

Caracterização Eletromagnética de um Cruzamento com Elementos Concentrados em Tecnologia CPWG

Eduarda G. Peres, Edson R. Schlosser, Marcos V. T. Heckler e Eduardo S. Sakomura

Resumo—Este artigo apresenta o projeto e a construção de um cruzamento com elementos concentrados (capacitores e indutores SMD) soldados em placa de circuito impresso em tecnologia de guia de onda coplanar aterrado (do inglês, *Grounded Coplanar Waveguide - CPWG*) para operar na frequência de 2,4 GHz. A simulação eletromagnética da estrutura projetada foi realizada usando o software Ansys HFSS. O dispositivo apresenta estrutura composta por apenas um laminado, área reduzida quando comparado com cruzamento em linha de transmissão, facilidade de ajuste através da substituição de componentes em bancada e baixo custo de construção.

Palavras-Chave—Cruzamento, Elementos concentrados, CPWG, Simulação eletromagnética.

Abstract—This paper presents the design of a crossover using lumped elements (SMD components: capacitors and inductors) mounted on a printed circuit board. The proposed structure was developed in Grounded Coplanar Waveguide (CPWG) technology to operate at 2.4 GHz. The electromagnetic simulation has been carried out the the commercial package Ansys HFSS. The device was designed in a single laminate, and presents compact dimensions, low cost and ease of adjustment through component replacement.

Keywords—Crossover, Lumped elements, CPWG, Electromagnetic simulation.

I. INTRODUÇÃO

O projeto de sistemas de telecomunicações requer o atendimento de requisitos, tais como compactação, baixo custo e facilidade de construção. A partir disso, com o passar das décadas, estruturas para redes de antenas tornaram-se mais complexas e pode ser necessário fazer com que linhas de transmissão se cruzem em algum ponto [1].

Nesse sentido, os cruzamentos são dispositivos indispensáveis nos projetos de micro-ondas, pois permitem que dois sinais distintos de radiofrequência (RF) se cruzem com alto nível de isolamento. É possível realizar cruzamento dos sinais por meio de cabos coaxiais ou estrutura multicamada, porém a complexidade e o custo de realização aumentam. Sendo assim, são escolhidas preferencialmente estruturas planares em função da facilidade de fabricação e integração. Tais estruturas, apesar de serem simples, baseiam-se em parâmetros distribuídos, tor-

nando, assim, o tamanho físico grande para algumas aplicações em RF.

Em [2], um cruzamento com elementos concentrados é proposto para operar na frequência de 1 GHz, em que análises de desempenho do protótipo são apresentadas. Para a construção do cruzamento, a tecnologia de microfita é utilizada no substrato Rogers RT/Duroid 5880.

Em [3], um acoplador de tamanho compacto baseado em elementos concentrados é projetado na frequência central de 1 GHz. O dispositivo é sintonizável, em que as taxas de acoplamento e as respostas são reconfiguráveis a partir da utilização de diodos varicap. Com a capacitância ajustada para um valor pequeno, o acoplador pode atuar como um cruzamento.

Os elementos concentrados podem limitar a largura de banda quando comparados com os elementos distribuídos. Sendo assim, em [4] é apresentada uma topologia em elementos concentrados de banda larga na frequência de 1 GHz. A topologia utilizada no trabalho é baseada em [5].

Neste trabalho, são apresentadas as características de projeto de um cruzamento baseado na utilização de elementos concentrados (capacitores e indutores) na frequência central de 2,4 GHz. Como principal contribuição, pode-se destacar a compensação dos efeitos parasitas no circuito e as análises da fase de saída de cruzamentos visando aplicação em circuitos de *beamforming*, em que é fundamental o controle da amplitude e fase das tensões aplicadas em cada antena que compõe a rede para obter o diagrama de irradiação desejado [6].

O artigo está estruturado da seguinte maneira: a seção II contém as simulações do diagrama esquemático do cruzamento analisado a partir do software Ansys Designer composto por componentes ideais. Adicionalmente, são realizadas simulações eletromagnéticas do cruzamento no software Ansys HFSS para incluir efeitos parasitas. Na seção III são apresentados os resultados obtidos através de medições em bancada dos protótipos. Por fim, as conclusões do trabalho são apresentadas na seção IV.

II. CRUZAMENTO EM ELEMENTOS CONCENTRADOS

O cruzamento investigado trata-se do modelo circuital proposto por [2], que se baseia na utilização de indutores e capacitores conectados de forma concentrada. A configuração usada pode ser visualizada na Fig. 1. O dispositivo opera da seguinte forma: um sinal que incide na porta 1 deve ser totalmente transmitido para a porta 3, e vice-versa, assim como um sinal que incide na porta 2 deve ser totalmente transmitido

Eduarda G. Peres, Edson R. Schlosser, Marcos V. T. Heckler e Eduardo S. Sakomura, Laboratório de Eletromagnetismo, Micro-Ondas e Antenas - LEMA, Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA, Alegrete-RS, e-mail: {eduardaperes.aluno, edsonschlosser, marcosheckler, eduardosakomura.aluno}@unipampa.edu.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul - FAPERGS (Processos: 21/2551-0000664-1 e 22/2551-0000768-6).

para a porta 4, e vice-versa. Na prática, o acoplamento entre as demais portas do circuito não será nulo; ou seja, a isolamento é finita, o que produz interferência entre os sinais a serem cruzados.

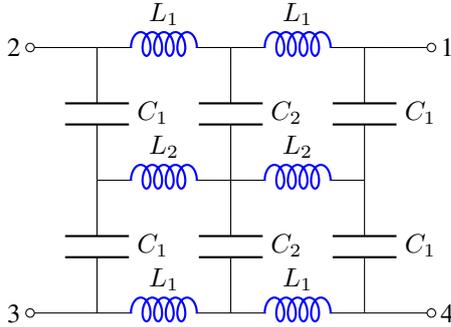


Fig. 1: Diagrama esquemático do cruzamento empregando-se elementos concentrados [2].

Os valores ideais dos componentes do circuito, que correspondem às capacitâncias C_1 e C_2 e aos indutores L_1 e L_2 , são determinados analiticamente por

$$C_1 = \frac{1}{L_1(2\pi f)^2}, \quad (1)$$

$$C_2 = 2C_1 \quad (2)$$

e

$$L_2 = \frac{L_1}{2}, \quad (3)$$

em que L_1 deve ser definido pelo projetista e f é a frequência central do projeto.

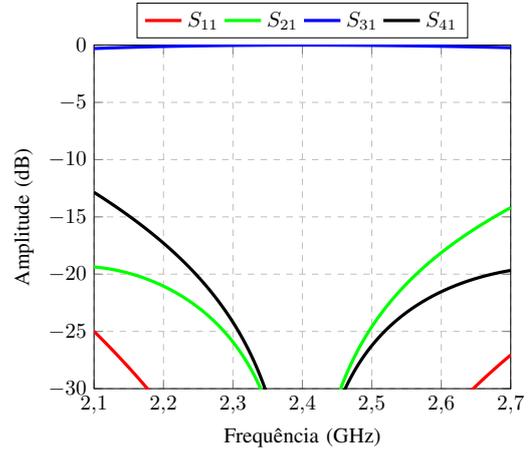
A. Simulação do Esquemático

Os valores dos componentes do circuito foram calculados através das Equações (1)-(3) para um indutor $L_1 = 2,5$ nH e $f = 2,4$ GHz. Os valores teóricos são: $L_2 = 1,25$ nH, $C_1 = 1,75$ pF e $C_2 = 3,52$ pF. O circuito foi elaborado e simulado no Ansys Designer, obtendo-se os resultados mostrados na Fig. 2. Devido à simetria do circuito, apenas os parâmetros relacionados à porta 1 foram apresentados.

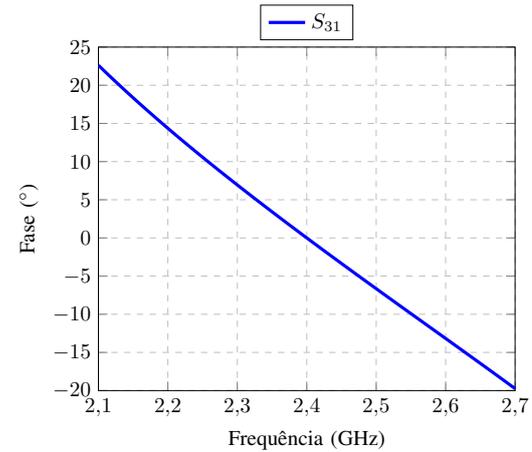
Os parâmetros S_{11} , S_{21} e S_{41} apresentam magnitudes em absoluto que tendem à zero na frequência central do projeto. Desta forma, o casamento e as isolações estão perfeitas. Já a magnitude do parâmetro S_{31} tende ao valor absoluto unitário, o que significa que a onda é totalmente transmitida da porta 1 para a porta 3.

B. Simulação Eletromagnética

A tecnologia de guia de onda coplanar aterrado foi selecionada para receber os componentes concentrados. A estrutura foi projetada no laminado RO4360G2 da Rogers, a qual possui as seguintes propriedades e parâmetros: constante dielétrica $\epsilon_r = 6,15$, tangente de perdas $\tan \delta = 0,0038$, espessura do



a)



b)

Fig. 2: Parâmetros S do cruzamento com elementos concentrados modelados no software Ansys Designer. a) Magnitude; b) Fase.

substrato $H = 0,61$ mm e espessura do cobre $E = 35$ μm , conforme [7].

A linha de transmissão com impedância característica $Z_0 = 50$ Ω em tecnologia CPWG para o laminado utilizado possui uma largura $W = 0,5$ mm, espaçamento entre linha central e plano de terra lateral $gap = 0,2$ mm e comprimento de onda guiado $\lambda_g = 66,87$ mm.

Os elementos do circuito foram inseridos no software Ansys HFSS como superfícies RLC e dimensões de componentes SMD 0402 imperial. Cada superfície inserida sintetiza uma determinada capacitância ou indutância, com valores correspondentes aos calculados na seção II-A. O circuito projetado possui quatro portas, conforme definido na Fig. 1, e pode ser visualizado na Fig. 3. A Fig. 3 exhibe a disposição dos capacitores e indutores SMD utilizados no projeto. Os componentes sinalizados na cor rosa são os capacitores e na cor verde são os indutores.

Após as simulações eletromagnéticas da estrutura, ajustes nos valores dos componentes foram necessários, visto que

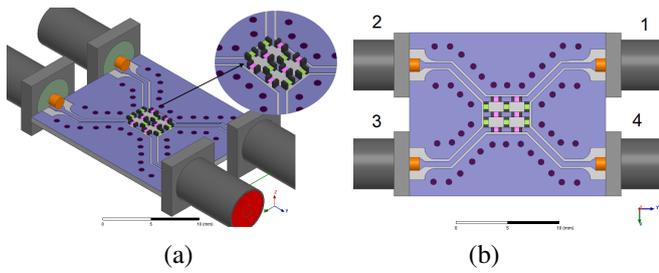


Fig. 3: Cruzamento com elementos concentrados no software Ansys HFSS. a) Vista isométrica; b) Vista superior.

capacitâncias e indutâncias parasitas estão presentes neste tipo de projeto. Os valores otimizados em um primeiro momento foram: $L_1 = 2,5$ nH, $L_2 = 1$ nH, $C_1 = 1,5$ pF e $C_2 = 2,5$ pF. Os resultados obtidos para esses valores de componentes podem ser visualizados nas linhas sólidas contidas na Fig. 4 para magnitudes e fases. É possível observar que existe uma ressonância muito próxima à frequência central do projeto. Esse efeito se dá pelo modelo de alta frequência embutido nos componentes. Para corrigir este efeito, foi necessário reprojeter o cruzamento visando afastar a ressonância da frequência central. Após um novo processo de otimização, os valores finais utilizados foram $L_1 = 2,5$ nH, $L_2 = 1,1$ nH, $C_1 = 1,6$ pF e $C_2 = 2,7$ pF. Os resultados obtidos para esses valores de componentes podem ser visualizados nas linhas tracejadas da Fig. 4.

Para o cruzamento 1, os parâmetros S_{11} , S_{21} , S_{31} e S_{41} na frequência de 2,4 GHz apresentam magnitudes iguais a $-36,75$ dB, $-55,61$ dB, $-0,23$ dB e $-15,72$ dB, respectivamente; para o cruzamento 2, os mesmos parâmetros na frequência de 2,4 GHz apresentam magnitudes iguais a $-24,09$ dB, $-32,17$ dB, $-0,44$ dB e $-11,73$ dB, respectivamente. Adicionalmente, é possível observar que ambos os cruzamentos possuem fases distintas para o parâmetro S_{31} .

Os cruzamentos foram construídos e medidos em bancada após concluídas as simulações eletromagnéticas. A Fig. 5 apresenta o protótipo de um dos cruzamentos construídos. Os resultados medidos para os cruzamentos podem ser observados nas Figs. 6 e 7.

Após as medições do cruzamento 1 por meio do analisador de redes, os parâmetros S_{11} , S_{21} , S_{31} e S_{41} na frequência de 2,4 GHz apresentam magnitudes iguais a $-13,45$ dB, $-26,87$ dB, $-1,40$ dB e $-14,92$ dB respectivamente. Posteriormente, para o cruzamento 2, os mesmos parâmetros na frequência central de 2,4 GHz apresentam magnitudes iguais a $-32,86$ dB, $-16,99$ dB, $-0,85$ dB, $-16,61$ dB, respectivamente. Também pode-se observar as fases obtidas através do parâmetro de transmissão S_{31} com valores próximos a 240° .

Após as medições obtidas para o cruzamento 1 considerando agora a porta 2 como a de entrada, os parâmetros S_{12} , S_{22} , S_{32} e S_{42} , na frequência de 2,4 GHz apresentam magnitudes iguais a $-26,87$ dB, $-13,01$ dB, $-18,84$ dB e $-1,36$ dB. Posteriormente, para o cruzamento 2, considerando também a porta 2 como a de entrada, os mesmos parâmetros na frequência central de 2,4 GHz apresentam magnitudes iguais a $-17,78$ dB,

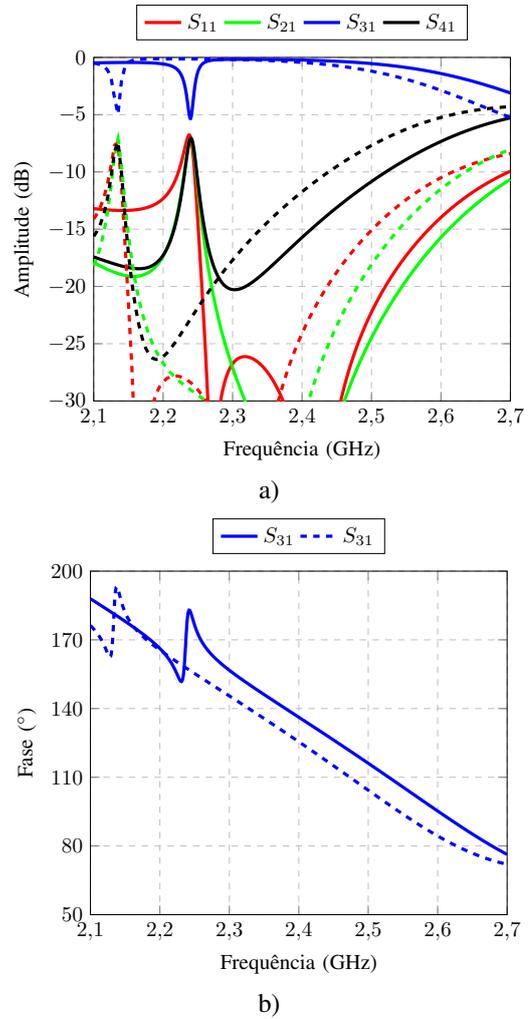


Fig. 4: Parâmetros S da simulação eletromagnética dos cruzamentos com elementos concentrados. a) Magnitude; b) Fase. Linha sólida: Cruzamento após a primeira otimização (cruzamento 1); Linha tracejada: Cruzamento em sua versão final (cruzamento 2).

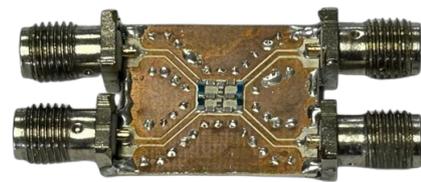


Fig. 5: Cruzamento com componentes discretos construído.

$-21,28$ dB, $-16,27$ dB, $-0,87$ dB, respectivamente.

III. CONCLUSÕES

O primeiro cruzamento projetado através do simulador eletromagnético Ansys HFSS, construído e validado posteriormente apresentou uma ressonância na curva de fase do parâmetro de transmissão S_{31} . Tal resultado pode comprometer a operação do dispositivo quando integrado a um circuito completo

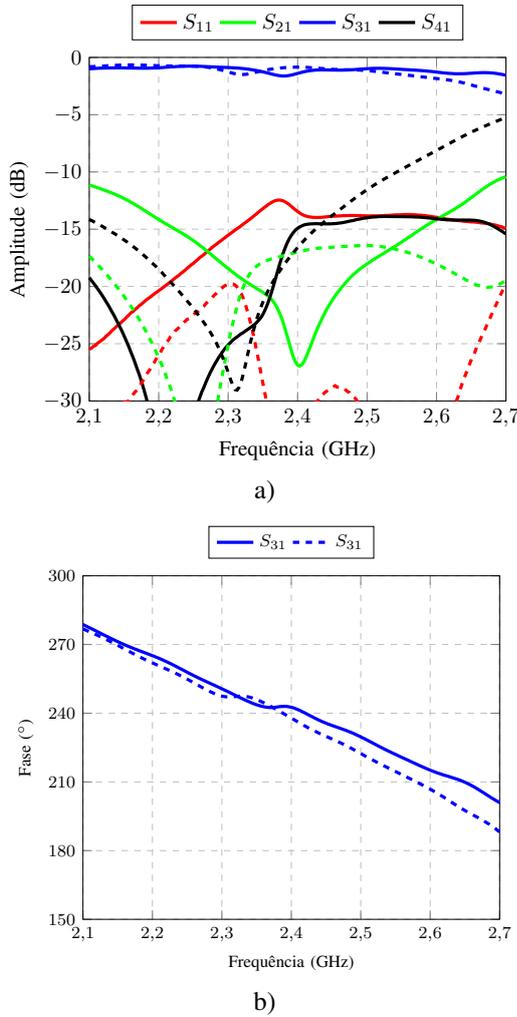


Fig. 6: Parâmetros S medidos em relação a porta 1 para o protótipo construído: a) Magnitude; b) Fase. Linha sólida: Cruzamento 1; Linha tracejada: Cruzamento 2.

para *beamforming* de redes de antenas baseado no emprego de defasagem progressiva. Para contornar esta limitação, um novo cruzamento foi otimizado, para que o efeito da ressonância fosse deslocado em frequência, já que após a medição do primeiro cruzamento, é possível observar uma diferença de aproximadamente 100° entre as curvas simulada e medida. O novo cruzamento foi otimizado de forma a não degradar o desempenho do dispositivo em termos de fase do parâmetro de transmissão. Os resultados obtidos foram satisfatórios e condizentes com as simulações realizadas.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) sob Termo de Outorga 21/2551-0000664-1 e processo PROA 22/2551-0000768-6.

REFERÊNCIAS

[1] D. M. Pozar, "Microwave Engineering," 4th Edition, Wiley, 2011.

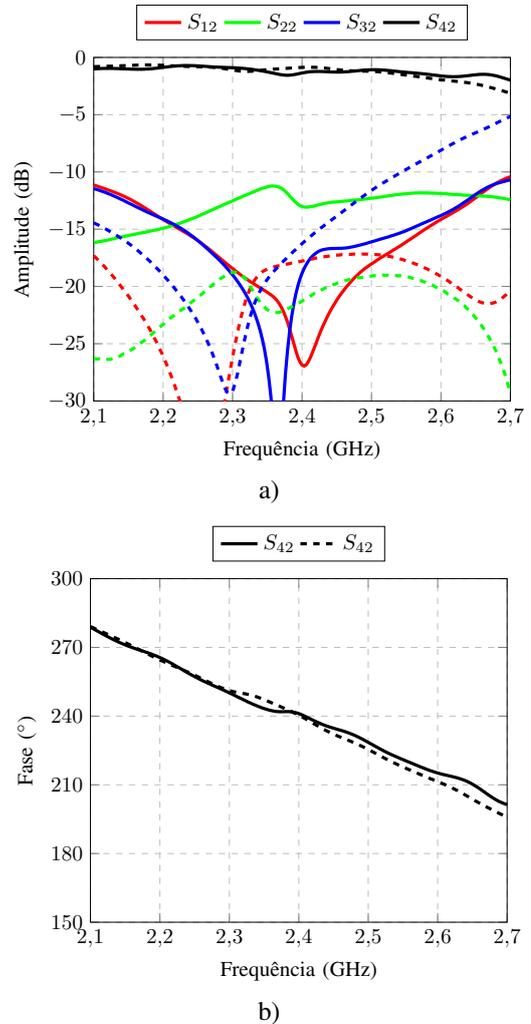


Fig. 7: Parâmetros S medidos em relação a porta 2 para o protótipo construído: a) Magnitude; b) Fase. Linha sólida: Cruzamento 1; Linha tracejada: Cruzamento 2.

[2] B. Arigong; M. Zhou; H. Ren; J. Shao; J. Ding; H. Kim e H. Zhang, "Ultra-compact lumped element cross-over," *Electronics Letters*, v. 51, pp. 1082-1084, 2015.

[3] B. Arigong; M. Zhou; H. Ren; C. Chen e H. Zhang, "A Compact Lumped-Component Coupler with Tunable Coupling Ratios and Reconfigurable Responses," *2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS, Philadelphia, PA, USA, 2018*, pp. 518-521.

[4] X. Yu e S. Sun, "Design of Wideband Lumped Crossovers With Resonator-Loaded Window Shape Structure," *Microwave and Wireless Components Letters*, v. 29, pp. 309-311, Maio 2019.

[5] D. Kholodniak; G. Kalinin; E. Vernoslova e I. Vendik, "Wideband 0-dB branch-line directional couplers," *2000 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (Cat. No.00CH37017)*, Boston, MA, USA, 2000, pp. 1307-1310 vol.3, doi: 10.1109/MWSYM.2000.861760.

[6] H. Ren; H. Zhang e B. Arigong, "Ultra-compact 3 x 3 Nolen matrix beamforming network," *IET Microw. Antennas Propag.*, v. 14, pp. 143-148, 2020.

[7] Rogers Corporation, "RO4360G2 High Frequency Laminates Data Sheet". [Online]. Available: <https://www.rogerscorp.com/media/project/rogerscorp/documents/advanced-electronics-solutions/english/data-sheets/ro4360g2-high-frequency-laminates-data-sheet.pdf>