UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

MARCOS VAZ CARDOSO

Síntese de filtros rejeita-faixa de micro-ondas de banda-larga e dupla-banda
empregando estruturas periódicas EBG

São Paulo
2012

MARCOS VAZ CARDOSO

Síntese de filtros rejeita-faixa de micro-ondas de banda-larga e dupla-banda
empregando estruturas periódicas EBG

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Elétrica.

São Paulo

2012

MARCOS VAZ CARDOSO

Síntese de filtros rejeita-faixa de micro-ondas de banda-larga e dupla-banda
empregando estruturas periódicas EBG

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Microeletrônica

Orientadora: Profa. Dra. Fatima Salete
Correra.

São Paulo

2012

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo da Publicação

Serviço de Documentação

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 15 de janeiro de 2012.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Cardoso, Marcos Vaz

Síntese de filtros rejeita faixa de micro-ondas de banda-larga e dupla-banda empregando estruturas periódicas EBG / M.V.

Cardoso. -- ed.rev. -- São Paulo, 2011.

169 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1. Tecnologia de microondas 2. Dispositivos de microondas 3. Filtros elétricos I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II. t.

*Dedico este trabalho aos meus pais Maria Alcina Vaz e
Joselito Edson de Almeida Cardoso,
que me possibilitaram chegar até aqui,
e à minha irmã, Ana Vaz Cardoso,
por estar sempre ao meu lado e
ajudar a vencer todas as dificuldades.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas do meu convívio que acreditaram e contribuíram, mesmo que indiretamente, para a conclusão deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudos na fase inicial do curso de mestrado.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

Ao Laboratório de Microeletrônica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LME-EPUSP) e seus funcionários, por colocarem à disposição para a execução deste trabalho os laboratórios, bem como materiais, equipamentos, instrumentos e serviços.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em São José dos Campos, onde como bolsista tive oportunidade de trabalhar diretamente na frente tecnológica para o desenvolvimento de satélites com enorme contribuição à indústria e ao desenvolvimento científico nacional, pela oportunidade da aplicação direta dos conhecimentos obtidos ao longo do curso de mestrado e para o desenvolvimento da presente dissertação, pela infraestrutura que me foi disponibilizada e pelos serviços à comunidade científica do país prestados em seus 50 anos de história.

Aos amigos do curso técnico em eletrônica do Liceu de Artes e Ofícios e aos demais amigos que a este grupo se somaram, os quais ao longo dos anos sempre estiveram presente em minha vida profissional e pessoal, acreditando e contribuindo para meu sucesso.

À minha mãe Maria Alcina Vaz e à minha irmã Ana Vaz Cardoso, pelo amor incondicional e pela paciência. Por terem feito o possível e o impossível para minha felicidade, acreditando e respeitando minhas decisões e nunca deixando que as dificuldades acabassem com os meus sonhos, serei imensamente grato.

Ao meu pai Joselito Edson de Almeida Cardoso pelo grande exemplo de dedicação.

À minha orientadora Fatima Salete Correra, pelo empenho, paciência e credibilidade, obrigado por tudo.

“A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original”
(Albert Einstein)

“A meta final de qualquer pesquisa não é a objetividade,
mas a verdade.”
(Helene Dustsch)

RESUMO

Esta dissertação de mestrado apresenta um estudo da aplicação de estruturas *Electromagnetic Bandgap* (EBG) em circuitos planares de micro-ondas, com a proposição de topologias originais de filtros rejeita-faixa de banda ultra-larga e dupla-banda e de uma metodologia de síntese desses filtros. Foi proposta uma metodologia de projeto de filtros EBG, que foi aplicada a um filtro em microlinha de transmissão utilizando duas estruturas EBG simultâneas, com a finalidade de se obter um filtro com banda de rejeição ultra-larga. Esse filtro foi construído em tecnologia planar, tendo demonstrado uma banda de rejeição ultra-larga de 11 GHz centrada em 11,5 GHz, com nível de rejeição superior a 34 dB, apresentando excelente concordância com os resultados de simulação computacional. Paralelamente, foi desenvolvida uma metodologia de síntese que permite a geração automática de novas topologias de filtros rejeita-faixa empregando estruturas EBG que resultem em uma banda larga de rejeição ou com duplas bandas de rejeição. A metodologia de síntese proposta envolve procedimentos computacionais de otimização da geometria das estruturas EBG aplicadas em microlinha de transmissão, visando a obtenção da resposta em frequência de um filtro definida por meio de uma Função Objetivo. Para esse fim empregou-se a ferramenta computacional MATLAB com o *toolbox* de algoritmos genéticos para desenvolver um programa de otimização, que interage com o simulador eletromagnético tridimensional – EM-3D *Microwave Suite* da CST. O procedimento de síntese desenvolvido foi aplicado ao projeto de um filtro com dupla-banda de rejeição centradas em 3,3 GHz e 7,8 GHz e de três filtros com característica de rejeição em banda ultra-larga, capazes de rejeitar até uma banda de 9 GHz a 20 GHz com rejeição maior que 10 dB. Os filtros projetados foram construídos em tecnologia planar e caracterizados em frequências de micro-ondas. Os resultados experimentais comprovaram a eficácia e flexibilidade da metodologia de síntese proposta, que possibilitou contribuições originais na área de filtros rejeita-faixa usando estruturas EBG, com topologias inéditas.

Palavras-chave: *Electromagnetic Bandgap*, filtros rejeita-faixa; microlinha de transmissão; banda-larga.

ABSTRACT

This dissertation for a Master degree in Engineering, presents a survey of the application of Electromagnetic Bandgap (EBG) structures on microwave planar circuits, with the conception of original topologies for wide stopband and dual stopband filters, and the proposition of a synthesis methodology for these filters. A filter design methodology was proposed and applied to the design of a transmission line filter using two simultaneous EBG structures, aiming at the achievement of a filter with a wide stop-band. This filter was built in planar circuit technology, with the demonstration of an 11 GHz ultra-wide stopband centered in 11.5 GHz, with high degree of rejection superior than 34 dB, presenting excellent agreement with the computational simulation. In parallel, a synthesis methodology was developed to automatically generate new topologies of stopband filters using EBG structures, that results in filters with wide stopband or dual stop-bands. The proposed synthesis methodology involves computational processes for the optimization of the EBG structure geometry applied to microwave transmission line, aiming at achieving the filter response defined by an objective function. For that, the software MATLAB with the genetic algorithm toolbox was used to develop an optimization program, which interacts with the tridimensional electromagnetic simulator – EM-3D Microwave Suite from CST. The synthesis procedure was applied to the project of one filter with dual stopband centered in 3.3 GHz and 7.8 GHz and to the project of three filters with an wide stopband feature capable of rejecting a frequency band from 9 GHz to 20 GHz with magnitude of rejection greater than 10 dB. The designed filters were built in planar technology and measured at microwave frequencies. The experimental results demonstrated the effectiveness and the flexibility of the proposed synthesis methodology, which allowed original contributions in the field of stopband filters using EBG structures, with novel topologies.

Keywords: Electromagnetic Bandgap, stopband filter; microwave transmission line; wide-band.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tipos de estruturas EBG em circuitos Planares. (a) <i>Frequency Selective Surface</i> (FFS) (Mias, 2002). (b) <i>Electromagnetic Bandgap Ground Plane</i> (EBG-GP) (Oliveira, 2001). (c) <i>Uniplanar Compact Electromagnetic Bandgap</i> (UC-EBG) (Oliveira, 2001). (d) <i>Artificial Magnetic Conductor</i> (AMC) (Silva A. M., 2004).	23
Figura 2 - Metodologia para construção de estrutura PBG tridimensional. (Yablonovitch E. a., 1991).	28
Figura 3 - Exemplos de <i>Photonic Crystal Fiber</i> (PCF). (a) <i>Cladding</i> composto de estrutura periódica unidimensional em camadas concêntricas (b) <i>Cladding</i> composto de estrutura periódica bidimensional por furos no dielétrico. (J.D. Joannopoulos, 2007, p. 157).	29
Figura 4 – Exemplo de FBG - <i>Fiber Bragg Gratings</i> . (Cazo, 2001)	30
Figura 5 - Ilustração da representação da Primeira Zona de Brillouin de uma rede periódica: (a) Rede periódica com um vetor r aleatório representado pela associação de células unitárias dadas pela (b) Primeira zona de Brillouin centrada na origem Γ com um vetor de onda k aleatório e zona irreduzível de Brillouin definida pelos pontos Γ , M e X (John D. Joannopoulos, 2007, p. 38).	32
Figura 6 - Comparação entre os diagramas de dispersão de (a) um semiconductor (Sze, 2007, p. 38) e (b) um cristal fotônico. (J.D. Joannopoulos, 2007, p. 76).	35
Figura 7 – Lei de Bragg para uma onda eletromagnética incidente em um cristal: (a) Ilustração artística e (b) Desenho geométrico. (Mark Ryan RMIT - Applied Physics Melbourne, 2006)	37
Figura 8 – Microlinha de transmissão com estrutura EBG por perfuração do substrato. (Vesna Radisic Y. Q., 1998).	41
Figura 9 - Parâmetros S medidos da microlinha de transmissão com estrutura EBG por perfuração do substrato. (Vesna Radisic Y. Q., 1998).	42
Figura 10 – Microlinha de transmissão com estrutura EBG-GP (Vesna Radisic Y. Q., 1998).	43
Figura 11 - Parâmetros S medidos da microlinha de transmissão com estrutura EBG-GP (Vesna Radisic Y. Q., 1998).	43
Figura 12 – Microlinha de transmissão com estrutura EBG por variação das dimensões geométricas da fita da microlinha de transmissão (Kenji Matsushita, 2010).	45
Figura 13 - Parâmetro S_{21} medido da microlinha de transmissão com estrutura EBG por variação das dimensões geométricas da fita da microlinha de transmissão (Kenji Matsushita, 2010).	45
Figura 14 - Guia de onda coplanar CPW (a) com estrutura UC- EBG - <i>Uniplanar Compact</i> e (b) representação de rede LC equivalente. (Oliveira, 2001)	47
Figura 15 - Exemplo de guia de onda coplanar com estrutura UC-EBG (Oliveira, 2001).	47
Figura 16 - Parâmetro S_{21} guia de onda coplanar com estrutura UC - EBG (Oliveira, 2001).	48
Figura 17 - Curvas simuladas de S_{12} e S_{11} x frequência de microlinha com estrutura EBG-GP de 2 períodos.	49
Figura 18 - Curvas simuladas de S_{12} e S_{11} x frequência de microlinha com estrutura EBG-GP de 3 períodos.	50
Figura 19 - Curvas simuladas de S_{12} e S_{11} x frequência de microlinha com estrutura EBG-GP de 4 períodos.	50
Figura 20 - Curvas simuladas de S_{12} e S_{11} x frequência de microlinha com estrutura EBG-GP de 6 períodos.	50
Figura 21 - Curvas simuladas de S_{12} e S_{11} x frequência de microlinha com estrutura EBG-GP de 8 períodos.	51
Figura 22 - Curvas simuladas de S_{12} x frequência de microlinha com estrutura EBG de diferentes números de períodos.	52

Figura 23 – Microlinha com estruturas EBG-GP em diferentes dimensionalidades, em (a) 1-D e (b) 2-D.....	53
Figura 24 - Curvas simuladas de S_{12} x frequência de microlinha com estruturas EBG-GP em configuração 1-D e 2-D.....	53
Figura 25 – Curvas simuladas de S_{12} e S_{11} x frequência de microlinha com estrutura EBG com fator de preenchimento $\Lambda = 0,15$	54
Figura 26 – Curvas simuladas de S_{12} e S_{11} x frequência de microlinha com estrutura EBG com fator de preenchimento $\Lambda = 0,25$	55
Figura 27 - Curvas simuladas de S_{12} e S_{11} x frequência de microlinha com estrutura EBG com fator de preenchimento $\Lambda = 0,35$	55
Figura 28 - Curvas simuladas de S_{12} e S_{11} x frequência de microlinha com estrutura EBG com fator de preenchimento $\Lambda = 0,45$	56
Figura 29 - Curvas simuladas de S_{12} x frequência de microlinhas com estruturas EBG com diferentes valores de fator de preenchimento Λ	57
Figura 30 - Curvas simuladas de S_{12} e S_{11} x frequência de microlinha com estrutura EBG-GP com $\Delta x = 0,2$ mm.	58
Figura 31 - Curvas simuladas de S_{12} e S_{11} x frequência de microlinha com estrutura EBG-GP com $\Delta x = 0,4$ mm.	59
Figura 32 - Curvas simuladas de S_{12} e S_{11} x frequência de microlinha com estrutura EBG-GP com $\Delta x = 0,8$ mm.	59
Figura 33 - Curvas simuladas de S_{12} e S_{11} x frequência de microlinha com estrutura EBG-GP com $\Delta x = 1,0$ mm.	59
Figura 34 - Curvas simuladas de S_{12} x frequência de microlinhas com estruturas EBG com diferentes valores de desvio Δx	60
Figura 35 - Estrutura EBG com <i>chirping</i> . (a) microlinha de transmissão com estrutura EBG (b) periodicidade da estrutura EBG corroída no plano de terra (M. A. G. Laso, 2000)	63
Figura 36 - Parâmetros S_{11} de microlinhas com estruturas EBG com e sem chirping (M. A. G. Laso, 2000)	64
Figura 37 - Parâmetros S_{21} de microlinhas com estruturas EBG com e sem chirping. (M. A. G. Laso, 2000).	65
Figura 38 - Estrutura EBG com <i>tapering</i> (M. A. G. Laso, 2000).	65
Figura 39 - Estrutura EBG fractal: (a) plano de terra de microlinha com célula unitária quadrada (b) célula unitária da primeira iteração fractal (c) célula unitária da segunda iteração fractal (Yun-Qi Fu, 2002).	66
Figura 40 – Curvas experimentais de S_{21} x frequência de microlinhas com estruturas EBG composta de células unitárias com diferentes geometrias (Yun-Qi Fu, 2002).	67
Figura 41 – Microlinha de transmissão com estrutura EBG com defeito localizado. (Kenji Matsushita, 2010).....	68
Figura 42 – Curvas de S_{21} x frequência de microlinha de transmissão com estrutura EBG com defeito localizado. (Kenji Matsushita, 2010)	68
Figura 43- Microlinha de transmissão com a topologia da estrutura EBG (a) Plano de Terra com estrutura EBG1 (b) Microfita com estrutura EBG2 (c) Filtro completo: estruturas EBG1 e EBG2 sobrepostas, com a camada do substrato omitida para facilitar a visualização.....	72
Figura 44 – Resposta em frequência simulada de filtro em microlinha com estrutura EBG de período $a = 4,85$ mm corroída no plano de terra	75
Figura 45 - Microlinha de transmissão com estrutura EBG1 corroída no plano de terra e fita da microlinha com $w = 0,6$ mm, com a camada do substrato omitida para facilitar a visualização.	77

Figura 46 – Resposta em frequência simulada de filtro em microlinha com estrutura EBG1 corroída no plano de terra.	77
Figura 47 - Microlinha de transmissão com estrutura EBG2 na fita da microlinha e plano de terra contínuo, com a camada do substrato omitida para facilitar a visualização.	80
Figura 48 – Resposta em frequência simulada de filtro com estrutura EBG2 na fita da microlinha de transmissão.	80
Figura 49 - Plano inferior e superior do substrato com estruturas EBG1 e EBG2, com a camada do substrato omitida para facilitar a visualização.	81
Figura 50 – Resposta em frequência simulada do filtro com estrutura EBG1 e EBG2 simultâneas (a) Magnitude de rejeição (b) fase de S_{21}	82
Figura 51 - Fotografia do filtro: (a) face superior, (b) plano de terra.	83
Figura 52 - Resposta em frequência simulada e experimental do filtro: (a) S_{11} (dB) e (b) S_{21} (dB).	84
Figura 53 - Metodologia proposta para otimização de célula unitária de estrutura EBG em circuitos planares.	88
Figura 54 – Exemplo de função matemática composta de diversos mínimos e máximos locais.	92
Figura 55: Implementação da metodologia para otimização de célula unitária de estrutura EBG em circuitos planares.	93
Figura 56 - Exemplo de histórico de otimização.	95
Figura 57 – Exemplo de arquivo CST com modelo da microlinha a ser utilizado para otimização.	95
Figura 58 – Exemplo de discretização da célula unitária no plano de terra de uma microlinha de transmissão no simulador eletromagnético CST.	96
Figura 59 - Exemplo de célula unitária replicada ao longo da linha de transmissão compondo a estrutura EBG, com a camada do substrato omitida para facilitar a visualização.	97
Figura 60 - Plano de terra de microlinha da transmissão com estruturas EBG1 e EBG2.	98
Figura 61 - Células unitárias das estruturas EBG1 e EBG2.	100
Figura 62 - Histórico da evolução do valor da Função Objetivo ao longo das gerações de uma das execuções do algoritmo otimizador.	102
Figura 63 – Leiaute dos filtros com banda de rejeição ultra-larga: (a) Face superior dos três filtros; (b) plano de terra do filtro <i>wide band 1</i> ; (c) plano de terra do filtro <i>wide band 2</i> e (d) plano de terra do filtro <i>wide band 4</i>	104
Figura 64 – Resposta em frequência dos filtros de banda de rejeição ultra-larga: (a) Filtro <i>wide band 1</i> ; (b) filtro <i>wide band 2</i> e (c) Filtro <i>wide band 4</i>	105
Figura 65 - Fotografia dos filtros de banda ultra-larga: (a) face superior dos filtros, (b) plano de terra do filtro <i>wide band 1</i> , (c) plano de terra do filtro <i>wide band 2</i> , (b) plano de terra do filtro <i>wide band 4</i>	106
Figura 66 - Resposta em frequência de S_{11} simulada e experimental do filtro de banda ultra-larga <i>wide band 1</i>	107
Figura 67 - Resposta em frequência de S_{21} simulada e experimental do filtro de banda ultra-larga <i>wide band 1</i>	107
Figura 68 - Resposta em frequência de S_{11} simulada e experimental do filtro de banda ultra-larga <i>wide band 2</i>	108
Figura 69 - Resposta em frequência de S_{21} simulada e experimental do filtro de banda ultra-larga <i>wide band 2</i>	109
Figura 70 - Resposta em frequência de S_{11} simulada e experimental do filtro de banda ultra-larga <i>wide band 4</i>	110
Figura 71 - Resposta em frequência de S_{21} simulada e experimental do filtro de banda ultra-larga <i>wide band 4</i>	110
Figura 72 - Estrutura EBG corroída no plano de terra da microlinha de transmissão.	112
Figura 73 - Célula unitária discretizada para a estrutura EBG.	115

Figura 74 - histórico da evolução do valor da Função Objetivo ao longo das gerações do algoritmo otimizador.....	116
Figura 75 – Leiaute da (a) microfita e (b) do plano de terra do filtro em microlinha otimizado com estrutura EBG de dupla-banda de rejeição.	118
Figura 76 - Resposta em frequência simulada do filtro com dupla-banda de rejeição: (a) S_{11} e (b) S_{21} . ..	119
Figura 77 - Fotografia do filtro rejeita-faixa com dupla-banda de rejeição: (a) face superior do filtro, (b) plano de terra do filtro em microlinha com estrutura EBG corroída.	120
Figura 78 -Resposta em frequência simulada e experimental do filtro rejeita-faixa com dupla-banda de rejeição: (a) S_{11} e (b) S_{21}	121
Figura 79 – Estrutura EBG com a utilização de absorvedores nas bordas da célula unitária como sugestão de trabalhos futuros para métodos numéricos de campos eletromagnéticos.	128
Figura 80 – Modelo de microlinha de transmissão	132
Figura 82 - Caixa de teste de alumínio projetada.....	134
Figura 81- Fluxograma do método de Algoritmo Genético.	136
Figura 82 - Exemplo de geração de indivíduos gerados pelo método de Algoritmo Genético.	136
Figura 83 - Exemplo de mutação de um indivíduo de uma geração no método de Algoritmo Genético..	137
Figura 84 - Exemplo de cruzamento entre indivíduos de uma geração no método de Algoritmo Genético.	138

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EBG	Electromagnetic Bandgap
MIC	Microwave Integrated Circuit
LME	Laboratório de Microeletrônica
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
MMIC	Monolithic Microwave Integrated Circuit
FSS	Frequency Selective Surface
EBG-GP	Electromagnetic Bandgap Ground Plane
UC-EBG	Uniplanar Compact Electromagnetic Bandgap
AMC	Artificial Magnetic Conductor
CAD	Computer Aided Design
ADS	Advanced Design System
CST	Computer Simulation Technology
EMDS	Electromagnetic Design System
PBG	Photonic Bandgap
PCF	Photonic Crystal Fiber
FBG	Fiber Bragg Gratings
CB-CPW	Conductor Backed Coplanar Waveguide
GA	Genetic Algorithm

LISTA DE SÍMBOLOS

R	Raio do núcleo de fibra PCF
a	Periodicidade da estrutura EBG
Γ	Ponto central da primeira zona de Brillouin
X	Ponto definidor da zona irreduzível de Brillouin
L	Ponto definidor da zona irreduzível de Brillouin
M	Ponto definidor da zona irreduzível de Brillouin
$\vec{r}$	Vetor aleatório em uma rede periódica
$\vec{k}$	Vetor aleatório na Primeira Zona de Brillouin
V	Potencial elétrico
R	Periodicidade de uma rede periódica
E	Energia do elétron
ψ	Função de onda
$\hbar$	Constante reduzida de Planck
m	Massa do elétron
ε	Constante dielétrica
μ_r	Permeabilidade magnética relativa
H	Vetor campo magnético
f	Frequência da onda eletromagnética
ω	velocidade angular da onda
k	Vetor de onda eletromagnética
θ	Ângulo de incidência da onda eletromagnética

n	Número múltiplo do comprimento de onda
ε_r	Constante dielétrica relativa
λ_g	Comprimento de onda guiado
$\Delta\lambda$	Banda de rejeição de uma fibra FBG
h	Altura do substrato em uma microlinha de transmissão
t	Espessura do metal da fita de microlinha de transmissão
w	Largura da fita de uma microlinha de transmissão
c	Velocidade da luz no vácuo
ε_0	Constante dielétrica do vácuo
ε_1	Constante dielétrica do substrato sob uma microlinha
ε_2	Constante dielétrica da camada sobre a microlinha
ε_{eff}	Constante dielétrica efetiva do meio
r	Raio do círculo corroído no plano de terra de uma microlinha de transmissão
Λ	Fator de preenchimento de estrutura EBG
Δx	Desvio da fita da microlinha em relação ao eixo da estrutura EBG
δ	Fator de espaçamento entre as células unitárias de uma estrutura EBG
a_0	Período da estruturas EBG para a primeira célula unitária
i	Índice de numeração de células unitárias em uma estrutura EBG
a_i	Período da estruturas EBG para a célula unitária número i
Ld	Espaçamento do defeito inserido em uma estrutura EBG
w_l	Secção mais larga da fita da microlinha com estrutura EBG
l_d	Comprimento da secção mais larga da fita da microlinha com estrutura EBG
x	Resolução mínima da discretização da célula unitária no eixo x

y	Resolução mínima da discretização da célula unitária no eixo y
n_{dis}	Número de subáreas discretizadas da célula unitária
$bitn$	Subárea da célula unitária de índice n
n_{subx}	Número de subáreas por aresta x da célula unitária
n_{suby}	Número de subáreas por aresta y da célula unitária

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	27
2.1.	Histórico das estruturas EBG.....	27
2.2.	Princípio de funcionamento de estruturas EBG	31
2.3.	Introdução ao projeto de estruturas EBG.....	36
2.4.	Tipos de estruturas EBG.....	40
2.4.1.	Estrutura EBG por alteração periódica do dielétrico do substrato	40
2.4.2.	Estrutura EBG por corrosão periódica do plano de terra	42
2.4.3.	Estrutura EBG por alteração periódica das dimensões da fita da microlinha	44
2.4.4.	Estrutura EBG por alteração periódica do acoplamento com o plano de terra ...	46
3	ESTUDO DE PARÂMETROS DE ESTRUTURAS EBG	49
3.1.	Estudo da influência do número de períodos.....	49
3.2.	Estudo da dimensionalidade.....	52
3.3.	Estudo do fator de preenchimento.....	54
3.4.	Estudo da sensibilidade ao desvio de alinhamento	58
3.5.	Conclusões do estudo dos parâmetros da estrutura EBG.....	61
3.6.	Metodologias para melhoria de desempenho de estruturas EBG.....	62
3.7.	Conclusões Parciais	68
4	PROJETO DE FILTRO DE MICROLINHA COM BANDA ULTRA-LARGA	70
4.1.	Introdução.....	70
4.2.	Metodologia de projeto de filtro rejeita-faixa usando duas estruturas EBG simultâneas	70
4.3.	Conclusões parciais.....	85
5	METODOLOGIA PROPOSTA PARA OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURAS EBG.....	86
5.1.	Conceito da metodologia para otimização de estruturas EBG.....	86
5.2.	Implementação da metodologia para otimização de estruturas EBG	93

5.3.	Aplicação da metodologia para otimização de estruturas EBG	97
5.3.1.	Aplicação da metodologia em filtro com banda de rejeição ultra-larga.....	98
5.3.1.1.	Conclusões sobre os filtros de banda ultra-larga projetados	111
5.3.2.	Aplicação da metodologia em filtro de dupla-banda de rejeição.....	112
5.4.	Conclusões Parciais	123
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	125
6.1.	Conclusões	125
6.2.	Sugestões para trabalhos futuros	127
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	129
APÊNDICE A	– Modelo da Microlinha de Transmissão	132
APÊNDICE B	- Desenho mecânico da caixa para medida de filtros	134
APÊNDICE C	- Método dos Algoritmos Genéticos de otimização.....	135
APÊNDICE D	– Rotina Principal em MATLAB para a otimização de estruturas EBG...	139
APÊNDICE E	– Rotina de interface e gravação em MATLAB para interação como simulador eletromagnético CST	141
APÊNDICE F	- Macro do simulador eletromagnético CST para filtro de banda ultra-larga de rejeição.....	145
APÊNDICE G	- Macro do simulador eletromagnético CST para filtro de dupla-banda de rejeição.....	152
APÊNDICE H	– Artigo submetido para publicação em revista.....	165

1 INTRODUÇÃO

1.1 OBJETIVOS E MOTIVAÇÃO

O objetivo desta dissertação de mestrado é realizar um estudo da aplicação de estruturas periódicas eletromagnéticas, *Electromagnetic Bandgap* (EBG), em circuitos planares de micro-ondas, com a proposição de topologias originais de filtros rejeita-faixa.

Para realização desse objetivo, foi proposta uma nova topologia de filtro rejeita-faixa empregando duas estruturas EBG simultâneas em uma microlinha de transmissão com o objetivo de se obter uma banda de rejeição ultra-larga.

Paralelamente, desenvolveu-se uma metodologia de síntese que permite a geração automática de novas topologias de filtros rejeita-faixa empregando estruturas EBG, que resultem em uma banda larga de rejeição ou com duplas bandas de rejeição. A metodologia de síntese envolve procedimentos computacionais de otimização de geometria de estruturas EBG usando ferramenta MATLAB que interage com simuladores eletromagnéticos tridimensionais – EM-3D para a obtenção da resposta de um filtro definida matematicamente por uma função objetivo.

Estruturas EBG são estruturas periódicas que apresentam uma resposta seletiva em frequências através da proibição da propagação das ondas eletromagnéticas em certas bandas de frequência e direção de propagação. De modo geral, estas estruturas são caracterizadas pela inclusão de uma perturbação periódica da constante dielétrica efetiva do meio de transmissão da onda eletromagnética, no seu eixo de propagação.

Estruturas periódicas com características aplicadas para o controle da propagação de energia eletromagnética surgiram inicialmente com a nomenclatura mais específica de *Photonic Bandgap* (PBG), já que seus primeiros estudos foram feitos na região óptica do espectro eletromagnético. Foi em 1987 a partir de estudos publicados (Yablonovitch E. , 1987) que os conceitos de formação de banda proibida fotônica por meio de estruturas periódicas foram primeiramente introduzidos. Neste trabalho o autor defende a possibilidade de controle da emissão espontânea de fótons pelos átomos através de uma estrutura dielétrica periódica tridimensional com uma banda proibida mais ampla que a banda eletrônica do átomo. Assim, com a estrutura proposta, foi possível impedir a emissão de fótons em uma

dada faixa do espectro, pois este átomo estaria envolto de um material no qual modos específicos de propagação da onda eletromagnética seriam proibidos. Desta forma, torna-se possível a melhoria do desempenho de lasers, células solares e transistores bipolares ou de heterojunção, onde a emissão espontânea de fóton pelos átomos de um semicondutor possui grande influência limitante.

No início de sua descoberta e exploração estas estruturas eram fabricadas visando principalmente à demonstração de fenômenos fotônicos. Porém, em meados da década de 1990, foi demonstrada pela primeira vez a possibilidade de se obter este mesmo comportamento aplicado para qualquer comprimento de onda eletromagnético, bastando para isto um aumento nas dimensões da estrutura. Na continuidade deste estudo o mesmo autor (Yablonovitch E. a., 1991) demonstrou pela primeira vez de forma experimental a criação de um material composto de um estrutura *Photonic Band Gap* (PBG) tridimensional, com uma banda proibida em frequência de micro-ondas. A partir de então, surgiram diversos estudos da aplicação deste fenômeno na propagação de ondas em diversas regiões do espectro eletromagnético. Aplicações estas que ao longo do tempo provocaram uma modificação na terminologia utilizada até então para a descrição de tal fenômeno e conduziram a um termo mais abrangente conhecido como *Electromagnetic Bandgap* (EBG).

No final da mesma década surgiram as primeiras aplicações de estruturas periódicas EBG em uma configuração bidimensional (2D) e unidimensional (1D) em circuitos planares de micro-ondas. Desde então, tem-se observado um significativo crescimento de aplicações de estruturas EBG em circuitos planares devido ao novo campo de pesquisa aberto pela possibilidade de manipular a propagação de onda eletromagnética de uma maneira não possível anteriormente.

A motivação para tal estudo se deve ao fato de os projetos baseados em fenômenos eletromagnéticos provenientes da aplicação de estruturas EBG em dispositivos planares possuírem diversas vantagens em comparação com os métodos convencionais de projeto. Estas vantagens são obtidas, como por exemplo, através do aumento da diretividade e da redução de perdas por irradiação em frequências espúrias de antenas de microfita, cujas técnicas convencionais de melhoria baseiam-se na utilização de substratos mais espessos ou antenas em multicamadas com *patches* empilhados (*stacked patches*). Neste caso, algumas destas desvantagens podem ser reduzidas com maior facilidade e eficiência a partir da utilização de antenas com substrato ou com plano de terra constituído de estruturas EBG.

Visto que há uma aplicabilidade emergente desta tecnologia e tendo-se observado que suas características de banda proibida são dependentes das características das estruturas periódicas projetadas, tais como: dimensões, periodicidade e permissividade, um enorme leque de diversidade de geometrias e modos de geração de estruturas periódicas se abre para aplicações em dispositivos planares. Por este efeito, há atualmente sob a denominação de estrutura EBG uma gama de diferentes estruturas propostas com classificações que variam de acordo com o procedimento utilizado para a aplicação de uma periodicidade em rede e respectivamente do surgimento de bandas proibidas.

Na Figura 1 são apresentadas estruturas com diferentes tipos de alterações periódicas em circuitos planares encontradas na literatura da área. Dentre as estruturas apresentadas está a estrutura EBG conhecida como *Frequency Selective Surface* (FSS), como ilustrado na Figura 1(a). A estrutura FSS é aplicada na eliminação de interferência eletromagnética, rejeitando uma faixa de frequência das ondas planas incidentes na mesma. Esta estrutura é constituída por geometrias periódicas metálicas definidas sobre um substrato dielétrico que operam como um filtro para uma onda eletromagnética incidente, sendo a resposta do filtro dependente da geometria que compõe a estrutura, da polarização da onda e do ângulo de incidência (Mias, 2002). Outras estruturas EBG existente na literatura são constituídas a partir de modificações periódicas no plano de terra e são denominadas de *Electromagnetic Bandgap Ground Plane* (EBG-GP), para os caso onde a estrutura EBG é desenvolvida no plano de terra inferior do substrato, como na Figura 1(b), ou de *Uniplanar Compact Electromagnetic Bandgap* (UC-EBG) para os casos onde a estrutura EBG é desenvolvida no plano de terra de um circuito coplanar, conforme ilustrado na Figura 1(c). Estruturas EBG denominadas de *Artificial Magnetic Conductor* (AMC), conforme ilustrado na Figura 1(d), também são conhecidas como superfícies de alta impedância eletromagnética e são constituídas de interconexões periódicas entre a superfície superior do substrato e a superfície inferior do plano de terra (Silva A. M., 2004).

Mais adiante as estruturas EBG-GP serão apresentadas de forma mais detalhada e serão utilizadas na parte experimental do presente trabalho e na metodologia proposta para geração de estrutura EBG.

Figura 1 - Tipos de estruturas EBG em circuitos Planares. (a) *Frequency Selective Surface* (FFS) (Mias, 2002). (b) *Electromagnetic Bandgap Ground Plane* (EBG-GP) (Oliveira, 2001). (c) *Uniplanar Compact Electromagnetic Bandgap* (UC-EBG) (Oliveira, 2001). (d) *Artificial Magnetic Conductor* (AMC) (Silva A. M., 2004).

Estruturas EBG aplicadas em circuitos planares de micro-ondas possuem como grande vantagem para o desenvolvimento em pesquisa o baixo custo e relativa facilidade de fabricação, a partir da utilização da tecnologia de circuitos integrados de micro-ondas ou *Microwave Integrated Circuit* (MIC) e substratos comumente utilizados em circuitos planares como, por exemplo, substratos de Alumina e substratos flexíveis. Dependendo do tipo de estrutura EBG, sua fabricação pode requerer fotogração em apenas uma face ou em ambas as faces do substrato. Esta vantagem possibilita a elaboração de projetos de filtros e antenas planares com características mais satisfatórias que as metodologias de projeto convencionais,

disponibilizando potenciais aplicações em sistemas de comunicações, em particular, nos sistemas *wireless*.

As atividades de pesquisa desta presente dissertação foram desenvolvidas junto ao grupo de micro-ondas do Laboratório de Microeletrônica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, LME-EPUSP, onde projetos de circuitos ativos e passivos de micro-ondas são desenvolvidos utilizando-se das tecnologias planares de *Microwave Integrated Circuit* (MIC) e *Monolithic Microwave Integrated Circuit* (MMIC), com diversas aplicações principalmente em telecomunicações.

Dessa foram, as estruturas EBG projetadas neste trabalho foram implementadas em tecnologia planar, beneficiando-se da experiência em projeto, construção e caracterização de MIC e MMIC, já existentes no LME-EPUSP. O estudo destas estruturas soma conhecimentos, expande a área de pesquisa em circuitos planares de micro-ondas e possibilita contribuições originais na instituição.

1.2 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

Esta dissertação inicia-se com a apresentação do de seus objetivos, bem como da motivação da pesquisa, descritas no Capítulo 1.

No Capítulo 2 são apresentados os fundamentos teóricos, iniciando-se pelo histórico da descoberta dos fenômenos eletromagnéticos percebidos por uma onda eletromagnética ao atravessar uma estrutura periódica do tipo EBG. São descritos a origem desta descoberta, seu princípio de funcionamento, bem como resultados relevantes mais recentes relatados na literatura técnica e os diversos tipos de estruturas EBG existentes.

No Capítulo 3 é descrito o estudo realizado na etapa inicial desta pesquisa para analisar o impacto dos principais parâmetros de estruturas EBG convencionais na resposta em frequência de circuitos planares de micro-ondas. Com esse objetivo analisa-se especificamente um filtro rejeita-faixa apresentado na literatura, composto por uma microlinha de transmissão com uma estrutura EBG formada por uma série de círculos corroídos periodicamente no plano de terra. O estudo realizado abrange o efeito da periodicidade, do fator de preenchimento e do número de elementos da estrutura EBG. É ainda analisado o efeito do desalinhamento entre a estrutura corroída no plano de terra e a fita

condutora que constitui a face superior da microlinha de transmissão, discutindo-se como esse desalinhamento, que pode ocorrer durante a fabricação do circuito, afeta a resposta em frequência do mesmo. Completando esse capítulo, discutem-se os procedimentos propostos na literatura para a otimização do desempenho de circuitos de micro-ondas empregando estruturas EBG não convencionais.

No capítulo 4 apresenta-se uma metodologia de projeto aplicada a um filtro passa-baixa com banda de rejeição ultra-larga. Esse filtro associa duas estruturas EBG distintas, utilizadas simultaneamente em uma microlinha de transmissão. São descritos a topologia do filtro, seu princípio de funcionamento, bem como sua resposta em frequência simulada em simulador EM-3D. Os resultados experimentais do filtro construído em substrato de Alumina demonstrou boa concordância com as simulações, tendo sido obtida uma faixa de rejeição ultra-larga de 11 GHz, centrada em 11,5 GHz, com magnitude de rejeição maior que 34 dB.

O capítulo 5 contém a descrição do procedimento de síntese de filtros que foi desenvolvido como parte da pesquisa de mestrado, que envolve a interação entre rotinas computacionais desenvolvidas em MATLAB com a utilização do *Toolbox* de algoritmos genéticos e o simulador eletromagnético tridimensional – EM-3D *Microwave Suite* da CST. Esse procedimento visa a proposição de novas estruturas EBG otimizadas, obtidas pela aplicação do procedimento de síntese desenvolvido para filtros constituídos por microlinhas de transmissão com estruturas EBG corroídas no plano de terra. Essas estruturas EBG são otimizadas automaticamente, de modo a atender a resposta em frequência desejada, definida matematicamente por uma Função Objetivo. Apresenta-se a aplicação desse procedimento de síntese tanto para filtro rejeita-faixa com banda de rejeição ultra-larga, como para filtro com dupla-banda de rejeição. São comparados resultados simulados e experimentais de quatro filtros sintetizados por esse procedimento, sendo um deles um filtro com dupla-banda de rejeição, construído em substrato flexível e três filtros construídos em substrato de Alumina, com banda de rejeição ultra-larga.

Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões da pesquisa realizada, bem como algumas sugestões de trabalhos futuros.

Os apêndices completam o texto da dissertação, abordando o modelo da microlinha de transmissão, o método de algoritmos genéticos aplicado na otimização das estruturas EBG, bem como as rotinas computacionais desenvolvidas em MATLAB e em Macro do simulador

eletromagnético *Microwave Suite*/CST como parte do método de síntese automática de filtros. No ultimo apêndice é apresentado o artigo submetido para publicação em uma revista internacional, gerado a partir do filtro descrito no capítulo 4.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo são apresentados aspectos históricos de estruturas EBG, bem como uma revisão da literatura técnica e os princípios teóricos que abrangem o princípio de operação, projeto e tipos de estruturas EBG.

2.1. Histórico das estruturas EBG

Estruturas EBG são estruturas periódicas que apresentam uma resposta seletiva em frequências através da proibição da propagação das ondas eletromagnéticas em certas bandas de frequência e direção de propagação. Estas estruturas periódicas surgiram inicialmente com a nomenclatura mais específica de estrutura *Photonic Bandgap* (PBG), já que seus primeiros estudos foram feitos na região óptica do espectro eletromagnético.

A tecnologia PBG surgiu a partir de um artigo publicado em 1987 pelo Dr. Yablonovitch, onde foi introduzido o conceito de bandas proibidas fotônicas para controle da emissão espontânea de luz (Yablonovitch E. , 1987). A idéia fundamental é a de que os cristais fotônicos atuam sobre os fótons da mesma forma que os cristais atômicos atuam sobre os elétrons em um semicondutor, ou seja, criando uma situação em que fótons com energias em um determinado intervalo, denominado de banda proibida, sejam impedidos de se propagar ao longo do eixo cristalino. Este ponto conceitual é muito importante, pois é o que caracteriza e diferencia o fenômeno próprio das estruturas PBG, visto que a reflexão da banda proibida de uma onda eletromagnética que incide em uma estrutura PBG não é proveniente da absorção e re-emissão dos fótons devido a uma onda eletromagnética incidente, como ocorre com a reflexão da onda eletromagnética em materiais comuns. Trata-se de um novo conceito baseado na não propagação deste fóton simplesmente porque não existem modos disponíveis para sua propagação ao longo do eixo cristalino.

Foi na continuidade deste estudo que em 1991 o mesmo autor (Yablonovitch E. a., 1991) demonstrou experimentalmente a possibilidade de criação de um material PBG tridimensional, ou seja, com variação periódica da constante dielétrica do material nos três eixos de propagação. Esta estrutura PBG tridimensional foi concebida a partir de diversas perfurações em um substrato, compondo uma rede triangular de orifícios. Nesta configuração cada orifício é perfurado três vezes com separação de 120° e com inclinação de 35° ao eixo

vertical do material, conforme ilustrado na Figura 2. O resultado destas perfurações são redes periódicas constituídas pela alternância da constante dielétrica do material e da constante dielétrica do ar, nos três eixos de propagação devido aos furos feitos no material. Neste material foi possível ser observado, pela primeira vez, o surgimento de bandas proibidas totais, ou seja, nos três eixos de coordenadas, em frequências de micro-ondas (13 GHz a 15 GHz).

Figura 2 - Metodologia para construção de estrutura PBG tridimensional. (Yablonovitch E. a., 1991)

Devido ao comprimento de onda favorável, a faixa de micro-ondas tem servido como um ótimo “campo de teste” experimental de estruturas PBG, pois nesta faixa de frequência estas estruturas possuem dimensões da ordem de centímetros em contraste com uma ordem de grandeza de micrometros, típica das estruturas que operam no regime óptico do espectro eletromagnético. Isto torna a fabricação, teste e caracterização das estruturas e dispositivos mais simples e com baixo custo, o que favoreceu a abertura de um vasto caminho para a gama de aplicações que emergiriam desta nova tecnologia nos anos seguintes.

A partir de então, no decorrer desta mesma década o efeito de bandas proibidas em um meio de propagação periódico foi exaustivamente estudado e analisado. Estes estudos levaram a um desenvolvimento considerável do conceito de estruturas PBG e da sua teoria associada.

Dentre as aplicações no campo óptico que possuem associação com a tecnologia baseada em estruturas PBG, podemos destacar a *Photonic Crystal Fiber* (PCF), ou fibra óptica microestruturada. Esta fibra óptica possui como princípio de funcionamento uma rede no eixo radial com uma alternância da constante dielétrica do material em todo o entorno do núcleo da fibra. Esta alternância da constante dielétrica da fibra no sentido radial pode ser feita de forma unidimensional, conforme ilustrado na Figura 3(a), ou de forma bidimensional,

conforme ilustrado na Figura 3(b). Esta configuração favorece o confinamento da luz dentro do guia óptico que constitui a fibra, pois para uma dada frequência, a energia eletromagnética não consegue atravessar a parte externa da fibra, denominada *cladding* da fibra, devido à periodicidade imposta pela alternância da constante dielétrica. Logo, nesta configuração resta para a onda eletromagnética apenas a propagação através do núcleo da fibra. Assim, é possível observar que a propagação guiada da luz em fibras PCF se baseia na proibição da onda de se propagar através da rede periódica dielétrica no sentido radial da fibra, portanto no confinamento da luz no núcleo desta fibra. Esta definição é diferente do modo de propagação da luz em uma fibra convencional, a qual se baseia no conceito de reflexão interna total da luz no interior da fibra, devido à diferença entre as constantes dielétricas, sendo a constante dielétrica do núcleo necessariamente maior que a do *cladding*. Portanto, uma nova possibilidade surge para a construção de fibras com o índice de refração do núcleo menor do que o índice de refração do *cladding*, ou até mesmo a construção de fibras de núcleos ocos, o que poderá acarretar em fibras com menores índices de perdas.

Figura 3 - Exemplos de *Photonic Crystal Fiber* (PCF). (a) *Cladding* composto de estrutura periódica unidimensional em camadas concêntricas (b) *Cladding* composto de estrutura periódica bidimensional por furos no dielétrico. (J.D. Joannopoulos, 2007, p. 157).

Outra associação de estruturas PBG no campo óptico foi o advento da *Fiber Bragg Gratings* (FBG), ilustrada na Figura 4. Esta fibra, em seu processo de fabricação, possui seu núcleo exposto a uma radiação que provoca uma modificação permanente da constante dielétrica do material na parte irradiada. Esta radiação é repetida de forma espaçada e periódica, ao longo do eixo de propagação da fibra, permitindo a obtenção de um núcleo composto de um material que possui uma alternância periódica da constante dielétrica. Por possuir em seu núcleo uma rede periódica dielétrica composta pela alternância de constantes dielétricas diferentes ao longo do eixo de propagação, esta fibra possui característica bem definida de filtro. Assim, devido à periodicidade da rede, certas ondas eletromagnéticas são proibidas de se propagarem ao longo da fibra e são refletidas. Esta fibra quando utilizada como sensores

ópticos, se tornam sensíveis a estímulos mecânicos, tais como pressão ou temperatura. Estes estímulos variam fisicamente a periodicidade da estrutura PBG através de deformações mecânicas por força ou temperatura, variando consecutivamente a frequência central da banda de rejeição da rede, a qual pode ser detectada através de instrumentação.

Figura 4 – Exemplo de FBG - Fiber Bragg Gratings. (Cazo, 2001)

Torna-se claro que termo *Photonic Bandgap* (PBG) refere-se ao estudo inicial deste fenômeno sobre as ondas eletromagnéticas na região óptica do espectro de frequência. No entanto, um problema comum nesta terminologia surge quando empregamos o termo para designar estruturas que operam fora do domínio óptico do espectro. Neste caso, como se trata de um fenômeno observado em toda a gama do espectro eletromagnético, o termo PBG se torna um pouco restritivo. Por este motivo em publicações mais recentes a utilização do termo *Electromagnetic Bandgap* (EBG) obteve uma maior aceitação, uma vez que é mais abrangente quanto a gama do espectro de frequências a ser utilizada.

Desde então, novas topologias de estruturas EBG têm sido propostas com a finalidade de se obter um melhor desempenho na rejeição das bandas proibidas e como proposta de utilização

destes materiais em diversos dispositivos, onde um melhor controle da propagação de ondas eletromagnéticas seja desejado.

2.2. Princípio de funcionamento de estruturas EBG

Há uma analogia conceitual no fenômeno de bandas proibidas em um cristal fotônico e o surgimento de bandas proibidas impostas aos elétrons que atravessam um cristal atômico, pois ambos possuem um potencial periódico ao longo do meio a ser percorrido. Assim, nestas situações poderá não haver estados de energia disponíveis para a propagação na faixa de energia analisada, tanto para o fóton quanto para o elétron.

Para iniciarmos a descrição e compreensão da interferência que as estruturas periódicas do tipo EBG produzem em uma onda eletromagnética que a atravessa podemos, a fim de comparação, conceber estas estruturas EBG como sendo uma rede periódica dielétrica artificial, que atua nos fótons portadores da energia eletromagnética de forma similar como ocorre com os elétrons que atravessam uma rede periódica de átomos de um semiconductor.

A partir desta concepção, temos como intuitivo o fato que com alterações nas dimensões e características desta rede periódica, poderemos controlar a propagação de modos eletromagnéticos que atravessam a estrutura. Logo, o controle da geometria da rede periódica pode permitir o controle da propagação de modos desejados e impedir a propagação de modos indesejados, contribuindo para o surgimento de uma banda proibida entre estas bandas de energias condutoras permitidas.

Podemos retomar da física do estado sólido que, em um cristal indefinidamente longo, as soluções das ondas no meio periódico podem ser totalmente caracterizadas a partir de uma célula unitária representativa, conhecida como a primeira zona de Brillouin. Esta primeira zona de Brillouin representa a menor célula repetidora dentro da estrutura periódica. Logo, poderemos simplificar o problema da solução de estados de energias permitidos em uma rede de dimensão infinita, ilustrada na Figura 5(a), pelo seu representante em um espaço reduzido definido pela primeira zona de Brillouin, conforme ilustrado na Figura 5(b).

Nesta representação dentro da célula unitária da rede periódica destaca-se uma região definida entre os pontos Γ , M e X , conhecida como zona irreduzível de Brillouin, conforme ilustrado na

Figura 5(b). Esta é a menor região dentro da primeira zona de Brillouin, no qual, o vetor $\vec{k}$ não pode ser relacionado por nenhuma simetria, pois o restante da região da célula unitária consiste basicamente em cópias transacionadas da zona irreduzível. Assim, as soluções de estados permitidos para um vetor $\vec{r}$ na rede periódica estarão necessariamente todas dentro das soluções obtidas na zona irreduzível. Desta forma, caso a relação de dispersão do elétron, que se define pela relação entre a energia e o vetor de onda para uma dada direção, seja descrita dentro da zona irreduzível de Brillouin, então esta será representativa para toda a rede periódica.

Figura 5 - Ilustração da representação da Primeira Zona de Brillouin de uma rede periódica: (a) Rede periódica com um vetor $\vec{r}$ aleatório representado pela associação de células unitárias dadas pela (b) Primeira zona de Brillouin centrada na origem Γ com um vetor de onda $\vec{k}$ aleatório e zona irreduzível de Brillouin definida pelos pontos Γ , M e X (John D. Joannopoulos, 2007, p. 38).

Temos que o cálculo do potencial elétrico para um elétron localizado em um cristal é dependente de sua posição e é dado por $V(r)$, onde r representa uma dada posição da célula unitária. Pela simetria da rede composta de diversas células unitárias, temos que o potencial elétrico $V(r)$ é uma função periódica com periodicidade R e que, devido à sua periodicidade, possui uma simetria transacional dada por:

$$V(r) = V(r + R) \quad (1)$$

Os estados de energia E do elétron podem ser obtidos através da equação de Schrödinger, resultando a equação dos estados de energia do elétron em um potencial periódico, dado por (Sze, 2007, p. 12):

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r) \right] \psi(r) = E \psi(r) \quad (2)$$

Onde m é a massa da partícula, $\hbar$ é a constante reduzida de Planck e $\psi(r)$ é a função de onda, a qual representa a amplitude provável da partícula para uma dada posição r em um dado tempo.

Da solução da equação acima teremos que os autoestados resultantes irão compor a relação de dispersão da rede cristalina, ou seja, a relação entre a energia do elétron que se propaga na rede cristalina e o vetor de onda nesta rede. Assim, caso não haja nenhum estado de energia disponível para o elétron para um dado vetor de onda, haverá o surgimento de bandas proibidas.

De forma análoga, a constante dielétrica $\varepsilon(r)$ do material em um meio no qual exista uma modulação periódica R que, devido à periodicidade da rede, será caracterizado com uma simetria translacional dada por:

$$\varepsilon(r) = \varepsilon(r + R) \quad (3)$$

A propagação dos fótons que atravessam este material, considerando material não ferromagnético de permeabilidade magnética relativa $\mu_r = 1$, será governada pela equação de onda clássica de Maxwell para o campo magnético $H(r)$ que percorre um meio periódico, escrita como (John D. Joannopoulos, 2007, p. 9):

$$\left[\nabla \times \frac{1}{\varepsilon(r)} \nabla \times \right] H(r) = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 H(r) \quad (4)$$

Onde ω é a velocidade angular da onda, c a velocidade da luz e $H(r)$ vetor campo magnético.

As equações acima mostram o paralelismo existente entre a propagação de elétrons em sólidos cristalinos e a propagação de fótons da onda eletromagnética em um cristal fotônico.

Temos da física do estado sólido que para o caso do elétron livre, ou seja, não confinado em uma região onde efeitos quânticos sejam relevantes, a dispersão de energia dada pela relação

entre a energia E e o vetor de onda $\vec{k}$, é uma parabólica e sem nenhum estado de energia proibido, obtida pela equação:

$$E = \hbar^2 k^2 / 2m \quad (5)$$

Portanto, sem a formação de bandas proibidas, já que todos estados de energia são permitidos. No entanto, este mesmo elétron ao se propagar em um cristal, ou seja, na presença de um potencial periódico, passa a ter uma equação de energia de autovalores e a possuir bandas de energia proibidas, pois nem todos seus estados de energia são permitidos, já que não existem valores de energia permitidos para a propagação no sentido de determinados vetores $\vec{k}$. Logo, a periodicidade do potencial da rede impede a propagação de elétrons com certas energias e favorece o surgimento de bandas proibidas.

De forma análoga, a propagação de energia eletromagnética em um espaço homogêneo livre, comporta-se de forma linear dado por:

$$\omega = ck \quad (6)$$

Portanto, sem nenhum estado de energia proibido. No entanto, a propagação de fótons em um meio dielétrico periódico poderá apresentar regiões em frequência, nas quais sua propagação não será permitida, pois poderá não haver estados de energias permitidos para sua propagação na rede cristalina para certos vetores de onda $\vec{k}$, o que favorece a formação de bandas proibidas ao longo do eixo de propagação. Assim, fótons com intervalo determinado de frequência não poderão se propagar no cristal.

Esta analogia na rejeição de banda pode ser verificada na Figura 6, onde está ilustrada uma comparação entre o diagrama de dispersão de um cristal semiconductor composto de Silício (Si) e o diagrama de dispersão de um cristal fotônico composto de uma estrutura EBG. Na Figura 6(a) observamos o diagrama de dispersão do semiconductor. Neste gráfico o eixo das abscissas está representado pelos vetores de onda existentes entre os pontos Γ , L e X , os quais compõem a zona irreduzível de Brillouin da célula unitária do semiconductor (Si), ilustrada geometricamente dentro da área do gráfico. No diagrama de dispersão do semiconductor (Si) da Figura 6(a) é possível observar uma banda de energia proibida no eixo das coordenadas entre 0 e 1 elétron Volt, já que não há estado de energia disponível para o

elétron para qualquer vetor existente dentro da zona irreductível, representada pelos pontos Γ , L e X .

Na Figura 6(b) é possível observar o diagrama de dispersão de um cristal fotônico. Neste gráfico o eixo das abscissas está representado pelos vetores de onda entre os pontos Γ , M e K que compõem a zona irreductível de Brillouin da célula unitária do cristal fotônico, ilustrada geometricamente dentro do gráfico. No diagrama de dispersão de um cristal fotônico da Figura 6(b) observamos no eixo de coordenadas uma banda proibida composta pelos comprimentos de onda entre as frequências normalizadas pela periodicidade a da rede cristalina de 0,42 e 0,51, já que não há propagação com frequência normalizada nesta faixa para qualquer vetor de onda entre os pontos Γ , M e K que compõem a zona irreductível de Brillouin da célula unitária do cristal fotônico.

A normalização da frequência empregada na Figura 6(b) é muitas vezes utilizada para verificar a eficiência de certa estrutura EBG ao surgimento de bandas proibidas independente de suas dimensões. Com a normalização a resposta do diagrama de dispersão pode ser escalonada para qualquer frequência pela relação entre o comprimento da onda $\lambda = c/f$ e a periodicidade a da rede, resultando da normalização da frequência $\omega a/2\pi c$ no eixo das coordenadas a relação λ/a .

Figura 6 - Comparação entre os diagramas de dispersão de (a) um semiconductor (Sze, 2007, p. 38) e (b) um cristal fotônico. (J.D. Joannopoulos, 2007, p. 76)

Visto as propriedades de rejeição de bandas observadas em uma rede periódica cristalina, ou seja, a forma com que uma estrutura periódica afeta a propagação dos fótons, pode-se constatar que o comportamento da onda ao atravessar uma estrutura EBG será determinado pelas seguintes características da estrutura:

- ✓ Contraste entre as constantes dielétricas (ϵ_1/ϵ_2);
- ✓ Fator de preenchimento (*filling factor*), razão entre o volume ocupado por cada dielétrico em relação ao volume total da célula unitária;
- ✓ Geometria da célula unitária que forma a estrutura periódica.

Tendo em vista as diversas variáveis que compõem as soluções físicas do problema de propagação de uma onda eletromagnética que atravessa uma rede periódica, temos para a solução física de problema envolvendo estruturas periódicas as leis de Maxwell, como foi demonstrado acima, da mesma forma que tratamos os demais problemas de propagação de uma onda eletromagnética em meio homogêneos. No entanto, para cálculos de propagação de ondas em meios de transmissão compostos de geometrias de relativa complexidade, as soluções das equações diferenciais provenientes da lei de Maxwell possuem solução analítica difícil ou impossível. Logo, para problemas deste tipo, devido principalmente à complexidade das condições de contorno impostas, as soluções das equações são comumente tratadas a partir de métodos numéricos de cálculo.

Desta forma, sem um modelo teórico relevante que possa se adequar bem ao problema proposto há a necessidade da utilização de grande quantidade de processamento computacional para se realizar a análise destas estruturas EBG. Esta análise é feita a partir de métodos numéricos, tais como: o método diferenças finitas, o método dos elementos finitos ou o método dos momentos.

2.3. Introdução ao projeto de estruturas EBG

Apresentado o conceito de rede periódica e a complexidade para o cálculo analítico dos potenciais dos campos eletromagnéticos que percorrem a estrutura EBG, será apresentada em seguida uma metodologia de projeto para estimar a frequência central de rejeição de uma rede periódica simétrica e infinita, baseando-se na lei da difração de Bragg. Este conceito conhecido meramente por Lei de Bragg foi primeiramente enunciado pelo próprio William

Lawrence Bragg em 1912 depois de observações sobre picos de difração de raios-x que podem surgir em certas frequências em um conjunto de planos cristalográficos, como ilustrado na Figura 7(a). Foi observado que devido à relação de espaçamento entre os planos cristalográficos e o comprimento da onda eletromagnética incidente, alguns comprimentos de ondas específicos são impedidos de atravessar o cristal, sendo refletidos.

Figura 7 – Lei de Bragg para uma onda eletromagnética incidente em um cristal: (a) Ilustração artística e (b) Desenho geométrico. (Mark Ryan RMIT - Applied Physics Melbourne, 2006)

Assim, devido ao fato das ondas refletidas percorrerem percursos diferentes ao da onda incidente uma interferência é gerada. Logo, dependendo do ângulo de incidência da onda eletromagnética teremos como resultado: uma interferência construtiva ou destrutiva. Os resultados destas interferências de nosso interesse serão valores máximos quando o caminho adicional percorrido pelas ondas eletromagnéticas refletidas for equivalente a um múltiplo do comprimento de onda incidente. Logo, a partir da Figura 7(b), impomos algebricamente que a diferença entre os caminhos percorridos pela onda seja igual a um múltiplo n do comprimento de onda λ :

$$(AB + BC) - (AC') = n\lambda \quad (7)$$

Tem-se do ângulo de incidência da onda θ e da periodicidade a do cristal que:

$$AB = BC = \frac{a}{\sin \theta} \quad (8)$$

e

$$AC = \frac{2a}{\tan \theta} \quad (9)$$

Segue-se que:

$$AC' = AC \cos \theta = \frac{2a}{\tan \theta} \cos \theta = \left(\frac{2a}{\sin \theta} \cos \theta \right) \cos \theta = \frac{2a}{\sin \theta} \cos^2 \theta \quad (10)$$

Substituindo na primeira equação, teremos:

$$n\lambda = \frac{2a}{\sin \theta} (1 - \cos^2 \theta) = \frac{2a}{\sin \theta} \sin^2 \theta \quad (11)$$

A qual por simplificação obtém-se:

$$n \lambda = 2a \sin \theta \quad (12)$$

Um fenômeno similar acontece com os cristais fotônicos artificiais. Devido à existência de planos cristalinos, ou seja, da existência de uma periodicidade nestes cristais, fótons em algumas regiões de frequência serão impedidos de atravessar o cristal. Assim, para mérito de projeto, no qual um ângulo de incidência ortogonal ao eixo cristalino, de acordo com a lei de Bragg, teremos $\theta = 90^\circ$ e $\sin \theta = 1$, segue que os comprimentos de onda para máxima reflexão serão dados por:

$$\lambda = \frac{2a}{n} \quad (13)$$

Onde n poderá ser qualquer valor real inteiro: $n = 1, 2, 3, \dots$

Logo, a banda de rejeição resultante de uma onda incidente ortogonal à uma estrutura EBG será centrada em uma frequência que poderá ser obtida pela relação da eq.(13), conhecida como condição de Bragg, que determina a relação entre o comprimento de onda λ da frequência central da banda de rejeição e a periodicidade a da rede cristalina.

Baseado neste conceito, este fenômeno eletromagnético começou a ser aplicado em regime de micro-ondas. Esta aplicação foi estimulada pelas vantagens que o comprimento de onda nesta região poderia fornecer na aplicação emergente desta tecnologia em rádio comunicação.

Assim, para projeto de estrutura EBG em circuitos planares de micro-ondas, deve-se considerar que em um meio dielétrico, temos o comprimento de onda guiada λ_g dado por:

$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (14)$$

Sendo ϵ_{eff} a constante dielétrica efetiva do meio percorrido pela onda eletromagnética.

Logo, a partir do comprimento de onda guiado eq.(14) e da Lei de Bragg para uma onda ortogonal ao eixo cristalino dada pela eq.(13), teremos que a frequência central f da primeira banda de rejeição para uma estrutura EBG em circuitos planares, dada por $n=1$ é:

$$f = \frac{c}{2a\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (15)$$

Verifica-se desta dedução que as variáveis responsáveis pela frequência central da banda de rejeição são a constante dielétrica efetiva ϵ_{eff} da microlinha de transmissão e a periodicidade a da rede.

Para o caso do modelo de uma microlinha de transmissão, o cálculo da constante dielétrica efetiva ϵ_{eff} detalhado no APÊNDICE A, para uma relação geométrica da microlinha de $\left(\frac{w}{h}\right) \geq 1$ e $(t/w) \ll 1$, onde w é a largura da fita da microlinha de transmissão e h é a altura do substrato e t é a espessura do metal da fita da microlinha, é dado por:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \left(1 + 12\frac{h}{w}\right)^{-0,5} \quad (16)$$

Sendo ϵ_1 a constante dielétrica do substrato sob a microlinha e ϵ_2 a constante dielétrica da camada sobre a microlinha, geralmente preenchido com ar ou $\epsilon_2 = 1$.

Podemos observar desta formulação que a modificação periódica da constante dielétrica efetiva ε_{eff} em uma microlinha de transmissão poderá ser provocada por diversos parâmetros tais como exemplo: por variação da permissividade ε_l ou por variação da dimensão w da linha de transmissão.

Baseado nestes conceitos há atualmente diversos métodos desenvolvidos para a implantação de estruturas periódicas em circuitos planares de micro-ondas. Estes métodos possuem a mesma finalidade em comum de obter bandas proibidas com a introdução de uma periodicidade em rede. Porém, diferenciam-se entre si pela metodologia utilizada para a implementação desta periodicidade. Desta maneira, cada uma destas metodologias possui características distintas de fabricação e concepção de bandas proibidas, conforme será apresentado em seguida.

2.4. Tipos de estruturas EBG

Estruturas EBG podem ser construídas em circuitos planares de micro-ondas através de diferentes métodos, que fazem com que a onda eletromagnética encontre uma alteração periódica das condições de propagação ao longo de seu percurso. Os diversos tipos de estruturas EBG são descritos nos itens a seguir.

2.4.1. Estrutura EBG por alteração periódica do dielétrico do substrato

Conforme apresentado na introdução do presente trabalho, o fenômeno por trás do surgimento de bandas proibidas a partir de estruturas periódicas que impedem a propagação de fótons em uma dada direção é aplicável a todo espectro eletromagnético. Foi a partir desta idéia que na década de 1990 surgiram as primeiras aplicações de estruturas EBG em circuitos planares de micro-ondas (Yongxi Qian, 1997).

Nestas primeiras aplicações as implementações de estruturas EBG foram concebidas através da perfuração do substrato do circuito planar de forma a criar uma perturbação da constante dielétrica do substrato com um padrão periódico desejado. Estes furos no substrato dos circuitos planares agiriam como uma variação periódica das constantes dielétricas do material do substrato ao longo do eixo de propagação do sinal. Por sua vez, esta variação da constante

dielétrica proporcionaria o surgimento de bandas proibidas através do fenômeno de rejeição de banda descrito anteriormente. Portanto, este fenômeno de rejeição de banda estaria intimamente relacionado com o raio e a periodicidade dos furos no dielétrico.

Vemos uma aplicação desta metodologia de projeto de estruturas EBG em circuitos planares aplicada a amplificadores de potência com filtro de segunda harmônica (Vesna Radisic Y. Q., 1998), ilustrado na Figura 8. Nesta configuração a periodicidade da estrutura EBG está sintonizada no comprimento de onda da segunda harmônica, proporcionando uma banda de rejeição mais larga que os métodos de filtragem convencionais em amplificadores que utilizam tocos de quarto de onda. Para este fim, tornam-se então possíveis projetos de amplificadores mais eficientes para bandas largas.

Figura 8 – Microlinha de transmissão com estrutura EBG por perfuração do substrato. (Vesna Radisic Y. Q., 1998)

A Figura 9 apresenta os parâmetros S medidos da uma microlinha de transmissão com estrutura EBG constituída por perfuração do substrato. Observam-se nessa figura as bandas de rejeição criadas pela introdução da estrutura EBG com frequências centrais de rejeição de 8.5 GHz e 17 GHz, sendo a primeira e a segunda banda de rejeição, respectivamente.

Figura 9 - Parâmetros S medidos da microlinha de transmissão com estrutura EBG por perfuração do substrato. (Vesna Radisic Y. Q., 1998)

Esta técnica, apesar de ser a primeira a ter demonstrado a aplicação de estruturas EBG em circuitos planares, foi praticamente abandonada e superada por outras técnicas mais recentes e mais eficazes de utilização de estruturas EBG em circuitos planares. Esta preferência por outras metodologias deve-se às dificuldades e imprecisões no processo de fabricação proveniente da implementação de furos nos substratos dos circuitos planares, devido ao fato de tais imprecisões proporcionarem distorções indesejadas na resposta esperada.

2.4.2. Estrutura EBG por corrosão periódica do plano de terra

Um método alternativo para a aplicação de estruturas EBG em circuitos planares é a concepção da estrutura nomeada na literatura como estrutura *Electromagnetic Bandgap Ground Plane* (EBG-GP). Esta estrutura EBG implementada no plano de terra de uma microlinha de transmissão foi proposta primeiramente em 1998 (Y., 1998. v. 3) (Ian Rumsey, 1998) e se diferencia pelo fato de requerer somente uma corrosão parcial do plano de terra para sua fabricação. Esta metodologia de concepção de estrutura EBG se torna compatível com a tecnologia empregada na fabricação de circuitos monolíticos, sendo de fácil construção, pois pode ser incluída nos mesmos processos típicos de fabricação de circuitos convencionais.

Assim, através de uma variação periódica do plano de terra por corrosão parcial do metal, poderemos ter uma microlinha de transmissão com uma estrutura EBG operando como um filtro rejeita faixa, conforme ilustrado na Figura 10. Esta aplicação refere-se ao filtro publicado por (Vesna Radisic Y. Q., 1998), o qual possui como finalidade a filtragem do sinal com rejeição da faixa em torno da frequência central sintonizada em 11 GHz.

Figura 10 – Microlinha de transmissão com estrutura EBG-GP (Vesna Radisic Y. Q., 1998).

A Figura 11 apresenta os parâmetros S medidos da microlinha de transmissão com a estrutura EBG. Nesta figura podemos observar a banda de rejeição da microlinha de transmissão com estrutura EBG por corrosão do plano de terra, onde é presente o comportamento rejeita faixa da mesma, com banda de rejeição centrada em 11 GHz.

Figura 11 - Parâmetros S medidos da microlinha de transmissão com estrutura EBG-GP (Vesna Radisic Y. Q., 1998).

Apesar de sua facilidade de fabricação as estruturas EBG-GP também possuem certas imprecisões, principalmente devido à falta de alinhamento entre as máscaras de ambas as faces do substrato. No entanto, a partir de processos elaborados de fotogração pode-se chegar a um resultado satisfatório de alinhamento. Desta forma, a utilização destas estruturas EBG-GP tem sido a preferência em publicações recentes, dado ao fato de produzirem resultados melhores e mais precisos do que a alternativa anterior de perfuração do substrato. A metodologia de fabricação de estruturas EBG-GP possui ainda uma maior versatilidade, pois permite a fabricação pelo processo de fotogração de estruturas compostas de diferentes geometrias, não se limitando a geometria necessariamente circular pela aplicação de furos no substrato.

2.4.3. Estrutura EBG por alteração periódica das dimensões da fita da microlinha

De maneira análoga à geração de EBG-GP por corrosão periódica do plano de terra como apresentado no item anterior, pode-se efetuar a variação periódica da impedância característica de uma microlinha de transmissão a partir da variação da largura da fita da microlinha de transmissão. Assim, bandas proibidas podem ser obtidas a partir apenas da variação das dimensões da fita da microlinha de transmissão ao longo de seu eixo de propagação. (Chang, 2001) (Lee, 2006) (Chul-Sik Kee J.-E. K., 1999) (Sang-Gyu Park, 2005).

A Figura 12 apresenta uma microlinha de transmissão com variação periódica gradual do fator geométrico w/h ao longo do seu eixo de propagação. Podemos observar pela ilustração que a variação do fator geométrico provoca uma variação gradual periódica na impedância característica da microlinha. Devido à diferença de impedância, haverá reflexões parciais do sinal propagante, provocando uma difração entre o sinal incidente e o sinal refletido. Estas interferências entre os sinais provocam valores máximos e mínimos em função da relação entre o comprimento de onda do sinal e a periodicidade da rede, conforme descrito pela Lei de Bragg.

Figura 12 – Microlinha de transmissão com estrutura EBG por variação das dimensões geométricas da fita da microlinha de transmissão (Kenji Matsushita, 2010).

Apresentamos na Figura 13 a resposta em frequência do coeficiente de transmissão (parâmetro S_{21} ou S_{12}) medida da microlinha de transmissão com a estrutura EBG por variação periódica do fator geométrico w/h . Podemos observar desta medida o surgimento da banda de rejeição, com pico de rejeição em torno da frequência de 5 GHz.

Figura 13 - Parâmetro S_{21} medido da microlinha de transmissão com estrutura EBG por variação das dimensões geométricas da fita da microlinha de transmissão (Kenji Matsushita, 2010).

Com o exemplo acima foi demonstrado, como forma alternativa, a possibilidade de fabricação de um filtro com estrutura EBG por uma variação geométrica da fita da microlinha de transmissão de um circuito planar. Esta metodologia de geração de estrutura EBG tem como vantagem a não necessidade de alinhamento entre as duas superfícies do substrato como no caso da estrutura EBG-GP, já que a variação periódica é imposta na própria fita da microlinha de transmissão. No entanto, há uma perda de um grau de liberdade na concepção geométrica da estrutura, pois devido ao fato da variação ocorrer na fita da microlinha de transmissão, esta estrutura EBG deverá ser necessariamente unidimensional, caso contrario haveria uma descontinuidade da linha de transmissão.

2.4.4. Estrutura EBG por alternância periódica do acoplamento com o plano de terra

Um outro tipo de estrutura EBG proposta que também possui a vantagem de não necessitar de um processo de confecção de circuito dupla face pela necessidade de um plano de terra corrodido são as estruturas baseadas na tecnologia de guias de onda coplanares *Coplanar Waveguide* (CPW) (Fei-Ran Yang, 1999). Nesta estrutura uma perturbação da constante dielétrica efetiva é obtida pela variação da distância entre o plano de terra e a fita da microlinha onde o sinal é introduzido.

Estas estruturas são denominadas *Uniplanar Compact Electromagnetic Bandgap* (UC-EBG). Em estruturas como esta, observamos que as interligações das células da estrutura UC-EBG ilustrada na Figura 14(a) criam uma rede LC equivalente no plano de terra do dispositivo, conforme ilustrado na Figura 14(b). Nesta rede, as indutâncias são introduzidas pelos braços estreitos e as capacitâncias pela proximidade entre os *pads* de células vizinhas.

Temos então que devido à condição de periodicidade imposta pela geometria das estruturas EBG-UC, deverá ocorrer uma inibição da propagação da onda eletromagnética na linha de transmissão em uma faixa de frequência, o que irá resultar em um vale no coeficiente de transmissão da linha, portanto em uma rejeição.

Figura 14 - Guia de onda coplanar CPW (a) com estrutura UC- EBG - *Uniplanar Compact* e (b) representação de rede LC equivalente. (Oliveira, 2001)

Um exemplo de linha de transmissão com estrutura UC-EBG é apresentado na Figura 15. Nesta ilustração observamos um circuito coplanar *Conductor Backed Coplanar Waveguide* (CB-CPW), o qual se trata de uma linha *coplanar* com um plano de terra também na superfície inferior do substrato. Neste circuito *coplanar* proposto há na superfície superior do substrato uma microlinha de transmissão ao centro e planos de terra com estruturas UC-EBG em ambos os lados da microlinha.

Figura 15 - Exemplo de guia de onda coplanar com estrutura UC-EBG (Oliveira, 2001).

Na Figura 16 é apresentado o coeficiente de transmissão, parâmetro S_{21} , de uma microlinha CPW convencional e da microlinha CPW com estrutura UC-EBG. Deste gráfico comparativo dos parâmetros S_{21} , podemos observar a formação de bandas de rejeição com frequências centrais de 8 GHz, 14 GHz e 32 GHz para a microlinha CPW com estrutura UC-EBG não existente na microlinha CPW convencional.

Figura 16 - Parâmetro S_{21} guia de onda coplanar com estrutura UC - EBG (Oliveira, 2001).

Esta metodologia de concepção de estrutura UC-EBG possui certas vantagens, como a facilidade de fabricação e menor tamanho do que as estruturas apresentadas anteriormente. No entanto, devido à periodicidade imposta na microlinha pelo acoplamento com o plano de terra, seu projeto se torna uma tarefa comparativamente mais difícil em relação às demais metodologias.

3 ESTUDO DE PARÂMETROS DE ESTRUTURAS EBG

O *software* para simulação eletromagnética EMDS do ADS/Agilent foi utilizado para efetuar uma análise da influência dos parâmetros das estruturas EBG na resposta de filtros planares. Estas simulações buscaram identificar qual a correlação entre a largura de banda e a magnitude de rejeição da resposta do filtro com alguns parâmetros da estrutura EBG como: o número de períodos, a dimensionalidade da rede, o fator de preenchimento da rede e o alinhamento da rede com a fita da microlinha de transmissão. Para esses estudos foram realizadas simulações de estruturas EBG com corrosão no plano de terra apresentadas em (Vesna Radisic Y. Q., 1998) , considerando substrato com $\epsilon_r = 9,9$ e $h = 0,635$ mm.

3.1. Estudo da influência do número de períodos

Para se verificar qual a influência do número de períodos da estrutura EBG imposta à onda eletromagnética na banda e na magnitude de rejeição, foi selecionada uma estrutura EBG-GP com corrosão periódica de círculos no plano de terra. Nesta estrutura círculos de raio $r = 1,25$ mm foram corroídos a uma periodicidade $a = 5$ mm, tendo sido simulados com o acréscimo sucessivo de um novo período a cada simulação. Os resultados simulados dos parâmetros S_{21} e S_{11} das estruturas com diferentes números de períodos estão ilustradas na Figura 17 até a Figura 21.

Figura 17 - Curvas simuladas de S_{12} e S_{11} x frequência de microlinha com estrutura EBG-GP de 2 períodos.

Figura 18 - Curvas simuladas de S_{12} e S_{11} x frequência de microlinha com estrutura EBG-GP de 3 períodos.

Figura 19 - Curvas simuladas de S_{12} e S_{11} x frequência de microlinha com estrutura EBG-GP de 4 períodos.

Figura 20 - Curvas simuladas de S_{12} e S_{11} x frequência de microlinha com estrutura EBG-GP de 6 períodos.

Figura 21 - Curvas simuladas de S_{12} e S_{11} x frequência de microlinha com estrutura EBG-GP de 8 períodos.

Observa-se através da Figura 17 até a Figura 21 que o número de pólos do filtro, que ocasionam as oscilações de S_{11} adjacentes à banda de rejeição do filtro, aumenta à medida que aumentamos o número de períodos da estrutura EBG.

Na Figura 22 é apresentado o gráfico que concentra os dados do parâmetro S_{12} das estruturas EBG simuladas com diferentes números de períodos. Deste gráfico podemos observar que o número de períodos da estrutura EBG corroídos do plano de terra de uma microlinha influencia a resposta do coeficiente de transmissão, dado pelo parâmetro S_{12} da microlinha, ocasionando um aumento significativo na magnitude de rejeição proporcional ao número de períodos e uma diminuição sutil na banda de rejeição.

Figura 22 - Curvas simuladas de S_{12} x frequência de microlinha com estrutura EBG de diferentes números de períodos.

Assim, torna-se possível deduzir que no projeto de um filtro em microlinha que se utiliza de estruturas EBG, deve-se considerar o número de períodos necessários para se obter um nível de magnitude de rejeição desejada.

3.2. Estudo da dimensionalidade

Para verificar qual a influência da dimensionalidade da estrutura EBG na magnitude e na banda de rejeição iremos utilizar a estrutura EBG-GP unidimensional (1-D) em uma linha de transmissão com círculos corroídos no plano de terra semelhante à estrutura apresentada no item anterior com estruturas EBG de 9 períodos de $a = 5$ mm, conforme ilustrada na Figura 23(a). No entanto, para efeito de comparação, uma nova estrutura EBG-GP foi simulada com uma estrutura em configuração bidimensional (2-D), com periodicidade no eixo x e no eixo y , conforme ilustrado na Figura 23(b), para verificar a influência da adição desta dimensionalidade na resposta do filtro planar.

Figura 23 – Microlinha com estruturas EBG-GP em diferentes dimensionalidades, em (a) 1-D e (b) 2-D.

Na Figura 24 apresentamos, para efeito comparativo, o parâmetro S_{12} para de microlinha de transmissão com estrutura EBG-GP em configuração 1-D, em vermelho, e para uma microlinha de transmissão com estrutura EBG-GP em configuração 2-D, em azul.

Figura 24 - Curvas simuladas de S_{12} x frequência de microlinha com estruturas EBG-GP em configuração 1-D e 2-D.

Do gráfico comparativo, é possível observar que a bidimensionalidade (2-D) de uma estrutura EBG em um plano de terra de uma microlinha não produz benefício significativo. Esta semelhança de resposta entre as duas estruturas se deve ao fato de a onda eletromagnética que atravessa a microlinha não possuir campos muito dispersos lateralmente. Logo, a onda

eletromagnética é pouco influenciada por obstáculos mais afastados presentes na estrutura EBG (2-D), pois praticamente toda energia está confinada próxima à fita da microlinha de transmissão.

3.3. Estudo do fator de preenchimento

Para se verificar qual a influência do fator de preenchimento da estrutura EBG na magnitude e na banda de rejeição de uma microlinha de transmissão, iremos utilizar a estrutura EBG-GP (1-D) apresentada anteriormente com círculos corroídos do plano de terra e com estruturas de 9 períodos de $a = 5$ mm. Nesse caso pode-se definir o fator de preenchimento Λ como a relação entre o raio do círculo que compõe a geometria repetida na estrutura EBG e a periodicidade a de repetição da mesma.

$$\Lambda = r/a \quad (17)$$

Para efeito de comparação, foram simulados filtros em microlinha com diferentes fatores de preenchimento, variando-se o raio das circunferências corroídas do plano de terra e mantendo-se a periodicidade constante $a = 5$ mm em simulações sucessivas, conforme ilustrado da Figura 25 até a Figura 28.

Figura 25 – Curvas simuladas de S_{12} e S_{11} x frequência de microlinha com estrutura EBG com fator de preenchimento $\Lambda = 0,15$.

Figura 26 – Curvas simuladas de S_{12} e S_{11} x frequência de microlinha com estrutura EBG com fator de preenchimento $\Lambda = 0,25$.

Figura 27 - Curvas simuladas de S_{12} e S_{11} x frequência de microlinha com estrutura EBG com fator de preenchimento $\Lambda = 0,35$.

Figura 28 - Curvas simuladas de S_{12} e S_{11} x frequência de microlinha com estrutura EBG com fator de preenchimento $\Lambda = 0,45$.

Na Figura 29 é apresentado o gráfico que concentra os dados dos parâmetros S_{12} simulados das estruturas analisadas, com diferentes valores de fator de preenchimento Λ das estruturas EBG presentes no plano de terra da microlinha de transmissão. Desse gráfico é possível observar que o fator de preenchimento da estrutura EBG corroída do plano de terra influencia diretamente o desempenho do filtro, sendo que um acréscimo no fator de preenchimento ocasiona tanto um aumento da banda de rejeição do filtro, quanto da magnitude de rejeição do filtro, bem como um deslocamento da frequência central da banda de rejeição.

Figura 29 - Curvas simuladas de S_{12} x frequência de microlinhas com estruturas EBG com diferentes valores de fator de preenchimento Λ .

Assim, é possível deduzir da observação do gráfico acima que no projeto de filtros planares que se utilizam de estruturas EBG para a obtenção de uma banda de rejeição com nível de magnitude de rejeição desejado, deverá ser levado em conta o fator de preenchimento, e consequentemente a área da geometria que compõe a estrutura EBG a ser corroída.

O fator de preenchimento afeta adicionalmente a frequência central da banda de rejeição do filtro. Este efeito é provocado pela variação do fator de preenchimento que altera a constante dielétrica efetiva percebida pela onda eletromagnética ao se propagar ao longo da microlinha com uma estrutura EBG. Assim, para que seja possível modificar o fator de preenchimento de uma estrutura EBG sem provocar um deslocamento da frequência central da banda de rejeição, deve-se alterar a periodicidade da estrutura EBG de forma compensativa, uma vez que a periodicidade da estrutura EBG influi majoritariamente na frequência central da banda de rejeição.

3.4. Estudo da sensibilidade ao desvio de alinhamento

Durante as etapas de fabricação de circuitos utilizando estruturas EBG pode ocorrer um desvio de alinhamento entre a fita da microlinha de transmissão fotografada na face superior do substrato e a estrutura EBG corroída no plano de terra, na face inferior do mesmo.

Para se verificar qual a sensibilidade que um desvio do alinhamento entre o eixo da fita da microlinha de transmissão e o eixo da estrutura EBG causa na banda e na magnitude de rejeição, foi simulada uma estrutura EBG-GP com 8 circunferências periódicas de $r = 1,25$ mm corroídas do plano de terra com periodicidade $a = 5$ mm. Em simulações consecutivas desse filtro, foi imposto um desvio Δx crescente no alinhamento entre o eixo da estrutura EBG e o eixo da fita da microlinha. Esse desvio foi realizado ao longo do eixo x , a um passo de 0,2 mm, acrescido em simulações sucessivas. Os resultados simulados dos parâmetros S_{12} e S_{11} das estruturas EBG com diferentes valores de desvios estão ilustradas da Figura 30 até a Figura 33.

Figura 30 - Curvas simuladas de S_{12} e S_{11} x frequência de microlinha com estrutura EBG-GP com $\Delta x = 0,2$ mm.

Figura 31 - Curvas simuladas de S_{12} e S_{11} x frequência de microlinha com estrutura EBG-GP com $\Delta x = 0,4$ mm.

Figura 32 - Curvas simuladas de S_{12} e S_{11} x frequência de microlinha com estrutura EBG-GP com $\Delta x = 0,8$ mm.

Figura 33 - Curvas simuladas de S_{12} e S_{11} x frequência de microlinha com estrutura EBG-GP com $\Delta x = 1,0$ mm.

O gráfico da Figura 34 concentra os dados simulados do parâmetro S_{12} das microlinhas apresentadas anteriormente, com diferentes desvios entre o eixo da fita da microlinha de transmissão, no plano superior do substrato, e o eixo da estrutura EBG, no plano inferior ao substrato. É observado do gráfico que o desvio do alinhamento da estrutura EBG corroído do plano de terra de uma microlinha influencia diretamente no desempenho do filtro, reduzindo tanto a banda de rejeição do filtro, quanto a magnitude de rejeição do filtro. Assim, pode-se chegar à conclusão sobre a importância da precisão da técnica de fotogravagem para se confeccionar um dispositivo utilizando-se estruturas EBG-GP, já que um pequeno desvio durante o processo de fotogravagem poderá degradar consideravelmente os parâmetros desejados para o filtro proposto. No caso do filtro analisado, verifica-se que um desvio de alinhamento de 0,2 mm entre fotograções das faces superior e inferior do substrato é suficiente para provocar uma redução de aproximadamente 4 dB na magnitude de rejeição máxima, bem como provocar um estreitamento da banda de rejeição.

Figura 34 - Curvas simuladas de S_{12} x frequência de microlinhas com estruturas EBG com diferentes valores de desvio Δx .

3.5. Conclusões do estudo dos parâmetros da estrutura EBG

As simulações EM-3D do filtro rejeita faixa composto por uma microlinha de transmissão com uma estrutura periódica constituída de círculos corroídos no plano de terra permitiu desenvolver o entendimento da influência dos principais parâmetros da estrutura EBG-GP no desempenho do filtro, como seguir:

a) Número de períodos da estrutura EBG.

Verificou-se que o aumento do número de períodos da estrutura EBG ocasiona o aumento da magnitude de rejeição. É também possível observar através da Figura 17 até a Figura 21 que as oscilações de S_{11} adjacentes à banda de rejeição do filtro, decorrentes do número de pólos do filtro, aumentam com o aumento do número de períodos da estrutura EBG.

b) Dimensionalidade

As simulações mostraram que no caso do filtro analisado, no qual o período da estrutura EBG corroída no plano de terra é aproximadamente 10 ordens de grandeza da largura da fita condutora da microlinha de transmissão, o aumento da dimensionalidade de 1D para 2D não produz mudança significativa na resposta em frequência. Isto ocorre pois nesse caso os campos espalhados nas bordas laterais da fita da microlinha de transmissão estão praticamente contidos na área da estrutura EBG unidimensional. Em circuitos em que essa condição não seja obedecida, o uso de estruturas EBG bidimensionais deve ser analisado para o caso específico.

c) Fator de preenchimento

Verificou-se que o aumento do fator de preenchimento ocasiona simultaneamente o alargamento da banda de rejeição e o aumento da máxima magnitude de rejeição do filtro. Paralelamente, ocasiona um aumento na frequência central da banda de rejeição, devido à diminuição da constante dielétrica efetiva percebida pela onda eletromagnética que se propaga pela estrutura EBG.

d) Sensibilidade ao desvio de alinhamento

As simulações realizadas mostraram que um desalinhamento entre a fita da microlinha de transmissão e o eixo da estrutura EBG, fotogravadas respectivamente nas faces superior e

inferior do substrato, degrada o desempenho do filtro. Dessa forma é importante utilizar procedimentos de fotogração dupla face que garantam reduzido erro de alinhamento. Para fabricação dos circuitos projetados nesta pesquisa foram usadas marcas de alinhamento visando um desvio menor que 100 μm entre as estruturas gravadas na face superior e inferior do substrato.

3.6. Metodologias para melhoria de desempenho de estruturas EBG

De acordo com os resultados de simulações apresentados em itens anteriores percebemos que, independente do método utilizado de implementação de estruturas EBG em circuitos planares, há inúmeras variáveis que definirão a resposta desejada desta estrutura EBG e necessitam ser projetadas tais como: período da estrutura, número de períodos, formato geométrico da célula unitária a ser repetida e fator de preenchimento. A composição dessa gama de variáveis que caracterizam uma estrutura EBG terá influência na resposta real do filtro, de modo a afetar a magnitude de rejeição, a largura de banda e a frequência central da banda de rejeição.

Também percebemos que mesmo uma metodologia de projeto simplificada de estrutura EBG em circuito planar baseada na Lei de Difração de Bragg possui certa complexidade no cálculo do comprimento de onda guiada em um circuito planar. O cálculo do comprimento de onda depende da constante dielétrica efetiva ϵ_{eff} do meio, que por sua vez depende da estrutura EBG que será implementada. Logo, este valor de comprimento de onda é obtido de forma não muito acurada por fórmulas aproximadas, ou por auxílio de programas CAD, devendo ser ajustado posteriormente, nas etapas de simulação do circuito projetado.

A dificuldade de projeto de estruturas EBG em um circuito planar cresce em complexidade quando a estrutura EBG possui sua simetria quebrada ou quando são compostas por estruturas periódicas simultâneas. Estas propostas de modificações fornecem resultados satisfatórios na busca por melhores repostas de desempenho na implementação de estruturas EBG em circuitos planares, mas acarretam uma maior complexidade de projeto.

Na literatura encontram-se diversas propostas para a aplicação de estruturas EBG em circuitos planares para o aprimoramento ou a otimização de algum parâmetro desejado do circuito com uma estrutura EBG, como banda mais larga ou bandas duplas de rejeição. Neste princípio de

otimização de estrutura EBG as metodologias para geração de novas estruturas propostas têm sido baseadas em intuições e/ou exaustivas iterações de simulações e medições experimentais.

Há atualmente na literatura diversas técnicas para melhoria de desempenho da utilização de estruturas EBG em circuito planares. Cada técnica proposta para a melhoria do desempenho da estrutura EBG possui uma metodologia, entre as quais podemos destacar as metodologias que se baseiam na concepção da estrutura EBG: com variação da periodicidade da estrutura (*chirping*) (M. A. G. Laso, 2000), com variação do fator de preenchimento da estrutura (*tapered*) (M. A. G. Laso, 2000), com a inserção de um defeito localizado na estrutura (*defect structure*) (Kenji Matsushita, 2010), com a utilização de estruturas EBG simultâneas em série (Lee, 2006) ou paralelo (Seo, 2000), ou estruturas EBG composta de células unitárias com geometrias fractais (Yun-Qi Fu, 2002),

Na metodologia em que é utilizada de uma variação da periodicidade da estrutura EBG (*chirping*) apresentada em (M. A. G. Laso, 2000), o projeto baseia-se em um fator de espaçamento designado de δ conforme ilustrado na Figura 35. Este fator irá definir o espaçamento crescente a_i que haverá entre as células unitárias adjacentes, dada pela eq. (18):

$$a_i = a_0 (1 + i\delta) \quad (18)$$

Figura 35 - Estrutura EBG com *chirping*. (a) microlinha de transmissão com estrutura EBG (b) periodicidade da estrutura EBG corroída no plano de terra (M. A. G. Laso, 2000) .

Devido ao fato da estrutura EBG gerada não possuir uma periodicidade uniforme, já que sua periodicidade varia em função de um fator crescente de espaçamento δ , o resultado da difração das ondas incidentes e refletidas já não será exatamente como determinado pela Lei

de Bragg. Esta não conformidade com a Lei de Bragg deve-se ao fato de a periodicidade da estrutura variar ao longo do eixo cristalino. Tratando-se agora de uma estrutura modificada com diferentes periodicidades, existem diferentes frequências centrais de bandas de rejeição para a estrutura EBG. Esta circunstância favorece o alargamento da banda de rejeição, já que para cada periodicidade há um correspondente comprimento de onda de sintonia. No entanto, devido à variação de distância entre as células unitárias que compõem a estrutura EBG, haverá uma degradação na magnitude de rejeição, uma vez que há poucos períodos com um determinado comprimento de onda específico. Logo, encontramos aqui uma maneira de gerar um compromisso entre a largura da banda e a magnitude de rejeição, como pode ser observado nos parâmetros S medidos apresentados na Figura 36 e Figura 37.

Figura 36 - Parâmetros S_{11} de microlinhas com estruturas EBG com e sem chirping (M. A. G. Laso, 2000) .

Figura 37 - Parâmetros S_{21} de microlinhas com estruturas EBG com e sem chirping. (M. A. G. Laso, 2000).

A metodologia de concepção de estruturas EBG por variação da área da geometria periódica ou com tapering, proposta em (M. A. G. Laso, 2000) é ilustrada na Figura 38, e baseia-se no mesmo conceito descrito anteriormente de compensação entre banda de rejeição e magnitude de rejeição. Pois, com as modificações periódicas da área do círculo corroído do plano de terra, alteramos periodicamente o fator de preenchimento $\Lambda = (r/a)$, sendo este diretamente relacionado à banda e à magnitude de rejeição. Assim, uma variação periódica do fator de preenchimento proporciona uma troca compensatória entre largura de banda e da magnitude de rejeição, de forma similar ao obtido em uma estrutura com chirping apresentada anteriormente.

Figura 38 - Estrutura EBG com *tapering* (M. A. G. Laso, 2000).

Na estrutura EBG com geometria fractal proposta em (Yun-Qi Fu, 2002), uma forma geométrica quadrada foi selecionada inicialmente e utilizada como célula unitária da estrutura EBG, sendo repetida por diversos períodos, conforme ilustrado na Figura 39(a). Duas

iterações sucessivas na fractalidade da célula unitária inicial foram efetuadas, gerando duas novas estruturas fractais a partir da primeira geometria quadrada inicialmente seleccionada, ilustradas na Figura 39(b) e Figura 39(c) .

Figura 39 - Estrutura EBG fractal: (a) plano de terra de microlinha com célula unitária quadrada (b) célula unitária da primeira iteração fractal (c) célula unitária da segunda iteração fractal (Yun-Qi Fu, 2002).

Os resultados experimentais da célula unitária inicial e das duas geometrias fractais utilizadas como células unitárias na estrutura EBG em uma microlinha para finalidade de filtro estão ilustrados na Figura 40. Nesta figura é apresentado o coeficiente de transmissão dado pelo parâmetro S_{21} das microlinhas de transmissão com a estruturas EBG que utilizam como célula unitária respectivamente: uma geometria quadrada, um fractal com uma iteração e um fractal com duas iterações, gerado a partir do primeiro fractal.

Ao utilizarmos uma geometria complexa como uma estrutura fractal ao invés de uma estrutura primitiva quadrada, a difração resultante das iterações das ondas eletromagnéticas incidentes e das ondas refletidas pela estrutura EBG já não se comportam exatamente como visto analiticamente pela Lei de difração de Bragg. A não conformidade, deve-se ao fato de que em uma geometria fractal cada estrutura é composta de pequenas estruturas menores e estas de estruturas ainda menores, causando um efeito de superposição de estruturas EBG. Este efeito pode ser observado na Figura 40, onde se verifica que a resposta do filtro com a utilização de uma célula unitária com geometria quadrada possui uma única banda de rejeição centrada em 6 GHz, já com a utilização de uma célula unitária fractal, há na resposta do filtro o surgimento de duas bandas de rejeição, aproximadamente em 4,5 GHz e em 7,5 GHz.

Figura 40 – Curvas experimentais de S_{21} x frequência de microlinhas com estruturas EBG composta de células unitárias com diferentes geometrias (Yun-Qi Fu, 2002).

A fractalidade da célula unitária que compõe a estrutura EBG resulta em uma resposta com um grau de complexidade alto devido à complexidade da geometria utilizada. Este tipo de estrutura mostra-se interessante para a aplicação em projetos de filtros com dupla-banda de rejeição (dual band).

Em metodologias que utilizam defeitos na estrutura EBG para a obtenção de melhoria na resposta do filtro, temos como exemplo típico a estrutura periódica com um defeito em sua periodicidade proposta em (Kenji Matsushita, 2010), conforme ilustrada na Figura 41. Essa estrutura EBG baseia-se na variação periódica da largura da fita da microlinha de transmissão, com a inserção de um defeito que nada mais é que um espaçamento atípico, uma quebra da periodicidade na estrutura EBG. Esta quebra de simetria da estrutura EBG proporciona uma onda estacionária com comprimento de onda proporcional ao espaçamento Ld do defeito inserido na estrutura.

Figura 41 – Microlinha de transmissão com estrutura EBG com defeito localizado. (Kenji Matsushita, 2010)

Na Figura 42 pode-se observar que na resposta do filtro com estrutura EBG com defeito há uma ressonância no meio da banda de rejeição provocada pelo defeito inserido.

Figura 42 – Curvas de S_{21} x frequência de microlinha de transmissão com estrutura EBG com defeito localizado. (Kenji Matsushita, 2010)

3.7. Conclusões Parciais

Os estudos e os resultados da literatura internacional apresentados neste capítulo indicam que existe uma ampla gama de possibilidades de projeto de filtros rejeita faixa usando estruturas EBG. Todas estas questões mostram que existem muitos fatores parametrizáveis que determinam a resposta final da estrutura EBG projetada e que não são consideradas como

variáveis de projeto nas equações analíticas derivadas da definição da Lei de Bragg. Assim, a busca de valores ideais de cada um destes parâmetros para a melhor resposta possível a um determinado objetivo é o que se denomina como um processo de otimização de uma estrutura EBG.

Na pesquisa realizada nesta dissertação optou-se por seguir dois caminhos distintos para a proposição de filtros rejeita faixa com topologias originais. O primeiro caminho, descrito no capítulo 4, consiste em reunir os conceitos estudados e propor uma nova topologia de filtro usando estruturas EBG, visando a obtenção de uma banda de rejeição ultra-larga. Esse procedimento de projeto depende do conhecimento e a criatividade do projetista, e foi aplicado com sucesso a um filtro que apresentou excelente concordância entre resultados experimentais e simulados.

O segundo procedimento adotado foi o desenvolvimento de um método de síntese automática que permitisse propor filtros usando estruturas EBG com topologias originais, com características pré-especificadas, como banda de rejeição ultra-larga ou de dupla-banda de rejeição. Neste caso a síntese automática do filtro é realizada através de procedimentos de otimização computacional que visam minimizar uma Função Objetivo que descreve matematicamente a resposta em frequência desejada para o filtro. Dessa forma, pode-se gerar inúmeras estruturas EBG com topologias originais, não intuitivas. O método de síntese proposto é apresentado no capítulo 5, bem como sua aplicação ao projeto de vários filtros que apresentaram resposta experimental compatível com as especificações de projeto.

4 PROJETO DE FILTRO DE MICROLINHA COM BANDA ULTRA-LARGA

4.1. Introdução

Nos capítulos iniciais foram apresentados os fundamentos teóricos das estruturas EBG e foi explanado o modo como estas estruturas propiciam o surgimento de uma banda proibida no espectro eletromagnético. Foi visto que as características da banda de rejeição de um filtro com uma estrutura EBG convencional, tais como a largura da banda de rejeição, a magnitude de rejeição e a frequência central da banda de rejeição, dependem diretamente da geometria da estrutura EBG que compõe o filtro. Esta geometria da estrutura EBG pode ser resumida nos seguintes parâmetros: a forma geométrica da célula unitária que será repetida periodicamente, o período de repetição e o fator de preenchimento da célula unitária.

No estudo apresentado também verificamos que a variação de tais parâmetros possui certa limitação para atingir determinadas especificações de banda de rejeição. Para estes casos, apresentamos no capítulo 3 algumas novas propostas de estruturas EBG modificadas encontradas na literatura. Novas estruturas EBG modificadas exploram outros parâmetros da natureza da estrutura e podem ser agrupadas pela utilização: de quebra de simetria periódica da estrutura EBG, do uso de duas estruturas EBG simultâneas ou do uso de células unitárias com geometrias não convencionais.

No presente capítulo é proposta uma metodologia de projeto para uma estrutura EBG (Shao Ying Huang, 2005) com o objetivo de se obter um filtro com uma banda de rejeição ultra-larga, a qual não poderia ser obtida através de estruturas EBG convencionais. O filtro de banda ultra-larga que é apresentado na metodologia de projeto proposta é gerado a partir da utilização de estruturas EBG simultâneas em uma microlinha de transmissão.

4.2. Metodologia de projeto de filtro rejeita-faixa usando duas estruturas EBG simultâneas

A metodologia proposta tem como objetivo o projeto de estruturas EBG que, ao serem implementadas em uma microlinha, propiciem uma banda de rejeição ultra-larga em alta frequência e com a passagem dos sinais de frequência inferior sem rejeição. O substrato

utilizado é Alumina com constante dielétrica relativa $\epsilon_r = 9,9$ e espessura do substrato $h = 0.635$ mm. Para obtermos uma microlinha com impedância de $Z = 50 \Omega$, nesse substrato a largura da fita de microlinha foi calculada como sendo $w = 0,6$ mm, a partir das equações demonstradas no APÊNDICE A.

Na topologia proposta (Shao Ying Huang, 2005), duas estruturas EBG distintas serão utilizadas simultaneamente na microlinha de transmissão, sendo estas estruturas: uma estrutura do tipo EBG-GP, apresentada em (Francisco Falcone, 1999) com corrosão do plano de terra e uma estrutura EBG na fita da microlinha proposta em (Manoj K. Tiwari, 2002). A utilização simultânea de estruturas EBG possibilita uma maior banda de rejeição pelo efeito de superposição ou cascadeamento das estruturas EBG individuais.

A Figura 43(a) apresenta a estrutura EBG-GP, a qual é formada por uma série de círculos de raio r corroídos no plano de terra, espaçados de uma distância ou período a . Essa estrutura será referenciada neste capítulo como EBG1. A Figura 43(b) apresenta a EBG construída pela variação periódica da largura da fita da microlinha de transmissão, que será denominada de EBG2. Note-se que foi adotada a mesma periodicidade a para ambas as estruturas EBG usadas simultaneamente.

A Figura 43(c) apresenta a topologia do filtro, obtido pela superposição das estruturas EBG1 e EBG2. Nessa figura a camada do substrato foi omitida propositadamente para facilitar a visualização de como estruturas EBG1 e EBG2 se compõem para formar o filtro de banda ultra-larga.

Figura 43- Microlinha de transmissão com a topologia da estrutura EBG (a) Plano de Terra com estrutura EBG1 (b) Microfita com estrutura EBG2 (c) Filtro completo: estruturas EBG1 e EBG2 sobrepostas, com a camada do substrato omitida para facilitar a visualização.

Os parâmetros de projeto do filtro são:

- EBG1: o período a e o raio r dos círculos corroídos no plano de terra, e, portanto o fator de preenchimento dado por $\Lambda = (r/a)$.
- EBG2: a largura w_l e o comprimento l_d da secção mais larga a fita condutora da microlinha de transmissão.

- EBG1 e EBG2: o número de repetições da célula unitária que formam as estruturas EBG.

No projeto aqui apresentado utilizou-se o máximo número de células unitárias que permitisse a construção do filtro em substrato de Alumina com 2 polegadas ou 50,8 mm de comprimento. Devido à limitação imposta pelo substrato empregado, foram utilizadas estruturas EBG com uma taxa de repetição de oito elementos unitários para a estrutura EBG1 e nove elementos unitários para a estrutura EBG2.

A largura w da secção mais estreita da fita condutora da microlinha de transmissão foi adotada como a de uma linha de transmissão com impedância característica de 50Ω , mas poderia ser um parâmetro adicional de projeto.

✓ *Projeto da estrutura EBG1*

Primeiramente, a estrutura EBG-GP – denominada EBG1, foi concebida no plano de terra com um fator de preenchimento que permitisse obter um bom compromisso de largura de banda e magnitude de rejeição, conforme estudo do efeito da variação dos parâmetros das estruturas EBG, apresentado no capítulo 3.

A escolha do valor do fator de preenchimento $\Lambda = (r/a)$, relação entre período da estrutura e o raio dos círculos corroídos no plano de terra, deve considerar que esta estrutura será construída simultaneamente com a outra estrutura EBG na mesma microlinha de transmissão. Portanto, seu fator de preenchimento não deverá ser próximo de $\Lambda = 0,5$, pois nesse caso a estrutura EBG1 ocuparia todo o período da estrutura, não restando espaço para interpolar a estrutura EBG2 a ser usada simultaneamente a esta. Baseado nas simulações apresentadas no capítulo 3, o valor do fator de preenchimento de $\Lambda = 0,35$ foi escolhido para a estrutura EBG1. Como visto anteriormente na Figura 29, esse fator de preenchimento fornece uma banda de rejeição relativamente larga com magnitude de rejeição elevada.

Em seguida foi definido o período das estruturas EBG aplicadas na microlinha de transmissão. No capítulo 3 verificamos que o período da estrutura EBG está diretamente relacionado à frequência central da banda de rejeição, a qual depende da constante dielétrica efetiva do meio.

O valor da constante dielétrica efetiva $\varepsilon_{eff} = 6,65$ considerado para uma microlinha de transmissão convencional no substrato de Alumina, foi obtido através de modelo detalhado no APÊNDICE A. Este valor da constante dielétrica efetiva não será o mesmo para uma microlinha de transmissão com a estrutura EBG1 corroída do plano de terra, pois a modificação da geometria no plano de terra altera o percurso das linhas dos campos eletromagnéticos, e, portanto afeta a constante dielétrica efetiva do meio. O valor da constante dielétrica efetiva para uma microlinha de transmissão não convencional com plano de terra corroído não possui uma modelagem matemática que permita uma solução analítica, devendo ser calculada por métodos numéricos aplicados a campos eletromagnéticos. Na presente metodologia de projeto será considerado inicialmente o valor da constante dielétrica efetiva para uma microlinha de transmissão convencional, com plano de terra contínuo. Consequentemente, a simulação eletromagnética da microlinha de transmissão com a estrutura EBG1 corroída no plano de terra mostrará um desvio na frequência central da banda de rejeição em relação à de projeto. É necessário, então, ajustar a frequência central da banda de rejeição para o valor desejado, alterando-se de forma compensativa o valor do período da estrutura EBG, de modo a considerar a mudança do valor da constante dielétrica efetiva devido à corrosão do plano de terra.

A estrutura EBG1 foi projetada para possuir uma banda de rejeição com frequência de corte inferior de 9 GHz. Para este objetivo é considerado que a frequência de corte inferior de uma estrutura EBG-GP com $\Lambda = 0,35$ é relacionada com a frequência de corte central, conforme ilustrado na Figura 29. Portanto, a frequência central de 12 GHz foi considerada para o filtro projetado.

A metodologia de projeto do filtro fabricado segue como demonstrado na introdução de projetos de estruturas EBG. A frequência central da banda de rejeição do filtro deve obedecer a Lei de difração de Bragg, a qual descreve que o comprimento de onda guiada λ_g deve ser duas vezes o período a da rede periódica, conforme eq.(14) e eq.(15).

O valor do período da estrutura EBG a ser utilizada na microlinha de transmissão será obtido, para os valores de $\varepsilon_{eff} = 6.65$ de uma microlinha convencional e a frequência central da banda de rejeição escolhida será de $f = 12$ GHz.

$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{12 \cdot 10^9 \sqrt{6,65}} = 9,7 \text{ mm}$$

Deste resultado, temos que $\lambda_g = 9,7 \text{ mm}$ e, conseqüentemente o período da estrutura EBG1 será $a = 4,85 \text{ mm}$. Dado que adotou-se fator de preenchimento de $A = (a/r) = 0,35$ para a estrutura EBG1, os círculos corroídos no plano de terra terão raio $r = 1,69 \text{ mm}$.

Na Figura 44 é apresentado o resultado da simulação de um filtro de microlinha de transmissão com largura da fita condutora $w = 0,6 \text{ mm}$ constante e com a estrutura EBG1 com período $a = 4,85 \text{ mm}$, corroída no plano de terra. No resultado é possível observar uma banda de rejeição de 9,5 GHz até 15,5 GHz com frequência central igual a 12,5 GHz.

Vale observar que a curva simulada apresenta uma ondulação rápida na banda de rejeição, a qual provavelmente se deve ao erro numérico da simulação computacional devido a estruturas altamente ressonantes, cujo efeito é mais perceptível quando os valores numéricos envolvidos são muito pequenos. Esse efeito aparece na Figura 44 e em demais figuras que apresentam curvas simuladas dos filtros projetados, sendo que deve ser desconsiderado na análise do desempenho dos filtros.

Figura 44 – Resposta em frequência simulada de filtro em microlinha com estrutura EBG de período $a = 4,85 \text{ mm}$ corroída no plano de terra .

Verificamos na figura que o valor da frequência central da banda de rejeição está acima do valor utilizado nos cálculos anteriores. Esta variação é explicada pela redução do valor da constante dielétrica efetiva devido à corrosão feita no plano de terra pela estrutura EBG1.

Nesta metodologia de projeto o valor da nova constante dielétrica efetiva após a corrosão no plano de terra pela EBG1 é obtido utilizando-se a frequência central da banda de rejeição através de simulação eletromagnética e da eq.(15) que expressa a Lei de Bragg.

Logo, com o valor da frequência central da banda de rejeição de 12,5 GHz obtida do resultado da simulação, refazemos os cálculos da eq.(14) para obtermos o novo valor da constante dielétrica efetiva.

$$\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} = \frac{c}{f \lambda_g} \quad (17)$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = \left(\frac{3 \cdot 10^8}{12,5 \cdot 10^9 \cdot 0,0097} \right)^2 = 6,12$$

Deste resultado, temos que o valor da constante dielétrica efetiva após a corrosão no plano de terra é $\epsilon_{\text{eff}} = 6,12$. Portanto, para efetuarmos uma compensação do desvio da frequência central da banda de rejeição devido à implementação da estrutura EBG no plano de terra da microlinha, devemos ajustar o período da estrutura EBG para uma banda de rejeição centrada na frequência de 12 GHz, este período deverá ser metade do comprimento de onda guiado, calculado como:

$$\lambda_g = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{12 \cdot 10^9 \sqrt{6,12}} = 10,10 \text{ mm}$$

Da equação anterior, obtemos $\lambda_g = 10,10 \text{ mm}$ e, conseqüentemente o período da estrutura EBG será $a = 5,05 \text{ mm}$ e $r = 1,76 \text{ mm}$. Note-se que houve um aumento da ordem de 4 % do raio do círculo corroído no plano de terra, o que causa uma redução de segunda ordem no valor da constante dielétrica efetiva. Essa redução foi desprezada no projeto do filtro, mas poderia ser considerada fazendo-se mais uma iteração no cálculo da constante dielétrica efetiva ϵ_{eff} .

Definidos os valores dos parâmetros da estrutura EBG1, a mesma será corroída do plano de terra da microlinha de transmissão, conforme ilustrado na Figura 45.

Figura 45 - Microlinha de transmissão com estrutura EBG1 corroída no plano de terra e fita da microlinha com $w = 0,6$ mm, com a camada do substrato omitida para facilitar a visualização.

A resposta em frequência da microlinha de transmissão com a estrutura EBG1 corroída no plano de terra e com uma tira condutora com $w = 0,6$ mm constante gravada na face superior do substrato e centralizada com a EBG1, foi obtida com a utilização do simulador EM-3D *Microwave Suite*/CST, sendo apresentada na Figura 46.

Figura 46 – Resposta em frequência simulada de filtro em microlinha com estrutura EBG1 corroída no plano de terra.

No resultado da simulação desse filtro podemos observar uma banda de rejeição que se inicia em aproximadamente 9 GHz e vai até 15 GHz, com a frequência central da banda de rejeição de aproximadamente 12 GHz, como projetado.

A banda de rejeição obtida do filtro em microlinha com a estrutura EBG1 é compatível com resultados relatados na literatura (Francisco Falcone, 1999). Para a obtenção de uma banda de

rejeição mais larga, aplicamos as estruturas EBG1 e EBG2 simultaneamente na mesma microlinha de transmissão. O resultado será uma banda ultra-larga devido ao sobreposicionamento dos efeitos das duas estruturas EBG.

✓ *Projeto da estrutura EBG2*

A partir dos resultados obtidos com a utilização da estrutura EBG1, uma nova estrutura EBG na microfita da microlinha, denominada aqui como EBG2, foi projetada através da alteração periódica da geometria da microfita. A nova estrutura EBG2 possui mesmo valor de período a da estrutura EBG1 e está intercalada a esta, de modo que as estruturas EBG1 e EBG2 estão deslocadas em meio período uma da outra.

O projeto da estrutura EBG2 consiste na definição das dimensões da modificação periódica da fita da microlinha e depende, portanto, de w_l e l_d , que são respectivamente a largura e o comprimento da secção mais larga da microfita. Esta variação periódica, ao longo do seu eixo de propagação, provoca uma alternância na impedância característica da linha de transmissão. Devido à diferença de impedância entre trechos de microlinha com diferentes larguras de microfita, haverá reflexões parciais do sinal propagante nas interfaces desta variação, provocando uma interferência entre o sinal incidente e o sinal refletido. Estas interferências entre os sinais provocam valores máximos e mínimos em sua amplitude, os quais são função da relação entre o comprimento de onda do sinal e a periodicidade da rede.

A definição do valor ótimo da largura w_l e do comprimento l_d das secções mais largas da fita condutora da microlinha de transmissão é um grande desafio para o projeto destas estruturas, especialmente no caso do presente filtro em que inclui o efeito da corrosão da estrutura EBG1 no plano de terra.

Para determinação dos valores da largura w_l e do comprimento l_d da fita da microlinha da estrutura EBG2, considerou-se a topologia completa do filtro, já com a estrutura EBG1 corroída no plano de terra. Na presente metodologia de projeto, utilizou-se então a ferramenta de otimização de variáveis presente no simulador EM-3D *Microwave Suite*/CST para se obter os valores de w_l e l_d que resultassem na banda de rejeição desejada para o filtro.

Dentre os diversos métodos para solucionar este tipo de problema, os mais usuais são baseados em métodos numéricos de otimização de variáveis. Na ferramenta de otimização do

simulador eletromagnético CST os seguintes métodos numéricos de otimização estão disponíveis: o método de Newton, o método Quase - Newton e o método de Powell.

Para obter a resposta do filtro desejada, foi definida uma função que deve ser minimizada durante as etapas de otimização, denominada Função Objetivo. Esta função é uma representação matemática da banda de rejeição desejada para o filtro, como segue:

$$F(l_d, w_1) = \sum_{f=5 \text{ GHz}}^{f=15 \text{ GHz}} S_{21}(\text{dB}) - 10. \sum_{f=5 \text{ GHz}}^{f=15 \text{ GHz}} S_{11}(\text{dB}) \quad (19)$$

A Função Objetivo definida na eq. (21) não possui restrição e é composta por dois termos, sendo minimizada durante a otimização. Ambos os termos são utilizados para otimizar a banda de rejeição, no primeiro termo o valor de $S_{21}(\text{dB})$ desejado dentro da banda de rejeição deve ser o mais negativo possível para a máxima rejeição. O segundo termo é composto pelo o coeficiente de reflexão $S_{11}(\text{dB})$ dentro da banda de rejeição, o qual deverá ser idealmente nulo para a reflexão total do sinal. Este termo foi afetado por um peso de 10 para ter uma influência significativa durante o processo de otimização.

Para que o resultado desejado seja alcançado de maneira otimizada, foi obtido o valor ótimo das variáveis w_1 e l_d , respectivamente largura e do comprimento da secção mais larga da fita da microlinha, através da otimização pelo método de otimização de Powell descrito com maior detalhe em (Rincão, 2008).

A ferramenta de otimização através de iterações encontrou o valor ótimo das variáveis w_1 e l_d da microlinha de transmissão que minimizassem o valor da Função Objetivo, definida matematicamente como a função desejada para a resposta do filtro. Ou seja, a otimização computacional foi realizada de modo a se obter o mínimo valor possível para a Função Objetivo:

$$\text{Min } F(l_d, w_1) \quad (20)$$

O resultado do processo de otimização foi obtido com os valores $w_1 = 3,2 \text{ mm}$ e $l_d = 1,92 \text{ mm}$. Estes valores foram utilizados para concepção da estrutura EBG2, conforme ilustrado na Figura 47.

Figura 47 - Microlinha de transmissão com estrutura EBG2 na fita da microlinha e plano de terra contínuo, com a camada do substrato omitida para facilitar a visualização.

Na Figura 48 são apresentados, apenas para mérito de análise, os resultados simulados da microlinha de transmissão somente com a estrutura EBG2 implementada na fita da microlinha e com plano de terra contínuo. Na figura é possível observar a formação de uma banda de rejeição de 7 GHz a 13 GHz.

Figura 48 – Resposta em frequência simulada de filtro com estrutura EBG2 na fita da microlinha de transmissão.

É importante destacar que a formação da banda de rejeição pela estrutura EBG2 a partir da variação geométrica da fita da microlinha possui uma banda de rejeição com frequência central diferente da estrutura EBG1 no plano de terra do substrato, apesar de possuírem o mesmo período e de estarem sobre o mesmo substrato, portanto sobre o mesmo coeficiente dielétrico relativo. A determinação da frequência central da banda de rejeição da estrutura EBG2 é também definida pela Lei de Bragg, portanto em função do ϵ_{eff} do meio. No entanto, o valor de ϵ_{eff} do meio já não terá o mesmo valor que o utilizado para o projeto da estrutura EBG1.

pois o acréscimo da largura da linha contribuiu para que o valor do ϵ_{eff} aumentasse, assim consequentemente para que diminuísse a frequência central da banda de rejeição.

O filtro projetado a partir da microlinha de transmissão com as duas estrutura EBG1 e EBG2 simultâneas, uma no plano de terra e a outra na fita da microlinha esta ilustrado na Figura 49.

Figura 49 - Plano inferior e superior do substrato com estruturas EBG1 e EBG2, com a camada do substrato omitida para facilitar a visualização.

A Figura 50 apresenta a resposta em frequência simulada do filtro com a utilização simultânea das estruturas EBG1 e EBG2. Podemos verificar na Figura 50a que a banda de rejeição possui uma largura que se inicia na frequência 6 GHz até a frequência de 17 GHz, totalizando uma banda de largura de 11 GHz. Pode ser verificado que a superposição das estruturas EBG teve como efeito uma banda de rejeição ultra-larga, que não seria possível de ser obtida com apenas uma única estrutura EBG convencional. Na Figura 50b é apresentada a fase do coeficiente de transmissão do filtro em função da frequência.

Figura 50 – Resposta em frequência simulada do filtro com estrutura EBG1 e EBG2 simultâneas (a) Magnitude de rejeição (b) fase de S_{21} .

Na Figura 51 é apresentada uma fotografia do filtro fabricado com as estruturas EBG projetadas. Para a fabricação do filtro foi utilizada a técnica de fotogração sobre o substrato de Alumina metalizado com ouro de $4 \mu\text{m}$ de espessura nas duas faces. O filtro foi montado em uma caixa de teste de alumínio, especialmente projetada de forma a proporcionar uma sustentação ao substrato, sem causar interferência no plano de terra onde a estrutura EBG1 está corroída. Transições SMA/microlinha de transmissão foram montadas na caixa, de modo

a dar acesso às portas de entrada e saída do filtro. O desenho mecânico da caixa de teste é apresentado em detalhes no APÊNDICE B.

(a)

(b)

Figura 51 - Fotografia do filtro: (a) face superior, (b) plano de terra.

O filtro projetado foi caracterizado em frequências de micro-ondas usando o Analisador Vetorial de Redes HP8722. A Figura 52 apresenta os resultados experimentais do filtro com as estruturas EBG1 e EBG2 projetadas. É possível observar a banda de rejeição ultra-larga obtida pela inserção das estruturas EBG simultâneas, no plano de terra e na fita da microlinha de transmissão, tendo sido observada uma boa concordância com os resultados simulados e os resultados experimentais.

(a)

(b)

Figura 52 - Resposta em frequência simulada e experimental do filtro: (a) S_{11} (dB) e (b) S_{21} (dB).

4.3. Conclusões parciais

Neste capítulo foi proposta uma metodologia para projeto aplicada a um filtro planar rejeita-faixa de micro-ondas que utiliza duas estruturas EBG simultâneas, sendo uma delas corroída no plano de terra e a outra aplicada na fita condutora da microlinha de transmissão. Foi apresentada a metodologia de projeto desse filtro, visando a obtenção de banda de rejeição ultra-larga. A metodologia de projeto utilizada associou equações teóricas, baseadas na Lei de Bragg, e simulações computacionais EM-3D.

O filtro foi projetado considerando um substrato de Alumina com espessura de $h = 0,635$ mm, metalizado com ouro em suas faces inferior e superior, e foi fabricado por meio de técnicas de fotografação. Verificou-se que houve um alinhamento adequado entre a EBG1 definida no plano de terra e a EBG2 na face superior do substrato. O filtro foi acondicionado em caixa de teste de alumínio especialmente projetada e caracterizado em frequências de micro-ondas, tendo apresentado rejeição maior que 34 dB na faixa de 6 GHz a 17 GHz, a qual está centrada em 11,5 GHz. Os resultados experimentais encontram-se em excelente acordo com as simulações, e comprovaram com boa acurácia a eficiência do filtro e a validação da metodologia proposta.

5 METODOLOGIA PROPOSTA PARA OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURAS EBG

Foram apresentadas no capítulo 3 algumas propostas de topologias não convencionais relatadas na literatura, visando aprimorar a resposta de filtros de microlinha de transmissão com a utilização de estruturas EBG. Essas novas topologias propostas são projetadas com a intenção de se obter uma resposta para um filtro que não seria possível de ser obtida através de estruturas EBG convencionais. Dentre as propostas apresentadas há a proposta para projetar estruturas EBGs a partir de uma célula unitária com uma geometria não convencional. A dificuldade de tal projeto reside em obter a geometria mais adequada para uma resposta de filtro desejada.

Neste capítulo é apresentada uma proposta de metodologia de projeto de filtros rejeita-faixa usando estruturas EBG-GP, desenvolvida como parte da pesquisa realizada. O objetivo dessa metodologia de projeto é obter a geometria ótima de uma célula unitária que compõe a estrutura EBG a ser corroída no plano de terra de uma microlinha de transmissão, de tal forma que esta estrutura EBG produza as especificações desejadas para o filtro, como resultado da geometria obtida para sua célula unitária.

O procedimento de projeto proposto foi realizado através de técnicas de otimização usando algoritmo genéticos, implementado em ambiente MATLAB, com interação com o simulador eletromagnético tridimensional *Microwave Suite/CST*.

5.1. Conceito da metodologia para otimização de estruturas EBG

Diferentemente da concepção intuitiva ou de tentativas empíricas de criação de novas estruturas periódicas propostas para o surgimento de bandas proibidas, é apresentada a proposta de uma metodologia de geração computacional de geometrias ótimas, baseadas nas especificações de desempenho desejadas para uma estrutura EBG em uma microlinha de transmissão.

A metodologia de projeto de estruturas EBG proposta consiste em conceber a geometria da célula unitária que irá ser reproduzida periodicamente compondo uma estrutura EBG em uma microlinha de transmissão. Dentre os métodos apresentados para a formação de estruturas EBG em circuitos planares, a estrutura EBG com corrosão no plano de terra foi selecionada

para ser utilizada na metodologia proposta por dois principais motivos. Primeiramente é metodologia que se caracteriza pela facilidade de construção, pois se adequa à metodologia de fabricação de circuitos planares convencionais, bastando para tanto corroer parcialmente o plano de terra de modo periódico, com alinhamento coerente com o plano superior do substrato. Em segundo lugar esta metodologia é a uma das que mais oferece graus de liberdade para criação de estruturas com formatos complexos e em duas dimensões.

Considerando-se que a célula unitária pode assumir geometrias arbitrárias, com diversos graus de complexidade, fica claro que não há um modelo analítico para determinar a matriz de espalhamento da microlinha de transmissão com a estrutura EBG de células unitárias periodicamente corroídas em seu plano de terra. Dessa forma é necessário recorrer a simuladores EM-3D que calculam os campos eletromagnéticos ao longo da estrutura do filtro e fornecem seus parâmetros de espalhamento, de modo que se possa englobar todas as possíveis geometrias de uma célula unitária que compõe uma estrutura EBG corroída no plano de terra.

Encontrar a geometria mais adequada não é um problema trivial, uma vez que a complexidade dos cálculos numéricos dos campos magnéticos para a obtenção da matriz de espalhamento da microlinha cresce na medida da complexidade da estrutura EBG. Há diversos métodos numéricos para cálculos de campos eletromagnéticos implementados em softwares comerciais que nos auxiliam na obtenção da matriz de espalhamento para uma microlinha de transmissão. Na presente metodologia o aplicativo *Microwave Suite* da CST foi utilizado para a obtenção dos resultados simulados.

A metodologia proposta para geração da geometria da célula unitária que irá compor a estruturas EBG possui o fluxograma ilustrado na Figura 53, o qual consiste dos passos descritos na sequência.

Figura 53 - Metodologia proposta para otimização de célula unitária de estrutura EBG em circuitos planares.

- **Definição da Função Objetivo**

Inicialmente há a entrada de dados do resultado desejado para algum parâmetro no circuito planar pelo usuário através de uma equação matemática, por exemplo: banda de rejeição ou magnitude de rejeição em uma dada frequência. Este parâmetro de medida será chamado de Função Objetivo e será o fim último no processo de otimização, sendo o princípio da otimização a maximização ou minimização desta Função Objetivo.

Na metodologia proposta a Função Objetivo é definida pelos valores desejados dos parâmetros de espalhamento do filtro a ser projetado na banda de rejeição, como mostrado nos exemplos de aplicação neste capítulo.

- **Geração binária de células unitárias**

A célula unitária da estrutura EBG ocupa uma área limitada por um quadrado, a qual é discretizada em subáreas que podem ser preenchidas por metal ou serem corroídas do plano de terra. O código binário é gerado automaticamente pelo algoritmo de otimização ao longo das iterações, visando no final do processo a obtenção do código binário que irá proporcionar uma resposta em frequência otimizada do filtro, definida matematicamente pela Função Objetivo.

- **Decodificação Binária da Geometria da Célula Unitária**

Para a geração computacional da geometria da estrutura EBG nesta metodologia proposta, necessita-se a discretização da célula unitária da estrutura periódica para que se possa obter uma decodificação computacional desta geometria. Logo, através de subdivisões da célula unitária, iremos discretizar a área da célula unitária em subáreas representadas de forma binária que irão corresponder a uma pequena área a ser corroída ou não do plano de terra na confecção do circuito, dependendo de seu valor binário. Esta etapa de discretização se faz necessária para que desta forma possamos transcrever uma base numérica computacional em uma forma geométrica para a célula unitária da estrutura EBG.

- **Cálculo numérico de equações diferenciais**

A partir da discretização da célula unitária, a resposta em frequência da microlinha de transmissão com a estrutura EBG composta pela repetição da geometria da célula unitária obtida, será analisada por métodos numéricos computacionais. No presente trabalho foi utilizado um simulador comercialmente disponível para realização desta etapa do projeto que utiliza o método numérico de integração finita (*FIT – Finite Integration Technique*).

O circuito analisado no método proposto é um filtro de microlinha de transmissão, composto pela microfita condutora na face superior do substrato e por um plano de terra no qual é corroída a estrutura EBG formada por uma sequência periódica das células unitárias a serem otimizadas. As características físicas e as dimensões do substrato, bem como o número de células unitárias que formam a estrutura EBG são dados fixos de entrada do projeto.

- **Cálculo do valor da Função Objetivo**

A saída dos cálculos numéricos da resposta em frequência da microlinha de transmissão com a estrutura EBG obtida pela repetição periódica da célula unitária discretizada, será dado de entrada para a obtenção do respectivo valor da Função Objetivo. Na primeira iteração a Função Objetivo é calculada a partir da resposta em frequência do filtro usando uma estrutura EBG baseada na célula unitária definida pelo código binário inicial gerado aleatoriamente pelo programa de otimização. Nas iterações subsequentes, o código binário gerado pelo programa de otimização irá se basear na inteligência do algoritmo de otimização do programa. Assim, o programa de otimização irá considerar diferentes códigos binários gerados anteriormente e seus respectivos valores de Função Objetivo e irá propor novos códigos binários nas iterações seguintes, com a finalidade da busca pela otimização da Função Objetivo.

- **Verificação de convergência do resultado**

Como dificilmente a escolha inicial para a geometria da célula unitária que irá compor a estrutura EBG apresentará valores ótimos para a Função Objetivo utilizada, um processo de otimização é então acrescentado ao fluxograma da metodologia. Neste processo, através de métodos de otimização computacional, os valores binários discretizados da geometria serão alterados no decorrer das iterações na busca do valor que irá otimizar a Função Objetivo. Assim, através de perturbações das variáveis binárias do problema pelo método de otimização, estes valores que compõem a célula unitária da estrutura EBG irão convergir para um valor ótimo, à medida que as iterações se sucedem.

Por meio de diversas iterações que se repetem do processo de criação de novos códigos binários e da seleção de códigos binários mais aprimorados, teremos como resultado ao longo do processo uma saída para a geometria da célula unitária que otimizará a Função Objetivo escolhida, a qual por sua vez deverá compor a estrutura EBG do circuito planar para a obtenção da resposta desejada do filtro.

Há ainda outras variáveis que compõem a estrutura EBG, com exceção da geometria da célula unitária, a qual será gerada pela metodologia proposta. Variáveis como, por exemplo, características do substrato, número de períodos que compõem a estrutura EBG e o

comprimento da periodicidade, são consideradas como constantes ou dados de entrada e serão utilizadas pelos métodos numéricos para as condições de contorno e para o cálculo dos campos eletromagnéticos da microlinha de transmissão com a estrutura EBG. Com a evolução do trabalho e de seus resultados, tais variáveis poderão ser incorporadas como variáveis do problema em trabalhos futuros, proporcionando maior complexidade e flexibilidade à metodologia proposta.

Observe-se que o fato de fixarmos as características físicas e dimensões do substrato e o número de células unitárias que compõem a estrutura EBG pode limitar o processo de otimização de uma determinada Função Objetivo desejada. Em outras palavras, pode-se não conseguir a resposta em frequência especificada para o filtro. Nesse caso, uma tentativa alternativa seria repetir o procedimento alterando o substrato e número de células unitárias da estrutura EBG.

- **Algoritmo de otimização**

Um algoritmo computacional de otimização consiste na implementação de rotinas de busca de mínimos e máximos de uma função, usualmente chamada de Função Objetivo, a partir de variações das n variáveis que a compõem. As alterações das n variáveis da função são feitas de diversas formas, dependendo do princípio de funcionamento do método de otimização, ou seja, dependendo do método proposto para a busca do valor ótimo da função. Assim, esta busca do valor ótimo será baseada no princípio de otimização proposto e feita ao longo das diversas iterações do algoritmo até que certo critério de parada seja obedecido, como por exemplo, certa tolerância ao valor esperado, número de iterações ou tempo computacional de processamento. Quando o critério de parada é atingido, tem-se como saída do programa computacional o valor das variáveis que otimizam a Função Objetivo.

A escolha de qual método de otimização deverá ser usado depende muito do tipo de problema e da função a ser otimizada. Pode-se notar, entretanto, que equações que possuam mínimos/máximos locais, como exemplificado no gráfico de uma função ilustrada na Figura 54, fazem parte de um grupo de funções das quais a otimização por métodos determinísticos é ineficiente, pois os métodos determinísticos que se baseiam em gradientes, possuem suas soluções frequentemente aprisionadas em mínimos/máximos locais da função a ser otimizada.

Assim, dificilmente por estes métodos poderíamos obter o valor de um mínimo/máximo global da função, ou seja, a otimização desta função.

Figura 54 – Exemplo de função matemática composta de diversos mínimos e máximos locais.

Para problemas como este com mínimos/máximos locais ou sem uma solução analítica possível, os métodos estocásticos de otimização são comumente utilizados. Estes métodos, muito conhecidos também como Métodos Heurísticos se baseiam em um princípio, ou seja, uma heurística, para utilizar as informações de resultados de interações anteriores para formular os possíveis valores das variáveis em uma próxima iteração com decisões dependentes de uma probabilidade aleatória, que através das iterações convergirá para algum resultado esperado. Alguns exemplos de métodos heurísticos de otimização que poderão ser utilizados na otimização de estruturas EBG em circuitos planares através da metodologia proposta são:

- ✓ *Simulated Annealing* (Recozimento Simulado)
- ✓ *Genetic Algorithm* (Algoritmos Genéticos)
- ✓ *Particle Swarm* (Enxame de Partícula)

No presente trabalho foi empregado o método de otimização por Algoritmos Genéticos descrito em maiores detalhes no APÊNDICE C. Este método de otimização foi empregado através da utilização do *Genetic Algorithm* (GA) *Toolbox* do MATLAB.

5.2. Implementação da metodologia para otimização de estruturas EBG

A metodologia para a obtenção da geometria ótima para a célula unitária de uma estrutura EBG visando uma resposta desejada para um do filtro de microlinha, foi aplicada com o desenvolvimento de rotinas computacionais em softwares comerciais: MATLAB e CST. O fluxograma para da implementação dessa metodologia é ilustrado na Figura 55, o qual consiste dos passos descritos na sequência.

Figura 55: Implementação da metodologia para otimização de célula unitária de estrutura EBG em circuitos planares.

- **Rotina Principal**

A rotina principal foi desenvolvida em MATLAB e é apresentada no APÊNDICE D. Esta Rotina é responsável pela entrada de dados do usuário: número de indivíduos que compõem a população de células unitárias a ser utilizada pelo algoritmo genético de otimização, número de gerações a serem usadas durante a otimização e definição do arquivo do CST onde está descrito o filtro de microlinha de transmissão a ser utilizado para otimização. A rotina principal também configura o algoritmo otimizador e repassa os dados de entrada para o mesmo, no caso o *Genetic Algorithm (GA) Toolbox* do MATLAB.

- ***Genetic Algorithm (GA) Toolbox***

O *GA Toolbox* é uma ferramenta do MATLAB que permite ao usuário implementar rotinas de otimização empregando Algoritmos Genéticos, com ampla versatilidade nos parâmetros de otimização.

O algoritmo otimizador contido no *GA Toolbox* é configurado pela rotina principal com os dados de entrada do usuário para a otimização, o critério de parada da otimização, a forma de apresentação de resultados, entre outras configurações. A partir desta configuração inicial do algoritmo *GA Toolbox*, este executa as seguintes funções:

- 1) Gerar os códigos binário de cada indivíduo que compõe a população inicial do método de otimização Algoritmo Genético.
- 2) Chamar a Função Objetivo a ser otimizada.
- 3) A partir do valor da Função Objetivo recebida para os indivíduos da geração atual, efetuar a seleção, cruzamento e a mutação dos indivíduos para gerar os códigos binários da geração futura.
- 4) Informar à rotina principal que o critério de parada foi atingido.

- **Rotina de interface e gravação**

A rotina de interface e gravação é descrita em MATLAB e é apresentada no APÊNDICE E, Esta rotina realiza a troca de dados entre o algoritmo otimizador e o programa de simulação eletromagnética CST. A cada iteração, a rotina de interface e gravação repassa o código binário que representa a célula unitária que foi gerado pelo algoritmo otimizador para o CST e envia o valor da Função Objetivo gerada pelo CST para o Algoritmo Otimizador. Além disso, grava os dados dos códigos binários e os valores da Função Objetivo em um histórico em arquivo .TXT para futuras consultas e análises, conforme ilustrado na Figura 56.

indiv	recor.	Bits	Funcaoobj
1	0	0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1,	-1.688958e+006
2	0	0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0,	-1.620255e+006
3	0	1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0,	-9.351207e+007
4	0	0, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0,	-4.332611e+006
5	0	0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0,	-1.865054e+006
6	0	1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1,	-1.304685e+008
7	0	1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0,	-8.634843e+007
8	0	0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1,	-7.878072e+007
9	0	0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1,	-1.593737e+006
10	0	0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0,	-1.693499e+006
11	0	1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0,	-8.999724e+006
12	0	0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0,	-1.714698e+006
13	0	0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 0,	-6.624333e+006
14	0	1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1,	-2.999740e+006
15	0	0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 1,	-4.251478e+006
16	0	1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0,	-1.040839e+008

Figura 56 - Exemplo de histórico de otimização.

- **Arquivo com o modelo físico da microlinha do CST**

O arquivo com o modelo físico do filtro em microlinha de transmissão consiste em um arquivo de leiaute do CST com o desenho da microlinha que se deseja utilizar para a criação de filtro com estruturas EBG corroídas no plano de terra. Os dados do substrato são também vinculados a esse modelo físico do filtro. Esse arquivo é chamado e modificado pela Macro do CST a cada iteração do algoritmo otimizador, gerando como saída os parâmetros de espalhamento resultantes da simulação do circuito planar modificado.

A Figura 55 apresenta a janela do CST com leiaute que corresponde ao modelo físico do filtro em microlinha, no qual será implementada a estrutura EBG.

Figura 57 – Exemplo de arquivo CST com modelo da microlinha a ser utilizado para otimização.

- **Rotina em Macro do CST**

A rotina em Macro desenvolvida no CST possui a função de interface entre o CST e o MATLAB. Esta rotina lê o valor do código binário gerado pelo algoritmo de otimização que é disponibilizado pela rotina de interface e gravação em MATLAB. Adicionalmente, essa rotina disponibiliza o valor da Função Objetivo obtida pelo CST para que a rotina de interface e gravação em MATLAB possa ler e fornecer este dado ao algoritmo otimizador.

A segunda função da Macro desenvolvida no CST é, após a leitura do código binário gerada pelo algoritmo otimizador, decodificar o código binário para a célula unitária da estrutura EBG a ser corroída no plano de terra da microlinha. Neste processo a Macro do CST molda o plano de terra do modelo físico da microlinha de transmissão do arquivo do CST e reproduz a célula unitária de acordo com o código binário gerado pelo algoritmo otimizador.

Na Figura 58 é ilustrada a discretização da célula unitária no plano de terra da microlinha de transmissão. Na janela maior dessa figura é apresentada a área da célula unitária, discretizada em n_{dis} subáreas. Cada subárea é nomeada como bit_n , sendo n de 1 a n_{dis} , como apresentado na janela da direita da figura.

Figura 58 – Exemplo de discretização da célula unitária no plano de terra de uma microlinha de transmissão no simulador eletromagnético CST.

Após a discretização da célula unitária, a Macro do CST interpreta o código binário gerado pelo algoritmo otimizador e molda a célula unitária no plano de terra da microlinha de transmissão, de forma a corroer o plano de terra na área representada pela variável quando esta possuir valor “1” e não corroer quando esta possuir valor “0”. No final deste processo temos como resultado a geometria para a célula unitária a ser utilizada nesta iteração da metodologia de otimização.

A terceira função da Macro do CST é, após obter a geometria da célula unitária, reproduzi-la ao longo da fita da microlinha, de forma a compor a estrutura EBG, conforme ilustrado na Figura 59.

Figura 59 - Exemplo de célula unitária replicada ao longo da linha de transmissão compondo a estrutura EBG, com a camada do substrato omitida para facilitar a visualização.

A quarta função da Macro do CST é, simular os parâmetros de espalhamento da microlinha de transmissão, calcular o valor da Função Objetivo a partir dos parâmetros de espalhamento simulados e repassar este valor para a rotina de interface e gravação do MATLAB.

5.3. Aplicação da metodologia para otimização de estruturas EBG

A metodologia proposta foi aplicada ao projeto de duas categorias de filtro rejeita-faixa de micro-ondas, de modo a exemplificar seu uso, explorar sua versatilidade e validar sua utilização em casos práticos. Foi realizada a aplicação da metodologia no projeto de filtros de banda de rejeição ultra-larga e ao projeto de filtros com dupla- banda de rejeição. O projeto das aplicações da metodologia serão detalhados nos itens a seguir.

5.3.1. Aplicação da metodologia em filtro com banda de rejeição ultra-larga

Para o projeto de um filtro com banda ultra-larga de rejeição utilizando-se de estruturas EBG-GP em circuitos planares de micro-ondas utilizaremos duas estruturas EBG simultâneas, assim como no capítulo 4. Esta estratégia permite a obtenção de resultados de filtros, não possíveis com aplicação de uma única estrutura EBG convencional, uma vez que o resultado obtido será a superposição dos resultados das duas estruturas EBG em paralelo. No entanto, diferentemente do filtro apresentado no capítulo 4, na presente proposta, ambas as estruturas EBG serão corroídas no plano de terra. Deste modo é possível uma maior flexibilidade para utilização de geometrias não convencionais para a célula unitária discretizada de duas dimensões, sem aplicar uma estrutura EBG na fita da microlinha de transmissão.

Temos ilustrado na Figura 60 o plano de terra da microlinha de transmissão. No plano de terra teremos as estruturas EBG1 e EBG2 corroídas, intercaladas com o mesmo período a .

Figura 60 - Plano de terra de microlinha da transmissão com estruturas EBG1 e EBG2.

Para o projeto do filtro com banda de rejeição ultra-larga especificou-se a banda de rejeição de 9 GHz a 20 GHz. O substrato utilizado foi Alumina, com constante dielétrica relativa $\epsilon_r = 9,9$ e espessura do substrato $h = 0,635$ mm, com tamanho de 1 polegada por 2 polegadas. Nesse substrato, uma microlinha de transmissão convencional com impedância de $Z = 50 \Omega$ deve ter uma largura da fita $w = 0,6$ mm, conforme modelo para microlinha de transmissão descrito no APÊNDICE A.

Em contra partida às vantagens da implementação de uma estrutura EBG no plano de terra, a corrosão do plano de terra favorece a diminuição do ϵ_{eff} , portanto o aumento da frequência central de banda de rejeição e por consequência, a frequência de corte inferior. Assim, para que o filtro projetado possa ter uma frequência de corte inferior de 9 GHz, utilizaremos como

período $a = 10$ mm para as estruturas EBG1 e EBG2, com deslocamento relativo entre as mesmas de $(a/2) = 5$ mm. Esses valores foram escolhidos considerando-se a Figura 29, de forma similar à realizada no projeto do filtro apresentado no Capítulo 4.

Conforme apresentado na descrição da presente metodologia proposta no início do capítulo, a aplicação desta metodologia no projeto de filtros planares em microlinha de transmissão consiste na entrada de dados, sendo estes dados basicamente a Função Objetivo a ser otimizada e os parâmetros do otimizador. A Função Objetivo a ser minimizada é exatamente a resposta desejada para o filtro a ser projetado.

Existem inúmeras escolhas possíveis para a Função objetivo. No presente caso do projeto de filtro de banda ultra-larga, considerando-se o desempenho desejado para o filtro, definimos a Função Objetivo como sendo:

$$F(bit_1, \dots, bit_{20}) = \sum_{f=9 \text{ GHz}}^{f=20 \text{ GHz}} S_{21}(dB) - 10 \cdot \sum_{f=0 \text{ GHz}}^{f=9 \text{ GHz}} S_{21}(dB) \quad (21)$$

A Função Objetivo definida na eq. (21) não possui restrição e é composta por dois termos, sendo minimizada durante a otimização. O primeiro termo é utilizado para otimizar a banda de rejeição, na qual o valor de $S_{21}(dB)$ desejado deve ser o mais negativo possível para a máxima rejeição. O segundo termo define a faixa de frequência em que o filtro se comporta como passa-baixa, na qual o parâmetro $S_{21}(dB)$ deverá ser idealmente nulo para a perda de inserção, este foi afetado por um peso de 10 para ter uma influência significativa durante o processo de otimização.

A Função Objetivo é uma função da geometria da célula unitária, sendo semelhante à utilizada no desenvolvimento do filtro de banda ultra-larga do capítulo 4. No entanto, na presente metodologia a célula unitária é uma geometria discretizada, portanto sua geometria dependerá dos valores de $n_{dis} = 20$ variáveis discretas denominadas como bit_1 até bit_{20} . Na discretização foi imposta uma simetria diagonal na célula unitária, de forma a diminuir o número de variáveis discretas para otimização e assim facilitar a procedimento computacional. No entanto esta medida restringe as possibilidades de geometria para apenas geometrias simétricas.

A Figura 61 ilustra duas células unitárias das estruturas EBG1 e EBG2 a serem aplicadas simultaneamente no plano de terra do filtro. Nota-se que cada uma dessas células unitárias é composta por uma matriz (8 x 8) da divisão da célula unitária em subáreas, com simetria diagonal. Os elementos da matriz que descreve a EBG1 são as variáveis de bit_1 até bit_{10} . Já no caso da célula unitária da EBG2, os elementos da matriz descritiva são as variáveis binárias de bit_{11} até bit_{20} .

Nesta discretização da célula unitária os valores das variáveis de bit_1 até bit_{20} poderão assumir os valores “1” ou “0”. Este valor binário será interpretada pela Macro do CST para moldar a célula unitária no plano de terra da microlinha de transmissão, de forma a corroer o plano de terra na subárea representada pela variável quando esta possuir valor “1” e não corroer quando esta possuir valor “0”.

Figura 61 - Células unitárias das estruturas EBG1 e EBG2.

O tamanho da célula unitária, tanto da EBG1 como da EBG2, foi escolhido como meio período da estrutura, de modo a permitir o preenchimento completo do período quando as duas EBGs forem corroídas do plano de terra.

O valor da mínima resolução que define as subáreas discretizadas da célula unitária no eixo x e no eixo y, será obtida através dos valores de x e y. Estes valores serão metade do valor do período a da estrutura EBG dividido pelo número de subáreas da células unitária por aresta em cada eixo, sendo o número de subáreas dado respectivamente por $n_{subx} = 8$ e $n_{suby} = 8$, contido em cada linha e coluna da matriz conforme Figura 61. Portanto, teremos a resolução mínima da célula unitária dada por:

$$\text{Resolução mínima em } x \text{ e } y = \frac{a}{2 \cdot n_{sub}} = \frac{10}{2 * 8} = 0,625 \text{ mm} \quad (22)$$

A escolha dos parâmetros do otimizador é uma questão de familiarização com a utilização da ferramenta, sendo a escolha os parâmetros mais cruciais para o desempenho da otimização o tamanho da população, o número de gerações e a taxa de cruzamento. O projetista deve procurar um conjunto desses parâmetros que reúna um bom compromisso entre eficiência de simulação e tempo de processamento para um determinado problema a ser otimizado. Estes parâmetros devem ser alterados pelo projetista a medida que as primeiras otimizações sejam feitas, caso seja observado que o processo de otimização possui uma convergência rápida ou demorada.

Um exemplo típico de valores utilizados no projeto dos filtros, foram: tamanho da população: 6 indivíduos, número de gerações: 256 e taxa de cruzamento: 50 %. Com esses parâmetros, observou-se um compromisso adequado entre otimização do filtro e tempo de simulação computacional.

Os procedimentos computacionais foram realizados em um notebook com processador Intel Pentium Dual-Core 2 GHz, com 3 GB de memória RAM. Com essa configuração os tempos envolvidos otimização da cada filtro projetado foi em torno de 24 horas.

Na Figura 62 é apresentado o histórico da evolução do valor da Função Objetivo de uma das execuções da metodologia proposta. A Função Objetivo está denominada no gráfico como *Fitness Value*, em função do número de geração de cada população. Observa-se uma evolução no valor da Função Objetivo no decorrer das gerações. No gráfico os pontos em preto representam o melhor valor da Função Objetivo obtido até uma determinada geração e os pontos em azul representam o valor médio da Função Objetivo dos indivíduos da respectiva geração.

Figura 62 - Histórico da evolução do valor da Função Objetivo ao longo das gerações de uma das execuções do algoritmo otimizador.

Do gráfico da Figura 62 podemos observar que o processo de otimização foi bem sucedido em minimizar a Função Objetivo ao longo das iterações do processo através da busca dos valores ótimos para as variáveis que compõem a célula unitária da estrutura EBG corroída no plano de terra de uma microlinha.

O processo de busca pelo valor mínimo da Função Objetivo é feito até que o critério de parada seja alcançado, no caso número de gerações: 256. Quando atingido este critério de parada o algoritmo otimizador finalizará, resultando como saída o valor ótimo das variáveis que geraram o menor valor para a Função Objetivo durante todas as iterações. Portanto cada topologia da célula unitária a ser utilizada para a fabricação dos filtros, deve ser otimizada pela execução da metodologia de otimização proposta.

Após executada a metodologia proposta por algumas vezes foram obtidas topologias distintas de geometria de célula unitária de estruturas EBG para compor filtros de microlinha com respostas em frequência que apresentam banda de rejeição ultra-larga. Três dessas topologias para compor filtros foram selecionadas para fabricação.

Os filtros de microlinha a serem fabricados com as topologias de célula unitária selecionadas para compor a estrutura EBG corroída no plano de terra, foram nomeados como filtros: *wide band 1*, *wide band 2* e *wide band 4*. As topologias das células unitárias para estes filtros foram

obtidas da saída da metodologia proposta e possuem os seguintes códigos binários para a geração da célula unitária, denominados como bit_n , para n de 1 a 20.

✓ Para o filtro *wide band 1*

bit_n : 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0

✓ Para o filtro *wide band 2*

bit_n : 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1

✓ Para o filtro *wide band 4*:

bit_n : 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1

Na Figura 63 é apresentado o leiaute dos filtros fabricados e na Figura 64 é apresentada a resposta em frequência simulada dos três filtros fabricados. Podemos observar que esses filtros apresentam banda de rejeição ultra-larga, como desejado. A magnitude de rejeição é, no entanto, reduzida em algumas faixas de frequência dentro da banda de rejeição. Esse comportamento pode ter ocorrido dado ao fato de ter-se aplicado o procedimento de projeto para obter-se um resultado desafiador: banda de rejeição de 9 GHz a 20 GHz. Ainda assim, verificou-se a formação da banda de rejeição ultra-larga, conforme especificado.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 63 – Leiaute dos filtros com banda de rejeição ultra-larga: (a) Face superior dos três filtros; (b) plano de terra do filtro *wide band 1*; (c) plano de terra do filtro *wide band 2* e (d) plano de terra do filtro *wide band 4*.

Figura 64 – Resposta em frequência dos filtros de banda de rejeição ultra-larga: (a) Filtro *wide band 1*; (b) filtro *wide band 2* e (c) Filtro *wide band 4*.

A Figura 65 apresenta fotografias dos filtros de banda ultra-larga fabricados com as estruturas EBG projetadas. Para a fabricação dos filtros foi utilizada técnica de fotogração sobre o substrato de Alumina metalizado com ouro de $4\ \mu\text{m}$ de espessura nas duas faces. Os filtros foram montados na mesma caixa de teste utilizada na caracterização do filtro apresentado no capítulo 4.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 65 - Fotografia dos filtros de banda ultra-larga: (a) face superior dos filtros, (b) plano de terra do filtro *wide band 1*, (c) plano de terra do filtro *wide band 2*, (d) plano de terra do filtro *wide band 4*.

Os filtros de banda de rejeição ultra-larga foram caracterizados em frequências de micro-ondas usando o Analisador Vetorial de Redes HP8722. Da Figura 66 até a Figura 71 são apresentados os resultados experimentais comparados aos simulados dos filtros projetados.

A Figura 66 e a Figura 67 apresentam o resultados experimentais comparados aos simulados do filtro projetado, denominado filtro rejeita-faixa *wide band 1*.

Figura 66 - Resposta em frequência de S_{11} simulada e experimental do filtro de banda ultra-larga *wide band 1*.

Figura 67 - Resposta em frequência de S_{21} simulada e experimental do filtro de banda ultra-larga *wide band 1*.

Comparando-se os resultados experimentais com os simulados do filtro rejeita-faixa *wide band 1* verificamos que:

- O comportamento rejeita faixa em banda ultra-larga foi obtido experimentalmente;
- O início da banda de rejeição para magnitude de rejeição de -10 dB experimentalmente obtida foi em 6,37 GHz, observando-se um descolamento da ordem de 2 GHz abaixo do valor simulado;
- Obteve-se uma banda com magnitude de rejeição maior que 10 dB de 6,37 GHz até 20 GHz, com exceção do intervalo de frequência entre 18,2 GHz e 18,7 GHz, no qual a rejeição ficou entre 7,8 e 10 dB;
- O filtro comportou-se como passa-baixa, demonstrando experimentalmente perda de inserção inferior a 1 dB de 50 MHz até 5,1 GHz.

A Figura 68 e a Figura 69 apresentam o resultados experimentais comparados aos simulados do filtro projetado, denominado filtro rejeita-faixa *wide band 2*.

Figura 68 - Resposta em frequência de S_{11} simulada e experimental do filtro de banda ultra-larga *wide band 2*.

Figura 69 - Resposta em frequência de S_{21} simulada e experimental do filtro de banda ultra-larga *wide band 2*.

Comparando-se os resultados experimentais e com os simulados do filtro rejeita-faixa *wide band 2* verificamos:

- O comportamento rejeita faixa em banda ultra-larga foi obtido experimentalmente;
- O início da banda de rejeição para magnitude de rejeição de -10 dB experimentalmente obtida foi em 7,70 GHz, ficando aproximadamente 700 MHz abaixo do valor simulado;
- O protótipo do filtro apresentou uma banda de rejeição 7,70 GHz até 20 GHz, com magnitude de rejeição maior que 10 dB ao longo da mesma;
- O filtro comportou-se como passa-baixa, demonstrando experimentalmente perda de inserção inferior a 1 dB de 50 MHz até 5,0 GHz.

A Figura 70 e a Figura 71 apresentam o resultados experimentais comparados aos simulados do filtro projetado, denominado filtro rejeita-faixa *wide band 4*.

Figura 70 - Resposta em frequência de S_{11} simulada e experimental do filtro de banda ultra-larga *wide band 4*.

Figura 71 - Resposta em frequência de S_{21} simulada e experimental do filtro de banda ultra-larga *wide band 4*.

Comparando-se os resultados experimentais e com os simulados do filtro rejeita-faixa *wide band 4* verificamos:

- O comportamento rejeita faixa em banda ultra-larga foi obtido experimentalmente;
- O início da banda de rejeição para magnitude de rejeição de -10 dB experimentalmente obtida foi em 6,80 GHz, ficando aproximadamente 250 MHz acima do valor simulado;
- O protótipo do filtro apresentou uma banda de rejeição 9 GHz até 20 GHz, com magnitude de rejeição maior que 10 dB ao longo da mesma, com exceção do intervalo entre 14,1 GHz e 14,7 GHz em que a rejeição ficou entre 8,9 e 10 dB;
- O filtro comportou-se como passa-baixa, demonstrando experimentalmente perda de inserção inferior a 1 dB de 50 MHz até 5,1 GHz.

5.3.1.1. Conclusões sobre os filtros de banda ultra-larga projetados

Comparando-se os resultados experimentais e simulados dos três filtros rejeita-faixa projetados, verificamos que a metodologia de projeto permitiu desenvolver novas topologias de estruturas EBG-GP que propiciaram a geração de banda de rejeição ultra-larga. Adicionalmente verificou-se que esses filtros apresentaram comportamento passa-baixa com perda de inserção reduzida, como previsto pelas simulações computacionais.

No caso do filtro *wide band 1* observou-se um deslocamento significativo entre a resposta em frequência medida e a simulada, verificando-se um aumento na largura de banda de rejeição experimentalmente determinada devido à redução da frequência inferior da banda de rejeição. Esse efeito foi observado de maneira bem mais reduzida nos filtros *wide band 2* e *wide band 4*. Dois fatores podem ter causado essa diferença entre respostas em frequência desses filtros medidas e simuladas: limitação do simulador EM-3D e/ou variação das dimensões das estruturas EBG ao longo das diversas etapas de fabricação dos filtros, como geração dos fotolitos, fotogravação e ataque químico.

Deve-se considerar também que as medidas foram realizadas em banda ultra-larga, na faixa de frequência de 50 MHz a 20 GHz, sendo portanto afetadas pela caixa teste metálica na qual foram montados os filtros, a qual não foi considerada nas etapas de simulação computacional. No caso dos filtros *wide band 1,2 e 4*, os extremos das estruturas EBG encontram-se a apenas 1,4 mm da borda interna da caixa usada na caracterização dos filtros, e essa proximidade pode ter influído nas respostas em frequência experimentalmente obtidas.

De forma geral podemos concluir que a eficácia da metodologia de projeto aplicada a filtros rejeita faixa de banda ultra-larga foi comprovada pelo conjunto dos resultados experimentais dos três filtros projetados.

5.3.2. Aplicação da metodologia em filtro de dupla-banda de rejeição

Para o projeto da metodologia proposta de um filtro rejeita-faixa com dupla-banda empregando estruturas EBG em circuitos planares de micro-ondas, utilizaremos uma estrutura EBG corroída do plano de terra com 5 períodos e com período de $a = 21,3$ mm, conforme ilustrado na Figura 72.

Figura 72 - Estrutura EBG corroída no plano de terra da microlinha de transmissão.

As dimensões desta estrutura EBG foi escolhida baseada na estrutura proposta em (Yun-Qi Fu, 2002), onde o autor propõe estruturas EBG criadas intuitivamente a partir do conceito de iterações fractais de estruturas geométricas para gerar um filtro em microlinha com dupla-banda de rejeição. Nesta proposta apresentada anteriormente no capítulo 3 como uma das metodologias para melhoria de desempenho de estruturas EBG, são propostos filtros em microlinha com uma estrutura EBG com célula unitária corroída no plano de terra com as geometrias: quadrada, fractal com uma iteração e fractal com duas iterações, gerada a partir do primeiro fractal, conforme ilustrado na Figura 39.

A utilização de uma estrutura EBG com as mesmas dimensões da proposta na literatura com a geometria de uma célula unitária gerada intuitivamente tem como finalidade demonstrar a flexibilidade e eficiência da metodologia proposta para a geração de geometrias não intuitivas de células unitárias de estrutura EBG, para a obtenção da resposta desejada para um filtro em microlinha. No entanto, a escolha do substrato e a do fator de preenchimento da estrutura EBG fazem parte da metodologia proposta.

Na metodologia proposta, optou-se por utilizar como substrato o RT/Duroid 6006, com constante dielétrica relativa $\epsilon_r = 6,15$ e espessura $h = 1,905$ mm, com 2 polegadas por 4 polegadas, diferente do substrato utilizado em (Yun-Qi Fu, 2002). Esse substrato é revestido em ambas as faces por camada de cobre com $35 \mu\text{m}$ de espessura. Para obtermos uma microlinha de transmissão com impedância de $Z=50 \Omega$, a largura da fita de microlinha resulta em $w = 2.75$ mm, a partir das equações demonstradas no APÊNDICE A. A utilização de um substrato espesso tem como princípio permitir que a microlinha de transmissão possa ter uma largura maior, de modo que a estrutura EBG corroída no plano de terra tenha maior influência no desempenho do filtro.

A definição do valor do fator de preenchimento da estrutura EBG segue o mesmo princípio dos filtros anteriores de permitir que a geometria da célula unitária possa variar até o valor máximo do fator de preenchimento de $A = 0,5$.

Conforme apresentado na descrição da presente metodologia de projeto proposta, a aplicação desta metodologia no projeto de filtros planares em uma microlinha de transmissão consiste na entrada de dados, basicamente da Função Objetivo a ser otimizada e dos parâmetros do otimizador. A Função Objetivo descreve matematicamente a resposta desejada para o filtro a ser projetado e será minimizada durante a otimização computacional. Neste caso, a resposta desejada para o filtro será a reprodução dos resultados apresentados em (Yun-Qi Fu, 2002), ilustrados na Figura 40.

Existem inúmeras escolhas possíveis para a Função objetivo. Nesta aplicação da metodologia ao projeto de filtro de dupla-banda de rejeição, considerando-se o desempenho desejado para o filtro, a Função Objetivo foi definida como:

$$\begin{aligned}
F(bit_1, \dots, bit_{100}) = & \left(\sum_{f=2 \text{ GHz}}^{f=5 \text{ GHz}} S_{21}(dB) + \sum_{f=7 \text{ GHz}}^{f=9 \text{ GHz}} S_{21}(dB) \right) \\
& - 10 \cdot \left(\sum_{f=0 \text{ GHz}}^{f=2 \text{ GHz}} S_{21}(dB) + \sum_{f=5 \text{ GHz}}^{f=7 \text{ GHz}} S_{21}(dB) + \sum_{f=9 \text{ GHz}}^{f=10 \text{ GHz}} S_{21}(dB) \right)
\end{aligned} \tag{23}$$

A Função Objetivo definida na eq. (23) não possui restrição e é composta por dois termos, sendo minimizada durante a otimização. O primeiro termo é utilizado para otimizar a banda de rejeição, na qual o valor de $S_{21}(dB)$ desejado deve ser o mais negativo possível para a máxima rejeição. O segundo termo define as faixas de frequência em que o filtro se comporta como passa-baixa e passa-faixa, nas quais o parâmetro $S_{21}(dB)$ deverá ser idealmente nulo para a mínima perda de inserção. O segundo termo foi afetado por um peso de 10 para ter uma influência significativa durante o processo de otimização.

Essa Função Objetivo foi definida de modo que sua minimização seja compatível com a síntese de um filtro com duas bandas de rejeição, localizadas entre 2 GHz e 5 GHz e entre 7 GHz e 8 GHz, centradas respectivamente em 3,5 GHz e 7,5 GHz. O valor da Função Objetivo é variável, sendo dependente da geometria da célula unitária, semelhante ao desenvolvimento do filtro banda de rejeição ultra-larga do capítulo 4. No entanto, na presente metodologia a célula unitária é uma geometria discretizada, portanto sua geometria dependerá dos valores de 100 variáveis discretas binárias, denominadas como de n_1 até n_{100} .

Nesta discretização as variáveis de n_1 até n_{100} poderão assumir os valores “1” ou “0”. Este valor binário será interpretado pela Macro do CST e irá moldar a célula unitária no plano de terra da microlinha de transmissão, de forma a corroer o plano de terra na área representada pela variável quando esta possuir valor “1” e não corroer quando esta possuir valor “0”.

Na discretização foi aplicada uma simetria na célula unitária no eixo x, de forma a diminuir o número de variáveis discretas para otimização e assim facilitar os cálculos computacionais. No entanto, esta medida restringe as possibilidades de geometria para apenas geometrias simétricas. A Figura 73 ilustra a discretização da célula unitária utilizada no projeto de filtro com dupla-banda de rejeição.

91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

Figura 73 - Célula unitária discretizada para a estrutura EBG.

O tamanho da célula unitária da EBG foi escolhido como meio período da estrutura. Dessa forma, o valor da mínima resolução na discretização da célula unitária será metade do período a da estrutura EBG dividido pelo número de subáreas da células por aresta, $n_{subx} = 10$ em x e $n_{suby} = 20$ em y , como mostrado na Figura 73.

Portanto a resolução mínima em x e y é dada por:

$$\text{Resolução mínima em } x = \frac{a}{2 \cdot n_{subx}} = \frac{21,3}{2 \cdot 10} = 1,03 \text{ mm} \quad (24)$$

e

$$\text{Resolução mínima em } y = \frac{a}{2 \cdot n_{suby}} = \frac{21,3}{2 \cdot 20} = 0,53 \text{ mm} \quad (25)$$

A escolha dos parâmetros do otimizador é uma questão de familiarização com a utilização da ferramenta, sendo a escolha os parâmetros mais cruciais para o desempenho da otimização o tamanho da população, o número de gerações e a taxa de cruzamento.

Um exemplo típico de valores utilizados no projeto dos filtros: tamanho da população: 6 indivíduos, número de gerações: 256 e taxa de cruzamento: 50 %. Com esses parâmetros, observou-se um compromisso adequado entre otimização do filtro e tempo de simulação computacional.

Os procedimentos computacionais foram realizados em um notebook com processador Intel Pentium Dual-Core 2 GHz, com 3 GB de memória RAM. Com essa configuração os tempos envolvidos na otimização de cada filtro projetado foram em torno de 72 horas.

Na Figura 74 é apresentado o histórico da evolução do valor da Função Objetivo, denominada no gráfico como *Fitness Value*, em função do número de geração de cada população para a otimização do filtro com dupla-banda de rejeição. Observa-se uma evolução no valor da Função Objetivo no decorrer das gerações. No gráfico os pontos em preto representam o melhor valor da Função Objetivo para a dada geração e os pontos em azul representam o valor médio da Função Objetivo daquela geração.

Figura 74 - histórico da evolução do valor da Função Objetivo ao longo das gerações do algoritmo otimizador.

Do gráfico da Figura 74 podemos observar que o processo de otimização foi bem sucedido em minimizar a Função Objetivo ao longo das iterações do processo através da busca dos valores ótimos para as variáveis que compõem a célula unitária da estrutura EBG corroída no plano de terra de uma microlinha.

O processo de busca pelo valor mínimo da Função Objetivo é feito até que o critério de parada seja alcançado, no caso número de gerações: 256. Quando atingido este critério de parada o algoritmo otimizador finalizará, resultando como saída o valor ótimo das variáveis que geraram o menor valor para a Função Objetivo durante todas as iterações. Portanto a

topologia da célula unitária a ser utilizada para a fabricação do filtro deve ser otimizada pela execução da metodologia de otimização proposta.

Após executada a metodologia proposta, foi obtida a topologia da geometria de célula unitária de estruturas EBG para compor os filtros de microlinha com respostas em frequência apresentando dupla-banda de rejeição.

O filtro de microlinha a ser fabricado com a topologia de célula unitária selecionada para compor a estrutura EBG corroída no plano de terra, foi nomeado como filtro *dual band 2*. A topologias da célula unitária para este filtro foi obtida da saída da metodologia proposta e possui o seguinte código binário para a geração da célula unitária, denominados como bit_n , para n de 1 a 100.

✓ Para o filtro *dual band 2*

bit_n : 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1,
 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0,
 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0,
 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1.

Na Figura 75 é apresentado o leiaute otimizado da estrutura EBG a ser corroída no plano de terra de uma microlinha de transmissão visando um filtro com o desempenho de dupla-banda de rejeição desejado, resultando em um valor mínimo para a Função Objetivo.

(a)

(b)

Figura 75 – Leiaute da (a) microfita e (b) do plano de terra do filtro em microlinha otimizado com estrutura EBG de dupla-banda de rejeição.

Na Figura 76 é apresentada a resposta em frequência da microlinha de transmissão otimizada para a resposta do filtro desejada. Podemos observar a presença de duas bandas de rejeição distintas, centradas em 3,3 GHz e 7,8 GHz com máxima magnitude de rejeição de 50 dB e 40 dB, respectivamente. Observa-se perda de inserção inferior a 1 dB na banda de passagem de 50 MHz até 2,5 GHz e inferior a 3 dB na faixa de 4,9 GHz até 7,2 GHz.

Figura 76 - Resposta em frequência simulada do filtro com dupla-banda de rejeição: (a) S_{11} e (b) S_{21} .

Este resultado está de acordo com a resposta do filtro desejada definida como dado de entrada da metodologia proposta e compatível com os resultados apresentados em (Yun-Qi Fu, 2002), ilustrado na Figura 40, demonstrando a eficácia da metodologia para a geração não intuitiva

de geometrias para a células unitárias de estruturas EBG com a finalidade da obtenção de filtro de microlinhas com um padrão de resposta desejado.

A Figura 77 apresenta a fotografia do filtro com dupla-banda de rejeição, fabricado com a estrutura EBG projetada. Para fabricação do filtro foi utilizada técnica convencional de fabricação de circuito impresso. É importante observar que uma inspeção visual em microscópio mostrou que houve sobre-corrosão das geometrias metálicas da ordem de $60 \mu\text{m}$, o que corresponde a 10 % das dimensões mínimas da estrutura EBG. Essa sobre-corrosão é compatível com a espessura da camada de cobre que reveste o substrato, que é de $35 \mu\text{m}$, mas é suficientemente alto para influir na resposta do filtro. Conectores SMA/microlinha foram soldados diretamente nos acessos de entrada e saída do filtro, como mostrado na fotografia.

(a)

(b)

Figura 77 - Fotografia do filtro rejeita-faixa com dupla-banda de rejeição: (a) face superior do filtro, (b) plano de terra do filtro em microlinha com estrutura EBG corroída.

O filtro rejeita-faixa com dupla-banda de rejeição foi caracterizado em frequências de micro-ondas usando o Analisador Vetorial de Redes HP8722. A Figura 78 apresenta os resultados experimentais comparados aos simulados do filtro projetado.

Figura 78 -Resposta em frequência simulada e experimental do filtro rejeita-faixa com dupla-banda de rejeição: (a) S_{11} e (b) S_{21} .

Analisando-se os resultados experimentais e simulados do filtro rejeita-faixa com dupla-banda de rejeição, verificamos:

- Foi obtido experimentalmente comportamento rejeita faixa, observando-se a presença de três faixas de rejeição;
- Verificamos que as bandas de rejeição obtidas experimentalmente estão centradas em 3,2 GHz, 5,8 GHz e 8,1 GHz enquanto as simulações computacionais previam bandas de rejeição em 3,3 GHz e 7,8 GHz;
- Verificou-se que na resposta obtida experimentalmente houve uma redução na largura banda de rejeição centrada em 3,3 GHz e um alargamento da banda de rejeição centrada em 7,8 GHz em comparação à resposta obtida por simulação.
- Houve desvio significativo na resposta experimental devido ao surgimento de uma banda de rejeição não prevista na resposta simulada em 5,8 GHz;
- O filtro comportou-se bem nas bandas de passagem, demonstrando experimentalmente perda de inserção inferior a 1 dB de 50 MHz até 2,1 GHz e inferior a 3 dB de 3,8 GHz a 5,4 GHz e de 6,4 GHz até 7,0 GHz.
- Observando-se os resultados simulados do filtro rejeita-faixa com dupla-banda de rejeição projetado, verificamos que a metodologia de projeto permitiu desenvolver novas topologias de estruturas EBG-GP não intuitivas que propiciaram a geração de dupla-banda de rejeição.
- As diferenças observadas entre as simulações e medidas podem ser atribuídas em parte à sobre corrosão da estrutura EBG gravada no plano de terra do filtro, verificada visualmente. Comparando-se a imagem da estrutura EBG obtida em microscópio com escala com a estrutura projetada, foi possível avaliar uma sobre corrosão da ordem de 50 a 70 μm na camada de cobre durante a fabricação do filtro. O segundo fator que também pode ter afetado o desempenho experimental do filtro é a montagem do mesmo, na qual os conectores foram soldados aos acessos do filtro, diretamente no substrato do mesmo, o que pode afetar suas características elétricas em alta frequência.

- De forma geral podemos concluir que a eficácia da metodologia de projeto aplicada a filtros rejeita faixa com dupla-banda de rejeição foi comprovada pelos resultados simulados do filtro projetado, sendo parcialmente endossada pelo resultado experimental do filtro, apesar do mesmo ter sido afetado pela sobre corrosão da estrutura EBG durante a fabricação do mesmo.

5.4. Conclusões Parciais

Neste capítulo foi apresentada uma metodologia versátil para o projeto de filtros planares de micro-ondas através da implementação de estruturas EBG corroídas no plano de terra. A versatilidade da metodologia consiste em definir a Função Objetivo que descreve matematicamente o desempenho desejado para o filtro planar com a estrutura EBG corroída no plano de terra.

Nesta metodologia, rotinas computacionais em MATLAB e em Macro do *Microwave Suite*/CST foram desenvolvidas de forma a proporcionar uma iteração entre um programa de cálculos numéricos de campos eletromagnéticos e um programa de otimização de funções matemáticas sem solução analítica, como é o caso da otimização da célula unitária de estruturas EBG na metodologia proposta.

Duas aplicações da metodologia proposta foram apresentadas para implementação em microlinhas de transmissão para diferentes finalidade de filtros, que geraram quatro topologias originais de estruturas EBG. A primeira aplicação consistiu no projeto de três filtros de banda ultra-larga através da otimização da geometria das células unitárias de duas estruturas EBGs corroídas no plano de terra. A segunda aplicação consistiu na obtenção de um filtro rejeita faixa de dupla-banda de rejeição através da otimização da geometria da célula unitária de uma estrutura EBG corroída no plano de terra. Na Tabela 1 é apresentado o resumo dos parâmetros da estrutura EBG para o projeto dos filtros de banda ultra-larga e de dupla-banda de rejeição. Com as duas aplicações da metodologia proposta para a finalidade de obtenção de filtros planares com diferentes critérios de desempenhos foi possível comprovar a eficácia e flexibilidade da metodologia proposta para o projeto de filtros planares de micro-ondas.

Parâmetros da estrutura EBG	Filtro de banda ultra-larga de rejeição	Filtro de dupla-banda de rejeição
Substrato	Alumina $\varepsilon_r = 9,9$; $h = 0,635$ mm	RT/Duroid 6006 $\varepsilon_r = 6,15$; $h = 1,905$ mm μ
Período a $a = \lambda_g / 2$	λ_g : comprimento de onda guiado da frequência entre frequência central da banda de rejeição e a frequência de corte inferior	λ_g : comprimento de onda guiado da frequência entre as frequências centrais das bandas de rejeição.
Fator de Preenchimento Λ	$\Lambda = 0,5$	$\Lambda = 0,5$
Número de discretização	$n_{dis} = 20$	$n_{dis} = 100$

Tabela 1: Resumo dos parâmetros da estrutura EBG para o projeto dos filtros de banda ultra-larga e de dupla-banda de rejeição.

Após simulações apresentadas o filtro de microlinha foi fabricado, com precisão de alinhamento satisfatório entre a camada superior e inferior do substrato. Os resultados experimentais dos filtros projetados validaram a metodologia de projeto proposta nesta dissertação.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões gerais sobre as atividades desenvolvidas, bem como algumas sugestões de trabalhos futuros na área de filtros empregando estruturas EBG.

6.1. Conclusões

Concluindo-se esta dissertação, pode-se dizer que os objetivos iniciais da pesquisa foram atingidos, tendo sido propostas cinco topologias originais de filtros rejeita-faixa usando estruturas EBG, sendo quatro filtros com característica de banda ultra-larga de rejeição e um filtro com dupla-banda de rejeição.

O estudo realizado da literatura internacional permitiu identificar uma ampla gama de possibilidades de projeto de filtros rejeita faixa usando estruturas EBG. Simulações realizadas de um filtro em microlinha de transmissão com uma estrutura EBG corroída no plano de terra permitiram investigar a influência dos diversos parâmetros geométricos da estrutura EBG no desempenho do filtro, solidificando conhecimentos para o projeto desse tipo de filtro.

A partir desse estudo optou-se por seguir dois caminhos distintos para a proposição de filtros rejeita faixa com topologias originais. O primeiro caminho consistiu em reunir os conceitos estudados e propor uma nova topologia de filtro usando estruturas EBG, visando a obtenção de uma banda de rejeição ultra-larga. Esse procedimento de projeto depende do conhecimento e a criatividade do projetista, e foi aplicado ao projeto de uma topologia de filtro rejeita faixa com banda larga de rejeição, que associa duas estruturas EBG simultâneas aplicadas a uma microlinha de transmissão. Na metodologia de projeto proposta, uma das estruturas EBG é corroída no plano de terra e a segunda estrutura EBG é obtida pela variação periódica da largura da fita condutora da microlinha de transmissão. A metodologia de projeto utilizada associou equações teóricas baseadas na Lei de Bragg, e simulações computacionais EM-3D. Esse filtro foi projetado e construído em substrato de Alumina, tendo apresentado uma banda de rejeição de 6 GHz a 17 GHz, com magnitude de rejeição maior que 34 dB. Esse filtro apresentou excelente concordância entre resultados experimentais e simulados, comprovando com boa acurácia a eficiência do filtro e a validação da metodologia proposta. O desempenho do filtro proposto destaca-se dos publicados na literatura, tendo gerado um artigo submetido à publicação em periódico internacional apresentado no APÊNDICE H.

O segundo procedimento adotado foi o desenvolvimento de um método de síntese automática que permitisse propor filtros planares usando novas estruturas EBG corroídas no plano de terra, com características pré-especificadas, como banda de rejeição ultra-larga ou de dupla-banda de rejeição. Neste caso a síntese automática do filtro é realizada através de procedimentos de otimização computacional que visam minimizar uma Função Objetivo que descreve a resposta em frequência desejada para o filtro. Esse procedimento de projeto apresenta grande potencial e versatilidade na geração de estruturas EBG com topologias originais, não intuitivas. Para esse fim foram desenvolvidas rotinas computacionais em MATLAB e em Macro do simulador EM-3D *Microwave Suite* do CST. Essas rotinas proporcionam uma iteração entre um programa de cálculos numéricos de campos eletromagnéticos e um programa de otimização de funções matemáticas sem solução analítica por algoritmos genéticos, como é o caso da otimização da célula unitária de estruturas EBG na metodologia proposta.

A metodologia de síntese de filtros rejeita-faixa usando estruturas EBG corroídas no plano de terra foi empregada em duas aplicações distintas de filtros, que geraram quatro topologias originais de estruturas EBG. A primeira aplicação consistiu no projeto de três filtros de banda ultra-larga através da otimização da geometria das células unitárias de duas estruturas EBG simultâneas, corroídas no plano de terra de uma microlinha de transmissão. Esses filtros foram projetados para rejeitar a banda de 9 GHz a 20 GHz, tendo sido construídos em substrato de Alumina. Os resultados experimentais desses filtros apresentaram bandas de rejeição ultra-largas, tendo-se obtido magnitude de rejeição de -10 dB em uma banda ultra-larga de até 7,7 GHz a 20 GHz. Os três filtros apresentaram magnitude de rejeição elevada ao longo da banda de rejeição, exceto por uma faixa de frequência de poucas centenas de MHz em que essa rejeição ficou entre 8 e 10 dB. Esses filtros demonstraram experimentalmente comportarem-se como filtros passa-baixa com perda de inserção menor que 1 dB até frequências da ordem de 6 GHz.

A segunda aplicação consistiu na obtenção de um filtro rejeita faixa de dupla-banda de rejeição através da otimização da geometria da célula unitária de uma estrutura EBG corroída no plano de terra. Projetou-se um filtro visando uma primeira banda de rejeição centrada em 3,5 GHz e uma segunda banda de rejeição centrada em 7,5 GHz. O filtro projetado foi construído em substrato flexível, tendo apresentado em seu desempenho experimental três bandas de rejeição centradas em 3,3 GHz, 5,8 GHz e 7,8 GHz, com magnitudes máximas de

rejeição de 18,7 dB, 13 dB e 53,5 dB, respectivamente. Através de inspeção visual em microscópio verificou-se que a fabricação desse filtro foi prejudicada por uma corrosão excessiva do cobre no plano de terra, em torno de 10 % das dimensões mínimas da estruturas EBG. Mesmo assim, o desempenho do filtro permitiu confirmar a eficiência do procedimento de síntese computacional proposto em gerar novas topologias de filtro com dupla-banda de rejeição.

Em suma, ambas as metodologias de projeto de filtros planares de micro-ondas usando estruturas EBG – a metodologia de projeto de filtro de banda ultra-larga e a metodologia empregando síntese computacional automatizada, apresentadas respectivamente nos capítulos 4 e 5, foram aplicadas com sucesso ao projeto de novos filtros, demonstrando seu potencial em gerar topologias originais. Os resultados experimentais dos filtros projetados demonstraram experimentalmente a eficácia, flexibilidade e potencial das metodologias propostas na geração de novos filtros com a finalidade de atender especificações de banda de rejeição ultra-larga ou de dupla-banda de rejeição.

6.2. Sugestões para trabalhos futuros

Durante a realização deste trabalho surgiram algumas sugestões de atividades futuras que podem ser desenvolvidas dando continuidade a esta pesquisa, como listado a seguir:

- Implementação da metodologia de síntese de filtros proposta em outros tipos de estruturas EBG, como em circuitos coplanares e em antenas planares de micro-ondas.
- Implementação da metodologia de síntese de filtros proposta em *Monolithic Microwave Integrated Circuit* (MMIC).
- Diminuição do passo de discretização da célula unitária da estrutura EBG, sem imposição de simetria, ou limitação da complexidade de fabricação e do aumento de tempo computacional, com vantagem de maior flexibilidade de geração de geometrias de células unitárias e consequentemente, de respostas em frequência possíveis para os filtros.

- Desenvolvimento de rotinas computacionais para cálculo numérico de campos eletromagnéticos com métodos absorvedores nas bordas da célula unitária da estrutura EBG, de forma a limitar o espaço físico de realização do cálculo desses campos a uma única célula unitária da estrutura EBG. com condições de contorno, como ilustrado na Figura 79. Dessa forma seria possível acelerar o processo para síntese de filtros através da metodologia proposta nesta dissertação, reduzindo o tempo total das simulações EM-3D (D. E. Schaub, 2008) (F. Akleman, 2004).

Figura 79 – Estrutura EBG com a utilização de absorvedores nas bordas da célula unitária como sugestão de trabalhos futuros para métodos numéricos de campos eletromagnéticos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Balanis, C. A. (2005). *Antenna Teory*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Cazo, R. M. (2001). *Sistemas Interrogadores de Sensores Baseados em Grade de Bragg*. São José dos campos: Instituto Tecnológico de Aeronautica.
- Chang, T.-Y. Y. (2001). Uniplanar One-Dimensional Photonic-Bandgap Structures and Resonators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* , 549-553.
- Chul-Sik Kee, J.-E. K. (1999). Essential parameter in the formation of photonic band gaps. *Physical Review*, 4695-4698.
- Chul-Sik Kee, J.-E. K. (1999). Roles of Wave Impedance and Refractive Index in Photonic Crystals with Magnetic and Dielectric Properties. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Tchniques* , 2148-2150.
- Colin, R. E. (2001). *Foundations for Microwave Engineering*. John Wiley & Sons Inc.
- Fei-Ran Yang, K.-P. M. (1999). A Uniplanar Compact Photonic-Bandgap (UC-PBG) Structure and Its Applications for Microwave Circuits. *A Uniplanar Compact Photonic-Bandgap (UC-PBG) Structure and Its Applications for Microwave Circuits* , pp. 1509-1514.
- Fleming, A. J. (s.d.). *The MATLAB Genetic Algorithm Toolbox*.
- Francisco Falcone, T. L. (1999). 1-d and 2-d Photonic Bandgap Microstrip Structures. *Microwave and Optical Technology Letters* , 411-412.
- Holland, J. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. The University of Michigan Press.
- Ian Rumsey, M. P.-M. (1998). Photonic Bandgap Structures Used as Filters in Microstrip Circuits. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters* , 336-338.
- J.D. Joannopoulos, R. M. (2007). Photonic crystal: Molding the flow of light. In: R. M. J.D. Joannopoulos, *Photonic crystal: Molding the flow of light* (p. pg. 157). NJ: Princeton University Press.
- John D. Joannopoulos, S. J. (2007). *Photonic Cristal - Modeling the flow of light*. Second Edition: Princeton University Press.
- Kenji Matsushita, M. F. (2010). Frequency Characteristics of 1-D Periodic Structures with Tapered Microstrip Lines. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering* , 245–250.
- Lee, S. Y. (2006). A New Optimization Approach for High Performance Meander EBG Filter Designs. *Microwave and Optical Technology Lett.* , 2933-2936.
- M. A. G. Laso, T. L. (March de 2000). Novel Wideband Photonic Bandgap Microstrip Structures. *Microwave and Optical Technology Letters* , pp. 357-360.
- Manoj K. Tiwari, K. K. (December de 2002). Photonic Band Gap Studies on Periodic Structures in Microwave Region. *Microwave and Optical Technology Letters* , p. 483.

- Mark Ryan RMIT - Applied Physics Melbourne, A. (01 de 11 de 2006). http://en.wikipedia.org/wiki/Bragg's_law. Acesso em 03 de 19 de 2010, disponível em Wikipedia.
- Mias, C. T. (2002). An investigation into the feasibility of designing frequency selective windows employing periodic structures. The Nottingham Trent University: Technical report.
- Oliveira, L. C. (2001). Aplicação de estruturas PBG em dispositivos planares de microondas - linhas e antenas - em substratos dielétricos e semicondutores. Campinas: Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da UNICAMP.
- P. Maagt, R. G. (october 2003 Vol 51 number 10). Electromagnetic bandgap Antennas nad Components for microwave and (Sub) millimeter wave applications. Transc. On Antennas and propagation , 2667-2676.
- Pozar, D. M. (2005). Microwave Engeneering. John Wiley & Sons, Inc.
- Rezende, S. M. (2004). Materiais e Dispositivos Eletrônicos. São Paulo: Editora Livraria da Física.
- Rincão, T. (2008). Otimização Irrestrita sem Derivadas Baseada em interpolação polinomial. Mestrado em Matemática Aplicada . Campinas, SP, Brasil: dma - imecc - unicamp.
- S. C. Bera, R. V. (2006). A Novel PBG Structure for Filter Application. Microwave and Optical Technology Letters , 188-190.
- Sang-Gyu Park, J.-H. K.-W.-S.-B.-I. (2005). A Ka-Band MMIC Oscillator Utilizing a Labyrinthine PBG Resonator. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 727-729.
- Santos, K. C. (2005). Aaplicação do método ltt às estruturas retangulares e triangulares em multicamadas e empilhadas em substratos pbg para comunicações móveis. natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Seo, T. K. (2000). A Novel Photonic Bandgap Structure for Low-Pass Filter of Wide Stopband. IEEE Microwave and Guided wave Letters , 13-15.
- Shao Ying Huang (2005). Tapered Dual-Plane Compact Electromagnetic Bandgap Microstrip Filter Structures. Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2656-2664.
- Silva, A. M. (2004). Tecnologia de estruturas EBG - Electromagnetic Band-Gap - aplicada a antenas para comunicações móveis. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas: Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica.
- Sze, S. M. (2007). Phisicys of Semiconductor Devices. NJ: John Wiley & Sons, Inc.
- Tavora, A. A. (2002). Antenas planares reconfiguraveis do tipo V-estático e tipo defasamento de arranjo por matrizes PBG - Photonic BandGap - para aplicação em telefonia móvel celular. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação: Dissertação de Mestre em engenharia elétrica.
- Vesna Radisic, Y. Q. (1998). Broad-Band Power Amplifier Using Dielectric Photonic Bandgap Structure. IEEE Microwave and Guided wave Letters , 13-14.
- Vesna Radisic, Y. Q. (1998). Novel 2-D Photonic Bandgap Structure for Microstrip Lines. IEEE Microwave and Guided Wave Letters , 69-71.

Y., R. V. (1998. v. 3). Active Antenna Approach to High Efficiency Power Amplifiers with EMI Reduction. IEEE Military Communications Conference , 699–703.

Yablonovitch, E. a. (1991). Photonic band structure: The face-centered-cubic case employing nonspherical atoms. Physical Review Letters , 2295–2298.

Yablonovitch, E. (1987). Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. Phys Rev Lett 58 , 2059–2062.

Yablonovitch, E. (1993). Photonic band-gap structures. J Opt Soc Am B 10 , 283–295.

Yang, F., & Rahmat-Samli, Y. (2009). Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering. Cambridge: Cambridge University Press.

Yongxi Qian, V. R. (1997). Simulation and experiment of photonic band-gap structures for microstrip circuits. Asia Pacific Microwave Conference , 585-588.

Yun-Qi Fu, N.-C. Y.-H. (JANUARY de 2002). A Novel Fractal microstrip PBG Structure. Microwave and Optical Technology Letters , pp. 136-138.

APÊNDICE A – Modelo da Microlinha de Transmissão

Nesta dissertação, o modelo adotado para o projeto das linhas de microfita, suas expressões, em forma fechada, são dadas por (Pozar, 2005, pp. 144-5):

Figura 80 – Modelo de microlinha de transmissão

Para uma microlinha de transmissão construída em um substrato com constante dielétrica relativa ϵ_r , recoberta por ar, sendo t a espessura do metal, w a largura da fita da microlinha de transmissão, h é a altura do substrato, a constante dielétrica efetiva é dada aproximadamente por:

para $(w/h) \geq 1$ e $(t/w) \ll 1$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 12(h/w)}} \quad (26)$$

para $(w/h) < 1$ e $(t/w) \ll 1$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12(h/w)}} + 0,04 \left(1 - \frac{w}{h} \right)^2 \right] \quad (27)$$

A impedância característica da microlinha de transmissão segue as equações;

para $w/h \leq 1$ e $t/w \ll 1$

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \cdot \ln\left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h}\right) \quad (\Omega) \quad (28)$$

para $w/h > 1$ e $t/w \ll 1$

$$Z_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \cdot \frac{120\pi}{\frac{w}{h} + 1,393 + 0,667 \cdot \ln\left(\frac{w}{h} + 1,444\right)} \quad (29)$$

APÊNDICE B - Desenho mecânico da caixa para medida de filtros

Na Figura 81 é apresentada a caixa de teste de alumínio que foi especialmente projetada de forma a proporcionar uma sustentação ao substrato, sem causar interferência no plano de terra onde haverá uma estrutura EBG nos filtros de microlinha que serão caracterizados na faixa de micro-ondas. A largura e o comprimento da caixa foram projetados de modo a acomodar um substrato de alumina de 1 polegada por 2 polegadas. A altura da caixa, tanto do lado da face superior, como da face inferior do filtro, foi escolhida de modo a ser maior que cinco espessuras do substrato, visando garantir que a amplitude do campo magnético radiado pelo filtro no exterior da caixa fosse suficiente baixa para que objetos próximos à mesma não interferissem na resposta em frequência do filtro

Figura 81 - Caixa de teste de alumínio projetada.

APÊNDICE C - Método dos Algoritmos Genéticos de otimização

Algoritmos Genéticos ou Genetic algorithms (GA) são métodos estocásticos de buscas globais e de otimização computacional que imitam a metafórica da teoria natural da evolução (Holland, 1975). Algoritmos Genéticos operam na população de soluções potenciais aplicando o princípio de sobrevivência e de adaptação para produzir sucessivamente melhores aproximações para a solução de uma função, denominada Função Objetivo a ser otimizada. Na presente dissertação a implementação dos Algoritmos Genéticos foi feita através de rotinas computacionais comerciais para otimização de funções contidas no *Toolbox* do MATLAB descrita em detalhes em (Fleming).

Uma das vantagens da utilização de GA para a otimização de funções se deve à natureza aleatória do Algoritmo Genético, o que o coloca em um grupo conhecido com algoritmos de otimização estocásticos. A natureza aleatória aumenta as chances de se encontrar a solução global de uma função em processo de otimização. Desta maneira o GA pode ser aplicado em soluções sem restrições, e na otimização de problemas em geral sem uma solução analítica, e não requer uma função descritiva do processo que seja diferenciável ou continua.

De modo geral no método de Algoritmo Genético, assim como na seleção natural, uma nova geração de indivíduos (variáveis do problema) é criada pelo processo de selecionar indivíduos de acordo com seus respectivos níveis de adaptabilidade no domínio do problema (valor da respectiva Função Objetivo) e reproduzi-los por cruzamentos e mutações a cada iteração do algoritmo. Após diversas iterações, este processo direciona a evolução da população de indivíduos que são melhores adaptados ao ambiente que os indivíduos dos quais eles foram criados, proporcionando a evolução dos indivíduos (variáveis do problema) que estejam melhor adaptados ao ambiente (que otimizam a Função Objetivo) .

O método de Algoritmo Genético possui os seguintes passos contidos no fluxograma, ilustrado na Figura 82.

Figura 82- Fluxograma do método de Algoritmo Genético.

Cada passo do método de Algoritmo Genético consiste em uma operação computacional das variáveis da Função Objetivo a ser otimizada, estas operações serão descritas com maiores detalhes a seguir. Os passos descritos exemplificam a aplicação do método de Algoritmo Genético para um problema de entrada de variáveis binárias, como o qual foi utilizado na metodologia proposta no capítulo 5, no entanto o método não se restringe a este tipo problema e à utilização para a entrada de apenas variáveis binárias.

1. Criação

No primeiro passo, a criação da geração inicial, indivíduos são criados aleatoriamente com características distintas entre si. Este passo é implantado pela GA como a geração de um conjunto de variáveis geradas aleatoriamente, conforme exemplificado na Figura 83, onde são gerados diversos indivíduos que possuem códigos binários como variáveis, representando os genes das características de cada indivíduo. Este conjunto de variáveis iniciais é denominado como sendo a primeira geração do método de Algoritmo Genético.

Figura 83 - Exemplo de geração de indivíduos gerados pelo método de Algoritmo Genético.

2. Adaptabilidade

Cada indivíduo possui sua adaptabilidade testada pela Função Objetivo. Neste processo o código binário de cada indivíduo é utilizado como variável de entrada da Função Objetivo, sendo a sua adaptabilidade testada pelo valor de saída desta função.

3. Seleção

A adaptabilidade dos indivíduos, ou seja, os respectivos valores da Função Objetivo para as variáveis de entrada contidas no gene de cada indivíduo, é mensurada. Com este valor de adaptabilidade é feita a seleção dos indivíduos, separando os indivíduos mais adaptados, ou seja, os melhores valores para a Função Objetivo, dos menos adaptados (piores valores para a Função Objetivo).

4. Mutação

A partir da seleção dos indivíduos mais adaptados que farão parte da próxima geração, é feita uma mutação aleatória do código de alguns indivíduos a uma certa taxa de mutação. Esta mutação é definida pela mudança do gene dos indivíduos, no procedimento computacional, é definida pela mudança de estado lógico de algum *bit* que compõe o código binário do indivíduo, conforme exemplificado na Figura 84.

Figura 84 - Exemplo de mutação de um indivíduo de uma geração no método de Algoritmo Genético.

5. Cruzamento

Os indivíduos com maior adaptabilidade, com melhores valores de Função Objetivo, depois de sofrerem alguma mutação, mudança de lógica de *bit* do código binário, são cruzados entre si para formar a próxima geração de indivíduos. Este cruzamento consiste

computacionalmente no cruzamento aleatório de uma parte do código binário dos indivíduos selecionados para compor a próxima geração. A nova geração será então composta da formação do cruzamento dos códigos binários da geração passada, conforme exemplificado na Figura 85.

Figura 85 - Exemplo de cruzamento entre indivíduos de uma geração no método de Algoritmo Genético.

A otimização de uma Função Objetivo pelo do método de Algoritmo Genético, consiste na execução computacional dos passos descritos anteriormente até que certo critério de parada seja alcançado, como por exemplo, certa tolerância ao valor esperado para a Função Objetivo, o número de iterações ou tempo computacional de processamento.

É importante ressaltar que, assim como os demais métodos de otimização estocásticos para a otimização de funções sem uma solução analítica, o fim do processo de otimização determinado por algum critério de parada estabelecido, não garante que o valor encontrado para a Função Objetivo será o seu valor ótimo, uma vez que para isso seria necessária a verificação de todas as possibilidades de variáveis de entrada. Assim, o processo de otimização por métodos de otimização estocásticos consiste em utilizar as informações de resultados de interações anteriores para formular os possíveis valores das variáveis em uma próxima iteração com decisões dependentes de uma probabilidade aleatória, que através das iterações convergirá para algum resultado esperado, sendo este resultado o melhor valor da Função Objetivo obtido do esforço computacional durante o processo do método de otimização utilizado.

APÊNDICE D – Rotina Principal em MATLAB para a otimização de estruturas EBG

```
% Principal CST
%
% %% Constrained Minimization Using the Genetic Algorithm
% This is a demonstration of how to minimize an objective function subject
% to nonlinear inequality constraints and bounds using the Genetic
% Algorithm.

% Copyright 2005 The MathWorks, Inc.
% $Revision: 1.1.6.3 $ $Date: 2005/12/12 23:19:10 $

%
%GA Constrained optimization using genetic algorithm.
% X = GA(FITNESSFCN,NVARS) finds a local unconstrained minimum X to the
% FITNESSFCN using GA. NVARS is the dimension (number of design
% variables) of the FITNESSFCN. FITNESSFCN accepts a vector X of size
% 1-by-NVARS, and returns a scalar evaluated at X.

%% Programa para Otimização de estruturas EBG no CST via Tool box de GA do
MATLAB

%%
%declaração de variaveis
clear all

global nbit
global indiv
global fval_i
global bit_i
global generation
global population
global recorrente

%global B
%recorrente = [];
recorrente(80000,1) = zeros;
%recorrente(15:30) = 1;
%recorrente = [];
%bit_i = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
bit_i = [];

fval_i = [];
indiv = 0 ;

%%
%final_pop = bit_i_final;
%final_pop = bit_i(31:45,:);
```

```

%Definir tamanho do GA
population = 32;
generation = 512;

%Definir Numero de bits
nbit=100;

%%Chamar tool box de otimização
%Busca de valor minimo de variavel binaria

%Definir parametros de otimização
options = gaoptimset;

%Critério de parada
options = gaoptimset(options, 'StallGenLimit', Inf);
options = gaoptimset(options, 'StallTimeLimit', Inf);
options = gaoptimset(options, 'PopulationSize', population);
options = gaoptimset(options, 'Generations', generation );

%parametros GA
options = gaoptimset(options, 'CrossoverFcn', @crossoverarithmetic);
options = gaoptimset(options, 'PopulationType', 'bitstring');

%apresentação resultados
options = gaoptimset(options, 'PlotFcns', @gaplotbestf);

% para rodar o GA a partir da rodada anterior
%options = gaoptimset('InitialPopulation', final_pop);
%options.InitialPopulation=final_pop;

% carrega numeror aleatorios para reproduzir resultado
%rand('twister', output.randstate);
%randn('state', output.randnstate);

%chamar função de interface com CST
%[x fval exitflag output final_pop scores] = ga(@fcn_test, nbit, options);
%[x fval exitflag output final_pop scores] = ga(@rastriginsfcn, nbit,
options);

[x fval exitflag output final_pop scores] = ga(@funcao_resp_CST_2, nbit,
options);

%%

```


APÊNDICE E – Rotina de interface e gravação em MATLAB para interação como simulador eletromagnético CST

```
% Programa Principal MATLAB
%
%   Desenvolvido por MARCOS VAZ CARDOSO
%   Data: 2011/3/11
%
%
%

%%
%Função chamada pelo Tool Box GA do MATLAB
%A variável B representa o vetor de entrada da função que é o código
%binário gerado %pelo MATLAB

function Z = funcao_resp_CST(B)
D = B;

%%
%Declaração de variáveis
global nbit                %contagem do bit de cada individuo
global indiv              %contagem do numero de DNA já avaliados
global fval_i             %Valor objetivo do DNA i
global bit_i              %valor binário do DNA i
global generation         %número de gerações utilizadas na otimização
global population         %número de DNAs em uma geração
global recorrente         %DNA recorrente=1, já foi utilizado antes

%% Inicio

indiv = indiv + 1;          %Incrementar contagem de DNA avaliado

%%
%Armazenar DNA dos indivíduos, sequência binária de cada DNA gerado

bit_i (indiv,:) = D(:);

%%
%Verificação se DNA Individuo analisado já recorrente, para evitar simular
em CST circuitos idênticos mais de uma vez, assim poupar tempo
computacional.

for n=1:indiv-1
    if bit_i (indiv,:) == bit_i(n,:)

%Armazenar Função Objetivo do indivíduo que já foi analisado
    fval_i (indiv) = fval_i (n);
    recorrente (indiv,1) = 1;
    end
end
```

```

%%
%Enviar código binário do DNA gerado pelo Tool Box GA do MATLAB para o
programa CST

%Gravar código binário em arquivo Gatext.TXT
fid2=fopen('C:\Users\Marcos\Documents\MATLAB\Gatext.txt','wt');

%Separar os bits por vírgula para que o CST possa interpretá-los
for i=1:nbit
fprintf(fid2,'%i ',D(i));
fprintf(fid2,'%s ',' ');
end

fclose(fid2);

%%
%Para um individuo que não é recorrente
%Rodar Simulação eletromagnética no CST com os DNA gerado pelo Tool Box %GA
do MATLAB e obter Função Objetivo que é a resposta para o filtro de
%microlinha.

    if recorrente (indiv,1) == 0

%Abrir programa CST e arquivo com a macro para interface com o MATLAB
! "C:\Program Files\CST STUDIO SUITE 2009\CST DESIGN ENVIRONMENT.exe" -m
C:\Principal_CST_stripline_GA_fractal_8periodos_maisbits_meia_simetria_cent
ralizado_A(er615)1EBG.bas

        [A] =
textread('C:\Users\Marcos\CST2009\Interface\mydata.txt','%f',2);
        s11_max = A(1);

        %função de teste
        % s11_max = bit_i(indiv,1)+ bit_i(indiv,3)+ bit_i(indiv,4)+
bit_i(indiv,2)- bit_i(indiv,5)- bit_i(indiv,6)- bit_i(indiv,7)-
bit_i(indiv,8);

        fval_i(indiv) = s11_max;    %Armazenar Função Objetivo dos
indivíduos
    else

        % s11_max = fval_i (indiv);    não mais utilizavel
    end

%%
%Gravação da geração de DNA

fprintf(fid2,'\n');

for m=1:generation+1
if indiv == m*population

```

```

fid2=fopen('C:\Users\Marcos\Documents\MATLAB\Geration.txt','wt');

fprintf(fid2,'%s ','indiv');
fprintf(fid2,'\t\');
fprintf(fid2,'%s ','recorrente');
fprintf(fid2,'\t\t\t');
fprintf(fid2,'%s ','DNA');
fprintf(fid2,'\t\t\t\t\t');
fprintf(fid2,'%s ','FuncaoObj');
fprintf(fid2,'\n');
fprintf(fid2,'\n');

for n=1:indiv

    fprintf(fid2,'%i ',n);    %numero do individuo
    fprintf(fid2,'\t');

    fprintf(fid2,'%i ',recorrente(n,1));    %Se individuo é
recorrente
    fprintf(fid2,'\t');

    for i=1:nbit
        fprintf(fid2,'%i ',bit_i(n,i));    %DNA do individuo
        fprintf(fid2,'%s ',' ');
    end

    fprintf(fid2,'\t');
    fprintf(fid2,'%i ',fval_i(n));    %numero do individuo

    fprintf(fid2,'\n');
end

fclose(fid2);
end
end

for m=1:generation+1
    if indiv == m*population

        fid2=fopen('C:\Users\Marcos\Documents\MATLAB\bit_i.txt','wt');

        for n=1:indiv
            for i=1:nbit

                fprintf(fid2,'%i ',bit_i(n,i));    %DNA do individuo
                fprintf(fid2,'%s ',' ');

            end
            fprintf(fid2,'\n');
            end
        end

    end

end

for m=1:generation+1

```

```

    if indiv == m*population

        fid2=fopen('C:\Users\Marcos\Documents\MATLAB\fval_i.txt','wt');

        for n=1:indiv

            fprintf(fid2,'%i ',fval_i(n));    %DNA do individuo
            fprintf(fid2,'\n');
        end
    end
end

%%
%Armazenar Função Objetivo dos individuos

%%
%saida de resultado para o tool box GA
indiv
recorrente (indiv,1)
bit_i(indiv,:)
fval_i(indiv)

%Z = s11_max;
Z = fval_i (indiv);

```

APÊNDICE F - Macro do simulador eletromagnético CST para filtro de banda ultra-larga de rejeição

Programa EBG wide Band

```
#Language "WWB-COM"
```

```
Option Explicit
```

```
Sub Main
```

```
Dim A As Variant
Dim B As Variant
Dim C As Variant
Dim D As Variant
Dim E As Variant
Dim F As Variant
Dim G As Variant
Dim H As Variant
Dim I As Variant
Dim J As Variant
Dim I As Variant
Dim M As Variant
Dim N As Variant
Dim O As Variant
Dim p As Variant
Dim Q As Variant
Dim R As Variant
Dim S As Variant
Dim T As Variant
Dim U As Variant
```

```
Dim x As Double
Dim y As Double
Dim period As Double
```

```
x = 0.625
y = 0.625
period = 5
```

```
'ler código binário do arquivo txt
```

```
Open "C:\Users\Marcos\Documents\MATLAB\Gatext.txt" For Input As #1
```

```
Input #1, A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, I, M, N, O, p, Q, R, S, T, U
Debug.Print A; D; E; F; G; H; I; J; I;
```

```
'mostrar
```

```
MsgBox CStr(A)
MsgBox CStr(B)
MsgBox CStr(C)
MsgBox CStr(D)
MsgBox CStr(E)
MsgBox CStr(F)
MsgBox CStr(G)
MsgBox CStr(H)
```

```
MsgBox CStr(I)
MsgBox CStr(J)
MsgBox CStr(I)
MsgBox CStr(M)
MsgBox CStr(N)
MsgBox CStr(O)
MsgBox CStr(p)
MsgBox CStr(Q)
MsgBox CStr(R)
MsgBox CStr(S)
MsgBox CStr(T)
MsgBox CStr(U)
```

```
'Abri arquivo do circuito CST
```

```
OpenFile("C:\Users\Marcos\CST2009\Microlinha\Otimização
CST_Matlab\Duas EBG no plano de terra\Duas EBG no
GP\microlinha_transmissao_duas_ebg_gp_wide_band_1_4e5periodo
s") 'abrir arquivo CST MWS file
```

```
'Modifica estrutura EBG de circuito do CST
```

```
'Recompilar antenna Patch
```

```
With Brick
.Reset
.Name "Ground_plane"
.Component "component2"
.Material "Gold"
.Xrange "-lado_substrato/2", "lado_substrato/2"
.Yrange "-comp_substrato/2", "comp_substrato/2"
.Zrange "-h_pec/2", "h_pec/2"
.Create
End With
```

```
Solid.Add "component2:New_Ground_Plane",
"component2:Ground_plane"
```

```
'Criar estruturas para modificar plano de terra
```

```
With Brick
```

```
EBG 1
primeira linha
.Reset
.Name "bit1"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "0", "x"
.Yrange "period/2", "period/2+y"
.Zrange "-h_pec", "h_pec"
.Create
```

```

'segunda linha
.Reset
.Name "bit2"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "x", "2*x"
.Yrange "period/2", "period/2+y"
.Zrange "-h_pec", "h_pec"
.Create

.Reset
.Name "bit3"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "x", "2*x"
.Yrange "period/2+y", "period/2+2*y"
.Zrange "-h_pec", "h_pec"
.Create

Terceira linha
.Reset
.Name "bit4"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "2*x", "3*x"
.Yrange "period/2", "period/2+y"
.Zrange "-h_pec", "h_pec"
.Create

.Reset
.Name "bit5"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "2*x", "3*x"
.Yrange "period/2+y", "period/2+2*y"
.Zrange "-h_pec", "h_pec"
.Create

.Reset
.Name "bit6"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "2*x", "3*x"
.Yrange "period/2+2*y", "period/2+3*y"
.Zrange "-h_pec", "h_pec"
.Create

Quarta linha
.Reset
.Name "bit7"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "3*x", "4*x"
.Yrange "period/2", "period/2+y"
.Zrange "-h_pec", "h_pec"
.Create

.Reset
.Name "bit8"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "3*x", "4*x"
.Yrange "period/2+y", "period/2+2*y"
.Zrange "-h_pec", "h_pec"
.Create

.Reset
.Name "bit9"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "3*x", "4*x"

.Yrange "period/2+2*y", "period/2+3*y"
.Zrange "-h_pec", "h_pec"
.Create

.Reset
.Name "bit10"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "3*x", "4*x"
.Yrange "period/2+3*y", "period/2+4*y"
.Zrange "-h_pec", "h_pec"
.Create

EBG 2
primeira linha
.Reset
.Name "bit11"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "0", "x"
.Yrange "-period/2", "-period/2+y"
.Zrange "-h_pec", "h_pec"
.Create

'segunda linha
.Reset
.Name "bit12"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "x", "2*x"
.Yrange "-period/2", "-period/2+y"
.Zrange "-h_pec", "h_pec"
.Create

.Reset
.Name "bit13"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "x", "2*x"
.Yrange "-period/2+y", "-period/2+2*y"
.Zrange "-h_pec", "h_pec"
.Create

Terceira linha
.Reset
.Name "bit14"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "2*x", "3*x"
.Yrange "-period/2", "-period/2+y"
.Zrange "-h_pec", "h_pec"
.Create

.Reset
.Name "bit15"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "2*x", "3*x"
.Yrange "-period/2+y", "-period/2+2*y"
.Zrange "-h_pec", "h_pec"
.Create

.Reset
.Name "bit16"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "2*x", "3*x"
.Yrange "-period/2+2*y", "-period/2+3*y"
.Zrange "-h_pec", "h_pec"
.Create

```

```

'Quarta linha
.Reset
.Name "bit17"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "3*x", "4*x"
.Yrange "-period/2", "-period/2+y"
.Zrange "-h_pec", "h_pec"
.Create

.Reset
.Name "bit18"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "3*x", "4*x"
.Yrange "-period/2+y", "-period/2+2*y"
.Zrange "-h_pec", "h_pec"
.Create

.Reset
.Name "bit19"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "3*x", "4*x"
.Yrange "-period/2+2*y", "-period/2+3*y"
.Zrange "-h_pec", "h_pec"
.Create

.Reset
.Name "bit20"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "3*x", "4*x"
.Yrange "-period/2+3*y", "-period/2+4*y"
.Zrange "-h_pec", "h_pec"
.Create

End With

```

'Agrupar bits = 1 para correr plano de terra

'Criar referencia para agrupar bits

```

With Brick
.Reset
.Name "ref_EBG1"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "0", "0.001"
.Yrange "0", "0.001"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create

.Reset
.Name "ref_EBG2"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "0", "0.001"
.Yrange "0", "0.001"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create

```

End With

'Agrupar Bits

```

With Solid
If A = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit1"
If B = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit2"

```

```

If C = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit3"
If D = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit4"
If E = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit5"
If F = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit6"
If G = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit7"
If H = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit8"
If I = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit9"
If J = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit10"

```

Solid.Rename "component2:ref_EBG1", "oit_EBG1"

```

If l = "1" Then .add "component2:ref_EBG2",
"component2:bit11"
If M = "1" Then .add "component2:ref_EBG2",
"component2:bit12"
If N = "1" Then .add "component2:ref_EBG2",
"component2:bit13"
If O = "1" Then .add "component2:ref_EBG2",
"component2:bit14"
If p = "1" Then .add "component2:ref_EBG2",
"component2:bit15"
If Q = "1" Then .add "component2:ref_EBG2",
"component2:bit16"
If R = "1" Then .add "component2:ref_EBG2",
"component2:bit17"
If S = "1" Then .add "component2:ref_EBG2",
"component2:bit18"
If T = "1" Then .add "component2:ref_EBG2",
"component2:bit19"
If U = "1" Then .add "component2:ref_EBG2",
"component2:bit20"

```

Solid.Rename "component2:ref_EBG2", "oit_EBG2"

End With

'Deletar as estrutura com Bit = "0"

With Solid

```

If A = "0" Then .Delete "component2:bit1"
If B = "0" Then .Delete "component2:bit2"
If C = "0" Then .Delete "component2:bit3"
If D = "0" Then .Delete "component2:bit4"
If E = "0" Then .Delete "component2:bit5"
If F = "0" Then .Delete "component2:bit6"
If G = "0" Then .Delete "component2:bit7"
If H = "0" Then .Delete "component2:bit8"
If I = "0" Then .Delete "component2:bit9"
If J = "0" Then .Delete "component2:bit10"
If l = "0" Then .Delete "component2:bit11"
If M = "0" Then .Delete "component2:bit12"
If N = "0" Then .Delete "component2:bit13"
If O = "0" Then .Delete "component2:bit14"
If p = "0" Then .Delete "component2:bit15"
If Q = "0" Then .Delete "component2:bit16"
If R = "0" Then .Delete "component2:bit17"
If S = "0" Then .Delete "component2:bit18"
If T = "0" Then .Delete "component2:bit19"
If U = "0" Then .Delete "component2:bit20"

```

```

End With

' Montar EBGs apartir da oitava parte

' Montar EBG1

With Transform
    .Reset
    .Name "component2:oit_EBG1"
    .Origin "Free"
    .Center "0", "0", "0"
    .PlaneNormal "0", "1", "0"
    .MultipleObjects "True"
    .GroupObjects "False"
    .Repetitions "1"
    .MultipleSelection "False"
    .Component ""
    .Material ""
    .MirrorAdvanced
End With

With Transform
    .Reset
    .Name "component2:oit_EBG1_1"
    .Origin "Free"
    .Center "0", "0", "0"
    .Angle "0", "0", "90"
    .MultipleObjects "False"
    .GroupObjects "False"
    .Repetitions "1"
    .MultipleSelection "False"
    .RotateAdvanced
End With

With Transform
    .Reset
    .Name "component2:oit_EBG1_1"
    .Vector "-2.5", "2.5", "0"
    .UsePickedPoints "False"
    .InvertPickedPoints "False"
    .MultipleObjects "False"
    .GroupObjects "False"
    .Repetitions "1"
    .MultipleSelection "False"
    .TranslateAdvanced
End With

Solid.Add "component2:oit_EBG1", "component2:oit_EBG1_1"
Solid.Rename "component2:oit_EBG1", "qua_EBG1"

With Transform
    .Reset
    .Name "component2:qua_EBG1"
    .Origin "Free"
    .Center "0", "0", "0"
    .PlaneNormal "0", "1", "0"
    .MultipleObjects "True"
    .GroupObjects "False"
    .Repetitions "1"
    .MultipleSelection "False"
    .Component ""
    .Material ""
    .MirrorAdvanced
End With

With Transform
    .Reset
    .Name "component2:qua_EBG1_1"
    .Vector "0", "5", "0"
    .UsePickedPoints "False"

    .InvertPickedPoints "False"
    .MultipleObjects "False"
    .MultipleSelection "False"
    .MultipleObjects "False"
    .GroupObjects "False"
    .Repetitions "1"
    .MultipleSelection "False"
    .TranslateAdvanced
End With

Solid.Add "component2:qua_EBG1", "component2:qua_EBG1_1"
Solid.Rename "component2:qua_EBG1", "met_EBG1"

With Transform
    .Reset
    .Name "component2:met_EBG1"
    .Origin "Free"
    .Center "0", "0", "0"
    .PlaneNormal "1", "0", "0"
    .MultipleObjects "True"
    .GroupObjects "False"
    .Repetitions "1"
    .MultipleSelection "False"
    .Component ""
    .Material ""
    .MirrorAdvanced
End With

Solid.Add "component2:met_EBG1", "component2:met_EBG1_1"
Solid.Rename "component2:met_EBG1", "EBG1"

' Montar EBG2

With Transform
    .Reset
    .Name "component2:oit_EBG2"
    .Origin "Free"
    .Center "0", "0", "0"
    .PlaneNormal "0", "1", "0"
    .MultipleObjects "True"
    .GroupObjects "False"
    .Repetitions "1"
    .MultipleSelection "False"
    .Component ""
    .Material ""
    .MirrorAdvanced
End With

With Transform
    .Reset
    .Name "component2:oit_EBG2_1"
    .Origin "Free"
    .Center "0", "0", "0"
    .Angle "0", "0", "90"
    .MultipleObjects "False"
    .GroupObjects "False"
    .Repetitions "1"
    .MultipleSelection "False"
    .RotateAdvanced
End With

With Transform
    .Reset
    .Name "component2:oit_EBG2_1"
    .Vector "2.5", "-2.5", "0"
    .UsePickedPoints "False"
    .InvertPickedPoints "False"
    .MultipleObjects "False"

```



```

.GroupObjects "False"
.Repetitions "1"
.MultipleSelection "False"
.TranslateAdvanced
End With

Solid.Add "component2:oit_EBG2", "component2:oit_EBG2_1"
Solid.Rename "component2:oit_EBG2", "qua_EBG2"

With Transform
.Reset
.Name "component2:qua_EBG2"
.Origin "Free"
.Center "0", "0", "0"
.PlaneNormal "0", "1", "0"
.MultipleObjects "True"
.GroupObjects "False"
.Repetitions "1"
.MultipleSelection "False"
.Component ""
.Material ""
.MirrorAdvanced
End With

With Transform
.Reset
.Name "component2:qua_EBG2_1"
.Vector "0", "-5", "0"
.UsePickedPoints "False"
.InvertPickedPoints "False"
.MultipleObjects "False"
.GroupObjects "False"
.Repetitions "1"
.MultipleSelection "False"
.TranslateAdvanced
End With

Solid.Add "component2:qua_EBG2", "component2:qua_EBG2_1"
Solid.Rename "component2:qua_EBG2", "met_EBG2"

With Transform
.Reset
.Name "component2:met_EBG2"
.Origin "Free"
.Center "0", "0", "0"
.PlaneNormal "1", "0", "0"
.MultipleObjects "True"
.GroupObjects "False"
.Repetitions "1"
.MultipleSelection "False"
.Component ""
.Material ""
.MirrorAdvanced
End With

Solid.Add "component2:met_EBG2", "component2:met_EBG2_1"
Solid.Rename "component2:met_EBG2", "EBG2"

'reproduzir EBGs aolongo da microlinha

With Transform
.Reset
.Name "component2:EBG2"
.Vector "0", "period/2", "0"
.UsePickedPoints "False"
.InvertPickedPoints "False"
.MultipleObjects "True"
.GroupObjects "False"
.Repetitions "1"
.MultipleSelection "False"
.Component ""
.Material ""
.TranslateAdvanced

.Vector "0", "4*period", "0"
.TranslateAdvanced
.Vector "0", "6*period", "0"
.TranslateAdvanced
.Vector "0", "-2*period", "0"
.TranslateAdvanced
.Vector "0", "-4*period", "0"
.TranslateAdvanced
.Vector "0", "-6*period", "0"
.TranslateAdvanced
.Vector "0", "-8*period", "0"
.TranslateAdvanced
End With

With Transform
.Reset
.Name "component2:EBG2"
.Vector "0", "2*period", "0"
.UsePickedPoints "False"
.InvertPickedPoints "False"
.MultipleObjects "True"
.GroupObjects "False"
.Repetitions "1"
.MultipleSelection "False"
.Component ""
.Material ""
.TranslateAdvanced

.Vector "0", "4*period", "0"
.TranslateAdvanced
.Vector "0", "6*period", "0"
.TranslateAdvanced
.Vector "0", "8*period", "0"
.TranslateAdvanced
.Vector "0", "-2*period", "0"

```

```

.TranslateAdvanced
.Vector "0", "-4*period", "0"
.TranslateAdvanced
.Vector "0", "-6*period", "0"
.TranslateAdvanced
End With

'Unir todosos EBGs

Solid.Add "component2:EBG1", "component2:EBG1_1"
Solid.Add "component2:EBG1", "component2:EBG1_2"
Solid.Add "component2:EBG1", "component2:EBG1_3"
Solid.Add "component2:EBG1", "component2:EBG1_4"
'Solid.Add "component2:EBG1", "component2:EBG1_5"
'Solid.Add "component2:EBG1", "component2:EBG1_6"
'Solid.Add "component2:EBG1", "component2:EBG1_7"

Solid.Add "component2:EBG2", "component2:EBG2_1"
Solid.Add "component2:EBG2", "component2:EBG2_2"
Solid.Add "component2:EBG2", "component2:EBG2_3"
Solid.Add "component2:EBG2", "component2:EBG2_4"
'Solid.Add "component2:EBG2", "component2:EBG2_5"
'Solid.Add "component2:EBG2", "component2:EBG2_6"
'Solid.Add "component2:EBG2", "component2:EBG2_7"

With Solid
.Version 9
.Add "component2:EBG1", "component2:EBG2"
End With

Solid.Rename "component2:EBG1", "EBG"

'Corroer EBGs do plano de terra

With Solid
.Version 9
.Subtract "component2:New_Ground_Plane", "component2:EBG"
End With

'-----
'Simular arquivo CST

'Ajustar frequencia de interesse
Dim fmin As Double, fmax As Double, f3 As Double, f4 As Double, f5
As Double
Dim f6 As Double, f7 As Double, f8 As Double, f9 As Double, f10 As
Double
Dim f11 As Double, f12 As Double, f13 As Double, f14 As Double
Dim f15 As Double, f16 As Double, f17 As Double, f18 As Double, f19
As Double
Dim f20 As Double, f21 As Double, f22 As Double
Dim f0 As Double, f1 As Double, f2 As Double
Dim f23 As Double, f24 As Double, f25 As Double
Dim f26 As Double, f27 As Double, f28 As Double
Dim f29 As Double, f30 As Double

Dim func As Double

fmin = 0
fmax = 20

f0 = 1
f1 = 2
f2 = 3
f3 = 6

f4 = 6.5
f5 = 7
f6 = 7.5
f7 = 8
f8 = 8.5
f9 = 9
f10 = 9.5
f11 = 10
f12 = 10.5
f13 = 10.5
f14 = 11
f15 = 12
f16 = 12.5
f17 = 13
f18 = 13.5
f19 = 14
f20 = 15
f21 = 15.5
f22 = 16
f23 = 16.5
f24 = 17
f25 = 17.5
f26 = 18
f27 = 18.5
f28 = 19
f29 = 19.5
f30 = 20

With Solver
.FrequencyRange (fmin, fmax)
End With

'Solver.Start /iniciar Transient Solver
'Save 'salvar resultado e retornar controle
para o matlab

'-----
'Determinar parametros S11 e S22 para uma dada frequencia

Dim maxr As Double

Dim s11_max_0 As Double
Dim s11_max_1 As Double
Dim s11_max_2 As Double
Dim s11_max_3 As Double
Dim s11_max_4 As Double
Dim s11_max_5 As Double
Dim s11_max_6 As Double
Dim s11_max_7 As Double
Dim s11_max_8 As Double
Dim s11_max_9 As Double
Dim s11_max_10 As Double
Dim s11_max_11 As Double
Dim s11_max_12 As Double
Dim s11_max_13 As Double
Dim s11_max_14 As Double
Dim s11_max_15 As Double
Dim s11_max_16 As Double
Dim s11_max_17 As Double
Dim s11_max_18 As Double
Dim s11_max_19 As Double
Dim s11_max_20 As Double
Dim s11_max_21 As Double
Dim s11_max_22 As Double
Dim s11_max_23 As Double
Dim s11_max_24 As Double
Dim s11_max_25 As Double

```

```

Dim s11_max_26 As Double
Dim s11_max_27 As Double
Dim s11_max_28 As Double
Dim s11_max_29 As Double
Dim s11_max_30 As Double

Dim saida As Double

Dim s11 As Object

Set s11 = Result1D("d2(1)1(1)")      'S11 em dB

s11_max_0 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f0))
s11_max_1 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f1)) + s11_max_0
s11_max_2 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f2)) + s11_max_1
s11_max_3 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f3)) + s11_max_2
s11_max_4 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f4)) +
s11_max_3
s11_max_5 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f5)) +
s11_max_4 * (10)
s11_max_6 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f6)) +
s11_max_5
s11_max_7 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f7)) +
s11_max_6
s11_max_8 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f8))
s11_max_9 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f9)) +
s11_max_8
s11_max_10 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f10))
+ s11_max_9
s11_max_11 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f11))
+ s11_max_10
s11_max_12 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f12))
+ s11_max_11
s11_max_13 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f13))
+ s11_max_12
s11_max_14 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f14))
+ s11_max_13
s11_max_15 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f15))
+ s11_max_14
s11_max_16 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f16))
+ s11_max_15
s11_max_17 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f17))
+ s11_max_16
s11_max_18 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f18))
+ s11_max_17
s11_max_19 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f19))
+ s11_max_18 * (10)
s11_max_20 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f20))
+ s11_max_19
s11_max_21 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f21))
+ s11_max_20
s11_max_22 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f22))
+ s11_max_21
s11_max_23 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f23))
+ s11_max_22 * (10)
s11_max_24 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f24))
+ s11_max_23

s11_max_25 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f25))
+ s11_max_24
s11_max_26 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f26))
+ s11_max_25
s11_max_27 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f27))
+ s11_max_26
s11_max_28 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f28))
+ s11_max_27
s11_max_29 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f29))
+ s11_max_28
s11_max_30 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(f30))
+ s11_max_29

'MsgBox CStr(s11_max)      'converter o
argumento em uma variavel tipo Stringo e mostrar em caixa
de mensagem

'-----
'-----
'Calcular Função Objetivo

saida = s11_max_30 - 100*(s11_max_7)

'MsgBox CStr(saida)      'converter o
argumento em uma variavel tipo Stringo e mostrar em caixa
de mensagem

'-----
'-----
'Escrever o resultado em um arquivo TXT

Open "C:\Users\Marcos\CST2009\Interface\mydata.txt" For
Output As #2
    Print #2, CStr(saida)
    'escrever a Maxima Perda de Retorno
Close #2

'Open "C:\Users\Marcos\CST2009\Interface\mydata.txt" For
Output As #1
    '    Print #1, CStr(func_obj)
    'escrever a Maxima Perda de Retorno
'Close #1

End Sub

```

APÊNDICE G - Macro do simulador eletromagnético CST para filtro de dupla-banda de rejeição

Programa EBG Dual Band

#Language "WWB-COM"

Option Explicit

Sub Main

Dim A As Variant
Dim B As Variant
Dim C As Variant
Dim D As Variant
Dim E As Variant
Dim F As Variant
Dim G As Variant
Dim H As Variant
Dim I As Variant
Dim J As Variant
Dim A1 As Variant
Dim B1 As Variant
Dim C1 As Variant
Dim D1 As Variant
Dim E1 As Variant
Dim F1 As Variant
Dim G1 As Variant
Dim H1 As Variant
Dim I1 As Variant
Dim J1 As Variant
Dim A2 As Variant
Dim B2 As Variant
Dim C2 As Variant
Dim D2 As Variant
Dim E2 As Variant
Dim F2 As Variant
Dim G2 As Variant
Dim H2 As Variant
Dim I2 As Variant
Dim J2 As Variant
Dim A3 As Variant
Dim B3 As Variant
Dim C3 As Variant
Dim D3 As Variant
Dim E3 As Variant
Dim F3 As Variant
Dim G3 As Variant
Dim H3 As Variant
Dim I3 As Variant
Dim J3 As Variant
Dim A4 As Variant
Dim B4 As Variant
Dim C4 As Variant
Dim D4 As Variant
Dim E4 As Variant
Dim F4 As Variant
Dim G4 As Variant
Dim H4 As Variant
Dim I4 As Variant
Dim J4 As Variant
Dim A5 As Variant
Dim B5 As Variant
Dim C5 As Variant

Dim D5 As Variant
Dim E5 As Variant
Dim F5 As Variant
Dim G5 As Variant
Dim H5 As Variant
Dim I5 As Variant
Dim J5 As Variant
Dim A6 As Variant
Dim B6 As Variant
Dim C6 As Variant
Dim D6 As Variant
Dim E6 As Variant
Dim F6 As Variant
Dim G6 As Variant
Dim H6 As Variant
Dim I6 As Variant
Dim J6 As Variant
Dim A7 As Variant
Dim B7 As Variant
Dim C7 As Variant
Dim D7 As Variant
Dim E7 As Variant
Dim F7 As Variant
Dim G7 As Variant
Dim H7 As Variant
Dim I7 As Variant
Dim J7 As Variant
Dim A8 As Variant
Dim B8 As Variant
Dim C8 As Variant
Dim D8 As Variant
Dim E8 As Variant
Dim F8 As Variant
Dim G8 As Variant
Dim H8 As Variant
Dim I8 As Variant
Dim J8 As Variant
Dim A9 As Variant
Dim B9 As Variant
Dim C9 As Variant
Dim D9 As Variant
Dim E9 As Variant
Dim F9 As Variant
Dim G9 As Variant
Dim H9 As Variant
Dim I9 As Variant
Dim J9 As Variant

Dim x As Double
Dim y As Double
Dim period As Double

x = 0.51
y = 2*0.51
period = 21.3

'-----

'ler codigo binario do aquiuvo txt

Open "C:\Users\Marcos\Documents\MATLAB\Gatext.txt" For Input As #1

```
Input
#1,A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,A1,B1,C1,D1,E1,F1,G1,H1,I1,J1,A2,B2,C2,D2,
E2,F2,G2,H2,I2,J2,A3,B3,C3,D3,E3,F3,G3,H3,I3,J3,A4,B4,C4,D4,E4,
F4,G4,H4,I4,J4,A5,B5,C5,D5,E5,F5,G5,H5,I5,J5,A6,B6,C6,D6,E6,F6,
G6,H6,I6,J6,A7,B7,C7,D7,E7,F7,G7,H7,I7,J7,A8,B8,C8,D8,E8,F8,G8,
H8,I8,J8,A9,B9,C9,D9,E9,F9,G9,H9,I9,J9
Debug.Print A;D;E;F;G;H;
```

'mostrar

```
'MsgBox CStr(A)
'MsgBox CStr(B)
'MsgBox CStr(C)
'MsgBox CStr(D)
'MsgBox CStr(E)
'MsgBox CStr(F)
'MsgBox CStr(G)
'MsgBox CStr(H)
'MsgBox CStr(I)
'MsgBox CStr(J)
```

'Abri arquivo do circuito CST

```
OpenFile("C:\Users\Marcos\CST2009\Microlinha\Otimização
CST_Matlab\EBG Fractal no
GP\microlinha_transmissao_ga_fractal_8periodos_maisbits_meia_sim
etria_centralizado_A(er615)") 'abrir arquivo CST MWS
file
```

'Modifica estrutura EBG de circuito do CST

'Recompor substrato

```
With Brick
.Reset
.Name "Ground_Plane"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "-lado_substrato/2", "lado_substrato/2"
.Yrange "-comp_substrato/2", "comp_substrato/2"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
End With
```

```
Solid.Add "component2:New_Ground_Plane",
"component2:Ground_Plane"
```

'Criar estruturas para modificar plano de terra

With Brick

```
'EBG 1
'primeira linha
.Reset
.Name "bit1"
```

```
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "0", "x"
.Yrange "period/2", "period/2+y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit2"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "0", "x"
.Yrange "period/2+1*y", "period/2+2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit3"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "0", "x"
.Yrange "period/2+2*y", "period/2+3*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit4"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "0", "x"
.Yrange "period/2+3*y", "period/2+4*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit5"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "0", "x"
.Yrange "period/2+4*y", "period/2+5*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit6"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "0", "x"
.Yrange "period/2-0*y", "period/2-2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit7"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "0", "x"
.Yrange "period/2-1*y", "period/2-2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit8"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "0", "x"
.Yrange "period/2-2*y", "period/2-3*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit9"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "0", "x"
.Yrange "period/2-3*y", "period/2-4*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit10"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "0", "x"
.Yrange "period/2-4*y", "period/2-5*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

'segunda linha

```
.Reset
.Name "bit11"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "x", "2*x"
.Yrange "period/2", "period/2+y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit12"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "x", "2*x"
.Yrange "period/2+1*y", "period/2+2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit13"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "x", "2*x"
.Yrange "period/2+2*y", "period/2+3*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit14"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "x", "2*x"
.Yrange "period/2+3*y", "period/2+4*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit15"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "x", "2*x"
.Yrange "period/2+4*y", "period/2+5*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
```

```
.Name "bit16"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "x", "2*x"
.Yrange "period/2-0*y", "period/2-2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit17"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "x", "2*x"
.Yrange "period/2-1*y", "period/2-2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit18"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "x", "2*x"
.Yrange "period/2-2*y", "period/2-3*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit19"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "x", "2*x"
.Yrange "period/2-3*y", "period/2-4*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit20"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "x", "2*x"
.Yrange "period/2-4*y", "period/2-5*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

'terceira linha

```
.Reset
.Name "bit21"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "2*x", "3*x"
.Yrange "period/2", "period/2+y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit22"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "2*x", "3*x"
.Yrange "period/2+1*y", "period/2+2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit23"
.Component "component2"
.Material "PEC"
```

```
.Xrange "2*x", "3*x"
.Yrange "period/2+2*y", "period/2+3*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit24"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "2*x", "3*x"
.Yrange "period/2+3*y", "period/2+4*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit25"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "2*x", "3*x"
.Yrange "period/2+4*y", "period/2+5*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit26"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "2*x", "3*x"
.Yrange "period/2-0*y", "period/2-2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit27"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "2*x", "3*x"
.Yrange "period/2-1*y", "period/2-2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit28"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "2*x", "3*x"
.Yrange "period/2-2*y", "period/2-3*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit29"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "2*x", "3*x"
.Yrange "period/2-3*y", "period/2-4*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit30"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "2*x", "3*x"
.Yrange "period/2-4*y", "period/2-5*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

'quarta linha

```
.Reset
.Name "bit31"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "3*x", "4*x"
.Yrange "period/2", "period/2+y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit32"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "3*x", "4*x"
.Yrange "period/2+1*y", "period/2+2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit33"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "3*x", "4*x"
.Yrange "period/2+2*y", "period/2+3*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit34"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "3*x", "4*x"
.Yrange "period/2+3*y", "period/2+4*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit35"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "3*x", "4*x"
.Yrange "period/2+4*y", "period/2+5*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit36"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "3*x", "4*x"
.Yrange "period/2-0*y", "period/2-2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit37"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "3*x", "4*x"
.Yrange "period/2-1*y", "period/2-2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit38"
```

```
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "3*x", "4*x"
.Yrange "period/2-2*y", "period/2-3*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit39"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "3*x", "4*x"
.Yrange "period/2-3*y", "period/2-4*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit40"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "3*x", "4*x"
.Yrange "period/2-4*y", "period/2-5*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

'quinta linha

```
.Reset
.Name "bit41"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "4*x", "5*x"
.Yrange "period/2", "period/2+y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit42"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "4*x", "5*x"
.Yrange "period/2+1*y", "period/2+2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit43"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "4*x", "5*x"
.Yrange "period/2+2*y", "period/2+3*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit44"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "4*x", "5*x"
.Yrange "period/2+3*y", "period/2+4*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit45"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "4*x", "5*x"
```

```
.Yrange "period/2+4*y", "period/2+5*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit46"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "4*x", "5*x"
.Yrange "period/2-0*y", "period/2-2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit47"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "4*x", "5*x"
.Yrange "period/2-1*y", "period/2-2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit48"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "4*x", "5*x"
.Yrange "period/2-2*y", "period/2-3*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit49"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "4*x", "5*x"
.Yrange "period/2-3*y", "period/2-4*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit50"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "4*x", "5*x"
.Yrange "period/2-4*y", "period/2-5*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

'sexta linha

```
.Reset
.Name "bit51"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "5*x", "6*x"
.Yrange "period/2", "period/2+y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit52"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "5*x", "6*x"
.Yrange "period/2+1*y", "period/2+2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```



```
.Reset
.Name "bit53"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "5*x", "6*x"
.Yrange "period/2+2*y", "period/2+3*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit54"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "5*x", "6*x"
.Yrange "period/2+3*y", "period/2+4*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit55"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "5*x", "6*x"
.Yrange "period/2+4*y", "period/2+5*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit56"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "5*x", "6*x"
.Yrange "period/2-0*y", "period/2-2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit57"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "5*x", "6*x"
.Yrange "period/2-1*y", "period/2-2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit58"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "5*x", "6*x"
.Yrange "period/2-2*y", "period/2-3*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit59"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "5*x", "6*x"
.Yrange "period/2-3*y", "period/2-4*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit60"
.Component "component2"
.Material "PEC"
```

```
.Xrange "5*x", "6*x"
.Yrange "period/2-4*y", "period/2-5*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

'setima linha

```
.Reset
.Name "bit61"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "6*x", "7*x"
.Yrange "period/2", "period/2+y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit62"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "6*x", "7*x"
.Yrange "period/2+1*y", "period/2+2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit63"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "6*x", "7*x"
.Yrange "period/2+2*y", "period/2+3*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit64"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "6*x", "7*x"
.Yrange "period/2+3*y", "period/2+4*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit65"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "6*x", "7*x"
.Yrange "period/2+4*y", "period/2+5*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit66"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "6*x", "7*x"
.Yrange "period/2-0*y", "period/2-2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit67"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "6*x", "7*x"
.Yrange "period/2-1*y", "period/2-2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit68"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "6*x", "7*x"
.Yrange "period/2-2*y", "period/2-3*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit69"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "6*x", "7*x"
.Yrange "period/2-3*y", "period/2-4*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit70"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "6*x", "7*x"
.Yrange "period/2-4*y", "period/2-5*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

'oitava linha

```
.Reset
.Name "bit71"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "7*x", "8*x"
.Yrange "period/2", "period/2+y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit72"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "7*x", "8*x"
.Yrange "period/2+1*y", "period/2+2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit73"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "7*x", "8*x"
.Yrange "period/2+2*y", "period/2+3*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit74"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "7*x", "8*x"
.Yrange "period/2+3*y", "period/2+4*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
```

```
.Name "bit75"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "7*x", "8*x"
.Yrange "period/2+4*y", "period/2+5*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit76"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "7*x", "8*x"
.Yrange "period/2-0*y", "period/2-2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit77"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "7*x", "8*x"
.Yrange "period/2-1*y", "period/2-2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit78"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "7*x", "8*x"
.Yrange "period/2-2*y", "period/2-3*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit79"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "7*x", "8*x"
.Yrange "period/2-3*y", "period/2-4*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit80"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "7*x", "8*x"
.Yrange "period/2-4*y", "period/2-5*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

'nona linha

```
.Reset
.Name "bit81"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "8*x", "9*x"
.Yrange "period/2", "period/2+y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit82"
.Component "component2"
.Material "PEC"
```

```
.Xrange "8*x", "9*x"
.Yrange "period/2+1*y", "period/2+2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit83"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "8*x", "9*x"
.Yrange "period/2+2*y", "period/2+3*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit84"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "8*x", "9*x"
.Yrange "period/2+3*y", "period/2+4*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit85"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "8*x", "9*x"
.Yrange "period/2+4*y", "period/2+5*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit86"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "8*x", "9*x"
.Yrange "period/2-0*y", "period/2-2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit87"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "8*x", "9*x"
.Yrange "period/2-1*y", "period/2-2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit88"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "8*x", "9*x"
.Yrange "period/2-2*y", "period/2-3*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit89"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "8*x", "9*x"
.Yrange "period/2-3*y", "period/2-4*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit90"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "8*x", "9*x"
.Yrange "period/2-4*y", "period/2-5*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

'decima linha

```
.Reset
.Name "bit91"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "9*x", "10*x"
.Yrange "period/2", "period/2+y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit92"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "9*x", "10*x"
.Yrange "period/2+1*y", "period/2+2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit93"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "9*x", "10*x"
.Yrange "period/2+2*y", "period/2+3*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit94"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "9*x", "10*x"
.Yrange "period/2+3*y", "period/2+4*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit95"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "9*x", "10*x"
.Yrange "period/2+4*y", "period/2+5*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit96"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "9*x", "10*x"
.Yrange "period/2-0*y", "period/2-2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create
```

```
.Reset
.Name "bit97"
.Component "component2"
.Material "PEC"
```

```

.Xrange "9"x, "10"x"
.Yrange "period/2-1*y", "period/2-2*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create

.Reset
.Name "bit98"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "9"x, "10"x"
.Yrange "period/2-2*y", "period/2-3*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create

.Reset
.Name "bit99"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "9"x, "10"x"
.Yrange "period/2-3*y", "period/2-4*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create

.Reset
.Name "bit100"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "9"x, "10"x"
.Yrange "period/2-4*y", "period/2-5*y"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create

End With

'Agrupar bits = 1 para correr plano de terra

'Criar referencia para agrupar bits

With Brick
.Reset
.Name "ref_EBG1"
.Component "component2"
.Material "PEC"
.Xrange "0", "0.001"
.Yrange "0", "0.001"
.Zrange "-h_pec", "0"
.Create

End With

'Agrupar Bits
With Solid
If A = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit1"
If B = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit2"
If C = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit3"
If D = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit4"
If E = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit5"

If F = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit6"
If G = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit7"
If H = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit8"
If I = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit9"
If J = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit10"

If A1 = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit11"
If B1 = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit12"
If C1 = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit13"
If D1 = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit14"
If E1 = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit15"
If F1 = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit16"
If G1 = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit17"
If H1 = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit18"
If I1 = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit19"
If J1 = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit20"

If A2 = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit21"
If B2 = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit22"
If C2 = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit23"
If D2 = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit24"
If E2 = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit25"
If F2 = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit26"
If G2 = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit27"
If H2 = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit28"
If I2 = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit29"
If J2 = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit30"

If A3 = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit31"
If B3 = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit32"
If C3 = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit33"
If D3 = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit34"
If E3 = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit35"
If F3 = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit36"
If G3 = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit37"
If H3 = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit38"
If I3 = "1" Then .add "component2:ref_EBG1",
"component2:bit39"

```



```

If A = "0" Then .Delete "component2:bit1"
If B = "0" Then .Delete "component2:bit2"
If C = "0" Then .Delete "component2:bit3"
If D = "0" Then .Delete "component2:bit4"
If E = "0" Then .Delete "component2:bit5"
If F = "0" Then .Delete "component2:bit6"
If G = "0" Then .Delete "component2:bit7"
If H = "0" Then .Delete "component2:bit8"
If I = "0" Then .Delete "component2:bit9"
If J = "0" Then .Delete "component2:bit10"

If A1 = "0" Then .Delete "component2:bit11"
If B1 = "0" Then .Delete "component2:bit12"
If C1 = "0" Then .Delete "component2:bit13"
If D1 = "0" Then .Delete "component2:bit14"
If E1 = "0" Then .Delete "component2:bit15"
If F1 = "0" Then .Delete "component2:bit16"
If G1 = "0" Then .Delete "component2:bit17"
If H1 = "0" Then .Delete "component2:bit18"
If I1 = "0" Then .Delete "component2:bit19"
If J1 = "0" Then .Delete "component2:bit20"

If A2 = "0" Then .Delete "component2:bit21"
If B2 = "0" Then .Delete "component2:bit22"
If C2 = "0" Then .Delete "component2:bit23"
If D2 = "0" Then .Delete "component2:bit24"
If E2 = "0" Then .Delete "component2:bit25"
If F2 = "0" Then .Delete "component2:bit26"
If G2 = "0" Then .Delete "component2:bit27"
If H2 = "0" Then .Delete "component2:bit28"
If I2 = "0" Then .Delete "component2:bit29"
If J2 = "0" Then .Delete "component2:bit30"

If A3 = "0" Then .Delete "component2:bit31"
If B3 = "0" Then .Delete "component2:bit32"
If C3 = "0" Then .Delete "component2:bit33"
If D3 = "0" Then .Delete "component2:bit34"
If E3 = "0" Then .Delete "component2:bit35"
If F3 = "0" Then .Delete "component2:bit36"
If G3 = "0" Then .Delete "component2:bit37"
If H3 = "0" Then .Delete "component2:bit38"
If I3 = "0" Then .Delete "component2:bit39"
If J3 = "0" Then .Delete "component2:bit40"

If A4 = "0" Then .Delete "component2:bit41"
If B4 = "0" Then .Delete "component2:bit42"
If C4 = "0" Then .Delete "component2:bit43"
If D4 = "0" Then .Delete "component2:bit44"
If E4 = "0" Then .Delete "component2:bit45"
If F4 = "0" Then .Delete "component2:bit46"
If G4 = "0" Then .Delete "component2:bit47"
If H4 = "0" Then .Delete "component2:bit48"
If I4 = "0" Then .Delete "component2:bit49"
If J4 = "0" Then .Delete "component2:bit50"

If A5 = "0" Then .Delete "component2:bit51"
If B5 = "0" Then .Delete "component2:bit52"
If C5 = "0" Then .Delete "component2:bit53"
If D5 = "0" Then .Delete "component2:bit54"
If E5 = "0" Then .Delete "component2:bit55"
If F5 = "0" Then .Delete "component2:bit56"
If G5 = "0" Then .Delete "component2:bit57"
If H5 = "0" Then .Delete "component2:bit58"
If I5 = "0" Then .Delete "component2:bit59"
If J5 = "0" Then .Delete "component2:bit60"

If A6 = "0" Then .Delete "component2:bit61"
If B6 = "0" Then .Delete "component2:bit62"
If C6 = "0" Then .Delete "component2:bit63"

```

```

If D6 = "0" Then .Delete "component2:bit64"
If E6 = "0" Then .Delete "component2:bit65"
If F6 = "0" Then .Delete "component2:bit66"
If G6 = "0" Then .Delete "component2:bit67"
If H6 = "0" Then .Delete "component2:bit68"
If I6 = "0" Then .Delete "component2:bit69"
If J6 = "0" Then .Delete "component2:bit70"

If A7 = "0" Then .Delete "component2:bit71"
If B7 = "0" Then .Delete "component2:bit72"
If C7 = "0" Then .Delete "component2:bit73"
If D7 = "0" Then .Delete "component2:bit74"
If E7 = "0" Then .Delete "component2:bit75"
If F7 = "0" Then .Delete "component2:bit76"
If G7 = "0" Then .Delete "component2:bit77"
If H7 = "0" Then .Delete "component2:bit78"
If I7 = "0" Then .Delete "component2:bit79"
If J7 = "0" Then .Delete "component2:bit80"

If A8 = "0" Then .Delete "component2:bit81"
If B8 = "0" Then .Delete "component2:bit82"
If C8 = "0" Then .Delete "component2:bit83"
If D8 = "0" Then .Delete "component2:bit84"
If E8 = "0" Then .Delete "component2:bit85"
If F8 = "0" Then .Delete "component2:bit86"
If G8 = "0" Then .Delete "component2:bit87"
If H8 = "0" Then .Delete "component2:bit88"
If I8 = "0" Then .Delete "component2:bit89"
If J8 = "0" Then .Delete "component2:bit90"

If A9 = "0" Then .Delete "component2:bit91"
If B9 = "0" Then .Delete "component2:bit92"
If C9 = "0" Then .Delete "component2:bit93"
If D9 = "0" Then .Delete "component2:bit94"
If E9 = "0" Then .Delete "component2:bit95"
If F9 = "0" Then .Delete "component2:bit96"
If G9 = "0" Then .Delete "component2:bit97"
If H9 = "0" Then .Delete "component2:bit98"
If I9 = "0" Then .Delete "component2:bit99"
If J9 = "0" Then .Delete "component2:bit100"

```

End With

'formar EBG a partir do meio EBG inicial

With Transform

```

.Reset
.Name "component2:qua_EBG1"
.Origin "Free"
.Center "0", "0", "0"
.PlaneNormal "1", "0", "0"
.MultipleObjects "True"
.GroupObjects "False"
.Repetitions "1"
.MultipleSelection "False"
.Component ""
.Material ""
.MirrorAdvanced

```

End With

With Solid

```

.Version 9
.Add "component2:qua_EBG1_1", "component2:qua_EBG1"

```

End With

Solid.Rename "component2:qua_EBG1_1", "EBG1"

'reproduzir EBG aolongo da microlinha

With Transform

```
.Reset
.Name "component2:EBG1"
.Vector "0", "-1*period/2", "0"
.UsePickedPoints "False"
.InvertPickedPoints "False"
.MultipleObjects "False"
.GroupObjects "False"
.Repetitions "1"
.MultipleSelection "False"
.Component ""
.Material ""
.TranslateAdvanced
```

```
.Name "component2:EBG1"
.Vector "0", "period", "0"
.UsePickedPoints "False"
.InvertPickedPoints "False"
.MultipleObjects "True"
.GroupObjects "False"
.Repetitions "1"
.MultipleSelection "False"
.Component ""
.Material ""
.TranslateAdvanced
```

```
.Vector "0", "2*period", "0"
.TranslateAdvanced
.Vector "0", "-1*period", "0"
.TranslateAdvanced
.Vector "0", "-2*period", "0"
.TranslateAdvanced
.Vector "0", "-3*period", "0"
.TranslateAdvanced
```

End With

'Unir todosos EBGs

```
Solid.Add "component2:EBG1", "component2:EBG1_1"
Solid.Add "component2:EBG1", "component2:EBG1_2"
Solid.Add "component2:EBG1", "component2:EBG1_3"
Solid.Add "component2:EBG1", "component2:EBG1_4"
Solid.Add "component2:EBG1", "component2:EBG1_5"
```

'corroer plano de terra

With Solid

```
.Version 9
.Subtract "component2:New_Ground_Plane", "component2:EBG1"
```

End With

'MsgBox CStr(A)

'Simular arquivo CST

'Ajustar frequencia de interesse

Dim fmin As Double

Dim fmax As Double

Dim Fm1 As Double

Dim Fm2 As Double

Dim Fm3 As Double

Dim Fm4 As Double

Dim Fm5 As Double

Dim Fm6 As Double

Dim Fm7 As Double

Dim Fm8 As Double

fmin = 0

fmax = 10

Fm1 = 2.0

Fm2 = 2.5

Fm3 = 6.0

Fm4 = 10.0

Fm5 = 1.0

Fm6 = 4.75

Fm7 = 7.25

Fm8 = 9.0

With Solver

.FrequencyRange (fmin, fmax)

End With

'Solver.Start /iniciar Transient Solver

'Save 'salvar resultado e retornar controle
para o matlab

'-----
'Determinar parametros S11 e S22 para uma dada frequencia

Dim maxr As Double

Dim s11_max_1 As Double

Dim s11_max_2 As Double

Dim s11_max_3 As Double

Dim s11_max_4 As Double

Dim s11_max_5 As Double

Dim s11_max_6 As Double

Dim s11_max_7 As Double

Dim s11_max_8 As Double

Dim s11 As Object

Set s11 = Result1D("d2(1)1(1)") 'S11 em dB

s11_max_1 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(Fm1))

s11_max_2 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(Fm2))

s11_max_3 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(Fm3))

s11_max_4 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(Fm4))

s11_max_5 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(Fm5))

s11_max_6 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(Fm6))

s11_max_7 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(Fm7))

s11_max_8 = s11.GetY(s11.GetClosestIndexFromX(Fm8))

'-----
'Calcular Função Objetivo

Dim func_obj As Double

func_obj = (2*s11_max_2 + s11_max_3 + s11_max_4) -
1000*(2*s11_max_5 + 2*s11_max_6 + s11_max_7 + s11_max_8)

```
'MsgBox CStr(func_obj)          'converter o argumento
em uma variavel tipo String e mostrar em caixa de mensagem

'-----
'Escrever o resultado em um arquivo TXT

'Close #1

End Sub

Open "C:\Users\Marcos\CST2009\Interface\mydata.txt" For Output As
#2
    Print #2, CStr(func_obj)
    'escrever a Maxima Perda de Retorno
Close #2

'Open "C:\Users\Marcos\CST2009\Interface\mydata.txt" For Output As
#1
'    Print #1, CStr(func_obj)
'    'escrever a Maxima Perda de Retorno
```


APÊNDICE H – Artigo submetido para publicação em revista

A lowpass filter with ultra-wide stopband using two simultaneous EBG structures

Marcos Vaz Cardoso
Escola Politécnica
Universidade de São Paulo
São Paulo, Brazil
mcardoso@lme.usp.br

Fatima Salete Correra
Escola Politécnica
Universidade de São Paulo
São Paulo, Brazil
fcorrera@lme.usp.br

Abstract—This paper presents a novel microstrip filter topology that associates two 1-D Electromagnetic Bandgap (EBG) structures in parallel to generate a low pass frequency response with an ultra-wide stopband. The two EBG structures used are a periodic pattern of circular holes etched in the ground plane and a microstrip line with a periodic variation of its width. The two EBGs structures were designed to produce a wider stopband than the classical simple EBG structure due to the superposition of their effects when simultaneously associated in a microstrip line. As a proof of concept, the proposed EBG structures were applied to the design of a filter on Alumina substrate that demonstrates an ultra-wide stopband of 11 GHz centered at 11.5 GHz and high magnitude of rejection. Results from full wave simulations and measurements were in very good agreement.

Keywords: *electromagnetic bandgap; lowpass filter; microstrip line; wide stopband.*

I. INTRODUCTION

The stopband of the EBG structures consists of the blockage of traveling electromagnetic waves due to the periodic change on the dielectric coefficient of the path material. The study of such effect was first initiated on late 80's, describing the phenomenon on waves in optical regime [1], and was stated as photonic band-gap (PBG). Later on, the concept was scaled to the wide range of the electromagnetic spectrum and many research groups developed and applied it in planar structures for microwave and millimeter-wave frequencies. So the term PBG was expanded to a new term, known as electromagnetic Bandgap (EBG), with a wider definition regardless the band frequency of the electromagnetic spectrum.

One of the advantageous aspects of the EBG structures for microwave purposes is its extremely simple implementation and effective ability to generate a stopband. Particularly in planar circuits, one-dimensional and bi-dimensional EBG structures for microstrip lines have been

proposed in the last years. The most common applications are in bandstop filters with dual or wide stopband, and in patch antennas for gain improvement, bandwidth increase and for reduction of mutual coupling in phased arrays [2].

Basically the means to conceive a classical simple EBG structure in a microstrip line consists in providing a periodic variation of the relative dielectric coefficient of the microstrip line along the electromagnetic signal path. This can be achieved with different types of periodic structures: in the ground plane – by etching the ground plane with a periodic pattern [3], in the substrate – by drilling holes on the substrates along the microstrip [4] or in the microstrip line – by varying the width of its conductor strip [5]. These EBG structures produces a stopband centered in a frequency related to the period of the structure and to the corresponding effective dielectric coefficient.

Different manners of conceiving the EBG structures in planar circuits have been proposed [6-9] to achieve stopbands wider than the ones that could be achieved by the classical EBG structure.

In this paper, we propose, analyze and evaluate the microstrip line for filtering purposes consisting of two simultaneous EBG structures. The first EBG structure is implemented by etching the ground plane with a periodic structure and the second EBG is implemented by varying periodically the width of the microstrip line strip. An ultra-wide stopband of 11GHz for a lowpass filter was obtained.

The design procedure of the proposed EBG structure is presented in Section II, as well as its application in a lowpass filter with an ultra-wide stopband of 11 GHz centered at 11.5 GHz, with high magnitude of rejection. The filter realization on Alumina substrate and its experimental results are shown in section III, where they are compared to the filter full-wave simulation results. Finally, the paper conclusions are presented in section IV.

II. WIDEBAND SIMULTANEOUS EBGs DESIGN

The proposed EBG structure is composed of two different EBG structures in parallel, fabricated in the same substrate, one in the ground plane and the other one in the microstrip

line strip. The simultaneous effect of these EBG structures results in a lowpass filter with an ultra-wide stopband response.

As the first design step, a classical filter with EBG in the ground plane, named from now on as EBG1, was conceived in microstrip technology as proposed in [3]. Figure 1 presents a view of the EBG1 layout, which consists of a group of holes with radius r and periodicity a , etched in the ground plane of a microstrip line.

Figure 1: EBG1 structure etched in the ground plane of a microstrip line.

The other EBG structure, named here as EBG2, consist in the periodic variation of the microstrip line strip width [5], with the same periodicity a as EBG1, as shown in Figure 2.

Figure 2: EBG2 structure printed in the strip of a microstrip line.

Figure 3 presents the proposed EBG structure, obtained from the combination of EBG1 and EBG2 overlapped with a half period spacing.

Figure 3: EBG1 and EBG2 structures overlapped. (for visualization purpose the substrate layer of the microstrip line was omitted)

The EBG structure design parameters for a desired filtering result are: the period a and the radius r of the circles etched in the ground plane and the width W_1 and length l_d of the wider sections of the microstrip line strip. The width W of the narrower sections of the microstrip line strip was assumed to be of a 50Ω transmission line, but could be also an additional design parameter.

The design procedure described here was applied to a practical case considering an Alumina substrate, with dielectric constant of $\epsilon_r = 9.9$ and thickness of $h = 0.635$ mm. Using this substrate, a conventional microstrip line with characteristic impedance of 50Ω should gave a width of

$W = 0.6$ mm. The EBG structure was designed for a stopband centered at 12 GHz.

The first design step was the determination of r and a that are related to the filling factor Λ , an auxiliary design parameter that affects both the stopband width and the magnitude of rejection.

$$\Lambda = (r/a) \quad (1)$$

Figure 4 presents the full wave simulation results of EBG1, considering the Alumina substrate with eight circles etched in the ground plane, a constant microstrip line strip width of $W = 0.6$ mm and different values of filling factor Λ . A higher filling factor improves both the bandwidth and the magnitude of rejection of the stopband. However, as the filling factor approaches $\Lambda=0.5$, the etched circles of EBG1 occupy the whole period a , and there would not be enough room for interpolate the EBG2 structure. A filling factor of $\Lambda = 0.35$ was chosen in this design, since it results in a moderately large rejection bandwidth with high magnitude of rejection, while preserving space to the EBG2 structure.

Figure 4: Simulated response of EBG1 structure as a function of the filling factor.

The stopband center frequency in a periodic structure satisfies the *Bragg* condition, which implies that the guided wavelength at the center frequency of the stopband is twice the period a of the EBG structure [10].

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{eff}}} = 2a \quad (2)$$

A first estimation of the period a can be obtained using (2), considering the effective dielectric coefficient of a 50Ω microstrip line, which results in $\epsilon_{eff} = 6.65$ for the Alumina substrate. This estimated value of a is a good start point but needs to be optimized to consider the effect of the circles etched in the ground plane, which change the path of the electromagnetic field and consequently the effective dielectric coefficient of the structure. The optimum value of the period a for a filling factor of $\Lambda=0.35$, eight circles etched in the ground plane and a rejection band centered at 12 GHz

was obtained after a few full wave simulations and resulted in $a=5.05$ mm. As the filling factor is $\Lambda=0.35$, the radius of the circle etched on the ground must be $r=1.76$ mm.

Note that by applying the *Bragg* condition, the guided wavelength at 12 GHz is $\lambda_g=10.10$ mm and the effective dielectric coefficient of the microstrip line with the circles etched in the ground plane, calculated from (), is $\epsilon_{\text{eff}} = 6.12$.

The simulated frequency response of the microstrip line with EBG1 is presented in Figure 5, and shows a stopband from 9 GHz to 15 GHz centered at 12 GHz.

Figure 5: Simulated response of a 50 Ω microstrip line with EBG1.

In order to obtain a wider stopband, the EBG2 structure presented at Figure 2 was used simultaneously with the EBG1 structure, imposing a periodic variation on the width of the microstrip line strip. The result was an ultra-wide stopband due to the superposition of the effects of both EBGs structures.

The periodic modification along the wave propagation path imposed by EBG2 to the microstrip line causes a periodic variation on its characteristic impedance. Due to the differences in impedance along the wave propagation path, reflection on the traveling signal exists, causing interferences between the incident signal and the reflected signal. These interferences induce maximums and minimums depending on the length of the guided wave and the lattice period.

The EBG2 structure design consists in determine the dimensions of the larger sections of the microstrip line strip – the width W_I and the length L_d depicted in Figure 2.

In order to determine the optimal values for W_I and L_d , the proposed EBG structure containing both EBG1 and EBG2 structures overlapped was optimized using CST Microwave Suite. The Powell method for optimization was selected due to its efficient performance on the optimization of problems with few variables, and was used to find W_I and L_d that results in the desired filter stopband. The optimization process was used to minimize an objective function that was defined to represent the desired filter response.

As an example, the frequency response of a filter with a stopband from 5 GHz to 15 GHz or wider and with -40 dB of magnitude of rejection can be defined by the following conditions:

$$S_{11}(\text{dB}) = 0 \text{ for } 5\text{GHz} \leq f \leq 15 \text{ GHz} \quad (3)$$

$$S_{21}(\text{dB}) \leq -40 \text{ dB for } 5\text{GHz} \leq f \leq 15 \text{ GHz}$$

In that case, a possible object function to be minimized during the filter optimization is the one presented in (4). Note that the parameter $S_{11}(\text{dB})$ received a weight of 10 in order to guarantee its impact on the filter optimization process as it assumes small values, ideally reducing to zero.

$$F(L_d, W_I) = \sum_{f=5 \text{ GHz}}^{15 \text{ GHz}} S_{21}(\text{dB}) - 10 \cdot \sum_{f=5 \text{ GHz}}^{15 \text{ GHz}} S_{11}(\text{dB}) \quad (4)$$

After many iterations, the optimization tool has found the optimal value for W_I and L_d that minimizes the objective function defined as the desired filter response. In short, the optimization seeks the minimal value on the objective function:

$$\text{Min}\{F(L_d, W_I)\} \quad (5)$$

The optimization process resulted in $W_I = 3.2$ mm and $L_d = 1.92$ mm. These values were used in the design of the EBG2 structure, which overlaps EBG1 designed earlier in the ground plane of the microstrip line.

The simulated results of the stopband filter with both EBG1 and EBG2 overlapped is presented in Figure 6, and shows a stopband larger than 11 GHz, centered around 11.5 GHz.

Figure 6: Simulated frequency response of the bandstop filter with both EBG1 and EBG2 overlapped.

III. EXPERIMENTAL RESULTS

The designed bandstop filter using the EBG 1 and EBG 2 structures superimposed was fabricated on a 0.635 mm-thick Alumina substrate, plated at both sides with a 4 μm -thick gold layer, using photolithography techniques. The filter was assembled in a test jig, as shown in Figure 7, and was characterized up to 18 GHz using the vector network analyzer HP8722.

Figure 7: Photograph of stopband filter assembled in the test jig (a) top side and (b) bottom side.

Figure 8 presents the measured frequency response of the filter using the proposed EBG structure and compares to the corresponding 3D-EM simulated results, showing that they are in very good agreement.

Figure 8: Measured and simulated results of the designed filter – (a) $S_{11}(\text{dB})$ and (b) $S_{21}(\text{dB})$.

The experimental results show a stopband from 6 GHz to 17 GHz, presenting an ultra-wide stopband of 11 GHz centered at 11.5 GHz. A high level of rejection, greater than 34 dB, was obtained within this stopband.

Note that the stopband center frequency has shifted from 12 GHz to 11.5 GHz when the EBG2 structure was added to the design, which was also observed on the simulated results. The center frequency shift is due to the influence of the wider section of the strip on the effective dielectric coefficient ϵ_{eff} seen by the traveling wave on the microstrip line. In order to maintain the center frequency unchanged, a small correction on the period a could be applied.

IV. CONCLUSIONS

A novel EBG structure for lowpass filters with ultra-wide stopband was presented, using two EBG structures implemented simultaneously in a microstrip line. The first structure was implemented by etching circles in the ground plane and the second structure was implemented by varying the width on the strip line.

A methodology for the design of the proposed filter aiming an ultra-wide rejection band is presented, using the optimization tools of a 3D EM full-wave simulator. The design methodology was applied to design a stopband filter using Alumina substrate.

The filter presented a magnitude of rejection greater than 34 dB for a stopband from 6 GHz to 17 GHz.

The simulated and the measured results are in good agreement and demonstrated the success of the proposed method to achieve wider stopband with EBG structures for filtering purposes in microstrip lines.

V. REFERENCES

- [1] Yablonotitch. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics - *Phys Rev Letters* 58 (1987), 2059–2062.
- [2] Yang, F., & Rahmat-Samli, Y.. *Electromagnetic Band gap Structures in Antenna Engineering* (Cambridge University Press, Cambridge, 2009).
- [3] Falcone F, Lopetegi T, Sorolla M, Group MW. 1-D and 2-D Photonic Bandgap. *Microwave and Optical Technology Letters*. 1999;22(6):411-412.
- [4] Structure B, Radisic V, et al. Broad-Band Power Amplifier Using Dielectric Photonic Bandgap Structure. *Microwave and Guided Wave Letters*. 1998;8(1):1997-1998.
- [5] Tiwari MK, Gupta KK, Gupta HC, Dube DC. Photonic Band Gap studies on periodic metallic structures in the microwave region. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2002;35(6):483-486.
- [6] Laso MA, Lopetegi T, Erro MJ, et al. Novel Wideband Photonic Bandgap Microstrip Structures. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2000;24(5):357-360.
- [7] Bozzetti M, Orazio AD, Sario MD, et al. Tapered photonic Bandgap microstrip lowpass filters : design and realization. *Microwave and Antenna Propagation*.:459-462.
- [8] Kim T, Seo C. A Novel Photonic Bandgap Structure for Low-Pass Filter of Wide Stopband. *Microwave and Guided Wave Letters*. 2000;10(1):13-15.
- [9] Liu H, Sun X, Li Z. A low-pass filter of wide stopband with a novel multilayer fractal photonic Bandgap structure. *Active and Passive Elec. Comp*. 2004;27(June):107-110.
- [10] Saleh,B .E.A.,and Teich,M.C.: *Fundamentals of Photonics* (John Wiley & Sons,UK,2000)