

# Etiqueta RFID sem chip com codificação de bits baseada em superfícies multirressonantes de alta impedância

Hamilton J. S. Coelho, Francisco D. M. Nobre, Rui, B. Pantoja e Maurício W. B. da Silva.

**Resumo**—Neste trabalho é proposta uma estrutura absorvedora baseada em uma superfície multirressonante de alta impedância que pode ser usada como etiqueta em um sistema de identificação por rádio frequência (RFID) sem chip. A célula unitária é composta por espiras circulares com capacidade de absorção de sinal nas faixas S, C e X acima de 90% nas frequências de ressonância de 3,612 GHz, 4,718 GHz, 5,984 GHz, 7,798 GHz e 11,316 GHz. É feita uma análise de codificação de bits a partir da presença ou ausência de elementos. São avaliados os parâmetros de performance da célula proposta como independência sob incidência angular, efeitos de cruzada polarização e fator de seletividade Q da estrutura, com resultados para a RFID proposta com possíveis aplicações em identificação de sistemas de radio enlace e filtragem de sinais.

**Palavras-Chave**—Superfícies de alta impedância, absorvedor de micro-ondas, RFID sem chip, FSS.

**Abstract**—An absorbant structure based on multiresonant high impedance surface is proposed on this paper which may be used as a tag on an chipless RFID system. The unity cell is comprised of circular ring spirals with signal absorption capacity in the S, C and X bands above 90% at the resonant frequencies 3.612 GHz, 4.718 GHz, 5.984 GHz, 7.798 GHz and 11.316 GHz. A bit encoding analysis is performed based on the presence or absence of elements. The performance parameters of the proposed cell are evaluated, such as angular incidence variation, cross-polarization effects and structure selectivity factor Q, with results for the proposed RFID for possible applications on radio link identification and signal filtering.

**Keywords**—High Impedance Surface, microwave absorber, Chipless RFID, FSS, RFID bit encoding.

## I. INTRODUÇÃO

O estudo de estruturas absorvedoras de sinais eletromagnéticos vem ganhando tração nas últimas décadas graças às novas aplicabilidades de sensores para melhoria de sistemas e processos e nas necessidades de otimização de sistemas de telecomunicações [1]. Neste contexto, etiquetas RFID se destacam por apresentarem capacidades específicas e de alta escalabilidade, se adaptando para diversos setores do mercado, com aplicações em sensores integrados [2], sensores de temperatura e umidade [3],[4], químicos [5], de rastreamento de mercadorias [6], redes de RFID para a saúde [7] e para

sistemas de pagamento [8]. A união de funcionalidades de um dispositivo absorvedor de capacidades de identificação por radiofrequência com codificação de bits evidencia uma perspectiva inovadora no tratamento de sinais e sistemas de telecomunicações.

Sobre perspectiva histórica, o entendimento de absorvedores evoluiu em concomitância a capacidade tecnológica de produção destes dispositivos, além do entendimento do comportamento de materiais condutores e dielétricos sob incidência de uma onda eletromagnética. Entre os diferentes modelos presentes na literatura, alguns se destacam, por possibilitarem um estudo mais elaborado dos papéis de diferentes tipos de interfaces e parâmetros que alicerçam o funcionamento da estrutura proposta, [9],[10], [11].

O trabalho de Ali [12] de um ressonador de anéis circulares fechados (CCRR) apresenta uma estrutura similar à que será aqui, sob a análise de parâmetros como a permissividade elétrica  $\epsilon$  e permeabilidade magnética  $\mu$  de seus componentes. Assim como este projeto, se tratam de estruturas baseadas em metamateriais [13] e superfícies de alta impedância presentes capazes de inferir sobre comprimentos de ondas eletromagnéticas inferiores às dimensões da estrutura. O comportamento das interações eletromagnéticas do absorvedor do projeto também remete aos princípios de funcionamento das FSSs (*Frequency Selective Surfaces*, estruturas 2D, também presentes nas células, que interagem por padrões de reflexão particulares às suas geometrias de forma a alterar leituras no espectro, e RFIDs [14],[15], ao apresentar uma resposta em frequência característica, chamada de assinatura eletromagnética.

Neste artigo, é apresentado um absorvedor fino multibanda baseado em uma superfície de alta impedância, com picos de absorção de 91,7%, 92,1%, 92,6%, 93% e 94% nas frequências de ressonância de 3,61 GHz, 4,72 GHz, 5,89 GHz, 7,80 GHz e 11,13 GHz, operando, portanto, nas bandas S, C e X.

A premência por estruturas com maior versatilidade em termos de independência de polarização de onda e incidência angular [16],[17], enfatizam a necessidade de se apresentar este projeto. Como um exemplo de modelo de alta tolerância à fatores de polarização, com absorções indiferente para ondas planas incidentes em modos TE e TM, e de tolerância à variação angular de até 75° para a maioria das ressonâncias, o artigo foi dividido em etapas de projeto de célula unitária, resultados numéricos e análises, codificação de bits e conclusões.

Coelho, Hamilton J. S., Maurício Weber Benjô da Silva, Departamento de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ, e-mail: {hj\_filho; mauriciobenjo}@id.uff.br; Nobre, Francisco D. M., Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Roraima, Boa Vista-RR, e-mail: nobredie@gmail.com; Pantoja, Rui B., Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Roraima, Boa Vista-RR, e-mail: rui-benjo@yahoo.com.br. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

## II. PROJETO DE CÉLULA UNITÁRIA

A célula unitária do absorvedor proposto é composta de anéis circulares concêntricos dispostos sobre um substrato e apoiado por um fundo metálico. A camada metálica é modelada como um filme de cobre e condutividade elétrica  $\sigma = 5,8 \times 10^7 \text{ S/m}$ . O material da camada dielétrica usada é o FR4, material muito utilizado para placas de circuito impresso, com permissividade relativa de 4,4 e tangente de perdas de 0,02.

As geometrias foram otimizadas através de simulações iterativas da maioria de seus parâmetros dimensionais, iniciados em  $sh = 1,5 \text{ mm}$ ,  $w_2 = 0,5 \text{ mm}$ ,  $g = 0,5 \text{ mm}$ ,  $P = 15 \text{ mm}$  e  $w = 0,5 \text{ mm}$  com variações de passos de 0,2, visando a maior ocupação de ressonâncias nas frequências sub 6GHz. Com suas dimensões finais apresentadas a seguir na Figura 1, chegou-se a valores finais de espessura de substrato  $sh = 1,8 \text{ mm}$ , espaçamento entre as espiras de  $w = 0,5 \text{ mm}$ , espaçamento das bordas da célula para a espira mais externa de  $g = 1 \text{ mm}$ , largura das espiras de  $w_2 = 0,7 \text{ mm}$  e espessura das partes de cobre de  $t = 0,035 \text{ mm}$ .

Assim, em termos comparativos dimensionais e em comprimento de onda, a estrutura proposta e analisada possui  $\lambda_{min}/1,55 \leq P \leq \lambda_{max}/4,88$ , considerando sua periodicidade  $p$  de 17 mm e comprimentos de onda referentes às frequências de ressonância 11,316 GHz e 3,612 GHz, respectivamente. Da mesma forma, se considerarmos o substrato de espessura  $sh = 1,8 \text{ mm}$ , apresenta  $\lambda_{min}/14,71 < sh < \lambda_{max}/46,11$ . Estes parâmetros de escala, considerando dispositivos similares na literatura, assemelham o projeto a absorvedores de substrato fino.

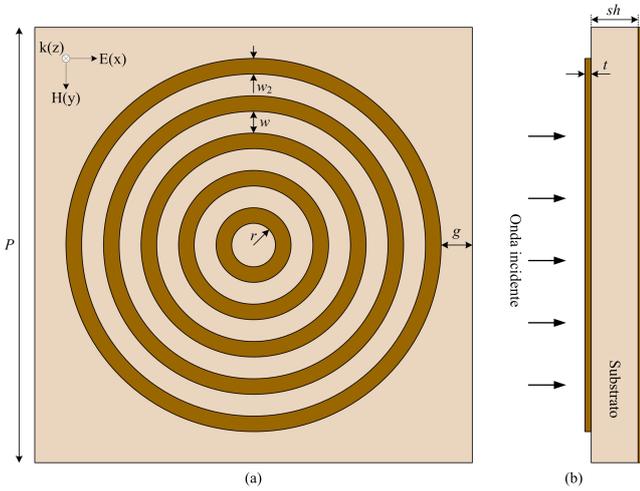


Fig. 1: Célula unitária da estrutura proposta mostrando em (a) ressonadores e parâmetros geométricos e em (b) vista lateral.

A escolha de construir uma etiqueta *RFID* sem chip de processamento ou bateria (*chipless RFID*) composta por células circulares foi motivada por diversas razões que a tornam vantajosa em comparação com outras geometrias. Entre elas, destacam-se a independência da polarização incidente com resultados consistentes devido à simetria axial da estrutura, sua maior compatibilidade, custo inferior e aplicabilidade em sistemas menores pela falta de presença de circuitos integrados

*ASIC*.

Sua observabilidade em composição *array*, simulada em conjunto mínimo de 4 células, foi optada por garantir efeitos de ressonâncias que reforçam os resultados. O *software* utilizado na obtenção das simulações de campo eletromagnético foi o CST Studio Suite [18]. O *template* na para a construção da simulação usado foi o de *FSS*, metamaterial em *Unit Cell* com diagrama de dispersão de fase e as condições de contorno foram de células unitárias nos eixos  $x$  e  $y$  e em espaço aberto no eixo  $z$ , com porta de incidência perpendicular a célula. A onda incidente simulada sobre a porta 1 foi de modo Floquet e plana na direção  $z$ .

## III. RESULTADOS NUMÉRICOS E ANÁLISES

O uso de uma célula quadrada com espiras circulares foi motivada por exemplo na literatura de estudos de efeitos geométricos das células e do substrato aterrado, que demonstra uma maior seletividade nas frequências para a geometria adotada, quando observados os valores ótimos de variação da frequência central ( $\Delta f$ ) e de RCS (*Radar Cross Section*), referente à medida de detecção do objeto em uma dada frequência, em comparação com outras geometrias [19]. Neste sentido, a geometria usada para o projeto foi a de número 2 da Tabela I, tendo em vista uma otimização de RCS nos pontos de absorção unida a uma banda estreita em torno das frequências de ressonância. A Figura 2 complementa os resultados desta análise.

TABELA I: TABELA COMPARATIVA DE TIPOS DE GEOMETRIAS EM ETIQUETAS RFID PARA AVALIAÇÃO DA ESCOLHA DE ESPIRAS CIRCULARES.

Forma	Periodicidade (mm)	Freq. (GHz)	RCS ( $\text{dB/m}^2$ )	$\Delta f$ (GHz)
1.	11,25	5,8	-45,2	0,2
2.	13,2	5,8	-48,4	0,06
3.	13,2	5,8	-41,45	0
4.	12,9	5,8	-36,9	0,13
5.	14,4	5,8	-49,9	0,14

A análise da estrutura proposta combina efeitos da *FSS* pela célula proposta à operacionalidade de *RFIDs* ao possibilitar modificações com resultados pré-definidos através de *software* de simulação eletromagnética 3D pelo *software* CST Studio 2020. A partir da inclusão de conceitos como o de aproximação por circuitos *RLC*, como proposto por Costa [20] para metamateriais, e análises numéricas, esta metodologia aplica o particionamento dos cálculos e das equações para a obtenção da impedância da célula, que elucida os efeitos variantes com a frequência de ressonância em termos de elementos resistivos, capacitivos e indutivos observados neste tipo de dispositivo. Assim, utiliza-se de resultados que combina os modelos de elementos finitos FEM (*Finite Element Method*) [21], a técnica de integrais finitas FIT (*Finite Integral Technique*) de Weiland

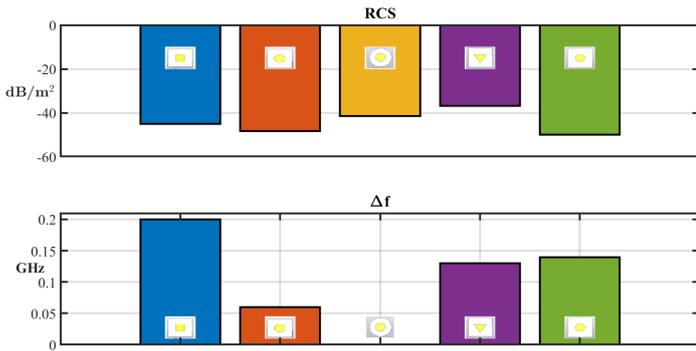


Fig. 2: Histograma RCS e desvio de frequência das células em [13].

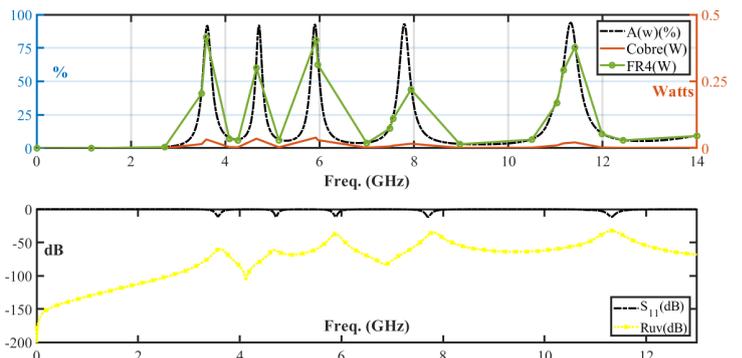


Fig. 3: Absortividade (%) total e por material (superior) e efeitos de polarização cruzada (inferior).

[22], que é composto pelos cálculos em FDTD (*Finite Difference Time Domain*) e o método TLM (*Transmission Line Matrix*) que são capazes de obter resultados de forma mais rápida.

Os resultados de absorção, variantes no domínio da frequência, dispostos na Eq. (1), dependem dos índices de reflexão e transmissão, que podem ser aferidos por variações nas tensões incidentes, refletidas e transmitidas nas portas do sistema. Para o caso observado, é possível desprezar os coeficientes de transmissão, dado que a estrutura possui um plano de terra traseiro refletor. A perda de retorno pode ser usada para o cálculo de absorptividade, a partir da Eq. (2) em decibéis (dB), que avalia a variação nas potências incidentes ( $P_i$ ) e refletidas ( $P_r$ ), guardando também relação com o parâmetro de espalhamento S.

$$A(\omega) = 1 - T(\omega) - R(\omega) \quad (1)$$

$$|R(\omega)| = \Gamma = \left( \frac{V^r}{V^i} \right)^2 = |S_{11}|^2$$

$$RL(dB) = -10 \log \left( \frac{P_r}{P_i} \right) = -20 \log |\Gamma| = S_{11} \quad (2)$$

$$A(\omega) = 1 - R_{uu}(\omega) - R_{uv}(\omega) - T_{uu}(\omega) - T_{uv}(\omega) \quad (3)$$

Da mesma forma, foi observado os efeitos de polarização cruzada na absorção, calculada pela Eq. (3), obtidas por desmembramento da Eq. (1), no gráfico inferior da Figura 3. Os parâmetros de polarização cruzada,  $R_{uv}$ , são desconsiderados e constantes para ambos os modos TE e TM, definidos por ondas de campo elétrico e campo magnético perpendiculares à direção de propagação, respectivamente. Através dos coeficientes de reflexão co polarizados,  $R_{uu}$ , foi possível estabelecer uma relação direta entre a absorptividade  $A(\omega)$ , a reflexão direta  $R_{uu}$ , a perda de retorno  $RL$  e os parâmetros S de espalhamento medidos na porta de entrada,  $S_{11}$ , com os valores de potência ou tensão que são feitos por cálculos eletromagnéticos computacionais pelo *software*.

No gráfico superior da Figura 3 são apresentados resultados para um pulso elétrico incidente de de 0,5 Watts de potência para a *RFID* absorvedora proposta, no eixo a direita, em composição comparativa de absorptividade percentual, no eixo

a esquerda. Conclui-se, assim, a preponderância de perdas dielétricas, por dissipação de calor no substrato FR4, e ôhmicas, pela resistividade, mesmo que pequena, das células *FSS* [23].

Um parâmetro muito utilizado na caracterização da banda em dispositivos é o fator de seletividade ou fator Q, que é definido como a razão da frequência central pela banda de operação, expressa na Eq. (4).

$$Q \stackrel{\text{def}}{=} \frac{f_r}{\Delta f} = \frac{\omega_r}{\Delta \omega} \quad (4)$$

No primeiro gráfico da Figura 4 está representado os fatores de seletividade nos pontos de frequência de ressonância (eixo azul à esquerda) e a absorptividade (eixo à direita), com absorptividade máxima acima de 90% para as cinco frequências propostas. Ainda, a figura traz o comportamento normalizado do parâmetro de espalhamento  $S_{11}$  e do coeficiente de reflexão  $\Gamma$ , destacando os pontos de inflexão da parte real e imaginária de  $S_{11}$  próximos a zero nas frequências de ressonância, que reforçam a estabilidade da reflexão.

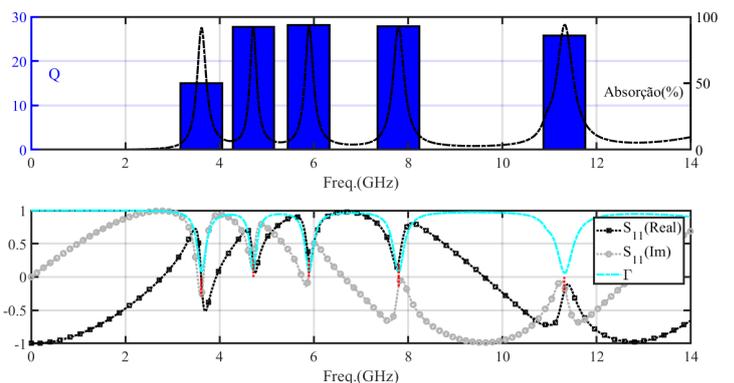


Fig. 4: Histograma fator Q com absorptividade e gráfico normalizado de coeficiente de reflexão e parâmetro de espalhamento real e imaginário.

Neste estudo, também foi analisado o comportamento da estrutura sob variação de incidência de onda oblíqua, a partir do ângulo  $\phi$ , referente ao ângulo entre a direção de propagação com o eixo z, com aferições de 0° a 60° em passos de 15°, como observado nos gráficos da Figura 5. Os resultados para

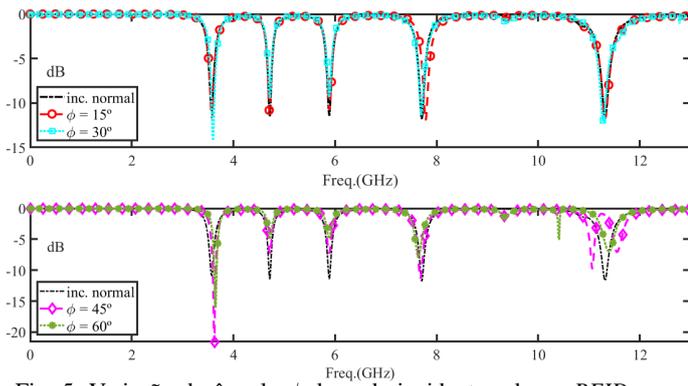


Fig. 5: Variação do ângulo  $\phi$  da onda incidente sobre a *RFID* absorvedora de espiras circulares.

$S_{11}$  se relacionam diretamente aos coeficientes de reflexão, como demonstrado nas equações anteriores, e se mostraram eficazes em todas as ressonâncias, apresentando efeitos dissipativos de alta ordem apenas na frequência de ressonância mais alta e sob incidência superior a  $45^\circ$ .

#### IV. CODIFICAÇÃO DE BITS

A codificação de bits pode ser observada em termos dos 5 bits alternáveis, representando cada absorção nos pontos das frequências centrais. O método de análise para a codificação foi o OOK (*on-off keying*) onde a ausência da espira foi representada pelo bit 0 enquanto a presença pelo bit 1, sendo as respostas analisadas no domínio da frequência.

Ainda, a codificação dos bits alternáveis nos modelos são representações da espira circular mais externa para a mais interna. Desta maneira, estão elucidados os resultados obtidos nos gráficos das Figs. 6 a 9, onde o modelo destacado em cinza teria codificação '11111' para os bits alternáveis, enquanto o modelo em vermelho teria a codificação '10101', para a Figura 6.

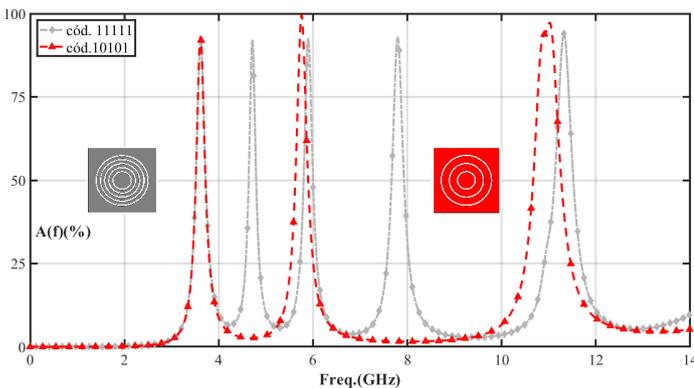


Fig. 6: Absorção do modelo 1 de Codificação de bits.

Em vista aos deslocamentos das frequências centrais de ressonância observados em alguns modelos de remoção das espiras, estima-se que estas variações produzam resultados toleráveis e haja a preservação da informação dos bits, considerando-se o uso de um dispositivo de detecção cuja banda de meia potência (queda de 3dB ou FWHM) seja de,

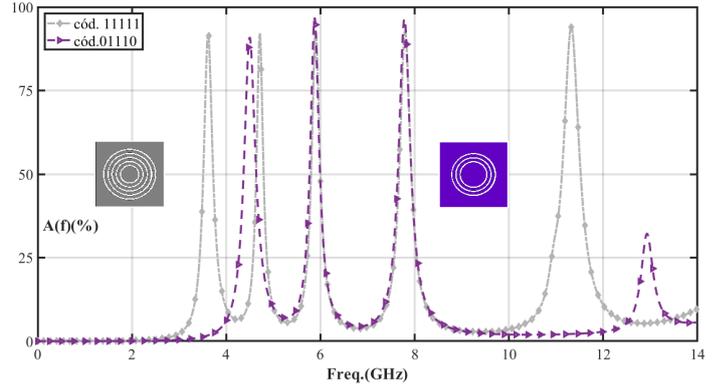


Fig. 7: Absorção do modelo 2 de Codificação de bits.

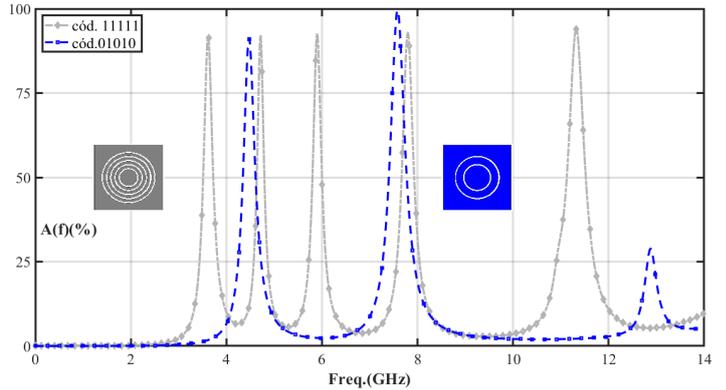


Fig. 8: Absorção do modelo 3 de Codificação de bits.

no mínimo, 170 MHz, como estipulado pelos valores destas bandas na frequências de ressonância na Tabela II.

TABELA II: FREQUÊNCIAS LATERAIS (FWHM), CENTRAIS E BANDA DE ABSORÇÃO.

$f_-$ (GHz)	$f_0$ (GHz)	$f_+$ (GHz)	Banda (MHz)
3,5	3,61	3,74	240
4,63	4,72	4,8	170
5,8	5,89	6,01	210
7,66	7,8	7,94	280
11,1	11,33	11,54	440

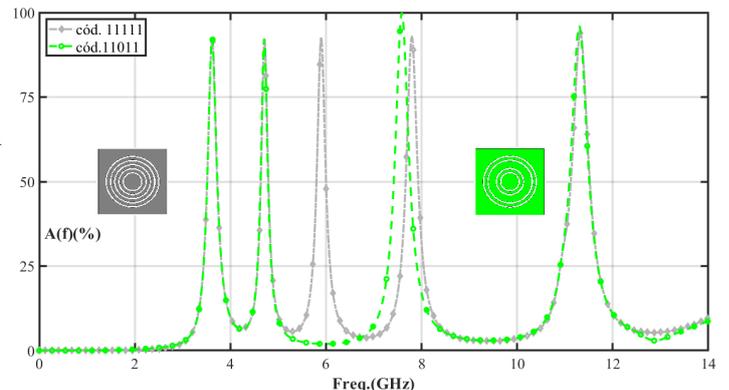


Fig. 9: Absorção do modelo 4 de Codificação de bits.

## V. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto um absorvedor baseado em superfície de alta impedância como etiqueta em sistemas *RFID* sem chip e absorvedora com aplicações em partes das frequências SHF, compreendida entre 3 e 30 GHz, que incluem transmissões por satélite espaço-terra, redes móveis e sistemas de meteorologia.

Com picos de absorção de até 90% sob incidência normal em todas as 5 frequências (3,612 GHz, 4,718 GHz, 5,984 GHz, 7,798 GHz e 11,316 GHz), independência de polarização cruzada e variação de incidência angular da onda plana estável até 45°, a etiqueta *RFID* absorvedora baseada em superfícies multirressonantes de alta impedância se mostra promissora.

Para além dos resultados apresentados, análises de codificações híbridas e com alternância de modelos de codificação por células, além da apresentação dos resultados práticos, ainda se fazem necessárias.

## AGRADECIMENTOS

O autor é grato à Universidade Federal Fluminense, ao Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações, em especial ao seu corpo docente, pela oportunidade de desenvolvimento acadêmico e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoas do Ensino Superior - CAPES pelo fomento à educação.

## REFERÊNCIAS

- [1] C. Herrojo *et al.*, "Chipless-RFID: A review and recent developments", *Sensors* v. 19, n. 15, p. 3385, 2019.
- [2] S. Dey *et al.*, "A brief overview of chipless RFID sensors with EM transduction", *8th International Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2014.
- [3] T. Athauda e N. Karmakar, "Screen printed chipless RFID resonator design for remote sensing applications", *Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*. IEEE, p. 1321-1323, 2018.
- [4] W. Buff *et al.*, "Passive remote sensing for temperature and pressure using SAW resonator devices", *IEEE transactions on ultrasonics, ferro-electrics, and frequency control*, v. 45, n. 5, p. 1388-1392, 1998.
- [5] W. T. Chen *et al.*, "Novel undercoupled radio-frequency (RF) resonant sensor for gaseous ethanol and interferents detection", *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 230, p. 63-73, 2015.
- [6] S. Preradovic *et al.*, "Multiresonator-based chipless RFID system for low-cost item tracking", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, v. 57, n. 5, p. 1411-1419, 2009.
- [7] Zhang *et al.* "A review of passive RFID tag antenna-based sensors and systems for structural health monitoring applications", *Sensors*, v. 17, n. 2, p. 265, 2017.
- [8] I. Lacmanovic *et al.*, "Contactless payment systems based on RFID technology", *The 33rd International Convention MIPRO*, IEEE, 2010, p. 1114-1119.
- [9] W. W. Salisbury, "Absorbent body for electromagnetic waves." *U.S. Patent No. 2,599,944*, 1952.
- [10] L. D. TOIT, "The design of jauman absorbers", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, v. 36, n. 6, p. 17–25, 1994.
- [11] W. Allenbach, W. Kleinsteuber, "Reflection and absorption of decimeter-waves by plane dielectric layers", *Hochfreq. u. Elektroak.*, v. 51, p. 152–156, 1938.
- [12] H. O. Ali *et al.* "New compact six-band metamaterial absorber based on Closed Circular Ring Resonator (CCRR) for Radar applications", *Optics Communications*, v. 503, p. 127457, 2022.
- [13] N. Engheta e R. Ziolkowski, "Metamaterials: Physics and Engineering Explorations", *Wiley*, 2006.
- [14] V. D. Hunt *et al.*, "RFID-A Guide to Radio Frequency Identification", *John Wiley & Sons*, 2010.
- [15] T. Wu *et al.*, "Frequency Selective Surface and Grid Array", *Series in Microwave and Optical Engineering*, 1995.
- [16] A. Vena *et al.*, "High-capacity chipless rfid tag insensitive to the polarization", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, IEEE, v. 60, n. 10, p. 4509–4515, 2012.
- [17] A. Agrawal *et al.*, "Oblique incidence and polarization insensitive multiband metamaterial absorber with quad paired concentric continuous ring resonators", *Progress In Electromagnetics Research M*, v. 60, p. 33-46, 2017.
- [18] "CST Studio Suite", disponível em: <https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite>, acessado em: 10 de agosto de 2024.
- [19] M. C. Samudrini *et al.*, "Comparative study of chipless rfid tag resonator for orientation-independent properties and bit-capacity", *IEEE Wireless Antenna and Microwave Symposium (WAMS)*, p. 1–5, 2023.
- [20] F. Costa *et al.*, "A Circuit-based Model for the Interpretation of Perfect Metamaterial Absorbers", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012.
- [21] R. Mittra *et al.*, "Techniques for analyzing frequency selective surfaces-a review" *Proceedings of the IEEE*, v. 76, n. 12, p. 1593–1615, 1988.
- [22] T. Weiland, "A discretization model for the solution of maxwell's equations for six-component fields" *Archiv Elektronik und Uebertragungstechnik*, v. 31, p. 116–120, 1977.
- [23] P. V. Tuong *et al.*, "Dielectric and Ohmic losses in perfectly absorbing-metamaterials", *Optics Communications*, v. 295, p. 17-20, 2013.