

CARACTERIZAÇÃO DE METAMATERIAIS NA FAIXA DE MICRO-ONDAS

Fellipe Augusto de Oliveira, Pedro Luiz Lima Bertarini
LaPSE, FEELT, Universidade Federal de Uberlândia. Patos de Minas – Minas Gerais.
fellipe3000@ufu.br, bertarini@ufu.br

Resumo – Este trabalho tem como o objetivo o projeto e caracterização de meios metamateriais na faixa de micro-ondas. A partir dos parâmetros de espalhamento (S) das células metamateriais, foi utilizado o método do desdobramento de fase para encontrar os valores de permissividade elétrica, permeabilidade magnética e índice de refração efetivos desse meio. Além disso, é mostrado como alterações nas propriedades geométricas da célula metamaterial influenciam as propriedades eletromagnéticas efetivas do meio. Foram considerados cinco cenários e observou-se que a frequência de ressonância do metamaterial aumenta à medida que o gap aumenta, atingindo aproximadamente os seguintes valores: 10,3 GHz (0,05mm), 10,8 GHz (0,15mm), 11,1 GHz (0,25mm), 11,3 GHz (0,35mm) e 11,6 GHz (0,45mm). Além disso, em todos esses cenários o índice de refração efetivo do meio assumiu valores negativos para frequências maiores que a frequência de ressonância.

Palavras-Chave – Metamateriais, Faixa de Frequências de Micro-ondas, Extração das Propriedades Eletromagnéticas, Índice de Refração Negativo.

METAMATERIALS CHARACTERIZATION IN MICROWAVE FREQUENCIES

Abstract - This work aims to design and characterize metamaterials in the microwave frequencies. From the scattering parameters (S) of metamaterials cells, we used the phase unwrapping method to find the effective values of electric permittivity, magnetic permeability and refractive index of the medium. Furthermore, it is shown how geometrical changes in the metamaterial cell influences the effective electromagnetic properties of the medium. Five scenarios were considered, and it was observed that the metamaterial resonance frequency increases as the gap increases, reaching approximately the following values: 10.3 GHz (0.05mm), 10.8 GHz (0.15 mm), 11, 1 GHz (0.25 mm), 11.4 GHz (0.35mm) and 11.6 GHz (0.45mm). Moreover, in all these scenarios the effective refractive index of the medium assumed negative values for frequencies greater than the resonant frequency.

Keywords - Metamaterials, Microwave Frequencies, Extraction of the Electromagnetic Properties, Negative Refractive Index.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente tem sido observado a necessidade e o interesse em materiais que apresentam propriedades físicas incomuns, porque abrem-se novos caminhos para ciência e tecnologia [1]. Dentre esses materiais, os metamateriais, dotados de propriedades físicas que não são encontradas na natureza, são materiais produzidos artificialmente, e representam uma emergente e promissora área de pesquisa [2]. Entretanto, o primeiro trabalho a respeito dos metamateriais foi publicado em 1968 pelo russo Victor G. Veselago [3], que os chamou por *Left Handed Materials* (LHM). Desde então pesquisadores de todo o mundo foram atraídos pelo assunto [4]. Esta nova classe de materiais pode possuir propriedades eletromagnéticas incomuns, tais como permeabilidade magnética e/ou permissividade elétrica negativas. Se tais propriedades forem obtidas simultaneamente, é possível que tal material tenha valores de índices de refração negativos [5].

As possibilidades provenientes desta técnica são inúmeras, e podem possibilitar o aprimoramento de vários dispositivos em diversas áreas, tais como: telecomunicações [1], sensoriamento [6], antenas [7], entre outros. Assim, surgiram novas aplicações utilizando metamateriais que apresentaram desempenho superiores aos dispositivos similares construídos com materiais convencionais [8], principalmente na faixa de frequências de micro-ondas.

Nesse contexto, este trabalho aplica a metodologia de projeto e caracterização de meios metamateriais na faixa de micro-ondas. Assim, para diversas configurações de células metamateriais, são realizadas simulações que fornecem os parâmetros S destas células. Então, utilizando-se de equações e do método do desdobramento de fase, é possível encontrar os valores de permissividade elétrica, permeabilidade magnética e índice de refração efetivos desse meio. Este trabalho ainda mostra como alterações nas propriedades geométricas da célula metamaterial alteram as propriedades eletromagnéticas efetivas do meio, o que possibilita uma grande janela de pesquisas e aplicações para esta tecnologia.

Este trabalho então é organizado da seguinte forma: na seção II é mostrada com detalhes a metodologia empregada nesse trabalho. A seção III apresenta resultados e discussões sobre como as variações dos parâmetros geométricos das



XIV CEEL - ISSN 2178-8308
03 a 07 de Outubro de 2016
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

células influenciam a resposta eletromagnética efetiva do meio e por fim, na seção IV, são apresentadas conclusões e aspectos futuros deste trabalho.

II. METODOLOGIA

Os metamateriais são definidos como materiais artificiais projetados para terem propriedades eletromagnéticas incomuns. Em alguns casos, essas propriedades podem apresentar valores exóticos, que não são encontrados na natureza, tais como: valores reais negativos de permissividade elétrica ($\epsilon < 0$), permeabilidade magnética ($\mu < 0$) e índice de refração ($n < 0$). Podem ser construídos a partir de materiais comuns, como metais e dielétricos [9]. Além disso, a fabricação de tais metamateriais não é tão complexa, uma vez que operando na faixa de micro-ondas (GHz) suas células macroscópicas são de escala milimétrica, possibilitando assim a fabricação de tais materiais utilizando métodos convencionais para a confecção das placas. Além disso, as características eletromagnéticas do meio metamaterial podem ser modeladas modificando-se apenas a geometria dessas células [5]. Entretanto, meios metamateriais apresentam limitações como, por exemplo, alta atenuação, faixa de operação estreita e pouca capacidade de ajustes de sintonia.

Os metamateriais geralmente são compostos por um arranjo periódico de “átomos macroscópicos” que são os ressoadores do material artificial. Para que a onda propagante interaja com esse meio discreto como se estivesse interagindo com um meio homogêneo [10], é necessário que o tamanho dos elementos básicos do material tenham em torno de 1/10 do comprimento de onda (λ). Deste modo o material pode ser descrito e estudado em termos de suas propriedades eletromagnéticas efetivas [9].

A. Simulação

As análises computacionais deste trabalho foram realizadas utilizando o software comercial Ansoft HFSS 13 (*High Frequency Structure Simulator*) [11], baseado no Método dos Elementos Finitos (FEM). O software permite desenhar as estruturas em 3 dimensões (3D), configurar os materiais de sua composição, configurar as condições de contorno e portas de excitações de forma a se obter os parâmetros de espalhamento, também conhecido como parâmetros S. Um exemplo de uma dessas geometrias pode ser visto na Figura 1, e para se obter a resposta pretendida em uma determinada faixa de frequências, as dimensões e configurações da simulação podem ser adaptadas durante o projeto a estrutura.

Assim, após aplicadas as configurações necessárias, pode-se obter os parâmetros S do material que relacionam as portas de excitação 1 e 2. Os coeficientes da matriz S são dependentes da frequência e complexos, logo apresentam amplitude e fase [4].

B. Extração dos Parâmetros de Eletromagnéticos

Após ter extraído os parâmetros S da estrutura, são manipulados os coeficientes de reflexão (S_{11}) e os coeficientes de transmissão (S_{21}), afim de encontrar a permeabilidade relativa magnética (μ_r), permissividade relativa elétrica (ϵ_r), índice de refração (n) e a impedância (z) do metamaterial. A solução utilizada para extração dos parâmetros

eletromagnéticos se baseia no desdobramento de fase, método proposto por Barroso e Hasar [12]. O método se baseia em desdobrar (*unwrap*) a fase do coeficiente de transmissão. Este passo é necessário pois quando se realiza a operação de logaritmo de um número complexo, a parte imaginária da solução sempre terá valores entre $-\pi$ e π . Assim, a resposta da função poderá não ser contínua, pois quando a solução ultrapassa um dos extremos desse intervalo os valores retornam para o extremo oposto ($-\pi$ ou π) [4]. As seguintes equações do método foram usadas [12]:

$$K(f) = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \quad (1)$$

$$\Gamma(f) = K(f) \pm \sqrt{K(f)^2 - 1} \quad (2)$$

$$T(f) = \frac{S_{21}}{1 - S_{11}\Gamma(f)} \quad (3)$$

Onde K é uma constante auxiliar, Γ é o coeficiente de reflexão e T é o coeficiente de transmissão do metamaterial.

$$\frac{1}{\Lambda(f)} = \frac{-j}{2\pi d} \ln(T(f)) \quad (4)$$

O comprimento de onda no interior do material é indicado por Λ e d indica a espessura da célula metamaterial. Neste ponto ocorre o problema no qual é resolvido utilizando o método do desdobramento de fase. Como a equação tem um logaritmo de um número complexo acaba causando o surgimento de infinitas soluções, deste modo utilizando a função *unwrap* a equação (4) é reescrita da seguinte forma [12]:

$$\frac{1}{\Lambda(f)} = \frac{1}{2\pi d} \left(-j \ln(|T(f)|) + \text{unwrap}(\arg(T(f))) \right) \quad (5)$$

Assim, com o valor de Λ e das grandezas encontradas anteriormente é possível dar sequência e calcular as grandezas físicas desejadas.

$$\mu_r(f) = \lambda_0 \frac{1}{\Lambda(f)} \frac{(1 + \Gamma(f))}{(1 - \Gamma(f))} \quad (6)$$

$$\epsilon_r(f) = \frac{\lambda_0^2}{\mu_r(f)} \frac{1}{\Lambda(f)^2} \quad (7)$$

$$z = \pm \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (8)$$

$$n = \pm \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (9)$$

A seguir serão apresentados os resultados obtidos por meio dessa metodologia apresentada.

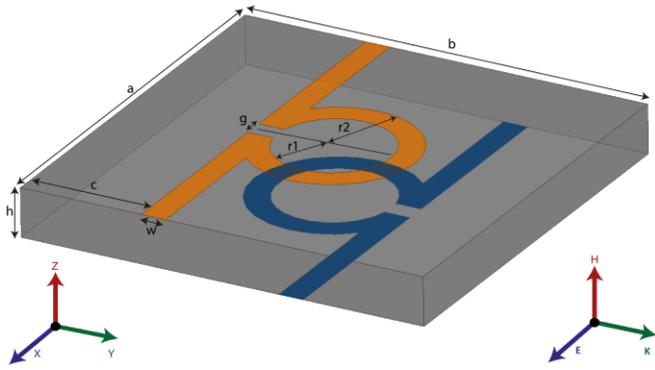


Fig. 1. Célula Ω metamaterial desenhada no ambiente do Software Ansoft HFSS 13. As dimensões e orientações de campo da estrutura também são destacadas.

III. RESULTADOS

Para analisar como alterações nas propriedades geométricas da célula metamaterial modificam as propriedades eletromagnéticas efetivas do meio, o formato de célula escolhido é um ômega (Ω) [4]. A célula e suas propriedades geométricas podem ser observadas na Figura 1. As descrições das medidas podem ser observadas na Tabela I.

Tabela I – Propriedades geométrica da célula Ω metamaterial.

a	b	c	g	h	w	r1	r2
5,00 mm	5,00 mm	1,50 mm	0,25 mm	0,60 mm	0,30 mm	1,00 mm	0,70 mm

A célula é envolta em uma caixa de vácuo que possui altura de 5,6 mm (eixo Z), comprimento de 5,0 mm (eixo Y) e largura de 5,0 mm (eixo X). A caixa foi omitida do desenho para melhor visualização da célula. O substrato escolhido foi alumina $\epsilon_r = 9,2 + 0,012j$. O campo elétrico está orientado no sentido do eixo X, enquanto o campo magnético tem componente no eixo Z. As portas de excitação, por sua vez, foram posicionadas ao longo do eixo Y.

Para que o campo eletromagnético seja excitado de forma correta foram utilizadas condições de contorno periódicas, que permitem simular uma única célula metamaterial como uma estrutura infinita, reduzindo significativamente o custo computacional da simulação. As condições de contorno PMC (condutor magnético perfeito) e PEC (condutor elétrico perfeito) foram associadas às faces normais ao eixo Z e X, respectivamente. Além disso, também foi aplicada a PEC aos dois ômegas da estrutura para emular as faces metálicas, o que evita um aumento considerável no número de elementos da simulação, que também aumentaria o custo computacional.

A faixa de operação vai de 9 GHz a 12 GHz, discretizada em 200 passos de 15 MHz cada. A partir da célula base, cujas dimensões foram apresentadas na Tabela I, foi feita a variação da largura do *gap* (g na Figura 1) afim de se analisar como esse parâmetro geométrico influencia a resposta eletromagnética dessas diferentes células. Foram considerados cinco cenários: dois valores abaixo (0,05 mm e 0,15 mm) e dois valores acima (0,35 mm, 0,45 mm) da medida original do *gap* que é de 0,25 mm.

As Figuras 2 e 3 apresentam, respectivamente, as partes real e imaginária da permissividade elétrica efetiva do meio. É

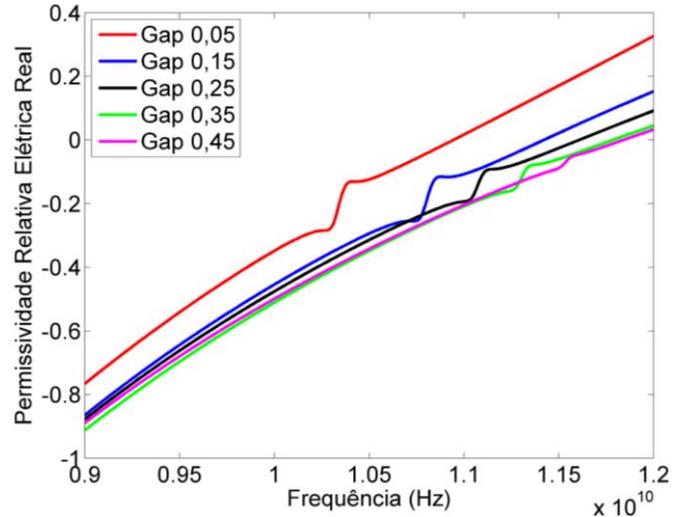


Fig. 2. Parte real da permissividade relativa elétrica (ϵ_r) em função de variações do *gap* da célula ômega.

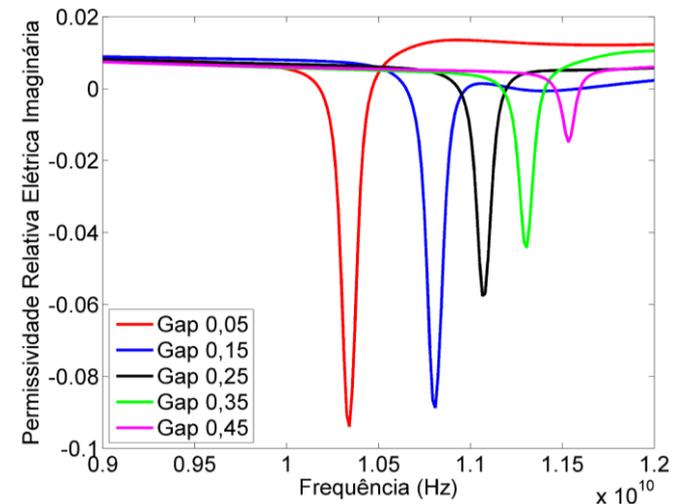


Fig. 3. Parte imaginária da permissividade relativa elétrica (ϵ_r) em função de variações do *gap* da célula ômega.

possível observar que, comparados com o cenário base ($g = 0,25$ mm), a magnitude da parte real da permissividade elétrica cresce e a frequência de ressonância diminui para valores de *gap* menores (0,05 mm e 0,15 mm). Ressalta-se a frequência de ressonância da célula base ocorre aproximadamente em 11,1 GHz. No mesmo sentido, a amplitude da parte imaginária da permissividade diminui e a frequência de ressonância do metamaterial aumenta à medida que o *gap* aumenta.

As Figuras 4 e 5, por sua vez, mostram as partes real e imaginária da permeabilidade magnética efetiva do meio, respectivamente. Nota-se claramente como o valor do *gap* influencia as propriedades magnéticas efetivas do meio. Além disso, pode-se observar que a parte real da permeabilidade magnética efetiva do meio sofre uma mudança abrupta saindo de um valor positivo para um valor negativo após a frequência de ressonância. Ainda pode-se observar que diferentemente da permissividade elétrica, as amplitudes real e imaginária da permeabilidade magnética crescem para maiores valores de *gap*. Observa-se também como a frequência de ressonância do metamaterial aumenta à medida que o *gap* aumenta, atingindo

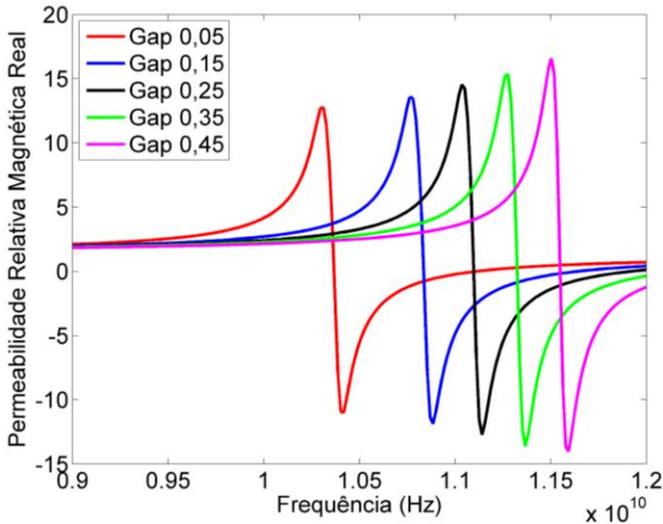


Fig. 4. Parte real da permeabilidade relativa magnética (μ_r) em função de variações do *gap* da célula ômega.

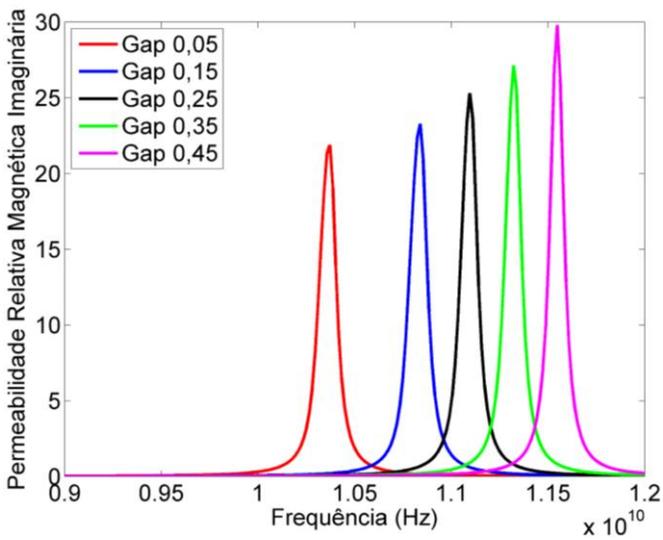


Fig. 5. Parte imaginária da permeabilidade relativa magnética (μ_r) em função de variações do *gap* da célula ômega.

aproximadamente os seguintes valores: 10,3 GHz (0,05mm), 10,8 GHz (0,15mm), 11,1 GHz (0,25mm), 11,3 GHz (0,35mm) e 11,6 GHz (0,45mm).

Por fim, as Figuras 6 e 7 apresentam, respectivamente, as partes real e imaginária do índice de refração efetivo do meio. É possível notar que nas faixas de frequência que ocorreram simultaneamente uma permissividade e permeabilidade real negativa (Figura 2 e 4, respectivamente), ocorreu também um índice de refração real negativo (a parte imaginária não pode ser negativa para respeitar o princípio da causalidade do meio). Tais valores começam na frequência de ressonância de cada cenário. No que diz respeito à parte imaginária do índice de refração, um importante ponto a se notar é que em frequências menores que a frequência de ressonância, os valores são significativamente altos, o que torna estes metamateriais impraticáveis nessas frequências. Para frequências maiores que a frequência de ressonância, a parte imaginária do índice de refração atinge valores menores permitindo que os metamateriais sejam usados nessa faixa de frequência pois teriam menor valor de atenuação.

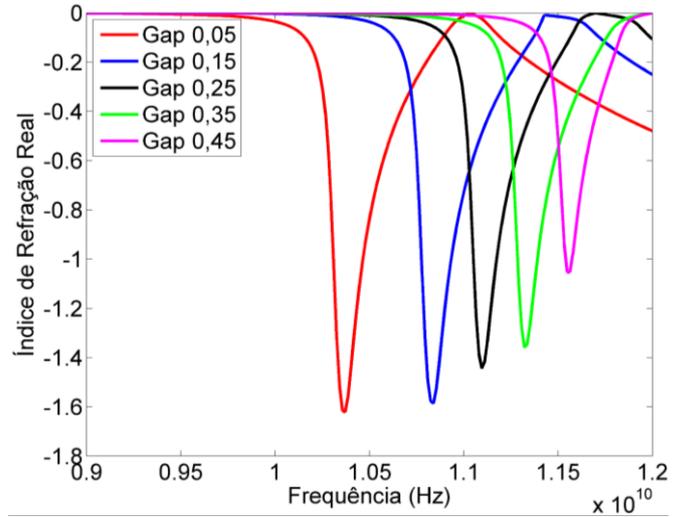


Fig. 6. Parte real do índice de refração (n) em função de variações do *gap* da célula ômega.

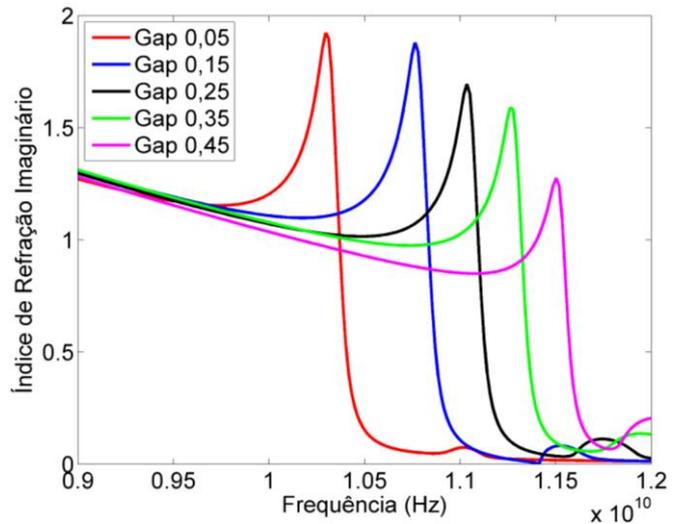


Fig. 7. Parte imaginária do índice de refração (n) em função de variações do *gap* da célula ômega.

Nas próximas etapas deste trabalho, serão investigadas como as outras dimensões da geometria da célula influenciam a resposta eletromagnética efetiva da mesma e como a associação de diferentes células pode aumentar a largura de banda de funcionamento e/ou melhorar a atenuação do metamaterial.

IV. CONCLUSÃO

Este trabalho aplicou uma metodologia de caracterização de meios metamateriais na faixa de micro-ondas. Num primeiro momento foram obtidos os parâmetros S das células metamateriais. Então, utilizando-se de equações e do método do desdobramento de fase, foi possível encontrar os valores de permissividade elétrica, permeabilidade magnética e índice de refração efetivos desse meio. Este trabalho ainda mostrou como alterações nas propriedades geométricas da célula metamaterial alteram as propriedades eletromagnéticas efetivas do meio. Foram considerados cinco cenários e observou-se que a frequência de ressonância do metamaterial

aumenta à medida que o *gap* aumenta, atingindo aproximadamente os seguintes valores: 10,3 GHz (0,05mm), 10,8 GHz (0,15mm), 11,1 GHz (0,25mm), 11,3 GHz (0,35mm) e 11,6 GHz (0,45mm). Além disso, em todos esses cenários o índice de refração efetivo do meio assumiu valores negativos para frequências maiores que a frequência de ressonância. Dessa forma, estes resultados serão utilizados em trabalhos futuros para explorar faixas de frequências mais largas com baixos valores de atenuação.

Method”, Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, vol. 33, no. 2, p. 237-244, 2012.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] N. I. Zheludev and Y. S. Kivshar. “From metamaterials to metadevices”, Nature Materials, v. 11, no.11, p. 917-924, 2012.
- [2] G. V. Eleftheriades and K. G. Balmain, “Negative Refraction Metamaterials – Fundamental Principles and Applications”, New York, John Wiley & Sons, 2005.
- [3] V. G. Veselago, “The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ”, Soviet Physic Uspekhi, v. 10, no. 4, p. 509 – 514, 1968.
- [4] A. F. Mota, A. Martins, P. L. Bertarini, B. H. V. Borges, “Dispersion management with microwave chirped pulses in metamaterials in the negative refraction regime”, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, v. 14, p. 1377 – 1380, 2015.
- [5] D. R. Smith, J. B. Pendry, and M. C. K. Wiltshire, “Metamaterials and negative refractive index”, Science (New York, N.Y.), vol. 305, no. 788-792, Aug. 2004.
- [6] J. J. Yang, M. Huang, and J. Sun, “Double Metamaterial Sensor Based on Microring Resonator”, IEEE Sensors Journal, vol. 11, no. 10, p. 2254-2259, Oct. 2011.
- [7] R. W. Ziolkowski and A. D. Kipple, “Application of double negative materials to increase the power radiated by electrically small antennas”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 51, no 10, pp. 2626-2640, 2003.
- [8] S. Arslanagic, et al, “A review of the scattering-parameter extraction method with clarification of ambiguity issues in relation to metamaterial homogenization”, IEEE Antennas and Propagation Magazine, v. 55, no. 2, p. 91 – 106, 2013.
- [9] C. M. Soukoulis, M. Kafesaki, and E. N. Economou, “Negative-index materials: new frontiers in optics”, Advanced Materials, v. 18(no 15), p. 1941-1952, 2006.
- [10] D. R. Smith and S. Schultz. “Determination of permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients”, Physical Review B, Vol. 65, no. 19, p. 195, 2002.
- [11] Ansoft HFSS (High Frequency Structure Simulator), version 15.0, Ansoft Corporation <www.ansoft.com>.
- [12] J. J. Barroso and U. C. Hasar, “Construtive Parameters of a Metamaterial Slab Retrieved by the Phase Unwrapping