

ESTUDO DA FLEXIBILIDADE DE PROJETO DE SUPERFÍCIES SELETIVAS DE FREQUÊNCIA

Antonio Luiz Pereira de Siqueira CAMPOS

Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte, Unidade de Ensino Descentralizada da Zona Norte de Natal, Departamento Acadêmico de Tecnologia da Informação e Indústria, Rua Brusque, S/N – Conjunto Santa Catarina – Potengi, 59112-490 Natal, RN, Brasil, 8440052600, E-mail: antonioluiz@cefetrn.br.

RESUMO

Superfícies seletivas de frequência têm sido largamente utilizadas devido a seu baixo custo, peso reduzido e habilidade de se integrar com outros circuitos de microondas. Elas são especialmente importantes em diversas aplicações, como aviões, sistemas de antenas, radomes, foguetes, mísseis, etc. Aplicações de FSS em faixas de frequência elevadas têm sido investigadas. A investigação dos efeitos produzidos pela utilização de novos materiais em superfícies seletivas de frequência é de grande interesse para o desenvolvimento científico e tecnológico, em face da possibilidade de melhoria das características de diversos dispositivos; e circuitos usados em altas frequências. O estudo de novas geometrias combinadas com o uso de novos materiais pode melhorar o desempenho dessas estruturas. Além desses fatores, o uso de superfícies seletivas de frequência, combinadas com antenas planares, pode aumentar a eficiência dessas antenas e encontra aplicações no desenvolvimento de diversos dispositivos e circuitos para sistemas de comunicações modernos. O uso de FSS integradas a absorvedores de microondas pode também melhorar o desempenho desses dispositivos. Absorvedores de microondas são importantes elementos em diversas áreas militar e civil. Alguns autores têm investigado experimentalmente absorvedores de microondas com FSS's embebidas. Os resultados mostram que a incorporação de FSS's pode mudar efetivamente as propriedades de reflexão dos absorvedores. Com projetos apropriados, pode-se obter a largura de banda e frequência de ressonância desejada. Este trabalho tem por objetivo efetuar um estudo da flexibilidade dos projetos de FSS, levando em consideração: geometrias dos elementos tipo patch, materiais dielétricos, estruturas multicamadas e dimensões físicas. Além disso, serão apresentados alguns resultados experimentais. Com isso, pretende-se elaborar um guia detalhado de projeto dessas estruturas planares que encontram tantas aplicações nas mais variadas áreas de telecomunicações.

Palavras-chave: Superfícies seletivas de frequência, materiais dielétricos, FSS, largura de banda, frequência de ressonância.

1. INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico ocorrido nos últimos anos na construção de dispositivos com tecnologia planar decorreu da necessidade crescente de implementação de dispositivos, com dimensões e peso cada vez menores, para aplicações diversas, tais como nas atividades aeroespaciais. Observa-se que uma atenção especial tem sido dedicada ao estudo de superfícies seletivas em frequência (*Frequency selective surfaces – FSS*).

As estruturas de FSS são formadas por elementos do tipo *patch* condutor ou por elementos do tipo abertura, ou ainda, uma combinação dos dois tipos de elementos. Estruturas de FSS com elementos do tipo abertura podem ser usadas para fornecer características passa-faixa. Em outras palavras, para a frequência de operação da antena, o sinal passa através da estrutura com um mínimo de perdas de inserção. Consequentemente, para frequências fora da banda de operação, o sinal é refletido. As estruturas periódicas têm um grande número de aplicações e têm contribuído significativamente para melhorar o desempenho dos circuitos de comunicações.

Arranjos periódicos têm sido investigados por vários autores. Investigações teóricas com os mais variados tipos de elementos podem ser encontradas na literatura. Além disso, várias técnicas numéricas têm sido estudadas.

Desta forma, o objetivo principal deste trabalho é apresentar um guia detalhado de projeto de FSS's. Serão consideradas diversas geometrias de elementos *patch*, resultados numéricos obtidos com diferentes técnicas numéricas, por outros autores e pelo autor desse trabalho, serão apresentados. Além desses resultados numéricos, resultados experimentais obtidos em diversos trabalhos serão apresentados. Estruturas com uma camada, com sobrecamada e com duas camadas dielétricas serão consideradas, além de estruturas *freestanding* (sem camadas dielétricas).

2. DEFINIÇÕES DE FSS

Uma FSS é um arranjo periódico de aberturas ou de elementos do tipo *patch* condutor. Como ilustrado na Figura 2.1, a FSS com elementos do tipo abertura trabalha como um filtro passa-faixa. Na medida em que os elementos vão entrando em ressonância, a estrutura vai se tornando “transparente” para a onda incidente, até que na frequência de ressonância da estrutura, ocorre a transmissão total da onda. Por outro lado, a FSS com elementos do tipo *patch* condutor, funciona como um filtro rejeita-faixa. Os elementos vão entrando em ressonância e, com isso, eles radiam a potência incidente na direção de reflexão, até que na frequência de ressonância da estrutura, ela se comporta como um condutor perfeito refletindo totalmente a onda incidente (MITTRA, 1988).

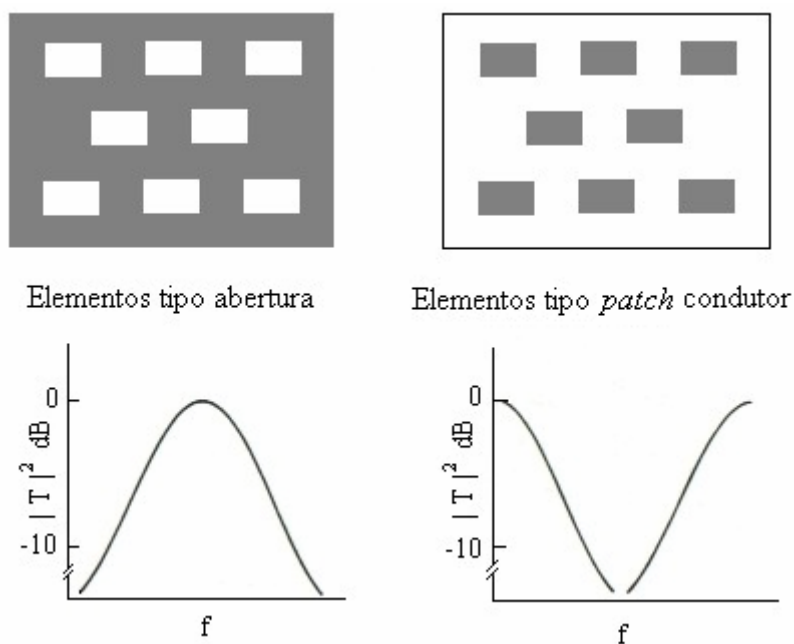


Figura 1 – Tipos de elementos de FSS.

As FSS podem ainda ser definidas como anteparo-fino ou anteparo-espesso, dependendo da espessura do elemento. A FSS anteparo-fino, usualmente, refere-se a um anteparo com elementos do tipo circuito impresso, que tem espessura menor que $0,001\lambda_0$, em que λ_0 é o comprimento de onda para a frequência de ressonância do anteparo. Em geral, a FSS anteparo-fino é leve, de pequeno volume e pode ser fabricada com baixo custo, empregando tecnologia convencional de fabricação de circuito impresso. Por outro lado, a FSS anteparo-espesso é pesada e sua fabricação requer o manuseio preciso de um bloco de metal espesso. Guias de ondas empilhados têm sido usados como uma forma popular de FSS anteparo-espesso. A vantagem das FSS anteparo-espesso é que a razão da frequência transmitida para a frequência refletida (f_t/f_r), ou banda de separação, pode ser reduzida para 1,15; o que é adequado para antenas de satélites de comunicações multifrequenciais (WU, 1995).

3. FORMAS DOS ELEMENTOS

Existe na literatura uma grande variedade de pesquisas que utilizam as mais diversas formas de elementos. Em (MUNK, 2000) os elementos são divididos em quatro grupos:

- Grupo 1: N – pólos conectados pelo centro;
- Grupo 2: as espiras;
- Grupo 3: os elementos de interior sólido;
- Grupo 4: combinações.

Elementos do Grupo 1 podem ser vistos na Figura 2.2, as formas mais comuns são: dipolo fino (MITTRA, 1988), cruz de Jerusalém (TSAO, 1984), dipolo cruzado (TSAO, 1984) e o tripolo (MUNK, 2000).

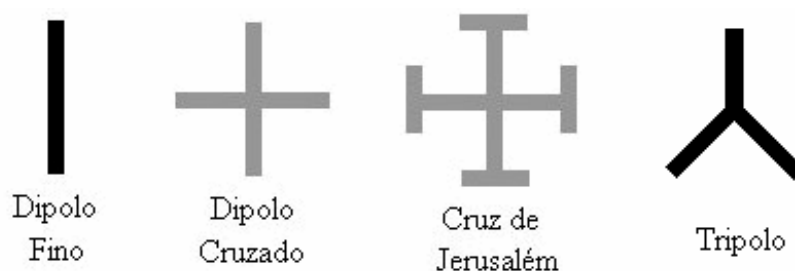


Figura 2 –Grupo 1: N – pólos conectados pelo centro.

O Grupo 2 é formado pelos elementos do tipo espira. Os tipos mais comuns são: as espiras quadradas (LANGLEY, 1982), quadradas duplas (LANGLEY, 1983), quadradas com grades (LEE, 1985) e anéis circulares concêntricos (PARKER, 1985). A Figura 3 mostra esses elementos.

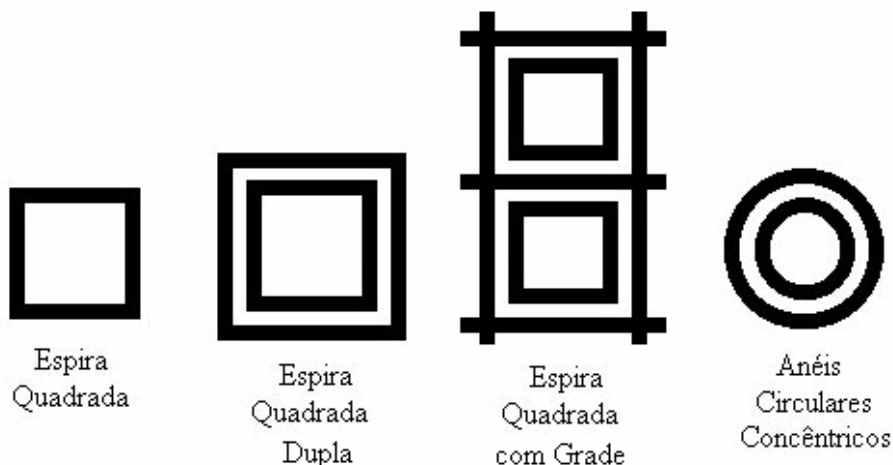


Figura 3 – Grupo 2: Espiras.

O Grupo 3 é formado pelos elementos do tipo sólido. Os tipos mais comuns são: os *patches* retangulares (WU, 1995) hexagonais (MUNK, 2000) e circulares (HUANG, 1994). Elementos desse grupo podem ser vistos na Figura 4.



Figura 4 – Grupo 3: Interior sólido.

O Grupo 4 é o dos elementos formados a partir de uma combinação dos elementos típicos. Um exemplo de combinação pode ser visto na Figura 5.

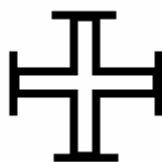


Figura 5 – Grupo 4: Combinações.

4. TÉCNICAS DE ANÁLISE

Várias técnicas numéricas têm sido usadas em análises de FSS. Há na literatura diversas técnicas de análise, efetuadas em anteparos periódicos.

Fórmulas aproximadas e simples foram desenvolvidas por alguns autores, para se determinar características de transmissão e de reflexão para uma FSS com *patches* condutores ou aberturas retangulares. Este tipo de análise diminui o tempo computacional e produz resultados satisfatórios para determinadas estruturas (ZARRILLO, 1987), (LEE, 1982). Entretanto, essas fórmulas têm suas limitações e, para determinadas aplicações, podem produzir resultados imprecisos.

Um método simples e que produz resultados satisfatórios é o modelo do circuito equivalente. Nesta análise os vários segmentos de fita que formam o elemento *patch* em um arranjo periódico são modelados como componentes indutivos ou capacitivos em uma linha de transmissão. Da solução deste circuito, são encontradas as características de transmissão e reflexão da FSS. Esta técnica usa uma aproximação quase-estática para calcular as componentes do circuito e permite uma análise computacional muito rápida (LANGLEY, 1982), (LANGLEY, 1983) e (LEE, 1985).

Outro método empregado é o da expansão modal (HUANG, 1994), que permite uma análise capaz de fornecer detalhes das repostas da frequência e da polarização, junto com o entendimento físico da sua operação.

Uma técnica bastante difundida, atualmente, é a técnica das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD). Esta técnica possibilita a análise de qualquer tipo de elemento, bem como a análise de perdas dielétricas e/ou magnéticas e a análise de estruturas não homogêneas (HARMS, 1994). A desvantagem desta técnica é o grande esforço computacional despendido.

Métodos híbridos estão sendo empregados na atualidade. Técnicas como interpolação racional de Krylov (WEILE, 2001), Método dos Momentos com o Método BI – RME (BOZZI, 2001) e Método dos Momentos em conjunto com elementos finitos (PELOSI, 2001), estão sendo muito usados na modelagem de elementos de forma complexa.

Técnicas de inteligência artificial também têm sido usadas. Algoritmos genéticos (CHAKRAVARTY, 2001), (MANARA, 1999) podem ser empregados na análise e/ou síntese de superfícies seletivas de frequência.

5. RESULTADOS

A Figura 6 ilustra a estrutura utilizada em todos os resultados obtidos nas análises seguintes. Foi considerada uma FSS com uma camada dielétrica e a geometria do *patch* foi mudada de uma curva para outra.

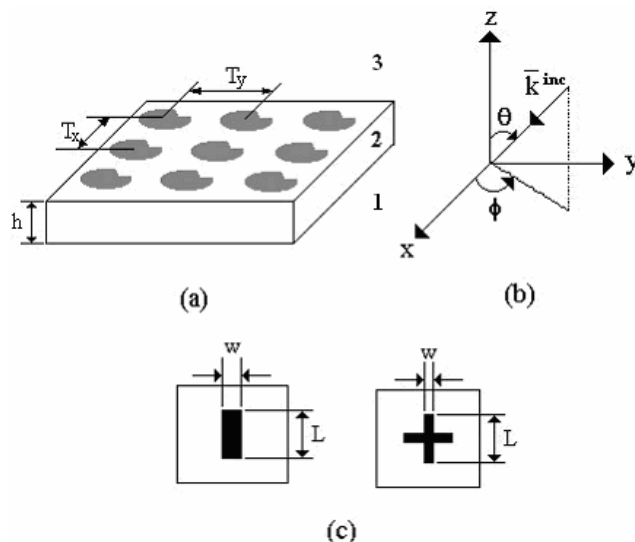


Figura 6 – Geometrias de FSS: (a) FSS sobre uma camada dielétrica, (b) onda plana incidente e (c) elementos considerados.

A Figura 7 compara resultados obtidos através do método dos momentos (MoM) com resultados obtidos por meio de algumas fórmulas aproximadas existentes na literatura, para uma FSS do tipo *freestanding* usando *patches* retangulares. As fórmulas utilizadas são as fórmulas apresentadas em (LEE, 1982), desenvolvidas pelos pesquisadores: Lee e Zarrillo (eq. 8a), Ulrich (eq. 10a) e Chen (eq. 11). As fórmulas LZ e a de Chen apresentam uma boa precisão, enquanto que a de Ulrich não apresenta resultados tão satisfatórios. Pode-se observar uma ótima concordância entre os resultados obtidos pela fórmula LZ e os resultados obtidos pelo MoM.

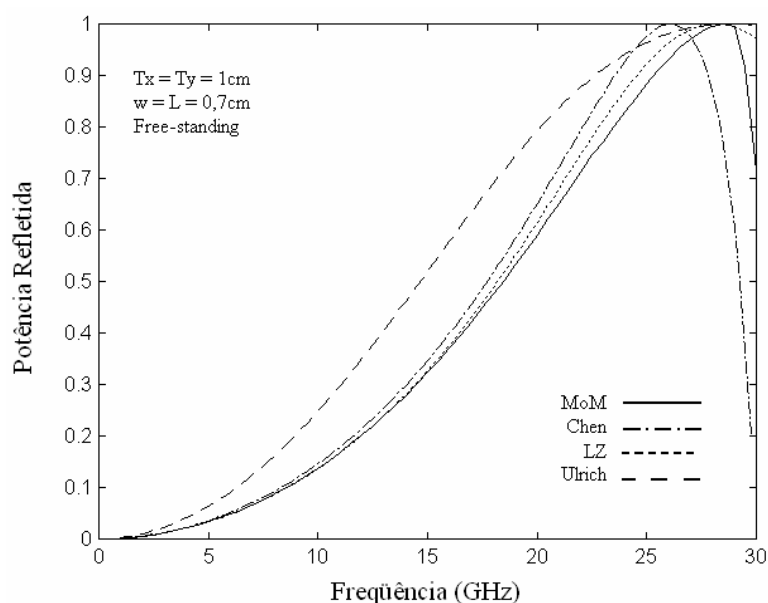


Figura 7 – Curvas da potência refletida de uma FSS *freestanding* usando *patches* retangulares comparando-se o método dos momentos (MoM) com fórmulas aproximadas.

A Figura 8 mostra curvas da potência refletida para FSS sobre diferentes dielétricos comparadas com a potência refletida em uma FSS do tipo *freestanding*. Foi considerada uma onda plana com incidência normal, analisada para os modos TE. Pode-se observar uma redução na frequência de ressonância inversamente proporcional aos valores de ϵ_r . Para a FSS do tipo *freestanding* a ressonância ocorre em $f = 20,6$ GHz e a estrutura possui uma largura de banda igual a 10,3 GHz. Quando se acrescenta uma camada dielétrica com $\epsilon_r = 2,2$ (PTFE), a ressonância ocorre em $f = 19,5$ GHz e a largura de banda diminui para 8,4 GHz. Para o quartzo (3,78), a ressonância ocorre em $f = 18,2$ GHz e a largura de banda é igual a 7,4 GHz. Esses resultados foram obtidos com o MoM.

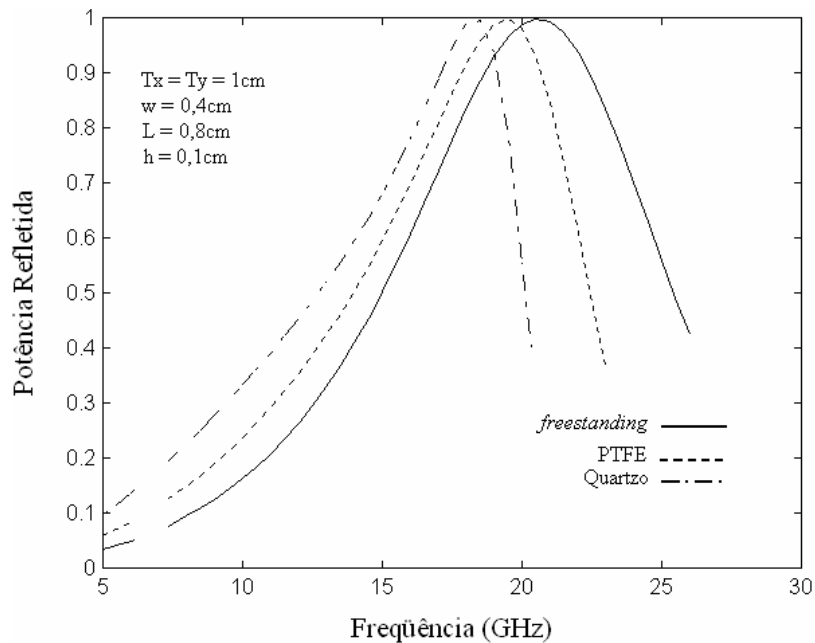


Figura 8 – Curvas da potência refletida para FSS usando elementos do tipo *patch* retangular sobre diferentes substratos.

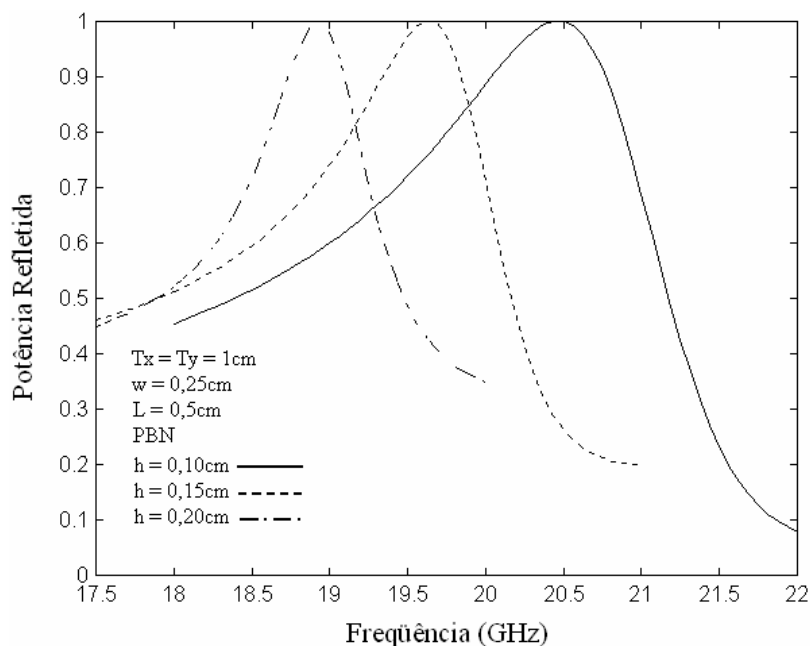


Figura 9 – Curvas da potência refletida para diferentes espessuras de substrato.

A Figura 9 mostra o efeito da espessura do substrato dielétrico na frequência de ressonância e na largura de banda de uma FSS sobre substrato dielétrico anisotrópico (PBN). As curvas foram traçadas para diferentes espessuras de substrato. Pode-se notar que a frequência de ressonância e a largura de banda variam inversamente proporcional à variação de h . Para $h = 0,1$ cm a ressonância ocorre em $f = 20,5$ GHz e $\Delta B = 2,8$ GHz, para $h = 0,15$ cm a ressonância ocorre em $f = 19,6$ GHz e $\Delta B = 2,3$ GHz enquanto para $h = 0,2$ cm a ressonância ocorre em $f = 18,9$ GHz e $\Delta B = 1,6$ GHz. Como se pode notar, a frequência de ressonância e a largura de banda diminuem com o aumento da espessura do substrato. Esses resultados foram obtidos com o MoM.

A Figura 10 mostra o efeito do ângulo de defasagem (Ω) na frequência de ressonância e na largura de banda para uma FSS usando elementos do tipo *patch* retangular sobre uma camada dielétrica anisotrópica. Pode-se observar que a máxima frequência de ressonância ocorre em $\Omega = 55^\circ$ ($f = 23,4$ GHz). Como se pode notar, a frequência de ressonância e a largura de banda variam diretamente proporcional com o ângulo de defasagem (Ω). Esses resultados foram obtidos com o MoM.

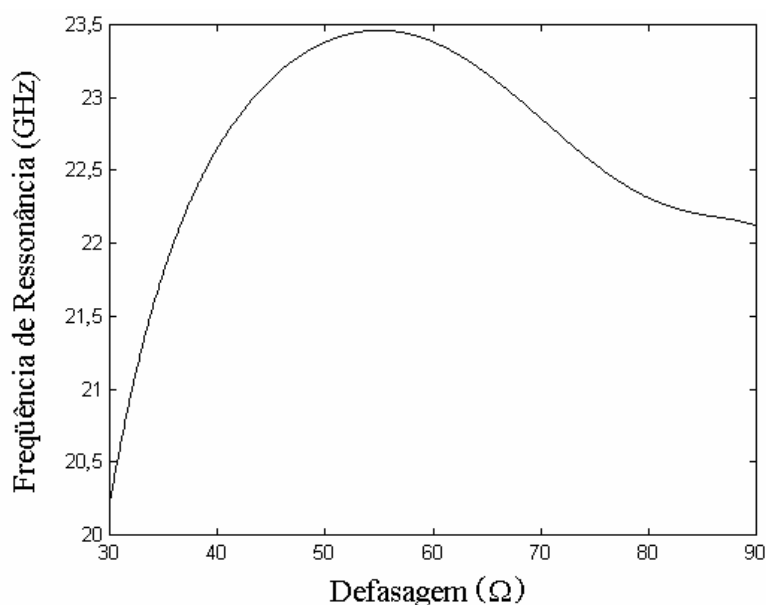


Figura 10 – Frequência de ressonância em função da defasagem Ω .

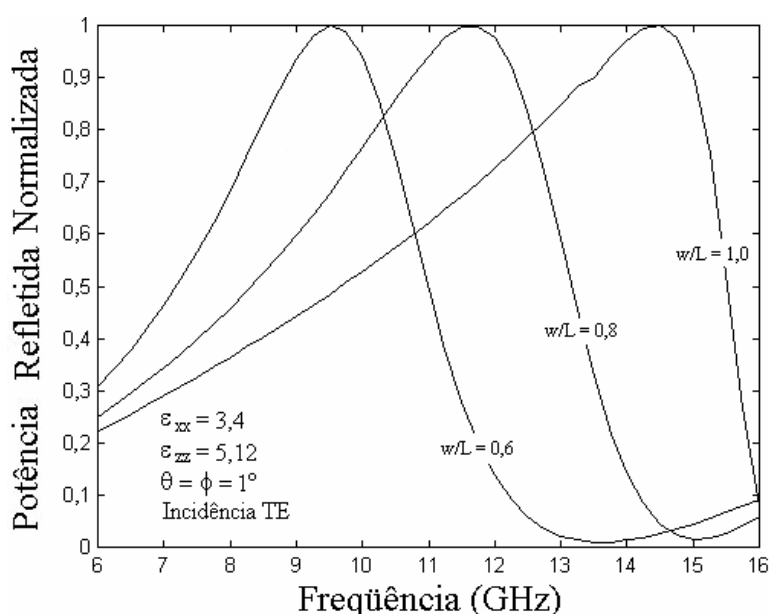


Figura 11 – Potência refletida de uma FSS em função da frequência, para diferentes valores de w/L .

A Figura 11 mostra resultados obtidos para a potência refletida de uma FSS sobre uma camada dielétrica anisotrópica, composta de um arranjo periódico de *patches* retangulares, em função da frequência, para diferentes valores da razão w/L . Foram considerados ângulos de incidência próximos da normal. Modos de incidência TE foram considerados. O material considerado na análise foi o PBN. A frequência de ressonância e a largura de banda variaram de maneira diretamente proporcional à razão w/L de acordo com os dados mostrados na Tabela 1. Pode-se observar que o fator de qualidade ($f_r/\Delta B$) praticamente não se altera. Esses resultados foram obtidos com o MoM.

Tabela 1 – Resultados obtidos para f_r , ΔB e Q em função da razão w/L .

w/L	f_r (GHz)	ΔB (GHz)	Q
0,6	9,6	3,9	2,46
0,8	11,7	5,0	2,34
1,0	14,5	6,0	2,42

A Figura 12 mostra resultados obtidos para a potência transmitida através de três superfícies seletivas de frequência. Pode-se observar o grau de flexibilidade de projeto das FSS. Foram consideradas três geometrias diferentes de elementos. As dimensões físicas também foram variadas. A periodicidade nas direções x e y foram consideradas iguais ($T_x = T_y = 1,6$ cm) e o material considerado foi igual para as três estruturas analisadas. Foram obtidas frequências de ressonância e larguras de bandas diferentes, para cada estrutura, como mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados obtidos para f_r , ΔB e Q considerando-se três geometrias diferentes.

Elemento utilizado	W (cm)	L (cm)	f_r (GHz)	ΔB (GHz)	Q
Dipolo fino	0,1	1,2	9,5	2,3	4,13
Dipolo cruzado	0,1	1,4	10,7	1,8	5,94
Patch retangular	0,6	1,2	11,5	3,8	3,03

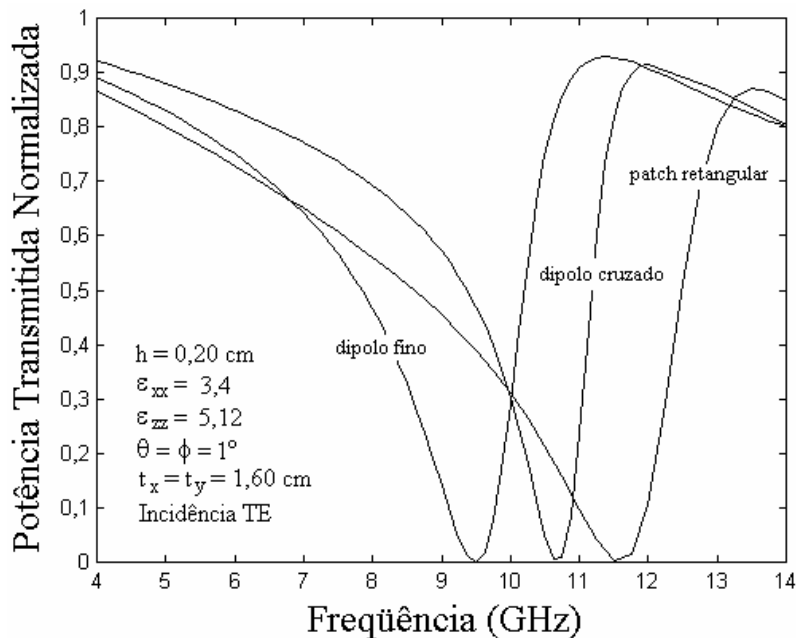


Figura 12 – Potência transmitida através de uma FSS composta de um arranjo periódico de *patches* em função da frequência, para diferentes tipos de elementos.

6. CONCLUSÕES

Pelo que foi apresentado, podê-se perceber que na análise de FSS's há uma flexibilidade dos parâmetros de projeto. Variações nas dimensões físicas da célula unitária, na espessura do substrato, no tipo de material dielétrico empregado, no ângulo de incidência, bem como no ângulo de defasagem entre as células, provocam alterações na frequência de ressonância e na largura de banda da estrutura projetada.

Técnicas numéricas aproximadas podem ser utilizadas para se obter um conhecimento aproximado da resposta em frequência da FSS, com um menor esforço computacional quando comparados com os métodos de onda completa. Após essa resposta aproximada, os métodos precisos podem ser usados para se obter uma resposta mais exata da estrutura.

Considerando a análise de FSS, o uso de camadas dielétricas anisotrópicas aponta para vantagens significativas. Conforme os resultados apresentados ao longo do trabalho, pôde ser observado que o uso de materiais anisotrópicos pode afetar as características de transmissão e de reflexão de uma FSS, introduzindo mais um parâmetro de projeto. Os materiais anisotrópicos podem apresentar ainda, uma baixa tangente de perdas, comparando-se com materiais isotrópicos, consistindo em uma vantagem a mais.

As estruturas periódicas encontram inúmeras aplicações diretas tais como: filtros angulares de microondas, radomes dielétricos, sub-refletores parabólicos, absorvedores de microondas, dentre outras. Além disso, o uso de FSS pode melhorar a resposta de antenas *patch* de microfita, aumentando sua largura de banda e melhorando a eficiência dessas antenas.

REFERÊNCIAS

- BOZZI, M., *et al.*, “Efficient analysis of quase-optical filters by a hybrid MoM/BI-RME method”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **49** (7), 1054 – 1064 (2001).
- CHANG, T. K., LANGLEY, R. J. e PARKER, E. A., “Active frequency selective surfaces”, *IEE Proceedings on Antennas and Propagation*, **143** (1), 62 – 66 (1996).
- CHAKRAVARTY, S., MITTRA, R. e WILLIAMS, N. R., “On the application of the microgenetic algorithm to the design of broad band microwave absorbers comprising frequency selective surfaces embedded on multilayered dielectric media”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **49** (6), 1050 – 1059 (2001).
- CHANG, T. K., LANGLEY, R. J. e PARKER, E. A., “Frequency selective surfaces on biased ferrite substrates”, *Electronics Letters*, **30** (15), 1193 – 1194 (1994).
- LIMA, A. C. C., LANGLEY, R. J. e PARKER, E. A., “Tunable frequency selective surfaces using liquid substrates”, *Electronics Letters*, **30** (4), 281 – 282 (1994).
- LANGLEY, R. J. e PARKER, E. A., “Equivalent circuit model for arrays of square loops”, *Electronics Letters*, **18** (7), 294-296 (1982).
- LANGLEY, R. J. e PARKER, E. A., “Double-square frequency selective surfaces and their equivalent circuit”, *Electronic Letters*, **19** (17), 675 - 677 (1983).
- LEE, S. W., ZARRILLO, G. e LAW, C. L., “Simple formulas for transmission through periodic metal grids or plates”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **30** (5), 904 – 909 (1982).
- LEE, C. K. e LANGLEY, R. J., “Equivalent circuit models for frequency selective surfaces at oblique angles of incidence”, *IEE Proceedings*, **132** (6), 395 – 399 (1985).
- MANARA, G., MONORCHIO, A. e MITTRA, R., “Frequency selective surfaces desing based on genetic algorithm”, *Electronic Letters*, **35** (17), 1400 – 1401 (1999).
- MITTRA, R., HALL, R. C. e TSAO, C., “Spectral-domain analysis of circular patch frequency selective surfaces”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **32** (5), 533 – 536 (1984).
- MITTRA, R., CHAN, C. H., e CWIK, T., “Techniques for analyzing frequency selective surfaces – a review”, *IEEE Proceedings*, **76** (12), 1593 – 1615 (1988).

- MUNK, B. A., “*Frequency Selective Surfaces – Theory and Design*”, John Willey and Sons, Inc., New York, 2000.
- PARKER, E. A. e VARDAXOLGOU, J. C., “*Plane-wave illumination of concentric-ring frequency selective surfaces*”, *IEE Proceedings*, **132** (3), 176 – 180 (1985).
- PELOSI, G., COCCHI, A. e SÉLLER, S., “*Electromagnetic scattering from infinite periodic structures with a localized impurity*”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **49** (5), 697 – 702 (2001).
- PHILIPS, B., PARKER, E. A., e LANGLEY, R. J., “*Active FSS in an experimental horn antenna switchable between two beamwidths*”, *Electronics Letters*, **31** (1), 1 – 2 (1995).
- HARMS, P., MITTRA, R. e KO, W., “*Implementation of the periodic boundary condition in the finite-difference time-domain algorithm for FSS structures*”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **42** (9), 1317 – 1324 (1994).
- HUANG, J., WU, T. K. e LEE, S. W., “*Tri-band FSS with circular ring elements*”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **42** (2), 166 – 175 (1994).
- SJOGREN, L. B. et al., “*Phased array operation of a diode grid impedance surface*”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **42** (4), 565 – 572 (1994).
- TSAO, C. H. e MITTRA R., “*Spectral-domain analysis of frequency selective surfaces comprised of periodic arrays cross dipoles and Jerusalem crosses*”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **32** (5), 478 – 486 (1984).
- WEILE, D. S., MICHIELSEN, E. e GALLIVAN, K., “*Reduced order modeling of multiscreen frequency selective surfaces using Krylov-based rational interpolation*”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **49** (5), 801 – 813 (2001).
- WEILE, D. S. e MICHIELSEN, E., “*Analysis of frequency selective surfaces through the blazing onset using Krylov model order reduction and Woodbury singularity extraction*”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **49** (10), 1470 – 1478 (2001).
- WU, T. K., “*Frequency selective surface and grid array*”, John Wiley & Sons, Nova York, E.U.A., 1995.
- ZARRILLO, G. e AGUIAR, K., “*Closed-Form low frequency solutions for electromagnetic waves through a frequency selective surface*”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **35** (12), 1406 – 1417 (1987).