

# A Multi-Bandgap Periodic Structure Device Acting as Multiplexer or Demultiplexer of Electromagnetic Signals

Rodrigo R. Paiva and Rodrigo M. S. de Oliveira

**Abstract**— In this work, a device capable of acting as a multiplexer (MUX) and demultiplexer (DEMUX) for electromagnetic waves in gigahertz range is designed and modeled numerically. The device is based on optimized dielectric periodic structures. It can combine signals of different central frequencies injected at its input ports to a single output port, thus acting as a MUX. Reciprocally, the device can separate mixed signals of different frequencies to specific output ports, acting as a DEMUX. To this aim, specific imperfections are introduced into the periodic structure. The design and analysis of the device are performed using the finite-difference time-domain method (FDTD). Transfer functions between pairs of input and output ports are calculated and used to define the design metrics.

**Index Terms**— FDTD, PBG, MUX, DEMUX, periodic structures, photonic crystals.

## I. INTRODUÇÃO

Com o surgimento dos primeiros transistores de silício em meados do século XX, cujo princípio de funcionamento baseia-se na quebra da periodicidade da estrutura cristalina dos materiais semicondutores, houve uma revolução na eletrônica, sobretudo nas áreas de computação e telecomunicações. No entanto, com o mundo cada vez mais globalizado, surgiu a necessidade de estudos com materiais que tornassem possível a criação de dispositivos ópticos, a fim de permitir a troca de informações com mais alta velocidade. Dessa forma, ao se utilizar tais dispositivos constituídos desses materiais, estes superam limitações encontradas pelo transporte e processamento de dados empregando elétrons. Neste cenário, cristais fotônicos têm contribuído consideravelmente para a evolução desses sistemas [1].

Esses cristais são combinações de materiais dielétricos em estruturas que se repetem em certas direções, podendo controlar as características da propagação eletromagnética, incluindo as frequências de micro-ondas e o espectro óptico. Conseqüentemente, eles permitem controlar a emissão e propagação luminosa a graus elevados de confinamento e guiamento [2, 3].

Tal como ocorre nos dispositivos semicondutores, existe uma banda de frequências denominada PBG (*Photonic*

*Bandgap*) na qual os modos eletromagnéticos (propagação fotônica) não são permitidos, o que inibe a propagação da onda em certas direções nos cristais fotônicos, permitindo controlar o fluxo luminoso [1].

Na literatura, há vários trabalhos contendo dispositivos e métodos de projeto envolvendo PBGs. Em [4], é mostrado um projeto de portas lógicas NOT e XOR, que operam na região óptica do espectro eletromagnético. Em [5], um cristal fotônico atua como isolador, a fim de aumentar a eficiência em comunicações ópticas. A rede cristalina planar está sobre um substrato de silício e apresenta um formato semelhante a um favo de mel. Sua célula unitária é composta por dois triângulos equiláteros invertidos. Um dos triângulos é resultante de abertura formada na estrutura de silício e, o outro, está na interface entre o silício e o ar. A partir de simulações numéricas, bem como de resultados experimentais, foi verificada uma alta eficiência quanto à supressão de sinais indesejados em sistemas de comunicações ópticas. Em [6], um subtrator binário é projetado. Ele é composto por uma rede cristalina com formato triangular, na qual os elementos pertencentes a esta rede são hastes cilíndricas de ar. A partir da criação de defeitos na rede cristalina, a estrutura é analisada através da quantidade de potência transmitida para as saídas dos canais formados. Para as simulações das interações eletromagnéticas, utilizou-se o método FDTD. Em [7], foi projetado um sensor de pressão de alta sensibilidade, operando em uma ampla faixa de pressão. O dispositivo, baseado em cristais fotônicos bidimensionais, apresenta uma estrutura de interferômetro Mach-Zehnder. O sensor proposto é implementado usando um arranjo de hastes dispostos periodicamente no ar. Cada haste é composta de GaAs. O desempenho do sensor é baseado na alteração do índice de refração do GaAs, a partir da pressão aplicada. O sistema é analisado através do método FDTD e do método da expansão em ondas planas (PWE).

Percebe-se que, na literatura, as estruturas PBG (inteligentes ou não) são utilizadas basicamente para guiar ondas eletromagnéticas em certa banda de frequências. Diferentemente dos trabalhos previamente publicados, neste trabalho é projetado numericamente um dispositivo PBG geometricamente simples que, além de guiar as ondas, é capaz de atuar como multiplexador ou demultiplexador de sinais eletromagnéticos. O dispositivo baseia-se em quebras específicas de periodicidade da estrutura cristalina. As frequências de *bandgap* são calculadas por meio da análise de

Revised on August 10, 2020.

Rodrigo R. Paiva, Universidade Federal do Pará, rods.paiva26@gmail.com  
Rodrigo M. S. de Oliveira, Universidade Federal do Pará (UFPA/ITEC/PPGEE), Belém, Pará, Brasil, rmso@ufpa.br .

funções de transferência do sistema, computadas através de sinais obtidos utilizando-se o método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD) [8]. Diferentemente de métodos analíticos [4]-[7], a metodologia de projeto aqui apresentada é simples e mais geral, pois se baseia em soluções numéricas das equações de Maxwell, fornecendo todos os picos de transmissão de campo em determinada banda de interesse através do cálculo de funções de transferência, de forma a simplificar os procedimentos de concepção de estruturas PBG.

## II. PROJETO DO MULTIPLEXADOR / DEMULTIPLEXADOR E RESULTADOS OBTIDOS

Neste tópico, é projetada uma estrutura PBG formada por diferentes redes periódicas utilizando células unitárias quadradas distribuídas em periodicidade bidimensional. A estrutura é otimizada para que haja a obtenção de um dispositivo capaz de atuar como multiplexador e demultiplexador. A modificação na estrutura para obtenção desse mecanismo foi baseada na ideia de que, ao provocar imperfeições na periodicidade, ou seja, ao retirar, trocar ou modificar as características elétricas dos elementos que compõem a rede, é possível, além de criar canais para o guiamento de ondas eletromagnéticas (tal como visto na literatura [3]), separar sinais de frequências diferentes de forma que estes se propaguem em diferentes guias de onda da estrutura baseados em PBGs particulares, caracterizando um demultiplexador. Ainda, através dessas modificações impostas em partes específicas da rede cristalina, é possível combinar sinais de frequências distintas, vindas de portas diferentes, em uma única porta de saída, formando-se, portanto, um multiplexador. No entanto, juntamente com tais alterações, é necessário realizar um estudo de respostas em frequência, a fim de encontrar *bandgaps*, que no presente trabalho são calculados a partir de funções de transferência do sistema, obtidas através dos sinais calculados nas entradas e saídas, ou seja, isto é feito considerando-se cada porta presente na estrutura. Com este procedimento, objetiva-se determinar numericamente bandas de frequências nas quais pode existir alta eficiência quanto ao nível de transmissão do sinal injetado em frequências de interesse.

A obtenção dos resultados deu-se a partir de simulações realizadas utilizando-se o método FDTD [8], para o caso bidimensional, cujo modo de propagação é o  $TM_z$  (são calculadas as componentes  $E_z$ ,  $H_x$  e  $H_y$ ). Para condição de fronteira absorvente, foi implementada a UPML (*uniaxial perfectly matched layers*) [9] com 10 camadas, obtendo-se assim um nível baixo de sinal refletido ( $\approx -60$  dB) nos limites da região de análise, de forma a representar numericamente a região como sendo aberta.

### A. Guiamento de Onda e a Estrutura PBG de Referência

Para realizar a modelagem numérica do dispositivo, inicialmente foi concebido e modelado o guia de onda bidimensional da Fig. 1, a partir de uma estrutura PBG. O guia foi criado com a retirada de elementos, quebrando-se a periodicidade da PBG e formando o canal de propagação. Sendo assim, a onda eletromagnética será transmitida desde

que os campos oscilem em uma determinada frequência contida em uma faixa de frequências que corresponde ao *bandgap* da estrutura periódica. Este mesmo tipo de problema é descrito em [3]. Em [3], são usados elementos dielétricos circulares para compor os elementos da estrutura PBG. No entanto, neste trabalho, são utilizados elementos dielétricos quadrados, haja vista que essas estruturas são perfeitamente representáveis no método FDTD tradicional baseado em malhas cartesianas [8], [10]. Para discretizar a estrutura periódica apresentada na Fig. 1, foram usadas células de Yee quadradas.

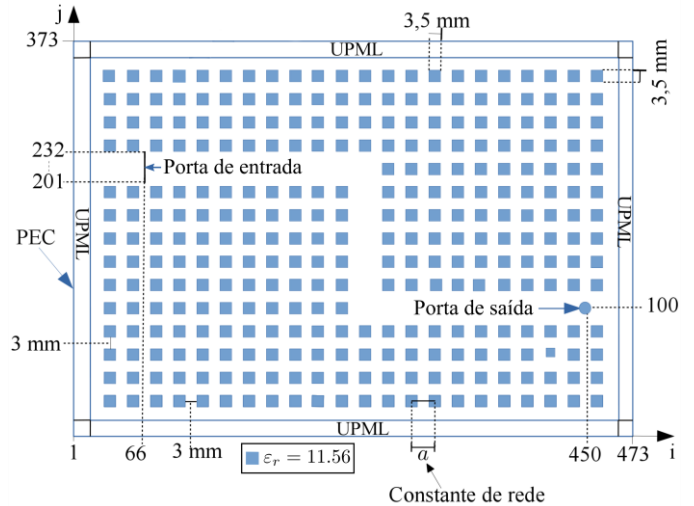


Fig. 1. Estrutura PBG de referência (adaptada de [3]).

Para construir a estrutura periódica utilizada neste trabalho, de forma a adequar ao que é apresentado em [3], fez-se o uso da relação de equivalência entre as áreas dos blocos utilizados em cada caso, além de ter sido obedecida a condição de que o raio do elemento circular tem que ser 20 % da constante de rede  $a$  da estrutura (Fig. 1) [1]. Portanto, de forma a haver equivalência com os elementos circulares de raio  $R$ , a aresta  $L$  do elemento quadrado deve ser dada por

$$L = R\sqrt{\pi} = 0.2a\sqrt{\pi} \approx 0.3545a. \quad (1)$$

Dessa forma, a estrutura formada é composta por blocos dielétricos quadrados, tendo 15 linhas e 23 colunas de blocos, sendo que cada bloco possui permissividade relativa  $\epsilon_r=11.56$ . Com o intuito de criar um canal de propagação, foram retirados alguns elementos de modo que esses espaços vazios (corredores) foram preenchidos com ar ( $\epsilon_r = 1$ ), tal como definido na Fig. 1. Além disso, a constante de rede  $a$  mede 10 mm e, portanto, cada bloco foi dimensionado para  $3.5 \times 3.5$  mm, o que implicou em uma distância de 3 mm entre eles. Trabalhos experimentais recentes [11], relativos a estruturas fotônicas obviamente tridimensionais, mostram que materiais metálicos são adequados para compor as partes de baixo e de cima das estruturas periódicas que operam em faixas de micro-ondas.

No método FDTD [8]-[10], faz-se necessário realizar a discretização do domínio físico em células, a fim de compor

um domínio computacional para geração e obtenção dos resultados. A partir disso, foram definidas as dimensões de cada célula:  $0.5 \times 0.5$  mm. Cada bloco dielétrico é formado por  $7 \times 7$  células. As distâncias vertical e horizontal entre eles correspondem a treze células. Através desses valores, foram definidas as dimensões do domínio computacional:  $473 \times 313$  células. O canto inferior esquerdo do primeiro bloco foi posicionado no ponto  $j = i = 13$  da malha computacional.

Com o objetivo de validar o método proposto, utiliza-se o *software* MEEP [12] para o cálculo da transmitância  $T$  entre as portas do canal, presentes na estrutura periódica ilustrada na Fig. 1. Semelhantemente ao método FDTD, o domínio de análise é discretizado em células. Cada célula quadrada possui aresta de 0,2 mm e a região da PML contém 10 células. O cálculo da transmitância consiste na razão entre as potências eletromagnéticas obtidas através dos campos registrados no sensor localizado na porta de saída ( $i = 450$  e  $j = 100$ ) e na porta de entrada ( $i = 66$  e  $j = 215$ ), tal como é ilustrado na Fig. 1. Logo,

$$T = \frac{P_{\text{sensor}}(f)}{P_{\text{excitação}}(f)}, \quad (2)$$

na qual  $P_{\text{sensor}}(f)$  e  $P_{\text{excitação}}(f)$  são as potências eletromagnéticas relativas aos campos registrados nos sensores localizados nas portas de saída e entrada, respectivamente. Nestes locais, a potência para um dado fluxo orientado segundo o versor  $\hat{a}_x$  é dada por

$$P(f) = \Re\{-H_y(f)E_z^*(f)\} \quad (3)$$

em que  $H_y(f)$  e  $E_z(f)$  são as transformadas de Fourier das componentes  $H_y$  e  $E_z$  registradas nos sensores. Dessa forma, tal como está ilustrado na Fig. 2, há uma boa concordância entre os resultados apresentados, o que valida a utilização do método proposto em estruturas mais complexa.

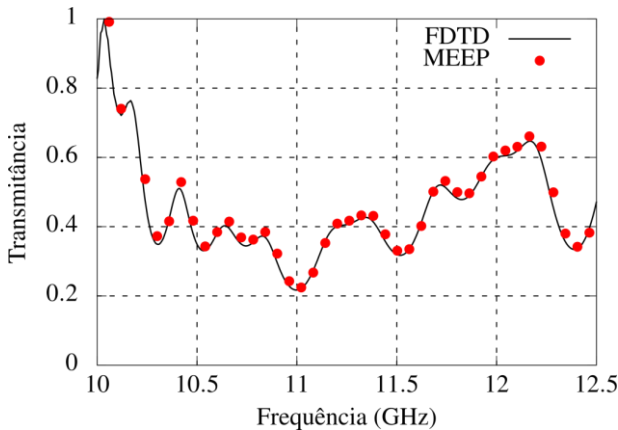


Fig. 2. Transmitâncias calculadas entre as portas do sistema ilustrado na Fig. 1

Ainda, através da análise de funções de transferência do

sistema para a mesma estrutura (Fig. 1), utilizou-se um pulso gaussiano modulado contendo uma banda de frequências de interesse (de 7 GHz a 15 GHz). Matematicamente, este pulso é dado por

$$f(t) = e^{\left(\frac{t-t_0}{T}\right)^2} \cos(2\pi ft), \quad (4)$$

no qual  $T = 20 \times 10^{-11}$  s,  $t_0 = 5T$  e  $f = 11 \times 10^9$  Hz.

Tal como no cálculo da transmitância, a fonte foi colocada no começo do guia, conforme é mostrado na Fig. 1. Excitou-se  $E_z$ , a componente  $z$  do campo elétrico, nas células indexadas por  $i = 66$  e  $201 \leq j \leq 232$ . Na saída do canal, foi colocado um sensor para registro de  $E_z$ , cuja posição se encontra na célula indexada por  $i = 450$  e  $j = 100$ .

Para realizar a simulação, foi utilizado um passo de tempo  $\Delta t = 1,16$  ns para se garantir a estabilidade do método FDTD [8]-[10] e permitir a validação dos resultados produzidos no presente trabalho. A fim de garantir que a forma de onda obtida pelo sensor seja integrável em  $-\infty < t < \infty$ , foram utilizadas 60000 iterações, de forma a garantir o correto cálculo da transformada de Fourier do sinal e, por consequência, das funções de transferência do sistema. Sendo  $\mathbf{E}_z^{\text{fonte}}$  e  $\mathbf{E}_z^{\text{sensor}}$  as transformadas de Fourier dos sinais da fonte e do sensor na saída do canal, respectivamente, a função de transferência é obtida através da conhecida relação

$$H(f) = \frac{\mathbf{E}_z^{\text{sensor}}(f)}{\mathbf{E}_z^{\text{fonte}}(f)}. \quad (5)$$

Para a estrutura da Fig. 1,  $|H(f)|$  está ilustrado na Fig. 3. Os picos indicam elevada transmissão entre as portas do guia.

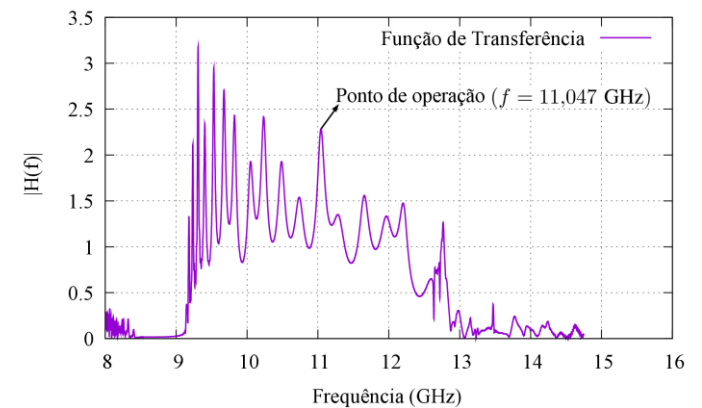


Fig. 3. Módulo de função de transferência entre as duas portas do sistema ( $\epsilon_r = 11,56$ ).

Nota-se nas Figs. 2 e 3 que ambos os métodos de cálculo (transmitância e função de transferência) podem ser usados para projetar estruturas PBG. Entretanto, na função de transferência, os picos de transmissão são vistos de forma mais evidente na banda de interesse. Sendo assim, utiliza-se

neste trabalho a análise de funções de transferência para o projeto do dispositivo MUX/DEMUX.

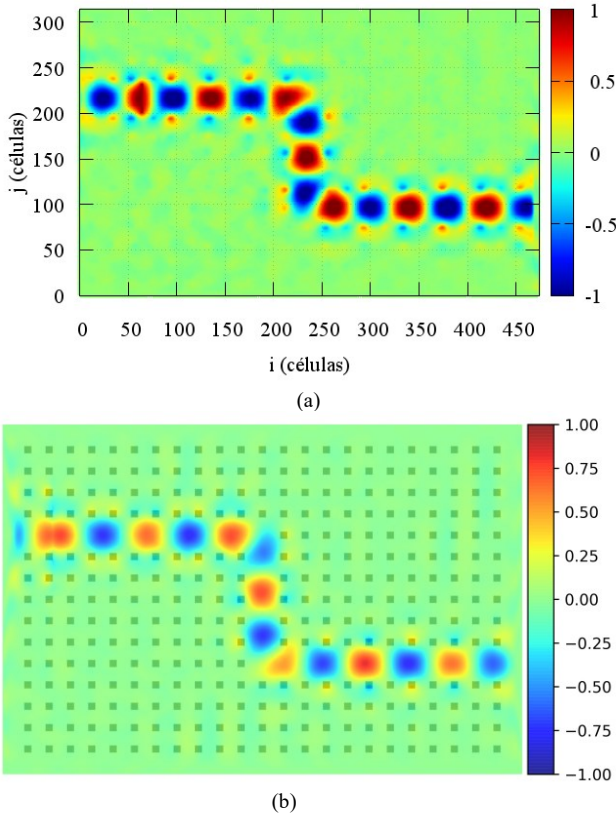


Fig. 4. Distribuições de  $E_z$  após 2500 iterações ( $f = 11,047$  GHz) provenientes do (a) método FDTD e (b) *software* MEEP.

Em [3], é calculada a frequência de operação de 11,085 GHz para o presente problema. Aqui, verifica-se um pico de transmissão em 11,047 GHz (ver Fig. 3), validando também o método de cálculo proposto no presente trabalho. De forma a demonstrar o confinamento da onda no canal, a estrutura foi excitada usando uma fonte senoidal de amplitude unitária. Para se obter a Fig. 4(a), no método FDTD a fonte do tipo *hard* é aplicada impondo-se  $E_z^{fonte} = \cos(2\pi ft)$ , em que  $f = 11,047$  GHz. Vale ressaltar que, com base na Fig. 3, é possível utilizar outras frequências para produzir confinamento da onda. O motivo para não utilizar uma frequência que apresentasse um maior nível de transmissão é associado à validação dos resultados apresentados neste trabalho com os obtidos em [3]. Na Fig. 4(a), é ilustrada a distribuição de  $E_z$  após 2500 iterações, calculada pelo método FDTD, mostrando o adequado confinamento do sinal. O mesmo ocorre utilizando-se o *software* MEEP, no qual o confinamento do sinal é destacado na Fig. 4(b). Os perfis de campo ilustrados na Fig. 3 estão de acordo com o apresentado em [3].

### B. Requisitos de Projeto para o Dispositivo Proposto

Para realizar o projeto e a modelagem do dispositivo MUX/DEMUX proposto, partiu-se da estrutura de referência da Fig. 1, na qual foi incluída uma porta adicional. Foram,

portanto, criados dois canais de propagação para ondas eletromagnéticas, definidos por três portas, combinadas duas a duas, tal como definido na Fig. 5. A porta 2 foi estabelecida retirando-se alguns blocos dielétricos da estrutura da Fig. 1. O canal 1 é definido entre as portas 1 e 3 e o canal 2 entre as portas 1 e 2. Na Fig. 5, a porta 1 contém a linha de excitação.

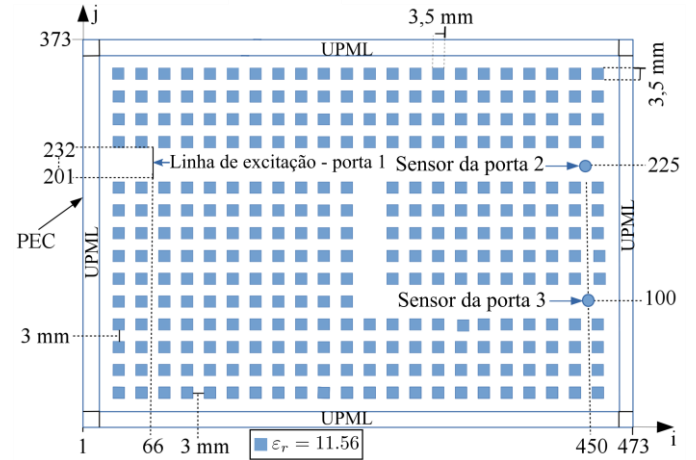


Fig. 5. *Layout* preliminar do dispositivo proposto, baseado em PBGs.

Para que o sistema opere tal como desejado, o mesmo deve satisfazer os seguintes requisitos: 1) as portas 2 e 3 devem ter suas respectivas frequências de *bandgap*  $f_2$  e  $f_3$  diferentes e 2)  $f_2$  e  $f_3$  devem ser frequências de *bandgap* da porta 1. Dessa forma, uma onda injetada na porta 1 com frequência  $f_n$  propaga-se para a porta  $n$ , de forma que  $n = 2$  ou  $n = 3$ . Interessantemente, caso o sinal injetado na porta 1 seja uma composição de senoides oscilando com frequências  $f_2$  e  $f_3$ , os referidos sinais senoidais serão separados fisicamente (demultiplexados) pela estrutura, se propagando respectivamente pelas portas 2 e 3. Reciprocamente, se as portas 2 e 3 forem usadas como entradas e se sinais oscilando com frequências  $f_2$  e  $f_3$  forem injetados nas portas 2 e 3 simultaneamente, tais sinais serão misturados (somados) fisicamente pela estrutura, produzindo um sinal multiplexado, com ambas as frequências, que se propaga pela porta 1. Os dois modos de operação a serem projetados neste trabalho (MUX e DEMUX) são fisicamente possíveis não só devido a modificações estruturais específicas que devem ser feitas adaptando-se localmente a rede nos corredores que formam as portas, mas também devido ao princípio da superposição obedecido pelas equações de Maxwell [10], [13]. Dessa forma, pode-se concluir que  $f_2$  e  $f_3$  não podem ser múltiplas entre si. Caso contrário, o funcionamento do dispositivo pode ser comprometido, visto que isto pode provocar interferências destrutivas nas regiões de interseção entre os canais. Note que se  $f_2$  e  $f_3$  não forem proporcionais, as fases não interferem no processo de propagação no corredor que contém a porta 1.

### C. Procedimento Preliminar de Projeto e Características do Dispositivo Obtido

Conforme discutido anteriormente, para propiciar o

confinamento das ondas nas portas em frequências específicas, é necessário fazer certas mudanças localmente na rede. As seguintes alterações são possíveis para blocos dielétricos: permissividade, geometria, posição ou mesmo exclusão de blocos [1]. Neste trabalho, as modificações feitas na estrutura periódica deram-se através de mudanças na constante dielétrica de elementos da rede que constituem as bordas das portas 2 e 3, tal como na versão preliminar do dispositivo, vista na Fig. 6. As alterações nas duas portas são necessárias para que sinais de determinada frequência  $f_2$  se propagem pelas portas 1 e 2 mas não se propagem pela porta 3. Além disso, é necessário que em outra frequência  $f_3$ , os sinais se propagem pelas portas 1 e 3 mas não se propagem pela porta 2. Para a porta 1, definiu-se  $\epsilon_r = 11,56$ , o mesmo valor usado na estrutura periódica de [3], ilustrada pela Fig. 1, cujas frequências de *bandgap* foram calculadas neste trabalho e estão associadas aos picos de transmissão vistos na Fig. 3.

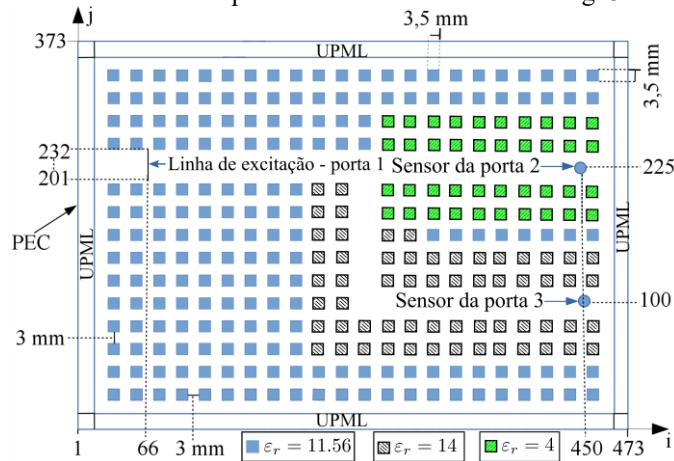


Fig. 6. Estrutura periódica com falhas propositais em períodos, compondo um candidato ao dispositivo proposto. Observe as diferentes permissividades para os blocos dielétricos.

Em seguida, a permissividade referente aos blocos que constituem as paredes da porta 2 foi otimizada. A ideia é possibilitar níveis de transmissão da onda eletromagnética adequados através das portas 1 e 2 em dada frequência  $f_2$  e, ao mesmo tempo, criar mínimos de transmissão na porta 2 em outras frequências em que haja picos de transmissão na porta 1. Para isso, pela simplicidade de análise, simulações preliminares foram feitas utilizando-se a estrutura periódica de referência da Fig. 1, que possui apenas um canal de propagação. Portanto, a referida otimização foi feita inicialmente alterando-se a permissividade elétrica de todos os blocos da estrutura da Fig. 1, de forma a se obter as frequências de *bandgap* associadas a diversas permissividades elétricas dos blocos. Os resultados obtidos nesta etapa são mostrados pela Fig. 7.

É possível ver na região destacada na Fig. 7 que há transmissão de mais de 60 % do sinal na banda em torno de 12,60 GHz tanto para a porta 1 (blocos com  $\epsilon_r = 11,56$ ) quanto para a porta 2 com blocos com  $\epsilon_r = 4,0$ . Além disso, quando a porta 2 é configurada com  $\epsilon_r = 4,0$ , pequenos níveis de transmissão são vistos para a porta 2 em frequências em que há picos de transmissão na porta 1.

A fim de otimizar o valor de  $\epsilon_r$  para os blocos da porta 3,

procedimento similar ao feito para otimizar a porta 2 foi executado. Novamente, com estrutura de referência da Fig. 1, vários valores de permissividade relativa foram testados alterando-se todos os blocos dielétricos da estrutura de referência, de forma a garantir pico de transmissão na porta 3 em frequência em que há pico de transmissão na porta 1 e baixo nível de transmissão na porta 2. Esta característica foi obtida com  $\epsilon_r = 14$ . São ilustradas, na Fig. 8, as funções de transferência para as três portas, com permissividades otimizadas para as portas 2 e 3. A partir dos *insets* ilustrados na Fig. 8, é possível observar que as frequências de *bandgap* selecionadas, 9,79 GHz e 12,62 GHz, atendem aos requisitos estabelecidos.

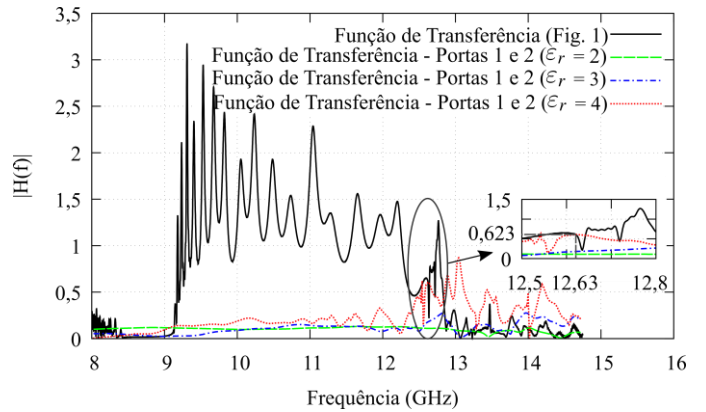


Fig. 7. Módulo de funções de transferência para as portas 1 e 2, considerando-se vários valores de  $\epsilon_r$  para os blocos dielétricos da porta 2.

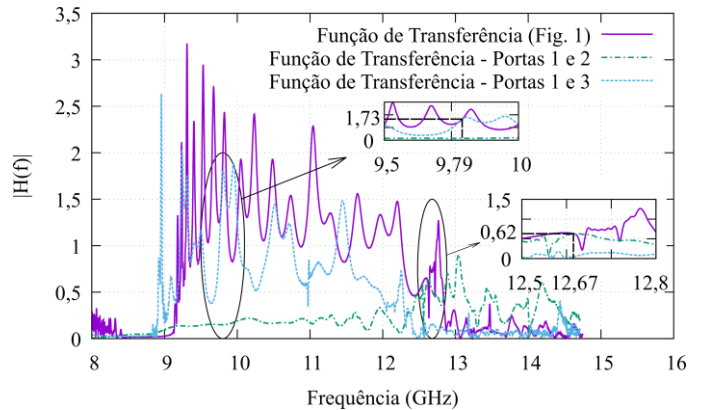


Fig. 8. Funções de transferência associadas às três portas.

#### D. Configuração Preliminar do Dispositivo Proposto e Resultados Obtidos

O nível de transmissão (função de transferência) em uma dada porta de saída, em sua frequência de operação, deve ser próximo ao nível de transmissão visto ao fim da porta de entrada, de forma a se maximizar casamentos de impedância e minimizar indesejadas reflexões de onda na interface entre as diferentes portas. Além disso, é importante que, na frequência de operação de uma dada porta, as funções de transferência das portas de saída e da própria porta de entrada tenham módulos próximos ou maiores que a unidade. Na Fig. 8, isto pode ser visto para a porta 3. Na porta 2, o nível de

transmissão em sua frequência de operação está próximo a 60%.

O nível de transmissão da porta 2 pode ser melhorado, embora tenham sido determinadas as permissividades ótimas para a estrutura preliminar da Fig. 1. Conforme previamente discutido, os níveis de transmissão dependem também da disposição geométrica dos blocos com permissividades modificadas, de forma adequada para se mitigar o referido problema. Um possível arranjo é a configuração final mostrada na Fig. 9, na qual há blocos dielétricos com permissividades relativas iguais a  $\epsilon_r = 14$ ,  $\epsilon_r = 4$  e  $\epsilon_r = 11,56$ , como indicado.

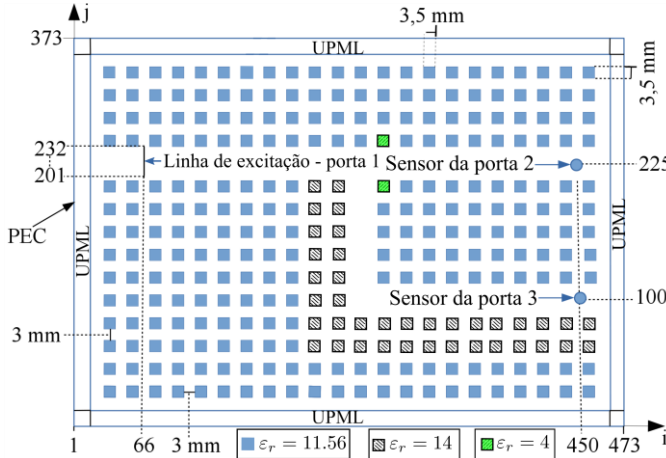


Fig. 9. Dispositivo projetado em configuração preliminar.

Após realizar a modelagem numérica da estrutura, com seus blocos dielétricos configurados com suas respectivas permissividades elétricas dispostas espacialmente tal como indicado na Fig. 9, fez-se necessário recalcular a função de transferência do sistema para cada porta de interesse. As funções de transferência obtidas para ambas as portas de saída da estrutura mostrada na Fig. 9, juntamente com a função de transferência relativa à porta de entrada, são mostradas na Fig. 10. Nos *insets* da Fig. 10, é possível observar que as duas frequências de operação do dispositivo da Fig. 9 foram alteradas em relação às do dispositivo preliminar da Fig. 6. Na estrutura final, para a porta 2 tem-se a frequência de operação  $f_2 = 12,68$  GHz e, para a porta 3, temos  $f_3 = 11,05$  GHz. Produziram-se níveis de transmissão de sinal para as portas 2 e 3 em torno de 88% e 74%, respectivamente.

Para realizar testes numéricos do modo de operação DEMUX, a estrutura foi excitada através do controle da componente  $E_z$  ao longo da linha de excitação indicada no começo da porta 1, conforme está ilustrado na Fig. 9. O sinal usado como excitação é uma composição de senoides vibrando nas frequências  $f_2$  e  $f_3$ . Matematicamente, temos, ao longo da linha de excitação,  $E_z^{fonte} = \cos(2\pi f_2 t) + \cos(2\pi f_3 t)$ . Na distribuição espacial do campo  $E_z$  ilustrada na Fig. 11, obtida após 3000 iterações, observa-se o sinal composto pelos dois comprimentos de onda na porta 1. Ao observar os campos produzidos nas portas 2 e 3, é facilmente constatável que houve a separação dos sinais com os comprimentos de onda relativos às frequências  $f_2$  e  $f_3$ , mostrando a efetiva atuação do

dispositivo como demultiplexador, conforme projetado.

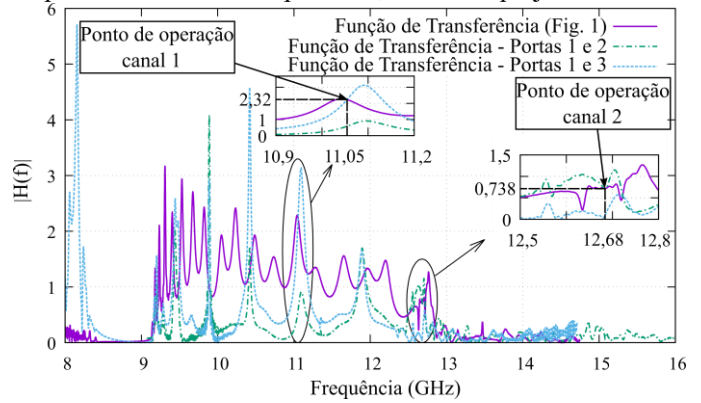


Fig. 10. Funções de transferência associadas às portas com suas respectivas frequências de bandgap.

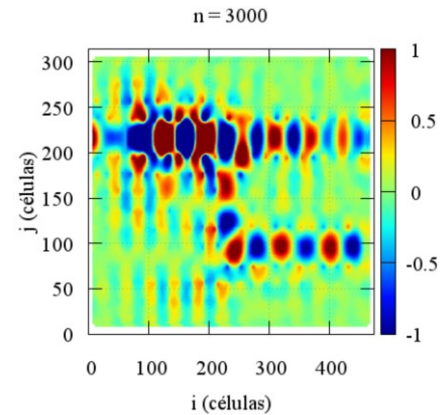
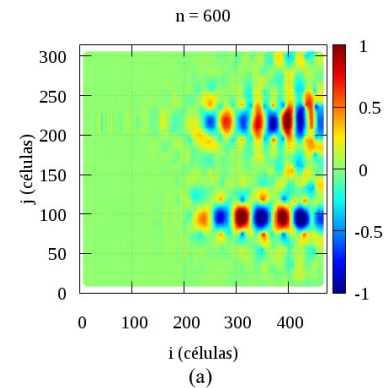


Fig. 11. Distribuição normalizada de  $E_z$  após 3000 iterações, demonstrando o funcionamento do dispositivo como demultiplexador.



(a)

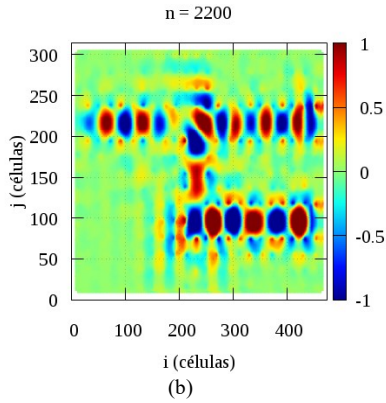


Fig. 12. Distribuições normalizadas de  $E_z$  após (a) 600 iterações e (b) 2200 iterações. É demonstrada a efetiva atuação do dispositivo como multiplexador.

Em seguida, o dispositivo foi novamente testado. Desta vez, as portas 2 e 3 foram excitadas com sinais independentes vibrando com frequências  $f_2$  e  $f_3$ , respectivamente. Na Fig. 12(a) está ilustrada a distribuição espacial de  $E_z$  obtida após 600 iterações. É possível observar propagação dos sinais, com comprimentos de onda próprios, em suas respectivas portas. Em seguida, após 2200 iterações, pode-se ver na Fig. 12(b) a composição dos dois sinais na porta 1, o que mostra a adequada atuação do dispositivo como multiplexador. Além disso, é mostrado na Fig. 13 o módulo da transformada de Fourier do sinal resultante da multiplexação, obtido na porta 1. Verifica-se que o mesmo apresenta picos de amplitude nas frequências  $f_2$  e  $f_3$ , demonstrando de forma precisa e evidente a efetiva multiplexação dos sinais injetados nas portas 2 e 3 na porta 1. Portanto, a atuação do dispositivo ocorre conforme esperado, tanto no modo MUX quanto no modo DEMUX.

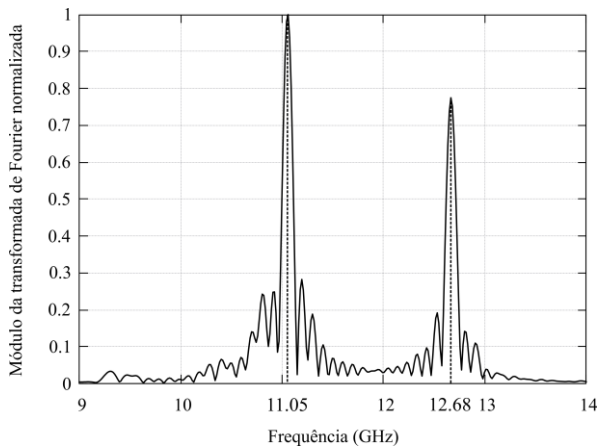


Fig. 13. Módulo da transformada de Fourier de  $E_z$  na porta 1, com o dispositivo atuando como multiplexador, mostrando energias significativas nas frequências  $f_2$  e  $f_3$ . Observe também o espalhamento espectral do sinal.

**E. Proposta de um Novo Dispositivo para Aumentar o Nível de Confinamento do Sinal em cada Canal e Resultados Obtidos**

Na Fig. 10, percebe-se no *inset* referente ao ponto de operação do canal 1 que o nível de transmissão associado às portas 1 e 2 não é desprezível. Conseqüentemente, para o modo DEMUX, o sinal registrado na porta 3 contém  $f_3$  e outras frequências indesejadas, indicando que o projeto do dispositivo pode ser melhorado. Para mitigar esse efeito, um

novo dispositivo é proposto. Nele, são adicionados blocos dielétricos retangulares ( $\epsilon_r = 4,0$ ) em parte do canal 2, tal como é ilustrado na Fig. 14. Cada bloco retangular possui área de  $17 \times 6$  células e são separados entre si por 3 células, atuando como um filtro adicional. Além disso, com função semelhante, são adicionados blocos dielétricos quadrados ( $\epsilon_r = 4,0$ ) na região que contém a porta 3. Tais blocos possuem a mesma aresta daqueles presentes na Fig. 1.

Novamente, funções de transferência associadas aos canais 1 e 2 são calculadas e estão ilustradas na Fig. 15. No *inset* referente ao ponto de operação do canal 1 ( $f_3 = 12,69$ ), o nível de transmissão para o canal 2 é aproximadamente nulo. Da mesma forma, para o ponto de operação do canal 2 ( $f_2 = 12,27$ ), obtém-se um nível de transmissão desprezível para o sinal que se propaga para o canal 1. Dessa forma, devido à ação dos filtros adicionais, que minimizam a propagação de sinais com frequência indesejada, garantem-se sinais com frequências de operação únicas propagando-se em seus respectivos canais.

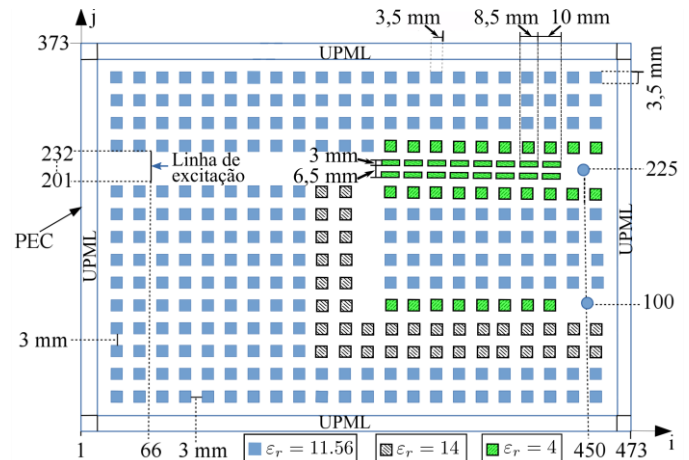


Fig. 14. Dispositivo proposto para operar como MUX ou DEMUX.

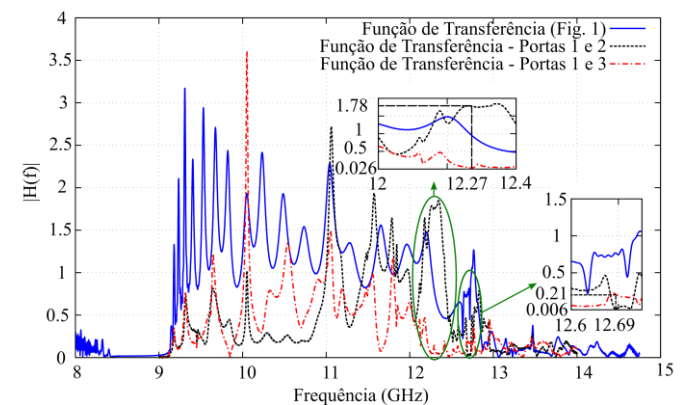


Fig. 15. Funções de transferência associadas aos canais de propagação.

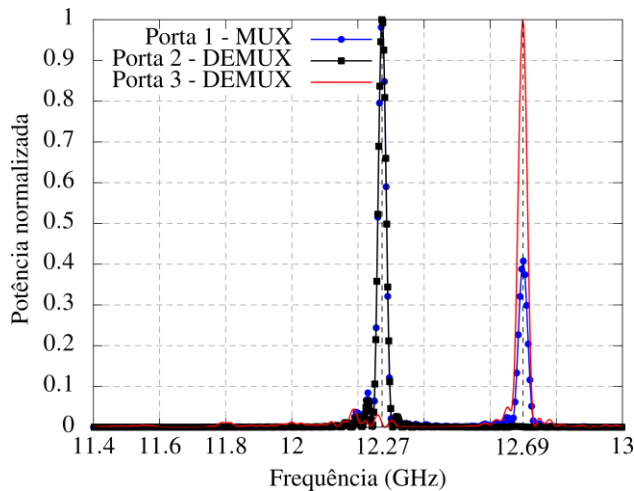


Fig. 16. Potências normalizadas com o dispositivo atuando como multiplexador e demultiplexador, mostrando energias significativas nas frequências  $f_2$  e  $f_3$ . Observe também o confinamento espectral dos sinais.

Para demonstrar a eficiência do dispositivo, este é testado em termos dos níveis de potência de sinal recebido nos modos de operação MUX e DEMUX. Em ambos os modos, a potência é concentrada em torno das frequências de operação  $f_3 = 12,69$  (canal 1) e  $f_2 = 12,27$  (canal 2), tal como é ilustrado na Fig. 16. Isso demonstra o correto funcionamento da multiplexação e da demultiplexação dos sinais injetados no dispositivo proposto (Fig. 14). O funcionamento do dispositivo é regido pela física teórica dos *bandgaps*, que é perfeitamente descrita pelas equações de Maxwell aqui solucionadas numericamente por meio do método FDTD.

### III. CONCLUSÃO

Neste trabalho, é proposto um novo dispositivo PBG que atua tanto como um multiplexador quanto como um demultiplexador, operando na faixa de gigahertz. O projeto e modelagem da estrutura foram realizados através do método FDTD, resolvendo-se numericamente as equações de Maxwell no domínio do tempo. Para se alcançar esse objetivo, foi necessário criar defeitos controlados na estrutura periódica formada por blocos dielétricos quadrados, a fim de que houvesse a propagação da onda eletromagnética nos canais formados em frequências específicas. Estes defeitos foram criados com base na retirada e mudanças dos parâmetros elétricos dos elementos constituintes da rede periódica. Blocos foram incluídos nos canais para realizar filtragem adicional.

Para cada canal de propagação, múltiplas frequências de *bandgap* foram obtidas através do cálculo de funções de transferência utilizando diretamente as informações de campo calculadas numericamente a partir das equações de Maxwell. Esta forma de tratar o problema foi necessária para se obter uma configuração geométrica com três portas fotônicas, de forma que na primeira porta, duas frequências  $f_2$  e  $f_3$  se propagam de forma confinada. Além disso, sinais com frequência  $f_2$  se propagam também pela porta 2, mas não se propagam pela porta 3. Reciprocamente, sinais com frequência  $f_3$  se propagam também pela porta 3, mas não se propagam pela porta 2. Estas características específicas, essenciais para o

funcionamento do dispositivo, foram obtidas através de análise direta das funções de transferência. O nível de transmissão do sinal obtido para a porta 3 foi em torno de 21% e, para a porta 2, de 178%. Com isso, foi obtida numericamente uma inédita estrutura fotônica capaz de operar efetivamente tanto quanto um multiplexador quanto como um demultiplexador.

### REFERÊNCIAS

- [1] J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn, and R. D. Meade, "Two-Dimensional Photonic Crystals", *Photonic crystals: molding the flow of light*. Princeton university press, 2011, ch. 5, pp. 66-92.
- [2] A. O. Silva, "Modelagem de cristais fotônicos tridimensionais pelo método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD)", Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2008.
- [3] S. Fan, P. R. Villeneuve, J. D. Joannopoulos, and H. Haus, "Channel drop tunneling through localized states," *Physical Review Letters*, vol. 80, no. 5, p. 960, 1998.
- [4] S. Naznin, S. T. Karim, R. T. Tisa, and M. A. Farhad, "Design and simulation of all optical logic gates based on 2d photonic crystal fiber," in *Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT), 2015 International Conference on*. IEEE, 2015, pp. 1-5.
- [5] M. I. Shalaev, W. Walasik, A. Tsukernik, Y. Xu, and N. M. Litchinitser, "Robust topologically protected transport in photonic crystals at telecommunication wavelengths," *Nature nanotechnology*, vol. 14, no. 1, pp. 31-34, 2019.
- [6] F. Parandin, M.-R. Malmir, and M. Naseri, "All-optical half-subtractor with low-time delay based on two-dimensional photonic crystals," *Superlattices and Microstructures*, vol. 109, pp. 437-441, 2017.
- [7] R. Zegadi, L. Ziet, F. Z. Satour, and A. Zegadi, "Design of a Wide Ranging Highly Sensitive Pressure Sensor Based on Two-Dimensional Photonic Crystals," *Plasmonics*, vol. 14, no. 4, pp. 907-913, 2019.
- [8] K. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Transactions on antennas and propagation*, vol. 14, no. 3, pp. 302-307, 1966.
- [9] S. D. Gedney, "An anisotropic perfectly matched layer-absorbing medium for the truncation of FDTD lattices," *IEEE transactions on Antennas and Propagation*, vol. 44, no. 12, pp. 1630-1639, 1996.
- [10] A. Taflov and S. C. Hagness, "Introduction to Maxwell's Equations and the Yee Algorithm", *Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method*. Artech house, 2005, ch. 3, pp. 51-105.
- [11] S. Ma, and S. Anlage, *Microwave Applications of Photonic Topological Insulators*, 2020. The paper was submitted on May 14, 2020 and the bibliographic reference: last revised 27 May 2020.
- [12] 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, no. 3, pp. 687-702, 2010.
- [13] C. A. Balanis, *Advanced engineering electromagnetics*. John Wiley & Sons, 2012.



**Rodrigo Rodrigues Paiva** possui graduação (Out. 2017) e mestrado (Set. 2019) em Engenharia Elétrica. Ambos os títulos foram obtidos pela Universidade Federal do Pará (UFPA). É aluno de doutorado do programa de pós-graduação em engenharia elétrica (PPGEE-UFPA), atuando nas áreas de Eletromagnetismo Aplicado, Antenas e Propagação, com ênfase em dispositivos baseados em grafeno.



**Rodrigo Melo e Silva de Oliveira**

possui graduação (2003), mestrado (Out. 2004) e Doutorado (Fev. 2008) em Engenharia Elétrica, títulos obtidos pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Telecomunicações, atuando

principalmente nos seguintes temas: Métodos FDTD e RPIM, Processamento Paralelo Distribuído, Propagação e Espalhamento Eletromagnético, Aterramento Elétrico e nanodispositivos (Grafeno). Atualmente, faz parte do quadro de Professores da UFPA (Associado II) - Instituto de Tecnologia (ITEC / Belém). É coordenador do Laboratório LEMAG, onde orienta alunos de graduação, mestrado e doutorado. Produziu mais de 30 publicações em periódicos, dois capítulos de livro e aproximadamente 80 publicações em conferências.