



Artigo

Análise do comportamento de parâmetros eletromagnéticos de uma antena de microfita após aplicação de estrutura EBG bidimensional

Matheus E. T. Sousa ^[1], Isaac B. T. da Silvar ^[2], Humberto D. de Andrade ^[3]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-árido; matheus.emanuel@mail.com

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-árido; isaac.barros@ufersa.edu.br

^[3] Universidade Federal Rural do Semi-árido; humbertodionisio@ufersa.edu.br

Recebido: 25/06/2019;

Aceito: 21/08/2019;

Publicado: 07/10/2019.

Resumo: Neste trabalho são apresentadas propostas de antenas de microfita com aplicação de estrutura Eletromagnetic Band gap (EBG) no substrato, assim como comparar as estruturas propostas com uma antena de microfita padrão com patch retangular, operando na faixa para aplicações Industriais, Médicas e Científicas (ISM – *Industrial, Scientific and Medical*) 2,4 GHz. Foram realizadas simulações para a obtenção desses resultados por meio do software ANSYS® HFSS. Foi aplicada uma estrutura com simetria translacional no substrato da antena, este feito com dois materiais diferentes, com o objetivo de verificar a influência nos parâmetros de radiação da antena. Os resultados simulados mostram que a frequência de ressonância das antenas simuladas sofre um deslocamento em razão da mudança na permissividade relativa do substrato, sendo necessário aplicar um fator de correção a fim de que se possa analisar o comportamento de todas as configurações na mesma faixa de frequência. Além disso, a variação no sentido da simetria do patch em relação às linhas da estrutura EBG e a variação nas dimensões da estrutura EBG causaram diminuição da densidade de corrente superficial nas antenas simuladas, aumento do ganho e diminuição da largura de banda.

Palavras-chave: antena de microfita; EBG; simetria translacional

1. INTRODUÇÃO

OS sistemas de microondas estão em evolução e a tendência é o desenvolvimento de dispositivos menores e com menor custo de produção, de modo que a questão da portabilidade entra como fator importante devido à necessidade de se ter vários dispositivos embarcados em um único equipamento, e as antenas de microfita surgem como alternativa para aplicação nesses novos sistemas, pois atendem ao pré-requisito de possuir baixo peso e volume, podendo ser integradas a circuitos microprocessados.

As primeiras publicações a respeito de antenas de microfita foram feitas por Deschamps em 1953, nos Estados Unidos da América e também por Gutton e Baissinot, em 1955 na França, e a partir daí foram criados diversos métodos, técnicas e análises para a fabricação de antenas de microfita [1].

A tendência é o desenvolvimento de dispositivos com baixo custo, menor peso e antenas com pequenos perfis para sistemas de comunicação modernos. Entretanto, o baixo custo depende da habilidade do projetista em controlar precisamente o processo de fabricação para que o protótipo da estrutura inovadora possa ser modelado matematicamente de forma adequada [2].

As antenas de microfita são ideais para diversas aplicações, principalmente as que requerem adequação da estrutura a qualquer tipo de superfície. Além de técnicas de produção de circuito impresso de baixa tecnologia e robustez mecânica [3].

Esse tipo de antena características como baixo peso e volume, facilidade de instalação e possuir perfis aerodinâmicos de fácil adaptação, o que a torna atrativa também para aplicações industriais, médicas e científicas (ISM).

De acordo com [4] as antenas de microfita na sua forma básica possuem algumas características, como largura de banda estreita, baixa eficiência de radiação e não são adequadas para aplicações em alta potência, sendo a estreita largura de banda a principal desvantagem, uma vez que esse fator limita as aplicações desse tipo de antena, logo, esforços têm sido feitos para o desenvolvimento de técnicas de aumento de largura de banda.

Para [5], o Photonic Band Gap (PBG) é uma estrutura periódica que proíbe a propagação de ondas em determinadas bandas de frequência, e ajustes de largura de banda podem ser alcançados por meio do uso de filtros de microfita baseados no conceito de PBG.

A terminologia da estrutura utilizada pode variar a depender da sua aplicação, por exemplo, para utilização como filtros, utiliza-se a terminologia superfícies seletoras de frequência (FSS) e para aplicação com cristais fotônicos utiliza-se a terminologia Photonic Band Gap (PBG). Uma classificação que engloba as outras é a chamada Eletromagnetic Band Gap (EBG).

Nesse contexto, serão aplicadas estruturas Eletromagnetic Band Gap (EBG) 2D com simetria translacional discreta no substrato de antenas de microfita para que se possa investigar o comportamento dos dispositivos de acordo com a variação da posição do patch e das características das estruturas EBG aplicadas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Apresenta-se na Figura 1 o procedimento metodológico adotado no trabalho.

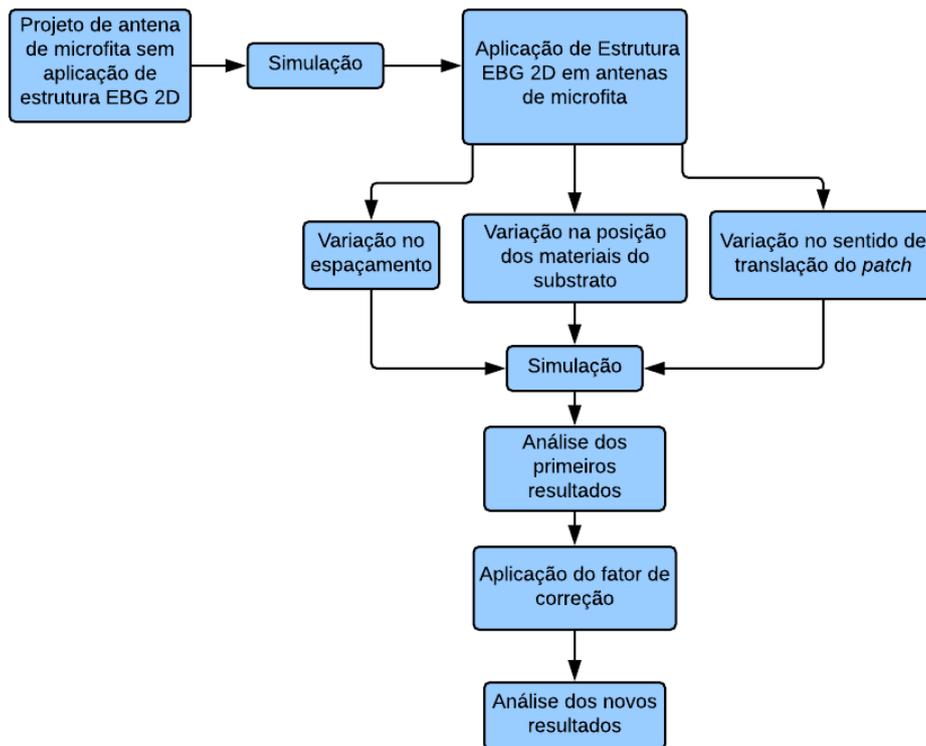


FIGURA 1. Procedimento metodológico utilizado (Autoria própria).

Projetou-se uma antena de microfita por meio do Modelo da Linha de Transmissão, com alimentação por linha de microfita para uma impedância de entrada de 50Ω , que será denominada Configuração 1 e servirá de parâmetro de comparação com as outras configurações de antenas de microfita propostas. O substrato utilizado na Configuração 1 foi o FR4 Epoxy, com permissividade relativa 4,4 e tangente de perdas (ou fator de dissipação) 0,02, com espessura de 1,54mm. Na Figura 2 é apresentada a antena projetada sem estrutura EBG e suas dimensões calculadas para uma frequência de ressonância de 2,45 GHz.

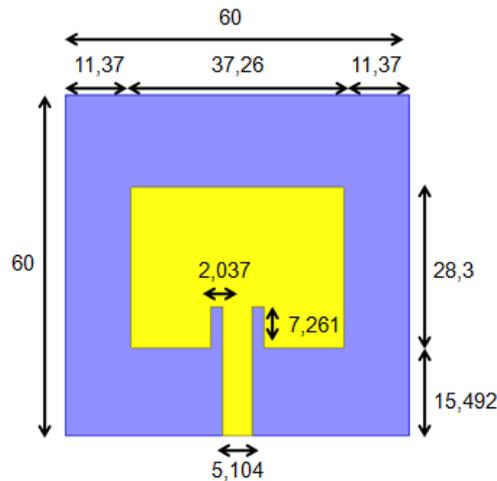


FIGURA 2. Dimensões (mm) para a antena de microfita sem estrutura EBG (Autoria própria).

A partir da Configuração 1, o substrato foi modificado, sendo aplicada uma estrutura que [6] denomina como uma estrutura com simetria translacional discreta, ilustrada na Figura 3, em dois materiais diferentes, ou seja, foi aplicada uma configuração de estrutura EBG para obter as outras configurações de antenas que serão comparadas com a Configuração 1. As características dos materiais que farão parte do substrato são mostradas na Tabela 1.

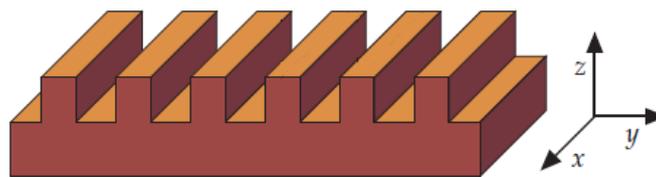


FIGURA 3. Estrutura com Simetria Translacional Discreta (Adaptado de [6]).

Nessa estrutura pode-se observar uma simetria ao transladar um ponto qualquer sobre o eixo y, e deslocando-se um ponto sobre o eixo y (na região que apresenta descontinuidade) ou no eixo z, as características do material variam, mas, para qualquer ponto deslocando-se sobre o eixo x as características da estrutura permanecem constantes, logo, esse tipo de estrutura pode ser classificada como estrutura bidimensional (2D).

TABELA 1. Características dos materiais utilizados no substrato (Autoria Própria).

Material 1: (FR4*)		Material 2: RT DUROID**	
ϵ_r	4,4	ϵ_r	2,33
tg δ	0,02	tg δ	0,0012
Espessura (mm)	1,54	Espessura (mm)	1,575

¹ Nota: *Fibra de Vidro. ** Compósitos de Politetrafluoretileno reforçado com fibra de vidro.

Serão simuladas mais oito configurações de antenas, de acordo com as estruturas ilustradas na Figura 4.



FIGURA 4. Estruturas aplicadas no substrato. (a) Tipo 1; (b) tipo 2 (Autoria própria).

As dimensões da estrutura EBG 2D no substrato de cada uma das oito configurações estão detalhadas na Tabela 2.

TABELA 2. Características estruturais dos substratos das configurações de estrutura EBG 2D (Autoria própria).

Configuração	Tipo	e (mm)	p (mm)	Sentido do patch em relação às linhas da estrutura EBG 2D
2	1	2	0,8	Paralelo
3	1	2	0,8	Perpendicular
4	2	2	0,8	Paralelo
5	2	2	0,8	Perpendicular
6	1	4	0,8	Paralelo
7	1	4	0,8	Perpendicular
8	2	4	0,8	Paralelo
9	2	4	0,8	Perpendicular

São ilustradas na Figura 5 os sentidos paralelo e perpendicular, citados na Tabela 2.

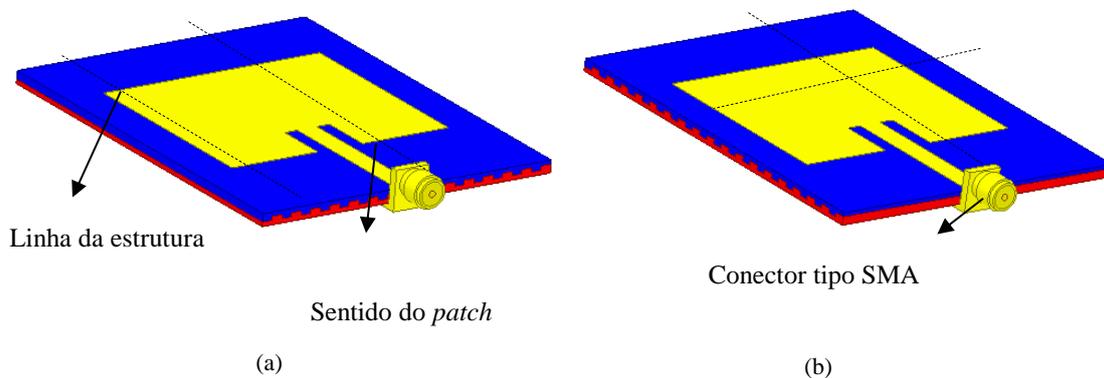


FIGURA 5. Sentidos do *patch*. (a) Paralelo; (b) perpendicular (Autoria própria).

Todas as configurações foram simuladas considerando-se as partes condutoras (*patch* e plano de terra) compostas de cobre com espessura 0,05 mm, e o intervalo de frequências utilizado no software ANSYS HFSS® foi de 2 a 3,5 GHz com passo de 0,01GHz, com o objetivo de obter os parâmetros de coeficiente de reflexão, ganho, largura de banda e densidade de corrente superficial no *patch*. A utilização de um novo material no substrato, é esperado uma alteração na permissividade relativa total da estrutura, provocando um deslocamento de frequência com relação à frequência de projeto, e para que se possa analisar e comparar o comportamento das configurações operando na mesma faixa de frequências, nesse caso a faixa ISM 2,4 GHz, foram selecionadas duas estruturas para aplicação do fator de correção (FC), que irá indicar as novas dimensões das antenas com estrutura EBG.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas Figuras 6 e 7 são apresentadas as relações entre o coeficiente de reflexão (S_{11}) em função da frequência de ressonância para a Configuração 1 e as configurações Tipo 1 (com material FR4 na parte superior do substrato) e para a Configuração 1 e as configurações Tipo 2 (com material RT DUROID na parte superior do substrato).

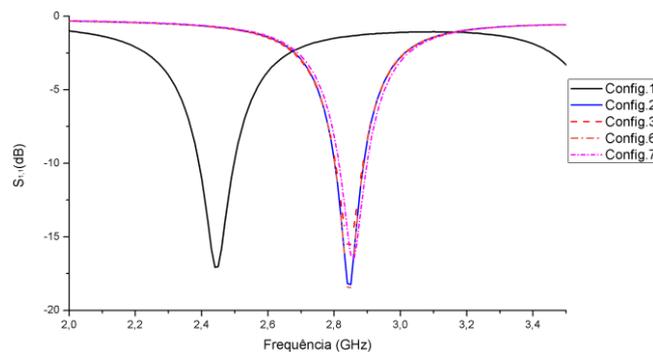


FIGURA 6. S_{11} (dB) x Frequência (GHz) para Configuração 1 e configurações Tipo 1 (Autoria própria).

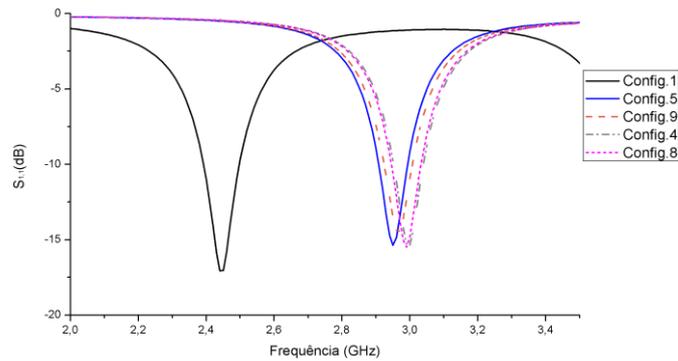


FIGURA 7. S_{11} (dB) x Frequência (GHz) para Configuração 1 e configurações Tipo 2 (Autoria própria).

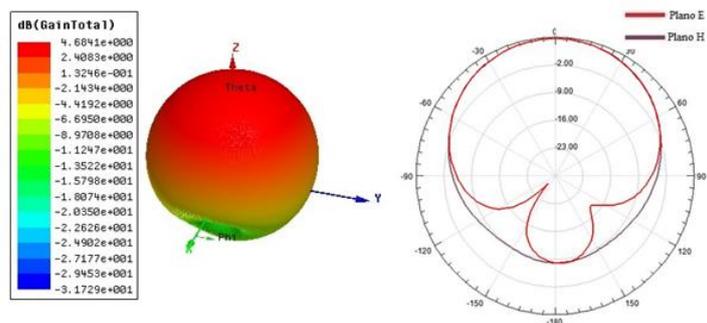
Observa-se nas Figuras 6 e 7 que nem as configurações Tipo 1 nem as configurações Tipo 2 ressoaram na frequência de projeto 2,45 GHz, e isso já era esperado devido a mudança na permissividade relativa do substrato. Mesmo com algumas configurações possuindo a dimensão e com largura 2 mm e outras com largura 4 mm (ver Tabela 2), e também com a variação no sentido do *patch* (ver Figura 5), todas as configurações Tipo 1 ressoaram em torno da mesma frequência (em torno de 2,9 GHz), assim como todas as configurações Tipo 2 ressoaram em torno da mesma frequência (3 GHz). O que mais influenciou nas características de ressonância das antenas foi a posição dos materiais utilizados no substrato. Na Tabela 3 pode-se observar os resultados mostrados nas Figuras 6 e 7 de forma mais detalhada.

TABELA 3. Comportamento das antenas simuladas (Autoria própria).

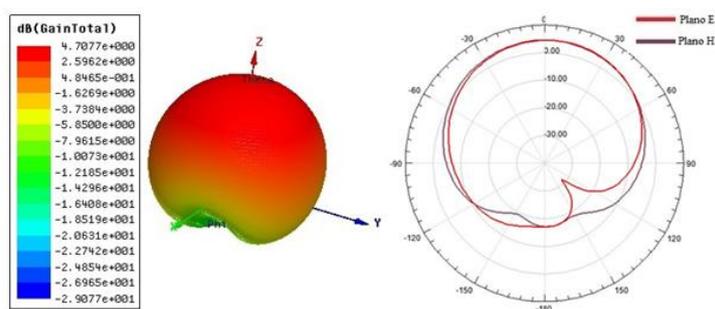
Configuração	Freq. (GHz)	S_{11} (dB)	Largura de Banda (MHz)
1	2,4500	-17,0229	102,8
2	2,8903	-18,2284	87,2
3	2,8903	-15,5211	82,5
4	3,0501	-15,3462	86,4
5	2,9501	-15,3709	84,8
6	2,9000	-18,4476	87,6
7	2,9100	-16,5360	84,8
8	3,0466	-15,4921	87,3
9	2,9714	-14,4284	82,8

Na Tabela 3 é mostrado que a Configuração 1 obteve a maior largura de banda dentre todas as antenas simuladas. Para as configurações Tipo 1, as Configurações 6 e 7, que possuem $e = 4$ mm sofreram um maior deslocamento de frequência em relação à frequência de ressonância de projeto, de 2,45 GHz, alcançando 2,9 GHz e 2,91 GHz, respectivamente. A Configuração 6 obteve tanto a maior largura de banda dentre todas as configurações simuladas com aplicação da estrutura EBG 2D, porém esse valor de largura de banda ainda foi menor que a Configuração 1 em cerca de 14,78%, como também obteve o menor coeficiente de reflexão dentre todas as configurações simuladas, tendo uma diminuição de aproximadamente 7,72% em relação à Configuração 1. As configurações Tipo 2 obtiveram valores mais próximos de coeficiente de reflexão do que as antenas Tipo 1, alcançando valores em torno de -15,5 dB (exceto a Configuração 9 que obteve uma coeficiente de reflexão de -14,4284 dB). A Configuração 9 apresentou o maior coeficiente de reflexão dentre todas as configurações simuladas e a Configuração 8 apresentou o menor coeficiente de reflexão, entre antenas Tipo 2. A diminuição na largura de banda das antenas com estrutura EBG 2D pode indicar que a permissividade relativa ϵ_r do substrato aumentou com relação à antena com substrato feito apenas com FR4 (Configuração 1), uma vez que a largura de banda é inversamente proporcional à raiz quadrada da permissividade relativa do substrato, porém, se faz necessário a aplicação da teoria da homogenização para confirmar o valor da nova permissividade efetiva do substrato.

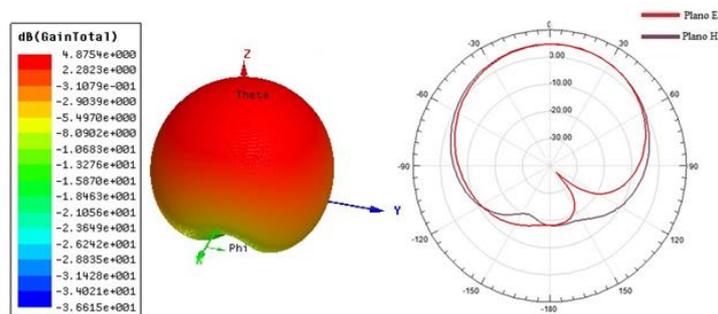
Os diagramas de campo elétrico e campo magnético foram plotados para a frequência de ressonância de cada configuração, para que fosse possível analisar o comportamento da antena no tocante às suas diretividades e ganhos. Os diagramas de cada configuração são apresentados na Figura 8 (a)-(i).



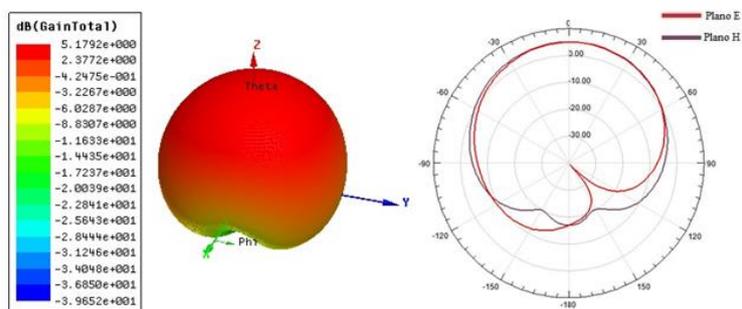
(a) Configuração 1. Diagrama 3D e 2D



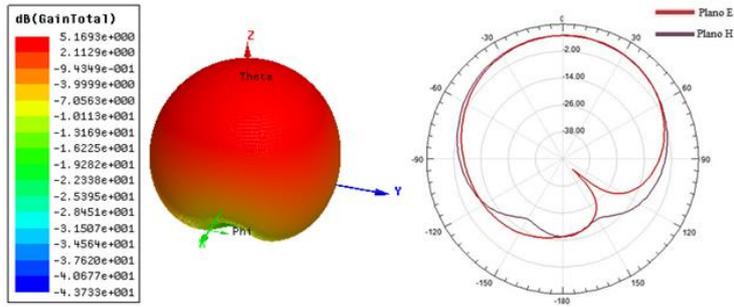
(b) Configuração 2. Diagrama 3D e 2D



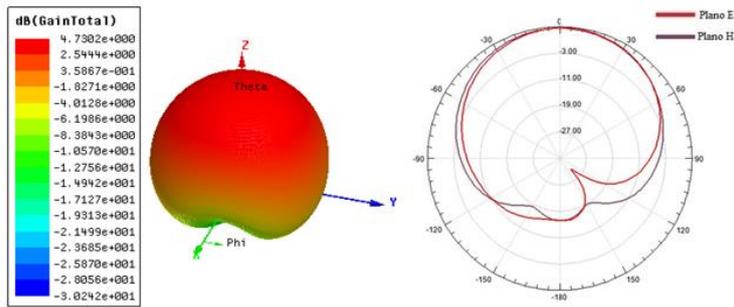
(c) Configuração 3. Diagrama 3D e 2D



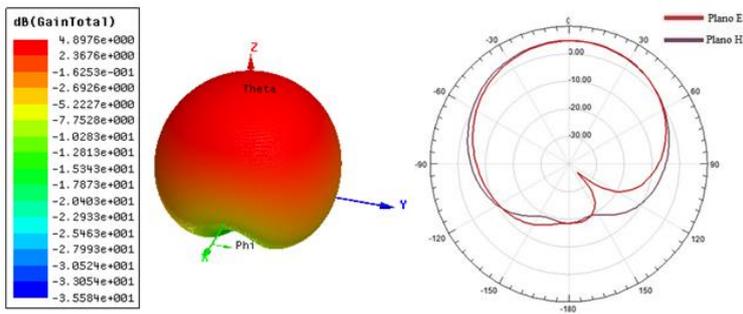
(d) Configuração 4. Diagrama 3D e 2D



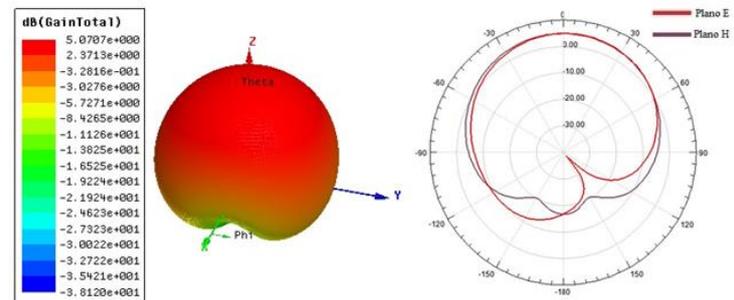
(e) Configuração 5. Diagrama 3D e 2D



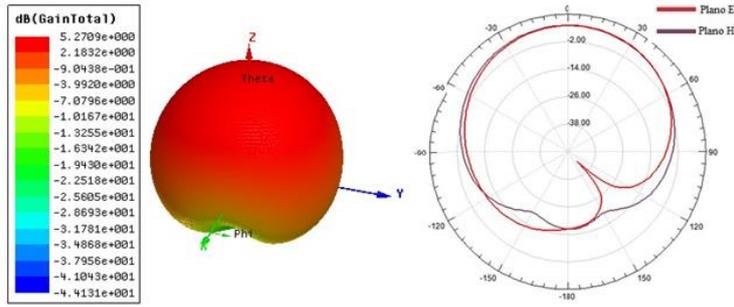
(f) Configuração 6. Diagrama 3D e 2D



(g) Configuração 7. Diagrama 3D e 2D



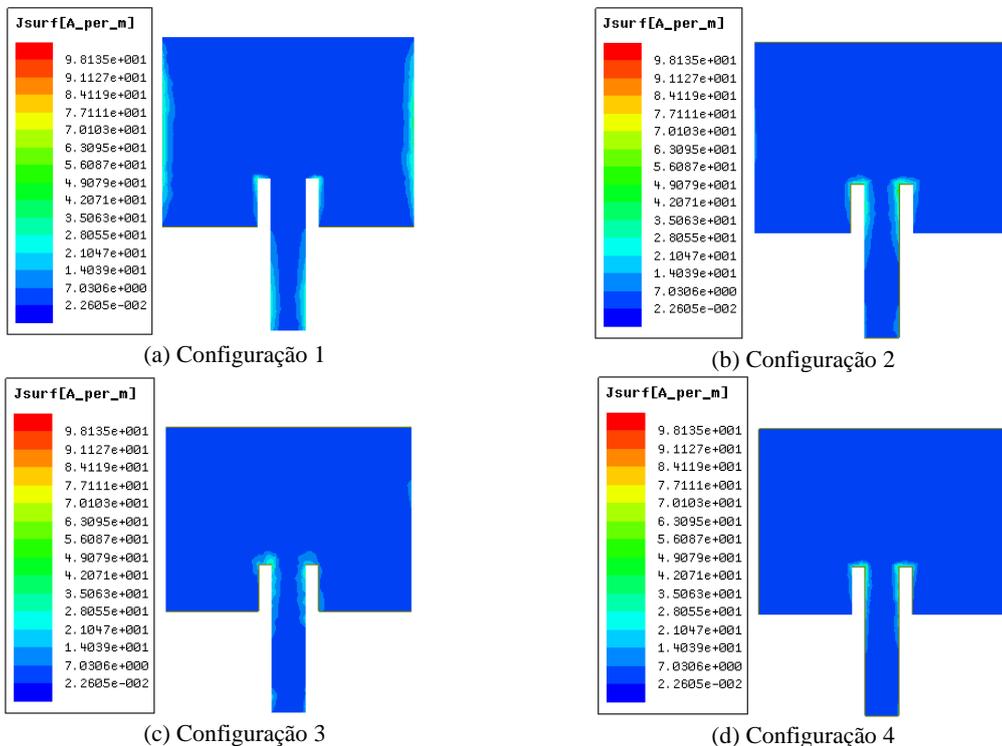
(h) Configuração 8. Diagrama 3D e 2D



(i) Configuração 9. Diagrama 3D e 2D

FIGURA 8. Diagrama de radiação apresentado por cada configuração.

Observa-se na Figura 8 é que os diagramas de radiação para as configurações além da Configuração 1 apresentaram comportamentos semelhantes, todas elas radiando potência na direção ortogonal ao *patch* da antena, ou seja, padrão de radiação *broadside*. As configurações Tipo 1 apresentaram ganhos em torno dos 4 dB, das quais a Configuração 7 apresentou maior ganho (4,8976 dB) e a Configuração 2 apresentou menor ganho (4,7077 dB). Já para as configurações Tipo 2, os ganhos resultaram em torno dos 5 dB, maiores do que a Configuração 1. A Configuração 9 apresentou o maior ganho entre todas as configurações simuladas (5,2709 dB). A variação no sentido do *patch* e a variação na dimensão e entre 2 mm e 4 mm não influenciaram tanto no ganho quanto a variação no parâmetro posição dos materiais do substrato. Com exceção das configurações 9 e 5, houve uma diminuição, com relação à Configuração 1, do módulo do lóbulo secundário. A densidade de corrente superficial, obtida para a frequência de ressonância em cada uma das configurações, é apresentada na Figura 9 (a)-(i).



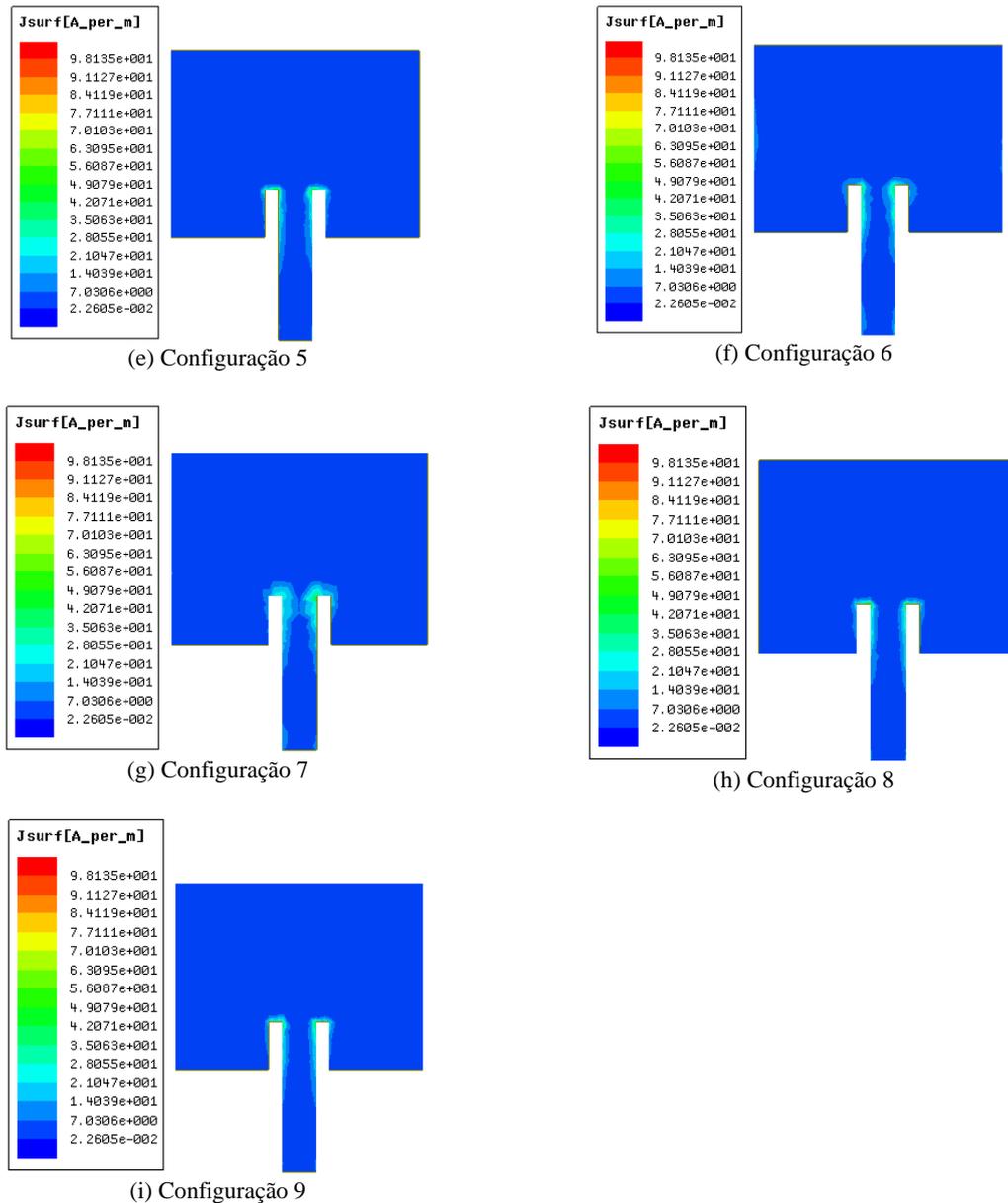


FIGURA 9. Densidades superficiais de corrente para cada configuração.

Observa-se na Figura 9 que a Configuração 1 possui em suas extremidades uma maior concentração de corrente superficial, em razão do efeito de borda, influenciando o valor do seu ganho, que foi menor do que os ganhos das demais configurações, pois concentrações de corrente superficial geram maiores perdas por condução, afetando diretamente o ganho da antena. As demais configurações apresentam um comportamento semelhante e uma melhor distribuição de corrente superficial com relação à Configuração 1, consequentemente um maior ganho. Percebe-se também que a inserção da estrutura EBG 2D proposta provocou uma melhor distribuição de corrente superficial no *patch*.

As escalas da Figura 9 foram todas padronizadas no valor máximo de 98,135 A/m e valor mínimo de 0,022605 A/m, que foram os valores máximo e mínimo de densidade de corrente superficial alcançados dentre todas as configurações, sendo obtidos pelas configurações 7 e 8, respectivamente. As configurações com $e = 2$ mm apresentaram uma média de valor máximo de densidade de corrente superficial de 79,169 A/m, que representa um aumento de cerca de 34,44% em relação à configuração sem estrutura EBG 2D. Já as configurações com $e = 4$ mm apresentaram uma média de valor máximo de densidade de corrente superficial de 78,73 A/m, que representa um aumento de cerca de 34,08% em relação à Configuração 1.

Comparando-se as configurações Tipo 1 ou Tipo 2 que possuem o mesmo valor para a dimensão e com relação ao sentido do *patch*, verifica-se que todas as configurações com o *patch* no sentido perpendicular apresentaram um maior valor de densidade máxima de corrente superficial, exceto para os casos das configurações 8 e 9, em

que a Configuração 8, que possui o *patch* com sentido vertical, apresentou um valor de densidade máxima de corrente superficial aproximadamente 12,54% maior que a Configuração 9, que possui o *patch* com sentido paralelo. Na Tabela 4 são apresentados os valores de densidade de corrente superficial (J_{sup}) máxima e mínima para cada uma das configurações.

TABELA 4. Densidade de corrente superficial para cada configuração (Autoria Própria).

Configuração	J_{sup} (A/m)	
	Máxima	Mínima
1	51,1900	0,163500
2	70,4050	0,045221
3	96,0290	0,071417
4	72,9000	0,056796
5	77,3420	0,028935
6	80,8100	0,023703
7	98,1350	0,092511
8	72,5360	0,022605
9	63,4390	0,028274

As configurações 6 e 8 foram selecionadas para aplicação do fator de correção nas dimensões do *patch* para serem comparadas, com relação aos seus comportamentos operando na faixa de frequências ISM 2,4 GHz, com a Configuração 1. A Configuração 6 foi selecionada porque dentre as configurações Tipo 1 foi a que apresentou o menor coeficiente de reflexão e a maior largura de banda, e a Configuração 8 foi selecionada pelo mesmo motivo, dentre as configurações Tipo 2.

Após as novas simulações, foram obtidas as relações entre coeficiente de reflexão e frequência de ressonância para cada antena. Esse comportamento é apresentado na Figura 10.

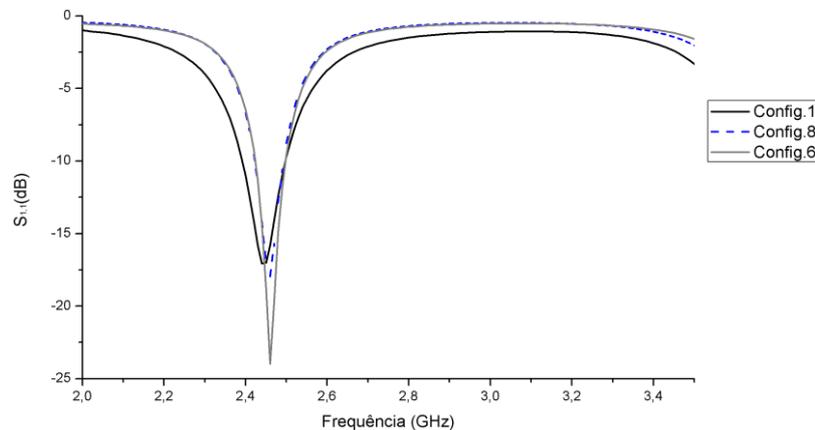


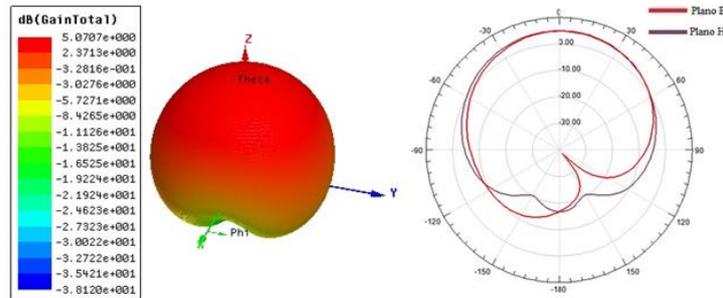
FIGURA 10. Coeficiente de Reflexão (dB) x Frequência (GHz).

A aplicação do fator de correção fez com que as antenas com configurações 6 e 8 ressoassem na frequência de 2,46 GHz, que está dentro da faixa ISM 2,4 GHz (2,400 a 2,4835 GHz). A Configuração 8 obteve uma redução na largura de banda, alcançando na nova simulação um valor de 70,4 MHz, e o dispositivo com Configuração 6 também sofreu redução na largura de banda, alcançando na nova simulação o valor de 73,9 MHz. Com relação ao coeficiente de reflexão, a Configuração 8 apresentou -17,95 dB, ou seja, diminuição aproximada de 16 % em relação à Configuração 8 sem fator de correção e diminuição aproximada de 5,45 % em relação à Configuração 1, e a Configuração 6 apresentou coeficiente de reflexão igual a -23,9607 dB, ou seja, diminuição aproximada de 29,88 % em relação à antena com Configuração 6 sem fator de correção aplicado e diminuição aproximada de 40,75 % em relação à Configuração 1. Na Tabela 6 são apresentados os comportamentos das antenas após as novas simulações.

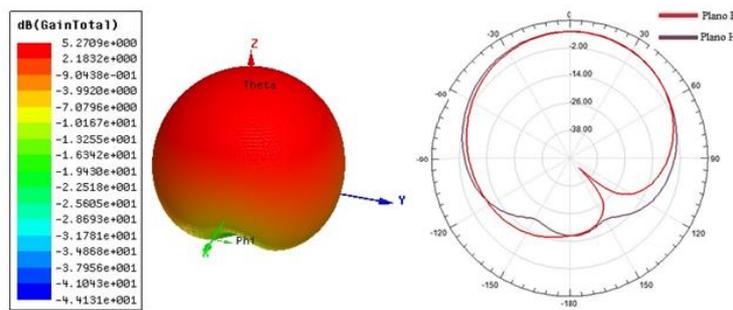
TABELA 5. Comportamento das novas antenas simuladas.

Configuração	Freq. (GHz)	S11 (dB)	Largura de banda (MHz)
1	2,45	-17,0229	102,8
6	2,46	-23,9607	73,9
8	2,46	-17,9514	70,4

Os novos diagramas de campo elétrico e campo magnético, apresentados na Figura 11, foram plotados para que fosse possível analisar o comportamento da antenna no tocante às suas diretividades e ganhos.



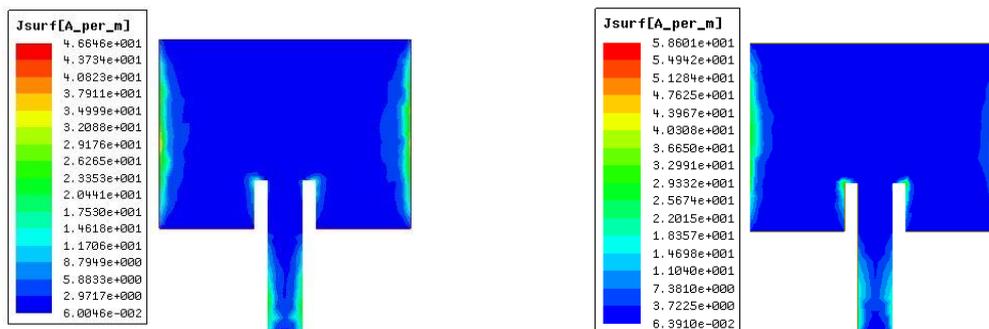
(a) Configuração 6. Novos diagramas 3D e 2D



(b) Configuração 8. Novos diagramas 3D e 2D

FIGURA 11. Diagramas 3D e 2D após nova simulação.

A Configuração 6 obteve um aumento de aproximadamente 26,69 % no valor de seu ganho com relação à Configuração 6 sem o fator de correção aplicado e aumento de aproximadamente 27,93 % em relação à Configuração 1. A Configuração 8 obteve um aumento de aproximadamente 23,95 % no valor de seu ganho com relação à Configuração 8 sem o fator de correção aplicado e aumento de aproximadamente 34,18 % em relação à Configuração 1. Na Figura 12 são mostradas as densidades de corrente superficial nos dispositivos em que foram aplicados fator de correção.



(a) Configuração 6

(b) Configuração 8

FIGURA 12. Densidade de corrente superficial para as novas estruturas simuladas.

A nova Configuração 6 apresentou redução de aproximadamente 42,28 % no valor de sua máxima densidade de corrente superficial em relação à Configuração 6 sem fator de correção e também apresentou uma redução de aproximadamente 10,12% em relação à Configuração 1. A nova Configuração 8 apresentou redução de aproximadamente 19,21 % no valor de sua máxima densidade de corrente em relação à Configuração 8 sem fator de correção e apresentou um aumento de aproximadamente 12,91 % em relação à Configuração 1. Essa variação nos valores das densidades de corrente superficiais ocorrem em razão da mudança das dimensões do *patch* após a aplicação do fator de correção. Na Tabela 6 são resumidos os resultados para a comparação entre as configurações 6, 8 e 1.

TABELA 6. Comparação entre as novas Configurações 6 e 8 e a Configuração 1.

Configuração	Freq. (GHz)		S11 (dB)		Largura de banda (MHz)		Ganho máximo (dB)		Jsup Máxima (A/m)	
	Sem FC	Com FC	Sem FC	Com FC	Sem FC	Com FC	Sem FC	Com FC	Sem FC	Com FC
1	2,45	-	-17,02	-	102,8	-	4,68	-	51,9	-
6	2,90	2,46	-18,44	-23,96	87,6	73,9	4,73	5,99	80,8	46,6
8	3,05	2,46	-15,49	-17,95	87,3	70,4	5,07	6,28	72,5	58,6

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram realizadas análises a respeito da inserção de uma estrutura EBG com simetria translacional discreta no substrato de uma antena de microfita a fim de realizar uma comparação no tocante aos parâmetros de radiação de uma antena padrão de microfita com *patch* retangular.

A inserção de um novo material no substrato provocou mudança na permissividade relativa do substrato e conseqüentemente um deslocamento de frequência com relação à frequência de ressonância do projeto, que é de 2,45 GHz. Para corrigir esse deslocamento foi necessário aplicar um fator de correção nas estruturas propostas.

Após a aplicação do fator de correção as estruturas apresentaram melhoria no que diz respeito ao coeficiente de reflexão e ganho, porém, apresentaram uma redução na largura de banda, conseqüência também da mudança na permissividade relativa do substrato.

Com as simulações dos dispositivos propostos foi possível observar o comportamento das características de ressonância da antena com a aplicação de uma estrutura EBG no substrato e qual a influência das posições dos materiais no substrato e também da posição do *patch*, que foi posicionado em paralelo em relação às linhas da estrutura EBG em algumas configurações e foi posicionado de forma perpendicular às linhas da estrutura EBG em outras simulações, também verificou-se que, para cada tipo de substrato analisado, as variações nas dimensões e, p e na orientação do *patch* possuem pouca influência na frequência de ressonância das antenas.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UFERSA, ao Grupo de Estudo e Pesquisa em Eletromagnetismo Aplicado e Telecomunicações (GEPEAT), à Equipe do Laboratório de Telecomunicações e Microondas da UFERSA, e CNPq.

REFERÊNCIAS

- [1] ALENCAR, M.S.; QUEIROZ, W.J.L.; Ondas Eletromagnéticas e Teoria de Antenas. São Paulo: Érica, 2010.
- [2] JAMES, J R; HALL, P S. Handbook of microstrip antennas. 2. ed. Londres: Peter Peregrinus Ltd, 1989. 1296 p.
- [3] BALANIS, Constantine A.. Antenna Theory: Analysis and Design. 3. ed. New Jersey: Wiley-interscience, 2005. 1047 p.
- [4] CHEN, Z. N.; CHIA, M. Y. W. Broadband Planar Antennas: Design and Applications. JohnWiley & Sons Ltd,2006. 243 p.
- [5] RADISIC, V.; QIAN, Y.; ITOH, T.. Novel architectures for high-efficiency amplifiers for wireless applications. IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques, [s.l.], v. 46, n. 11, p.1901-1909, 1998. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/22.734508>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/734508>. Acesso em 19 jun. 2019.

- [6] JOANNOPOULOS, John D.; JOHNSON, Steven G.; WINN, Joshua N.; MEADE, Robert D.. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. 2. ed. Nova Jersey: Princeton University Press, 2008. 286 p.