

Metamaterial ENG de baixo custo para aplicações RFID UHF

Júlio C. S. Oliveira e Rodrigo O. Martins e Bruno M. S. Ribeiro e Edmilson C. Moreira e Antônio S. B. Sombra

Resumo— Um metamaterial ENG de baixo custo voltado para aplicações RFID que usam a faixa de frequências UHF (902-928 MHz) é proposto, projetado, fabricado e validado nesse artigo. O metamaterial ENG é feito a partir de fios de cobre e filme plástico, refletindo ondas planas e permitindo o trânsito de ondas evanescentes elétricas. Resultados de simulação e experimentais são apresentados e discutidos.

Palavras-Chave— Metamateriais, Antenas, RFID.

Abstract— A low-cost ENG metamaterial aimed at RFID applications operating in the UHF frequency band (902–928 MHz) is proposed, designed, fabricated, and validated in this paper. The ENG metamaterial is made from copper wires and plastic film, reflecting plane waves and allowing the transmission of evanescent electric waves. Simulation and experimental results are presented and discussed.

Keywords— Metamateriais, Antennas, RFID.

I. INTRODUÇÃO

RFID é um sistema de Identificação Automática e Captura de Dados (AIDC - sigla em inglês para *Auto-Identification and Data Capture*) que transmite informações por ondas de radiofrequência e que movimenta atualmente US\$16,9 bilhões [1]. Essa tecnologia, em especial, a especificada no padrão ISO 18000-6C, possui um amplo leque de aplicações como varejo de vestuário, gerenciamento de ativos e cadeia de suprimentos, logística e transportes [2], [3]. Essa heterogeneidade de aplicações demanda uma alta diversidade de configurações das zonas de leitura da camada física dos sistemas RFID.

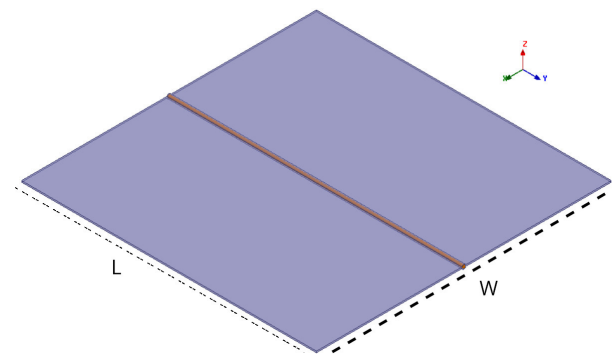
Metamateriais (MTM) são meios eletromagnéticos artificiais dispersivos com propriedades físicas projetadas pela montagem periódica de estruturas, chamadas células unitárias, muito menores que o comprimento da onda eletromagnética incidente [4], [5]. Metamateriais de permissividade elétrica negativa (ENG) são capazes de refletir ondas eletromagnéticas propagadas, permitindo, entretanto, a passagem de ondas evanescentes. Essa capacidade dos metamateriais ENG pode ser uma ferramenta útil no projeto de zonas de leitura de sistemas RFID.

É nesse contexto que surge a ideia de projetar, elaborar, testar, analisar e validar um novo metamaterial ENG destinado

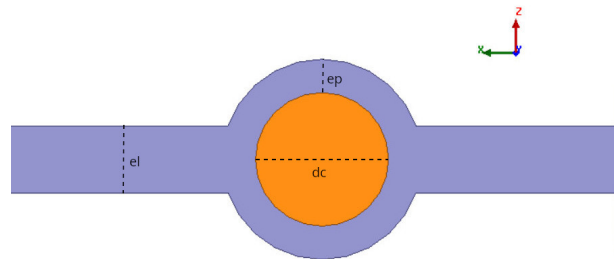
aos sistemas RFID que usam o protocolo de interface aérea ISO 18000-6c baseado em uma matriz de fios metálicos, de mais baixo custo, mecanicamente flexível, e projetado, caracterizado e validado a partir da análise de seus parâmetros constitutivos simulados (ϵ_r , μ_r), permitindo uma maior compreensão do comportamento do material, e consequentemente, aumentando a assertividade de sua elaboração.

Sob uma ótica mais estratégica, o esforço feito nesse trabalho também visa diminuir os elevados custos referentes à infraestrutura necessária para adoção de RFID no Brasil como descrito em [6], sendo assim vital para melhorar a atratividade econômica da tecnologia no Brasil, impulsionando assim sua adoção.

Este trabalho continua descrevendo o projeto e fabricação do metamaterial. Em seguida, os resultados de simulação e experimentais são apresentados e confrontados com o intuito de validar que o arranjo de fios metálicos aqui apresentado é de fato um Metamaterial ENG e que tem aplicabilidade junto a sistemas RFID UHF.



(a) Visão em perspectiva.



(b) Visão frontal.

Fig. 1: Célula unitária do MTM ENG

Júlio C. S. Oliveira, e-mail: julio.cesar.sousa39@aluno.ifce.edu.br; Rodrigo O. Martins, e-mail:rodrigo.oliveira.martins36@ifce.edu.br; Bruno M. S. Ribeiro, e-mail:bruno.montes.silva05@aluno.ifce.edu.br; Edmilson C. Moreira, LEMA – Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, e-mail:edmilson.moreira@ifce.edu.br; Antônio S. B. Sombra, LOCEM – Laboratório de Telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais, Departamento de Física, Universidade Federal do Ceará, e-mail: asbsombra@gmail.com. Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES e pelo IFCE.

II. PROJETO E FABRICAÇÃO

O projeto do metamaterial ENG inicia com definição da geometria de sua célula unitária. Arranjo de fios é usado desde a década de 60 para obtenção de uma resposta elétrica artificial [7]. Em [8], é apresentado um metamaterial que usa essa geometria para operar na faixa de frequências especificada para região da *International Telecommunication Union*, 902-928 MHz e sua fabricação é baseada em trilhas de cobre em placas de circuito impresso. Esse método de fabricação resulta em metamateriais rígidos e com amplo espaço para redução de custo. O uso de fios metálicos de cobre colocados entre duas laminas de filme plástico com adesivo permite a elaboração de metamateriais ENG de menor custo e mecanicamente mais flexíveis do que o apresentado em [8], facilitando sua incorporação ao uma maior variedade de cenários de aplicação. Em seguida, é elaborado um modelo de simulação da célula unitária no Ansoft HFSS baseado na estrutura previamente proposta, podendo ser vista, em detalhes e com seus principais parâmetros de projeto apresentados, na Figura 1.

As dimensões exatas da célula unitária ENG são obtidas usando as condições de contorno periódicas mestre-escravo e a excitação da porta Floquet do Ansoft HFSS [9], que emula uma placa ENG com infinitas repetições dessa célula, permitindo a elaboração de múltiplos estudos paramétricos fundamentais para o projeto desse metamaterial. A Tabela I apresenta as dimensões dos principais parâmetro de projeto da célula unitária do metamaterial ENG, visíveis na Figura 1

TABELA I: *Parâmetros de projeto.*

Parâmetro	L	W	ep	dc	el
Comprimento (mm)	10	10	0,025	0,094	0,052

A validação do projeto do metamaterial ENG é feita através da análise dos resultados de simulação referentes aos coeficientes de reflexão (S_{11}) e transmissão (S_{21}), ilustrados na Figura 2, e aos seus parâmetros constitutivos: permissividade elétrica e permeabilidade magnética relativas, (ϵ_r , μ_r), mostrados na Figura 3.

É possível observar na Figura 2 que o coeficiente de reflexão é praticamente nulo em todo o espectro apresentado, 0,2 dB em 915 MHz, indicando que a onda eletromagnética que incide na placa de metamaterial ENG é majoritariamente refletida. Já a curva referente a transmissão mostra um relevante valor negativo, -180 dB em 915 MHz, significando que o metamaterial é praticamente opaco à transmissão de ondas eletromagnéticas nessa faixa de frequência. Esse comportamento de alta reflexão e baixa transmissão de onda eletromagnéticas é o esperado tanto para metamateriais com permissividade elétrica negativa (ENG), como para metamateriais com permeabilidade magnética negativa (MNG). Já sabemos que essa geometria induz respostas elétricas artificiais [4], mas a já citada obtenção dos parâmetros constitutivos deste metamaterial são a evidência definitiva sobre a natureza da sua resposta, dentro desse contexto de simulação. Objetivamente, para que o metamaterial seja classificado como ENG ele precisa apresentar partes reais da permissividade elétrica negativa e permeabilidade

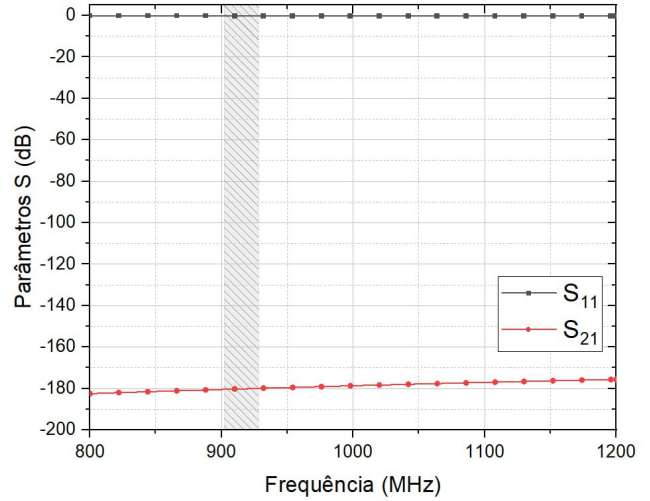


Fig. 2: Coeficientes de reflexão e transmissão do metamaterial ENG.

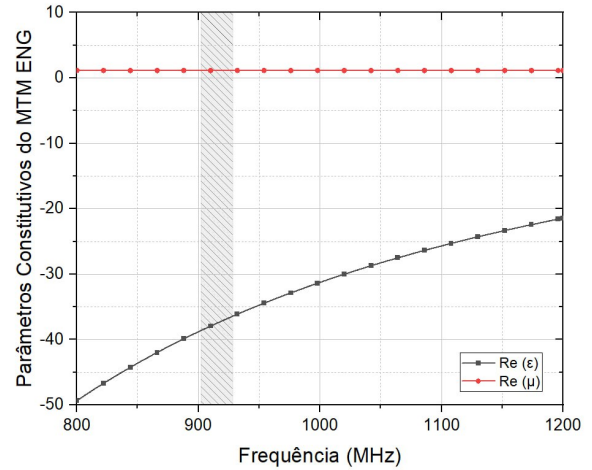


Fig. 3: Parâmetros constitutivos (ϵ_r e μ_r) do metamaterial ENG.

magnética positiva. Esses parâmetros constitutivos são obtidos usando um algoritmo implementado no Octave baseado nos métodos de obtenção que usam os coeficientes de reflexão e transmissão [9], [10]. Na Figura 3, é possível observar que a parte real da permissividade elétrica relativa é negativa em todo espectro de frequências apresentados, sendo -37,3 em 915 MHz. Já a permeabilidade magnética relativa, se mantém próxima de 1 em todo o espectro de frequências apresentado, com o valor de 1,2 em 915 MHz. Dessa forma, os dados de simulação demonstram que o arranjo de fios proposto é um metamaterial ENG.

Por fim, o metamaterial é construído usando fios de cobre, filme plástico adesivo e um gabarito de plástico. O processo de fabricação começa com a colocação do filme plástico em cima do gabarito com a parte não adesiva em contato com a ferramenta. Em seguida, o fio de cobre é posicionado nos sulcos presentes no gabarito, ficando assim adequadamente fixados no filme plástico. Um novo filme plástico é adesivado em cima de

tudo, conferindo unidade ao metamaterial. A conclusão é feita com a remoção do metamaterial recém-elaborado do gabarito com o arremate das extremidades usando ferramenta de corte, gerando uma peça quadrada de 200 mm de aresta. A Figura 4 mostra o metamaterial ENG fabricado, os insumos e o gabarito utilizados.

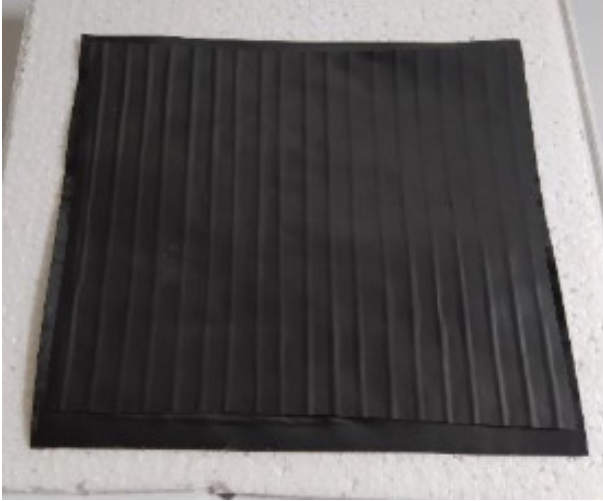


Fig. 4: Metamaterial ENG construído.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o metamaterial fabricado, é preciso buscar dados experimentais que o validem empiricamente. A ideia é criar um dipolo de meia onda como referência, caracterizando-o, e, em seguida, acoplar esse mesmo dipolo ao metamaterial fabricado, obtendo uma antena de campo próximo elétrico que também é caracterizada. Dessa forma, a validação vem como resultado de uma análise comparativa das caracterizações empíricas e de simulação do dipolo e da antena de campo próximo elétrico.

Nesse sentido, o primeiro passo é a concepção da antena dipolo de meia onda. Esse processo começa com a elaboração de um modelo de simulação no Ansoft HFSS, devendo esse ter banda de impedância cobrindo a faixa UHF definida para a região 2 da ITU, 902-928 MHz, e apresentar um ganho de simulação próximo ao valor definido para um dipolo de meia onda [10], sendo 2 dBi esse valor. O modelo de simulação da antena dipolo projetada possui banda de impedância definida por 892,929 - 961,616 MHz, e valor mínimo de -21,4 dB, podendo isso ser visto na Figura 5.

Quanto ao ganho, é possível ver na Figura 6, que o modelo de simulação da antena dipolo projetada possui ganho máximo de 2,31dBi em 915MHz, estando isso em linha com o previamente idealizado.

O dipolo projetado é então fabricado usando fios de cobre com 0,94 mm de diâmetro, tendo seu comprimento total de 150 mm, e podendo ser visto na Figura 7.

Em seguida, os dados de seu coeficiente de reflexão para análise de sua banda de impedância são obtidos experimentalmente, usando um analisador de rede Agilent 8510C, como visto na Figura 5. A antena apresenta o intervalo 877,011 - 979,808 MHz como banda de impedância, mostrando boa concordância entre dados simulados e experimentais, e cobrindo

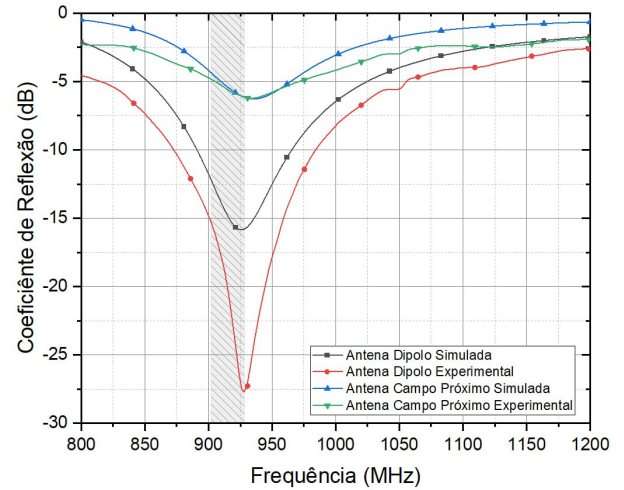


Fig. 5: Coeficiente de reflexão das antenas simuladas e fabricadas.

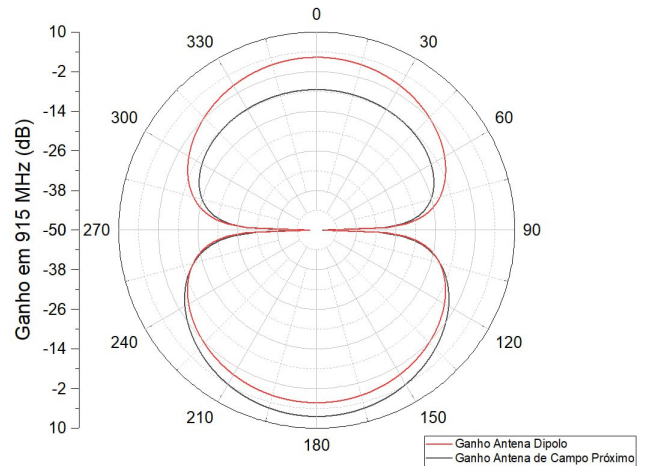


Fig. 6: Ganho simulado das antenas.

toda a faixa UHF para a região 2 definida pela ITU. Dessa forma, a antena é considerada validada.

Em seguida, é feito o modelo de simulação da antena de campo próximo, oriunda do acoplamento do dipolo com o metamaterial ENG e pode ser visto na Figura 9.

Neste modelo, uma peça de 200 mm x 200 mm do metamaterial ENG é posicionada a 4 cm acima do dipolo. O dipolo e o metamaterial são centralizados tanto no comprimento como na largura. A Figura 5 permite ver o coeficiente de reflexão simulado da antena de campo próximo que claramente se deteriora muito, não apresentando banda de impedância com valores menores de -10 dB, sendo seu mínimo, -5,7 dB em 917,2 MHz. O posicionamento do metamaterial ENG a 4 cm do dipolo reflete para o dipolo parte das ondas eletromagnéticas que este irradia, intensificando o sinal refletido e medido no coeficiente de reflexão, sendo essa a causa de seu deterioramento. A Figura 6 apresenta o ganho simulado da antena de campo próximo.

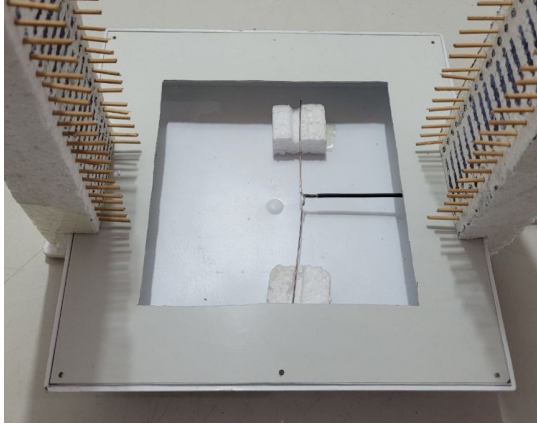


Fig. 7: Antena dipolo de meia onda inserida na estrutura de testes usando um sistema RFID.

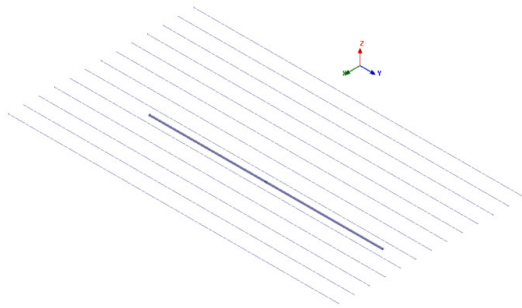


Fig. 8: Modelo de simulação da antena de campo próximo.

A adição do metamaterial ENG reduz o ganho, para elevação nula ($\theta = 0^\circ$), de 2,31 dBi para -7,45 dBi, mostrando que, de fato, o metamaterial ENG impede a passagem de ondas eletromagnéticas. O ganho no sentido oposto, em elevação máxima ($\theta = 180^\circ$), aumenta de 2,27 dBi para 6,42 dBi, evidenciando claramente que o metamaterial ENG reflete as ondas eletromagnéticas que incidem sobre ele.

A antena de campo próximo é então prototipada. Novamente, o analisador de rede Agilent 8510C possibilita a obtenção experimental do coeficiente de reflexão deste dispositivo, sendo apresentado na Figura 5. Observa-se boa congruência entre os valores simulados e experimentais, ratificando o comportamento verificado em ambiente de simulação.

Por fim, com o intuito de validar na prática o metamaterial ENG através da constatação de que a antena de campo próximo funciona como esperado, é montado um cenário usando um leitor RFID UHF Honeywell IF2, um cabo LMR-195 de 4 m e uma tag Avery Dennison AD-237 com o intuito de capturar o RSSI (*Received Signal Strength Indication*) do sinal enviado pela tag. Vale ressaltar que isso também valida a aplicabilidade do metamaterial desenvolvido nesse trabalho em sistemas de identificação por radiofrequência UHF.

Para essa validação, uma estrutura eletromagneticamente neutra ($\epsilon_r \approx 1$, $\mu_r \approx 1$) é desenvolvida, utilizando poliestireno expandido (EPS) e bastonetes de madeira. Os testes de leitura levaram em conta um espaço com 25 níveis de altura e 10 faixas paralelas, totalizando 250 posições de leitura, exibido na Figura 9. Os níveis foram dispostos perpendicularmente em

relação à base da estrutura, sendo o primeiro nível posicionado à 30mm acima da antena e todos os outros com um espaçamento de 10 mm entre si. Todas as leituras foram realizadas com a mesma potência (15dBm).

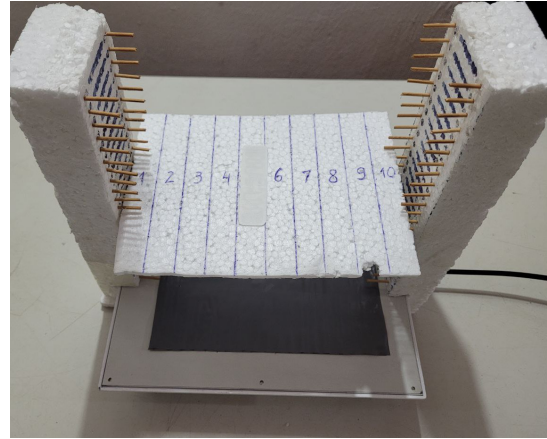


Fig. 9: Estrutura para testes práticos em um sistema RFID UHF com o metamaterial ENG posicionado acima do dipolo de meia onda formando a antena de campo próximo elétrico.

Com o propósito de evidenciar claramente o relacionamento do metamaterial ENG com as ondas de rádio UHF geradas pelo leitor RFID, a validação prática proposta é feita para dois cenários. O primeiro é o da antena dipolo sem metamaterial ENG. Já o segundo é feito com o dipolo acoplado ao metamaterial ENG, compondo a antena de campo próximo. Em cada posição, foi realizado um total de 10 leituras e, assim, obtidos valores médios de RSSI. Na Figura 10, os valores são referentes a antena sem o metamaterial, com leituras registradas em todas as posições, e valor de RSSI máximo de -42,3 dBm. Esses dados são compatíveis como os de ganho simulado, apresentados na Figura 6 para o dipolo de meia onda.

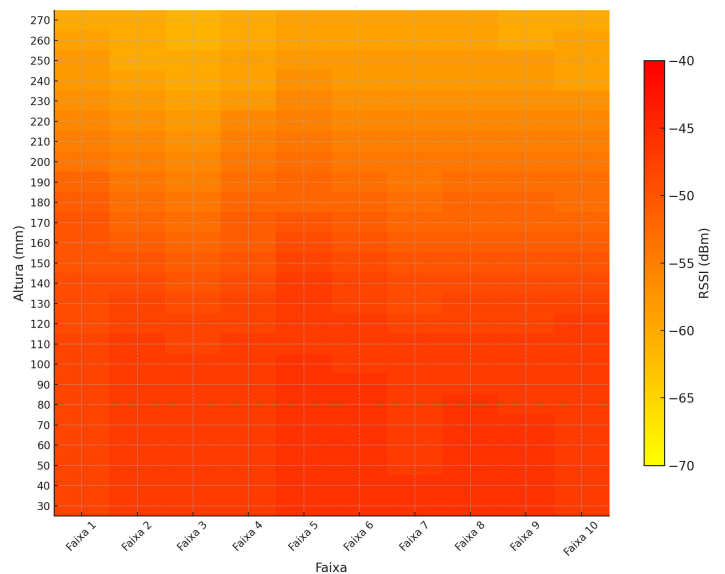


Fig. 10: Intensidade do RSSI em função da posição da tag ao testar a antena dipolo.

Já a Figura 11 apresenta os valores da antena de campo próximo com o metamaterial acoplado, com leituras em apenas algumas das posições, pois não houve energia suficiente para o leitor receber as informações vindas da tag. O valor máximo de RSSI nesse cenário é de -54,8 dBm. Novamente, é perceptível que esses dados são compatíveis como os de ganho simulado, apresentados na Figura 6 para a antena de campo próximo elétrico.

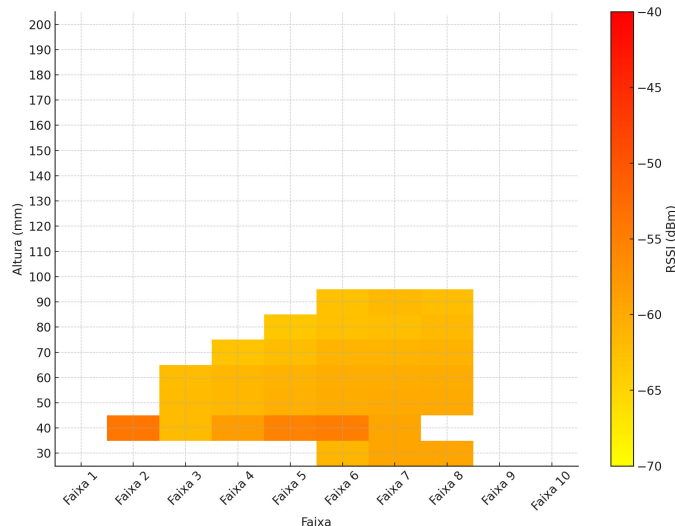


Fig. 11: Intensidade do RSSI em função da posição da tag ao testar a antena de campo próximo.

Os dados apresentados nas Figuras 10 e 11 permitem concluir que o comportamento funcional dos dispositivos projetados e fabricados, tanto a antena dipolo como a de campo próximo feita acoplando o dipolo ao metamaterial ENG, estão em linha com os dados produzidos pelos modelos de simulação e coletados pelo analisador de rede. O metamaterial de baixo custo realmente atua refletindo fortemente as ondas eletromagnéticas incidentes na faixa de frequências UHF definidas para a região 2 da ITU. A antena de campo próximo permite a criação de uma zona de leitura bem confinada, cenário muito útil em um ponto de venda de uma loja de varejo que use RFID como sistema de identificação automática e captura de dados. Dessa forma, é razoável afirmar que metamaterial é de fato ENG na faixa de frequências 902-928 MHz e que esse pode ser usado em sistemas RFID UHF.

IV. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta o projeto, a fabricação e a validação de um metamaterial ENG de baixo custo para aplicações em sistemas RFID UHF. Inicialmente, uma célula unitária é simulada no Ansoft HFSS, permitindo a análise dos coeficientes de reflexão e transmissão, além da extração dos parâmetros constitutivos ϵ_r e μ_r . Os resultados obtidos indicam que o arranjo de fios proposto se comporta como um metamaterial ENG. Na sequência, o metamaterial é construído com fios de cobre e filme plástico, resultando em uma estrutura mecanicamente flexível e de custo reduzido. Um dipolo de meia onda é projetado e fabricado para atuar como antena de referência, permitindo o acoplamento com o metamaterial

e a criação de uma antena de campo próximo. Os dados obtidos por simulação e experimento mostram coerência e confirmam que o metamaterial ENG reflete eficientemente as ondas eletromagnéticas, permitindo apenas a propagação de ondas evanescentes. Isso gera uma zona de leitura confinada, adequada para aplicações que exigem controle espacial do campo irradiado, como pontos de venda com RFID. Apesar da intensificação da reflexão causar parte do sinal a retornar à antena, leitores modernos, como os monoestáticos, operam de forma robusta mesmo nesse cenário. Dessa forma, conclui-se que o metamaterial ENG apresentado opera como esperado na faixa de 902-928 MHz e pode ser empregado com sucesso em sistemas RFID UHF.

REFERÊNCIAS

- [1] Renub Researches, "RFID Market Global Forecast Report by Type, Product, Frequency, End Use, Countries and Company Analysis 2025-2033", researchandmarkets.com, Novembro 2024.
- [2] E. C. Moreira et al., "RFID in cashew nut industry". In: 2014 IEEE Brasil RFID. [S.l.: s.n.], 2014. p. 31-34.
- [3] M. Bertolini et al., "Experimental evaluation of business impacts of RFID in apparel and retail supply chain." International Journal of RF Technologies Research and Applications, v. 3, n. 4, p. 257-282, 2012.
- [4] F. Capolino, "Theory and Phenomena of Metamaterials." [S.l.]: CRC Press, 2009. Metamaterials Handbook. ISBN 9781420054262.
- [5] V. Veselago et al., "Negative refractive index Materials." Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, v. 3, n. 2, p. 1-30, 2006.
- [6] E. A. Moretti et al., "Main difficulties during RFID implementation: an exploratory factor analysis approach." Technology Analysis & Strategic Management, v. 31, n. 8, p. 943-956, 2014.
- [7] F. Bilotti, L. Sevgi, "Metamaterials: Definitions, properties, applications, and FDTD-based modeling and simulation." International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, v. 22, n. 4, p. 422-438, 2012.
- [8] T. A. Morgado et al., "Spatially Confined UHF RFID Detection With a Metamaterial Grid.", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 62, n. 1, 2014.
- [9] A. B. Numan, M. S. Sharawi, "Extraction of Material Parameters for Metamaterials Using a Full-Wave Simulator". IEEE Antennas and Propagation Magazine, v. 55, n. 5, p. 202-211, 2013.
- [10] Constantine A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, Third Edition, John Wiley & Sons Inc., 2005.