

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM ACOPLADOR HÍBRIDO RAT-RACE DUAL-BAND EM MICROFITA

Ronaldo de A. MARTINS (1); Elder Eldervitch C. de OLIVEIRA (2); Adaildo G. D' ASSUNÇÃO (3); Paulo H. da F. SILVA (4); João Bosco L. de OLIVEIRA (5);

(1) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Av Sen. Salgado Filho, s/n. CEP: 59072-970, Natal-RN, e-mail: ronaldo@ufrnet.br

(2) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Av Sen. Salgado Filho, s/n. CEP: 59072-970, Natal-RN, e-mail: elder2@ymail.com

(3) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Av Sen. Salgado Filho, s/n. CEP: 59072-970, Natal-RN, e-mail: adaildo@ct.ufrn.br

(4) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Av 1º de maio, 720, Jaguaribe, CEP: 58015-4430, João Pessoa-PB, e-mail: henrique@ifpb.edu.br

(5) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Av Sen. Salgado Filho, s/n. CEP: 59072-970, Natal-RN, e-mail: bosco@sedis.ufrn.br

RESUMO

O anel híbrido Rat-Race é um dispositivo acoplador de potência de quatro portas com muitas aplicações em circuitos de comunicação para a faixa de micro-ondas e de ondas milimétricas. O anel híbrido descrito neste artigo é constituído de quatro seções de microfita, uma de comprimento de $\frac{3}{4}\lambda$ e três de comprimento de $\frac{1}{4}\lambda$. O acoplamento entre as porta 1 e 2 (S21) e as portas 1 e 3 (S31) foram caracterizados com auxílio da ferramenta de análise *Ansoft DesignerTM*, que implementa o método dos momentos (MoM). Em particular, foram verificadas as defasagens de sinais na faixa de micro-ondas transmitidos às portas de saída (2 e 3) após a excitação do circuito de microfita na porta de entrada 1. Com a finalidade de validar os resultados teóricos simulados, um protótipo do dispositivo foi fabricado e medido no laboratório do INCTCSF-UFRN (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Comunicação Sem Fio).

Palavras-chave: anel híbrido, circuito de micro-ondas, microfita

1 INTRODUÇÃO

Um acoplador híbrido Rat-Race é um dispositivo com aplicações em circuitos de comunicação para a faixa de micro-ondas e de ondas milimétricas, tais como: misturadores (*mixers*), amplificadores, multiplicadores e divisores/combinadores de potência (WU, 2009). O acoplador híbrido Rat-Race realiza a supressão de harmônicas de ordem elevada atenuando os sinais de interferência indesejáveis. Aplicações envolvendo isoladores de potência também são possíveis, em virtude do alto nível de isolamento entre as portas ser necessário (TSENG, 2010).

Uma ilustração do leiaute do circuito Rat-Race construído em tecnologia planar com quatro portas é mostrada na Figura 1. Pode-se observar que um segmento do anel acoplador tem um comprimento de $\frac{3}{4}\lambda$, enquanto os outros três têm comprimentos iguais a $\frac{1}{4}\lambda$, em que, λ é o comprimento de onda de operação. O comprimento da linha de alimentação de cada porta foi considerado com sendo $\frac{1}{8}$ de λ .

A configuração do anel é projetada de tal forma que, para um sinal injetado na porta de entrada 1, metade desse sinal será transmitido à porta 2 e 3 ocorrendo interferência construtiva. Por outro lado, nenhuma sinal espera ser detectado na porta 4, ocorrendo dessa forma interferência destrutiva. Ou seja, tem-se então um sinal injetado na porta 1 que é dividido na junção entre a linha e o anel percorrendo os comprimentos $\frac{1}{2}\lambda$ e λ até atingir a porta 4 em oposição de fase (defasagem de 180°), portanto, teoricamente estes sinais se anulam numa interferência destrutiva na porta 4 (porta isolada). Entre as portas 1 e 2 e as portas 1 e 3, o sinal percorre dois caminhos de comprimentos $\frac{\lambda}{4}$ e $\frac{5}{4}\lambda$, portanto chegando as portas de saída 2 e 3 em fase. A largura de banda (em termos percentuais) de um Rat-Race convencional está situada entre 10% e 15%. Entretanto os efeitos da descontinuidade em cada junção e das seções de linha podem reduzir a largura de banda do acoplador (LIAO, 2004).

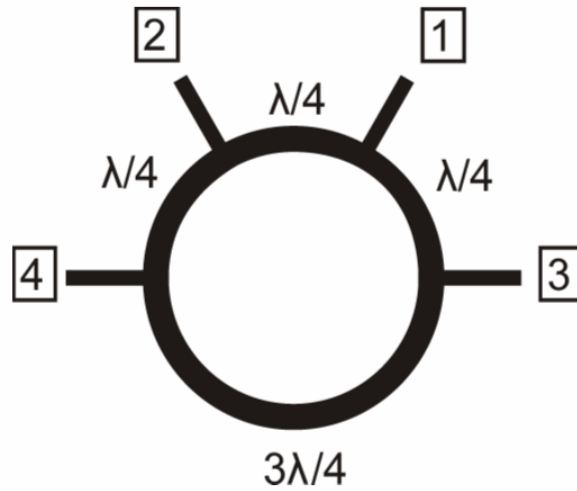


Figura 1 – Esquemático de um circuito Rat-Race de quatro portas

Considere uma matriz de espalhamento de quatro portas:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \quad [\text{Eq. 01}]$$

Para um acoplador ideal, esta rede será recíproca, casada em cada porta e nenhuma potência será entregue a porta 4 (porta isolada). Aplicando estas condições, a matriz de espalhamento se torna

$$S = \begin{bmatrix} 0 & S_{21} & S_{31} & 0 \\ S_{21} & 0 & 0 & S_{42} \\ S_{31} & 0 & 0 & S_{43} \\ 0 & S_{42} & S_{43} & 0 \end{bmatrix} \quad [\text{Eq. 02}]$$

Um acoplador simétrico ou de 90° suposto ideal é caracterizado por

$$S = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & j\beta & 0 \\ \alpha & 0 & 0 & j\beta \\ j\beta & 0 & 0 & \alpha \\ 0 & j\beta & \alpha & 0 \end{bmatrix} \quad [\text{Eq. 03}]$$

Em que, α e β são os coeficientes de transmissão e de acoplamento, respectivamente. Para uma rede sem perdas temos

$$\alpha^2 + \beta^2 = 1 \quad [\text{Eq. 04}]$$

Após uma inspeção na [Eq. 03], se observa que a potência na porta acoplada está 90° fora de fase com a potência na porta direta de saída.

A superfície ocupada por um circuito Rat-Race típico é de $0,18 \lambda^2$, que é um valor grande nas baixas frequências de micro-ondas. Suas dimensões geralmente tornam proibitivo seu uso em aplicações para circuitos integrados monolíticos de microondas (MMICs) (GILLICK, 1992). Diferentes técnicas têm sido relatadas na literatura especializada para reduzir o tamanho do dispositivo. Em Liao et al. (2004),

acopladores Rat-Race de tamanho reduzido têm sido propostos usando estrutura de impedância “stepped”, a qual apresenta uma largura de banda melhorada. Em algumas das técnicas relatadas em Hirota et al. (1990) e Giannini et al. (2002), elementos *lumped* e distribuídos ou capacitores metal-isolador-metal (MIM) são necessários, uma vez que os mesmos elevaram a complexidade do dispositivo e o seu custo de fabricação.

O objetivo deste trabalho consiste em uma caracterização experimental da capacidade de defasamento de sinais de um acoplador híbrido Rat-Race projetado para a frequência de operação de 2,45 GHz. Em que foi verificado um comportamento *dual-band* para o dispositivo analisado onde as impedâncias das linhas consideradas no projeto para a frequência de operação observada foram: $Z_0 = 50 \Omega$ para as portas do circuito e $Z_0 = 50 / \sqrt{2} = 35,36 \Omega$ para os segmentos de linha do anel de $\lambda/4$ e $3\lambda/4$.

2 METODOLOGIA EMPREGADA

Com auxílio da ferramenta de análise *Ansoft DesignerTM*, o dispositivo pôde ser caracterizado através do acoplamento entre as porta 1 e 2 designado como S21 (coeficiente de transmissão entre a porta 1 e a porta 2) e entre as portas 1 e 3 designado como S31. Com a finalidade de validar os resultados teóricos, um protótipo do dispositivo foi fabricado e medido no laboratório do INCTCSF-UFRN (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Comunicação Sem Fio) com um analisador de redes (modelo HP 8714C) que opera na faixa entre 300 KHz e 3 GHz.

O dispositivo Rat-Race analisado foi construído sobre um substrato dielétrico laminado de baixo custo FR4 (fibra de vidro), com uma permissividade elétrica relativa igual a 4,4 e uma espessura de 1,5 mm, revestido com duas camadas finas de cobre em cada face. As equações de projeto utilizadas nos cálculos dos parâmetros elétricos do circuito foram baseadas no modelo TLM (modelo da linha de transmissão) descrito em Balanis et al. (1997), para um comprimento de onda dado por

$$\lambda = \frac{c}{F_r} \quad [\text{Eq. 05}]$$

As dimensões do circuito Rat-Race projetado para a frequência de ressonância (F_r) de 2,45 GHz são especificadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Exemplo de estilos a serem utilizados

Comprimento de cada linha de alimentação	15,31 mm
Largura da linha (anel) de $50 / \sqrt{2} \Omega$	4,90 mm
Comprimento de onda de operação (λ)	122,45 mm
Largura da linha de alimentação de 50Ω	2,87 mm
Comprimento do segmento ($3\lambda/4$)	91,84 mm
Comprimento do segmento ($\lambda/4$)	30,61 mm

O processo de fabricação do circuito envolveu quatro etapas (ver Figura 2): (a) elaboração precisa do leiaute com auxílio de um *software* de CAD (neste caso usou-se o *CorelDrawTM*); (b) preparação da placa de FR4 e confecção de máscara adesiva com os respectivos leiautes de impressão ; (c) corrosão das faces de cobre, descobertas pela máscara de impressão, por imersão da placa de FR4 em solução de percloroeto de ferro; (d) instalação e soldagem dos conectores.

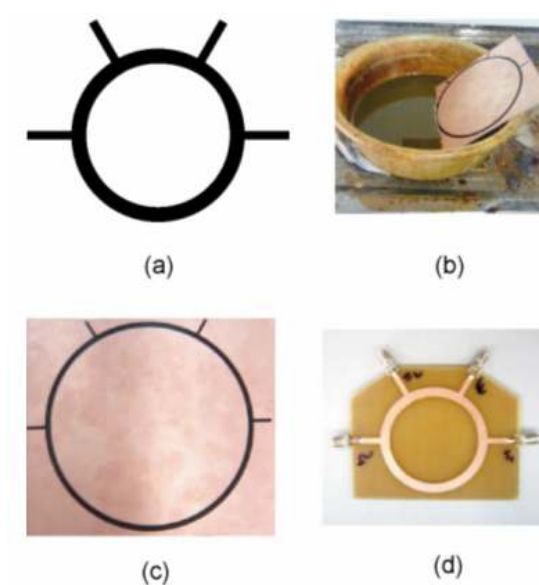


Figura 2 – (a) Leiautes das máscaras de impressão do circuito Rat-race em microfita projetado. (b) Imagem da placa de FR4 durante a imersão em solução corrosiva. (c) Imagem do dispositivo após o corte da placa. (d) Imagem final do circuito após a instalação dos conectores

2.1 Equipamentos utilizados na medição

O arranjo de medição é mostrado na imagem da Figura 3. Os seguintes equipamentos e acessórios foram utilizados:

- Um analisador de rede vetorial modelo HP 8714C;
- Cabos e conectores SMA;
- Ferro de solda;
- Uma carga de $50\ \Omega$;
- A Placa FR4 de fibra de vidro ($\epsilon_r = 4,4$ e $h = 1,5\text{ mm}$);
- Um pendrive de 1 gigabyte;
- Um microcomputador;

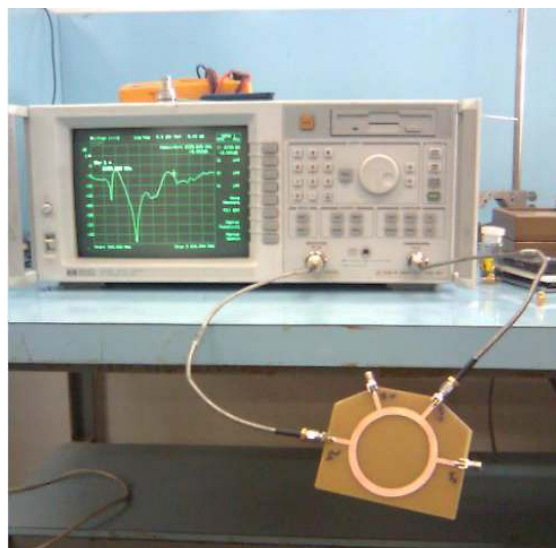


Figura 3 – Setup utilizado nas medições

3 RESULTADOS SIMULADOS E EXPERIMENTAIS

Para a análise do acoplador Rat-Race foram considerados os valores medidos e simulados do acoplamento (S_{21} e S_{31}) entre as portas (1 e 2) e (1 e 3) respectivamente. A defasagem em função do comprimento de onda entre as portas 1 e 2, e entre as portas 1 e 3 é observada e comparado aos 90° de defasagem esperado para um acoplador simétrico. Todos os resultados ilustrados nas figuras posteriores foram medidos num range de frequência que varia de 300 KHz – 3 GHz.

A Figura 4 ilustra uma comparação entre os resultados de simulação e medição para o parâmetro S_{21} . Observa-se uma boa concordância entre os resultados medidos e simulados, em que a frequência de operação medida para esse dispositivo aponta para uma frequência de aproximadamente 2,326 GHz. Por sua vez o resultado ilustrado na Figura 5 comprova um bom funcionamento desse dispositivo. O mesmo foi capaz de atrasar a fase do sinal em $82,7^\circ$, próximo aos 90° esperado como resultado. Resultando em um erro percentual de aproximadamente 8%, o qual se encontra dentro das especificações estabelecidas no projeto.

A Figura 6 ilustra uma comparação entre os resultados de medição e simulação para o S_{31} do mesmo dispositivo operando em 2,45 GHz. Observa-se nesse resultado uma concordância na primeira ressonância, próxima aos 800 MHz e uma discordância na segunda ressonância. Por sua vez a defasagem obtida para o parâmetro S_{31} nesse dispositivo, apresentou uma pequena discordância para a frequência de operação desejada (ver Figura 7). O circuito para esse parâmetro defasou 90° numa frequência de aproximadamente 2,20 GHz ao invés dos 2,36 GHz esperado, resultando em um erro percentual de aproximadamente 7%. O resultado da Figura 8 ilustra um comparativo em frequência entre os parâmetros S_{21} e S_{31} medidos para o circuito Rat-Race analisado. Estes resultados encontram-se resumidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados simulados e medidos na frequência de 2,45 GHz

Parâmetro S	F_{R1} simulado	F_{R1} medido	F_{R2} simulado	F_{R2} medido	Defasagem	Erro (%)
S_{21}	700 MHz	667 MHz	2,155 GHz	2,326 GHz	$82,7^\circ$	8
S_{31}	800 MHz	770 MHz	2,1 GHz	2,16 GHz	$96,5^\circ$	7

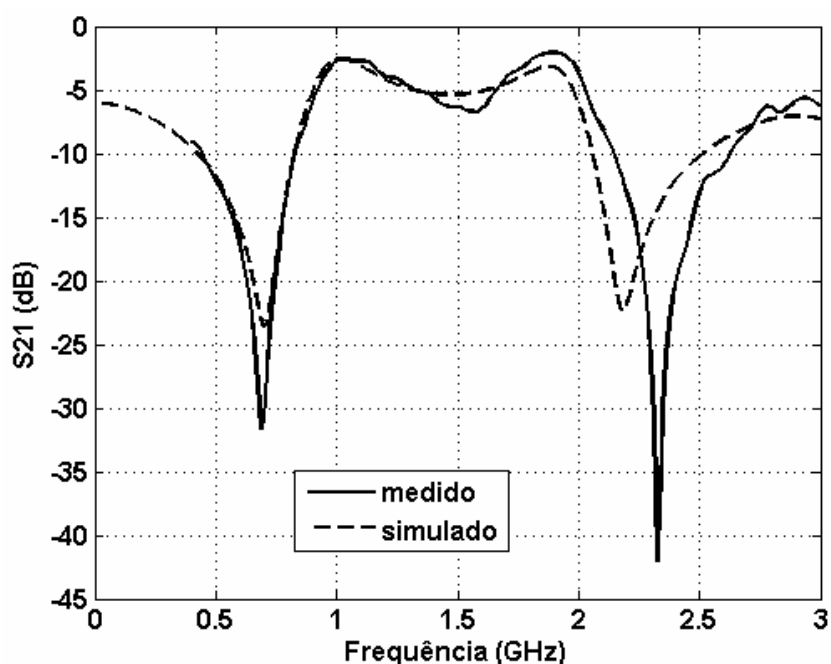


Figura 4 – Resultado comparativo entre simulação e medição para o acoplamento entre as portas 1 e 2 na frequência de 2,45 GHz

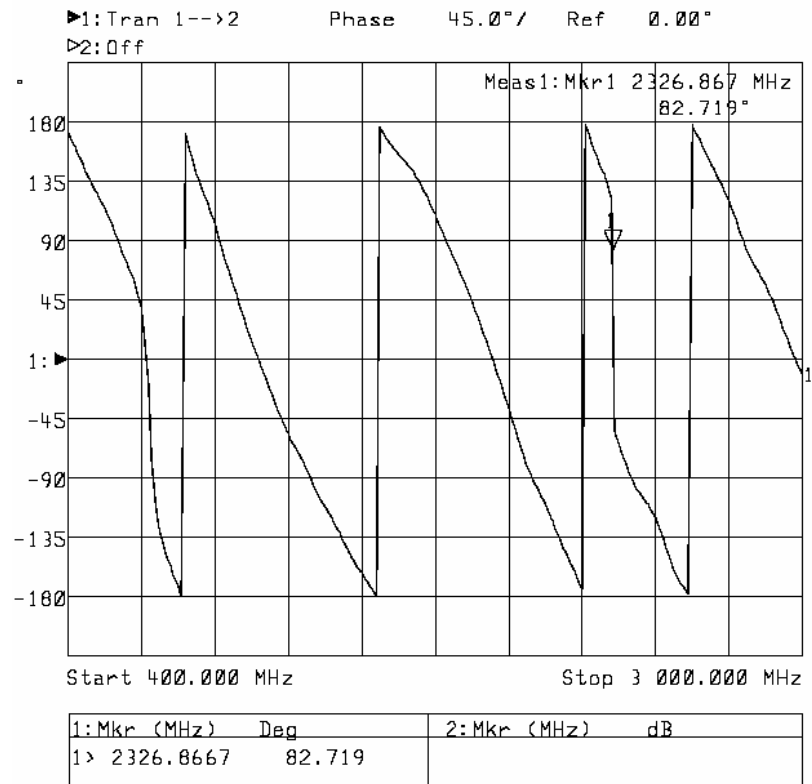


Figura 5 – Diferença de fase entre as portas 1 e 2 do anel híbrido na frequência de 2,45 GHz

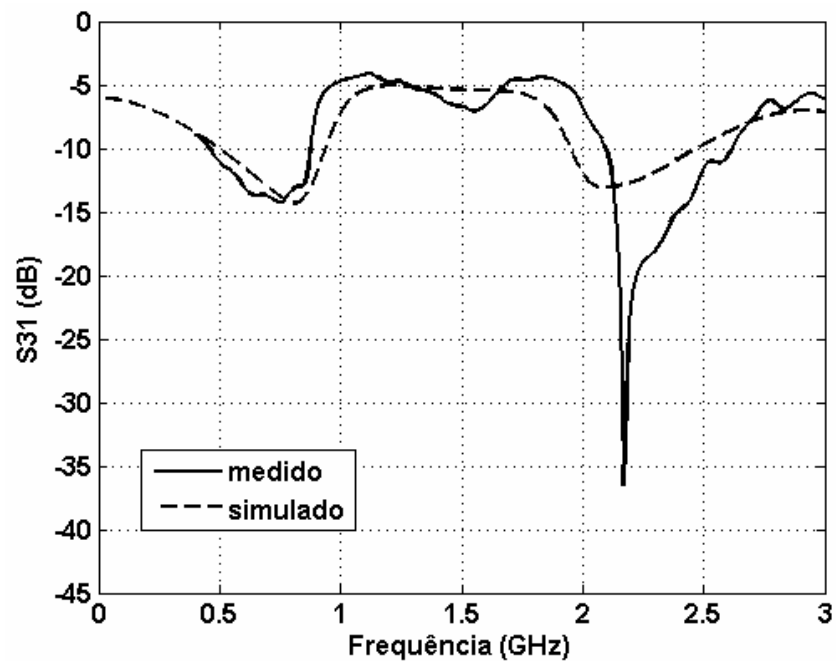


Figura 6 – Comparação entre simulação e medição na porta 1 e 3 na frequência de 2,45 GHz

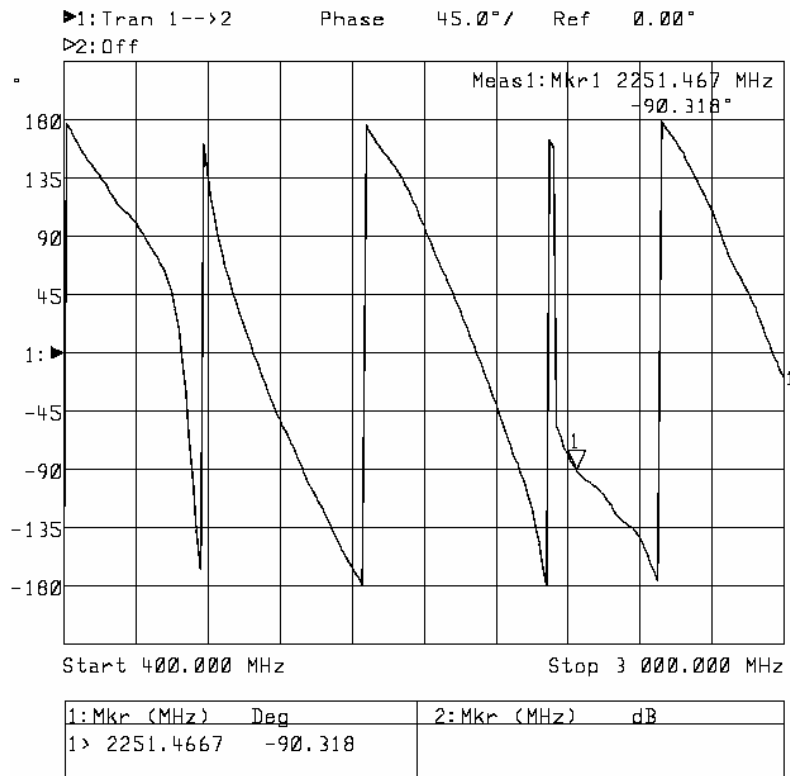


Figura 7 – Diferença de fase entre as portas 1 e 3 do anel híbrido na frequência de 2,45 GHz

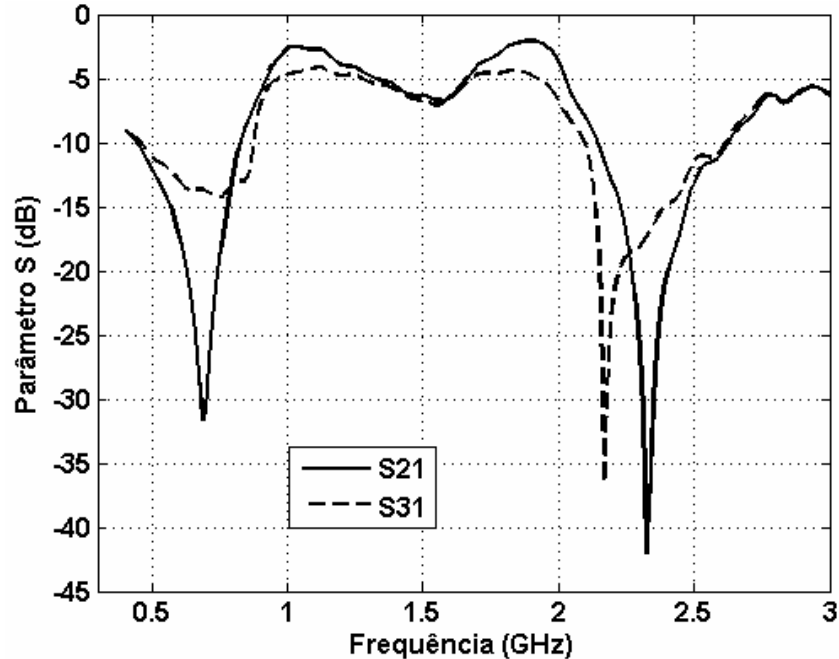


Figura 8 – Comparação entre os parâmetros S12 e S13 na frequência de 2,45 GHz

4 CONCLUSÃO

Neste artigo um acoplador híbrido Rat-Race com características *dual-band* foi projetado e construído em circuito de microfita na faixa de micro-ondas para a frequência de 2,45 GHz, em que seus parâmetros de espalhamento S21 e S31 foram caracterizados por meio de simulações

computacionais e medições, que foram realizadas no Laboratório de Telecomunicações do INCTCSF-UFRN. O dispositivo apresentou boas características de funcionamento e o estudo comparativo entre os resultados medidos e simulado apresentaram boa concordância. A diferença de fase entre as portas 1 e 2 e entre as 1 e 3 ficou próxima do valor ideal de 90° , o que era esperado para um acoplador simétrico. Pequenas discordâncias obtidas no projeto podem de certa forma ser atribuídas às limitações envolvidas no processo de fabricação do dispositivo ou a pequenos desvios nos parâmetros do material dielétrico utilizado como substrato do circuito.

REFERÊNCIAS

LIAO, S. S. **A Novel reduced size Rat-Race coupler using stepped impedance structure**. Microwave and Millimeter Wave Technology, 2004. ICMMT 4th International Conference on, Proceedings, 2004. 328 p.

HIROTA, T. and MINAKAW, A. **Reduced-size branch line and ratrace hybrids for uniplanar MMICs**, IEEE Trans. Microwave Theory Tech, VOL. 38, 1990. 270-275 p.

GIANNINI, F. and SCUCCHIA, L. **A double frequency 180° lumped element hybrid**, Microwave and Optical Tech. Lett., VOL. 33, 2002. 247-251 p.

GILLICK, M. ROBERTSON, I. D. and JOSHI, J. S. **Design and realization of reduced-size impedance transforming uniplanar MMIC branchline coupler**, Electronics Lett., Vol. 28, 1992. 1555-1157 p.

TSENG, C. H. **Compact LTCC Rat-Race Couplers Using Multilayered Phase-Delay and Phase-Advance T-Equivalent Sections**, IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol. 33, 2010. 543-551 p.

WU, C. Y. CHIOU, Y. C. KUO, J. T. **Dual-Band Rat-Race Coupler with Arbitrary Power Divisions Using Microwave C-Sections**, IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2009. 2108-2111 p.

BALANIS, C. A., **Antenna Theory-analysis and Design**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1997.