

Desenvolvimento de uma FSS Banda Dupla para Aplicações em Paredes Inteligentes

Alfrêdo Gomes Neto, Jefferson Costa e Silva, Juliete da Silva Souza, Marina de Oliveira Alencar, Thamyrís da Silva Evangelista

Resumo—Este artigo apresenta o desenvolvimento de uma FSS banda dupla para aplicações em paredes inteligentes, cobrindo as frequências correspondentes ao padrão WiFi, 2,4 GHz e 5,8 GHz. É utilizada a geometria estrela de quatro braços associada a anéis trapezoidais, o que permite uma maior flexibilidade no ajuste da resposta em frequência. São propostas as equações iniciais de projeto e discutidas as características da resposta em frequência. Os resultados numéricos e experimentais obtidos para quatro FSS apresentam uma boa concordância, obtendo-se, para a polarização x , um coeficiente de transmissão de pelo menos 15 dB de atenuação em cada banda de operação.

Palavras-Chave—FSS, Paredes Inteligentes, WiFi.

Abstract—This article presents the implementation of a dual band FSS for intelligent walls applications, covering the WiFi frequency bands, 2.4 GHz and 5.8 GHz. The four arms star geometry, associated to trapezoidal rings, are used, which allows a more flexible frequency response adjust. Initial project equations are introduced and the frequency response characteristics discussed. Numerical and measured results are presented for four FSS, verifying a good agreement, achieving, for the x polarization, a transmission coefficient of, at least, 15 dB of attenuation for each WiFi band.

Keywords— FSS, intelligent walls, WiFi.

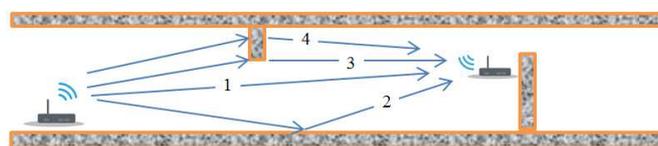
I. INTRODUÇÃO

Com o contínuo crescimento do número de usuários e da diversidade de oferta de serviços de comunicações, surge a necessidade cada vez maior de transmitir grandes quantidades de informações simultaneamente. Além do elevado número de aplicações voltadas para as comunicações móveis baseadas em *smartphones*, incluindo TV digital, geolocalização, entre outras, serviços como veículos não tripulados, *drones*, tornam-se cada vez mais comuns [1]–[5]. Juntamente com o avanço tecnológico e a consequente dependência dos sistemas de comunicação sem fio, prover cobertura para os usuários nas mais diversas localizações, bem como a segurança e privacidade da informação, são desafios para os projetistas dos sistemas de comunicações.

Assim sendo, no projeto de edificações as condições da propagação eletromagnética passam a chamar cada vez mais a atenção, principalmente em edificações com um grande número de ambientes de uso comum (escritórios, consultórios

Alfrêdo Gomes Neto, Jefferson Costa e Silva, Juliete da Silva Souza, Marina de Oliveira Alencar, Thamyrís da Silva Evangelista, Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado, GTEMA, do Instituto Federal da Paraíba, IFPB. E-mails: alfredogomes@ifpb.edu.br, jefferson@ifpb.edu.br, thamyris.tse@gmail.com, julietesouza25@gmail.com, marina.alencar.93@gmail.com. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo PPGEE-IFPB e IFPB editais 04-2016 e 26-2016.

médicos, lojas, etc.), por apresentarem uma elevada densidade de usuários, propagação em ambiente *indoor* e alta taxa de reuso de frequências; ou em ambientes que requerem um nível de segurança diferenciado (hospitais, presídios, embaixadas, etc.) [6]–[8]. Uma das dificuldades enfrentadas pelos projetistas é a complexidade dos mecanismos de propagação eletromagnética, com diferentes princípios, tais como: reflexão, difração, refração, além do sinal direto, Fig. 1. Considere-se ainda que padrões como o 802.11 e suas variações, comercialmente denominados WiFi, podem operar em diferentes faixas de frequência, com diferentes largura de banda.



(1) sinal direto, (2) sinal refletido, (3) sinal difratado, (4) sinal refratado

Fig. 1. Diferentes mecanismos de propagação em ambientes indoor.

Neste contexto, a utilização de superfícies seletivas em frequência, *frequency selective surfaces*, FSS, passivas ou reconfiguráveis, vem sendo intensivamente investigada como uma das opções para aumentar a eficiência dos sistemas de comunicação sem fio em ambientes *indoor*, assim como limitar a intensidade de sinais eletromagnéticos em ambientes específicos, através da implementação de paredes inteligentes [7]–[12]. As paredes inteligentes se baseiam na interferência em um ou mais princípios de propagação, favorecendo o sinal desejado e/ou evitando uma recepção indesejada, Fig. 2. Por apresentarem características tais como baixo custo, peso e volume reduzidos, as FSS vêm sendo utilizadas na implementação de paredes inteligentes.

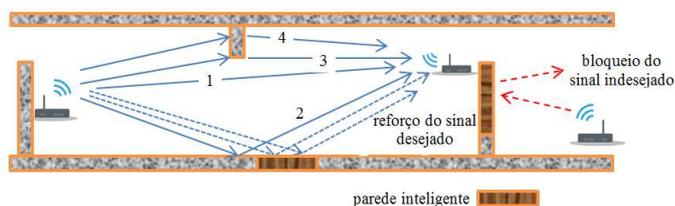


Fig. 2 Atuação das paredes inteligentes para melhoria do sistema de comunicação sem fio em ambiente *indoor*.

Basicamente, uma FSS consiste de um arranjo periódico, geralmente planar, distribuído em um substrato dielétrico, Fig. 3. Dentre outros fatores, a resposta em frequência da FSS depende da polarização da onda incidente, assim como do seu ângulo de incidência, da geometria do elemento básico do arranjo planar, da periodicidade dos elementos constituintes do

arranjo e da permissividade e espessura do substrato, Fig. 4, [13]–[16]. No projeto de uma FSS, a escolha da geometria do elemento básico é um dos principais pontos, onde aspectos como miniaturização, polarização e operação multibanda podem ser ajustados com relativa flexibilidade.

Quando é desejado se obter uma FSS com mais de uma banda de operação, ou ajustar a largura de banda, uma das opções é combinar diferentes geometrias, de maneira que os campos eletromagnéticos associados a cada geometria e suas respectivas ressonâncias, não estejam fortemente acoplados.

Neste artigo é apresentado o desenvolvimento de uma FSS banda dupla para aplicações em paredes inteligentes, com bandas de rejeição nas faixas de 2,4 GHz e 5,8 GHz, baseada na geometria estrela de quatro braços associada a anéis trapezoidais, Fig. 5. As geometrias estrela de quatro braços e anéis trapezoidais são descritas e suas propriedades discutidas, incluindo o efeito da polarização na resposta em frequência. As equações iniciais de projeto são propostas e resultados numéricos e experimentais são apresentados, observando-se uma boa concordância entre esses, obtendo-se um coeficiente de transmissão com no mínimo 15 dB de atenuação em cada uma das bandas de operação.

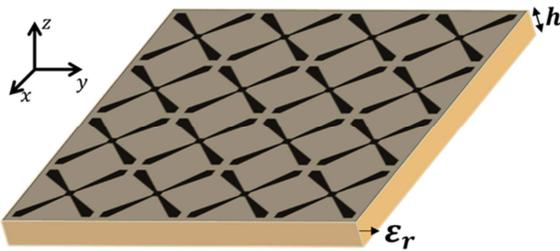


Fig. 3 Geometria básica de uma FSS [15].

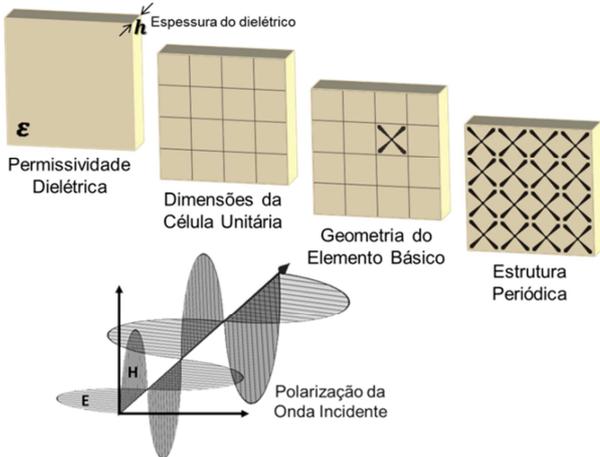


Fig. 4 Parâmetros que influenciam na resposta em frequência da FSS [13].

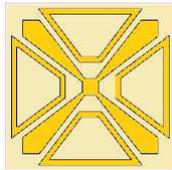


Fig. 5 Geometria estrela de quatro braços associada com anéis trapezoidais.

II. GEOMETRIAS ESTRELA DE QUATRO BRAÇOS E ANÉIS TRAPEZOIDAIS

A geometria estrela de quatro braços foi introduzida em [17], [18], apresentando características bastante atrativas para aplicações em sistemas reconfiguráveis e que requerem dimensões reduzidas. O seu projeto inicia-se com uma célula unitária com dimensões W_x e W_y , adicionando um *patch*

retangular convencional, com dimensões L_x e L_y e o ponto de comutação com dimensões S_x e S_y , localizado no centro do *patch*, Fig. 6 (a). As dimensões dos braços da estrela são definidas por L_x , L_y (que são as mesmas do *patch*), dx_1 e dy_1 e, posteriormente, são traçadas diagonais das extremidades dos braços da estrela até o canto oposto do ponto de comutação, Fig. 6 (b) e Fig. 6 (c). Finalmente, é retirada a parte da camada de metalização que não constitui a estrela de quatro braços e é obtida a geometria desejada, Fig. 6 (d).

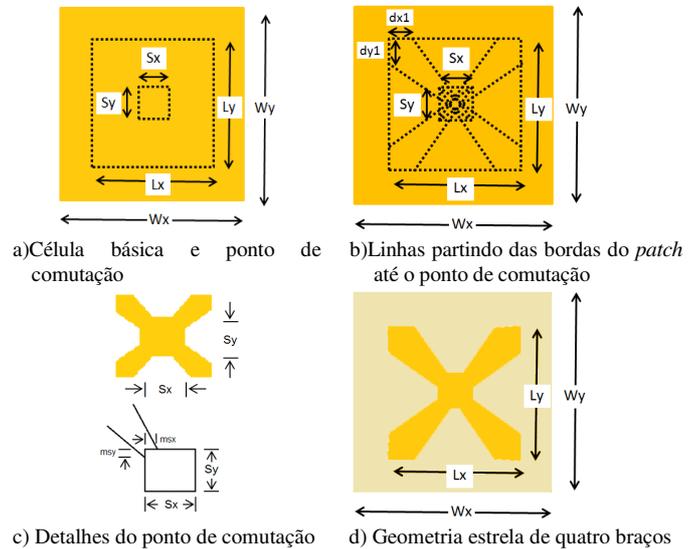


Fig. 6 Geometria estrela de quatro braços passo a passo.

O cálculo das dimensões da FSS é geralmente baseado na experiência do engenheiro de micro-ondas, juntamente com um processo de otimização numérica. Entretanto, expressões para obtenção das dimensões iniciais e estimativa das frequências de ressonância auxiliam no procedimento de projeto. Para a geometria estrela de quatro braços, (1) fornece uma boa aproximação para a frequência de ressonância, especialmente quando $h \ll \lambda_0$.

$$f_{res}(GHz) = \frac{0,3}{2L_{efe}} \quad (1)$$

sendo $L_{efe} = L_x + L_y$.

A geometria anéis trapezoidais é uma arranjo de quatro anéis trapezoidais, onde cada anel pode ser dimensionado separadamente. Entretanto, inicialmente será considerado que os quatro anéis possuem dimensões iguais, Fig. 7. Uma das características dessa geometria é que os anéis são excitados em pares, de acordo com a direção do campo elétrico, Fig. 8. Para uma dada polarização, a primeira ressonância é determinada pelos anéis cujas bases são perpendiculares à direção do campo elétrico, Fig. 9 (a). A segunda ressonância é dada pelos anéis cujas bases são paralelas à direção do campo elétrico, Fig. 9 (b). Note que, mesmo com anéis trapezoidais de mesmas dimensões, os pares de anéis apresentam comprimentos efetivos diferentes e, conseqüentemente, diferentes frequências de ressonância.

Não é evidente a obtenção das equações para o cálculo das frequências de ressonância dos anéis trapezoidais [19]. Ainda assim, neste trabalho são propostas duas equações aproximadas, (2) e (3), com as quais é possível determinar uma faixa de frequência na qual as duas primeiras ressonâncias podem estar contidas. Destaque-se que essas duas ressonâncias, em função das dimensões dos anéis trapezoidais, podem se degenerar em uma única ressonância. Além disso, reforça-se

que essas equações são equações iniciais de projeto, um primeiro passo, para uma posterior otimização numérica.

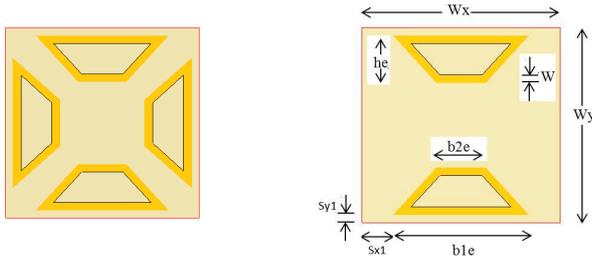


Fig. 7 Geometria anéis trapezoidais.

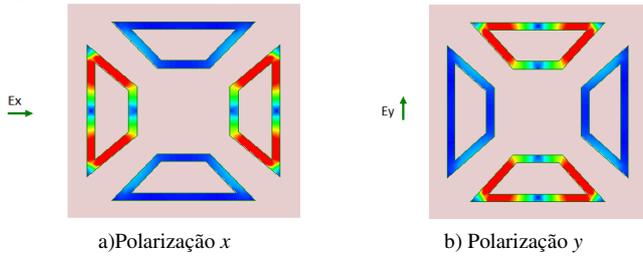


Fig. 8 Excitação dos anéis trapezoidais em função da polarização.

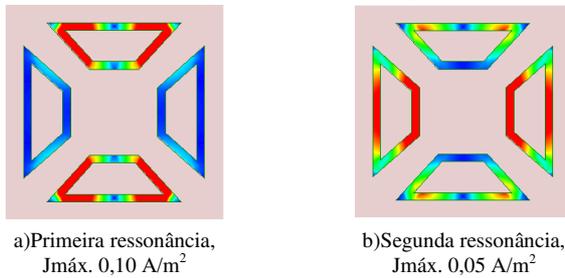


Fig. 9 Densidade de corrente elétrica (J , A/m^2) para as duas primeiras ressonâncias, polarização y .

$$f_{r1}(GHz) = \frac{0,3}{l_{1ef}\sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (2)$$

$$f_{r2}(GHz) = \frac{0,3}{l_{2ef}\sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (3)$$

sendo,

ϵ_{ref} a constante dielétrica efetiva para uma guia de ondas complanar, sem plano terra [20], com $s=10 \times h$ e a fita central igual a largura da fita do anel trapezoidal, W . Esse valor pode ser facilmente calculado usando um dos software disponíveis em [21], [22].

l_{1ef} é o comprimento médio do trapézio cujas bases são perpendiculares à direção do campo elétrico.

l_{2ef} é duas vezes o comprimento médio da base maior do trapézio cujas bases são paralelas à direção do campo elétrico.

Com as duas geometrias associadas, Fig. 5, os campos eletromagnéticos de cada geometria não estão completamente desacoplados, afetando a resposta em frequência da FSS. Como uma primeira aproximação, pode-se afirmar que a frequência de ressonância da estrela de quatro braços diminui em torno de 20%; a primeira ressonância do anel trapezoidal praticamente não se altera e a segunda frequência de ressonância dos anéis trapezoidais é mais afetado. Entretanto, como as dimensões dos anéis verticais e horizontais podem ser ajustadas separadamente, uma resposta em frequência adequada pode ser obtida.

III. RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

Com o objetivo de verificar as características da geometria proposta, inicialmente foram projetadas e fabricadas três FSS, tendo sido utilizado um substrato de baixo custo, FR-4 ($\epsilon_r = 4,4$, altura $h=1,50$ mm, tangente de perdas 0,02), Fig. 10. Cada FSS contém 8×8 células unitárias de $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$, o que corresponde a uma dimensão total de $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, Fig. 11. As dimensões são apresentadas na Tabela I, de acordo com as Fig. 6 e Fig. 7.

Os resultados numéricos foram obtidos usando o software comercial ANSYS Designer [23]. Os resultados medidos foram obtidos no Laboratório de Micro-ondas do GTEMA/IFPB, usando um analisador de redes Agilent E5071C e pares de antenas tipo corneta. Para a faixa de frequência de 4,5 GHz a 14,0 GHz, foram utilizadas antenas tipo corneta, Fig. 12. Para a faixa de frequência de 1,0 GHz a 7,0 GHz, as antenas tipo corneta foram substituídas por antenas tipo *double ridge guide horn*, SAS-571. A incidência da onda é considerada normal à superfície da FSS.

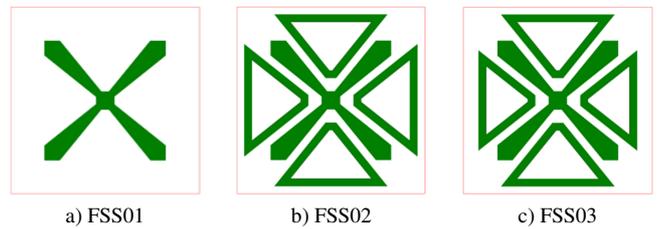


Fig. 10 FSS projetadas.

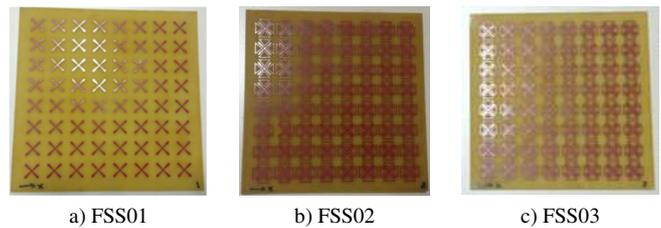


Fig. 11 FSS fabricadas.

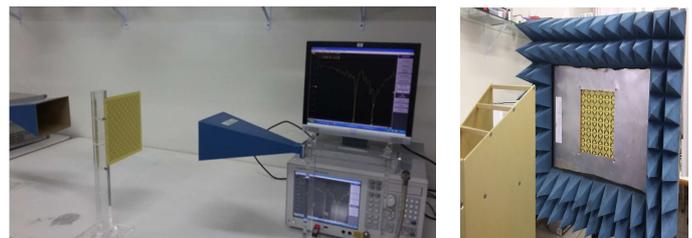


Fig. 12 Setup usado na caracterização experimental das FSS.

A FSS1 é uma FSS com a geometria estrela de quatro braços, sendo a resposta em frequência apresentada na Fig. 13. Como essa é uma geometria simétrica, apenas a polarização x é apresentada, observando-se uma excelente concordância entre resultados medidos e simulados. A primeira frequência de ressonância calculada usando (1), 4,69 GHz, apresenta uma diferença de menos de 1% quando comparada aos valores medido, 4,72 GHz, e simulado, 4,70 GHz, o que é um resultado muito bom. Neste trabalho, a segunda ressonância, em torno de 11,00 GHz, não será analisada. Na Tabela II é apresentado um resumo dos resultados obtidos.

TABELA I. DIMENSÕES DAS FSS 1, 2, 3 E 4

	FSS1	FSS2	FSS3	FSS4
$L_x = L_y$	16,0	16,0	16,0	27,4
$dx = dy$	2,0	2,0	2,0	2,0
$S_x = S_y$	2,4	2,4	2,4	2,0
$ms_x = ms_y$	0,7	0,7	0,7	0,7
$W_x = W_y$	25	25	25	34,0
W	1,0	1,0	1,0	1,0
S_{x1}	-	5,0	5,0/5,8*	4,7/6,5*
S_{y1}	-	1,0	1,0/2,0*	1,5/3,5*
b_{1e}	-	15,0	15,0/13,4*	24,6/21,0*
b_{2e}	-	1,4	1,4	3,0/10,2*
he	-	8,5	8,5/7,5*	12,0/6,0*

Obs: Todas as dimensões em mm. *Anéis trapezoidais verticais.

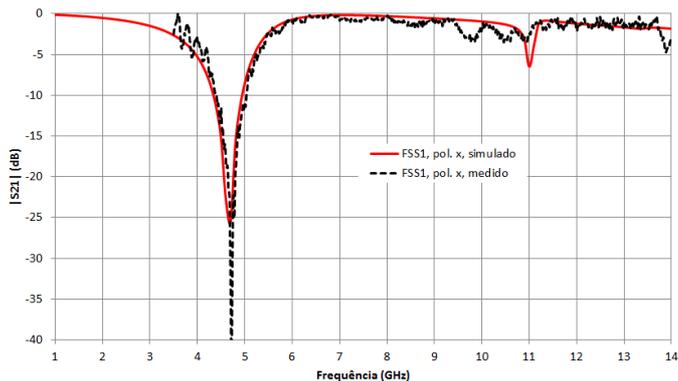


Fig. 13 Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz), FSS1, pol. x.

Na Fig. 14 é apresentada a resposta em frequência da FSS2, verificando-se uma boa concordância entre os resultados medidos e simulados. Tratando-se de uma estrutura simétrica, novamente os resultados são apresentados apenas para a polarização x. A primeira frequência de ressonância, 4,00 GHz/4,00 GHz (medido/simulado) está relacionada com a geometria estrela de quatro braços. As duas outras ressonâncias, 7,19 GHz/7,16 GHz e 8,33 GHz/8,60 GHz, são relacionadas aos anéis trapezoidais.

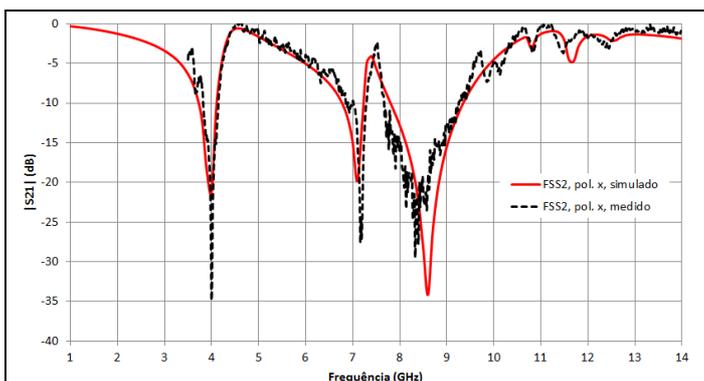


Fig. 14 Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz), FSS2, pol. x.

Para que fossem obtidas apenas duas frequências de ressonância, mantendo a primeira (4,00 GHz) praticamente inalterada, as dimensões dos anéis verticais foram reduzidas, FSS3. Como essa FSS não é mais simétrica, as respostas em frequência são diferentes para as polarizações x e y, sendo apresentadas nas Fig. 15 e Fig. 16, respectivamente. Para a polarização x, as novas dimensões dos anéis trapezoidais verticais deslocaram a ressonância para a frequência de ressonância dos anéis horizontais, cuja frequência de ressonância permaneceu praticamente inalterada, (8,56 GHz/8,79 GHz).

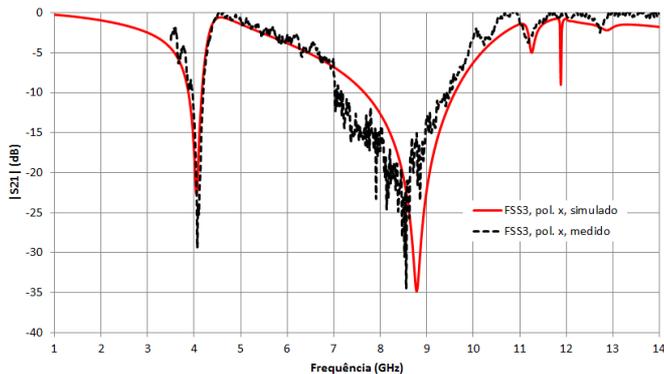


Fig. 15 Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz), FSS3, pol. x.

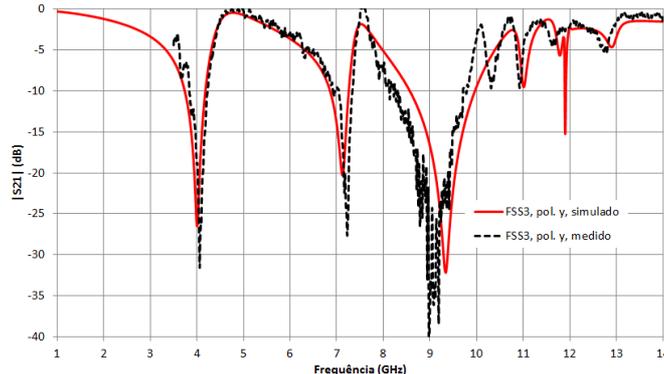


Fig. 16 Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz), FSS3, pol. y.

TABELA II. FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIA DAS FSS 1, 2, 3

	FSS1	FSS2	FSS3, pol.	FSS3, pol.
fr_1 (GHz), medido	4,72	4,00	4,07	4,06
fr_1 (GHz), simulado	4,70	4,00	4,06	4,00
fr_2 (GHz), medido	-	7,19	-	7,22
fr_2 (GHz), simulado	-	7,16	-	7,12
fr_3 (GHz), medido	-	8,33	8,56	8,78
fr_3 (GHz), simulado	-	8,60	8,79	9,34

A FSS com banda dupla de operação, para aplicações em paredes inteligentes, cobrindo as bandas de WiFi, FSS4, foi projetada usando o mesmo substrato, com 6×6 células unitárias de 34 mm \times 34 mm, correspondendo a uma dimensão total de 204 mm \times 204 mm, Fig. 17. As dimensões estão descritas na Tabela I. A ressonância na faixa de 2,4 GHz é determinada pela geometria estrela de quatro braços. As dimensões dos anéis trapezoidais foram ajustadas de maneira a obter apenas uma ressonância na faixa de 5,8 GHz. Note que, tratando-se de uma estrutura assimétrica, a polarização deve ser considerada. Nas Fig. 18 e Fig. 19 são apresentadas, respectivamente, as respostas em frequência obtidas para as polarizações x e y.

Para a polarização x, Fig. 18, observa-se uma boa concordância entre os resultados medidos e simulados, com apenas uma pequena diferença na segunda ressonância (5,61 GHz/5,72 GHz). Nas bandas de operação de WiFi, 2,4 GHz e 5,8 GHz, verifica-se um coeficiente de transmissão com no mínimo 15 dB de atenuação. Para a polarização y, observa-se novamente uma boa concordância entre resultados numéricos e simulados. Entretanto, as bandas de rejeição não correspondem às bandas de WiFi, o que é um resultado esperado, em função da assimetria da estrutura. Contudo, se necessário, essa desvantagem pode ser superada utilizando FSS com dupla camada.



Fig. 17 FSS com banda dupla de operação para aplicações em WiFi, FSS4 – Célula unitária e FSS fabricada.

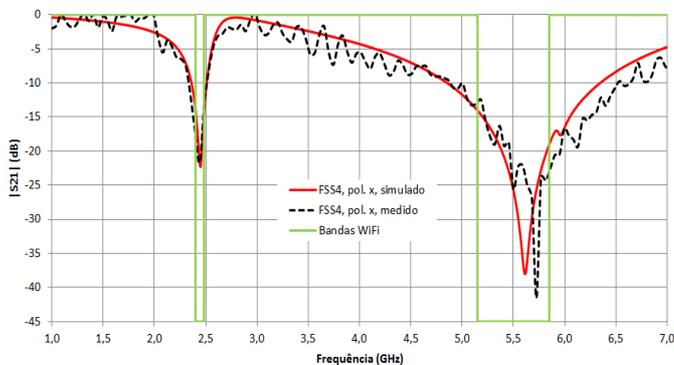


Fig. 18 Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz), FSS4, pol. x.

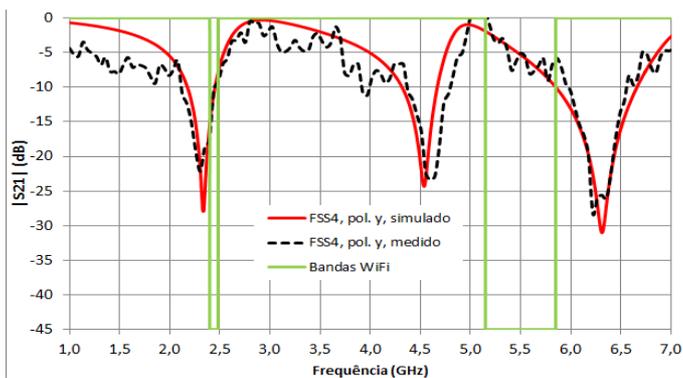


Fig. 19 Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz), FSS4, pol. y.

IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento de uma FSS com banda dupla de operação para aplicações em paredes inteligentes, cobrindo as bandas de WiFi. As equações iniciais de projeto foram propostas, assim como discutidas as características das respostas em frequência. Uma das vantagens da geometria proposta é que as ressonâncias associadas a cada geometria podem ser ajustadas separadamente, permitindo uma maior flexibilidade na determinação da resposta em frequência. Por outro lado, uma desvantagem é a dependência da resposta em frequência com a polarização.

Resultados numéricos e experimentais foram apresentados para quatro FSS, observando-se, de maneira geral, uma concordância muito boa, verificando-se um coeficiente de transmissão com, pelo menos, 15 dB de atenuação em cada banda de rejeição.

REFERÊNCIAS

[1] A. Clegg and A. Weisshaar Eason, "Future radio spectrum access," vol. 102, No. 3, *Proceedings of the IEEE*, pp. 239–241, March 2014.
 [2] ITU, "The impact of broadband on the economy: research to date and policy issues," April, 2012. Disponível em www.itu.int/broadband, consultado em 04/02/2016.

[3] Masaki Kitsunezuka, Kazuaki Kunihiro, and Muneo Fukaishi, "Efficient use of the spectrum," in *IEEE Microwave Magazine*, pp. 55–63, January/February, 2012.
 [4] Ya-Feng Liu, "Dynamic spectrum management: a complete complexity characterization," *IEEE Transactions on Information Theory*, pp. 392–403, vol. 63, January 2017.
 [5] Chiya Zhang, Wei Zhang, "Spectrum sharing for drone networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, pp. 136–144, vol. 35, January 2017.
 [6] Mohamad Omar Al Kalaa; Walid Balid; Hazem H. Refai; Nickolas J. LaSorte; Seth J. Seidman; Howard I. Bassen; Jeffrey L. Silberberg; Donald Witters, "Characterizing the 2.4 GHz Spectrum in a Hospital Environment: Modeling and Applicability to Coexistence Testing of Medical Devices," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, pp. 58–66, vol. 59, January 2017.
 [7] Ludek Subrt, Pavel Pechac, Andrea Vallecchi, Lee Ford, Richard Langley, Jonathan Rigelsford, "Advanced modelling of intelligent walls for indoor smart environments," in *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*, Hague, Netherlands, April 6–11, 2014, pp. 620–622.
 [8] Jiayin Roberts, Design of a Secure Electromagnetic Building, PhD. Thesis, The University of Sheffield, Sheffield, UK, 2014.
 [9] Marios Raspopoulos and Stavros Stavrou, "Frequency selective buildings through frequency selective surfaces," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 8, pp. 2998–3005, August, 2011.
 [10] Ghaffer I. Kiani, Kenneth L. Ford, Lars G. Olsson, Karu P. Esselle, and Chinthana J. Panagamuwa, "Switchable frequency selective surface for reconfigurable electromagnetic architecture of buildings," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 2, pp. 581–584, February, 2010.
 [11] In-Gon Lee, Ie-Pya Hong, "Frequency selective surface design for blinds applications," *2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Gothenburg, Sweden, April 8–12, 2013, pp. 2753–2755.
 [12] Mats Gustafsson, Anders Karlsson, António Pedro Pontes Rebelo, and Björn Widenberg, "Design of frequency selective windows for improved indoor outdoor communication," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 6, pp. 1897–1900, June, 2006.
 [13] John C. Vardaxoglou, Frequency Selective Surfaces – Analysis and Design, Research Studies Press, England, 1997.
 [14] B.A. Munk, Frequency-Selective Surfaces: Theory and design, Wiley, New York, 2000.
 [15] Nieremberg José Pereira de Lyra Ramos, Caracterização de Antena Tipo Refletor de Canto Utilizando Superfícies Seletivas em Frequência, Dissertação de Mestrado, IFPB, João Pessoa, PB, Brasil, 2016.
 [16] A. L. P. S. Campos, Superfícies Seletivas em Frequência – Análise e Projeto, Natal: IFRN Editora, 2009.
 [17] Alfrêdo Gomes Neto; Joabson Nogueira de Carvalho; André Nascimento da Silva; Hillner de Paiva Almeida Ferreira; Isaac Silva Sousa Lima; Jefferson Ideião Fernandes, "Four arms star: An useful geometry for switchable FSS," in Proc. Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC), 2013 SBMO/IEEE MTT-S International, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2013, pp. 1-5.
 [18] Isaac Silva Sousa Lima, Caracterização de FSS com Geometria em Forma de Estrela de Quatro Braços, Dissertação de Mestrado, IFPB, João Pessoa, PB, Brasil, 2014.
 [19] João Batista de Oliveira Silva, Desenvolvimento de Superfícies Seletivas em Frequência com Banda Dupla de Operação Baseadas na Geometria Estrela de Quatro Braços Associada a Anéis Trapezoidais, Dissertação de Mestrado, IFPB, João Pessoa, PB, Brasil, 2016.
 [20] R. Simons, Coplanar Waveguide Circuits, Components, and Systems, USA: Wiley, 2001.
 [21] AppCAD, <http://www.hp.woodshot.com>.
 [22] <http://www.microwaves101.com/encyclopedia/calcpw.cfm>.
 [23] <http://www.ansys.com>.