

Proposta de Antena *Patch* de Microfita Modificada com Materiais Dielétricos Distintos para Aplicação no Serviço WLAN

José Lucas da Silva Paiva
Departamento de Engenharia e Tecnologia
Universidade Federal Rural do Semi-Arido- UFRSA
Mossoró-RN, Brasil
lucassilva_jls@hotmail.com

Humberto Dionisio de Andrade
Departamento de Engenharia e Tecnologia
Universidade Federal Rural do Semi-Arido- UFRSA
Mossoró-RN, Brasil
humbertodionisio@ufersa.edu.br

Resumo— Neste artigo, duas antenas de microfita com *patches* modificados, de acordo com [1], e operando na frequência de 2,4GHz foi simulada, construída e comparada com uma antena dipolo comercial. A antena proposta por [1-3] foi originalmente projetada para operar na UWB (*Ultra Wideband*); no entanto, nesta investigação, ela foi remodelada para operar no serviço WLAN (*Wireless Local Area Network*). Como resultados medidos, as antenas propostas construídas proporcionaram um ganho total de 3,0dB e 2,2dB, perda de retorno de -14,8dB e -16,8dB para 2,4GHz, além de larguras de banda acima de 2GHz, respectivamente.

Palavras-chave – Antena de Microfita, Largura de banda, WLAN.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente, diversos aspectos relacionados às redes de comunicação requerem dispositivos tecnológicos de alta precisão. Pesquisadores dedicaram atenção especial ao uso conjunto de várias tecnologias para aplicação em redes sem fio [4-6]. Nesse contexto, um novo paradigma, que deve predominar no futuro, é como as redes de comunicação sem fio poderão transmitir o tráfego de dados cada vez mais intenso a partir de sinais de diferentes fontes. A esse respeito, é cada vez mais necessário o uso de circuitos que integram dispositivos de radiação de ondas eletromagnéticas, como específico, as antenas de microfita. De particular interesse para o setor de telecomunicações é o desenvolvimento de novos modelos de estruturas planares que exibam características elétricas como: ganho, padrão de radiação, perda de retorno e diretividade, em toda a largura de banda operacional.

A estrutura adaptativa planar utilizada para a aplicação em sistemas de rádios móveis e dispositivos de sistemas de comunicação sem fio pode ser a antena, que opera como um transmissor ou um receptor de sinais de RF (*Radio Frequency*). Ao longo dos anos, especificamente, as Antenas *Patches* de Microfita (APM) aumentaram em popularidade e aplicação, principalmente devido as suas características físicas de peso leve, baixo perfil, fabricação relativamente fácil, tamanho compacto e baixo custo. No entanto, as APM, normalmente, possuem largura de banda estreita, ondas superficiais e baixa eficiência.

A aplicação dos dispositivos propostos neste trabalho é para a tecnologia WLAN, em frequência não licenciada, na qual não é necessário pedir licença para ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações), o equipamento deve

obedecer a limites impostos a sua potência máxima, o qual se enquadre na banda em estudo de 2,4GHz a 2,4835GHz, de acordo com a Tabela I vinculada a resolução nº680, de 27 de junho de 2017 [7] e o protocolo IEEE (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos) 802.11 [8], o estudo baseia-se na relação comparativa de estruturas planares, distintas pelas propriedades de seus materiais dielétricos, usado como substrato da antena de microfita, no qual foi impresso um material condutivo nas suas duas faces. Sendo uma dessas faces o plano de terra, como o elemento refletor, e a outra face o elemento irradiador denominado *patch*, em que pode assumir diferentes formas, no entanto, as formas retangulares e circulares são as mais comuns.

TABELA I. FAIXAS DE RADIOFREQUÊNCIAS UTILIZÁVEIS POR EQUIPAMENTOS DE RADIAÇÃO RESTRITA COM LIMITES DE EMISSÃO ALTERNATIVOS. [7]

Frequência Inicial	Frequência Final	Unidade
...	...	...
915	940	MHz
944	948	MHz
1910	1920	MHz
2.400	2.483,5	MHz
2.900	3.260	MHz
915	940	MHz
...	...	...

Alega-se que os sistemas de comunicação sem fio cresceram rapidamente, possuindo várias tecnologias, operando em diferentes frequências, por exemplo, Wi-Fi (*Wireless Fidelity*), WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), *Bluetooth* e rede local sem fio WLAN [9]. Também é sabido que esses sistemas são obrigados a operar com altas taxas de transmissão de dados, com baixa densidade espectral de potência.

Em termo de projeto, as dimensões de um *patch* de antena de microfita dependem da frequência de operação, da constante dielétrica e espessura do substrato. A constante dielétrica e a espessura dos substratos são parâmetros fundamentais, pois podem afetar diretamente o desempenho dos resultados de análise da antena. É relevante que um substrato com constante dielétrica baixa pode melhorar a eficiência da radiação da antena e um substrato mais espesso pode aumentar a largura de banda.

Além disso, as antenas de comunicação requerem estrutura fina e conforme e o uso da APM pode satisfazer essas duas condições [9].

Além das características iniciais de projeto, definidas baseada na aplicação, deve-se considerar os métodos matemáticos de análise e alimentação adequados. Entre os métodos de análise aproximado e de onda completa, foi utilizado o primeiro através do método da linha de transmissão, por possuir a modelagem consideravelmente simples além de promover um bom aspecto físico de projeto. Este método considera os efeitos de borda causados devido ao *patch* possuir dimensões finitas, o que leva a um efeito de franjamento tanto ao longo do comprimento quanto da largura do *patch*.

Já o método de alimentação, no qual pode ser classificado como conectado ou não-conectado, foi utilizado a categoria conectado por meio da linha de microfitas. Neste caso, uma tira condutora é conectada diretamente à borda do *patch*. Esse tipo de alimentação é interessante e útil para os dispositivos propostos por permitir adequação fabril à uma estrutura plana, uma vez que o *patch* e a linha de alimentação estão localizados no mesmo nível de substrato. Em geral, o *patch* de uma antena de microfitas é alimentado por sua borda. Para obter a máxima transferência de potência, é necessário satisfazer o casamento de impedância da borda com a impedância característica da linha de alimentação.

Considerando essas características de projeto, pôde-se modelar, simular e construir os protótipos a fim de compará-los aos resultados práticos (perda de retorno, largura de banda e ganho) com os obtidos a partir de uma antena dipolo comercial, normalmente usada em roteadores de sistemas WLAN.

O artigo está organizado da seguinte forma: Na seção I, foi apresentada uma breve introdução sobre a antena de microfitas. A seção II mostrará a principal característica das antenas projetadas. A seção III descreverá os resultados numéricos e discute-os; posteriormente, as conclusões na seção IV.

II. PROJETO DAS ANTENAS

As antenas de microfitas propostas neste trabalho possuem uma estrutura retangular e são alimentadas por uma linha de microfitas. Para obter uma melhor correspondência de impedâncias (casamento de impedância), as antenas têm uma inclinação de 26° em suas bordas inferiores, como mostra a Figura 1 [10], dimensionado a partir de um módulo adicional do ANSYS HFSS®, o *optimetric*, que fornece inúmeras ferramentas de análise, no qual permite ao usuário automatizar varreduras paramétricas, realizar ajustes de parâmetros em tempo real usando derivados analíticos, identificar especificações de desempenho para otimização e realizar a análise estatística de sensibilidade no modelo otimizado, que no caso foi implementado para otimizar a melhor angulação para o casamento de impedância. Já para a parte posterior da antena, foi especificada uma faixa de valores dentro do intervalo de interesse e um plano de terra truncado, cuja função básica desse refletor, é modificar o padrão de radiação da antena, concentrando-se em uma direção interessar a maior parte possível da energia transmitida ou aumentar a área efetiva da energia recebida.

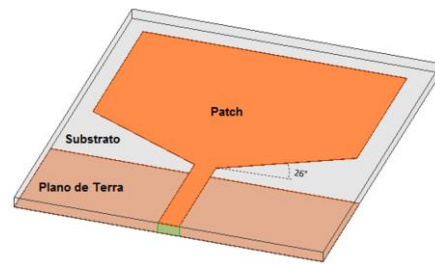


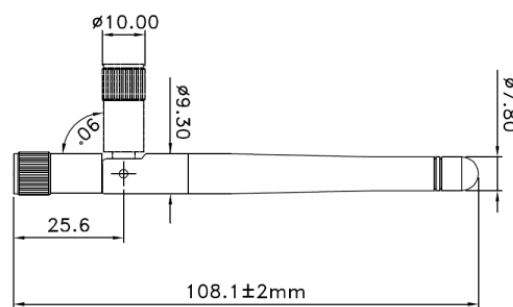
Fig. 1. Estrutura da antena de microfitas

Para isso, as antenas foram projetadas à uma frequência de 2,4GHz para operar no serviço WLAN. No projeto, foram utilizados dois tipos de substratos dielétricos, Fenolite e Fibra de Vidro (FR4), permitindo desempenho diferenciado devido aos seus parâmetros eletromagnéticos específicos (permissividade e permeabilidade) do material dielétrico, implantado como substrato da antena. Assim, foi possível obter dois projetos de antenas para a mesma frequência de operação, a fim de compará-los com uma antena dipolo comercial na mesma frequência.

Esta por sua vez, utilizada para comparação com as antenas propostas, é especificada de acordo com sua folha de dados do fabricante possuindo valor de ganho máximo de 2dBi, com impedância de 50Ω , polarização linear, faixa de frequência de operação de 2,4-2,5GHz, peso de 13g, temperatura de operação entre -20°C a 65°C . A Figura 2 representa a antena comercial com suas dimensões físicas [11].



(a)



(b)

Fig. 2. Antena Comercial (a) Dipolo (b) Dimensões físicas [11]

A construção das estruturas propostas segue o procedimento realizado no fluxograma da Figura 3, no qual apresenta as etapas de seleção de materiais, modelagem à fabricação.

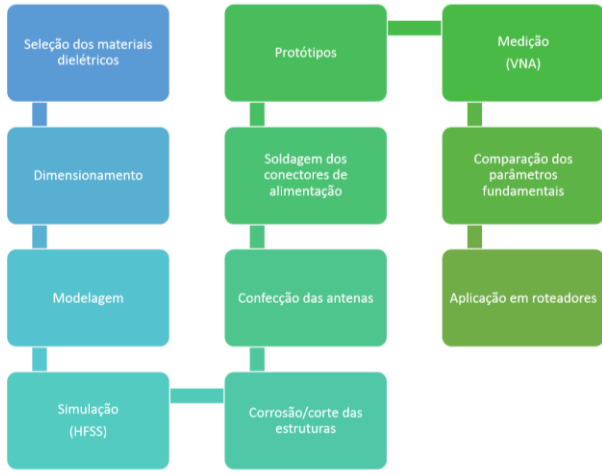


Fig. 3. Fluxograma metodológico de projeto.

A escolha dos materiais baseou-se nas características de permissividade em conformidade com a especificação para aplicação e suas disponibilidades, de modo que diversos materiais podem ser utilizados como substrato de antenas de microfita, sendo que esses materiais possuem normalmente uma permissividade relativa entre os valores de 2,2 a 12, no qual o valor da constante dielétrica baixo em combinação com o substrato espesso, possibilitam no espaço livre maior eficiência de radiação [12].

As dimensões de projeto das antenas propostas (ver Figura 4) foram calculados de acordo com [12], através das Equações (1) a (6) pelo método da linha de transmissão.

A largura W do elemento radiador é dada por (1).

$$W = \frac{1}{2f_r\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

A constante dielétrica efetiva da antena é determinada por (2).

$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W}\right)^{-1/2} \quad (2)$$

Após determinar o valor de W , determina-se a partir a (3) a extensão de comprimento gerada pelos campos de bordas.

$$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(\epsilon_{ref} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{ref} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8\right)} \quad (3)$$

O comprimento L da antena é dado por (4).

$$L = \frac{1}{2f_r\sqrt{\epsilon_{ref}}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (4)$$

O comprimento efetivo da antena é finalmente calculado por (5).

$$L_{ef} = L + 2\Delta L \quad (5)$$

A frequência de ressonância é expressa por (6) para o modo dominante TM_{010} .

$$(f_r)_{010} = \frac{v_0}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (6)$$

Onde

ΔL : variação de comprimento da antena;

f_r : frequência de ressonância;

ϵ_{ref} : constante dielétrica efetiva;

v_0 : velocidade no espaço livre;

ϵ_r : constante dielétrica;

h : espessura do substrato.

A. Antenas Propostas

O primeiro substrato dielétrico dimensionado foi o FR4, no qual possui largura R e comprimento S (consulte a Figura 4a), permissividade relativa (ϵ_{r1}) de 4,4, tangente de perda ($\tan\delta$) de 0,02 e espessura 1,58mm. Já o segundo, foi o material de Fenolite, que possui largura R_0 , comprimento S_0 (ver Figura 4b), permissividade relativa (ϵ_{r2}) de 3,6 e espessura de 1,64mm. O material adotado para o *patch*, o plano do terra e a linha de microfita foi o cobre, com espessura de 0,017 mm. A Tabela II mostra os respectivos valores das dimensões.

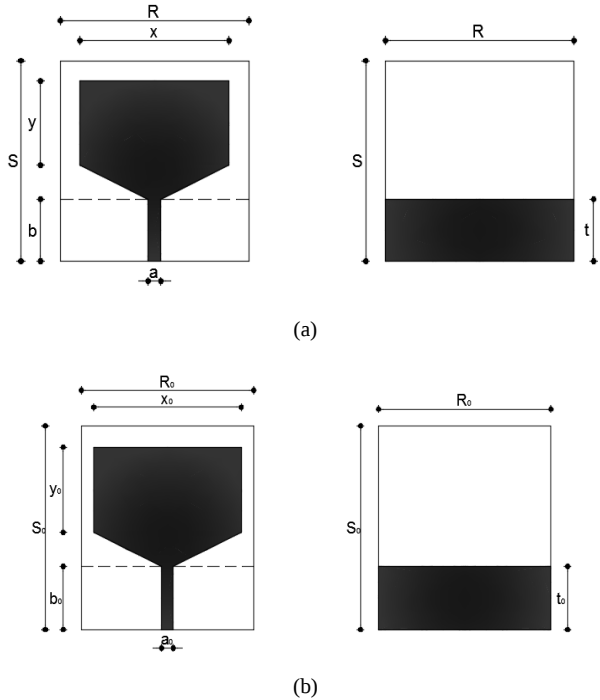


Fig. 4. Detalhes das duas antenas com substratos (a) FR4 e (b) Fenolite

TABELA II. DIMENSÕES DAS ANTENAS PROPOSTAS

Substratos	Dimensões (mm)
FR4	$R = 48$; $S = 50$; $x = 38$; $y = 21$; $a = 3,28$; $b = t = 15,45$
Fenolite	$R_0 = 48$; $S_0 = 55$; $x_0 = 41$; $y_0 = 23,3$; $a_0 = 3,28$; $b_0 = t_0 = 17,02$

x, x_0 : largura dos *patches*;
 y, y_0 : comprimento dos *patches*;
 a, a_0 : largura das linhas de microfitas;
 b, b_0 : comprimento das linhas de microfitas;
 t, t_0 : comprimento dos planos de terra.

O conector utilizado foi o SMA (*SubMiniature version A*) fêmea reto, distância centro pino 5,08mm, como mostra a Figura 5 [13], peso de 1,58g com impedância de 50Ω, aplicados em diversas finalidades como: estações de base, instrumentação, controle de processos, telecomunicações e redes.

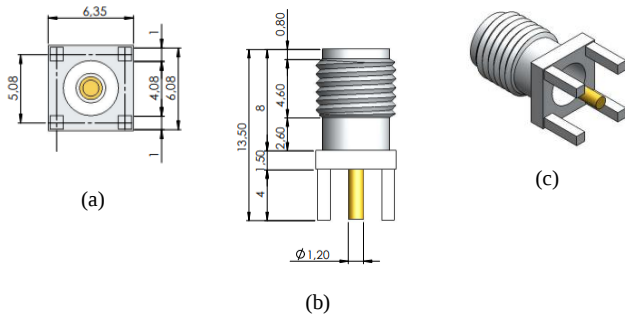


Fig. 5. Conector SMA (dimensões em mm) (a) vista posterior (b) vista lateral e (c) perspectiva.

A Figura 6 mostra os modelos das antenas construídas, que possuem seus *patches* modificados e o plano de terra truncado.

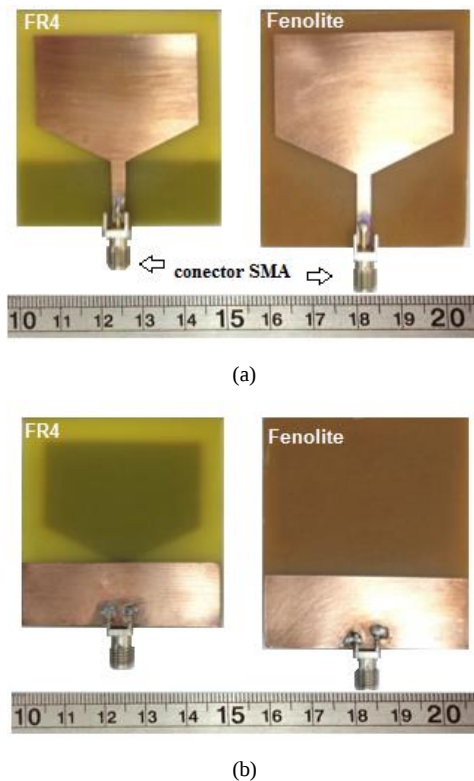


Fig. 6. Antenas construídas com substratos propostos (a) vista superior (b) vista posterior.

As placas utilizadas para a fabricação das antenas são caracterizadas por suas faces cobertas por finas camadas de cobs, sendo a configuração do *patch*, plano de terra e a linha de alimentação feita pela corrosão do material metálico, no qual os formatos foram modelados por adesivos não corrosivos quando imersos em uma solução química de Percloro de Ferro (FeCl_3) utilizado na corrosão da camada metálica para confecção da forma física das estruturas.

III. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise das antenas propostas foi realizada na faixa de 1,5GHz a 4,5GHz, a qual compreende a frequência de projeto de 2,4GHz, objetivando verificar o comportamento eletromagnético, que possuem permissividade distintas, a modelagem e os dados, a priori, foram extraídos por meio de simulações computacionais através do *Ansys HFSS® (High Frequency Structure Simulator)*. Esses resultados foram obtidos utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) e, a fim de validar as simulações realizadas, duas antenas de microfita foram fabricadas e comparada com uma antena dipolo comercial, sendo a medição realizada no laboratório de Telecomunicações e Micro-ondas no equipamento denominado ZND - *Vector Network Analyzer (Rohde & Schwarz)*, com varredura de frequência de 100kHz a 4,5GHz, podendo estender até 8,5GHz, portando 2 portas do tipo N (fêmea), no qual foi possível acoplar as antenas propostas ao cabo flexível de 50Ω, com suas extremidades de conectores tipo N (macho) na porta 1, como mostra a Figura 7, assim obteve os parâmetros desejados em análise, como: perda de retorno e largura de banda.

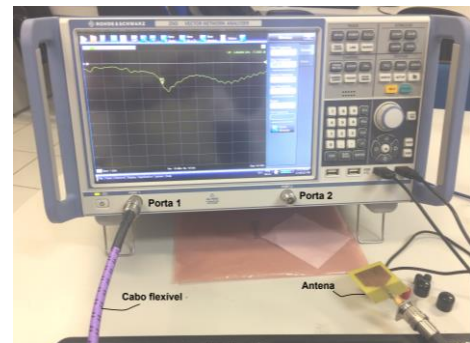


Fig. 7. Configuração de medição no Vector Network Analyzer.

É sabido que o tipo de material utilizado no substrato influencia diretamente aos parâmetros eletromagnéticos da antena, possibilitando observar se existe alteração na frequência de projeto, como mostra a Figura 8, na relação entre a perda de retorno baseado no coeficiente de reflexão (dB) e a frequência de ressonância (GHz) aos valores simulados de ambas as antenas propostas. Além da largura de banda associada à faixa de frequência, na qual a antena deve satisfazer a função de aplicação ao serviço de comunicação sem fio, calculada em porcentagem de acordo com [14].

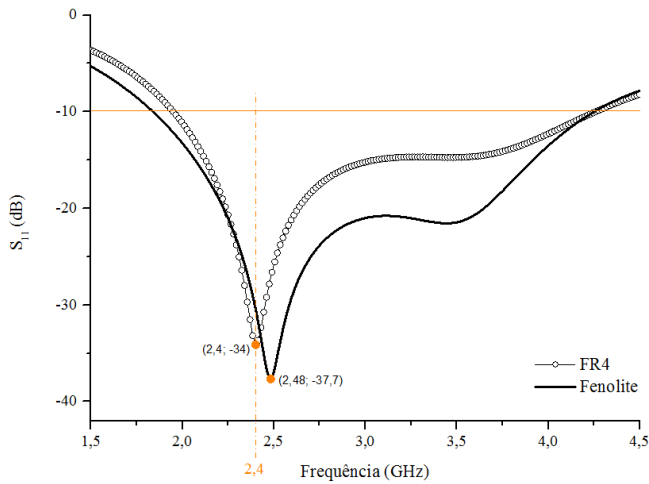


Fig. 8. Comparação de valores simulados das antenas propostas.

Observa-se na Figura 8 que para ambas as antenas, o comportamento da perda de retorno e largura de banda apresentaram-se satisfatórios no modo ressonante, tendo a proposta com substrato de FR4 apresentando uma perda de retorno maior do que a proposta com substrato de Fenolite. Assim, na simulação a frequência de projeto obteve um casamento de impedância adequado e dentro da faixa de aplicação, no qual demonstra que para qualquer uma das antenas utilizadas satisfaz a aplicação no serviço WLAN.

Os parâmetros de desempenho simulado e medido da antenna composta pelo substrato de FR4, na Figura 9 e Figura 10, mostram a perda de retorno em função da frequência e os padrões de radiação 2D e 3D para o campo distante da antenna, respectivamente.

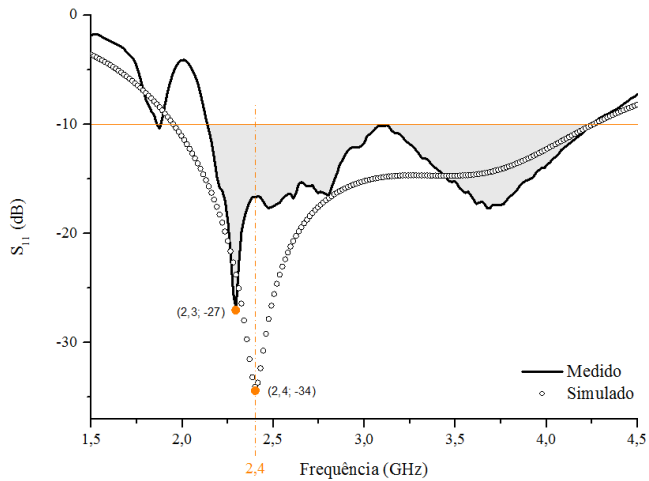
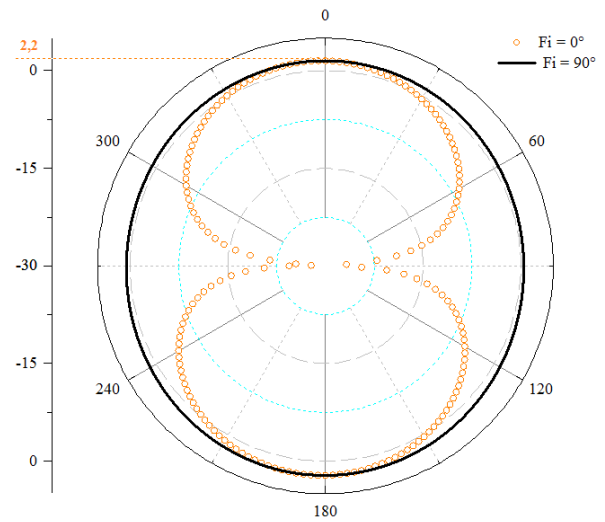
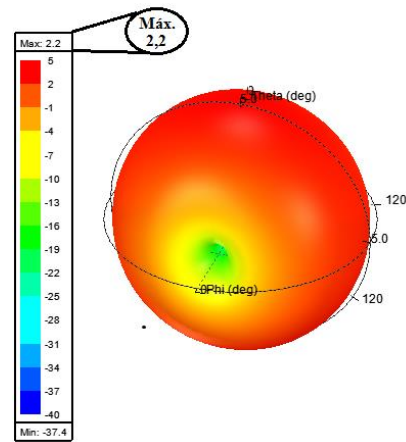


Fig. 9. Comparação entre valores medidos e simulados para a antenna com substrato FR4.



(a)



(b)

Fig. 10. Padrões de radiação simulados para antena com permissividade de 4,4 (FR4). (a) 2D e (b) 3D

Pôde-se observar na Figura 9, que as duas curvas características da perda de retorno tanto para o simulado quanto para o medido, demonstraram concordância em seu comportamento de reflexão, entretanto no medido não estabeleceu um casamento tão quanto a simulado, porém aplicável na frequência de operação.

Já para a antena com o material de Fenolite, a Figura 11 e a Figura 12, ilustram os parâmetros do desempenho simulado e medido, no qual representam a perda de retorno em função da frequência e os padrões de radiação 2D e 3D para o campo distante da antenna, respectivamente.

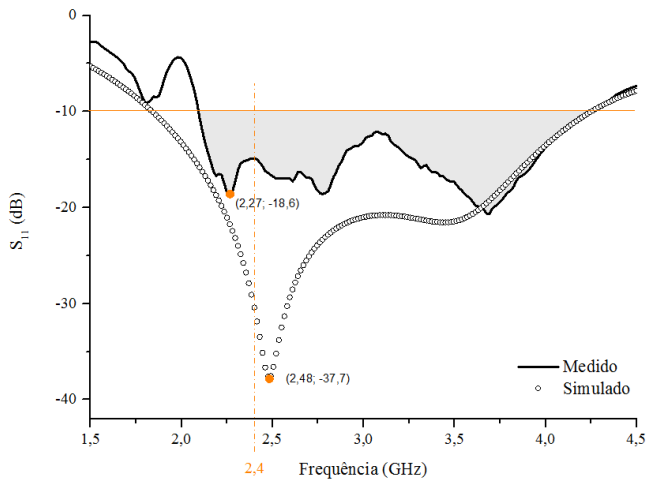


Fig. 11. Comparação entre os valores medidos e simulados para a antenna com substrato de Fenolite.

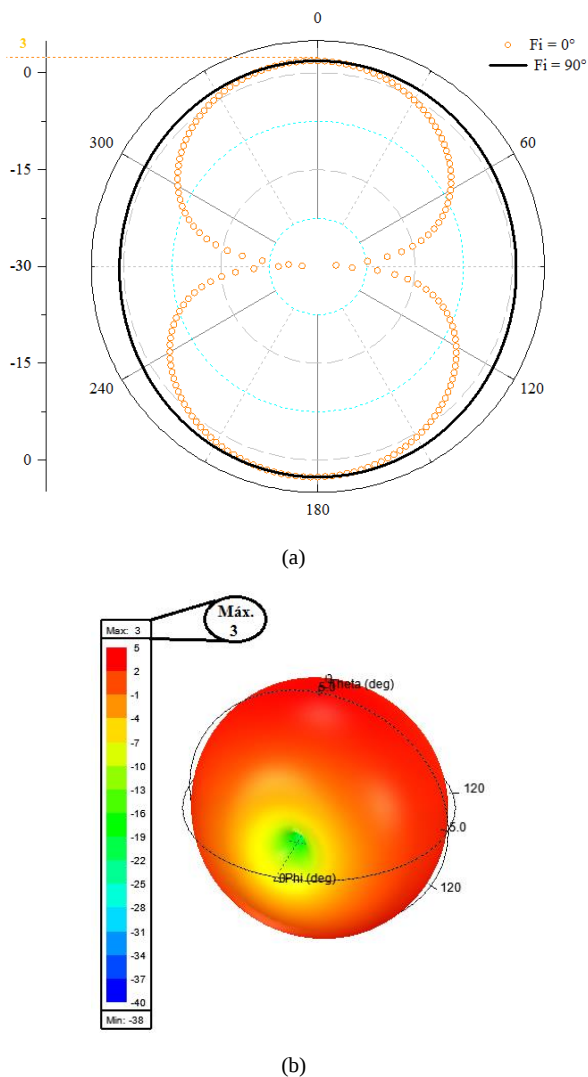


Fig. 12. Padrões de radiação simulados para a antenna com permissividade de 3,6 (Fenolite). (a) 2D e (b) 3D

Tendo a análise de resultados medidos e simulados, como demonstrado nas Figuras 9 a 12, possibilitou observar que a antenna com substrato de Fenolite também é aplicável ao

serviço proposto tão quanto a com substrato de FR4, visto que para a frequência de operação possui perda de retorno abaixo de -10dB, possibilitando ainda trabalhar em outra frequência específica dentro da faixa de WLAN.

Para validar os dados obtidos através da modelagem e simulação, foi necessário fabricar as duas antenas de microfitas, que possuem diferentes materiais como substrato. Posteriormente, os resultados foram comparados aos de uma antenna dipolo comercial de 2,4GHz para conector SMA de polaridade reversa, possuindo especificações para utilização em roteadores sem fio [9].

Assim, foi possível fazer comparações entre os resultados medidos das antenas propostas e a comercial, a fim de analisar seus comportamentos eletromagnéticos no modo de operação do serviço WLAN.

A Figura 13 apresenta os valores medidos que possibilitam verificar a viável aplicação em dispositivos e circuitos eletrônicos para comunicação sem fio, por meio da análise do parâmetro fundamental eletromagnético, assim, o comportamento da perda de retorno demonstra o quão reage o coeficiente de reflexão para todas as antenas em estudo.

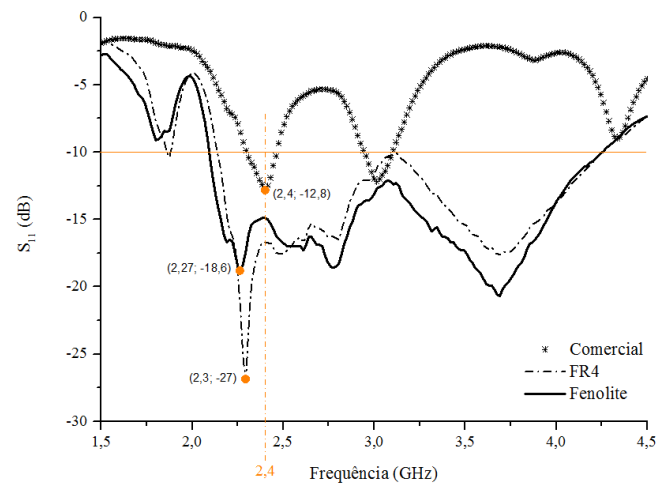


Fig. 13. Comparação da perda de retorno das antenas de medidas.

Observa-se na Figura 13 o comportamento do parâmetro na análise, no qual a antenna comercial possui dois modos ressonantes para a faixa (1,5GHz - 4,5GHz) em que o primeiro modo ressoa na frequência central em 2,4GHz e uma largura de banda de 180MHz e o segundo modo em 3GHz com largura de banda 150MHz para a aplicabilidade da banda do serviço WLAN. Observa-se também o comportamento similar das antenas propostas na faixa de frequência de projeto, tendo um deslocamento entre ambas devido ao material utilizado em seu substrato e seu comportamento eletromagnético, estabelecendo uma aplicabilidade em frequências de 2,1GHz - 4,25GHz, no qual inclui-se a comunicação sem fio WLAN.

A Tabela II mostra os resultados dos parâmetros simulados e medidos em relação à frequência de operação, perda de retorno, largura de banda e ganho total, além da perda de retorno medida para a antenna comercial. Em especial aos valores medidos, no qual estão inclusos os pontos de análise considerando-se o mínimo valor para o modo ressonante e a frequência de operação 2,4GHz, obteve uma largura de banda baseada na diferença da frequência superior pela inferior, no limiar de -10dB, apresentando para as antenas com substratos de FR4 e Fenolite banda ultra

larga, utilizada para referenciar qualquer tecnologia de rádio em que se use uma largura de banda maior de 500 MHz, portanto, uma boa concordância para a frequência e banda de aplicação do projeto.

TABELA II. RESULTADOS SIMULADOS E MEDIDOS

Antenas	Simulado			Medido			Ganho total (dB)
	Freq. (GHz)	S ₁₁ (dB)	BW (GHz)	Freq. (GHz)	S ₁₁ (dB)	BW (GHz)	
FR4	2,4	-34	2,36	2,3	-27	2,11	2,2
Fenolite	2,48	-37,7	2,38	2,27	-18,6	2,15	3,0

De acordo com os dados apresentados na Tabela II, os valores medidos da frequência de ressonância para as antenas mostradas na Figura 4, foi possível obter valores coerentes com os resultados projetados além de satisfatórios para aplicação em sistemas WLAN, uma vez que as frequências de ressonância dos valores medidos incluem a frequência de projeto das antenas com substratos de FR4 e Fenolite. Tendo também a largura de banda que apresentou percentual acima de 20MHz, estabelecido para aplicação WLAN, caracterizada como requisito importante na análise para aplicação em banda larga. As antenas com substrato FR4 e Fenolite também apresentaram valores significativos em relação ao ganho total, 2,2 dB e 3,0 dB, como visto nas Figuras 10 e 12, respectivamente.

Pôde-se verificar a funcionalidade das antenas propostas analisando os gráficos da carta de Smith, a fim de promover um meio de obtenção da impedância atual da linha de transmissão utilizada no projeto, tão quanto os compensadores reativos a serem utilizados de modo a permitir um melhor casamento de impedância entre a linha de transmissão e a carga [15]. A Figura 14 ilustra esses comportamentos de impedância.

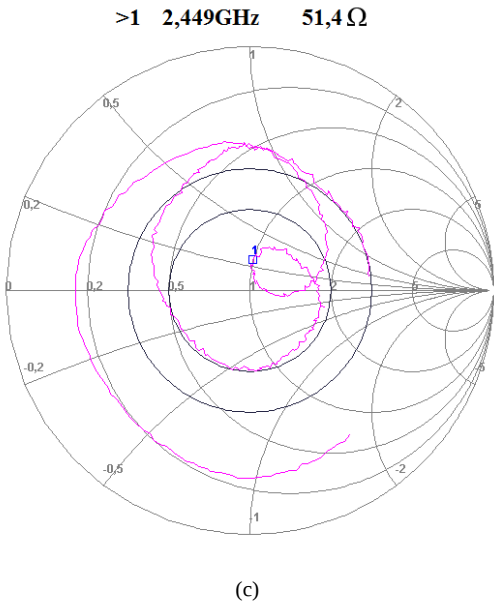
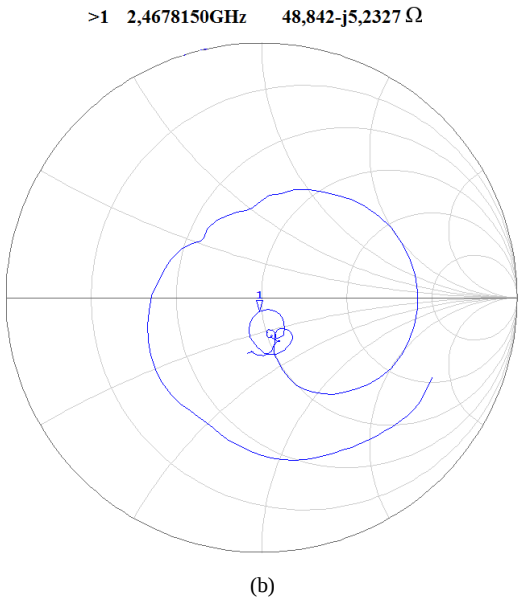
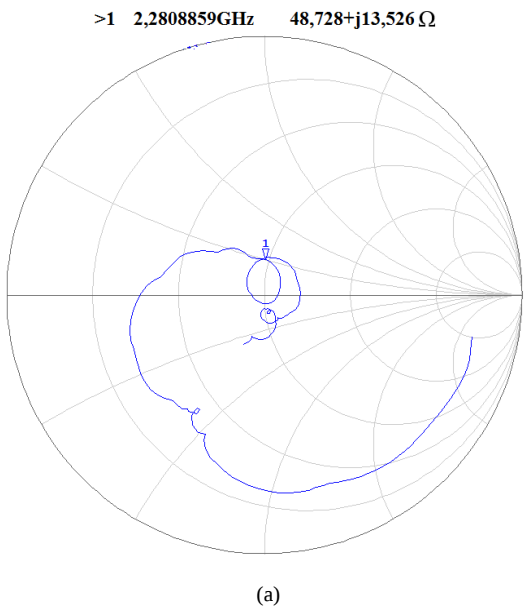


Fig. 14. Carta de Smith (a) FR4 (b) Fenolite e (c) Dipolo Comercial

De acordo com a Figura 14, das duas antenas propostas com substrato de FR4 e Fenolite, projetadas para a frequência de 2,4GHz, foi possível observar que as impedâncias inseridas foram definidas por 48,7Ω e 48,8Ω, respectivamente, as quais se aproximam de 50Ω, demonstrando uma correspondência de impedâncias satisfatórias. Da mesma forma, a antena dipolo comercial com impedância de 51,4Ω. Assim, as cartas de Smith obtidas na medição valida o desempenho das antenas propostas, bem como demonstra que a aplicação se torna possível tão quanto a já comercializada, ao que refere-se a casamento de impedância, facilitando a interligação aos componentes como cabos e conectores já existentes em 50Ω.

IV. CONCLUSÃO

O estudo comparativo de aplicabilidade entre antenas de microfita e uma antena dipolo comercial, com destaque ao comportamento dos parâmetros de radiação, apresentado neste trabalho, foi possível verificar os modos de respostas tanto na forma convencional, como na modificação dos parâmetros eletromagnéticos de seus substratos distintos, observou-se o desempenho de alguns parâmetros, como frequência de ressonância, perda de retorno, largura de banda e ganho total, para cada modelagem e comparação.

De acordo com os resultados obtidos por simulação e medição, foi possível afirmar que as antenas propostas se mostraram viáveis para aplicação no padrão IEEE 802.11 para sistemas de comunicação em ambientes internos, relacionadas à conectividade de redes locais sem fio. A partir da análise na frequência de aplicação, as antenas propostas forneceram uma largura de banda acima de 2GHz, com 91,47% (FR4) e 91,62% (Fenolite) maior e uma perda de retorno de aproximadamente 3,9dB (FR4) e 2dB (Fenolite) menor comparadas ao modelo da antena dipolo comercial, além de uma concordância de impedância apropriada para este objetivo. O que significa que a correspondência proposta poderá substituir o modelo comercial sem ocasionar problema para o desempenho do sistema de comunicação sem fio, além das antenas propostas apresentarem um ganho superior do que especificado pela folha de dados da antena comercial (2dBi). Como propostas à continuidade do trabalho, propõe-se: Verificar a distância máxima de comunicação das antenas propostas e compará-las à comercial; Verificar a transmissão de dados em uma frequência específica dentro da banda analisada; Propor novas estruturas com modificação no substrato para melhoria dos parâmetros fundamentais.

REFERÊNCIAS

- [1] M. A. Peyrot-Solis, G. M. Galvan-Tejada e A. Jardon-Aguilar, "A novel planar UWB monopole antenna formed on a printed circuit board," *Microwave And Optical Technology Letters*, vol. 48, pp. 933-935, 2006.
- [2] S. W. Su, K. L. Wong, and C. L. Tang, "Ultra-wideband square planar monopole antenna for IEEE 802.16a operation in the 2–11-GHz band", *Microwave and Optical Technology Letters*, 42 (2004), 463– 465.
- [3] M. Yanagi, S. Kurashima, T. Arita, and T. Kobayashi, A planar UWB monopole antenna formed on a printed circuit board, see www.fujitsu.com/downloads/MKICRO/fcai/input/uwb_monopole_antenna.pdf
- [4] Jari, M. H., Tapio, S., Jari, H., Ville, V.: 'Frequency reconfigurable multiband handset antenna based on a multichannel transceiver', *Antennas and Propagation IEEE Transactions on*, 2017, pp. 4452-4460, vol. 65, ISSN 0018-926X.
- [5] Arash, V., Pejman, R., Ali, A. O.: 'Design of reconfigurable active integrated microstrip antenna with switchable low-noise amplifier/power amplifier performances for wireless local area network and WiMAX applications', *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2015, pp. 872-881, vol 09.
- [6] Chandrasekharan, N., Assia, A. I., Sathishkumar, S., Sheroz, K.: 'Compact multiband microstrip patch antenna with slot-rings for wireless applications', *IEEE 15th Student Conference on Research and Development (SCOREd)*, 2017, pp. 428 – 433, vol. 01.
- [7] Resolução 680. ANATEL, 2017. < <https://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2017/936-resolucao-680>>. Acesso em: 10 outubro de 2019.
- [8] IEEE Std 802.11™. "IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements". USA., 2007.
- [9] R. A. R. Ibrahim; M. C. E. Yagoub, "Practical novel design component of microstrip patch slot antenna MSPSA for RFID applications," in *Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 2010 23rd Canadian Conference on , vol., no., pp.1-5, 2-5 May 2010.
- [10] J. L. S. Paiva, J. P. da Silva, A. L. P. Campos, H. D. de Andrade. "Using metasurfaces structures as signal polarizers in microstrip antennas". *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2019, pp. 23-27, vol 13.
- [11] 2.4GHz dipole antenna datasheet. LSR, 2015. < <https://www.mouser.com/datasheet/2/223/330-0016-1021192.pdf> >. Acesso em: 05 setembro de 2019.
- [12] C. A. Balanis, "Antenna Theory: Analysis and Design", John Wiley & Sons, 2005.
- [13] Conector fêmea reto para p.c.i 4 pinos. KLC conectores, 2011. < http://www.klc.ind.br/2013/busca_resultado.php?familia=9 >. Acesso em: 08 novembro de 2019.
- [14] M. Ghavami, L. Michael, R. Kohno. "Ultra-Wideband: Signals and Systems in Communication Engineering". West Sussex: John Wiley & Sons. p. 278. 2004.
- [15] D. M. Pozar. "Microwave Engineering". 4 ed. United States of America: John Wiley & Sons. p. 756. 2012.