura, com a vantagem de apresentar uma estrutura mais compacta, uma frequência central elevada e altos níveis de isolamento e largura de banda.

Tabela 1 – Comparação de circuladores da literatura.

Trabalho	Frequência Central (GHz)	Isolação (dB)	Banda (GHz)	Material
Este trabalho	102	-37,2	1,4	Hexaferrite
[9]	94,5	-17,5	2,31	Ferrite
[13]	35,2	-8,7	2,79	Hexaferrite
[16]	28,9	-37	0,289	Hexaferrite
[19]	73,5	-20	2.4	Hexaferrite
[20]	9,7	-53,36	0,194	Ferrite
[21]	41,4	-28,1	3	Hexaferrite
[22]	32,06	-36,1	2,9	Hexaferrite
[23]	98,45	-52,3	0,96	Ferrite
[24]	30	-48	0,882	Ferrite

O projeto de circuladores baseados em cristais fotônicos ainda é, em grande parte, conduzido por abordagens empíricas, uma vez que não existem procedimentos consolidados para a obtenção direta das características desejadas de circulação. Frequentemente, o casamento de impedância e as condições necessárias para o estabelecimento do regime de circulação são alcançados por meio de ajustes sucessivos e tentativas iterativas. No presente trabalho, a obtenção de uma primeira estimativa dos parâmetros do ressonador de hexaferrite foi realizada por meio de um método analítico aproximado [25], o que permitiu reduzir significativamente a dependência exclusiva de técnicas numéricas custosas em termos computacionais. O ajuste fino do casamento de impedância foi efetuado por meio

do método de otimização por busca aleatória proposto na seção 3.5, ressaltando-se que a configuração de casamento apresentada não é única, podendo se tratar de uma região de eficiência de mínimo local, podendo existir outras soluções geométricas equivalentes ou melhores.

Apesar da otimização por busca aleatória se apresentar promissora para estruturas mais compactas, em dispositivos complexos (como circuladores com mais de 3 portas, com formato T, formato de garfo e divisores de potência [23,26,27]) essa abordagem pode ser ineficiente conforme o número de parâmetros aumenta, dado o seu fator aleatório e a alta probabilidade de convergir para regiões de mínimo local não promissoras. Foram feitas cerca de 800 simulações utilizando o método de otimização proposto, além das análises feitas entre cada *lote* de simulações realizadas, exigindo um tempo de otimização considerável (em torno de 15 minutos para cada simulação). Sendo assim, abordagens utilizando aprendizado de máquina (do inglês: *machine learning*) para otimização de dispositivos fotônicos estão sendo amplamente estudadas como uma alternativa aos métodos de otimização convencionais, apresentando uma melhora significativa no tempo de treinamento [28–30].

Outro aspecto relevante do projeto é acerca dos desafios associados ao uso de hexaferrites devido aos valores fixos do campo magnético interno característico desses materiais, o que pode limitar a flexibilidade do projeto. Uma alternativa consiste na seleção, para cada aplicação, de um material de hexaferrite com campo coercivo interno H_c adequado à frequência de operação desejada. Em princípio, o projeto pode ser inicialmente conduzido considerando um sistema com magnetização externa ajustável, permitindo a determinação do campo interno ótimo; posteriormente, pode-se selecionar o hexaferrite com valor de H_c correspondente. Entretanto, a disponibilidade comercial de materiais com diferentes valores de campo coercivo ainda é limitada. Além disso, a hexaferrite possui perdas de inserção relativamente elevadas devido à alta permissividade dielétrica desses materiais, favorecendo maior concentração do campo eletromagnético no interior do elemento ressonante, aumentando as perdas quando comparadas a dispositivos convencionais baseados em ferrites.

5.2 Conclusão

Neste Trabalho de Conclusão de Curso, foi apresentada a modelagem e desenvolvimento de um circulador de 3 portas baseado em cristal fotônico com núcleo de hexaferrite e simetria radial de 120° . O presente trabalho também teve como objetivo demonstrar ao leitor quais passos e análises seguir para a modelagem de dispositivos fotônicos baseados em cristal fotônico, sendo possível desenvolver e modelar um circulador baseado na metodologia e descrições presentes neste trabalho.

Sendo assim, para o desenvolvimento do dispositivo, foi realizado o estudo extenso de sua estrutura de cristal fotônico para analisar seu funcionamento, a excitação do ressonador e encontrar sua região de circulação. Após isso, para se alcançar uma excelente eficiência do dispositivo, foi aplicado um método de busca aleatória, o qual consistia em sucessivas simulações em torno de regiões da geometria parametrizada que produziam respostas em frequência consideradas ótimas para o funcionamento do dispositivo, buscando melhorar ainda mais a resposta eletromagnética do circulador.

Dessa forma, foi possível desenvolver um dispositivo simples e compacto com excelente largura de banda e baixas perdas por inserção, evidenciando um bom funcionamento na região de circulação. A partir disso, de uma forma geral, a análise de estruturas somada ao método de otimização proposto se apresentaram promissores para a modelagem e desenvolvimento de dispositivos circuladores de 3 portas.

5.3 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, são sugeríveis os seguintes estudos:

- Utilizar a metodologia de otimização proposta 3.5 para outros dispositivos mais complexos.
- Investigar uma abordagem de otimização utilizando aprendizado por reforço (*Reinforcement Learning (RL)*) [28] para dispositivos fotônicos.
- Averiguar uma abordagem de modelagem inversa utilizando Redes Neurais Profundas (*Deep Neural Networks (DNNs)*) [9] para circuladores de 3 portas e outros dispositivos mais complexos.

5.4 Trabalhos Desenvolvidos

O presente Trabalho de Conclusão de Curso teve contribuição aos seguintes trabalhos:

- V. Dmitriev, L. R. Martins and E. C. Rozal, "*Magnetless hexaferrite millimeter-wave and THz photonic crystal-based three-port circulators*", *Journal of Optics*, (2025). [25]
- V. Dmitriev, L. Martins and E. Rozal, "*Circulador de três portas baseado em cristal fotônico com núcleo de hexaferrite*", *Anais do SBrT*, (2024). [31]

REFERÊNCIAS

- [1] J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn, and R. D. Meade, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*. Princeton University Press, 2 ed., 2008.
Citado 5 vezes nas páginas 13, 16, 17, 18 e 43.
- [2] Y. Shen and P. Prasad, “Nanophotonics: a new multidisciplinary frontier,” *Applied Physics B*, vol. 74, no. 7, pp. 641–645, 2002.
Citado na página 13.
- [3] V. Dmitriev and M. N. Kawakatsu, “Nonreciprocal optical divider based on two-dimensional photonic crystal and magneto-optical cavity,” *Applied Optics*, vol. 51, no. 24, pp. 5917–5920, 2012.
Citado na página 13.
- [4] V. Dmitriev and G. Portela, “Optical component: nonreciprocal three-way divider based on magneto-optical resonator,” *Applied Optics*, vol. 52, no. 27, pp. 6657–6662, 2013.
Citado na página 13.
- [5] V. Dmitriev and W. Castro, “Dynamically controllable graphene terahertz splitters with nonreciprocal properties,” *Applied Optics*, vol. 58, no. 24, pp. 6513–6518, 2019.
Citado na página 13.
- [6] J. Helszajn, *The Stripline Circulators: Theory and Practice*. John Wiley & Sons, Inc., 2008.
Citado 4 vezes nas páginas 14, 20, 28 e 46.
- [7] “COMSOL Multiphysics.” <http://www.comsol.com>.
Citado 2 vezes nas páginas 14 e 17.
- [8] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, P. Nithiarasu, and J. Zhu, *The finite element method*, vol. 3. McGraw-hill London, 1977.
Citado na página 14.
- [9] V. Dmitriev, L. Martins, G. Portela, and L. Assunção, “Quadrupole resonator mode versus dipole one in photonic crystal ferrite circulators,” *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, p. 100954, 2021.
Citado 3 vezes nas páginas 18, 35 e 38.

- [10] V. Harris and A. Sokolov, “The self-biased circulator: Ferrite materials design and process considerations,” *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, vol. 32, pp. 97–108, 2019.
Citado na página 20.
- [11] F. Fan, S.-J. Chang, C. Niu, Y. Hou, and X.-H. Wang, “Magnetically tunable silicon-ferrite photonic crystals for terahertz circulator,” *Optics Communications*, vol. 285, no. 18, pp. 3763–3769, 2012.
Citado na página 20.
- [12] Y. Wang, D. Zhang, S. Xu, B. Xu, and Z. Dong, “H-plane cross-shaped waveguide circulator in magneto-photonic crystals with five ferrite posts,” *Chinese Optics Letters*, vol. 15, p. 111601, 2017.
Citado na página 20.
- [13] R. Bowrothu, H.-I. Kim, C. S. Smith, and D. P. Arnold, “35-GHz Barium Hexaferrite/PDMS Composite-Based Millimeter-Wave Circulators for 5G Applications,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 68, pp. 5065–5071, 2020.
Citado 2 vezes nas páginas 20 e 35.
- [14] L. Alyabyeva, A. Prokhorov, D. Vinnik, and V. Anzin, “Lead-substituted barium hexaferrite for tunable terahertz optoelectronics,” *NPG Asia Mater*, vol. 13, 2021.
Citado na página 20.
- [15] V. Laur, G. Vérissimo, P. Quéffélec, L. A. Farhat, and H. Alaaeddine, “Self-Biased Y-Junction Circulators Using Lanthanum- and Cobalt-Substituted Strontium Hexaferrites,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, pp. 4376–4381, 2015.
Citado na página 20.
- [16] S. Oliver, P. Shi, N. McGruer, and C. Vittoria, “Integrated self-biased hexaferrite microstrip circulators for millimeter-wavelength applications,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, pp. 385–387, 2001.
Citado 2 vezes nas páginas 20 e 35.
- [17] P. J. Pupalaiakis, *S-Parameters for Signal Integrity*. Cambridge University Press, 2020.
Citado na página 21.

- [18] A. F. Oskooi, D. Roundy, M. Ibanescu, P. Bermel, J. D. Joannopoulos, and S. G. Johnson, “Meep: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the fdtd method,” *Computer Physics Communications*, vol. 181, pp. 687–702, 2010.
Citado na página 25.
- [19] Y. Akaiwa and T. Okazaki, “An application of a hexagonal ferrite to a millimeter-wave y circulator,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 10, no. 2, pp. 374–378, 1974.
Citado na página 35.
- [20] B. Xu, D. Zhang, X. Zeng, Y. Wang, and Z. Dong, “Magnetic photonic crystal circulator based on gradient changing width waveguide,” *Optik*, vol. 185, pp. 132–137, 2019.
Citado na página 35.
- [21] J. Peurifoy, Y. Shen, L. Jing, Y. Yang, F. Cano-Renteria, B. G. DeLacy, J. D. Joannopoulos, M. Tegmark, and M. Soljačić, “Nanophotonic particle simulation and inverse design using artificial neural networks,” *Science advances*, vol. 4, no. 6, p. eaar4206, 2018.
Citado na página 35.
- [22] N. Zeina, H. How, C. Vittoria, R. West, C. Carosella, and V. Folen, “Self-biasing circulators operating at k_a -band utilizing m-type hexagonal ferrites,” in *IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG)*, pp. 458–458, IEEE, 1992.
Citado na página 35.
- [23] V. Dmitriev, G. Portela, and L. Martins, “Photonic crystal-based circulators with three and four ports for sub-terahertz region,” *Photonic Network Communications*, vol. 33, no. 3, pp. 303–312, 2017.
Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.
- [24] X. Jin, Z. Ouyang, Q. Wang, M. Lin, G. Wen, and J. Wang, “Highly compact circulators in square-lattice photonic crystal waveguides,” *PLoS ONE*, vol. 9, no. 11, p. e113508, 2014.
Citado na página 35.
- [25] V. Dmitriev, L. R. Martins, and E. C. Rozal, “Magnetless hexaferrite millimeter-wave and thz photonic crystal-based three-port circulators,” *Journal of Optics*, 2025.
Citado 2 vezes nas páginas 35 e 38.

- [26] V. Dmitriev, G. Portela, and L. Martins, “Three-port circulators with low symmetry based on photonic crystals and magneto-optical resonators,” *Photonic Network Communications*, vol. 31, no. 1, pp. 56–64, 2016.
Citado na página 36.
- [27] V. Dmitriev, F. Nobre, W. Castro, G. Portela, and L. Assunção, “Nonreciprocal dynamically tunable power dividers by three (1x3) based on graphene for terahertz region,” *Optics Communications*, vol. 506, p. 127312, 2022.
Citado na página 36.
- [28] R. Li, C. Zhang, W. Xie, Y. Gong, F. Ding, H. Dai, Z. Chen, F. Yin, and Z. Zhang, “Deep reinforcement learning empowers automated inverse design and optimization of photonic crystals for nanoscale laser cavities,” *Nanophotonics*, vol. 12, no. 2, pp. 319–334, 2023.
Citado 2 vezes nas páginas 36 e 38.
- [29] D. Witt, J. Young, and L. Chrostowski, “Reinforcement learning for photonic component design,” *APL Photonics*, vol. 8, no. 10, p. 106101, 2023.
Citado na página 36.
- [30] Z. Liu, D. Zhu, L. Raju, and W. Cai, “Tackling photonic inverse design with machine learning,” *Advanced Science*, vol. 8, no. 5, p. 2002923, 2021.
Citado na página 36.
- [31] V. Dmitriev, L. Martins, and E. Rozal, “Circulador de três portas baseado em cristal fotônico com núcleo de hexaferrite,” in *Anais do SBrT 2024*, 2024.
Citado na página 38.

6 APÊNDICES

6.1 APÊNDICE A – Equações de Maxwell

A propagação e o confinamento da radiação eletromagnética em cristais fotônicos podem ser compreendidos a partir dos princípios da Eletrodinâmica clássica, sendo descritos matematicamente pelas equações de Maxwell [1], apresentadas a seguir:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho, \quad (6.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (6.2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (6.3)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}. \quad (6.4)$$

Nas equações acima, \vec{E} representa o campo elétrico, \vec{H} o campo magnético, \vec{D} o vetor deslocamento elétrico, \vec{B} a densidade de fluxo magnético, ρ a densidade volumétrica de carga e \vec{J} a densidade de corrente elétrica.

Além dessas equações fundamentais, o comportamento dos materiais é descrito pelas relações constitutivas:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}, \quad (6.5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (6.6)$$

onde ε é a permissividade elétrica do meio e μ sua permeabilidade magnética.

Considerando campos harmônicos no tempo, os campos elétrico e magnético podem ser representados na forma:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \tilde{\vec{E}}(\vec{r})e^{j\omega t}, \quad (6.7)$$

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \tilde{\vec{H}}(\vec{r})e^{j\omega t}, \quad (6.8)$$

em que $\tilde{\vec{E}}(\vec{r})$ e $\tilde{\vec{H}}(\vec{r})$ representam as amplitudes complexas dos campos e ω corresponde à frequência angular da onda eletromagnética.

No caso específico de cristais fotônicos dielétricos, admite-se a ausência de cargas livres e correntes elétricas. Nessas condições, as equações de Maxwell reduzem-se a:

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0, \quad (6.9)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (6.10)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (6.11)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}. \quad (6.12)$$

Das relações constitutivas e da representação harmônica dos campos, obtém-se:

$$\vec{D}(\vec{r}, t) = \varepsilon \vec{E}(\vec{r}) e^{j\omega t}. \quad (6.13)$$

Substituindo as expressões harmônicas nas equações de Maxwell e considerando um meio dielétrico sem cargas livres, chegam-se as seguintes relações no domínio da frequência:

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}) + j\omega\mu_0\vec{H}(\vec{r}) = 0, \quad (6.14)$$

$$\nabla \times \vec{H}(\vec{r}) - j\omega\varepsilon_0\varepsilon(\vec{r})\vec{E}(\vec{r}) = 0. \quad (6.15)$$

A partir dessas expressões pode-se deduzir a equação de onda vetorial, frequentemente denominada “equação mestra” (*master equation*), que governa a propagação eletromagnética em cristais fotônicos:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\varepsilon(\vec{r})} \nabla \times \vec{H}(\vec{r}) \right) = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \vec{H}(\vec{r}), \quad (6.16)$$

em que

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} \quad (6.17)$$

corresponde à velocidade da luz no vácuo.

Em cristais fotônicos, a permissividade elétrica apresenta periodicidade espacial, isto é,

$$\varepsilon(\vec{r}) = \varepsilon(\vec{r} + \vec{R}), \quad (6.18)$$

onde \vec{R} é o vetor de rede da estrutura cristalina.

Para os casos analisados neste trabalho, nos quais há inserção de hexaferrite na estrutura periódica, a equação mestra pode ser escrita na forma:

$$\nabla^2 \tilde{H} - \nabla(\nabla \cdot \tilde{H}) + \omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon_h \mu_0 [\mu] \tilde{H} = 0, \quad (6.19)$$

onde ε_h representa a permissividade relativa do hexaferrite, considerada constante, e $[\mu]$ é o tensor de permeabilidade magnética do material.

6.2 APÊNDICE B – Hexaferrite

Os parâmetros físicos adotados para um material típico de hexaferrite hexagonal do tipo M são apresentados na Tabela 2, onde $4\pi M_s$ representa a magnetização de saturação, H_c é o campo magnético coercivo, ΔH corresponde à largura de linha da ressonância ferromagnética (*FMR*) e ϵ_h é a permissividade elétrica relativa. O campo magnético interno em corrente contínua (DC) é $H_{int} = 19,23$ kOe e o parâmetro de giromagnetização da hexaferrite é $\kappa/\mu = 0,238$.

Tabela 2 – Parâmetros da Hexaferrite

$4\pi M_s$ (G)	H_c (kOe)	ΔH (Oe)	ϵ_h
5000	20	200	20

A seguir, utiliza-se o tensor de permeabilidade $[\mu]$ [6]:

$$[\mu] = \begin{pmatrix} \mu & -j\kappa & 0 \\ j\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (6.20)$$

onde μ e κ são definidos pelas seguintes expressões:

$$\mu = 1 + \frac{\omega_m (\omega_i + j\omega\alpha)}{(\omega_i + j\omega\alpha)^2 - \omega^2}, \quad \kappa = \frac{\omega_m \omega}{(\omega_i + j\omega\alpha)^2 - \omega^2}, \quad (6.21)$$

em que $\omega = 2\pi f$ é a frequência de operação, $\omega_m = \gamma 4\pi M_r$, $\omega_i = \gamma H_{int}$ e α é o fator de amortecimento, dado por:

$$\alpha = \frac{\mu_0 \gamma \Delta H}{2\omega}. \quad (6.22)$$

6.3 APÊNDICE C – Cristal Fotônico: Parâmetros Gerais

A estrutura geométrica do dispositivo baseado em cristais fotônico está apresentada na Fig. 16. Ela é composta por furos de ar em uma estrutura periódica dielétrica, cuja a constante de rede a é de 1,488 mm. Cada furo tem o raio de $0,48a$ em valores discretos da constante de rede.

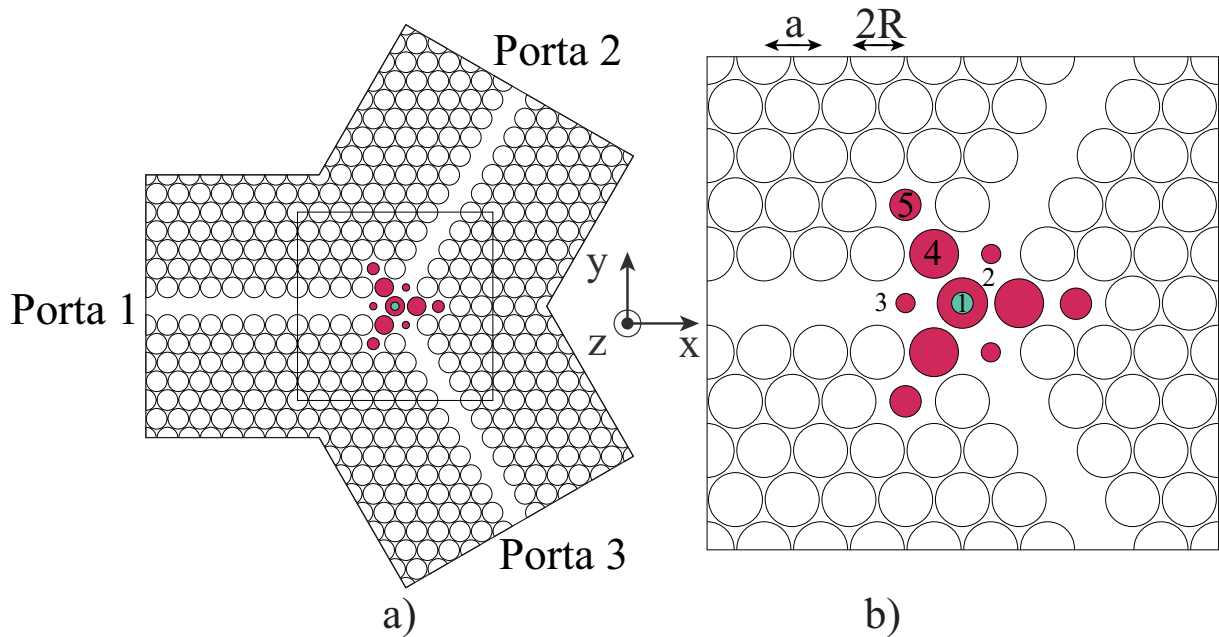


Figura 16 – Parametrização da geometria base do cristal fotônico.

Fonte: Autor.

A Tabela 3 mostra os valores de geometria do dispositivo dipolo em função da constante de rede a . O valor *original* refere-se à geometria base e o valor *otimizado* à geometria otimizada.

Tabela 3 – Parâmetros geométricos do circulador

Elemento	Raio (original)	Raio (otimizado)
1	0.191a	0.191a
2	0.48a	0.44826a
3	0.48a	0.17203a
4	0.48a	0.43707a
5	0.48a	0.27993a