

Projeto de Superfície Seletiva em Frequência com Estabilidade de Polarização e Angular para Aplicações na Banda *ISM*

José Filipe de Lima
Centro de Engenharias
Universidade Federal Rural do Sêmi-Árido
Mossoró, Brasil
filipe_lima2013@outlook.com

Humberto Dionísio de Andrade
Centro de Engenharias
Universidade Federal Rural do Sêmi-Árido
Mossoró, Brasil
humbertodionisio@ufersa.edu.br

Antônio Sérgio Bezerra Sombra
Departamento de Física
Universidade Federal do Ceará
Fortaleza, Brasil
sombra@fisica.br

Karoline Rodrigues Lima
Centro de Engenharias
Universidade Federal Rural do Sêmi-Árido
Mossoró, Brasil
karolinerodrigueslima@hotmail.com

Matheus Emanuel Tavares Sousa
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Natal, Brasil
matheus.sousa@ufersa.edu.br

Resumo—As redes de comunicação sem fio vem apresentando um rápido crescimento nos últimos anos, devido à flexibilidade que as mesmas oferecem para os usuários. Juntamente com esse crescimento, vem desenvolvendo-se técnicas para a melhoria da qualidade dos serviços oferecidos. Entre estas técnicas está o uso de Superfícies Seletivas em Frequência (*FSS*) para a modificação das condições de transmissão e reflexão do ambiente. Assim, este trabalho tem o objetivo de projetar e simular uma *FSS* para atuar como refletora de sinais *WLAN*, seguindo o padrão *IEEE 802.11n*. A estrutura foi simulada no software *HFSS* da *Ansys*[®], apresentando resultados satisfatórios.

Palavras-chave — Comunicação *indoor*, Redes *wireless*, Superfícies seletivas em frequência.

I. INTRODUÇÃO

AS redes de comunicação sem fio, ou *wireless*, apresentaram um rápido crescimento nos últimos anos [1][2]. Esse tipo de comunicação elimina a necessidade de cabos entre o transmissor e o receptor, proporcionando maior liberdade aos usuários. Essa tecnologia tem como base a propagação de ondas eletromagnéticas no meio sem fio. No caso da comunicação em ambientes *indoor*, o sinal transmitido passa pelos fenômenos da reflexão, refração, difração e espalhamento antes de chegar ao receptor [1].

Todos esses fenômenos influenciam na qualidade do sinal recebido, sendo que em ambientes de comunicação *indoor* típicos, a reflexão e a transmissão por meio dos materiais empregados na construção são os principais responsáveis pela perda de qualidade [1]. Recentemente têm surgido várias pesquisas para melhorar a qualidade do sinal de comunicação *indoor* por meio da modificação das características do ambiente, fazendo-se uso de Superfícies Seletivas em Frequência (*SSF*), ou do inglês *Frequency Selective Surfaces* (*FSS*) [3].

Essas estruturas atuam como filtros espaciais para ondas eletromagnéticas e apresentam características passa e rejeita-

faixa [3][4]. A Fig. 1 apresenta um exemplo de modificação das características do ambiente interno por meio do uso de *FSS* [1]. Resultados satisfatórios foram obtidos por [5] com a aplicação prática desta técnica. Na Fig. 1, TX representa o transmissor e RX o receptor. O ambiente é modificado por meio da *FSS* atuando como superfície refletora. O uso de tais estruturas permite a seletividade dos sinais bloqueados em função da sua frequência de operação, o que não é possível com um refletor comum.

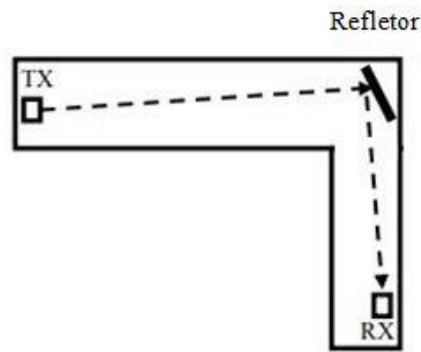


Fig. 1. Modificação do ambiente de comunicação *indoor* por meio de *FSS*.

Neste trabalho é apresentada uma *FSS* para bloqueio de sinais da rede *WLAN*, conforme o padrão *IEEE 802.11n*, para aplicação em ambientes de comunicação *indoor*. A estrutura proposta tem o objetivo de bloquear os sinais nas frequências de 2,4 GHz e 5,0 GHz.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção são apresentados conceitos básicos de superfícies seletivas em frequência e seu funcionamento como filtros espaciais.

A. Superfícies seletivas em frequência

FSS são um arranjo periódico de *patches* condutores ou aberturas, capazes de atuar como filtros espaciais para ondas eletromagnéticas [4][6]. As estruturas do tipo *patch* apresentam o comportamento de um filtro rejeita-faixa, enquanto que as do tipo abertura possuem a característica de

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – (CAPES) Brasil – Código de financiamento 001.

um filtro passa-faixa. A Fig. 2 apresenta uma *FSS* do tipo *patch* e uma do tipo abertura [1]. A parte condutora é representada em laranja na Fig. 2, sendo representado o comportamento do coeficiente de transmissão (S_{21}) como uma função da frequência.

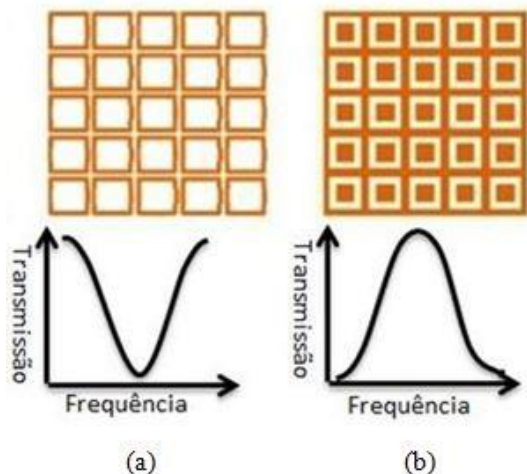


Fig. 2. Comportamento das *FSS*: (a) Tipo *patch* (b) Tipo abertura.

Tomando como exemplo uma *FSS* do tipo *patch*, a mesma começa a atuar como filtro rejeita-faixa quando o seu coeficiente de transmissão assume valores abaixo de -10 dB, enquanto que a frequência de ressonância é determinada quando este atinge o seu menor valor [3]. As *FSS* apresentadas na Fig. 2 possuem elementos do tipo espira quadrada simples. Porém, há uma grande variedade de tipos de elementos, apresentando características particulares de desempenho [4].

No entanto, um elemento de qualidade deve apresentar estabilidade angular, ou seja, pouca variação na sua frequência de ressonância para diferentes ângulos de incidência da onda eletromagnética [4][7]. Neste trabalho o elemento escolhido foi à espira quadrada dupla, para realizar o bloqueio de sinais nas frequências especificadas anteriormente, pois a mesma apresenta estabilidade angular e característica *dual band* [8].

B. Espira quadrada dupla

A Fig. 3 apresenta a espira quadrada dupla, juntamente com os parâmetros físicos considerados para dimensionamento e análise, juntamente com seu circuito equivalente [9].

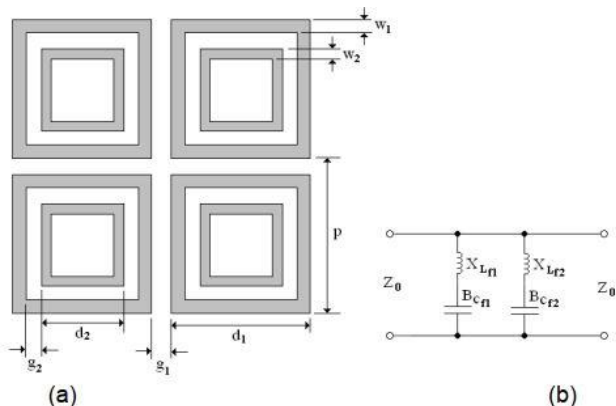


Fig. 3. Espira quadrada dupla: (a) Parâmetros físicos (b) Circuito equivalente.

O Modelo do Circuito Equivalente (MCE) é simples e exige menos esforço computacional do que os de onda completa [6]. Este último tem como base as equações propostas por *Marcuvitz*. Com base no circuito da Fig. 3(b) têm-se o seguinte conjunto de Equações [8][9]:

$$\frac{X_{Lr1}}{Z_0} = 2(X_{L11} || X_{L12}) \frac{d_1}{p} \quad (1)$$

$$\frac{B_{cr1}}{Z_0} = 0,75 B_{c1} \frac{d_1}{p} \quad (2)$$

$$\frac{X_{Lr2}}{Z_0} = X_{L13} \frac{d_2}{p} \quad (3)$$

$$\frac{B_{cr2}}{Z_0} = \left(\frac{B_{c1} B_{c2}}{B_{c1} + B_{c2}} \right) \frac{d_2}{p} \quad (4)$$

Onde

$$X_{L11} = F(p, w_1, \lambda_1, \phi) \quad (5)$$

$$X_{L12} = F(p, w_2, \lambda_2, \phi) \quad (6)$$

$$B_{c1} = 4\epsilon_r F(p, w_1, \lambda_1, \theta) \quad (7)$$

$$B_{c2} = 4\epsilon_r F(p, w_2, \lambda_2, \theta) \quad (8)$$

Sendo Z_0 a impedância do espaço livre, λ_1 corresponde ao comprimento de onda da frequência de ressonância da espira externa, enquanto que λ_2 está associado a espira interna. Já ϵ_r corresponde à permissividade relativa do substrato utilizado. Os símbolos ϕ e θ representam o ângulo de incidência para o modo Transversal Elétrico (TE) e Magnético (TM), respectivamente. Mais detalhes sobre a função F do conjunto de equações apresentado anteriormente podem ser encontrados em [8][9].

III. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados os métodos e o software utilizado para o projeto e simulação da estrutura proposta.

A. Dimensionamento da *FSS*

A *FSS* foi dimensionada e otimizada por meio do conjunto de Equações de 1 a 8, implementando-se um algoritmo em *loop*, para encontrar as dimensões ideais das espiras. Tais dimensões são encontradas quando a espira externa e interna, ressoam nos intervalos de frequência de 2,40 GHz a 2,5 GHz e 5,72 GHz a 5,85 GHz, respectivamente. A Fig. 4 apresenta as dimensões obtidas para a *FSS* em mm.

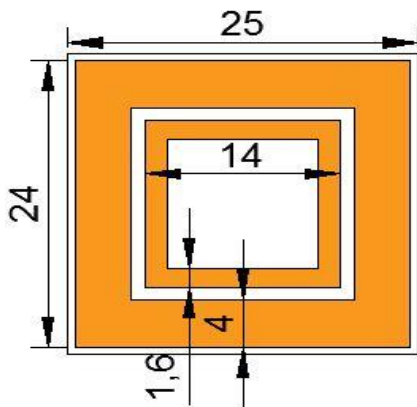


Fig. 4. Dimensões da FSS proposta em mm.

Na próxima seção são apresentadas as especificações de simulação da estrutura.

B. Simulação

A estrutura foi simulada usando-se o *Ansoft software High Frequency Structure Simulator (HFSS®)* versão 19. A simulação foi realizada no intervalo de frequência de 1 GHz a 8 GHz com passo de 0,0155 GHz. Foi utilizada como substrato uma placa de FR4 cujas especificações estão apresentadas na Tab. I.

TABELA I. PARÂMETROS DO FR4.

| Parâmetro | Valor |
|-------------------------------------|---------|
| ϵ_r | 4,40 |
| Tangente de perdas ($\tan\delta$) | 0,02 |
| Espessura | 1,56 mm |

A Fig. 5 apresenta a estrutura no ambiente de simulação.

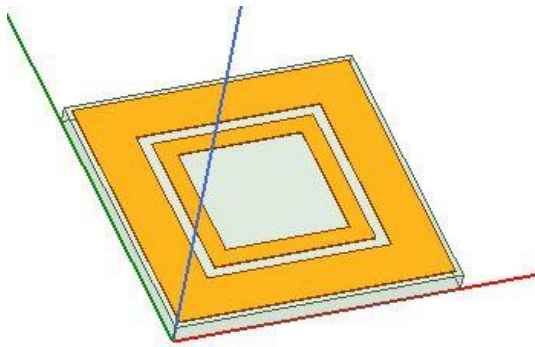


Fig. 5. FSS no ambiente de simulação.

Após a modelagem a estrutura foi simulada no *HFSS*, sendo os resultados obtidos apresentados na próxima seção.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos nas simulações.

A. Frequências de ressonância da estrutura

A Fig. 6 apresenta o coeficiente de transmissão da FSS para uma incidência normal da onda eletromagnética.

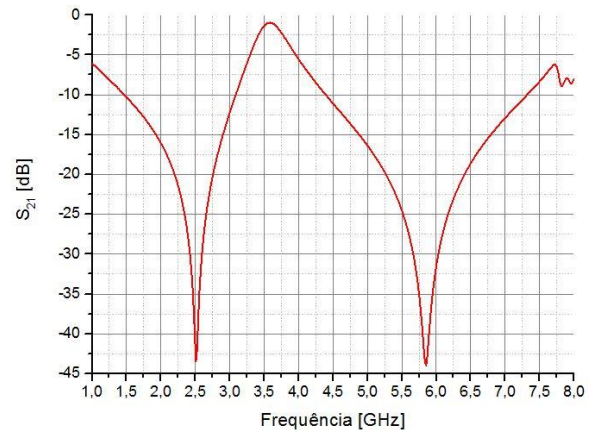


Fig. 6. Coeficiente de transmissão da FSS.

A FSS apresentou resultado satisfatório na simulação, ressoando no intervalo de frequência apropriado. A primeira frequência de ressonância foi $f_1 = 2,50$ GHz com $S_{21} = -43,10$ dB, atuando como filtro rejeita-faixa de 1,50 GHz a 3,08 GHz. A segunda frequência de ressonância foi $f_2 = 5,84$ GHz com $S_{21} = -43,70$ dB, atuando no intervalo de 4,42 GHz a 7,29 GHz.

A estrutura apresentou desempenho satisfatório para a incidência normal, porém foi analisado seu desempenho para diferentes ângulos de incidência. Essa situação é bastante comum em ambientes de comunicação *indoor* [1][3][5].

B. Análise de estabilidade angular

A estabilidade angular da estrutura foi analisada variando-se o ângulo de incidência de 0° a 75° , com passo 15° . Essa variação foi realizada para os modos TE e TM. A Fig. 7 apresenta o resultado para o modo TE.

A FSS apresentou desempenho de estabilidade angular satisfatório para o modo TE. Apesar de variação na frequência de ressonância, a mesma continuou atuando como filtro rejeita-faixa nos intervalos de frequência especificados. Houve o surgimento de novas frequências de ressonância, sendo esse efeito mais acentuado para $\theta = 75^\circ$. Os efeitos da variação do ângulo de incidência foram mais acentuados na frequência de 5,0 GHz.

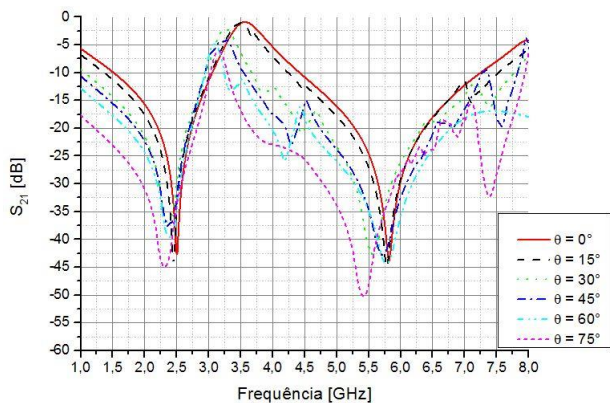


Fig. 7. Análise de estabilidade do modo TE.

A Fig. 8 apresenta os resultados da análise de estabilidade angular para o modo TM. A FSS apresentou desempenho de estabilidade angular satisfatório. O ângulo que apresentou maior variação na frequência de ressonância foi $\phi = 60^\circ$. Para a incidência de $\phi = 75^\circ$, a FSS deixou de atuar no intervalo especificado para a frequência de 5,0 GHz. Entretanto, a mesma apresentou desempenho satisfatório em todos os demais ângulos.

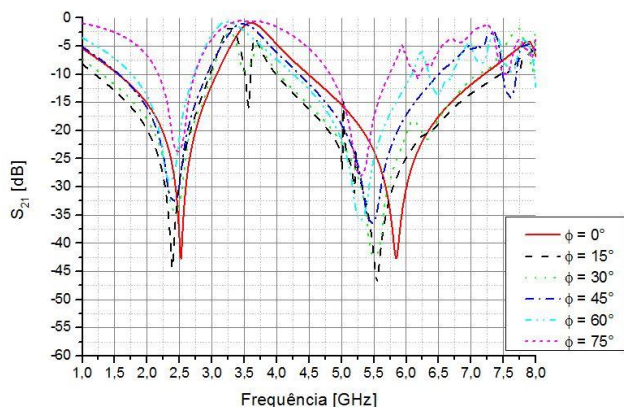


Figura 8. Análise de estabilidade do modo TM.

A Tab. II apresenta o ângulo que apresentou maior variação na frequência de ressonância e a porcentagem em relação à incidência normal.

TABELA II. RESUMO DA ANÁLISE DE ESTABILIDADE ANGULAR.

| Frequência | Modo | Varição máxima | Ângulo de maior variação |
|------------|------|----------------|--------------------------|
| 2,4 GHz | TE | 7,2% | $\theta = 75^\circ$ |
| | TM | 6,0% | $\phi = 60^\circ$ |
| 5,0 GHz | TE | 7,2% | $\theta = 75^\circ$ |
| | TM | 9,4% | $\phi = 60^\circ$ |

Como pode ser visto na Tab. II, apesar do ângulo $\phi = 75^\circ$ ter ressoado fora do intervalo para a frequência de 5,0 GHz, o mesmo não apresentou a maior variação na frequência de ressonância.

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado o projeto e simulação de uma FSS, aplicada à melhoria da qualidade do sinal de redes WLAN. Tal melhoria pode ser alcançada por meio da modificação das características do ambiente de comunicação indoor, utilizando as propriedades refletoras da FSS nas faixas de frequência desejadas. Por meio de simulações, chegou-se a conclusão de que a estrutura apresentou resultados satisfatórios de estabilidade angular e polarização para incidência normal, semelhantes aos obtidos por [5].

Como trabalho futuro propõe-se a construção de protótipos, para a realização de medições experimentais. Pode-se ainda realizar a modificação de um ambiente, analisando-se os efeitos na qualidade do sinal. Melhorar a estabilidade angular da estrutura por meio de aspectos construtivos, como espaçamento entre as espiras e permissividade relativa do substrato é uma proposta de trabalho bastante interessante.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do CNPq, Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) e do Grupo de Estudo e Pesquisa em Eletromagnetismo Aplicado e Telecomunicações (GEPEAT).

REFERÊNCIAS

- [1] N. Qasem "Enhancing Wireless Communication System Performance Through Modified indoor environments" Doc. thesis, Dept. Electron. Eng., Loughborough Univ., London, England, 2012.
- [2] B. Sanz-Izquierdo, J. -. Robertson, E. A. Parker and J. C. Batchelor, "Small FSS arrays for Indoor Communications," 2008 International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas and Novel Metamaterials, 2008, pp. 466-469, doi: 10.1109/IWAT.2008.4511379.
- [3] I. Lee, S. Cho, I. Hong and S. Yoon, "Improvement of communication performance in indoor environment using screen printed frequency selective film," 2017 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA), 2017, pp. 120-123, doi: 10.1109/CAMA.2017.8273374.
- [4] MUNK, Ben A. **Frequency Selective Surfaces: Theory and Design.** 3 ed. New York, United States: Wiley-Blackwell, 2000. 440 p. ISBN 978-0471370475.
- [5] M. Raspopoulos and S. Stavrou, "Frequency Selective Buildings Through Frequency Selective Surfaces," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 59, no. 8, pp. 2998-3005, Aug. 2011, doi: 10.1109/TAP.2011.2158779.
- [6] F. Costa, A. Monorchio and G. Manara, "Efficient Analysis of Frequency-Selective Surfaces by a Simple Equivalent-Circuit Model," in IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 54, no. 4, pp. 35-48, Aug. 2012, doi: 10.1109/MAP.2012.6309153.
- [7] F. Che Seman, R. Cahill, R. F. Fusco, G. Goussets "Design of a Salisbury Screen Absorber Using Frequency Selective Surface to Improve Bandwidth and Angular Stability Performance" IET Microwaves, Antennas and Propagation, Vol. 5, no. 2, pp. 149-156, Jan. 2012, doi: 10.1049/iet-map.2010.0072.
- [8] C. K. Lee, R. J. Langley "Equivalent-circuit models for frequency-selective surfaces at oblique angles of incidence" IET Microwaves, Antennas and Propagation, Vol. 132, no. 6, pp. 395-399, Oct. 1985, doi: 10.1049/ip-h-2.1985.0070.
- [9] CAMPOS, Antonio. **Superfícies Seletivas em Frequência: Análise e projeto.** 1 ed. Natal, Brasil: Ifrn Editora, 2009. 196 p. ISBN 978-85-89571-47-0