

Investigação na Espessura de Substrato em Híbridas em Quadratura de Baixo Custo Usando FR-4

Investigation into Substrate Thickness in Low-Cost Quadrature Hybrids Using FR-4

DOI:10.34117/bjdv7n6-141

Recebimento dos originais: 07/05/2021

Aceitação para publicação: 01/06/2021

João Paulo Sales Henriques Lima

Graduação

Instituição de atuação atual: Sidia Instituto de Ciência e Tecnologia

Endereço completo: Av. Darcy Vargas, 654, Parque Dez de Novembro, Manaus – AM, 69055-035

E-mail: joao.henrique@sidia.com

Daniel Discini Silveira

Doutorado

Instituição de atuação atual: Universidade Federal de Juiz de Fora

Endereço completo: Campus Universitário, Rua José Lourenço Kelmer, s/n, São Pedro, Juiz de Fora – MG, 36036-900

E-mail: danielsilveira@engenharia.ufjf.br

RESUMO

Este artigo aborda o desenvolvimento de híbridas em quadratura a partir de materiais e técnicas de fabricação de baixo custo, através dos softwares ADS e CST, para operação na faixa de TV digital UHF no Brasil (470MHz a 806MHz). A estrutura se baseia em microfita acopladas por sobreposição, além de adaptações nas extremidades para alcançar melhor casamento em 50Ω . São elaborados modelos com diferentes espessuras de substrato, compostos por camadas de FR-4 de 1,6mm. Os modelos simulados são então testados experimentalmente e evidenciam a possibilidade de se obter tal elemento de circuito através de materiais muito acessíveis.

Palavras-Chave: Acoplador Direcional, Baixo Custo, FR-4, Híbrida em Quadratura, Microfita, TV Digital.

ABSTRACT

Development of quadrature hybrid based on low-cost materials and fabrication techniques, using ADS and CST softwares, for operation in the UHF Digital TV frequency band in Brazil (470 MHz to 806MHz). The structure consists of superposition-coupled microstrips, plus extra end fitting to ensure better 50Ω matching. Models with different substrate thickness are designed, composed of 1.6mm FR-4 layers. The models are simulated, tested experimentally, and demonstrate the possibility of obtaining these system elements through low-cost materials.

Keywords: Directional Coupler, Low Cost, FR-4, Quadrature Hybrid, Microstrip, Digital TV.

1 INTRODUÇÃO

Nas redes de micro-ondas, os acopladores direcionais desempenham papel importante em diversos circuitos, tais como mixers, moduladores, amplificadores, entre outros. Um dos elementos de destaque é a híbrida em quadratura, responsável por dividir simetricamente o sinal de entrada, além de prover uma diferença de 90 graus entre as saídas. Dada a demanda cada vez maior por circuitos que respondam de forma satisfatória em banda larga nos sistemas modernos de comunicação, as híbridas de banda larga representam um ponto desafiador na pesquisa e desenvolvimento para circuitos em radiofrequência [1].

As híbridas mais simples são do modelo Branch-Line, o qual não possui, entretanto, bandas largas. Na tentativa de se obter uma banda de operação mais larga, se faz necessário o cascadeamento de mais ramos no seu projeto, o que não é prático para fabricação, pois logo nos primeiros ramos inseridos, a impedância das trilhas requisitadas atinge valores difíceis de obter (e.g. $> 120\Omega$), aumentando os custos da fabricação [2]. Outras estratégias mais elaboradas que merecem destaque são os acopladores Tandem e Lange, as estruturas em multicamadas, o crossover, entre outras [3]. Tais acopladores fazem uso de air-bridges, estruturas que não são adequadas ao emprego de altas potências para o contexto de micro-ondas [4]. Além disso, o uso de substratos especiais e técnicas de fabricação complexas encarecem a produção desses elementos [5]. Sendo assim, a investigação por híbridas em quadratura de baixo custo se dá como um tópico atraente para a pesquisa.

Recentemente no Brasil, a operação de televisão digital aberta expandiu significativamente. Tal comunicação acontece na banda de UHF, com espectro delimitado entre 470MHz a 806MHz. Dessa forma, o desenvolvimento de elementos de circuito e técnicas para operação nessa banda se torna mais relevante.

Com isso, esse trabalho tem como objetivo propor a elaboração de uma híbrida em quadratura, que opere na região da TV digital aberta, e que seja feita a partir de materiais e técnicas de fabricação de baixo custo. Foram produzidos três protótipos para a comparação, com simulações e medidas.

A seção II trará uma abordagem de temas importantes na teoria dos circuitos de micro-ondas, como a análise em modos par e ímpar, suas impedâncias e outras grandezas de interesse. Em seguida, a seção III apresentará o processo das simulações dos modelos elaborados, as medidas realizadas em laboratório e, por fim, as conclusões.

2 ANÁLISE TEÓRICA

A boa compreensão do funcionamento das híbridas requer o entendimento das estruturas utilizadas para a elaboração do projeto, juntamente com seu comportamento eletromagnético. Nesse trabalho, foram desenvolvidos projetos baseados em microfitas acopladas por sobreposição, em substrato de baixo custo (FR-4 com $\epsilon_r = 4.3$). Vale destacar que tais microfitas podem ter dimensões que dificultam o seu casamento em 50Ω , adequado para integração com os demais circuitos de micro-ondas. Com isso, suas extremidades são adaptadas para permitir um casamento mais próximo do ideal. Tem-se, assim, que o projeto se baseia em estruturas de baixo custo e de simples fabricação, como inicialmente desejado.

O substrato, por sua vez, tem papel fundamental para o projeto. De acordo com suas características, serão investigadas as dimensões das trilhas, o acoplamento, o casamento, entre outras grandezas relevantes. As dificuldades inerentes do projeto de uma híbrida em quadratura apenas aumentam com o fato de se utilizar um substrato de baixo custo, com $\epsilon_r = 4.3$ e alta tangente de perdas, como o FR-4. A espessura do substrato é, assim, um dos fatores cruciais do projeto. Portanto, serão avaliados projetos com 3 diferentes espessuras de substrato, para efeitos de comparação.

As características eletromagnéticas podem ser bem avaliadas através do estudo nos modos par e ímpar, técnica que consiste na análise do circuito em questão a partir da inserção de sinais iguais em módulo em suas entradas, e obtenção de simplificações devido às simetrias presentes na rede. No modo par, os sinais inseridos estão em fase, ao passo que no modo ímpar, eles estão em oposição de fase [6]. De cada modo, resulta uma impedância característica, como visto em (1) e (2). Estas equações que se baseiam na impedância característica do circuito e no acoplamento 'c' em unidades lineares. Como normalmente se expressa o acoplamento em dB, é útil a utilização de (3). Finalmente, é possível avaliar a impedância do circuito baseado nas impedâncias de cada modo, como visto em (4).

$$Z_{0, \text{par}} = Z_0 \sqrt{\frac{1+c}{1-c}} \quad (1)$$

$$Z_{0, \text{ímpar}} = Z_0 \sqrt{\frac{1-c}{1+c}} \quad (2)$$

$$C = 10^{\frac{-c}{20}} \quad (3)$$

$$Z_0 = \sqrt{Z_{0, \text{par}} \cdot Z_{0, \text{ímpar}}} \quad (4)$$

Algumas outras grandezas são importantes no processo de confecção de acopladores direcionais, como o fator de acoplamento, o fator de isolamento, a perda de inserção e a diretividade, descritos respectivamente nas equações (5) a (8), as quais descrevem os acopladores. Dada a representação conhecida para os acopladores em Fig 1, tem-se que a porta 1 representa a entrada. As portas 2 e 3 são ditas direta e acoplada, constituindo as saídas. No caso das híbridas em quadratura, cada uma delas deve receber, idealmente, metade da potência inserida na porta 1. Além disso, esses sinais devem ter uma diferença de fase em 90 graus. A porta 4, finalmente, é chamada isolada pois, sobre ela, não deve incidir nenhuma potência, caso as portas 2 e 3 estejam perfeitamente casadas [7]. No caso, ela será terminada em um resistor de 50Ω para garantir ótimo casamento com a rede.

$$C(dB) = -10 \log_{10}(P_3/P_1) \quad (5)$$

$$I(dB) = -10 \log_{10}(P_4/P_1) \quad (6)$$

$$L_{inserção} = -10 \log_{10}(P_2/P_1) \quad (7)$$

$$D(dB) = -10 \log_{10}(P_3/P_4) \quad (8)$$

Na Fig 2 é exposto o comportamento das linhas de campo para os campos elétrico e magnético em cada um dos modos, ilustrando o acoplamento que ocorre entre as microfitas sobrepostas. Percebe-se que uma forte interação ocorre entre as trilhas no modo par para o campo magnético, e no modo ímpar para o campo elétrico, colaborando para maior acoplamento.

Fig. 1. Representação de um acoplador direcional

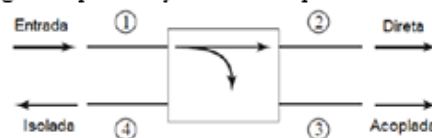
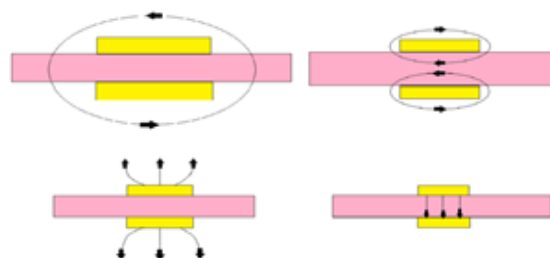


Fig. 2. Linhas dos campos magnético (superior) e elétrico (inferior), nos modos par (esquerda) e ímpar (direita)



3 DESENVOLVIMENTO

Foi confeccionado inicialmente um modelo da estrutura proposta, com microfitas sobrepostas num substrato de $\epsilon_r = 4.3$, com as devidas adaptações nas extremidades para garantir o casamento, utilizando-se o software Keysight Advanced Design Systems (ADS). Procurou-se, assim, otimizar os parâmetros disponíveis para se obter o melhor acoplamento possível (representados pelos parâmetros de espalhamento S_{21} e S_{31}) sem divergir do casamento em 50Ω e mantendo bom nível de isolamento ao longo da banda (evidenciados por S_{11} , S_{22} e S_{33}).

Visto que o objetivo do trabalho consiste em empregar substrato de baixo custo, foram investigados três modelos de híbrida, diferindo no número de camadas sobrepostas de $h = 1,6\text{mm}$ de FR-4. O primeiro modelo tinha uma folha de $1,6\text{mm}$ de espessura, enquanto os outros modelos tinham duas e três camadas, portanto, $h = 3,2\text{mm}$ e $h = 4,8\text{mm}$, respectivamente. Foi verificado no modelo ADS que, ao aumentar a espessura do substrato, seria possível atingir melhor acoplamento, por isso a investigação com substratos mais espessos. Sendo assim, foi feita uma comparação através de simulações em um software de simulação eletromagnética 3D, o Computer Simulation Technology (CST) dos modelos 3D elaborados com os diferentes substratos, em conjunto com as medidas dos protótipos produzidos.

Primeiramente, o protótipo de $h = 1,6\text{mm}$ será analisado. O desempenho obtido com simulações não foi capaz de atingir valores considerados bons para a aplicação da híbrida, pois o acoplamento diverge do valor desejado de -3dB , além dos parâmetros S_{11} , S_{22} e S_{33} não apresentarem níveis aceitáveis ao longo da banda desejada (e.g. $< -15\text{dB}$), como podemos ver em Fig 3, Fig 4 e Fig 5. A diferença de fase entre sinais de saída se mostra razoável. No entanto, pode-se destacar positivamente o fato de as curvas apresentarem certa coerência com o modelo idealizado no pacote Linecalc, e posteriormente simulado no ADS, indicando uma possibilidade de sucesso ao se utilizar maior espessura do substrato. O desempenho do protótipo produzido, mostrado em Fig 6 Fig 7 e Fig 8, apresenta boa correspondência com o comportamento obtido através de simulação em CST. O isolamento exibido é mais satisfatório, pois no protótipo conseguiu-se melhor casamento em 50Ω .

A simulação com $h = 4,8\text{mm}$ foi capaz de apresentar melhores resultados teóricos, como visto em Fig 9, Fig 10 e Fig 11. O acoplamento se torna mais estreito e próximo do alvo -3dB , o que indica uma divisão mais simétrica da potência de entrada entre as portas de saída. Além disso, bons níveis de isolamento foram obtidos, visto que os parâmetros

S11, S22 e S33 são mantidos em patamares considerados bons ao longo de toda a banda. Somente S22 escapa de forma sutil para valores acima de -15dB nas frequências superiores da banda, o que não foi considerado tão grave. A diferença de fase dos sinais de saída se mostra em nível aceitável, próximo dos 90° desejados. É possível afirmar, dadas as medidas realizadas com o protótipo em Fig 12, Fig 13 e Fig 14, que o acoplamento em 3dB melhorou de forma significativa, o que é evidenciado pelo cruzamento estreito das linhas de S21 e S31, principalmente na faixa de 470MHz a 710MHz, destacada pelos marcadores 1 e 2. Na banda superior, ocorre uma degradação no desempenho, como mostrado no comportamento simulado, o que é passível de melhorias. Podemos atribuir tal queda ao aumento das perdas no substrato com frequências mais elevadas. O isolamento também teve comportamento próximo ao simulado, porém com um pouco mais de perdas, o que não compromete a qualidade das comparações entre simulações e práticas. A diferença de fase entre as portas de saída se mostrou coerente, chegando próximo de 90° ao longo da banda.

Fig. 3. Acoplamento obtido para modelo 3D com h = 1.6mm

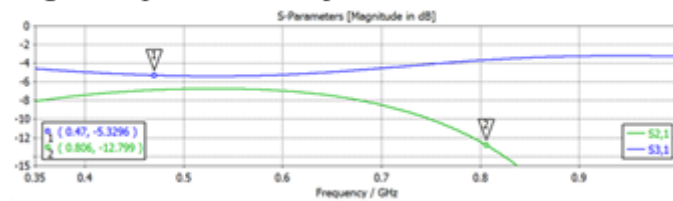


Fig. 4. Isolamento das portas obtido para modelo 3D com h = 1.6mm

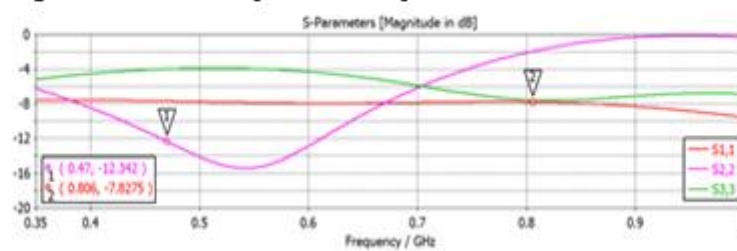


Fig. 5. Diferença de fase entre sinais de saída para modelo 3D com h = 1.6mm

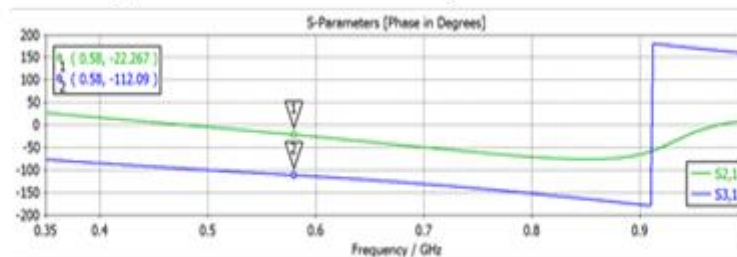


Fig. 6. Medida do acoplamento obtido com protótipo de $h = 1.6\text{mm}$

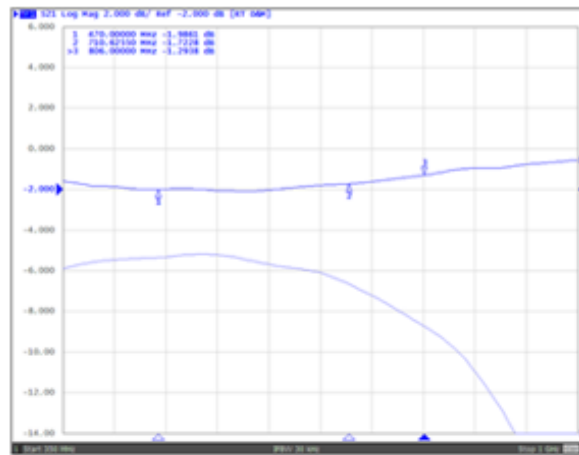


Fig. 7. Medidas para isolamento das portas 1, 2 e 3, respectivamente, para protótipo de $h = 1.6\text{mm}$

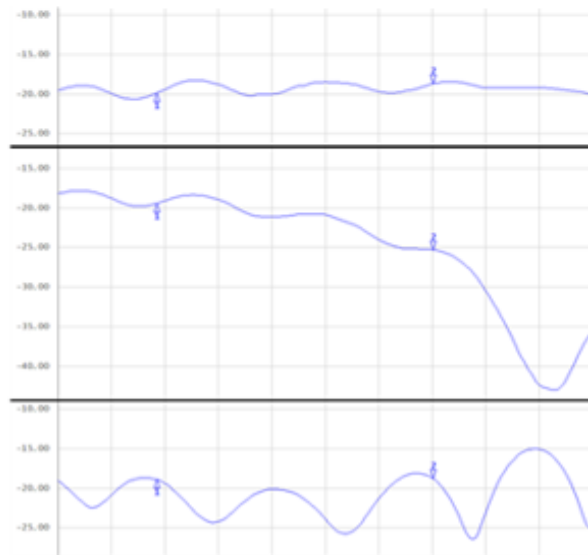


Fig. 8. Medida da diferença de fases entre saídas em protótipo de $h = 1.6\text{mm}$



Fig. 9. Acoplamento obtido com modelo 3D para $h = 4.8\text{mm}$

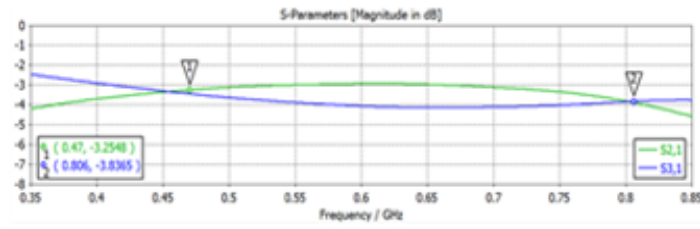


Fig. 10. Isolamento das portas obtido para modelo 3D com $h = 4.8\text{mm}$

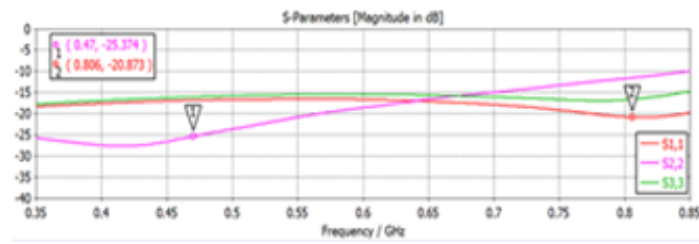


Fig. 11. Diferença de fase entre sinais de saída para modelo 3D de $h = 4.8\text{mm}$

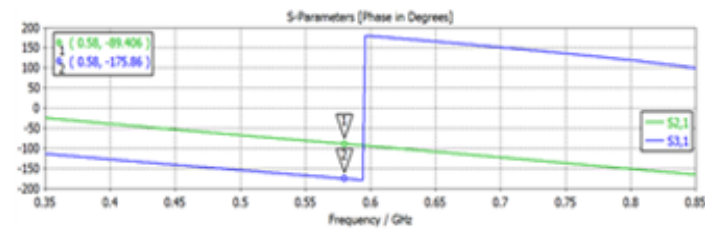


Fig. 12. Medida do acoplamento obtido com protótipo de $h = 4.8\text{mm}$

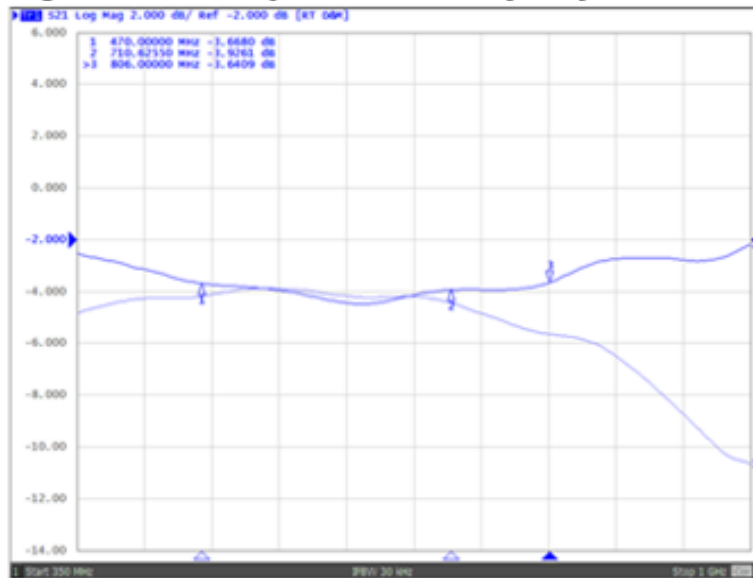


Fig. 13. Medida de isolamento das portas 1, 2 e 3, respectivamente para protótipo de $h = 4.8\text{mm}$

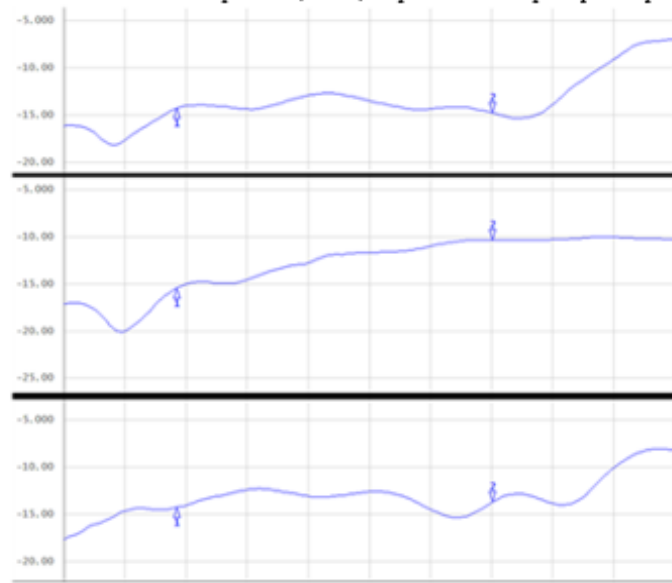


Fig. 14. Medida da diferença de fases entre saídas em protótipo de $h = 4.8\text{mm}$



Na tentativa de se atingir as melhorias, o protótipo intermediário, com $h = 3,2\text{mm}$, foi desenvolvido. As simulações indicam que o acoplamento se torna mais estreito ainda, considerado algo positivo, dado em Fig 15. Ao mesmo tempo, os isolamentos nas portas se mostram abaixo de -15dB praticamente ao longo de toda banda, sendo que o leve escape se dá nas altas frequências novamente, porém de forma mais atenuada, em torno de $-14,5\text{dB}$, no pior caso, visto em Fig 16. A diferença de fases também apresenta bons resultados, como exposto em Fig 17. As medidas realizadas são exibidas em Fig 18, Fig 19 e Fig 20. Tem-se que o acoplamento se mostrou muito coerente com o simulado, mais definido e com menos perdas nas altas frequências. Vale destacar que em um trecho central da banda o parâmetro S_{21} tem valores precisos em -3dB , como mostra o marcador

3. O isolamento em todas as portas também teve uma leve melhoria, principalmente na parte superior da banda. A diferença de fase se mostrou, mais uma vez, em valores aceitáveis. A Fig 21 apresenta os protótipos produzidos, a partir da qual pode-se ter uma ideia das dimensões práticas dos modelos confeccionados. As medidas em laboratório foram feitas através de um analisador de espectro Agilent CXA N9000A.

Fig. 15. Acoplamento obtido com modelo 3D para $h = 3.2\text{mm}$

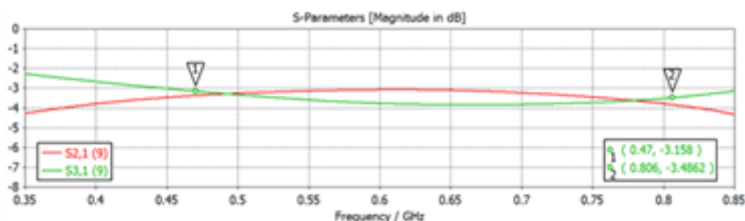


Fig. 16. Isolamento das portas obtido para modelo 3D com $h = 3.2\text{mm}$

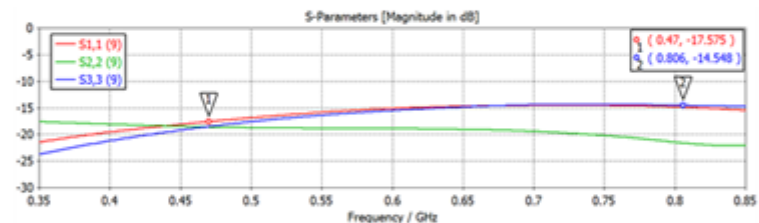


Fig. 17. Diferença de fase entre sinais de saída para modelo 3D de $h = 3.2\text{mm}$

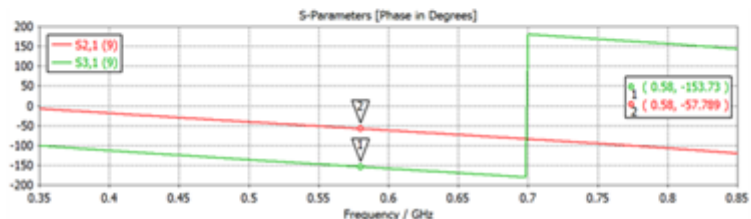


Fig. 18. Medida do acoplamento obtido com protótipo de $h = 3.2\text{mm}$

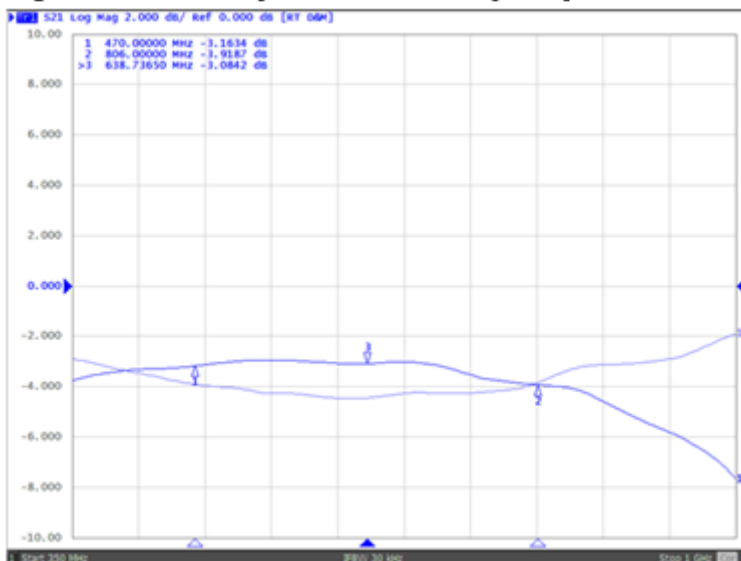


Fig. 19. Medida de isolamento das portas 1, 2 e 3, respectivamente para protótipo de $h = 3.2\text{mm}$

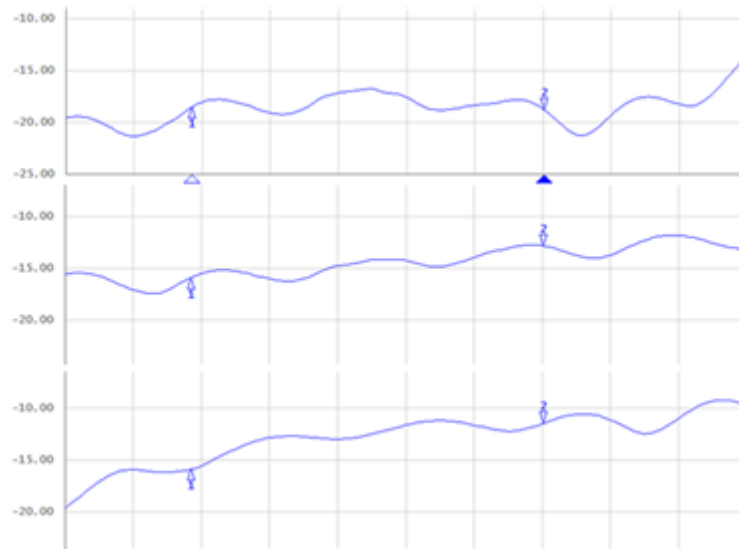


Fig. 20. Medida da diferença de fases entre saídas em protótipo de $h = 3.2\text{mm}$

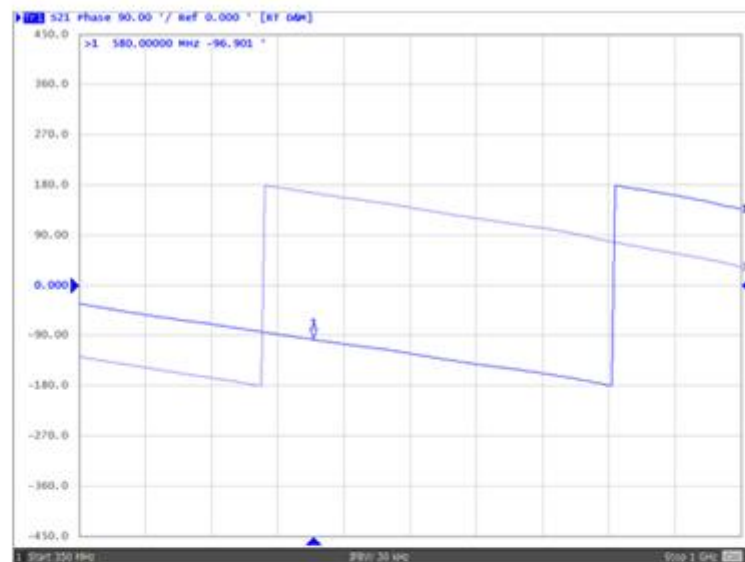
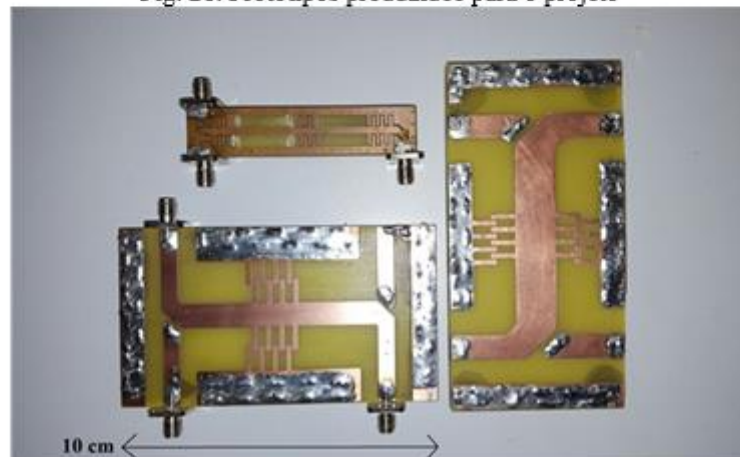


Fig. 21. Protótipos produzidos para o projeto



4 CONCLUSÕES

Este trabalho propõe o desenvolvimento de híbridas em quadratura a partir de técnicas e substratos de baixo custo (camadas de 1,6mm de FR-4, com $\epsilon_r = 4.3$) para operação na faixa da TV digital aberta do Brasil (470MHz a 806MHz). O projeto se baseia em microfitas acopladas por sobreposição, tendo suas extremidades adaptadas para alcançar melhor casamento em 50Ω . Além disso, capacitores interdigitais colaboram com o estreitamento do acoplamento. Diferentes espessuras de substrato foram testadas, dada a importância dessa grandeza para o projeto das estruturas. Os modelos possuíam uma, duas ou três camadas de FR-4 e foram feitas comparações em simulações 3D em CST, além de medidas em laboratórios dos protótipos produzidos. Foi evidenciada a possibilidade de se obter bom acoplamento (próximo a -3dB) com essa estrutura simples e barata, sendo que o melhor resultado foi obtido com duas camadas do substrato. O isolamento mostrou-se ainda um desafio, pois não se conseguiu manter em todas as portas níveis aceitáveis ao longo de toda a banda (e.g. $< -15\text{dB}$). A diferença de fase entre os sinais de saída apresentou padrões adequados, próximo aos 90 graus desejados. As dificuldades encontradas podem ser creditadas às grandes perdas, principalmente nas altas frequências, inerentes do material de baixo custo que possui tangente de perdas elevada. Mesmo assim, tem-se validada a possibilidade de se obter tal elemento de circuito com desempenho satisfatório a partir de técnicas de fabricação e substratos muito acessíveis.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado por Samsung Eletrônica da Amazônia Ltda., de acordo com a Lei da Informática nº 8.387/91. Os autores agradecem também o apoio da UFJF.

REFERÊNCIAS

- 1 B. M. Alqahtani, A. F. Sheta, M. A. Alkanhal, “New compact wide-band branch-line couplers,” in *Microwave Conf., 2009. EuMC 2009. European*. IEEE, 2009, pp. 1159-1162.
- 2 M. Muraguchi, T. Yukitake, Y. Naito, “Optimum design of 3-dB branch-line couplers using microstrip lines”, *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 31, n.8, pp. 674-678, 1983.
- 3 R. K. Mongia, I. J. Bahl, P. Bhartia, J. Hong, K. C. Gupta, *RF and Microwave Coupled-Line Circuits*, 2nd ed. Boston: Artech House, 2007.
- 4 S. M. H. Javadzadeh, S. M. S. Majedi, F. Farzaneh, “An ultra-wideband 3-dB quadrature hybrid with multisection broadside stripline tandem structure”, in *Mobile Multimedia Communications, MobiMedia 2010*. J. Rodriguez, R. Tafazolli, C. Verikoukis, Eds. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010, pp. 672-681.
- 5 N. A. Sutton, J. M. Oliver, D. S. Filipovic, “Wideband 18-40 GHz surface micromachined branchline quadrature hybrid”, *IEEE Microwave and Wireless Comp. Letters*, vol. 22, n. 9, pp. 462-464, 2012.
- 6 D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed. USA: John Wiley & Sons, 2011.
- 7 E. Tutkur, “Wideband Directional Couplers and Power Splitters”, unpublished Master of Science Thesis, Chalmers University of Technology. Gothenburg, 2014.