

3 Subsistemas de Ondas Guiadas

Neste capítulo as aplicações utilizando substratos de altas perdas do tipo FR- 4 e substratos de altíssima constante dielétrica $\epsilon_r = 80$ são apresentadas, com o objetivo de se desenvolver componentes e subsistemas analógicos e digitais de ondas guiadas nas bandas de 5 GHz a 20 GHz. Destacam-se os modelos desenvolvidos e os resultados experimentais dos protótipos realizados com as estruturas de transição e conectores SMA.

Um filtro de guia de onda SIWG centrado na frequência de 10 GHz com banda passante de 1 GHz no FR-4 é realizado e avaliado, apresentando um novo modelo simplificado para o dimensionamento deste tipo de filtro. Os resultados experimentais do protótipo são comparados com os resultados simulados.

3.1 FR-4 SIWG

Utilizando um substrato dielétrico FR-4 de constante dielétrica de $\epsilon_r=4,3$, perdas dielétricas $\tan\delta=0.019$, altura $h=1.575$ mm com espessura de metalização de cobre de $t=0.035$ mm, um guia SIWG foi calculado para a frequência de corte $TE_{10} = 5.3$ GHz. A

Tabela 1 apresenta as dimensões calculadas para este guia seguindo as equações da sessão anterior. O guia SIWG foi simulado simulador EM 3D e o equivalente RWG foi simulado no ADS (circuito de guia ideal) para a comparação. A Figura 10 apresenta em (a) o modelo tridimensional do guia SIWG para a simulação eletromagnética no CST [18] e em (b) o respectivo modelo RWG no ADS [16] para a simulação de parâmetros S.

SIWG - FR4 ($\epsilon_r=4.3$) $\tan\delta = 0.019$	
Protótipo de 15 a 60 GHz	
λ_{TE10} / frequência TE_{10}	27,6 mm / 5.238 GHz
λ_{TE20} / frequência TE_{20}	13.79 mm / 10.48GHz
λ_{TE01} / frequência TE_{01}	3.15 mm / 45.89GHz

Altura / espessura do dielétrico ($H = b$)	1.575 mm
razão a/b	8.761904762
distância (a) na direção x centro a centro das vias que formam a parede do guia	$a_{RWG} = 13.8$ mm $a_{SIWG} = 13.8$ mm
distância (p) na direção Z centro a centro das vias que formam a parede do guia	4.6 mm
Diametro das vias que formam a parede do guia (d)	1.7 mm
d/p	0.37 mm
d/a	0.12 mm
raio das vias que formam a parede do guia (r)	0.85 mm
espaço (tangente) entre as vias da parede do guia	2,9 mm
quantidade de vias da parede na direção Z	10
Comprimento total do guia SIWG / qnte de vias em 1 linha paralela (1 parede)	42.72 mm
Retardo do guia calculado	0,63 ns
comprimento do trexo de linha microstrip + transição	$2 * (20$ mm)
l_{trm} = comprimento em Z do taper de melhor S_{21} em 10 GHz	9.1 mm
base triang = comprimento em x que forma a base do taper (transição guia)	12.1 mm
w (largura) linha microstrip	3.15 mm
T (espessura) metalização microstrip	0.035 mm

Tabela 1 - Dimensões do guia FR4-SIWG.

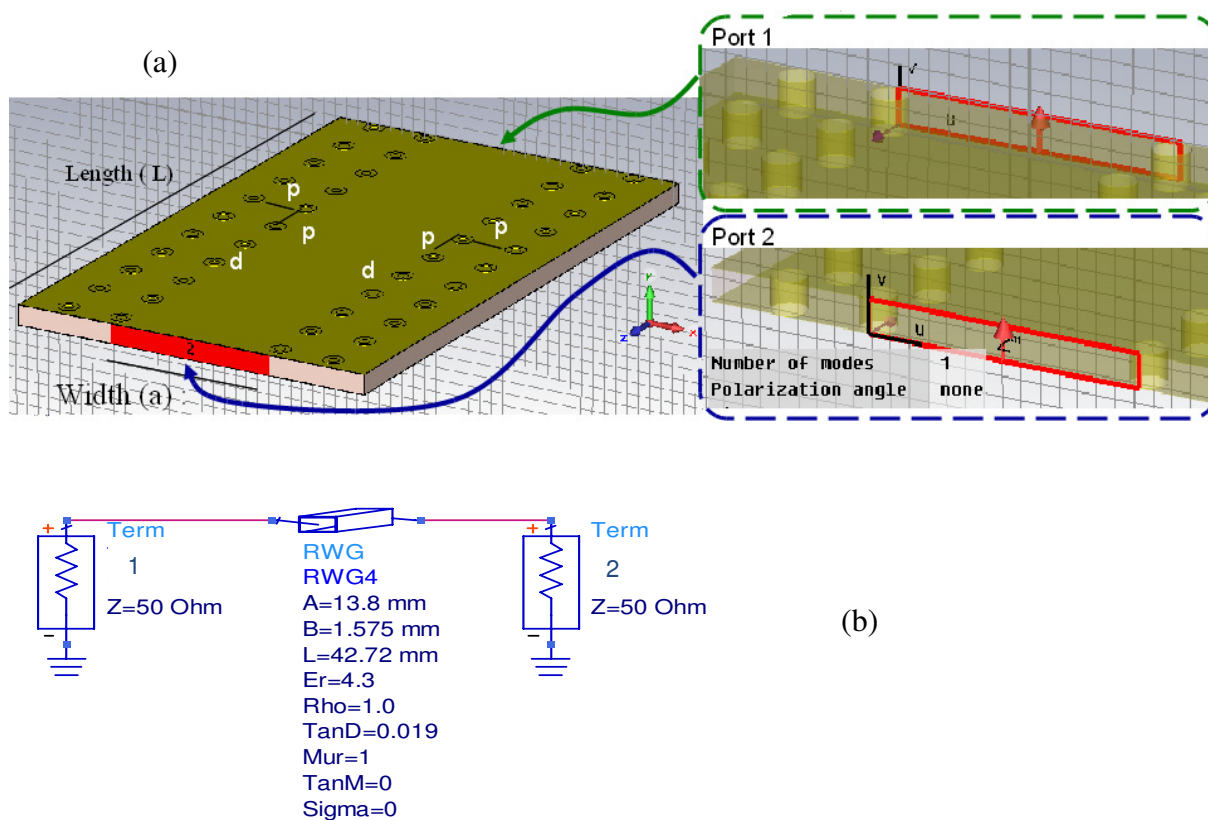


Figura 10 - Modelo do guia em FR4 ; (a) Modelo eletromagnético 3D ; (b) Modelo RWG.

A Figura 11 apresenta os resultados da perda de transmissão (S_{21}) e perda de reflexão (S_{11}) para o modelo RWG e para o modelo SIWG simulados. Em ambos os casos a perda de inserção na frequência de 10 GHz é aproximadamente 2 dB.

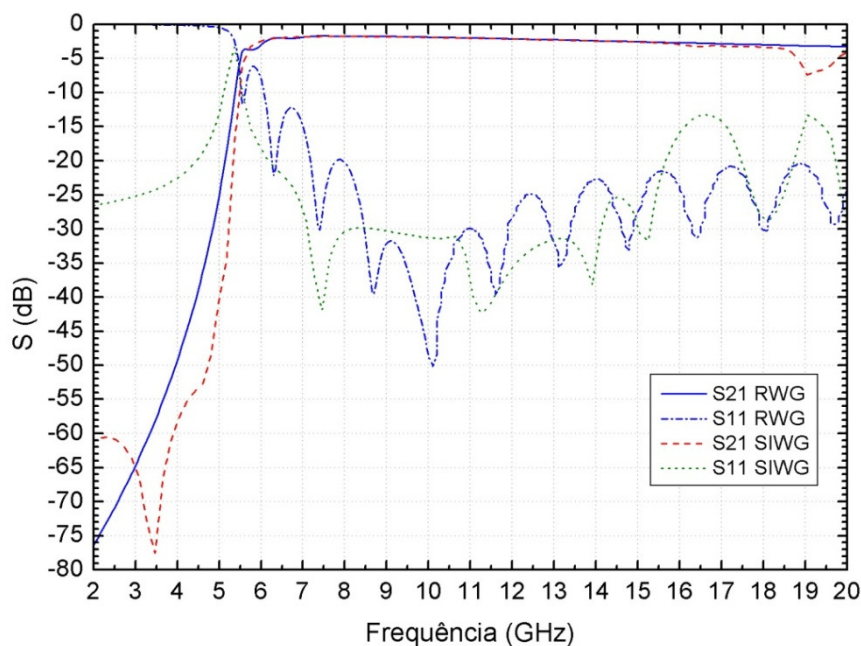


Figura 11 - Resultados da simulação eletromagnética (a) SIWG 3D; (b) Modelo equivalente RWG

Neste resultado é possível observar que a frequência de corte do modo $TE_{10} = 5,3$ GHz aproximadamente para as dimensões $a_{SIWG}=a_{RWG}$, uma vez que apesar das perdas do FR-4, a constante dielétrica é baixa, em torno de 4,3.

De forma a possibilitar a integração com circuitos planares e a caracterização experimental, a linha microstrip no FR-4 com perdas foi dimensionada pelas equações de Ke Wu [14] e otimizada no simulador Eletromagnético para o modo $TE_{10}=5,3$ GHz e também para a propagação do modo em 10 GHz para o acoplamento com o guia SIWG.

Alguns autores propõem que a parede do guia tenha uma ou duas fileiras de furos [6,9]. Este trabalho realiza a comparação de desempenho dos dois casos no substrato FR-4. A Figura 12 (a) ilustra o modelo 3-D no simulador Eletromagnético, sendo a parede de furos composta por apenas uma fileira de cada lado. A Figura 12 (b) apresenta o modelo 3-D com a parede de furos composta por duas fileiras de furos em cada parede. A comparação entre a simulação eletromagnética dos 2 casos foi realizada no HFSS [19] e apresentada na Figura

13. Estes resultados não apresentaram diferenças significativas de S_{21} e S_{11} pois para os dois casos as perdas de inserção em 10 GHz são de aproximadamente 4dB. É possível observar também que cada estrutura de transição entre os conectores e o guia adicionou apenas 1dB de perda cada uma, se comparado com o guia simulado sem transições.

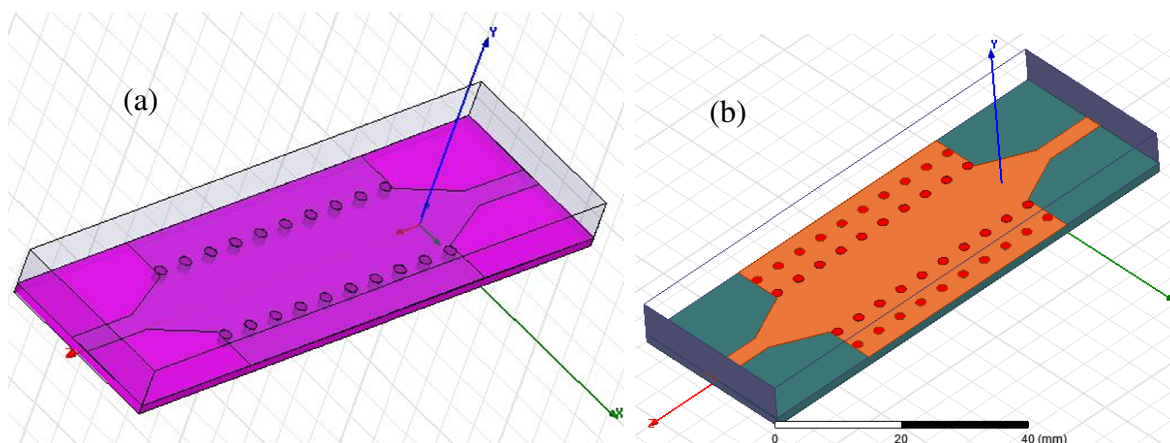


Figura 12 - Modelo 3D do guia FR-4 SIWG com transição microstrip; (a) parede com uma fileira de furos; (b) parede com duas fileiras de furos no HFSS [19];

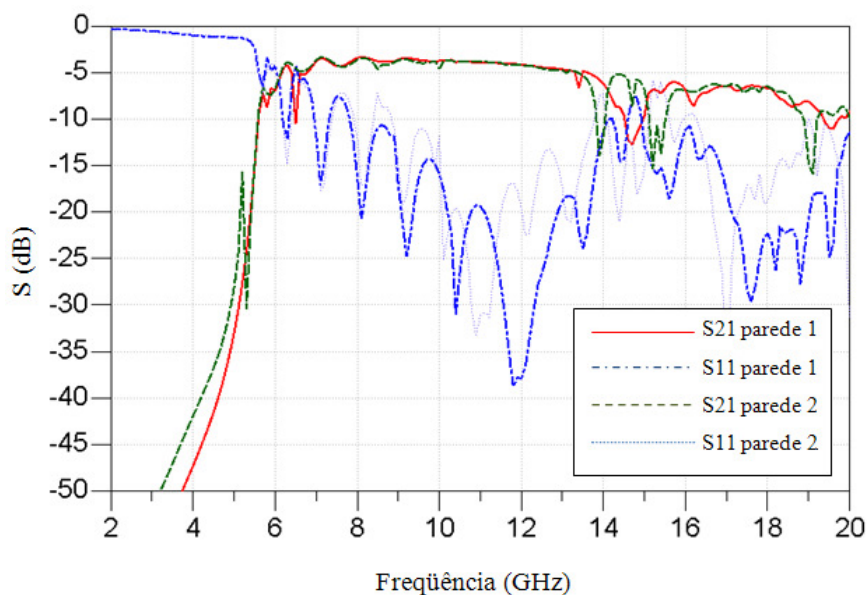


Figura 13 - Resultado de simulação eletromagnética do modelo 3D do FR-4 SIWG com transição microstrip comparação da parede do guia.

Um protótipo é fabricado escolhendo a parede de furos com 2 fileiras. A Figura 14 mostra o guia fabricado em FR-4 utilizando uma prototipadora LPKFTM de placa de circuitos impressos do CETUC. Dois conectores coaxiais SMA (3.5mm) são utilizados para a caracterização experimental no analisador de redes vetorial (HP 8720 C). A comparação entre os resultados experimental e simulado para a perda de inserção e reflexão do guia SIWG é apresentado no gráfico da Figura 15. Em ambos os casos S_{21} na frequência de 10 GHz são de aproximadamente de 4 dB. A diferença observada entre os resultados de simulação e de medição se deve ao fato de que a simulação não considera os conectores SMA.



Figura 14 - Protótipo SIWG com transição microstrip.

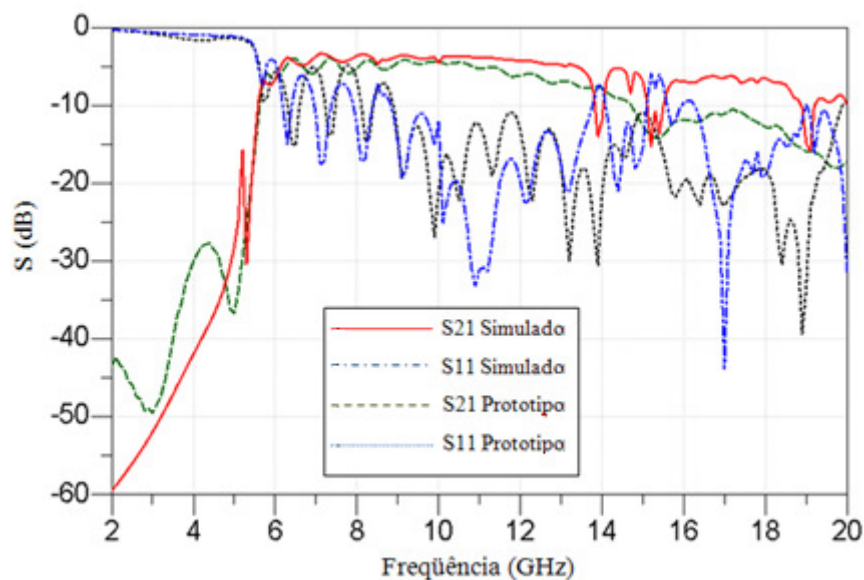


Figura 15 - resultado simulação SWG comparado com resultado experimental.

O comportamento de fase e retardo também são características importantes para a utilização destas estruturas em sistemas digitais. A Figura 16 apresenta o resultado da simulação da fase comparada com o resultado experimental medido no analisador de redes vetorial, com comportamento linear em ambos os casos. A Figura 17 apresenta o retardo de grupo constante na banda de passagem do guia de aproximadamente 0,78 ns para o protótipo SIWG realizado no FR-4.

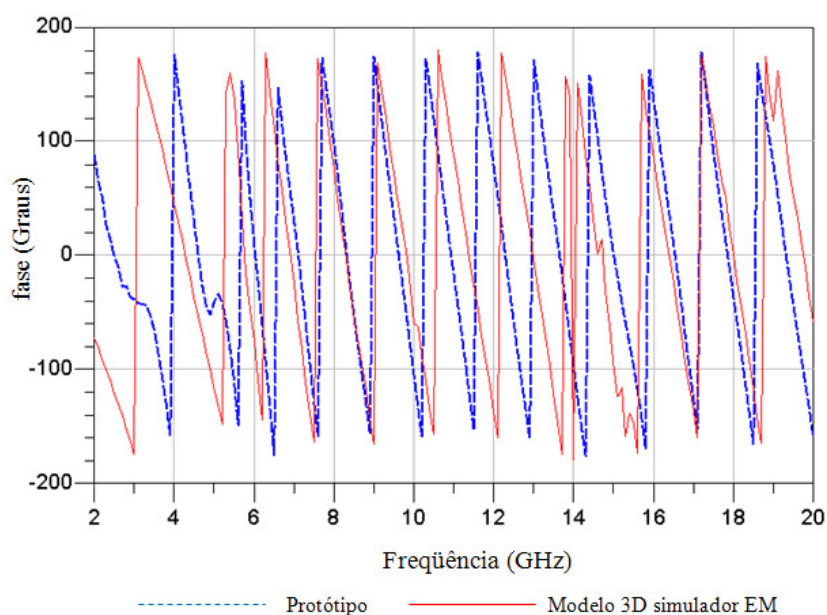


Figura 16 - Comportamento de Fase do FR4 - SIWG , comparação de simulação EM e medição experimental.

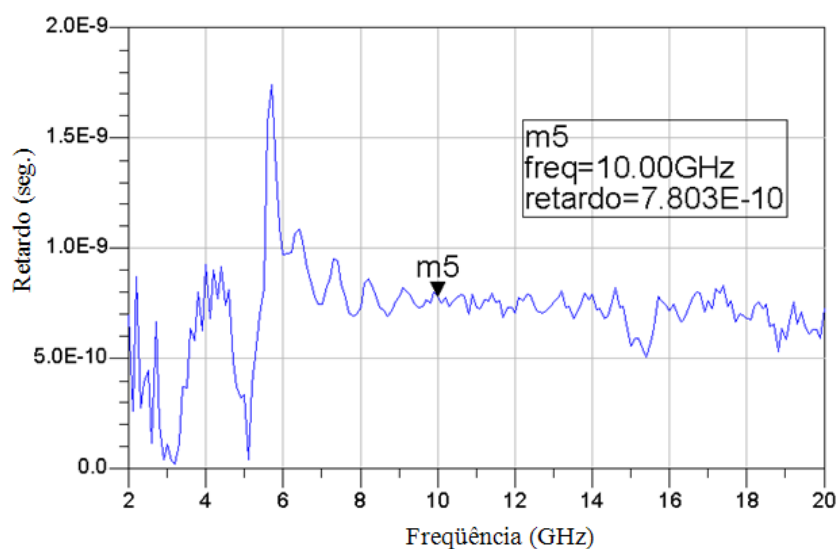


Figura 17 –Retardo de grupo do protótipo FR4-SIWG, resultado medido.

Os resultados obtidos até o presente momento comprovam portanto que o FR-4 pode ser utilizado para a fabricação de componentes e dispositivos de micro-ondas por meio de ondas guiadas SIWG na faixa de operação de 2 GHz a 20 GHz com baixo custo e uma boa eficiência.

3.2 FR-4 PCB em 10Gb/s

Um setup experimental é implementado para testar uma transmissão de 2.5Gb/s no protótipo do FR-4 SIWG, usando modulação ASK em bancada na frequência de 10 GHz. Para tal, um gerador de pulso (HP 8133) é utilizado para gerar uma sequência PRBS de 2.5Gbits/seg. Dois mixers balanceados são utilizados como elementos de "*up and down converter*" respectivamente de forma que o sinal esteja centrado na portadora de 10 GHz que é a frequência central do guia. A portadora é gerada por um oscilador local e dividida para os 2 mixers de forma a manter o sincronismo. A Figura 18 apresenta a bancada para o teste em questão.

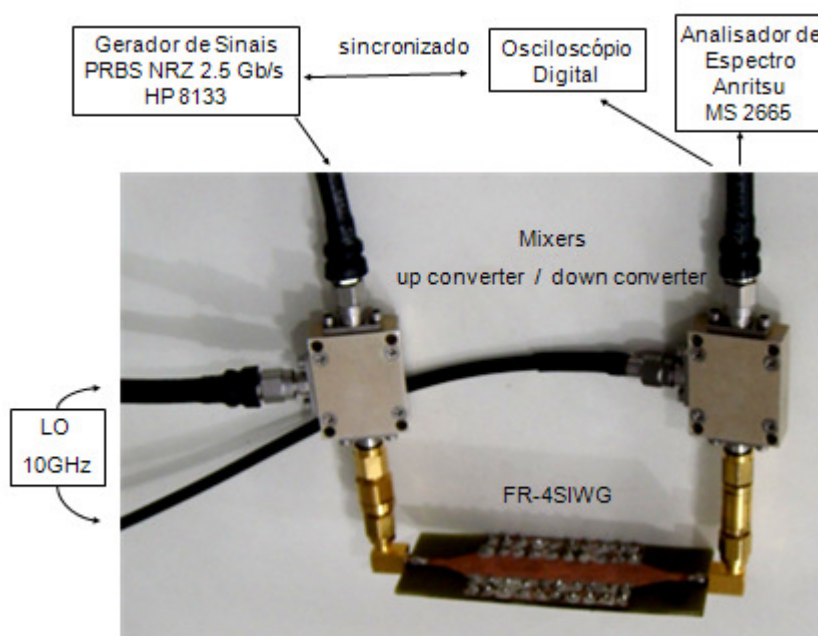


Figura 18 - Setup experimental para teste da transmissão digital PRBS 2.5Gbits/s no guia FR-4 SIWG na portadora de 10 GHz

Um analisador de espectro (Anritsu MS 2665) é usado para medir o espectro do sinal na entrada e na saída do guia e desta forma avaliar o sinal transmitido no FR-4 SIWG, este resultado é apresentado na Figura 19. É possível observar que a perda de inserção de 4 dB do guia é percebida, entretanto não há mudanças significativas na banda do sinal transmitido.

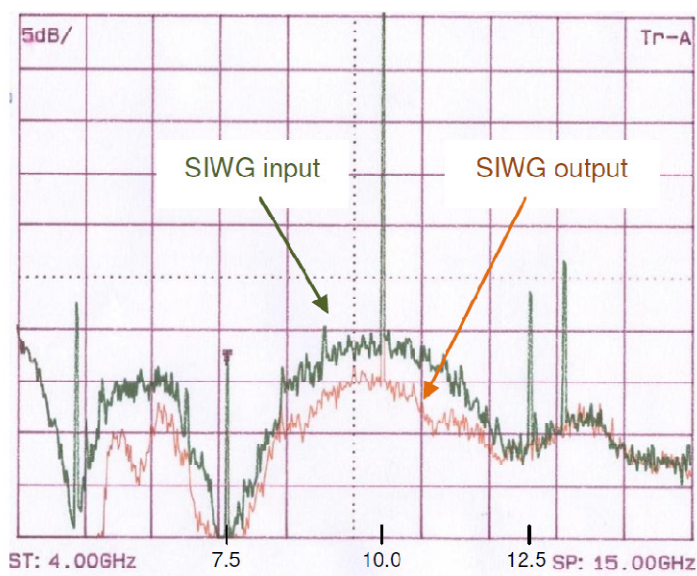


Figura 19 - Espectro digital medido antes e depois do guia FR-4 SIWG na configuração da figura 18.

A performance da transmissão do sinal digital é avaliada medindo o diagrama de olho com um osciloscópio digital na saída "*down converter*", sendo o mesmo sincronizado com a fonte PRBS de 2.5 Gbits/s. A Figura 20 apresenta o diagrama de olho medido indicando uma taxa de bits errados (BER – Bit Error Rate) satisfatória de aproximadamente 10^{-8} .

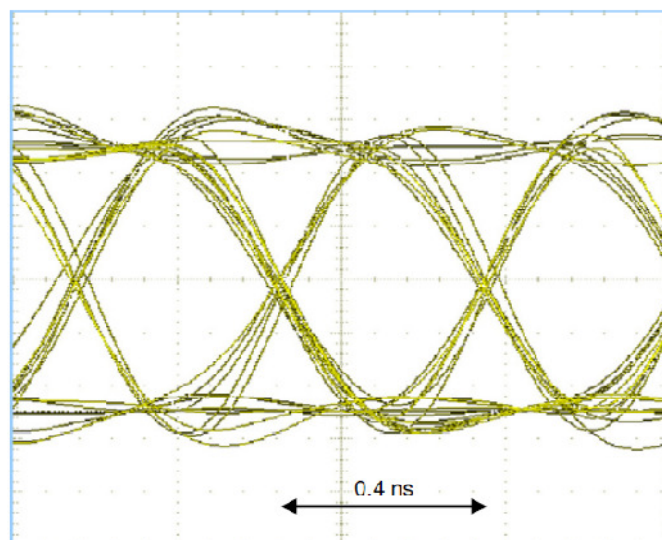


Figura 20 - Diagrama de olho para a transmissão do sinal PRBS de 2.5 Gbits/s no guia FR-4 SIWG na configuração da figura 18.

Com esses resultados um sinal digital de 10 Gbit/s modulado por meio de um formato 16-QAM ou 64-QAM pode ser transmitido no guia FR-4 SIWG, na portadora de 10 GHz, ocupando a banda de 7 GHz a 13 GHz. A Figura 21 apresenta o diagrama de blocos da transmissão digital serial de 10 Gbit/s no FR-4 SIWG. Neste esquema o sinal PRBS de 10Gbit/s é modulado em QAM onde o modulador e o demodulador são sincronizados com o oscilador local de 10 GHz.

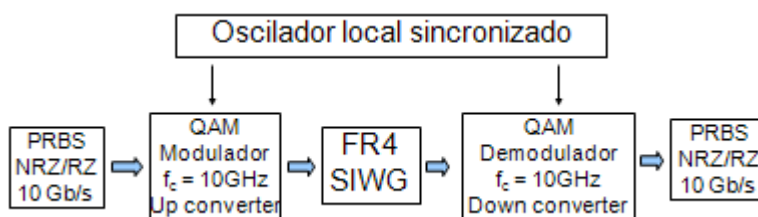


Figura 21 - Transmissão digital serial de 10Gbit/s no FR-4 SIWG com modulação QAM

A Figura 22 apresenta o modelo do circuito digital no formato 16-QAM para a modulação e demodulação de um sinal PRBS de 10Gbits/s. Este circuito é simulado usando a ferramenta computacional "*microwave and RF Circuits Design with embedded HFSS 3D Eletromagnetic Simulations*" [19], de forma a integrar os resultados obtidos no modelo eletromagnético 3D do protótipo do guia FR-4 SIWG com o circuito de transmissão e recepção de modulação digital QAM. Desta forma uma sequência de bits PRBS de 10 Gbit/s

é gerada, um modulador de fase e quadratura (I/Q) é utilizado de forma a gerar o sinal 16-QAM na portadora de 10 GHz. Este sinal de saída do modulador é transmitido no guia FR-4 e recebido no demodulador 16-QAM de forma a avaliar a BER na recepção.

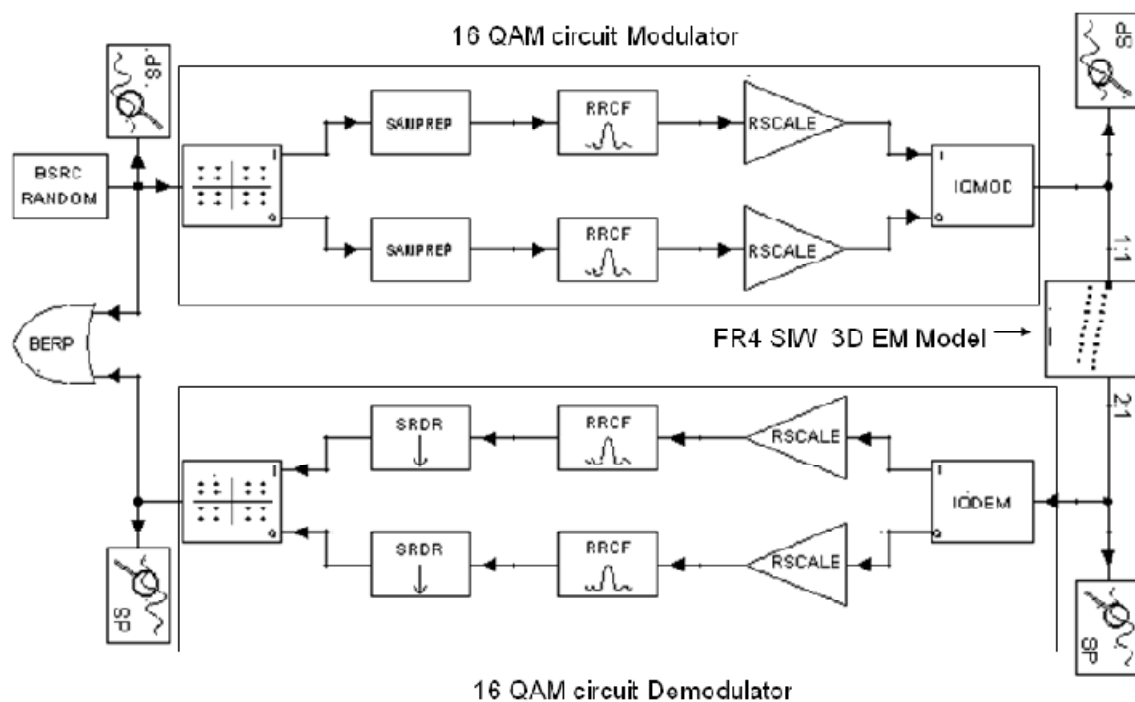


Figura 22 - Circuito de simulação da transmissão do sinal PRBS 10Gbit/s no formato 16-QAM integrado com o modelo 3D EM do guia FR-4 SIWG

A Figura 23 apresenta o espectro modulado na portadora de 10 GHz na entrada e na saída do guia FR-4 SIWG.

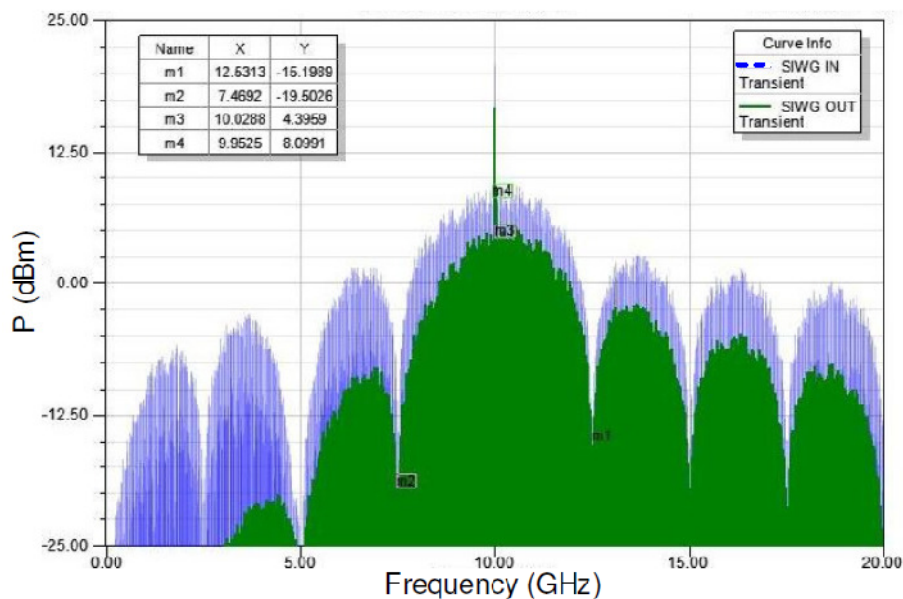


Figura 23 - Espectro simulado para a transmissão do sinal digital PRBS 10Gbit/s no formato 16-QAM : em azul o sinal na entrada do guia e em verde o sinal na saída do guia.

A Figura 24 apresenta o resultado de simulação da análise do diagrama de olho cuja BER é estimada em aproximadamente 10^{-8}

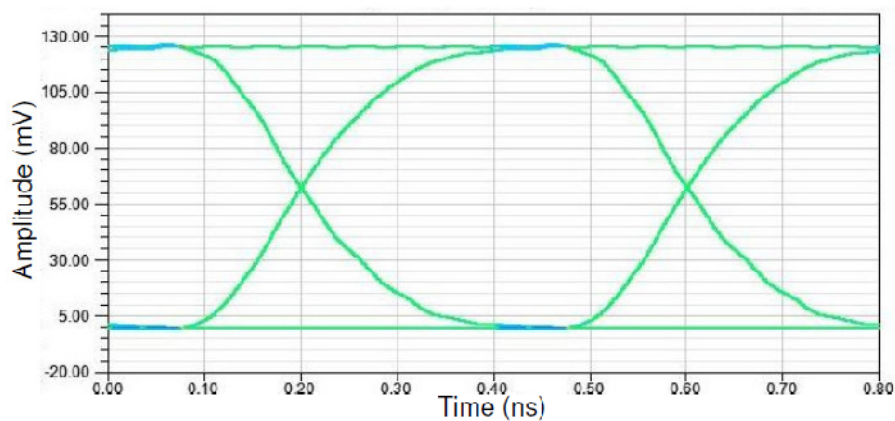


Figura 24 - Diagrama de olho para a transmissão do sinal PRBS 10 Gbits/s modulado em 16-QAM transmitido no guia FR-4 SIWG.

3.3 Filtro SIWG no FR-4 centrado em 10 GHz

Considerando os resultados obtidos para o guia no FR-4 apresentados no capítulo 2, um novo método de circuito equivalente é proposto para dimensionar um filtro passa faixa de

ondas guiadas em guia de onda SIWG [15]. A configuração do filtro consiste em inserir vias metalizadas centralizadas no interior do guia, que são modeladas como "postes indutivos metalizados" centrados num guia retangular. A Figura 25 ilustra o filtro SIWG, que consiste em dois pares de vias metalizadas de diâmetros d_1 e d_2 simetricamente dispostas em relação ao eixo longitudinal (z) formando 5 comprimentos diferentes de guia SIWG no FR-4 (LTs). As dimensões a e b são respectivamente a largura (centro a centro das vias) e a altura (espessura do substrato) que formam as paredes do guia.

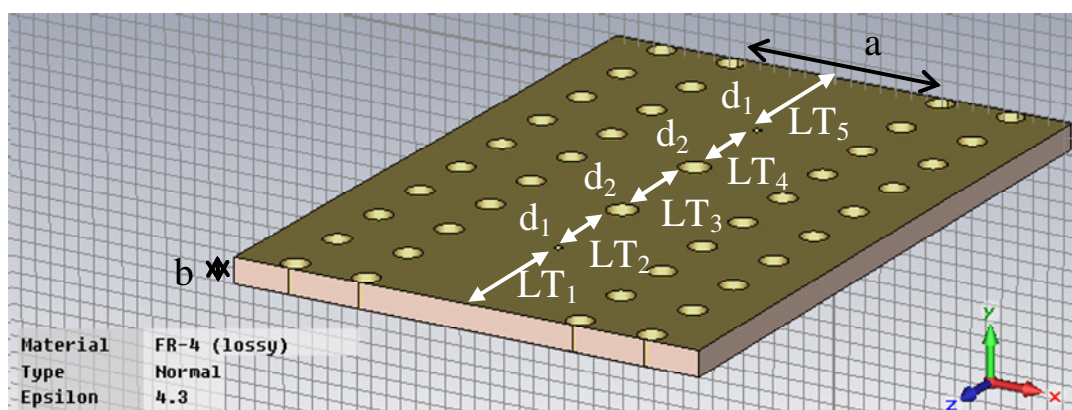


Figura 25 - Filtro SIWG 3D no FR-4

A Figura 26 apresenta a vista do corte transversal no guia e o modelo equivalente de circuito PI para cada via metalizada centralizada no guia. Neste circuito equivalente as dimensões do guia (a e b) e o diâmetro de cada via central (d) são calculados segundo a teoria de Marcuvitz' [22] pois estão relacionadas com a reatância indutiva (X_L), reatância capacitiva (X_C), comprimento de onda e impedância de onda para os modos que se propagam no guia assim como para o modo TE_{10} .

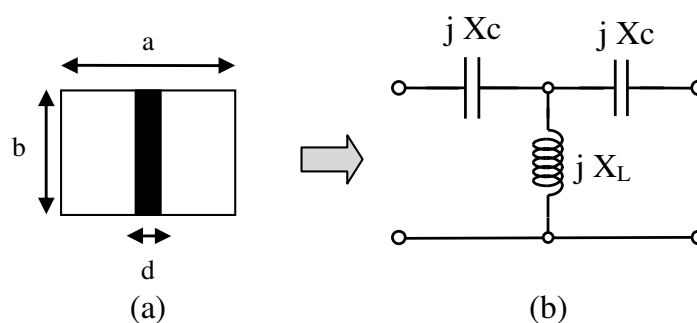


Figura 26 - Modelo equivalente do circuito PI de cada via metalizada centralizada no guia [22].

Utilizando o modelo PI apresentado acima, um circuito equivalente é analisado para dimensionar o filtro SIWG e ilustrado na Figura 27. O modelo consiste em 5 trechos de guias RWG alternados com 4 circuitos PI, correspondentes às 4 vias metalizadas centradas no guia. O valor de cada reatância capacitiva e indutiva assim como o valor do comprimento dos trechos de guia foram calculados segundo a otimização da perda de inserção e de reflexão nas portas P1 e P2 do circuito equivalente da Figura 27 na simulação de parâmetros S do ADS [16] para uma filtro centrado em 10 GHz com 1 GHz de banda. Este método de dimensionamento é uma boa aproximação que permite determinar o diâmetro e a posição de cada via metalizada centrada no guia que forma o filtro SIWG.

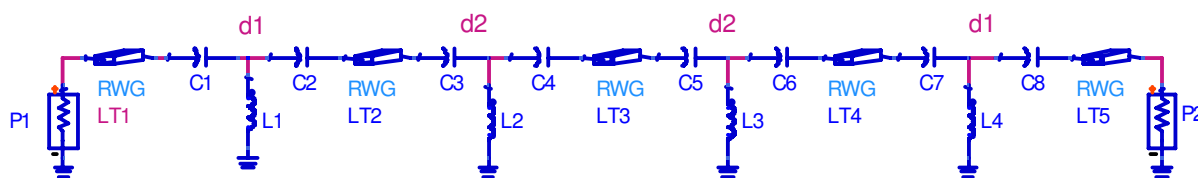


Figura 27 - Circuito equivalente do filtro SIWG utilizado para simulação e otimização no ADS

Os valores obtidos para o filtro SIWG são : $a=13.8$ mm , $b = 1.575$ mm , $d_1= 0.5$ mm , $d_2=1.9$ mm , $LT_1=10$ mm , $LT_2=7.22$ mm , $LT_3= 8.28$ mm , $LT_4=7.22$ mm e $LT_5=10$ mm resultando em um filtro de 42.72 mm de comprimento total. A simulação eletromagnética do filtro SIWG resultante foi realizada no CST [16]. A Figura 28 apresenta os resultados de simulação do circuito equivalente e da simulação 3D EM. É importante observar que os resultados apresentam respostas bastante semelhantes. Na frequência central de 10 GHz a perda de inserção é de aproximadamente 3.34 dB em ambos os casos com 1 GHz de banda passante. Uma pequena diferença é observada na faixa de rejeição inferior do filtro, pois o modelo de circuito equivalente é uma aproximação da função de transferência, que auxilia o dimensionamento 3D do filtro SIWG.

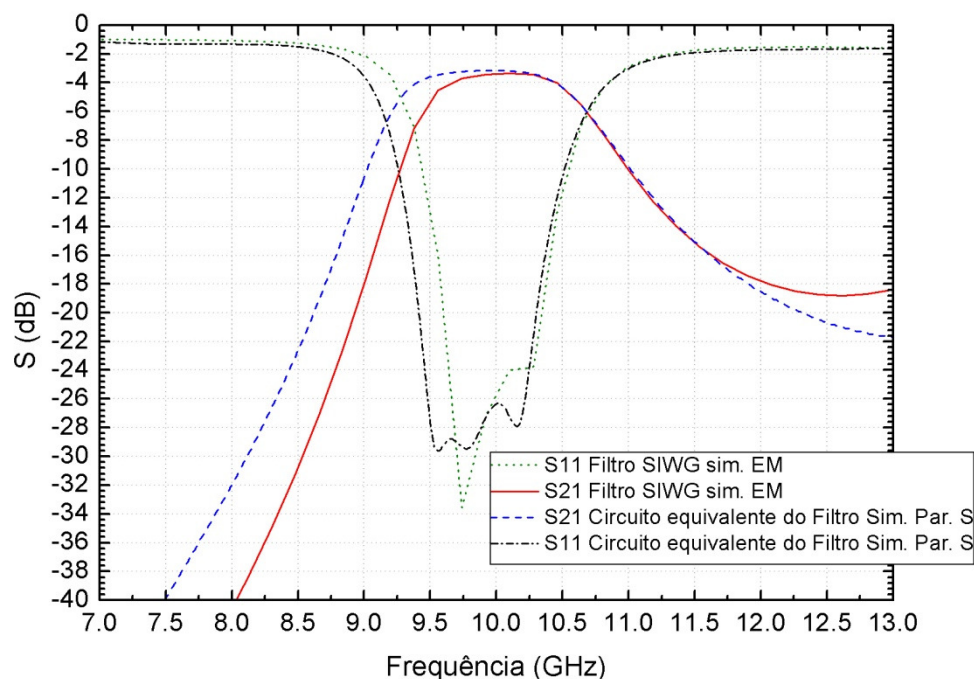


Figura 28 - Comparação entre a simulação EM 3D do filtro SIWG e a simulação do circuito equivalente.

Utilizando uma prototipadora de circuito impresso LDKFTM, o filtro SIWG foi fabricado no respectivo substrato FR-4. As linhas microstrip foram calculadas segundo a metodologia de cálculo apresentada no capítulo 2, na frequência central do filtro para excitar os modos no guia e utilizaram-se os conectores SMA coaxial 3.5mm para a caracterização experimental. A Figura 29 apresenta em (a) o protótipo do filtro realizado e em (b) o componente simulado no CST 3D EM com as respectivas dimensões. A Figura 30 apresenta os resultados da simulação eletromagnética e os resultados práticos medidos no analisador de redes vetorial HP 8720C. É importante observar que a perda de inserção na frequência central do filtro é de 5.8 dB para o protótipo e de 5.3 dB na simulação. Esta pequena diferença acontece pois as vias metalizadas foram realizadas de forma manual, isto é, preenchidas com soldas uma a uma, desta forma as dimensões reais das vias metalizadas do protótipo podem ter ficado um pouco diferentes das do modelo simulado. A fabricação do filtro em uma prototipadora industrial é recomendada para obter vias metalizadas de diâmetros iguais aos calculados e uma comparação mais precisa entre a simulação e caracterização experimental.

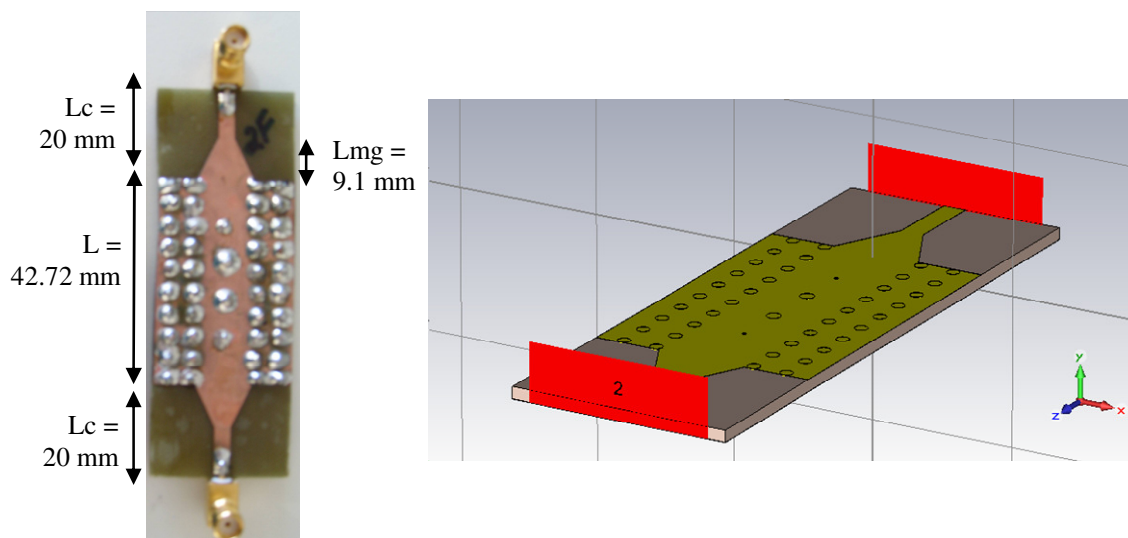


Figura 29 - Protótipo do filtro com transição Microstrip e conectorização, equivalente modelo 3D no CST.

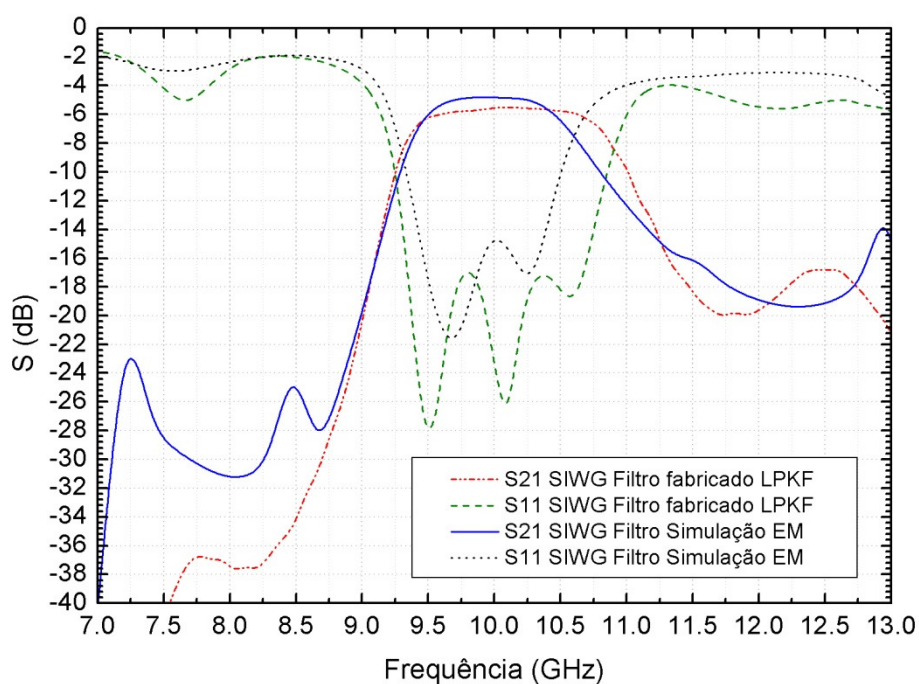


Figura 30 - Comparação entre a simulação do modelo 3D do filtro e a caracterização experimental do protótipo.

A Figura 31 apresenta o resultado experimental do filtro obtido no analisador de redes vetorial para a fase e o retardo de grupo na banda passante do filtro. Observa-se que a fase

varia linearmente com a frequência e o retardo é constante, em torno de 1 ns em toda a faixa de transmissão do filtro. Este resultado demonstra uma excelente característica do filtro, que permite ser utilizado, por exemplo, em um circuito radar com boa eficiência de pulsos emitidos e recebidos em 10 GHz.

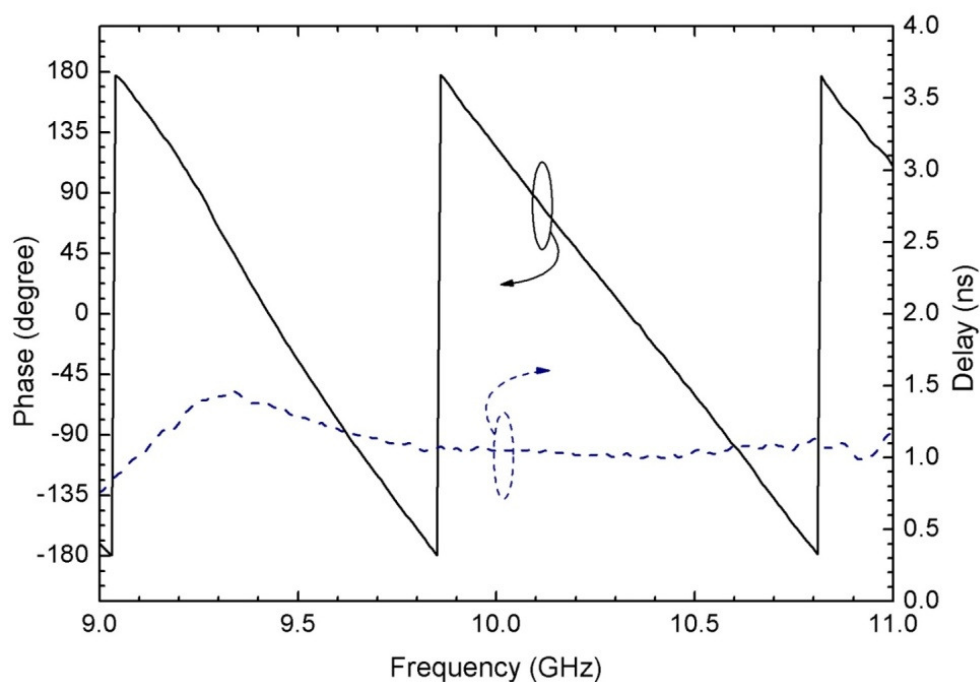


Figura 31 - Resultado experimental da fase e do retardo do filtro SIWG.

3.4 Ondas guiadas em substratos de Altíssimas constantes dielétricas

Utilizando um substrato cerâmico Trans-tech S-8600 [3] de constante dielétrica de $\epsilon_r=80$, um guia SIWG foi dimensionado e calculado para a frequência de corte $TE_{10} = 5$ GHz com a mesma metodologia de cálculo anterior. A tabela 2 apresenta as dimensões deste guia e a Figura 32 apresenta em (a) modelo 3D do SIWG para a simulação eletromagnética tridimensional e em (b) o modelo RWG na simulação de parâmetros S. A Figura 33 apresenta os resultados da perda de transmissão (S_{21}) para o caso em que a dimensão em x da porta do guia SIWG (a_{SIWG}) é igual a dimensão em x da porta do guia RWG (a_{RWG}). Neste caso a frequência de corte do modo TE_{10} é diferente para os 2 modelos, sendo portanto necessário uma correção da dimensão da parede do guia SIWG de acordo com a equação (11), isto é, redimensionar novamente o valor de a_{SIWG} de forma que a frequência de corte do modo TE_{10}

dos 2 modelos seja a mesma. Assim a otimização da equação (11) da sessão 2.2 é realizada no simulador eletromagnético, para se encontrar o melhor valor de a_{SIWG} , dependente do valor do diâmetro das vias já dimensionadas para a melhor resposta da perda de reflexão (S_{11}). A Figura 34 apresenta o resultado da simulação eletromagnética quando $a_{SIWG}=a_{RWG}+(1.3*r)$.

SIWG - transtech (Er=80)	
Fator Q do substrato	3716
tg perdas = 1/Q	0.000269107
Prototipo de 5 a 20 GHz	
λ TE10 / freq TE10	6.69 mm / 5 GHz
λ TE 20 / freq TE20	3.35 mm / 10 GHz
λ TE 01 / freq TE01	2.5 mm / 13.41 GHz
Altura / espessura do substrato (H = b)	1.25 mm
razão a/b	2.68
distância (a) na direção x centro a centro das vias que formam a parede do guia	aRWG= 3.35 mm
	aSIWG = 3.3518+(1.3*0.35)
	3.7418 mm
distância (p) na direção Z centro a centro das vias que formam a parede do guia	1.3 mm
Diametro das vias que formam a parede do guia (d)	0.7 mm
d/p	0.538461538
d/a	0.208955224
raio das vias que formam a parede do guia (r)	0.35 mm
espaço (tangente) entre as vias da parede do guia	0.6 mm
quantidade de vias da parede na direção Z	21
Comprimento total do guia SIWG / qnte de vias em 1 linha paralela (1 parede)	26.7 mm
Retardo do guia calculado	0.796 ns

Tabela 2 - Dimensões do guia de alta constante dielétrica $\epsilon_r=80$ no substrato Trans-tech S-8600 [3].

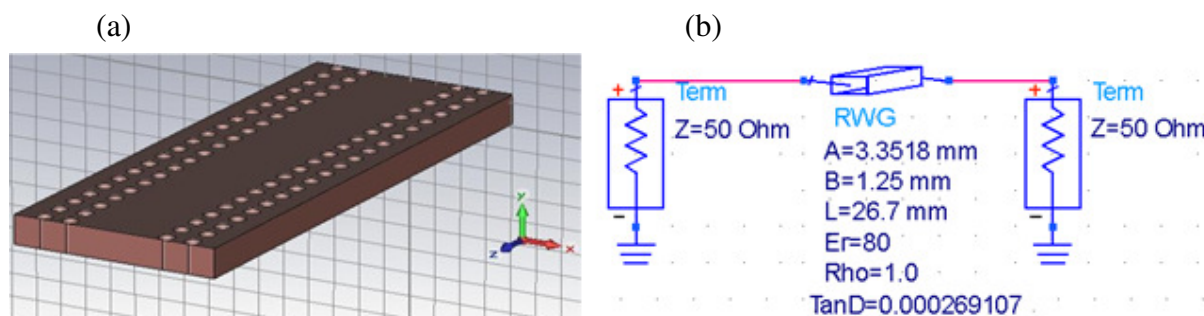


Figura 32 - Modelo SIWG $\epsilon_r=80$: (a) modelo tridimensional; (b) modelo RWG equivalente.

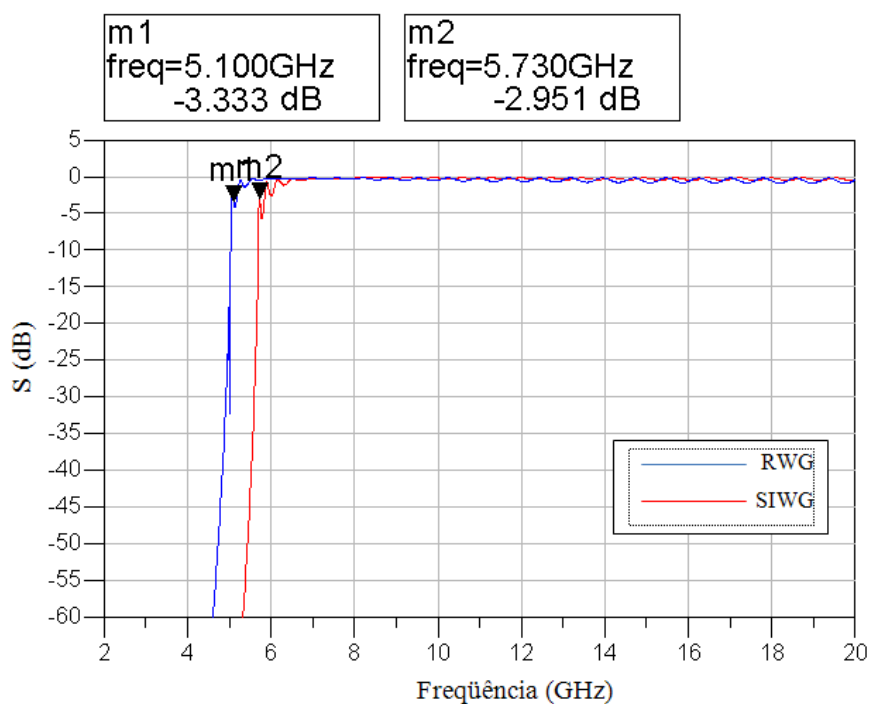


Figura 33 - Resultado de simulação eletromagnética SIWG x RWG no substrato Trans-tech S-8600 para $a_{RWG}=a_{SIWG} = 3.3518$ mm

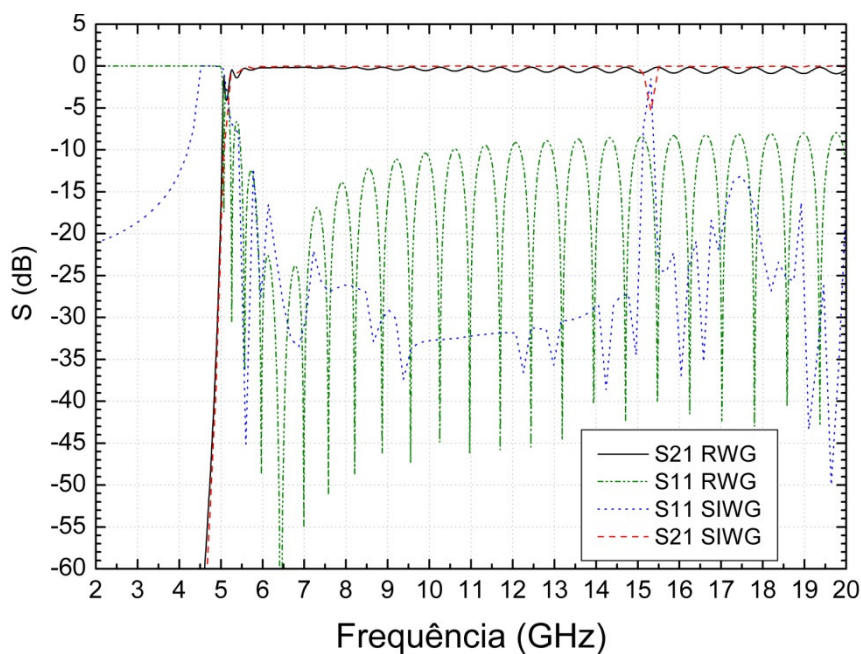


Figura 34 - Resultado de simulação eletromagnética SIWG x RWG no substrato Trans-tech S-8600 para $a_{RWG}=3.3518$ mm e $a_{SIWG} = 3.7418$ mm .

Em ambos os casos a perda de inserção na frequência de 10 GHz é aproximadamente 0.2 dB, tanto a estrutura SIWG e o respectivo modelo RWG apresentam resultados semelhantes, comprovando portanto que o substrato de altíssima constante dielétrica pode ser utilizado para a fabricação de componentes e dispositivos de micro-ondas por meio de ondas guiadas SIWG na faixa de operação de 2 GHz a 20 GHz com uma boa eficiência e dimensões realizáveis. Entretanto as estruturas de casamento planar/guia para $\epsilon_r=80$ devem ainda ser avaliadas e estudadas para possibilitar a integração e a utilização destes guias.

O projeto de um radar nas bandas S ou X é atualmente realizado com muitos componentes e circuitos conectorizados, com respostas oscilatórias nas bandas de projeto devido a reflexões múltiplas nas interfaces conectorizadas e também com um custo alto de desenvolvimento [26,27,28,29]. Considerando a nova tecnologia de integração de circuitos por meio de guia de ondas estudada no capítulo 2, este trabalho apresenta como proposta a possibilidade de desenvolver componentes ou subsistemas para radares operando nas diversas bandas compreendidas entre 2 GHz a 20 GHz utilizando guias SIWG integrados em um único substrato dielétrico: FR-4, Teflon e/ou cerâmicos de alta constante dielétrica ($\epsilon_r=40$ ou $\epsilon_r=80$), visando baixo custo de realização e alta eficiência.

A Figura 35 apresenta o diagrama de blocos de um radar de acompanhamento (Tracking radar [26]). O circuito de transmissão e recepção ilustra a integração dos componentes envolvidos na tecnologia SIWG: filtro, divisor 1:4, linhas (guias) de retardo (defasador), mixers, amplificadores LNA e a antena Tx/Rx, onde todos são integrados em um único substrato, realizados por meio de guias de ondas, formando um único componente com dimensões reduzidas e baixo custo.

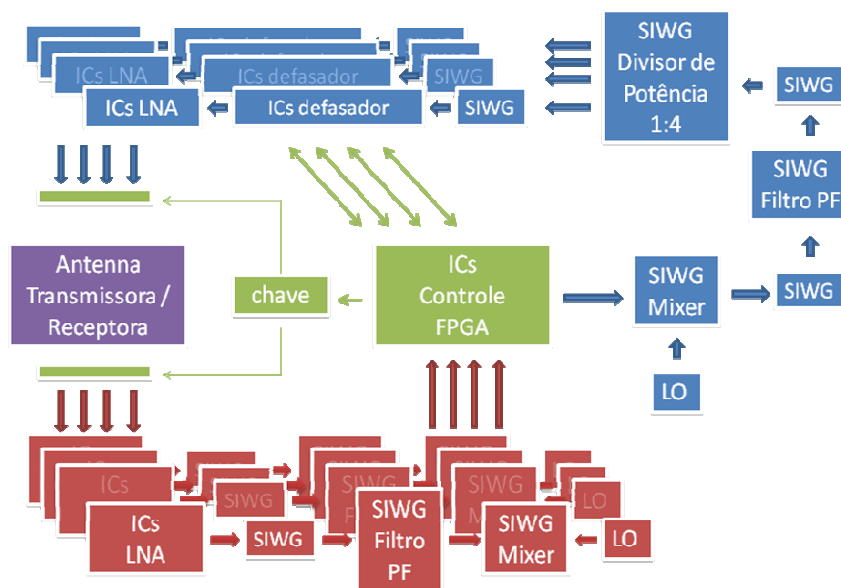


Figura 35 - Radar de acompanhamento em um circuito totalmente integrado pela tecnologia SIWG

3.5 Comentários

Neste capítulo as aplicações utilizando o substrato FR-4 de muitíssimo baixo custo demonstram sua utilização em banda larga e contínua na faixa de 5 GHz a 20 GHz. Verificou-se que as paredes dos guias SIWG podem ser realizadas com uma ou duas fileiras de furos. As soluções associadas a duas fileiras na parede do guia apresentaram melhores resultados no FR-4.

Os protótipos realizados tanto do guia quanto do filtro demonstraram excelentes resultados, confirmando as simulações, destacando que as estruturas de ondas guiadas em substratos comerciais de Placas de Circuito Impresso em substratos do tipo FR-4 podem atingir as taxas de 10 Gbits/s se associados aos formatos de modulação ASK ou QAM e podem ser fabricados em prototipadoras de CIs com baixo custo de realização.

Deve ser também destacado que o método de projeto desenvolvido nesta tese para a realização do filtro de ondas guiadas em FR-4 difere dos métodos tradicionais apresentados na literatura.

Adicionalmente, os guias dielétricos cuja constante dielétrica é de $\epsilon_r=80$ foram estudados e avaliados indicando a operação na faixa de 5 GHz a 20 GHz com uma dramática redução em suas dimensões quando comparados com outros substratos.

A aplicação destes guias em subsistemas militares, como por exemplo em circuitos de um equipamento radar, pode ser realizada com eficiência, simplificação e redução dos custos.