

# Avaliação experimental de técnicas de casamento de impedância em antenas de microfita *patch* circular

Hartur Sousa, Jéssica Sousa, Rafael Bayma, Andrécia Costa e André Cruz

**Resumo**— Este trabalho apresenta uma avaliação experimental dos parâmetros de desempenho de três antenas de microfita com *patch* circular, cada uma utilizando uma técnica distinta de casamento de impedância. As antenas foram projetadas para operar na frequência de 2,4 GHz, com alimentação de 50 Ω. As técnicas de casamento de impedância empregadas foram: sonda coaxial, linha de microfita indentada e transformador de 1/4 de onda. A otimização do casamento de impedância foi realizada utilizando o software Ansys HFSS. Os resultados foram validados por meio da caracterização experimental das antenas, utilizando o analisador vetorial de rede portátil LiteVNA-64.

**Palavras-Chave**— Antena de microfita, casamento de impedância, caracterização experimental.

**Abstract**— This work presents an experimental evaluation of the performance parameters of three microstrip antennas with circular patch, each employing a distinct impedance matching technique. The antennas were designed to operate at a frequency of 2.4 GHz, with a 50 Ω feed. The impedance matching techniques used were: coaxial probe, inset-fed microstrip line, and quarter-wave transformer. The impedance matching was optimized using Ansys HFSS software. The results were validated through experimental characterization of the antennas using the LiteVNA-64 portable vector network analyzer.

**Keywords**— Microstrip antenna, impedance matching, experimental characterization.

## I. INTRODUÇÃO

Antenas de microfita têm sido amplamente utilizadas em aplicações de comunicação sem fio devido às suas características favoráveis, como baixo perfil, baixo custo de fabricação e fácil integração com circuitos de radiofrequência [1]. Entre as diversas geometrias disponíveis, a antena de *patch* circular destaca-se por sua simetria, estabilidade na resposta de frequência e estado da arte bem consolidado [2].

O desempenho das antenas de microfita é influenciado tanto por sua geometria e material dielétrico quanto pela técnica de alimentação, a qual afeta diretamente parâmetros como largura de banda, frequência de operação, taxa de onda estacionária e perda de retorno [3]. A escolha da técnica de alimentação ideal requer avaliar fatores como facilidade de fabricação, adaptação à impedância de 50 ohms, estabilidade da frequência e complexidade do projeto, sendo que simulações com ferramentas como o *High Frequency Structure Simulator* fornecido pela Ansys são essenciais para otimizar o desempenho da antena [4] [5].

Hartur Sousa<sup>1</sup>, e-mail: hartur.sousa@tucurui.ufpa.br; Jéssica Sousa<sup>1</sup>, e-mail: jessica.sousa@tucurui.ufpa.br; Rafael Bayma<sup>2</sup>, e-mail: rafael-bayma@ufpa.br; Andrécia Costa<sup>2</sup>, e-mail: andreciacosta@ufpa.br; André Cruz<sup>2</sup>, e-mail: andrcruz@ufpa.br. <sup>1</sup>Curso de Engenharia Elétrica, <sup>2</sup>Faculdade de Engenharia Elétrica; <sup>1,2</sup> Universidade Federal do Pará. Este trabalho foi parcialmente financiado por FAPESPA (projeto PRO6432-2023).

Este trabalho apresenta uma análise comparativa de desempenho de três antenas de microfita com *patch* circular projetadas para 2,4 GHz, cada uma utilizando uma técnica distinta de casamento de impedância: sonda coaxial, linha de microfita indentada e transformador de 1/4 de onda. Realizando uma varredura paramétrica de cada técnica no software HFSS, e por meio da fabricação utilizando corte a laser e corrosão, as antenas foram caracterizadas utilizando um analisador de rede vetorial portátil LiteVNA-64 [3]. Ao comparar os resultados simulados e experimentais, verificou-se um desvio médio de 0,11 GHz na resposta em frequência. A técnica de transformador de 1/4 de onda mostrou maior largura de banda relativa de 2,24%.

## II. PROJETO DA ANTENA PATCH CIRCULAR

Para determinar o raio do *patch* circular das antenas de microfita, utilizou-se a equação (1) [1].

$$a = F \left\{ 1 + \left[ \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \right] \left( \ln \left[ \frac{\pi F}{2h} \right] + 1,7726 \right) \right\}^{-1/2}, \quad (1)$$

onde  $F = 8,791 \times 10^9 / (f_r \sqrt{\epsilon_r})$ , a frequência  $f_r$  em Hz, e a espessura  $h$  do substrato em cm.

As antenas foram projetadas para em  $f_r = 2,4$  GHz, amplamente utilizada em aplicações de comunicação sem fio como *Wi-Fi* (IEEE 802.11), *Bluetooth* (IEEE 802.15.1) e *ZigBee* (IEEE 802.15.4) [6]. O raio do *patch* é determinado considerando que a antena possui um substrato de fibra de vidro FR4 com espessura  $h = 0,15$  cm, com constante dielétrica  $\epsilon_r = 4,4$  e tangente de perdas 0,02, resultando em um *patch* com raio  $a \approx 1,6976$  cm. A largura e o comprimento do substrato quadrado (com plano de terra) foram determinados por  $L_g = W_g = 6h + 2a \approx 4,2951$  cm [5].

Na figura 1 são mostradas as três antenas utilizando alimentação por: sonda coaxial abaixo do plano de terra, linha de microfita indentada e transformador de 1/4 onda.

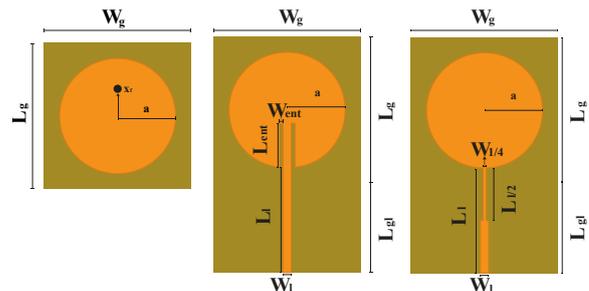


Fig. 1. Antenas *patch* circular com: (a) Sonda coaxial abaixo do plano de terra; (b) Linha de microfita indentada; (c) Transformador de 1/4 onda.

Para determinar a largura  $W_l$  das linhas de microfita com impedância  $Z_l$  foi utilizada a equação (2) definida por [3].

$$Z_l = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{r_{ef}}}} \ln \left[ \frac{8h}{W_l} + \frac{W_l}{4h} \right], & W_l \leq h \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{r_{ef}}}} \left( \frac{W_l}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left[ \frac{W_l}{h} + 1,444 \right] \right)^{-1}, & W_l > h \end{cases} \quad (2)$$

onde  $\epsilon_{r_{ef}}$  é permissividade relativa efetiva entre o dielétrico e espaço livre, aproximada pela equação (3) definida por [3].

$$\epsilon_{r_{ef}} = \frac{(\epsilon_r + 1)}{2} + \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{2a} \right]^{-1/2} \quad (3)$$

A partir da inversão da equação (2) para  $Z_l = 50 \Omega$ , verificou-se uma largura de  $W_l = 0,24$  cm. O comprimento total das linhas de microfita pode ser determinado por  $L_l = \lambda_g/2 \approx 3,09$  cm, com  $\lambda_g = c/(f_r \sqrt{\epsilon_{r_{ef}}})$ .

### III. RESULTADOS

A posição  $x_f$  da sonda coaxial na antena 1, as dimensões  $W_{ent}$  e  $L_{ent}$  dos entalhes da antena 2, e a largura  $W_{1/4}$  do trecho de  $1/4$  de  $\lambda_g$  da antena 3 podem ser determinados a partir de um conjunto de simulações paramétricas no *software* Ansys HFSS, em conjunto com um código no *software* Matlab para os parâmetros de desempenho: Perda de retorno ( $S_{11}$ , dB), Largura de banda relativa (BW, %) e menor desvio de  $f_r$ .

O setup de simulação empregou 20 iterações adaptativas com malha  $\lambda/3$  (0,3333) e tolerância  $\Delta S \leq 0,002$ , analisando a faixa de 2 a 3 GHz (1500 pontos de frequência). Para a Antena 1, implementou-se um cabo coaxial (diâmetro externo de 0,4 cm e diâmetro do condutor interno 0,14 cm,  $\epsilon_r = 2,25$ ) com *Wave Port*, enquanto as Antenas 2 e 3 utilizaram *Lumped Ports* (50  $\Omega$ ). Condições de contorno PEC foram aplicadas ao patch e ao plano de terra. A validação experimental foi realizada utilizando o LiteVNA-64 portátil, calibrado com a técnica *Short, Open, Load* (SOL).

Na figura 2 são mostrados os resultados de desempenho da antena 1 (com sonda coaxial) variando a posição de alimentação  $x_f$  de 0 a 0,5a em 25 pontos.

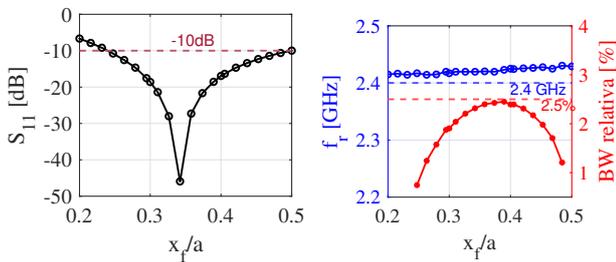


Fig. 2. Desempenho da antena 1 em função da posição de alimentação em  $x_f$ , normalizado pelo raio  $a$  do patch: (a) Perda de retorno; (b) Frequência de ressonância (em azul) e Largura de banda relativa (em vermelho).

A partir da figura 2(a) foi verificado que a antena apresentou menor perda de retorno com a sonda em  $x_f = 0,3421a$ . No entanto, avaliando a figura 2(b), verifica-se que a maior largura de banda relativa é obtida para  $x_f = 0,3737a$ , de  $BW = 2,4262\%$ , com perda de retorno admissível de  $-21,67$  dB e frequência de ressonância de 2,4196 GHz (desvio de 0,81%).

Na figura 3 são mostrados os resultados de desempenho para a antena 2 alimentada por linha de microfita indentada (*inset-fed*) com dois entalhes no patch circular. Foram realizadas 375 simulações variando a largura  $W_{ent}$  dos entalhes de 0 a 0,24 cm, e o comprimento  $L_{ent}$  de 0,6 a 1,69 cm.

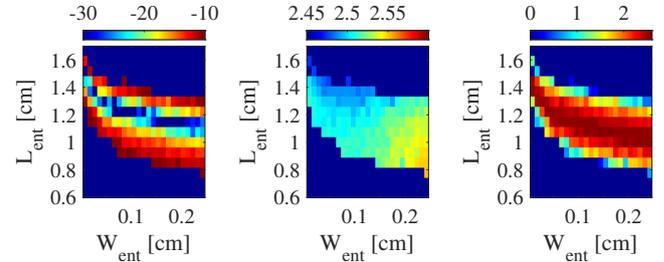


Fig. 3. Desempenho da antena 2 em função da largura  $W_{ent}$  e comprimento  $L_{ent}$  dos entalhes: (a) Perda de retorno; (b) Frequência de ressonância; (c) Largura de banda relativa.

A partir da figura 3 a verifica-se que a antena 2 apresenta perda de retorno mínima para um entalhe mais comprido e mais estreito, quase atingindo o centro do patch circular. No entanto, fabricar um entalhe estreito com precisão pode ser um desafio. Ao aumentar a largura do entalhe, verifica-se que a antena passa a ressoar com valores menores de comprimento do entalhe. Isso mostra que, diferente da antena patch retangular, a largura e o comprimento ideal do entalhe não são independentes.

A partir da figura 3(b) verifica-se que a frequência de ressonância da antena é deslocada para a direita a medida que a largura do entalhe aumenta. Tal deslocamento é resultado da diminuição da área efetiva do patch da antena. A decisão para escolha da largura e do comprimento do entalhe na antena 2 foi tomada a partir da análise dos resultados da figura 3(c), ao avaliar os pontos de maior largura de banda relativa, na faixa entre 2,4 a 2,5%. A partir dessa primeira seleção, decidiu-se por avaliar os resultados com menor deslocamento da frequência de 2,4 GHz, com perda de retorno entre -20 e -30 dB, com maior largura de entalhe, para facilitar a fabricação da antena.

Os resultados mostraram-se adequados para  $W_{ent} = 0,03887$  cm (ou 0,39mm) e  $L_{ent} = 1,3007$  cm, com a antena 2 apresentando a seguinte resposta:  $BW = 2,5114\%$ ,  $S_{11} = -25,10$  dB, e  $f_r = 2,5114$  GHz (desvio de 4,04%).

Para a antena 3, foi variada a largura  $W_{(1/4)}$  do trecho de  $L_{l/2} = \lambda_g/4$  de 0 a 0,5 $W_l$  em 30 pontos (figura 3).

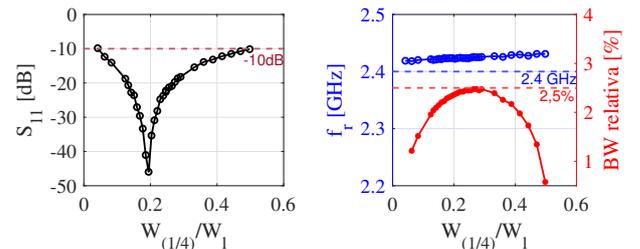


Fig. 4. Desempenho da antena 3 em função da largura  $W_{(1/4)}$ , normalizado pela largura da linha  $W_l$ : (a) Perda de retorno; (b) Frequência de ressonância (em azul) e Largura de banda relativa (em vermelho).

Buscando resultados mais precisos, as simulações para a antena 3 foram realizadas em passos não uniformes de  $W_{1/4}$ , com maior concentração de pontos entre 0,1 e  $0,3W_l$ , como é indicado na figura 4. Verifica-se que a menor perda de retorno é apresentada para  $W_{1/4} = 0,2W_l$ . Contudo, avaliando a figura 4b, constata-se que a maior largura de banda é obtida para  $W_{1/4} = 0,2468W_l$  ( $W_{1/4} \approx W_l/4$ ).

Os resultados mostraram-se adequados para a antena 3 com alimentação via linha de microfita com transformador de quarto de onda com comprimento  $L_l/2 = \lambda_g/4 = 1,54\text{cm}$  e largura  $W_{1/4} = 0,059\text{ cm}$  (ou 0,59mm), apresentando a seguinte resposta:  $BW = 2,4504\%$ ,  $S_{11} = -22,20\text{ dB}$ , e  $f_r = 2,4329\text{ GHz}$  (desvio de 1,37%).

A partir da escolha da posição  $x_f$  da sonda coaxial de alimentação na antena 1, as dimensões  $W_{ent}$  e  $L_{ent}$  dos entalhes na antena 2, e a largura  $W_{1/4}$  na linha da antena 3, foi iniciado o processo de fabricação das três antenas pelo método de corrosão com perclorato de ferro.

Os desenhos foram transferidos para o FR4 com vinil adesivo, cortado com um *router* CNC a laser com precisão de 0,01 cm, usando um laser de  $\text{CO}_2$  com potência de 80 W. No processo, foi utilizado 8% da capacidade para um corte superficial do vinil adesivo. A solução corrosiva foi diluída na proporção de uma parte de perclorato para quatro partes de água. Após a corrosão, a placa foi lavada, os adesivos de vinil remanescentes foram removidos, e em cada caso foi solado um conector SMA. As antenas fabricadas são mostradas na figura 5.

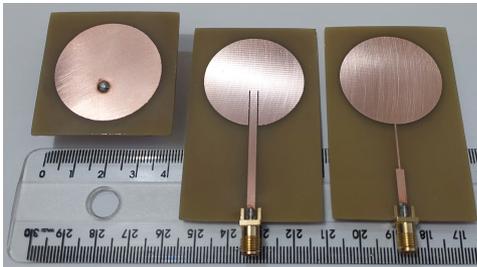


Fig. 5. Antenas 1, 2 e 3 fabricadas pelo método de corte a laser e corrosão por perclorato de ferro, cada com o devido conector SMA soldado com estanho.

Na figura 6 é mostrado o *setup* de medição das antenas utilizando o LiteVNA-64.

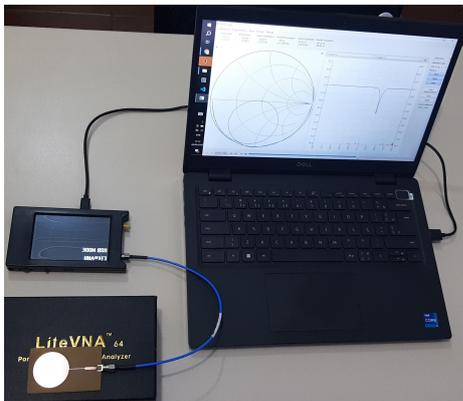


Fig. 6. *Setup* de medição utilizando LiteVNA-64 portátil e notebook.

Os resultados de  $S_{11}$  para as antenas 1, 2 e 3 no *software* HFSS, juntamente com os dados de medição obtidos utilizando o LiteVNA-64 são mostrados na figura 7.

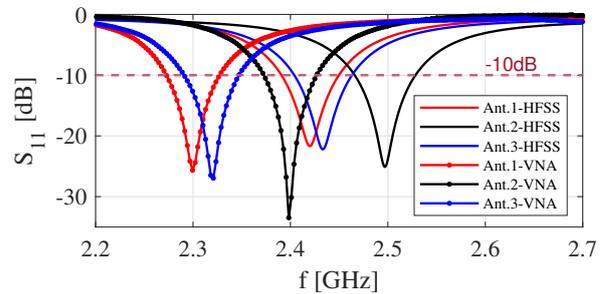


Fig. 7. Comparação entre resultados de perda de retorno para as antenas 1, 2 e 3 otimizadas: Simulados no *software* HFSS e medidos no LiteVNA-64.

Avaliando razão de onda estacionária, foi verificado que as antenas 1, 2 e 3 apresentaram  $VSWR = 1,12, 1,04$  e  $1,09$ , respectivamente, nas frequências de ressonância 2,29 GHz, 2,39 GHz e 2,32 GHz. Portanto, verifica-se que todas as antenas apresentaram  $VSWR$  inferior a 2, sendo esse um requisito mínimo de operação eficiente para antenas de microfita. A antena 1 (com sonda coaxial) apresentou impedância de entrada  $Z = 55,13 + 2,71j\ \Omega$ , resultando em uma perda de retorno de  $-25,15\text{ dB}$  e  $BW = 2,2048\%$ . A antena 2 (com entalhes no *patch*) apresentou impedância de entrada  $Z = 49,44 - 2,14j\ \Omega$ , resultando em uma perda de retorno de  $-33,02\text{ dB}$  e  $BW = 2,1129\%$ . Por fim, a antena 3 (com transformador de 1/4 de onda) apresentou impedância de entrada  $Z = 50,10 + 4,61j\ \Omega$ , resultando em uma perda de retorno de  $-26,73\text{ dB}$  e  $BW = 2,2433\%$ .

#### IV. CONCLUSÕES

Os resultados experimentais obtidos via medição mostraram um deslocamento médio de  $-0,11\text{ GHz}$  em comparação aos simulados. Tal comportamento pode ser explicado por desvio na constante dielétrica do substrato utilizado. Com o deslocamento, a medição da antena 2 mostrou menor desvio de frequência de 0,01 %. No entanto, por dificuldade de fabricar a largura adequada do entalhe no *patch*, essa apresentou uma diminuição da largura de banda esperada. Por fim, as medições da antena 3 demonstraram maior  $BW$ , além de desempenho adequado em perda de retorno, e fabricação mais simples.

#### REFERÊNCIAS

- [1] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed., Hoboken, NJ: Wiley, 2016.
- [2] D. M. Pozar and D. H. Schaubert, *Microstrip Antennas: The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays*, IEEE Press, 1995.
- [3] M. A. Matin and A. I. Sayeed, "A design rule for inset-fed rectangular microstrip patch antenna," *Proc. of the International Conference on Computer and Communication Engineering*, 2010, pp. 1–4.
- [4] S. Kumar and A. Patnaik, "Comparison of different feeding techniques for rectangular microstrip patch antenna," *2020 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation (InCAP)*, 2020, pp. 1–4.
- [5] A. I. Rachmansyah, & A. B. Mutiara, Designing and manufacturing microstrip antenna for wireless communication at 2.4 GHz. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 3(5), 670-675, 2011.
- [6] IEEE STANDARDS ASSOCIATION. The evolution of Wi-Fi technology and standards. IEEE SA Beyond Standards, 12 jan. 2023. Disponível em: <https://standards.ieee.org/beyond-standards/the-evolution-of-wi-fi-technology-and-standards/>. Acesso em: 19 maio 2025.