

Divisor de potência do tipo Wilkinson banda larga no FR-4 aplicado ao RFID e 5G

Vítor L. G. Mota, Vanessa P.R. Magri, Luana V. Moraes, Mauricio Webber e Cláudia B. Marcondes.

Resumo— Este artigo apresenta o projeto de um divisor de potência do tipo Wilkinson banda larga impresso e de dimensões reduzidas realizado no substrato FR-4 objetivando os serviços RFID e 5G. Os resultados, prático e simulado, mostram perda de transmissão de 3,5 e 4 dB, nas portadoras dos serviços desejados, além de um isolamento entre as portas de saída de 10 dB. Inclui também aplicações do divisor em sistema de transmissão *full duplex* e na alimentação de painel com antenas elípticas. Os resultados apresentados mostram um bom comportamento alcançando, em ambos os casos, até 160 MHz de largura de banda.

Palavras-Chave — *divisor de potência, wilkinson, banda larga, RFID, 5G.*

Abstract— This paper presents the design of a Wilkinson wideband printed and reduced size power divider realized on FR-4 substrate targeting RFID and 5G services. The practical and simulated results show transmission loss of 3.5 and 4 dB, on the carriers of the desired services, and isolation between the output ports of 10 dB. It also includes applications of the power divider in full duplex transmission systems and in panel feed with elliptical antennas. The presented results show a good behavior reaching, in both cases, up to 160 MHz of bandwidth.

Keywords — *power divider, Wilkinson, wideband, RFID, 5G.*

I. INTRODUÇÃO

Os divisores de potência são dispositivos passivos de micro-ondas que possibilitam a divisão de uma potência incidente em duas ou mais portas de saída [1]. Em geral, esses dispositivos são projetados visando uma distribuição de potência igualitária entre suas portas de saída, embora seja possível projetá-los considerando um desequilíbrio nessa distribuição [2].

Diversos sistemas de rádio frequência (RF) e micro-ondas precisam de divisores de potência, por exemplo, alimentação de conjuntos de antenas [3], novas tecnologias de comunicação sem fio na faixa de 60 GHz [4], alimentação de elementos irradiantes em circuitos de camada dupla [5]. Além de serem amplamente aplicados, os divisores podem apresentar distintas formas geométricas e diferentes modelos teóricos, como divisor em formato de T [6], em formato de Y [7], anel circular [8], divisor do tipo Wilkinson [9], entre outros modelos. De modo geral, os divisores do tipo Wilkinson se apresentam como boas opções por possuírem boa isolamento entre as portas de saída devido à utilização do resistor de 100 Ω entre elas [1], [2].

Graças à necessidade de utilização dos divisores em circuitos RF e a vasta possibilidade de aplicação, os divisores de potência considerando a teoria de linhas *microstrip*, com suas distintas geometrias e diferentes modelos, continuam a despertar muito interesse da comunidade acadêmica e científica, já que apresentam baixo custo de fabricação, são leves, pouco volumosos, apresentam pequenas perdas e, em geral, o projeto

não é muito complexo e apresentam um bom desempenho nas frequências desejadas.

Portanto, o objetivo desse trabalho é projetar e desenvolver um divisor do tipo Wilkinson 2x1 banda larga visando atender os requisitos dos serviços RFID (Identificação por Rádio Frequência) e Serviço de Telefonia Móvel de Quinta Geração-5G. Posteriormente, esse divisor é fabricado em substrato de baixo custo e caracterizado através de sua Matriz de parâmetros S. Para tal, o artigo é organizado da seguinte forma: na seção II, apresenta-se o desenvolvimento do divisor de potência do tipo Wilkinson; na seção III, são apresentadas a fabricação e os resultados do protótipo fabricado; na seção IV são apresentadas duas possíveis aplicações para o divisor, sendo uma delas a aplicação para alimentação de antenas e a outra a transmissão em sistemas *full duplex* usando o divisor proposto e, por fim, as conclusões do trabalho e a previsão de possíveis trabalhos futuros estão na seção V.

II. DESENVOLVIMENTO DO DIVISOR DE POTÊNCIA

O projeto foi realizado utilizando o *software*: HFSS (*High Frequency Structor Simulator*). O substrato escolhido para o desenvolvimento do protótipo é o FR-4, com constante dielétrica igual a $\epsilon_r = 4,4$ e tangente de perdas $\tan \delta = 0,019$, aproximadamente. Esse substrato foi escolhido, pois é amplamente utilizado para fabricação de circuitos eletrônicos e de RF de baixo custo.

A faixa de frequência desejada para operação do dispositivo considera as frequências de 2,4 GHz e 3,5 GHz, portadoras dos serviços RFID e 5G no Brasil, Estados Unidos, Japão e China [10][11].

Bem como os divisores que seguem o modelo proposto por Wilkinson, as linhas *microstrip* são calculadas considerando dois trechos diferentes cujas impedâncias são de 50 Ω e 75 Ω, como visto na Figura 1.

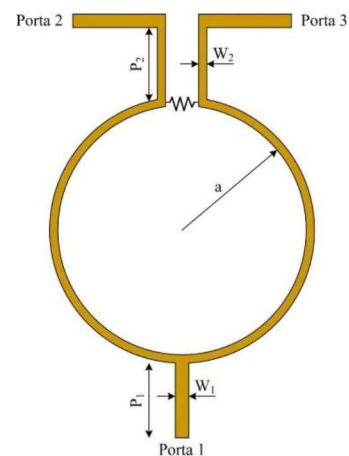


Fig. 1. Representação genérica do Divisor do tipo Wilkinson proposto.

Além disso, o divisor proposto apresenta parte de sua estrutura em formato de anel. O raio de estrutura divisor é calculado considerando a equação (1) vista em [1]:

$$a = \frac{1,841}{2\pi f \sqrt{\mu\epsilon}} \quad (1)$$

onde f é a frequência de ressonância do projeto, μ é a permeabilidade magnética e ϵ a permissividade elétrica do material. A Tabela I mostra os valores de comprimento (W), largura (P) e raio (a) calculados.

Tabela I. Valores de comprimento, largura e raio calculados.

	Impedância 50Ω	Impedância 75Ω
Comprimento (W_1/W_2)	1,55 mm	1,55 mm
Largura (P_1/P_2)	1,04 mm	11,98 mm
Raio (a)	11,97 mm	

A Figura 2 mostra o esquemático do dispositivo proposto considerando o substrato FR-4 e o resistor de 100Ω, e as dimensões calculadas na Tabela I para as linhas de transmissão do tipo *microstrip* a serem utilizadas.

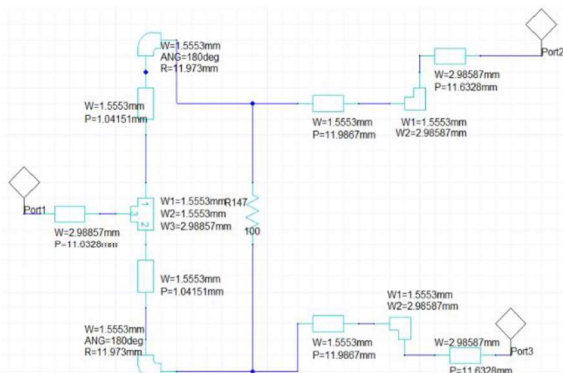


Fig. 2. Circuito esquemático do Divisor do tipo Wilkinson proposto.

Na Figura 2 é possível identificar o ângulo de acoplamento entre as linhas. Esse ângulo θ foi ajustado de modo que fosse possível obter um dispositivo com comportamento banda larga e, além disso, fabricável de acordo com as ferramentas e técnicas disponíveis, que serão abordadas na próxima seção.

A fim de caracterizar o comportamento do divisor proposto, a matriz de parâmetros S é avaliada. São avaliados os parâmetros de reflexão nas portas (s_{11}, s_{22} e s_{33}), de transmissão entre as portas (s_{12}, s_{13}) e de isolamento entre as portas de saída (s_{23}).

Através da análise da Figura 3, que apresenta o resultado da reflexão, é possível verificar que nas duas portadoras desejadas a reflexão (s_{11}) está em -32,09 dB e -26,66 dB, representando mais de 99% da potência transmitida. Além disso, os demais parâmetros de reflexão (s_{22} e s_{33}) alcançam o valor de -10 dB, ou seja, cerca de 90% da potência incidente é transmitida.

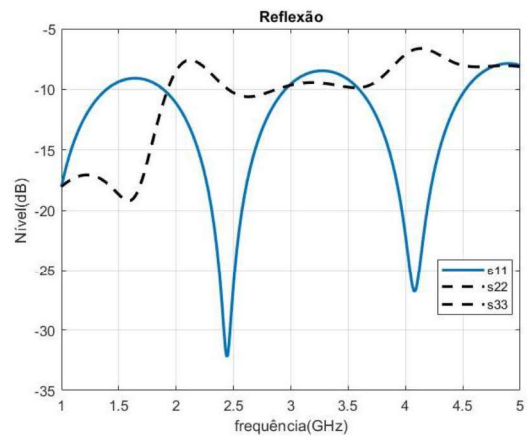


Fig. 3. Parâmetros de reflexão (s_{11}, s_{22} e s_{33}) simulados.

A Figura 4 mostra o parâmetro de transmissão e verifica-se que ele varia 3,25 dB e 5,1 dB, configurando, assim, uma boa transmissão entre as portas. Por fim, o isolamento é analisado na Figura 5 e nota-se que o vale na curva de isolamento aparece na frequência de 3 GHz, com o valor de -56,46 dB, que é a frequência central escolhida para o projeto objetivando atender as portadoras do RFID e do 5G. A Tabela II sintetiza os parâmetros S nas duas frequências do projeto.

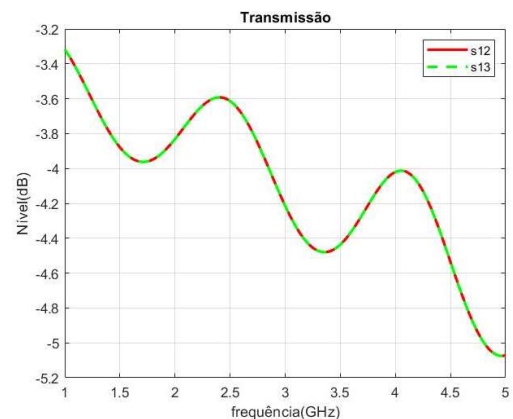


Fig. 4. Parâmetros de transmissão ($s_{12},$ e s_{13}) simulados.

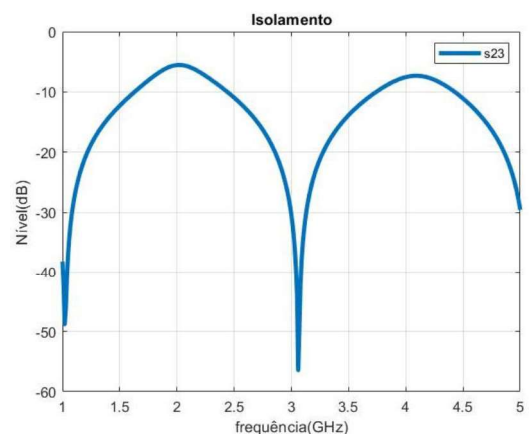


Fig. 5. Parâmetro de isolamento (s_{23}) simulado.

Tabela II. Matriz S simulada para o Divisor Wilkinson proposto.

		Frequência RFID	Frequência 5G
Parâmetros de reflexão (dB)	s_{11}	-10,11	-10,05
	s_{22}	-24,63	-15,24
	s_{33}	-24,63	-15,24
Parâmetros de transmissão (dB)	s_{12}	-3,6	-4,4
	s_{13}	-3,6	-4,4
Parâmetro de isolamento (dB)	s_{23}	10,16	13,49

Além do circuito esquemático do divisor, o layout é desenvolvido e apresentado na Figura 6. Nessa Figura é possível observar o raio calculado através da equação (1) e a divisão de 1 para 2 portas. Com o layout finalizado, é possível avançar para a etapa de fabricação do protótipo.

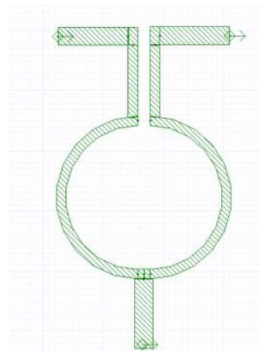


Fig. 6. Circuito layout do Divisor do tipo Wilkinson proposto.

III. FABRICAÇÃO E RESULTADOS

O protótipo do divisor Wilkinson foi fabricado utilizando a prototipadora de circuitos impressos LKPF s103, disponível no LAProp (Laboratório de Antenas e Propagação) da Universidade Federal Fluminense (UFF). Na etapa de fabricação, o substrato FR-4 é utilizado, além disso, após a fabricação é realizada a adição, através do processo de soldagem, do resistor de 100Ω ao circuito do divisor, como visto na Figura 7. Ele é posicionado entre as linhas acopladas das portas de saída 2 e 3, uma vez que essa posição apresentou o melhor resultado para o isolamento na simulação.

Na Figura 7 é possível observar uma pequena diferença na altura de fresagem no substrato, isso é devido a necessidade de desgastar parte do material para realizar a conectorização do dispositivo para caracterização experimental.

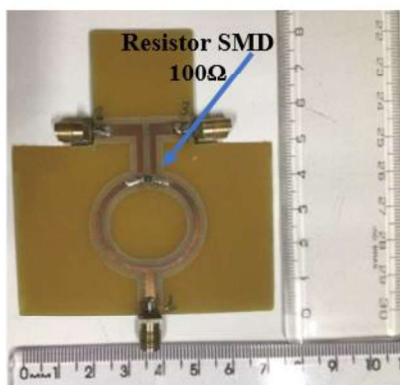


Fig. 7. Circuito final fabricado do Divisor do tipo Wilkinson proposto.

A matriz de parâmetros S do divisor é avaliada utilizando o Analisador de Redes Vetorial Anritsu MS2034A, que tem como intuito principal verificar o comportamento do divisor através da análise de seus parâmetros de transmissão (linha cheia em azul representando o s_{12} e pontilhada em vermelho o s_{13}) e isolamento (linha pontilhada em rosa representando o s_{23}), para a partir da análise concluir se ele atende o requisito de banda larga para as duas frequências principais, como pode ser visto na Figura 8.

A partir da análise da Figura 8 e da Tabela III, é possível concluir que matriz de parâmetros S do divisor é similar ao resultado apresentado na simulação, comprovando sua possível aplicação nas frequências dos serviços RFID e 5G. Na figura 8 os resultados medidos e simulados são comparados juntos onde as curvas tracejadas são os resultados simulados (azul: s_{12} , vermelho: s_{13} e rosa: s_{23}) e as representados por linhas cheias são os medidos (azul: s_{12} , vermelho: s_{13} e rosa: s_{23}).

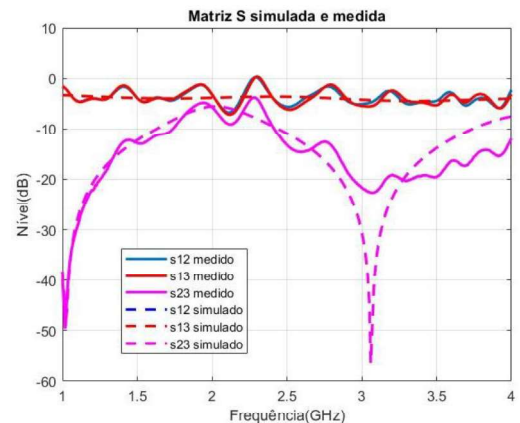


Fig. 8. Comparação entre os parâmetros de transmissão (s_{12} , s_{13}) e isolamento (s_{23}) simulados medidos.

Ainda na Figura 8, notam-se pequenas oscilações nos resultados medidos, esse fenômeno é explicado devido ao fato de que a calibração do equipamento não considerou os cabos envolvidos. Além disso, ao analisar o isolamento entre as portas, verifica-se que nos intervalos compreendidos entre as frequências de 2,39 GHz e 4 GHz, o parâmetro s_{23} se encontra abaixo do patamar de -10 dB e os de transmissão s_{12} e s_{13} comprovam o comportamento banda larga de aproximadamente 110 MHz do mesmo.

Tabela III. Matriz S parcial medida para o Divisor Wilkinson proposto.

		Frequência RFID	Frequência 5G
Parâmetros de transmissão (dB)	s_{12}	-3,24	-4,18
	s_{13}	-3,05	-3,812
Parâmetro de isolamento (dB)	s_{23}	-12,03	-19,96

IV. APLICAÇÃO DO DIVISOR WILKINSON

O protótipo do divisor Wilkinson proposto é submetido a dois testes de simulação distintos, sendo: o primeiro deles é verificar sua aplicação em sistemas de transmissão full duplex e o segundo consiste na sua utilização para alimentar duas antenas patch do tipo elípticas.

O teste de transmissão *full duplex* consiste em simular uma fonte geradora de sinal ($P_{tx} = 0 \text{ dBm}$) nas portadoras de 2,4 GHz e 3,5 GHz, separadamente, e verificar se o nível de potência que chega nas portas de saída (P_2 e P_3), na frequência da portadora e em algumas frequências de harmônicos para os dois casos, como visto no esquemático do circuito apresentado na Figura 9.

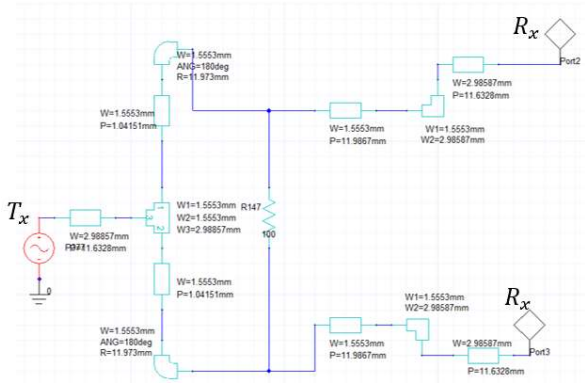


Fig. 9. Circuito esquemático do Divisor do tipo Wilkinson no teste de transmissão *full duplex*.

Na Figura 10 é possível observar que, considerando o sinal transmitido na frequência de 2,4 GHz, o nível de potência na recepção nas portas 2 (em azul) e 3 (em verde) é de, aproximadamente, 3dBm. Por outro lado, para o sinal transmitido na frequência de 3,5 GHz o nível de potência é de 0 dBm em ambas as portas, conforme pode ser visto na Figura 11. Nas demais frequências, incluindo os harmônicos, o nível de potência recebido é bem menor do que na portadora.

Baseado nesses resultados e na simulação, alterando a posição da fonte geradora de potência é possível inferir que o divisor proposto pode ser aplicado em transmissões de sistemas *full duplex* com isolamento de 10 dB entre as portas, como já visto na Figura 8.

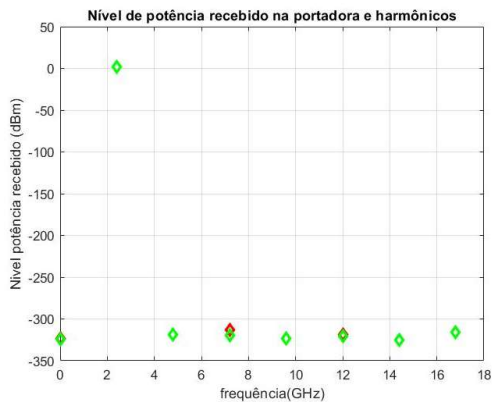


Fig. 10. Nível de potência na recepção considerando a transmissão na portadora de 2,4 GHz.

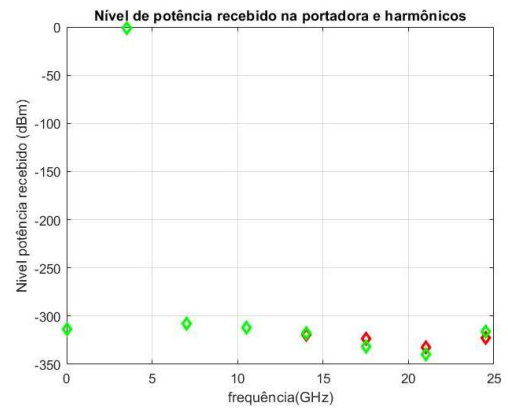


Fig. 11. Nível de potência na recepção considerando a transmissão na portadora de 3,5 GHz.

O segundo teste de aplicação para o divisor é o de alimentação em painel ou conjunto de antenas. Para tal, são propostos dois modelos de antenas patch com geometria elíptica contando com elemento casador de impedância em sua estrutura. Esses modelos são desenvolvidos no software ANSYS HFSS, com seu projeto visto na Figura 12 e as suas dimensões mostradas na Tabela IV.

Tabela IV. Dimensões das antenas elípticas desenvolvidas.

Modelo Elíptico	Dimensões (cm) Elíptica RFID	Dimensões (cm) Elíptica 5G
Patch eixo X	2,99	4,28
Patch eixo Y	2,30	3,285
Edge Feed Width	0,072	0,072
Edge Feed Length	1,414	2,104
Feed Width	0,306	0,306
Feed Length	2,246	3,341

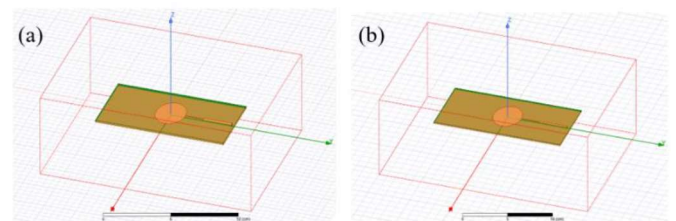


Fig. 12. Layout das antenas elípticas propostas (a) portadora RFID (b) portadora 5G.

O objetivo desse teste de simulação é analisar o parâmetro s_{11} do painel. Para tal, são calculados dois novos trechos de casamento de impedância para serem adicionados à estrutura do divisor Wilkinson; cada um desses trechos é calculado em função da frequência do elemento irradiante a ser alimentado, ou seja, o ramo superior é calculado em função da portadora de 2,4 GHz e o inferior da portadora de 3,5 GHz, como é observado na Figura 13.

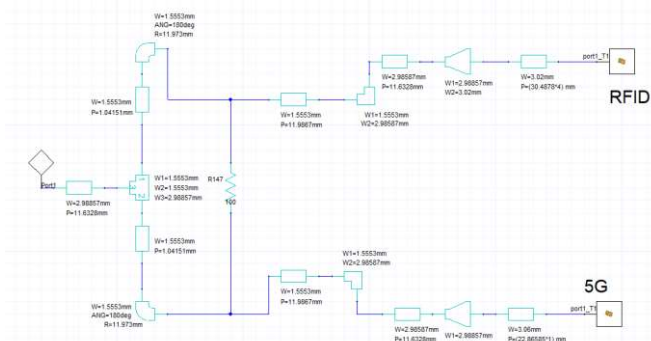


Fig. 13. Circuito esquemático da alimentação de antenas elípticas com o Divisor do tipo Wilkinson.

O resultado do parâmetro s_{11} nessa configuração, visto na Figura 14, permite concluir que as melhores frequências de operação são 2,37 GHz, atendendo o serviço RFID com 120 MHz de largura de banda, e 3,78 GHz, atendendo o serviço 5G com 150 MHz de largura de banda. Além disso, identifica-se outras frequências de ressonância como 1,81 GHz e 4,81 GHz, com largura de banda de 70 e 100 MHz, respectivamente, possibilitando que esse protótipo seja aplicado a sistemas 4G e 5G.

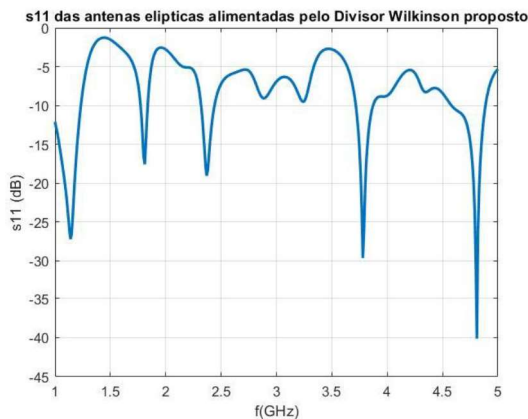


Fig. 14. Parâmetros S_{11} simulado com a aplicação do Divisor Wilkinson a antenas elípticas.

V. CONCLUSÕES

Diversos sistemas de RF precisam dividir a potência incidente entre 2 ou mais portas de saída, portanto, neste trabalho é proposto o desenvolvimento de um divisor de potência do tipo Wilkinson que seja banda larga e, consequentemente, possa ser utilizado em dois serviços distintos, RFID e 5G.

O divisor é desenvolvido seguindo a teoria de linhas de transmissão *microstrip* e considerando o substrato FR-4, desse modo obtém-se um protótipo de baixo custo e miniaturizado com dimensões de 7x5 cm, permitindo sua aplicação em dispositivos para aplicação no RFID e no 5G. Além disso, os resultados de simulação mostram que ele apresenta boa transmissão nas frequências desejadas, além de um bom isolamento entre as portas de saída com uma largura de banda de 150 MHz, contribuindo assim para que ele seja aplicado a diversos serviços. Simulações mostraram bom desempenho do divisor projetado, o que foi corroborado com os resultados de medições. Os resultados práticos obtidos também comprovam sua característica banda larga com 160 MHz de largura de banda.

Através da análise dos resultados do divisor aplicado a sistemas full duplex e na alimentação de antenas do padrão elíptico é possível confirmar seu bom funcionamento nos dois cenários. No primeiro, o nível do sinal recebido é considerado bom nas duas portadoras, e no segundo verifica-se a presença das portadoras desejadas como frequência de ressonância do protótipo, além do surgimento de outras frequências, possibilitando sua aplicação em outros serviços de RF já estabelecidos, como o serviço de telefonia móvel 4G.

Para trabalhos futuros, destaca-se o experimento prático do divisor aplicado a sistemas full duplex, além da fabricação do protótipo de painel alimentado pelo divisor, a fim de caracterizá-lo através de seu diagrama de irradiação e verificar outras características do painel como ganho, diretividade, HPBW e FNBW. Além disso, o estudo, simulação e fabricação de divisor de potência do tipo Wilkinson 4x1 operando em distintas frequências também é considerado, de modo que seja possível continuar a atender mais de um serviço com uma única alimentação para transmissão e recepção *full duplex*, além de possibilitar a alimentação de mais elementos em um conjunto de antenas, aumentando assim o ganho do conjunto utilizado.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à CAPES pela Bolsa de Estudos do primeiro autor.

REFERÊNCIAS

- [1] David M. Pozar, *Microwave Engineering*. 2 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2003..
- [2] Robert E. Collin, *Foundations for Microwave Engineering*. 2 ed. IEEE press. John Wiley & Sons.
- [3] E. Park, S. Kim and N. S. Jeong, "A Circularly Polarized Planar 2x2 Dipole Array Antenna Fed by a Modified 4-way Gysel Power Divider," *2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, 2019, pp. 1745-1746, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8888941..
- [4] K. B. Kumar and T. Shanmuganatham, "3-Port T-junction SIW power divider for 60GHz applications," *2017 IEEE International Conference on Antenna Innovations & Modern Technologies for Ground, Aircraft and Satellite Applications (iAIM)*, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/IAIM.2017.8402630.
- [5] K. Song, F. Xia, Y. Zhou, S. Guo and Y. Fan, "Microstrip/Slotline-Coupling Substrate Integrated Waveguide Power Divider With High Output Isolation," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 29, no. 2, pp. 95-97, Feb. 2019, doi: 10.1109/LMWC.2018.2888943.
- [6] A. Tiwari, U. Pattapu and S. Das, "A wideband 1:2 T-junction power divider for antenna array with optimum results," *2018 3rd International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP)*, 2018, pp. 1-2, doi: 10.1109/ICMAP.2018.8354594.
- [7] Y. Fu, K. Y. Chan, M. G. Banciu and R. Ramer, "Broadband Y-type Divider in Ku-band Using Substrate Integrated Waveguide," *2019 International Semiconductor Conference (CAS)*, 2019, pp. 57-60, doi: 10.1109/SMICND.2019.8924000.
- [8] F. Yang and Q. -X. Chu, "A Ka-Band Compact Five-Port Power Divider," *2021 Cross Strait Radio Science and Wireless Technology Conference (CSRSWTC)*, 2021, pp. 175-176, doi: 10.1109/CSRSWTC52801.2021.9631615.
- [9] S. Adya, A. Jain, D. Sharma, A. Gupta and V. Bhalla, "Design and fabrication of microstrip equal Wilkinson RF power divider at 650MHz using MWO," *2017 IEEE Applied Electromagnetics Conference (AEMC)*, 2017, pp. 1-2, doi: 10.1109/AEMC.2017.8325697.
- [10] Agência Nacional de Telecomunicações do Brasil (ANATEL), "Resolução 680, Junho 27 2017," [Online]. Available: <https://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2017/936-resolucao-680>. [Acessado em 02 de maio 02 de 2020].
- [11] J. Wang, G. Li, B. Huang, Q. Miao, J. Fang, P. Li, H. Tan, W. Li, J. Ding, J. Li and Y. Wang, *Spectrum Analysis and Regulations for 5G*. 5G Mobile Communications.