

# Investigação do Uso de Estruturas CSRR em Antenas de Microfita

Jefferson Costa e Silva, Marília Gabriela Alves Rodrigues Santos, Álef Huan Pereira Souto, Alfrêdo Gomes Neto

**Resumo**— Este trabalho tem por objetivo a investigação do uso de estruturas CSRR (*Complementary Split Ring Resonator*) no plano de terra de antenas de microfita, para utilização em sistemas de comunicações sem fio 4G/LTE na faixa de 2,5 GHz. Foram utilizadas duas geometrias para os elementos irradiantes das antenas, a circular e a retangular. Algumas equações iniciais foram utilizadas para o projeto das estruturas CSRR, seguido de um processo de otimização numérica. Dessa forma, foram realizadas as análises numérica e experimental das alterações nas características das antenas, principalmente na frequência de ressonância, largura de banda e diagrama de irradiação. Os resultados simulados foram obtidos utilizando o *software* comercial ANSYS, que utiliza o Método dos Momentos (MoM). Os resultados simulados e medidos das antenas com as estruturas SRR impressas em seu plano de terra foram comparados com os obtidos pelas antenas de microfita com *patch* circular e retangular e plano de terra convencional, observando-se um recuo na frequência de ressonância das mesmas, possibilitando o processo de miniaturização.

**Palavras-Chave**— Antena de Microfita, CSRR, 4G/LTE, Simulações, Medições.

**Abstract**— This work aims to investigate the use of CSRR (*Complementary Split Ring Resonator*) structures in the ground plane of microstrip antennas, for use in 4G/LTE wireless systems in the 2.5 GHz band. Two geometries for the radiating elements of the antennas, the circular and the rectangular, were used. Some initial equations were used to design the CSRR structures, followed by a numerical optimization process. In this way, the numerical and experimental analyzes of the changes in antennas characteristics were carried out, mainly in resonance frequency, bandwidth and radiation pattern. The simulated results were obtained using the commercial software ANSYS, which uses the Moment Method (MoM). The simulated and measured results of the antennas with the SRR structures printed on their ground plane were compared with those obtained by circular and rectangular patch antennas with a conventional ground plane, observing a reduction in their resonant frequency, allowing the miniaturization process.

**Keywords**— *Microstrip antenna, CSRR, 4G/LTE, Simulations, Measurements.*

## I. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da tecnologia de comunicação sem fio ocasiona uma demanda crescente por banda larga, alta eficiência, operação em diferentes faixas de frequência e tamanho de dispositivos reduzido. Assim, novos materiais têm sido desenvolvidos de modo a atender a todas essas demandas [1]-[3].

Os exemplos mais conhecidos de novas estruturas eletromagnéticas são os cristais fotônicos e os metamateriais, ou LHM (*Left-Handed Materials*), como é popularmente conhecido, por possuir índice de refração negativo. Estes últimos vêm adquirindo importância cada vez mais significativa devido a sua constituição ser feita por materiais artificiais estruturados que podem interagir com as ondas eletromagnéticas e controlá-las [4]. Um dos tipos desse material consiste em anéis concêntricos repartidos que podem exibir simultaneamente permissividade elétrica e permeabilidade magnética negativas, Fig. 1.

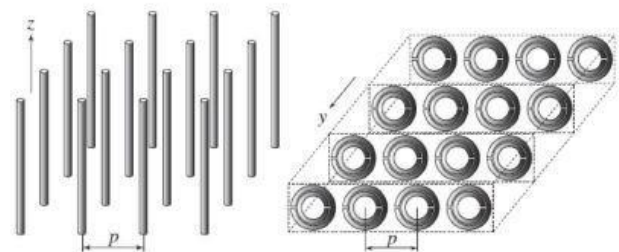


Fig. 1. Primeiros metamateriais propostos por Pendry [4].

As estruturas metamateriais têm sido extensivamente utilizadas em antenas e dispositivos de micro-ondas como auxílio para que os mesmos possam alcançar novas características [5]-[7]. Dessa forma, procura-se associar as propriedades já observadas das antenas de microfita convencionais, às vantagens das estruturas SRR impressas em seu plano de terra, possibilitando a alteração das características de operação da antena original, tais como: redução do acoplamento mútuo, operação multi banda, melhoria da diretividade e ganho, aumento da largura de banda, melhoria dos coeficiente de reflexão e diagrama de radiação, dentre outros [8]-[11].

Uma maneira convencional de se reduzir o tamanho de uma antena de microfita é utilizando substrato com alto valor de constante dielétrica. Mas essa abordagem ocasiona altas perdas devido a presença de ondas de superfície. Este trabalho investiga o uso de antenas de microfita, com *patches* de geometrias retangular e circular, projetadas para a frequência de ressonância de 2,5 GHz, a mesma utilizada pelos sistemas de comunicações sem fio 4G/LTE (*Long Term Evolution*), com estruturas CSRR impressas em seu plano de terra, de modo a alterar suas características ressonantes, através da utilização das propriedades do metamaterial. A geometria da estrutura CSRR é descrita e são apresentadas equações iniciais de projeto, que fornecem os valores das dimensões dos anéis

para uma posterior otimização numérica. Após a obtenção dos resultados numéricos, as antenas foram construídas e caracterizadas experimentalmente e os resultados medidos são comparados com os obtidos numericamente, observando-se um considerável recuo da frequência de ressonância e boa concordância entre os mesmos. Isto torna as estruturas apresentadas potencialmente atrativas para diversas aplicações nos atuais sistemas de telecomunicações, em particular, para os sistemas de comunicações sem fio 4G/LTE.

## II. ESTRUTURAS SRR E CSRR

Os SRRs (*Split Ring Resonator*) são estruturas artificiais utilizadas para se conseguir alcançar as mesmas propriedades dos metamateriais, tendo sido sugeridos inicialmente por [4]. Cada elemento do SRR consiste em anéis concêntricos repartidos que podem exibir simultaneamente permissividade elétrica e permeabilidade magnética negativas, Fig. 2 (a). Tal estrutura, denominada de ressonador de anéis concêntricos repartidos, apresenta ressonâncias tanto magnéticas como elétricas. A ressonância magnética é induzida pela abertura dos anéis e também pela região de separação entre os anéis interno e externo, os quais constituem elementos capacitivos. Devido à repartição dos anéis essas estruturas podem suportar comprimentos de onda maiores que a dimensão dos anéis. Dadas as propriedades peculiares dos circuitos com esses metamateriais, uma estrutura periódica formada por anéis concêntricos repartidos pode ser utilizada como plano de terra em antenas de microfita. Quando os anéis são muito menores que o comprimento de onda, o SRR pode ser visto como um circuito LC. Então, uma permeabilidade efetiva magnética ( $\mu_{eff}$ ) pode ser encontrada. As estruturas usadas neste trabalho foram baseadas no CSRR (Fig. 2 (b)), que constituem um arranjo de aberturas.

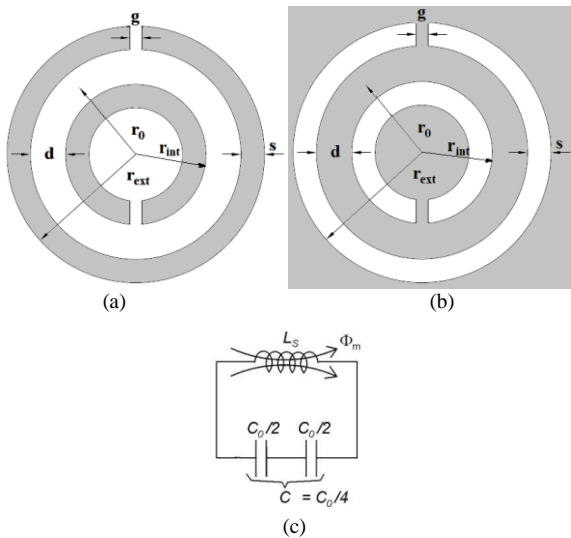


Fig. 2 Geometrias das estruturas (a) SRR, (b) CSRR e (c) circuito equivalente.

Em uma estrutura SRR, como a distância entre os dois anéis é pequena (ocorrendo um acoplamento significativo entre eles), ela é considerada eletricamente pequena e pode ser aplicada uma análise quase-estática para se deduzir suas indutância e capacitância. Tal análise foi realizada em [12] e

[13]. Quando o SRR é excitado por um campo magnético externo variável no tempo, aplicado perpendicularmente à estrutura, os cortes em cada anel fazem com que a corrente elétrica flua de um anel para o outro através da abertura entre elas. Essa abertura entre os anéis comporta-se, portanto, como uma capacitância distribuída, e todo o SRR pode ser representado pelo circuito equivalente mostrado na Fig. 2 (c), onde  $L$  é a indutância da SRR e  $C_o/2$  é a capacitância associada a cada metade da SRR (com relação à linha contendo a partição de cada anel). Esta capacitância é  $C_o = 2\pi r_o C_{pul}$ , onde  $r_o$  é o raio médio do SRR, e  $C_{pul}$  é a capacitância por unidade de comprimento ao longo da fenda entre os anéis. A capacitância total deste circuito é a resultante em série da capacitância de ambas as metades SRR, ou seja,  $C_o/4$ . Portanto, a frequência de ressonância  $\omega_o$  é dada por [14], [15]:

$$\omega_o = \sqrt{\frac{2}{\pi r_o LC}} \quad (1)$$

onde  $C = C_o/4$  é a capacitância entre os anéis do SRR e  $r_o$  é o raio médio da região de separação entre os anéis. Como revelado em (1), a frequência de ressonância  $\omega_o$  depende dos parâmetros geométricos da estrutura.

A capacitância dessas estruturas são obtidas a partir de (2),

$$C = \frac{\beta}{\omega Z} \quad (2)$$

onde  $\beta$  é a constante de fase e  $Z$  é a impedância de um par de linhas de transmissão de microfita acopladas sobre um substrato dielétrico. Este método de cálculo é rápido e dá precisão suficiente para o modelo atual. No entanto, melhores resultados poderiam ser obtidos utilizando métodos mais específicos que podem levar em conta os efeitos da curvatura da estrutura. No entanto, essa melhoria só teria sentido se outros aspectos do modelo, tal como o cálculo da indutância do anel, também fossem aprimorados.

O cálculo da indutância total do SRR não é tão simples, embora a realização de algumas aproximações possa fornecer uma simplificação considerável, com certa precisão. De acordo com as considerações anteriores sobre o comportamento das correntes ao longo dos anéis do SRR, pode-se assumir que a indutância total dos dois anéis do SRR pode ser aproximada pela indutância de um único anel equivalente cujo raio é o raio médio dos anéis do SRR considerado e largura  $s$  igual a largura de cada anel original. A indutância pode então ser calculada a partir de (3)

$$L = \frac{\mu_o \pi^2}{I^2} \int_0^\infty [I(k)]^2 k^2 dk \quad (3)$$

onde  $I(k)$  é a transformada de Fourier da função da expressão da corrente no anel  $I(r)$ , definida por (4)

$$I(r) = \int_r^\infty J_{s,\varphi}(r') dr' \quad (4)$$

onde  $J_{s,\varphi}$  é a densidade de corrente de superfície no anel. Por questões práticas, assumiu-se um valor constante para  $J_{s,\varphi}$  no anel, ou seja,

$$J_{s,\varphi} = \begin{cases} \frac{I}{s} & \text{para } r_0 - \frac{s}{2} < r < r_0 + \frac{s}{2} \\ 0 & , \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (5)$$

onde  $I$  é a intensidade de corrente total no anel. Para o presente trabalho, as equações (1) a (5) orientaram os passos iniciais do projeto das estruturas CSRR, porém, ajustes numéricos foram necessários para se chegar às dimensões finais.

### III. RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

Foram projetadas duas antenas de microfita, ambas com frequência de ressonância de 2,5 GHz. A primeira com *patch* retangular, com dimensões  $L = 27,8$  mm e  $W = 37$  mm, Fig. 3 (a). A segunda possui *patch* com geometria circular de raio  $a = 16,3$  mm, Fig. 3 (b). Os resultados numéricos foram obtidos utilizando o programa computacional ANSYS Designer 8.0 [16]. Para todas as simulações são adotadas as seguintes especificações:

- a) Substrato FR4, de espessura 1,6 mm, constante dielétrica  $\epsilon_r = 4,4$  e tangente de perdas 0,02;
- b) Largura da linha de alimentação  $w_0 = 3,0$  mm;
- c) Faixa de frequência de 1 GHz a 4 GHz;
- d) O limiar do coeficiente de reflexão (parâmetro  $|S_{11}|$ ) utilizado para se determinar a banda passante das antenas foi de -10 dB

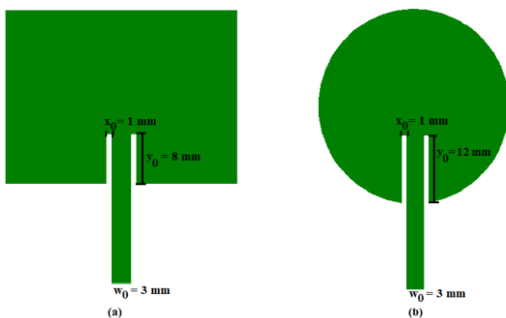


Fig. 3 Antenas projetadas (a) *patch* retangular, (b) *patch* circular.

As estruturas CSRR projetadas, conforme a Fig. 3 (b), possuem as dimensões mostradas na Tabela 1:

TABELA I. DIMENSÕES DA ESTRUTURA CSRR.

Dimensão	Valor (mm)
$r_{ext}$	8,0
$r_{int}$	5,0
$s$	1,0
$d$	2,0
$g$	1,0

As antenas e estruturas simuladas foram fabricadas e caracterizadas experimentalmente, com os mesmos parâmetros utilizados na etapa de simulação. As medições foram realizadas no Laboratório de Micro-ondas do GTEMA/IFPB, utilizando um analisador de redes Agilent E5071C, Fig. 4.

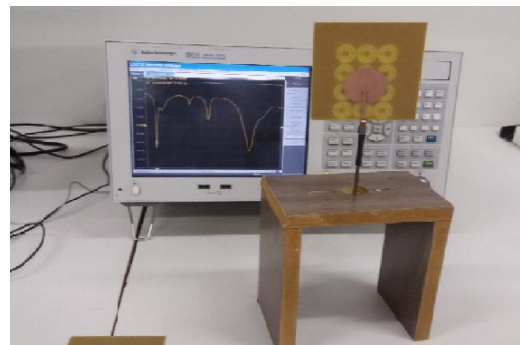


Fig. 4 Setup de medição

Na Fig. 5 são mostrados os valores simulados e medidos da resposta em frequência (parâmetro  $S_{11}$ ) da antenna de microfita com *patch* retangular e com um arranjo de 9 elementos da estrutura CSRR projetada, impressos em seu plano de terra. Também é feita a comparação com os resultados medidos e simulados da resposta em frequência para a antenna de microfita com *patch* retangular convencional. Nesta situação pode ser observada um significativo recuo dos dois primeiros modos ressonantes, com a introdução das estruturas CSRR no plano de terra da antenna. Esse recuo chega a 50,1% para o primeiro modo ressonante.

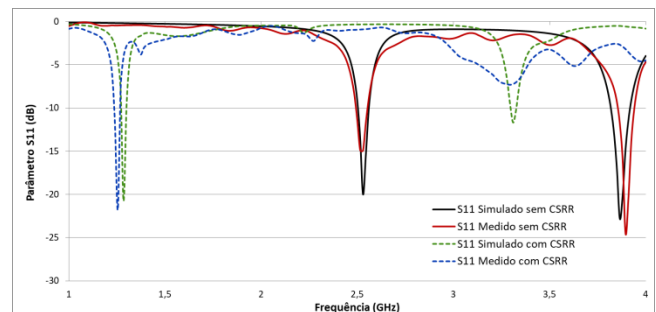
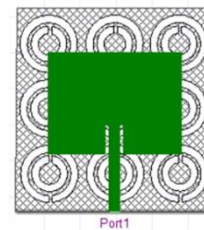


Fig. 5 Resposta em frequência da antenna de microfita com *patch* retangular e com arranjo de 9 elementos CSRR impresso no plano de terra.

Na Fig. 6 são mostrados os valores simulados e medidos da resposta em frequência (parâmetro  $S_{11}$ ) da antenna de microfita com *patch* circular e com um arranjo de 12 elementos da estrutura CSRR projetada, impressos em seu plano de terra. Também é feita a comparação com os resultados medidos e simulados da resposta em frequência para a antenna de microfita com *patch* circular convencional. Nesta situação também pode ser observada um significativo recuo dos primeiros modos ressonantes, com a introdução das estruturas CSRR no plano de terra da antenna. Esse recuo chega a 49,2% para o primeiro modo ressonante.

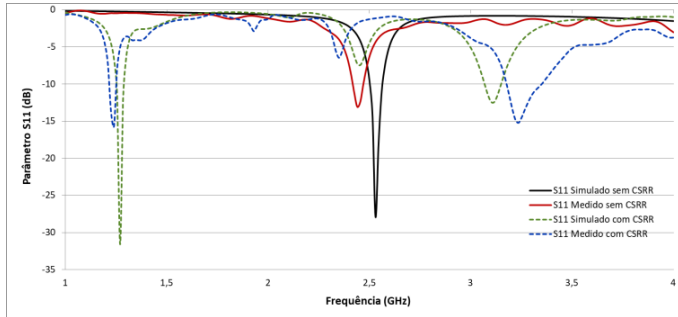
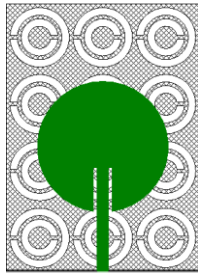


Fig. 6 Resposta em frequência da antena de microfita com patch circular e com arranjo de 12 elementos CSRR impresso no plano de terra.

Uma das possíveis características alcançadas a partir do uso de estruturas CSRR é o aumento da largura de banda. Para alcançar esse objetivo, para a antena de microfita com patch retangular, foi feito um ajuste no número de estruturas CSRR impressas em seu plano de terra. Na Fig. 7 são mostrados os valores simulados e medidos da resposta em frequência da antena de microfita com patch retangular e com um arranjo de 8 elementos da estrutura CSRR projetada, impressos em seu plano de terra. Quando comparado com os resultados medidos e simulados da resposta em frequência para a antena mostrada na Fig. 4, pode ser observado um aumento na largura de banda do primeiro modo ressonante. Esse aumento chega a 333,3%. Quando comparado à antena com patch retangular convencional, esse aumento é de 116,67%.

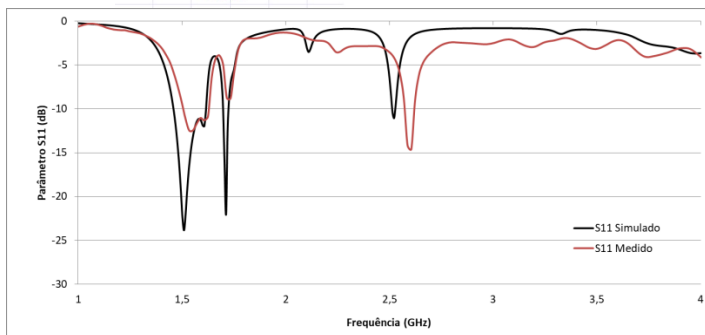
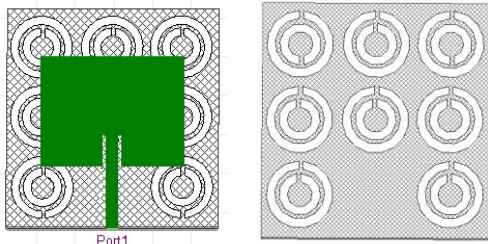


Fig. 7 Resposta em frequência da antena de microfita com patch retangular e com arranjo de 8 elementos CSRR impresso no plano de terra.

Na Tabela II é apresentado um resumo dos resultados obtidos para as estruturas apresentadas. Pode-se observar que os valores obtidos através de simulação numérica e os obtidos experimentalmente são bastante concordantes.

TABELA II RESULTADOS PARA AS ANTENAS PROJETADAS

TIPO DE ANTENA	Valor simulados		Valores medidos	
	1ª Freq. Ressonância (GHz)	BW (MHz)	1ª Freq. Ressonância (GHz)	BW (MHz)
Retangular sem CSRR	2,530	60,0	2,53	60,0
Retangular com 9 CSRR	1,285	30,0	1,255	30,0
Retangular com 8 CSRR	1,51	157,5	1,53	130,0
Circular sem CSRR	2,53	50,0	2,44	55,0
Circular com 12 CSRR	1,27	40,0	1,24	35,0

Na Fig. 8 são mostrados os diagramas de irradiação das antenas com patch retangular e plano de terra convencional (Fig. 7 (a)) e com 9 CSRR impressos no plano de terra, (Fig. 7 (b)). Observa-se que com as estruturas CSRR no plano de terra o diagrama de irradiação da antena se torna quase omnidirecional, adequada para uso pelo padrão 4G/LTE.

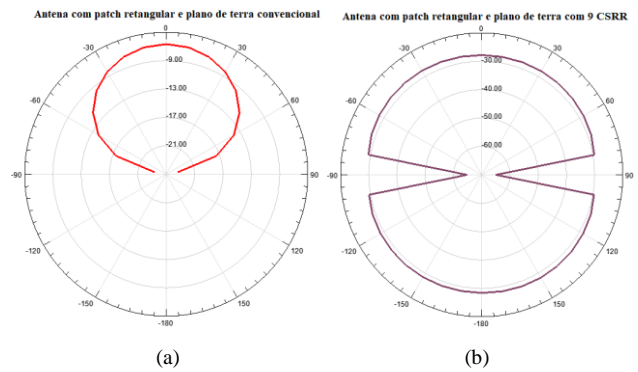


Fig. 8 Diagrama de irradiação da antena com patch retangular e plano de terra convencional (a) e plano de terra com 9 CSRR (b).

Na Fig. 9 são mostrados os diagramas de irradiação das antenas com patch circular e plano de terra convencional (Fig. 8 (a)) e com 9 CSRR impressos no plano de terra, (Fig. 8 (b)). Observa-se, como no caso anterior, que com as estruturas CSRR no plano de terra o diagrama de irradiação da antena se torna quase omnidirecional, adequada para o padrão 4G/LTE.

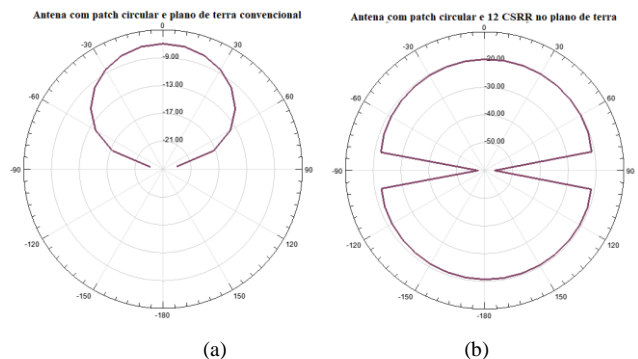


Fig. 9 Diagrama de irradiação da antena com patch circular e plano de terra convencional (a) e plano de terra com 12 CSRR (b).

terra convencional (a) e plano de terra com 12 CSRR (b).

#### IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizada a investigação do uso de estruturas CSRR (*Complementary Split Ring Resonator*) no plano de terra de antenas de microfita, para utilização em sistemas de comunicações sem fio 4G/LTE na faixa de 2,5 GHz. Foram construídas duas antenas, uma com geometria retangular para o elemento irradiante e a outra com geometria circular. Para o projeto das estruturas CSRR foram utilizadas algumas equações iniciais, seguida de um processo de otimização numérica. Na sequência, foram realizadas as análises numérica e experimental das alterações nas características das antenas projetadas, principalmente na frequência de ressonância, largura de banda e diagrama de irradiação, devido a influência das estruturas CSRR quando incorporadas aos respectivos planos de terra. Os resultados numéricos e experimentais das antenas com as estruturas SRR foram comparados com os obtidos pelas antenas com patch circular e retangular e plano de terra convencional, observando-se um recuo na frequência de ressonância das mesmas, possibilitando o processo de miniaturização. Este comportamento possibilita a operação na faixa de frequência de 2,5 GHz (a mesma utilizada pelo sistema 4G/LTE), reduzindo-se as dimensões do elemento irradiador a partir da aplicação das estruturas CSRR apresentadas. Os resultados medidos e simulados para todas as estruturas se apresentaram bem concordantes. Através de ajustes no arranjo das estruturas CSRR impressas no plano de terra foi possível o aumento da largura de faixa da antena com *patch* retangular. Foi observado também que a utilização das estruturas CSRR no plano de terra faz com que a antena passe a operar com um diagrama de irradiação quase omnidirecional, característica também adequada para a aplicação desejada (4G/LTE).

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao suporte recebido do IFPB, através da Chamada Interconecta 01/2017-IFPB e do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação – PIBITI/CNPq, Edital 12/2017-IFPB.

#### REFERÊNCIAS

- [1] W. Li, J. Valentine, "Metamaterial Perfect Absorber Based Hot Electron Photodetection", *Nano Letters*, vol. 14, pp 3510-3514, 2014.
- [2] M. M. Islam, et al., "A Miniaturized Antenna with Negative Index Metamaterial Based on Modified SRR and CLS Unit Cell for UWB Microwave Imaging Applications", *The 9th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics*, vol. 8, pp 392-407, 2015.
- [3] D. Vrba, D. B. Rodrigues, J. Vrba (Jr.), P. R. Stauffer, "Metamaterial antenna arrays for improved uniformity of microwave hyperthermia treatments," *PIER Progress In Electromagnetics Research*, vol. 156, pp. 1–12, 2016.
- [4] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, W. J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear

- phenomena", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, pp 2075-2084, 1999.
- [5] S. K. Sharma, R. K. Chaudhary, "Dual-band metamaterial-inspired antenna for mobile applications, *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 57, pp 1444-1447, 2015.
- [6] R. Rajkumar, K. U. Kiran, "Gain enhancement of compact multiband antenna with metamaterial superstrate", *Optical And Microwave Technologies*, pp. 91-98, 2017.
- [7] H.-X. Xu, G.-M. Wang, M.-Q. Qi, "A miniaturized triple-band metamaterial antenna with radiation pattern selectivity and polarization diversity", *PIER Progress In Electromagnetics Research*, vol. 137, pp. 275–292, 2013.
- [8] E.R. Iglesias, O.Q. Teruel e L. I. S. Sanchez, "Mutual coupling reduction in patch antenna arrays by using a planar EBG structure & a multiplayer dielectric substrate", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, volume 56, no.6, pp. 1648-1655, 2008.
- [9] R. S. Daniel, R. Pandeeswari, S. Deivalakshmi, "A metamaterial absorber based high gain directional dipole antenna," *IEEE 2nd International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP)*, 2017.
- [10] S. V. Pushpakaran, et al, "A metamaterial absorber based high gain directional dipole antenna," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, pp. 1-7, 2018.
- [11] M. Shafi, A. K. Jha, M. J. Akhtar, "Dual band RF sensor for testing of magnetic properties of materials using meandered line SRR," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 272, pp. 170-177, 2018.
- [12] R. Marques, F. Martín, M. Sorolla, *Metamaterials with Negative Parameters: Theory, Design and Microwave Applications*, John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2008.
- [13] R. Marques, F. Medina, R. Rafii-El-Idrissi, "Role of bianisotropy in negative permeability and left handed metamaterials". *Physical Review B*, vol. 65, pp. 144440-144446, 2002.
- [14] M. Durán-Sindreu, J. Naqui, F. Paredes, J. Bonache e F. Martín, "Electrically Small Resonators for Planar Metamaterial", *Applied Sciences*, vol. 2, pp. 375-395, 2012.
- [15] R. Marques, F. Mesa, J. Martel, F. Medina, "Comparative Analysis of Edge- and Broadside-Coupled Split Ring Resonators for Metamaterial Design—Theory and Experiments", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 51, pp. 2572-2581, 2003.
- [16] <http://www.ansys.com>