

Caracterização de antena *patch* circular usando técnicas de casamento de impedância para faixa de frequência de 2,035 GHz

Characterization of circular patch antenna using impedance matching techniques for 2.035 GHz frequency range

Caracterización de antena patch circular utilizando técnicas de matrimonio de impedancia para rango de frecuencia de 2,035 GHz

Resumo

A demanda por novas faixas de operação de frequência e a construção de sofisticados circuitos integrados de micro-ondas de baixo custo e de fácil fabricação têm instigado pesquisadores da área de telecomunicações a buscarem por novos materiais, novas geometrias e técnicas objetivando um melhor desempenho para dispositivos como antenas, filtros, guias de ondas, entre outros. Nos últimos anos, as pesquisas envolvendo dispositivos compactos, como as antenas de microfitas, tem crescido, pois são estruturas de baixo custo, leve e de fácil fabricação e integração a circuitos de micro-ondas aplicados a comunicações móveis. Diante disso, este trabalho tem como objetivo apresentar a caracterização de antenas *patch* de geometria circular através de técnicas de casamentos de impedância para faixa de frequência de 2,035 GHz, faixa de frequência usada no *Global System for Mobile Communications*. Para isso, adotaram-se metodologias encontradas na literatura especializada de forma a projetar as estruturas das antenas de microfitas. Foram feitas simulações usando *software Ansoft Designer™* (ferramenta CAD para circuitos e simulações de micro-ondas, baseada no Método dos Momentos (MoM)). Posteriormente as antenas foram fabricadas para medição através do analisador de rede vetorial de duas portas modelo Agilent E5071C. Os resultados simulados e medidos foram comparados: a técnica de casamento *inset-fed* apresentou uma diferença percentual maior que 5%; já as demais, com as técnicas de casamento transformador de quarto de onda e híbrida, apresentaram a menor diferença percentual ficando abaixo de 5%, tendo, assim, bom resultado entre resultados experimentais e medidos.

Palavras-chave: Antena *patch*; geometria circular; Técnicas de casamento de impedância.

Abstract

The demand for new frequency operating ranges and the construction of sophisticated, low-cost, and easy-to-manufacture microwave integrated circuits has instigated researchers in the field of telecommunications to search for new materials, new geometries, and techniques aiming at better performance for devices such as antennas, filters, and waveguides, among others. In recent years, research involving compact devices such as microstrip antennas has grown for their low-cost, lightweight structures that are easy to manufacture and integrate into microwave circuits applied to mobile communications. Therefore, this work aims to present the characterization of circular geometry patch antennas through impedance matching techniques for the 2.035 GHz frequency band, which is the frequency band used in the Global System for Mobile Communications. For this, methodologies found in the specialized literature were adopted to design the structures of the microstrip antennas. Simulations were performed using Ansoft Designer™ software (CAD tool for microwave circuits and simulations, based on the Method of Moments (MoM)). Subsequently, the antennas were manufactured for measurement using the Agilent E5071C two-port vector network analyzer. The simulated and measured

Juliete da Silva Souza 
julietesouza25@gmail.com
Instituto Federal do Ceará
(IFCE Cedro)

José Janiere da Silva Souza 
janiere.silva@ifce.edu.br
Instituto Federal do Ceará
(IFCE Cedro)

results were compared: the inset-fed matching technique showed a percentage difference greater than 5%, while the others with the transforming quarter-wave and hybrid matching techniques presented the lowest percentage difference, remaining below 5%, thus having good results between experimental and measured results.

Keywords: Patch antenna; Circular geometry; Impedance matching techniques.

Resumen

La demanda por nuevos rangos de operación de frecuencia y la construcción de circuitos sofisticados integrados de microondas de bajo coste y de fácil fabricación viene instigando investigadores del área de telecomunicaciones a buscar nuevos materiales, nuevas geometrías y técnicas objetivando un mejor rendimiento para dispositivos con antenas, filtros, guías de ondas, entre otros. En los últimos años, las investigaciones relacionadas con dispositivos compactos como las antenas de micro-banda viene creciendo, porque son estructuras de bajo coste, ligero y de fácil fabricación e integración a circuitos de microondas aplicados a comunicaciones móviles. Ante esto, este trabajo tiene el objetivo de presentar la caracterización de antenas patch de geometría circular por medio de técnicas de matrimonio de impedancia para rango de frecuencia de 2,035 GHz. Este es el rango de frecuencia utilizado en Global System for Mobile Communications. Para tanto, fueron adoptadas metodologías encontradas en la literatura especializada de forma a proyectar las estructuras de las antenas de micro-banda. Fueron hechas simulaciones utilizando software Ansoft Designer™ (herramienta CAD para circuitos y simulaciones de microondas, basada en el Método de los Momentos (MoM). Posteriormente las antenas fueron producidas para mediciones por medio del analizador de red vectorial de dos puertos modelo Agilent E5071C. Los resultados simulados y medidos fueron comparados: la técnica de matrimonio inset-fed presentó una diferencia porcentual mayor que 5%, ya las demás con técnicas de matrimonio transformador de cuarto de onda e híbrida presentaron la menor diferencia porcentual quedando debajo de 5%, teniendo, por lo tanto, buen resultado entre resultados experimentales y medidos.

Palabras clave: Antena patch; geometría circular; Técnicas de matrimonio de impedancia.

1 Introdução

Nos dias atuais, o aparelho celular é um dos acessórios indispensáveis no cotidiano das pessoas. Neste cenário, é importante destacar que a padronização dos sistemas de celulares teve seu início na Europa em meados da década de 80, onde existiam diversos padrões de sistemas celulares. Vale destacar que as incompatibilidades técnicas prejudicavam o funcionamento dos aparelhos, acarretando insatisfações dos usuários. Tendo em vista este fato, os profissionais da época estimaram que ano a ano a demanda pelo acessório cresceria, necessitando aumentar, assim, a capacidade de canais para atender o crescimento do setor (TELECO, 2020).

Assim, as autoridades técnicas desenvolveram um único sistema para comunidade europeia. Após inúmeros estudos, realizados em vários países, nasceu o sistema GSM (*Global System for Mobile Communications*), cujos fundamentos técnicos foram definidos em 1987, tendo seu primeiro sistema comercialmente instalado na Finlândia. Vale salientar que a tecnologia GSM é líder em número de usuários a nível mundial, pois usa da combinação das técnicas de acesso FDMA (*Frequency Division Multiple Access*, ou Múltiplo Acesso por Divisão de Frequência) e TDMA (*Time Division Multiple Access*, ou Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo) que inicialmente foram estruturadas sobre a banda de 900 MHz (TELECO, 2020).

A crescente demanda pelos serviços de telefonia móvel tornou necessária a busca por novas faixas de operação na Europa. Assim, a faixa de operação em GSM possibilitou uma considerável oferta de capacidade, em virtude do largo espectro disponível na região de 1800 MHz, visto que comporta 374 canais GSM (374 ARFCNs) recebendo a denominação de GSM 1800 e DCS 1800 (*Digital Cellular System*, ou Sistema de Celular Digital). A maioria dos países adotou a proposta com pequenas modificações, exceto os Estados Unidos (que adotaram a faixa de frequência de 1900 MHz adiante). Essa composição também foi adotada no Brasil pela Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações), onde a oferta as bandas D (910-912,5 MHz e 1710-1725 MHz) e E (912,5-915 MHz e 1740-1755 MHz), dentro do modelo SMP (Autorizações do Serviço Móvel Pessoal), que viabilizou a instalação das operadoras em tecnologia GSM (TELECO, 2020; ANATEL, 2016).

O avanço tecnológico na área de telecomunicações tem impulsionado a construção de sofisticados circuitos integrados de micro-ondas de baixo custo e de fácil fabricação. Diversos pesquisadores da área vêm buscando desenvolver estudos voltados a novas geometrias e novos materiais de forma alcançar um melhor desempenho para os sistemas de telecomunicações. Neste sentido, nos últimos anos, notou-se um aumento no número de investigações por dispositivos compactos, leves e de baixo custo de fabricação. Entre estes dispositivos, estão as antenas planares de microfita (antenas *patch*) que se caracterizam por serem estruturas planares com diversas vantagens – tais como baixo peso, possibilidades de variações de suas dimensões, facilidade de fabricação, largura de banda estreita, fácil integração com circuitos integrados de micro-ondas (MICs), irradiação unidirecional, entre outras –, sendo usadas em aplicações para dispositivos de comunicações móveis. Na literatura há variados estudos envolvendo as antenas *patch*, com uma diversidade de geometrias e combinações, bem como o uso de novos materiais aplicados a diversas faixas de frequência existentes no espectro eletromagnético (COSTA E SILVA, 2014).

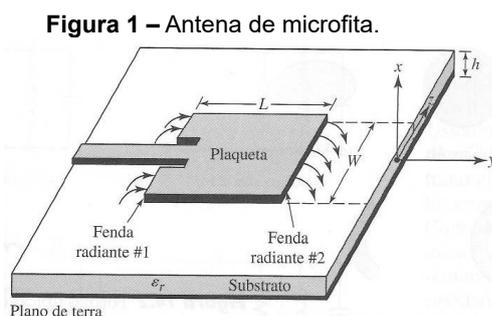
Diante disso, este trabalho tem como intuito apresentar a caracterização de antenas *patch* de microfita de geometria circular que atendem à faixa de frequência de 1900 – 2170 MHz (faixa de frequência usada em GSM), utilizando técnicas de casamento de impedância.

2 Embasamento Teórico

2.1 Antenas de microfita

Historicamente, as primeiras investigações envolvendo estudos sobre as antenas de microfita ou antenas *patch* ocorreram em meados da década de 50 com Deschamps, nos Estados Unidos (DESCHAMPS, 1953), e com Gutton e Baissinot, na França (GARG *et. al.* 2001; KUMAR; RAY, 2003; JAMES; HALL, 1989; BALANIS, 2016). Todavia, as pesquisas sobre as antenas planares ganharam destaque a partir da década de 70, com o estudo de Byron (KUMAR; RAY, 2003).

As antenas de microfita caracterizam-se enquanto estruturas planares constituídas basicamente por duas placas condutoras paralelas e separadas por uma camada dielétrica ($2,2 < \epsilon_r < 12,0$), onde os elementos irradiantes (*patches*) e as linhas de alimentação estão sobre o substrato dielétrico, conforme mostrado na Figura 1. A parte superior é denominada de elemento condutor irradiante (ou *patch*) e a parte inferior é o plano de terra (OLIVIERA, 2008).



Fonte: BALANIS, 2016.

O funcionamento de uma antena *patch* dá-se da seguinte maneira: quando o elemento *patch* é excitado por uma alimentação, há uma distribuição de carga que é estabilizada na parte de baixo do *patch* metálico, bem como no plano terra. Em um instante temporal, a parte inferior do *patch* é carregada positivamente e o plano-terra é carregado negativamente (essa quantidade de carga depende diretamente do ϵ_r do material dielétrico). A força de atração entre as cargas positivas e negativas tendem a manter um grande quantitativo de cargas entre as duas superfícies. Porém, a força repulsiva entre as cargas positivas localizadas no *patch* puxa algumas cargas em direção à margem, resultando em uma grande densidade de cargas na margem irradiante do *patch*. A radiação na antena microfita se dá em decorrência do efeito *fringing* gerado pelas cargas nas margens (OLIVIERA, 2008).

Uma especificidade do elemento *patch* é a possibilidade de variações na forma da sua geometria. No entanto, as análises e previsões do desempenho destas estruturas comumente são usadas nas geometrias tradicionais, como as retangulares, circulares e as recentes formas fractais, em virtude da facilidade de análise e fabricação (OLIVIERA, 2008). A Figura 2 ilustra algumas das formas geométricas usadas nas antenas *patch*.

Figura 2 – Formas geométricas usualmente usadas no elemento *patch*.



Fonte: OLIVEIRA, 2008.

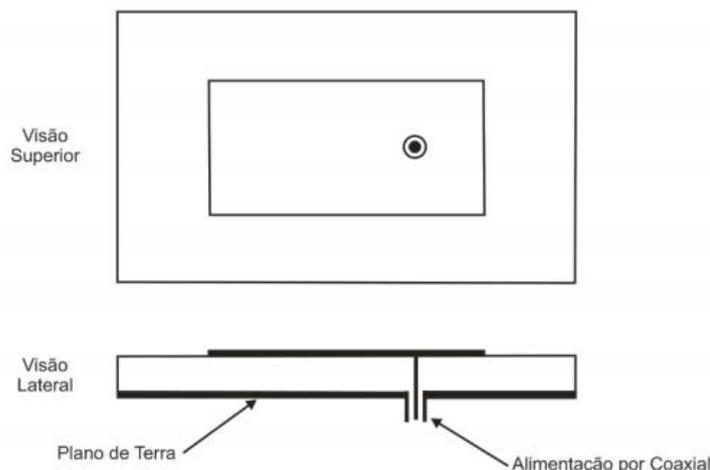
Segundo com Garg *et. al.* (2001), as principais vantagens das antenas de microfita são: (i) estruturas compactas, leve com pouco volume, proporcionando assim um perfil que torna facilmente conformáveis as superfícies não planares; (ii) em decorrência das técnicas de circuito impresso usadas na confecção das antenas *patch*, cuja a produção se torna mais fácil e com baixo custo; e (iii) a possibilidade de polarização linear e circular por meio de mudanças simples na posição de alimentação ou no próprio elemento irradiador, entre outras.

Já de acordo com Balanis (2016), as principais limitações desse tipo de antena são: (i) pequena largura de banda, que é determinada especialmente pelas dimensões do elemento *patch* e pela altura do substrato; (ii) baixo ganho; e (iii) dificuldades na pureza da polarização.

Vasconcelos (2006) ressalta que os estudiosos têm proposto várias configurações com intuito de redução das características indesejáveis das antenas de microfita. Dentre estes estudos, destacam-se as antenas impressas sobre múltiplas camadas dielétricas, com propriedades dielétricas distintas contendo *patches* metálicos de geometrias retangular, circular, triangular ou anelar.

Oliviera (2008) destaca que a faixa de frequência de operação das antenas *patch* vão de aproximadamente 100 MHz a 50 GHz, tendo um ganho entre 5 e 6 dB e uma largura de feixe que varia entre 70 e 90 graus. Já a respeito da forma de alimentação deste tipo estrutura, existem variadas formas, como, por exemplo, cabo coaxial (Figura 3), linhas de microfita (Figura 1), linhas de fenda, acoplamento por íris ou abertura, entre outras,; sendo as alimentações mais comuns são as por cabo coaxial e as de linhas de microfita (COSTA E SILVA; EVANGELISTA, 2015).

Figura 3 – Geometria da antena alimentada por cabo coaxial.



Fonte: ALMEIDA FILHO, 2010.

Costa e Silva (2014) destacam que o desempenho da antena *patch* pode ser averiguado a partir de alguns parâmetros, tais como diagrama de radiação, diretividade e perda de retorno. Sendo o casamento de impedância com a linha de alimentação uma interferência direta nesses parâmetros.

2.2 Técnicas de casamento de impedância usadas em antenas de microfita

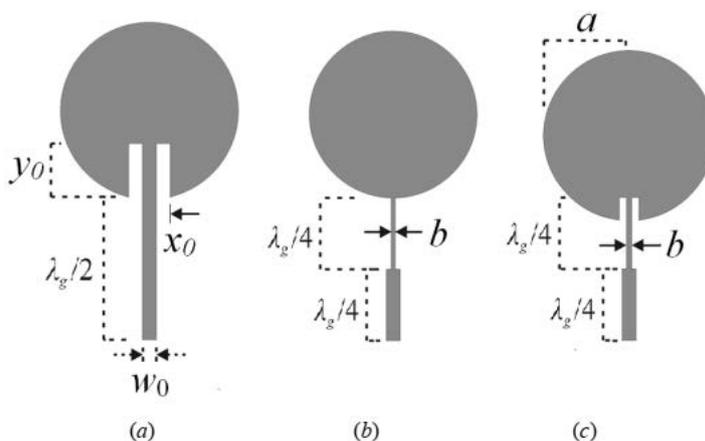
Usualmente, a alimentação direta de uma antena de microfita possuía uma impedância de 50Ω , isso leva a um descasamento de impedâncias, em virtude do elevado valor da impedância de entrada no *patch* irradiante, provocando reflexões indevidas de sinais na entrada da antena. Uma das técnicas comumente usadas para corrigir este efeito indesejável são as técnicas de casamentos de impedância (OLIVEIRA, 2017).

Neste sentido, as técnicas de casamento de impedância mais utilizadas nas antenas alimentadas por linhas de microfita são: (i) linha deslocada; (ii) transformador de quarto de onda ($\lambda/4$); (iii) *inset-fed*; e (iv) híbrida.

Oliveira *et al.* (2016) descrevem as técnicas de casamento de impedância. Segundo os autores, a técnica de casamento por transformador de $\lambda/4$ é resultante do estreitamento da linha de microfita, acarretando dificuldade na fabricação da seção de $\lambda/4$. Na técnica de *inset-fed* são introduzidas reentrâncias (*slots*) no *patch*, alterando a geometria do elemento irradiante.

A técnica híbrida foi proposta por Oliveira *et al.* (2016), na qual existem a combinação da técnica de *inset-fed* e transformador de $\lambda/4$. Os autores verificaram que a técnica híbrida possibilitou o aumento da largura da seção da linha de microfita de $\lambda/4$, bem como, a redução nas reduções dos *slots*. Comparando as técnicas de casamento convencionais, as características da técnica híbrida conduziram a uma maior flexibilidade do projeto, facilitando, assim, na construção do transformador de $\lambda/4$ e menor modificação na geometria do *patch*, proporcionando o melhor casamento das impedâncias no dispositivo. A Figura 4 ilustra as técnicas de casamento de impedância de *inset-fed*, transformador de $\lambda/4$ e híbrida.

Figura 4 – Técnicas de casamento de impedâncias para antena *patch* circular:
(a) *inset-fed*; (b) transformador de quarto de onda; (c) híbrida.



Fonte: OLIVEIRA *et al.*, 2016.

3 Metodologia

A primeira etapa do projeto foi determinar as dimensões da antena *patch* circular. Para isso foi adotada a metodologia sugerida em Aftab *et al.* (2015), na qual estimou-se o valor aproximado do raio do *patch* circular (a) a partir das equações (1) e (2). Vale ressaltar que foi levado em consideração um laminado cobreado de fibra de vidro da Hitachi, com espessura (h) de 1,5 mm e permissividade elétrica relativa (ϵ_r) de 4,78 e tangente de perdas (d) de 0,019. A impedância característica da linha de microfita de entrada foi estabelecida em 50Ω .

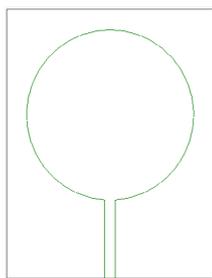
$$a = \frac{F}{\left\{ 1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[\ln \left(\frac{\pi F}{2h} \right) + 1,7726 \right] \right\}^{1/2}} \tag{1}$$

$$F = \frac{8,791 \cdot 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \tag{2}$$

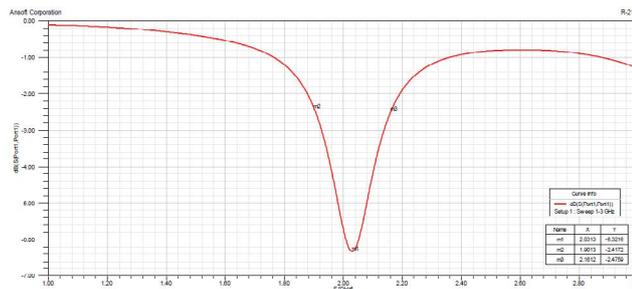
Desse modo, estimou-se o raio do círculo em 19,296 mm. De forma, a obter uma exatidão da estimativa das equações, foi utilizado um código no *software* MATLAB, disponibilizado por Balanis (2016), obtendo assim uma valor de raio (*a*) de 19,296 mm e raio efetivo (*a_{eff}*) de 19,767 mm. Utilizou-se também o *software* APPCAD para se estimar a largura da linha de alimentação da microfita (*w₀*) de 2,652 mm. As antenas foram projetadas para uma frequência de ressonância (*f_r*) de 2035 MHz ou 2,035 GHz, a qual se adequa à faixa de GSM. As simulações e ajustes do projeto inicial foram realizadas com o *software* Ansoft Designer™ e as medições dos protótipos foram realizadas com analisador de rede vetorial de duas portas modelo Agilent E5071C.

Para iniciar a etapa de simulação, usou-se o *software* Ansoft Designer™ (ferramenta CAD para circuitos e simulações de micro-ondas, baseada no Método dos Momentos [MoM]) de uma antena *patch* sem técnica de casamento de impedância, conforme visto na Figura 5. O raio inicial estimado, de 19,296 mm, não atingiu a *f_r* projetada, assim, fez-se de forma empírica algumas tentativas de alteração no valor do raio, com o valor de *a* = 21 mm, chegou-se a *f_r* projetada inicialmente.

Figura 5 – Simulação da antena *patch* sem técnica de casamento no Ansoft Designer™.



(a) Antena sem técnica



(b) Resultado da simulação da antena sem técnica.

Fonte: Elaborada pelos autores, 2020.

Na Tabela 1 são mostrados os resultados da simulação da antena *patch* sem técnica no *Ansoft Designer™* para *a* = 21 mm, exemplificada na Figura 5.

Tabela 1 – Resultados obtidos na antena *patch* circular sem técnica para *a* = 21 mm.

Técnica	Resultado	Parâmetros (GHz)			
		<i>f_r</i>	<i>f₁</i>	<i>f₂</i>	S11 (dB)
Sem técnica	Simulado	2.0313	1.9013	2.1612	- 6,5

Fonte: Elaborada pelos autores, 2020.

Após a obtenção dos resultados da simulação da antena *patch* sem técnica, passou-se às verificações das simulações das antenas com as técnicas de casamento de impedância, *inset-fed*, transformador de $\lambda/4$ e híbrida (Figura 4).

Abaixo são mostrados os parâmetros usados na simulação para as três antenas *patch* com as técnicas de casamentos de impedância, conforme são apresentados na Figura 4. Vale ressaltar que esses parâmetros tiveram como base inicial o resultado obtido para a primeira simulação da antena sem técnica, além da estimativa de alguns parâmetros usando os *softwares*, como o APPCAD, MATLAB e *Ansoft Designer™*, que após as simulações iniciais de forma empírica foram alterados chegando aos valores finais apresentados na Tabela 2.

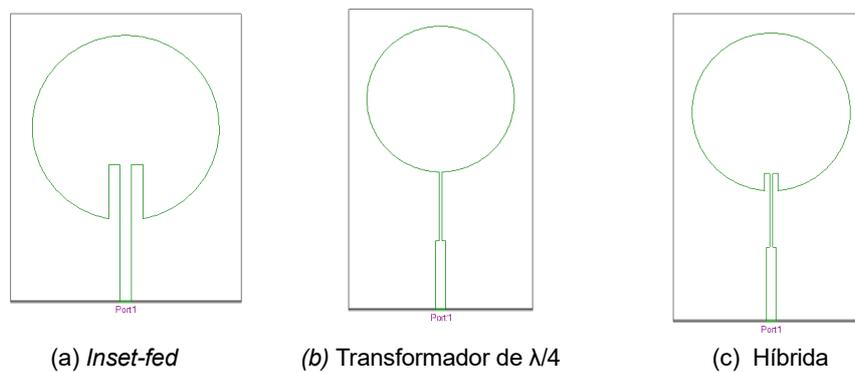
Tabela 2 – Parâmetros usados no projeto das antenas *patch* com as técnicas de casamentos de impedância.

Parâmetros	Técnicas de casamentos de impedâncias usadas		
	<i>Inset-fed</i>	$\lambda/4$	Híbrida
a	21,71 mm	20.7 mm	20,84 mm
b	-	0,68 mm	0,82 mm
x_0	2,652 mm	-	1,326 mm
w_0	2,652 mm	2,652 mm	2,652 mm
y_0	12,7 mm	-	4,634 mm
$\lambda_g/2$	25.7 mm	-	-
$\lambda_g/4$	-	19,47 mm	19,47 mm
f_r	2,03 GHz	2,03 GHz	2,037 GHz

Fonte: Elaborada pelos autores, 2020.

A Figura 6 mostra as três antenas projetadas de acordo com as dimensões da Tabela 2. Essas antenas foram simuladas usando o *Ansoft Designer™* e posteriormente foram fabricados os protótipos para as medições e as comparações dos resultados simulados e experimentais (Figura 7).

Figura 6 – Antenas *patch* com técnicas de casamentos de impedância simuladas no *Ansoft Designer™*.



Fonte: Elaborada pelos autores, 2020.

Figura 7– Antenas *patch* com técnicas de casamentos de impedância fabricadas.



Fonte: Elaborada pelos autores, 2020.

3.1 Técnica de casamento de impedância com *inset-fed*

Como citado anteriormente, a alimentação direta de uma antena *patch* por linha de microfita é aproximadamente de 50 Ω , causando um deslocamento de impedâncias, em decorrência do alto valor de impedância de entrada no elemento *patch* irradiante, o que causa inúmeras reflexões desfavoráveis nos sinais

na entrada da antena; de maneira a melhorar este efeito por meio da técnica *inset-fed*, com a adição de fendas (*slots*) aproximando-se do ponto de alimentação do centro do *patch* circular, conforme visto na Figura 6 (a).

No modelo empregado, as larguras do *slot* (x_0) e da linha de microfita (w_0) são iguais. Um valor inicial calculado para o comprimento do *slot* (y_0) no *patch* circular é dado por (3) e (4), em definições do comprimento (L) e da resistência de entrada (R_{in}) para uma antena *patch* retangular em 2,4 GHz - G_1 é a autocondutância; G_{12} é a condutância mútua entre os *slots* (BALANIS, 2016).

$$y_0(0) = \frac{L}{\pi} \arccos\left(\sqrt{\frac{50}{R_{in}(0)}}\right) \quad (3)$$

$$R_{in}(0) = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \quad (4)$$

3.2 Técnica de casamento de impedância com transformador de $\lambda/4$

A técnica de casamento com transformador de $\lambda/4$, como visto na Figura 6 (b), considerou-se uma seção de linha de comprimento igual a um quarto do comprimento de onda guiado (λ_g) dado pela equação (5). Já a largura da linha foi obtida através do seu valor de impedância característica (Z_0), estimado pela equação (6) com o valor da impedância de entrada $Z_{in} = 50 \Omega$ e a impedância da linha (Z_L) igual à impedância da antena (Z_{ant}), ou seja, $Z_L = Z_{ant} = 101,9 \Omega$.

$$\lambda_g = \frac{3 \cdot 10^8}{f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (5)$$

$$Z_0 = \sqrt{Z_{in} Z_L} \quad (6)$$

Oliveira *et al.* (2015) afirmam que a utilização dessa técnica resulta em valores muito pequenos para a largura da seção de linha do $\lambda/4$ e, que dependendo da f_r e do substrato diétrico utilizado, podem resultar valores de largura $b < 0,5$ mm, sendo esta considerada a principal limitação, pois em termos de fabricação a seção do $\lambda/4$ em microfita fica quase impossível.

3.3 Técnica de casamento de impedância híbrida

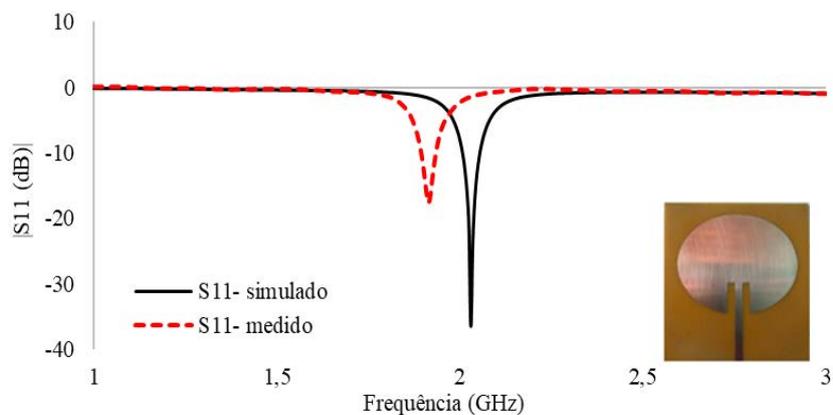
Esta técnica é junção das técnicas de casamentos *inset-fed* e transformador de $\lambda/4$, proposta por Oliveira *et al.* (2015), ilustrada na Figura 6 (c). Os autores, ao usarem esta técnica, conseguiram obter uma redução da área total da antena, além de diminuir as dimensões dos *slots* no elemento *patch* irradiante da antena de microfita.

4 Resultados

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos para as propriedades ressonantes e de irradiação das antenas abordadas. Os dados coletados a partir dos resultados de medição e simulação foram reunidos em gráficos plotados usando o *software* Excel. Nas Figura 8, 9 e 10 é possível observar a variação da perda de retorno (parâmetro S_{11}) em função da frequência de ressonância.

Na Figura 8, apresenta-se a frequência ressonante medida de 1,92 GHz apresentando um desvio de 5,42 % em relação ao valor simulado, com uma perda de retorno de -17,01 dB, enquanto a antena simulada apresentou uma perda de retorno de -36,51 dB, como mostrado na Tabela 3.

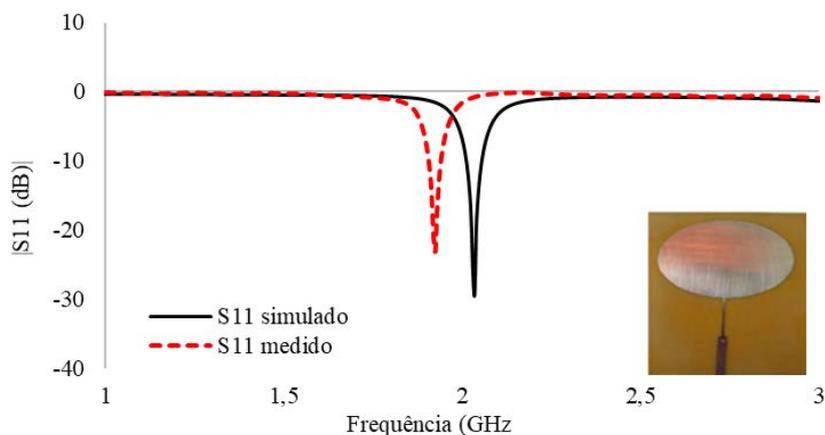
Figura 8 – Comparação da medição e simulação – |S11| (dB) x Freq. (GHz), técnica *inset-fed*.



Fonte: Elaborada pelos autores, 2020.

Na Figura 9, apresenta-se a frequência ressonante medida de 1,93 GHz apresentando um desvio de 4,93 % em relação ao valor simulado, com uma perda de retorno de -23,33 dB, enquanto a antena simulada apresentou uma perda de retorno de -29,33 dB, como mostrado na Tabela 3.

Figura 9 – Comparação da medição e simulação – |S11| (dB) x Freq. (GHz), técnica transformador de um quarto de onda.



Fonte: Elaborada pelos autores, 2020.

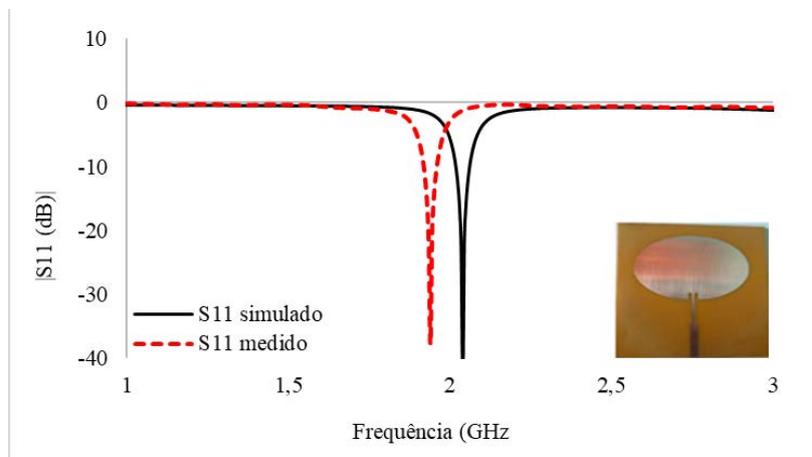
Tabela 3 – Valores simulados e medidos para a frequência de ressonância.

Técnica	Resultado	f_r (GHz)	S11 (dB)
<i>Inset-fed</i>	Simulado	2,03	-36,65
	Medido	1,92	-17,01
Quarto de onda	Simulado	2,03	-29,33
	Medido	1,93	-23,33
Híbrida	Simulado	2,04	-43,02
	Medido	1,94	-37,01

Fonte: Elaborada pelos autores, 2020.

Na Figura 10, apresenta-se a frequência ressonante medida de 1,94 GHz apresentando um desvio de 4,76 % em relação ao valor simulado, com uma perda de retorno de -37,01 dB, enquanto a antena simulada apresentou uma perda de retorno de 43,02 dB (ver Tabela 3).

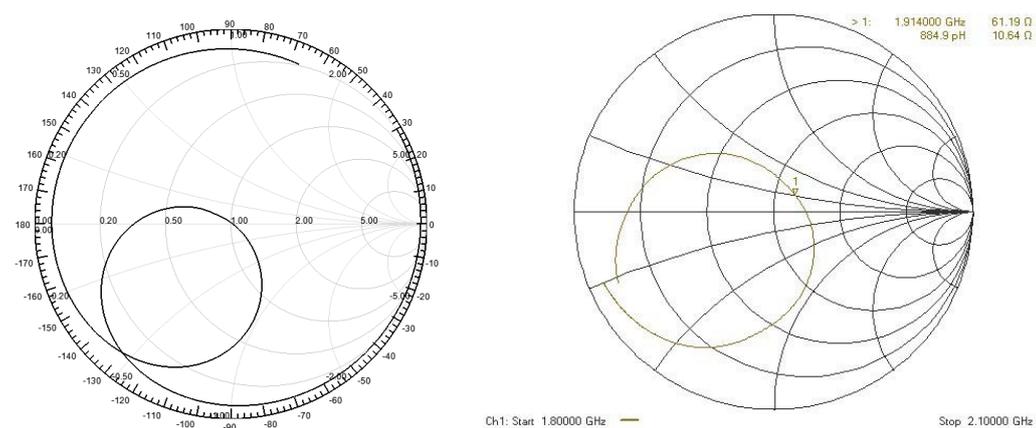
Figura 10 – Comparação da medição e simulação – |S11| (dB) x Freq. (GHz), técnica híbrida.



Fonte: Elaborada pelos autores, 2020.

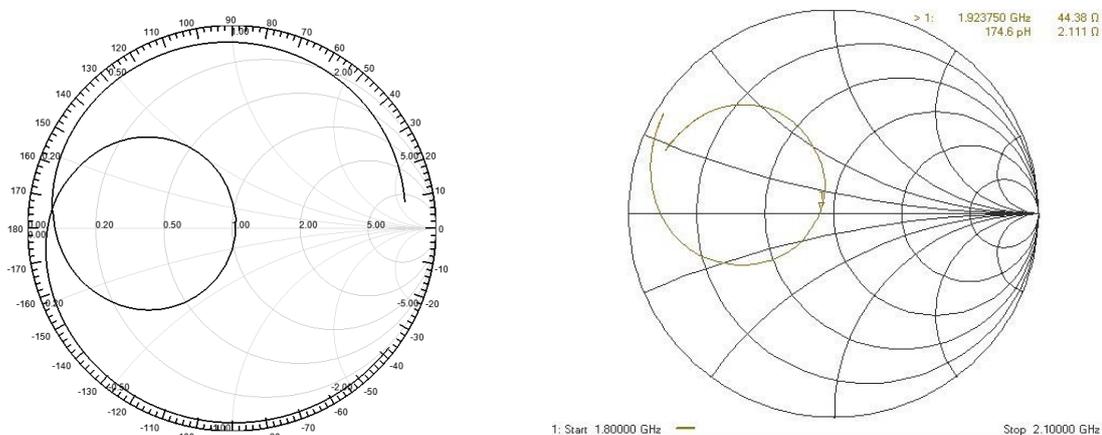
Nas Figuras 11, 12 e 13 são apresentadas as cartas de Smith, valores medidos e simulados.

Figura 11 – Carta de Smith, técnica *inset-fed*.



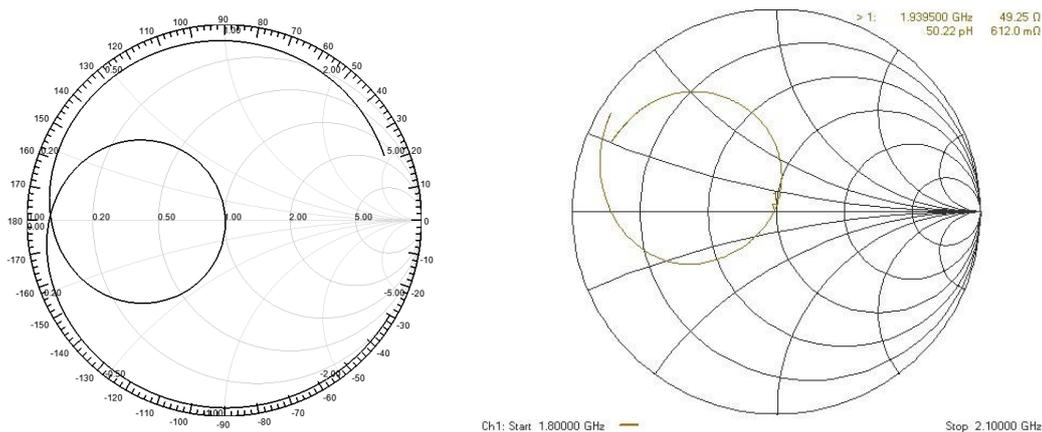
Fonte: Elaborada pelos autores, 2020.

Figura 12 – Carta de Smith, técnica transformador de $\lambda/4$.



Fonte: Elaborada pelos autores, 2020.

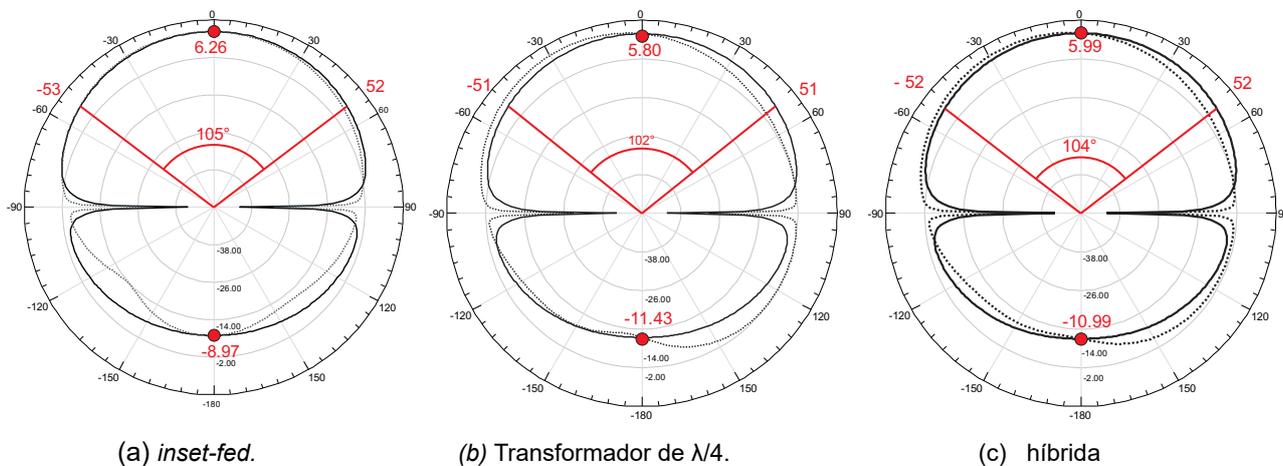
Figura 13 – Carta de Smith, técnica híbrida.



Fonte: Elaborada pelos autores, 2020.

Através das cartas de Smith, mostradas nas Figura 11, 12 e 13, observar-se que as impedâncias da carta estão bem ao centro. A resistência de entrada medida para antena *inset-fed* foi de 61,19 Ω, para antena de transformador $\lambda/4$ foi de 44,38 Ω e para a antena híbrida foi de 49,25 Ω. As antenas fabricadas possuem plano de terra, deixando as antenas com características de transmissão e recepção menos diretivas. Para tanto, foram considerados os seguintes parâmetros de irradiação: largura de feixe de meia potência (*Half Power Bandwidth* – HPBW), ganho direcional máximo e relação frente-costas (*Front to Back Ratio* – FB), conforme mostrados na Tabela 4. Assim, segue abaixo, os diagramas de irradiação 2D apresentados na Figuras 14.

Figura 14 – Diagrama de irradiação das antenas com técnicas de casamento de impedância.



Fonte: Elaborada pelos autores, 2020.

Tabela 4 – Parâmetros de Irradiação.

Técnica de Alimentação	Ganho 2D (dBi)	HPBW	FB (dB)
<i>Inset-fed</i>	6.26	105°	15,23
Transformador	5.80	102°	17,23
Híbrida	5.99	104°	16,98

Fonte: Elaborada pelos autores, 2020.

Constatou-se, com os resultados da Tabela 4, que as antenas com técnicas transformador de $\lambda/4$ e híbrida possuem melhor relação frente-costa.

5 Conclusão

Neste artigo apresentaram-se três técnicas de casamentos de impedâncias para antenas *patch* circulares em microfita operando numa faixa de frequência de 1900 – 2170 MHz e aplicação em GSM. Com a análise dos resultados experimentais e dos numéricos, percebeu-se um deslocamento nas respostas em frequências para todas as antenas apresentadas, obtendo assim um erro percentual entre os mesmos.

Dentre os piores resultados obtidos, teve-se a antena com técnica de casamento com *inset-fed* obtendo um erro percentual acima de 5%. Acredita-se que um dos fatores que contribuíram para erros percentuais nas medições das antenas foi a interferência dos sinais externos presentes no local de medições, já que não possui elementos absorvedores, tratando-se de laboratório/sala de aula com inúmeros objetos que contribuem para reflexão de sinais externos.

Um fato sugerido para melhorar o erro percentual da técnica de casamento *inset-fed* seria a mudança do parâmetro largura do *inset* (w_o) para uma dimensão $w_o/2$, tendo, assim, que realizar a modificação no projeto, simular, fabricar e medir para verificar a possibilidade de redução do erro percentual.

As técnicas de transformador de quarto de onda e a híbrida apresentaram os menores erros percentuais, ficando no limiar inferior a 5%, tendo em vista que na literatura é relatada como um bom resultado se o erro percentual for até 5%, tendo assim, bom resultado entre resultados experimentais e medidos.

Verificou-se também que, nas antenas *patch* circulares caracterizadas, os padrões de irradiação permanecem praticamente inalterados, independente da técnica de casamento de impedâncias usada. As antenas apresentaram ganhos máximos de 5,80 - 6,26 dBi na direção *broadside* e boa relação frente-costas, acima de 15 dB.

Referências

- AFTAB, N. *et. al.* Reconfigurable patch antenna for wireless applications. *In: EUROPEAN CONFERENCE ON ANTENNAS AND PROPAGATION (EuCAP)*, 9., 2015, Lisbon. **Proceedings [...]**. Lisbon: EuCAP, 2015. p. 1-3. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7228965>. Acesso em: 10 nov. 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ANATEL). **Resolução nº 454, de 11 de dezembro de 2006**. Aprova o Regulamento sobre Condições de Uso de Radiofrequências nas Faixas de 800 MHz, 900 MHz, 1.800 MHz, 1.900 MHz e 2.100 MHz. Brasília: ANATEL, 2016. Disponível em: <http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2006/89-resolucao-454>. Acesso em: 10 nov. 2020.
- ALMEIDA FILHO, V. A. **Arranjos Log-Periódicos Compactos em Microfita com Elementos Fractais de Koch**. 2010. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/15315>. Acesso em: 15 nov. 2020.
- BALANIS, C. A. **Antenna theory: analysis and design**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.
- COSTA E SILVA, J. Análise experimental do efeito de diversas configurações de “inset feed” na alimentação de antenas planares dos tipos retangular, circular e triangular. **Revista Principia**, João Pessoa, n. 24, p. 49-56, jun. 2014. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/viewFile/342/275>. Acesso em: 15 nov. 2020.
- COSTA E SILVA, J.; EVANGELISTA, T. S. Caracterização numérica de antena planar para aplicação no sistema de comunicação móvel 4G utilizando a técnica de inserção de fendas. **Revista Principia**, n.27, p. 118-122, dez. 2015. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/545>. Acesso em: 15 nov. 2020.
- DESCHAMPS, G. A. Microstrip microwave antennas. *In: Symposium on the USAF Antenna Research and Development Program*, 3., [S.l.], 1953. **Proceedings [...]**. [S.l.]: [s. n.], 1953. p. 18-22.
- GARG, R. *et. al.* **Microstrip antenna design handbook**. Norwood: Artech House, 2001.
- JAMES, J. R.; HALL, P. S. (Ed.). **Handbook of Microstrip Antennas**. Peter Peregrinus LTD: London United Kingdom, 1989. (v. 2).

KUMAR, G.; RAY, K. P. **Broadband microstrip antennas**. Norwood: Artech House, 2003.

OLIVEIRA, M. A. **Projeto de antenas e superfícies seletivas de frequência a partir de transformações polares**. 2017. 155f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Instituto Federal da Paraíba (IFPB), João Pessoa, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ifpb.edu.br/handle/177683/285>. Acesso em: 18 nov. 2020.

OLIVEIRA, M. A. *et. al.* Técnicas de Casamento de Impedâncias por Linha de Microfita para Antenas Patch Circular em 2,4 GHz. *In*: CBMAG – CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO, 12., SBMO – SIMPÓSIO BRASILEIRO MICRO-ONDAS E OPTOELETRÔNICA, 17., Porto Alegre, 2016. **Anais [...]**. Porto Alegre, RS: MOMAG, 2016. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/ufrgs/eventos/momag-2016>. Acesso em: 16 nov. 2020.

OLIVIERA, E. E. C. **Antenas de microfita com patch quase-fractal para aplicações em redes WPAN/WLAN**. 2008. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/15213>. Acesso em: 16 nov. 2020.

TELECO. Banda para Telefonia Celular: Bandas de 900, 1800, 1900 e 2100 MHz. **Portal TELECO**, São José dos Campos, 2020. Tutoriais Telefonia Celular. Disponível em: https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialbandcel/pagina_5.asp. Acesso em: 16 nov. 2020.

VASCONCELOS, C. F. L. **Antenas de microfita com patch em anel e múltiplas camadas dielétricas anisotrópicas uniaxiais**. 2006. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/15396>. Acesso em: 17 nov. 2020.

Sobre os autores

Juliete da Silva Souza

Mestra em Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal da Paraíba (IFPB) e Tecnóloga em Mecatrônica Industrial pelo Instituto Federal do Ceará (IFCE).

José Janiere Silva de Souza

Discente do Programa de Doutorado da UFC e atualmente é professor efetivo do Instituto Federal do Ceará no *Campus Cedro* (IFCE) possui Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará (UFC) e Graduação em Tecnologia em Mecatrônica Industrial pelo Instituto Federal do Ceará (IFCE).

Avaliado em: 26.04.2022

Aceito em: 06.03.2023