6 Resultados de simulação e práticos

6.1. Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos tanto com a simulação dos divisores projetados no capítulo 4 como com as medidas em laboratório efetuadas nos circuitos implementados, sendo realizada uma análise comparativa entre os resultados simulados e os experimentais. Ao final, estes são comparados com os disponíveis na literatura.

6.2. Caracterização do PHEMT FPD1500SOT80

Foram realizadas medidas dos parâmetros *S* do PHEMT FPD1500SOT89 montado em uma placa de circuito impresso em substrato RT5880 com *H*=0,787mm e *t*=0,7 mil. O dispositivo foi montado como nos circuitos dos divisores, sendo construídas três (3) amostras, numa delas foram empregados parafusos para a realização do aterramento de fonte, nas demais foram empregados fios rígidos soldados ao plano de terra e um *pad* de acesso ao terminal do dispositivo. Na Figura 64 podem-se ver as fotografias das amostras para caracterização.

Figura 64: Fotografia das amostras montadas do PHEMT FPD1500SOT89 para caracterização dos parâmetros *S*.

Na Figura 65 é mostrado o ambiente de testes empregado na caracterização dos PHEMTs, as medidas foram realizadas em um analisador de redes vetorial,

modelo HP8720C, sendo empregados dois Ts de polarização, um para a porta e outro para o dreno do dispositivo. Para a realização das medidas empregou-se um método de calibração TRL-*full-2-port* descrito em [122 e 123]. Assim, foram confeccionadas três (3) placas: uma placa para ser empregada como *thru*, outra como *line* e uma terceira em curto para ser usada como *reflect*. Na Figura 66 as fotografias das três (3) placas podem ser observadas. Na Tabela 24 são exibidos os valores medidos dos parâmetros S ao longo da freqüência, para $V_{ds} = 3V$, $V_{gs} = -0{,}6V$ e potência de entrada de -10 dBm. Na Tabela 25 são mostrados os valores medidos dos parâmetros S ao longo da freqüência, para $V_{ds} = 3V$, $V_{gs} = -0{,}6V$ e potência de entrada de 0 dBm. Na Tabela 26 são apresentados os valores medidos dos parâmetros S ao longo da freqüência, para $V_{ds} = 3V$, $V_{gs} = -1V$ e potência de entrada de -10 dBm. Na Tabela 27 são apresentados os valores medidos dos parâmetros S ao longo da freqüência, para $V_{ds} = 3V$, $V_{gs} = -1V$ e potência de entrada de 0 dBm.

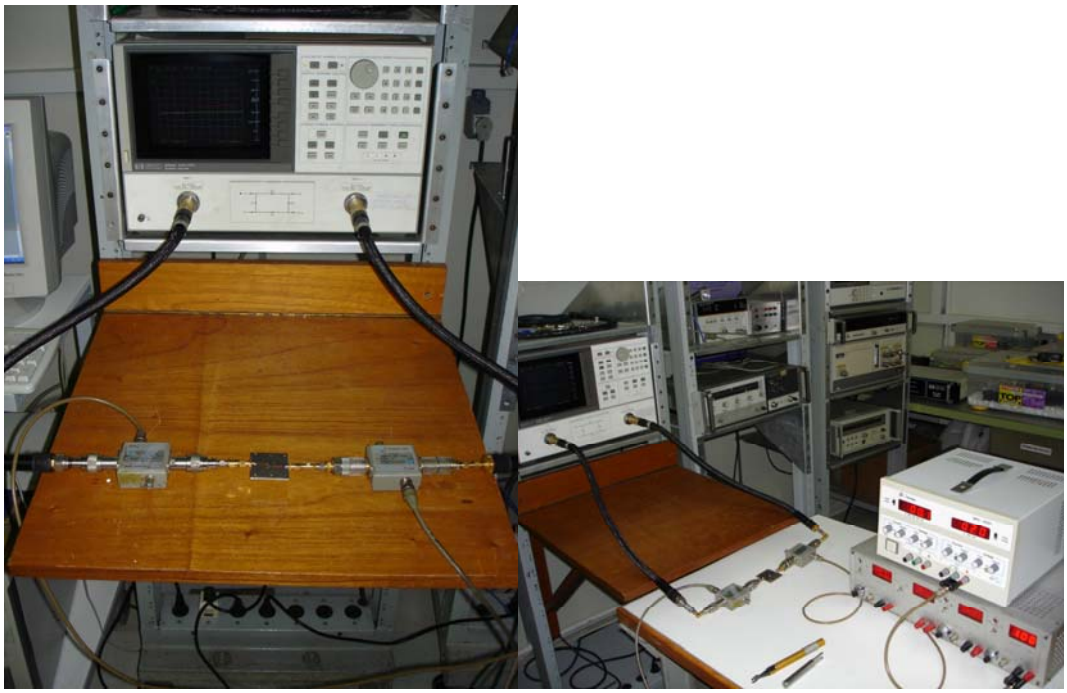

Figura 65: Ambiente de teste dos parâmetros *S*.

Figura 66: Fotografia dos padrões de calibração da medida dos parâmetros *S*.

Tabela 24: Parâmetros *S* medidos do PHEMT FPD1500SOT89, para $V_{ds} = 3V$, $V_{gs} = -0{,}6V$ e potência de entrada de -10 dBm.

Freq. (GHz)	**S_{11}**	**S_{12}**	**S_{21}**	**S_{22}**
0,50	0,872/-73,9	0,0374/50,1	3,402/114,8	0,159/168,1
0,75	0,783/-115,5	0,0527/34,7	3,557/86,3	0,192/145,3
1,00	0,776/-151,1	0,0670/17,6	3,452/60,2	0,211/130,3
1,25	0,705/171,6	0,0814/4,1	3,676/34,2	0,232/108,9
1,50	0,664/138,9	0,0963/-11,2	3,675/10,4	0,242/92,2
1,75	0,470/37,9	0,112/-27,6	2,675/-61,8	0,242/74,5
2,00	0,360/-58,4	0,124/-42,2	2,589/-132,6	0,271/54,3

Tabela 25: Parâmetros *S* medidos do PHEMT FPD1500SOT89, para $V_{ds} = 3V$, $V_{gs} = -0{,}6V$ e potência de entrada de 0 dBm.

Freq. (GHz)	**S_{11}**	**S_{12}**	**S_{21}**	**S_{22}**
0,50	0,829/-102,9	0,0338/45,3	10,630/101,6	0,286/164,1
0,75	0,704/-149,2	0,0468/29,2	9,704/70,2	0,320/145,2
1,00	0,632/173,1	0,0582/13,3	8,481/44,0	0,346/125,6
1,25	0,591/143,0	0,0698/-1,2	7,280/22,1	0,358/107,4
1,50	0,584/117,8	0,0812/-16,3	6,192/2,1	0,376/90,6
1,75	0,5866/93,6	0,0932/-32,8	5,361/-18,0	0,391/73,3
2,00	0,590/73,6	0,104/-48,2	4,729/-36,1	0,401/56,2

Tabela 26: Parâmetros *S* medidos do PHEMT FPD1500SOT89, para $V_{ds} = 3V$, $V_{gs} = -1V$ e potência de entrada de -10 dBm.

Freq. (GHz)	**S_{11}**	**S_{12}**	**S_{21}**	**S_{22}**
0,50	0,916/-69,8	0,0925/35,3	3,214/116,5	0,568/-64,6
0,75	0,868/-104,9	0,121/8,8	3,230/89,7	0,499/-98,1
1,00	0,826/-138,4	0,139/-14,6	3,123/64,3	0,451/-130,4
1,25	0,740/-172,4	0,151/-35,3	3,307/37,8	0,409/-158,1
1,50	0,727/156,0	0,153/-56,7	3,212/15,7	0,395/171,6
1,75	0,681/125,1	0,155/-75,9	3,209/-8,3	0,379/145,4
2,00	0,674/100,2	0,151/-93,6	3,034/-28,4	0,379/120,8

Tabela 27: Parâmetros *S* medidos do PHEMT FPD1500SOT89, para $V_{ds} = 3V$, $V_{gs} = -1V$ e potência de entrada de 0 dBm.

Freq. (GHz)	**S_{11}**	**S_{12}**	**S_{21}**	**S_{22}**
0,50	0,848/-79,5	0,0917/33,9	6,759/107,4	0,563/-67,6
0,75	0,782/-116,1	0,122/7,9	5,894/81,8	0,516/-99,1
1,00	0,721/-148,8	0,142/-15,3	5,112/55,8	0,465/-129,2
1,25	0,686/-176,9	0,154/-36,5	4,236/33,1	0,423/-156,7
1,50	0,679/154,0	0,159/-56,6	3,742/12,3	0,396/175,8
1,75	0,667/127,9	0,162/-76,0	3,209/-9,9	0,376/149,8
2,00	0,665/104,5	0,161/-93,4	2,885/-29,3	0,368/126,3

Através de uma análise comparativa entre os valores da Tabela 24 (medido) e da Tabela 10 (simulado), pode-se verificar que na freqüência de saída (1 GHz) o PHEMT apresenta um valor para S_{11} não muito diferente daquele obtido para a simulação de pequenos sinais, correspondendo a uma impedância de entrada igual a 6,7-j12,7 Ω, contra uma simulada igual a 7,0-j23,0 Ω. Os valores obtidos para os demais parâmetros não são muito confiáveis, neste caso, pois a saída do PHEMT estava, em algumas freqüências, saturando o receptor do analisador de redes. Porém, ao se observar os valores da Tabela 25, que apresentam o resultado de uma caracterização do dispositivo para uma potência de entrada de 0 dBm, mais próximo ao valor de trabalho esperado para os divisores de freqüência, verifica-se, agora, que o valor obtido para S_{11} na freqüência de saída (1 GHz) é bem diferente daquele obtido pela simulação de pequenos sinais, correspondendo a uma impedância de entrada igual a 11,3+j2,9 Ω, apresentando uma resistência bem elevada, em conjunto com uma reatância indutiva, assim, nestas condições, não ocorrerá o fenômeno de divisão paramétrica de freqüência, pois o circuito não apresentará uma ressonância de modo ímpar, para o caso das linhas acopladas e no caso das linhas em série (sem acoplamento), além do circuito deixar de ser ressonante, este não estaria isolado da entrada, assim, esta estaria carregando o

circuito, impedindo o processo de transferência subharmônica de energia. Alguns circuitos foram projetados e realizados para esta polarização. Porém, como será exposto mais a frente, nenhum deles foi capaz de realizar a divisão de freqüência, quando polarizados desta forma, contudo, ao mudar-se para a polarização de $V_{ds} = 3V$, $V_{gs} = -1V$, todos eles funcionaram dentro de certas circunstâncias. Nestes casos, foram verificadas, como poderá ser visto adiante, variações na freqüência de ressonância máxima.

Agora, através de uma análise dos valores da Tabela 26 obtidos para uma potência de entrada de -10 dBm e da Tabela 27 para uma potência de entrada de 0 dBm, pode-se verificar que na freqüência de saída (1 GHz) o PHEMT apresenta, uma impedância de entrada igual a 5,4-j18,8 Ω e a 8,7-j13,6 Ω, respectivamente. Assim, para a polarização de $V_{ds} = 3V$, $V_{gs} = -1V$ o dispositivo apresenta uma variação menor da impedância de entrada com a potência, sendo que esta continua apresentando um comportamento capacitivo em conjunto com uma resistência de entrada, relativamente menor que a apresentada pela rede de entrada do circuito divisor de freqüência. Desta forma, é possível que o circuito, no caso das linhas acopladas apresente uma freqüência de ressonância de modo ímpar e no das linhas série desacopladas, uma freqüência ressonante, na qual o circuito esteja, ainda, consideravelmente, isolado da entrada. Como se pode observar dos valores obtidos para a impedância de entrada, a freqüência de ressonância ocorrerá para valores diferentes daqueles projetados.

As discrepâncias obtidas entre os valores simulados e os valores medidos se devem por vários razões, imprecisão do modelo não-linear do dispositivo em descrever o comportamento a pequenos sinais; variações devido à construção de cada dispositivo e primordialmente, ao processo de confecção e montagem artesanal em laboratório, sem a necessária precisão, do dispositivo em uma placa de circuito impresso de microondas, dificultando, por exemplo, que o *pad* de soldagem e o furo de passagem de aterramento da fonte do PHEMT pudessem ser adequadamente inseridos no modelo, por meio de um circuito equivalente. Foram feitas algumas investigações que mostraram o efeito da via de acesso ao plano de terra da placa nos parâmetros do dispositivo montado, mas como estas não fazem parte da proposta do trabalho e poderão ser bem caracterizadas quando de uma

montagem profissional, onde os circuitos equivalentes destas vias são conhecidos [124], fica feito, apenas, o registro do cuidado que se deve ter neste sentido.

6.3. Simulação transiente dos circuitos divisores de freqüência

A seguir serão apresentados os resultados de simulação transiente obtidos para os circuitos projetados, tanto na polarização de $V_{ds} = 3V$ e $V_{gs} = -0{,}6V$ como na de $V_{ds} = 3V$ e $V_{gs} = -1V$. A designação que identifica os circuitos é àquela empregada no capítulo 4. Para cada circuito é realizada uma simulação transiente, sendo variada a freqüência do gerador em torno de 2 GHz, de forma, que a banda de operação de cada circuito divisor de freqüência seja determinada, para uma potência de entrada de 0 dBm. Também, é verificada a potência de entrada mínima necessária para que a geração subharmônica ocorra. É realizada uma análise comparativa entre os circuitos projetados.

6.3.1. Resultados obtidos para o divisor#1

A Figura 67 exibe o espectro de saída obtido com o divisor#1, para uma variação da freqüência do gerador entre 1,6 e 2,5 GHz e uma potência de -10 dBm, pode-se observar que não é gerado o subharmônico para este nível de potência de entrada. O processo de divisão inicia-se para -6 dBm em uma freqüência de 2,3 GHz como evidenciado pela Figura 68. A Figura 69 apresenta o espectro do sinal de saída para uma potência de entrada de 0 dBm, a banda de freqüência da entrada observada é de 200 MHz (2,1 a 2,3 GHz). O espectro de saída de cada uma das portas balanceadas para a freqüência de 2,3 GHz é mostrado de forma isolada na Figura 70. Como o circuito completo de um divisor de freqüência por dois apresenta um balum que transforma as duas saídas balanceadas e uma desbalanceada, a Figura 71 exibe o espectro do sinal nesta porta. Verifica-se que o sinal subharmônico gerado é reforçado, enquanto o sinal na freqüência de entrada é praticamente eliminado, já que nesta as saídas se encontram em fase. Na Figura 72 é apresentada à tensão do sinal nas duas portas do circuito. É possível observar que o sinal de maior intensidade é o de 1,15 GHz, cujo período é cerca de 0,87 ns. Verifica-se, ainda, a presença de harmônicos de ordem elevada desta freqüência, porém de menor intensidade.

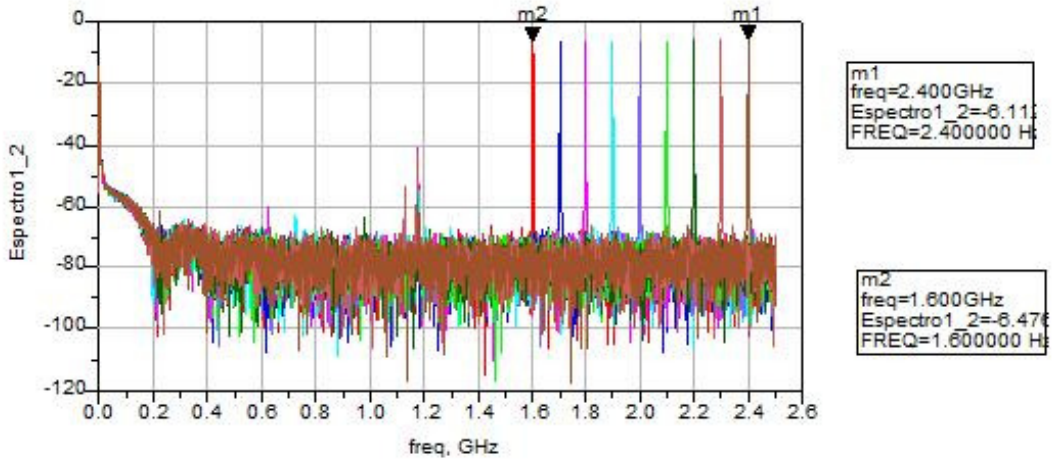

Figura 67: Espectro de saída do divisor#1 para uma potência de entrada de -10 dBm e a freqüência variando de 1,6 a 2,5 GHz.

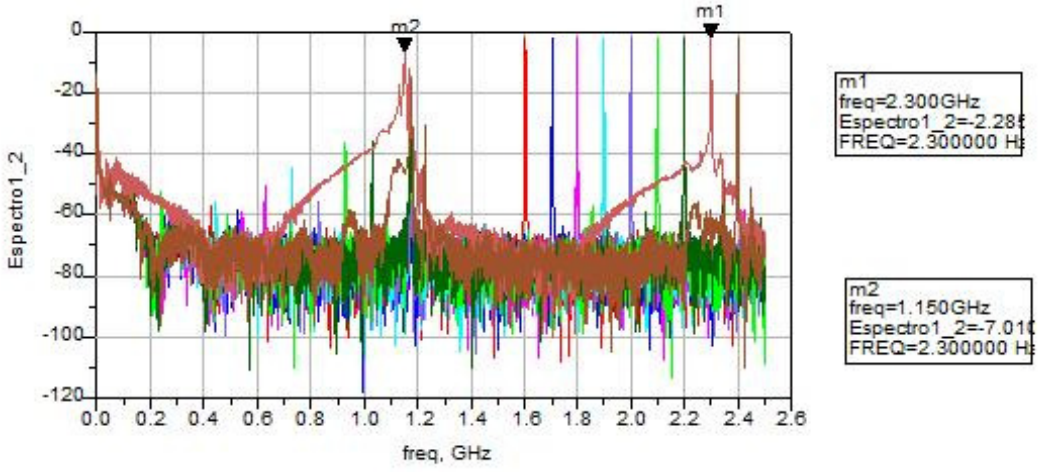

Figura 68: Espectro de saída do divisor#1 para uma potência de entrada de -6 dBm e a freqüência variando de 1,6 a 2,5 GHz.

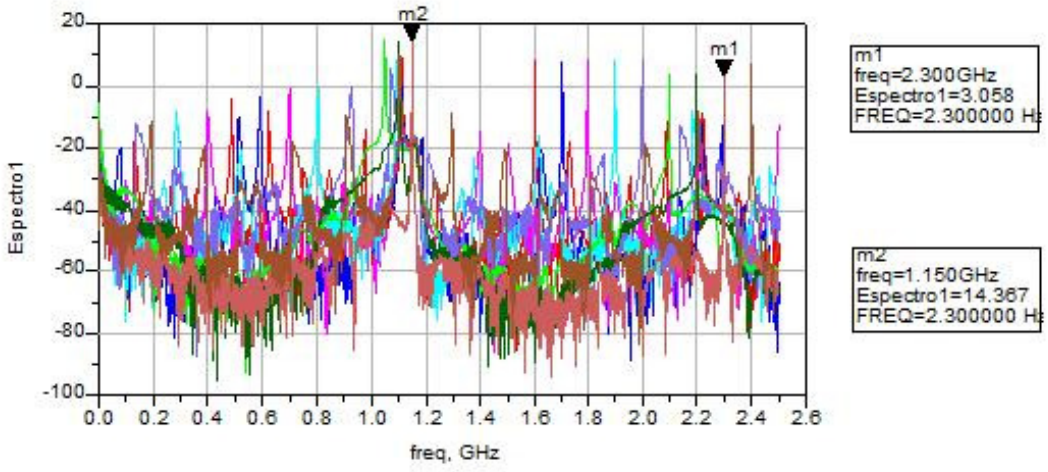

Figura 69: Espectro de saída do divisor#1 para uma potência de entrada de 0 dBm e a freqüência variando de 1,6 a 2,5 GHz.

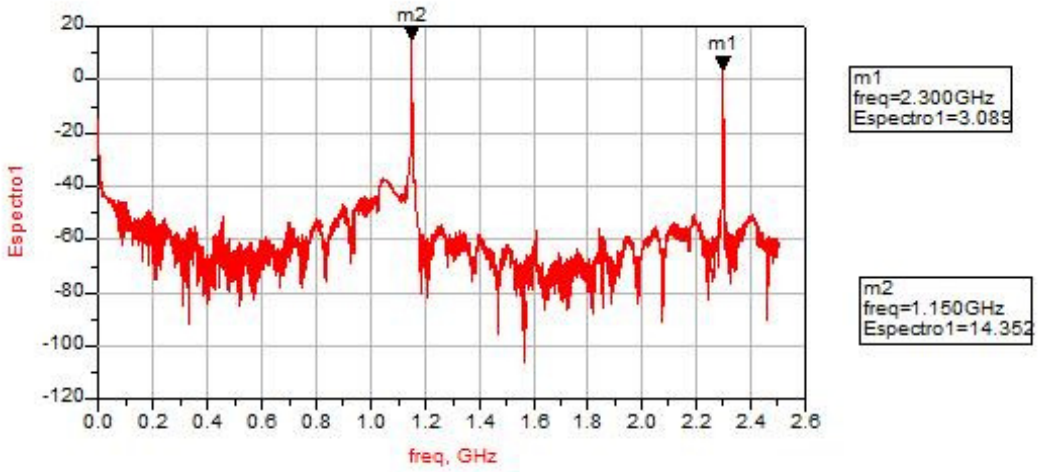

Figura 70: Espectro de saída do divisor#1 para uma potência de entrada de 0 dBm e a freqüência de 2,3 GHz.

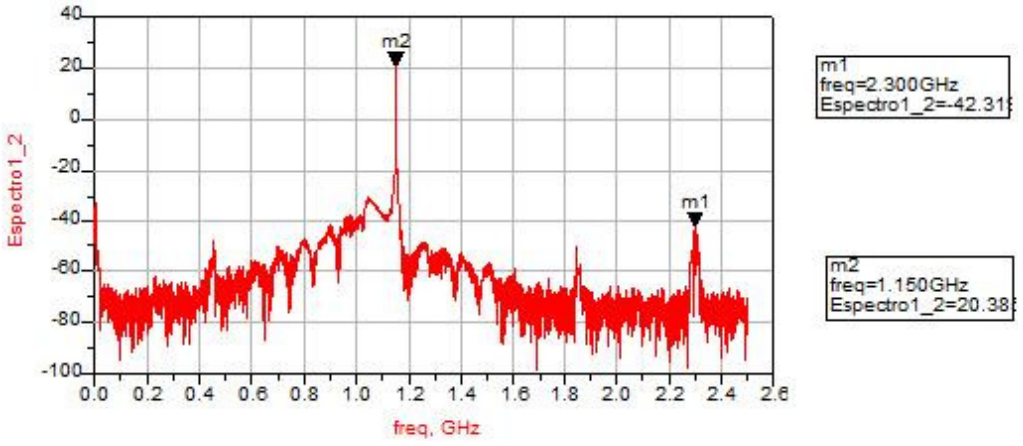

Figura 71: Espectro de duas vezes a diferença entre as saídas balanceadas do divisor#1 para uma potência de entrada de 0 dBm e freqüência de 2,3 GHz.

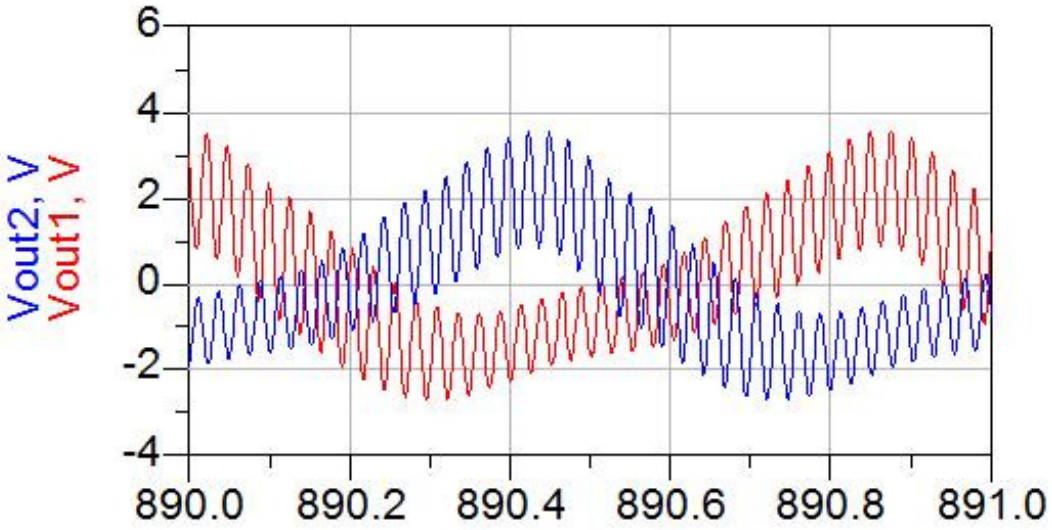

Figura 72: Tensão de saída em cada uma das portas balanceadas do divisor#1 para uma potência de entrada de 0 dBm e a freqüência de 2,3 GHz.

6.3.2. Resultados obtidos para o divisor#2

A Figura 73 exibe o espectro de saída obtido com o divisor#2, para uma variação da freqüência do gerador entre 1,6 e 2,4 GHz e uma potência de -10 dBm, pode-se observar que não é gerado o subharmônico para este nível de potência de entrada. O processo de divisão inicia-se para -8 dBm em uma freqüência de 2,2 GHz como evidenciado pela Figura 74. A Figura 75 apresenta o

espectro do sinal de saída para uma potência de entrada de -6 dBm, onde se verifica que a potência do subharmônico gerado nestas circunstâncias é bem mais elevado (cerca de 12 dBm), pode-se apreender da Figura 76 que a banda de freqüência da entrada observada é de 300 MHz (2,0 a 2,3 GHz), para o divisor de freqüência excitado por um sinal de 0 dBm. Fazendo uma comparação com o divisor#1, divisor#2 tem um limiar de potência para início da geração subharmônica menor (-8 dBm contra -6 dBm). Contudo, deve-se notar que a freqüência onde este ocorre é diferente (2,2 GHz contra 2,3 GHz). A banda obtida para 0 dBm de entrada foi maior (300 MHz contra 200 MHz) e com níveis de potência do sinal de saída, em ambos os casos, de cerca de 14 dBm. Verifica-se, assim, que o casamento da entrada realizado melhorou tanto a sensibilidade quanto a banda de operação do divisor de freqüência.

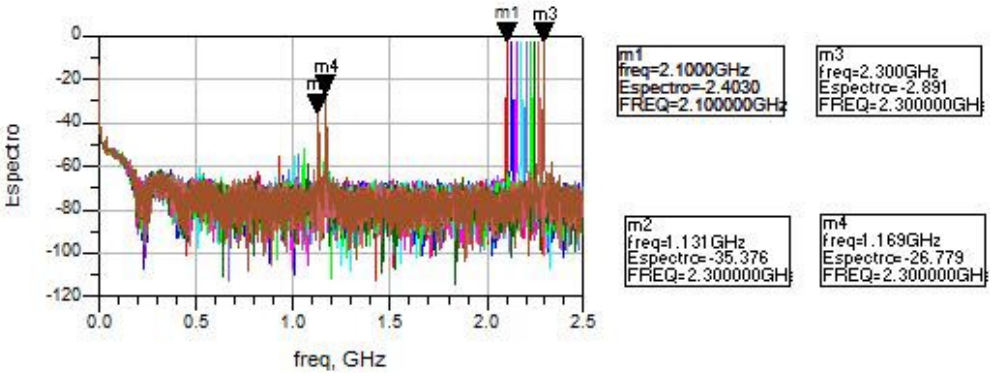

Figura 73: Espectro de saída do divisor#2 para uma potência de entrada de -10 dBm e a freqüência variando de 2,1 a 2,3 GHz.

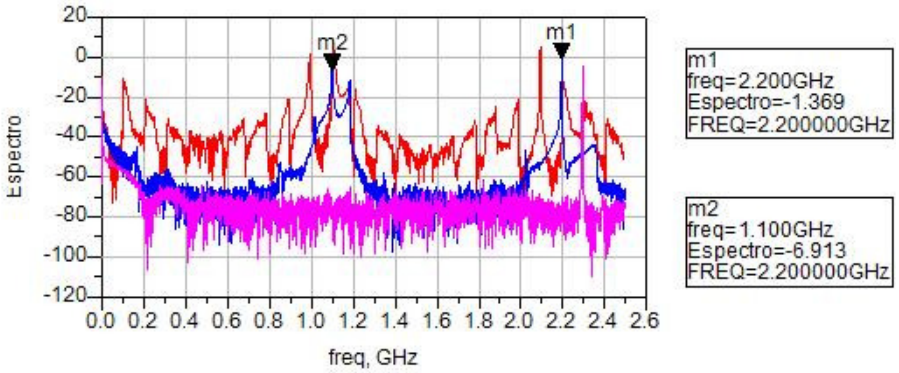

Figura 74: Espectro de saída do divisor#2 para uma potência de entrada de -8 dBm e a freqüência variando de 2,1 a 2,3 GHz.

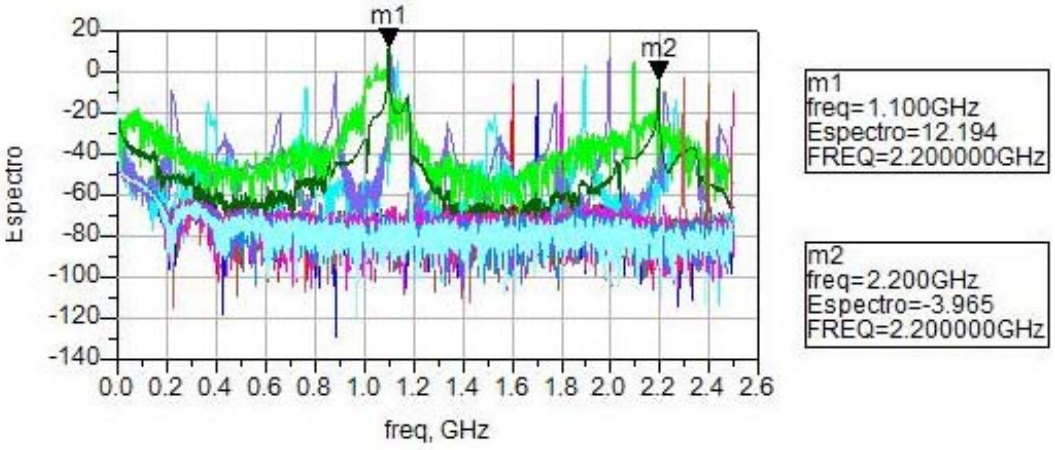

Figura 75: Espectro de saída do divisor#2 para uma potência de entrada de -6 dBm e a freqüência variando de 1,6 a 2,5 GHz.

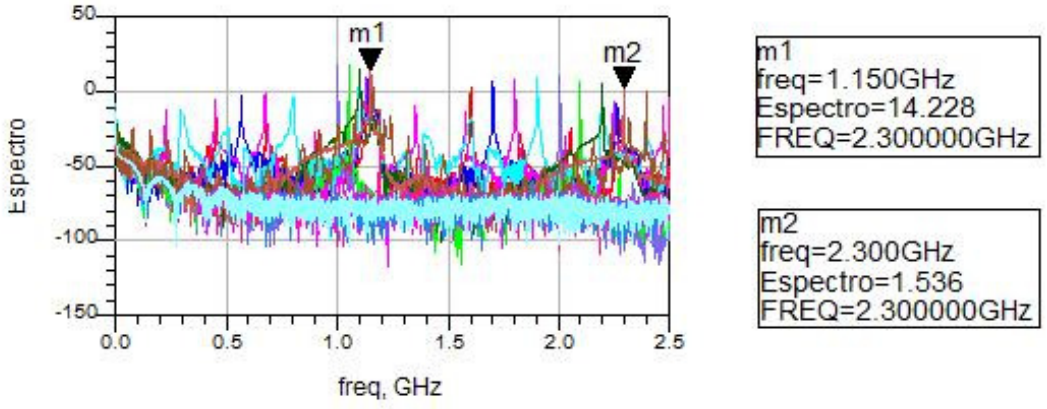

Figura 76: Espectro de saída do divisor#2 para uma potência de entrada de 0 dBm e a freqüência variando de 1,6 a 2,5 GHz.

6.3.3. Resultados obtidos para o divisor#3

Da Figura 77 percebe-se que para uma potência de -10 dBm de entrada o divisor#3 não apresenta divisão de freqüência. O processo de divisão de freqüência inicia-se com uma potência de -5 dBm, na freqüência de 2,3 GHz, sendo observado na Figura 78. Para uma potência de entrada de -4 dBm o divisor#3 já apresenta 200 MHz (2.1 a 2.3 GHz) de banda passante de entrada, como verificado na Figura 79. Na Figura 80 é apresentada uma banda passante de 200 MHz (2,1 a 2,3 GHz), para uma potência de 0 dBm.

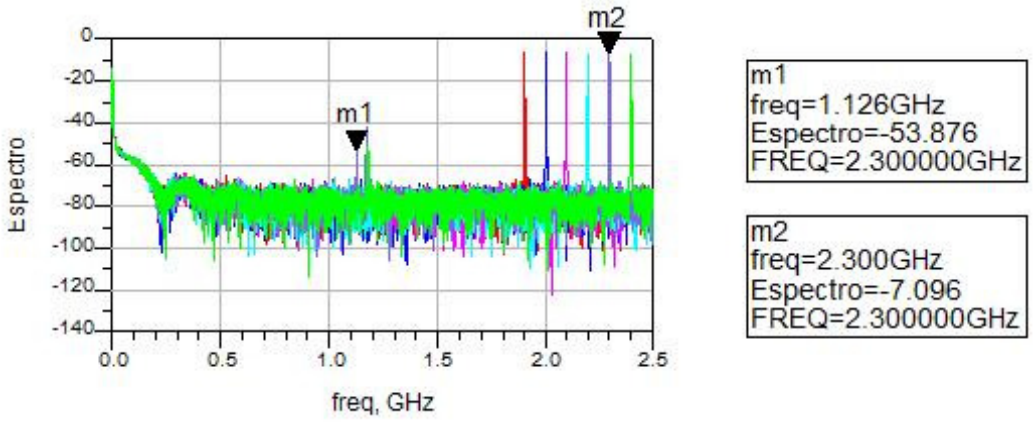

Figura 77: Espectro de saída do divisor#3 para uma potência de entrada de -10 dBm e a freqüência variando de 1,9 a 2,4 GHz.

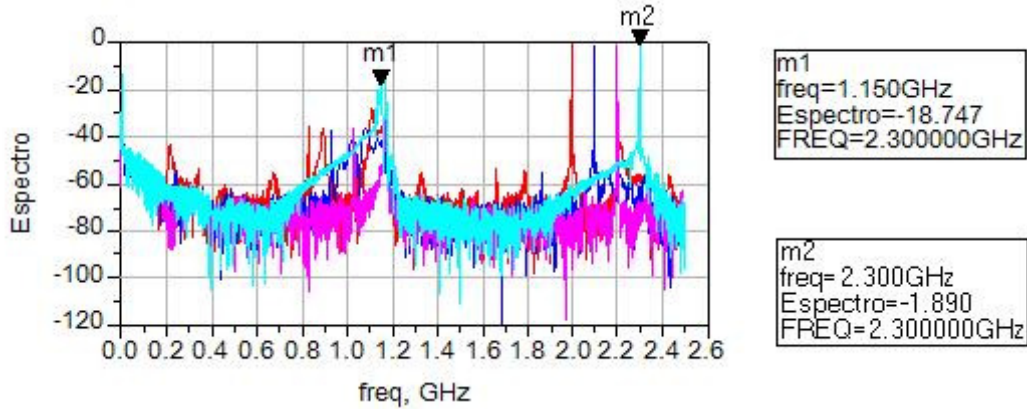

Figura 78: Espectro de saída do divisor#3 para uma potência de entrada de -5 dBm e a freqüência variando de 2,0 a 2,3 GHz.

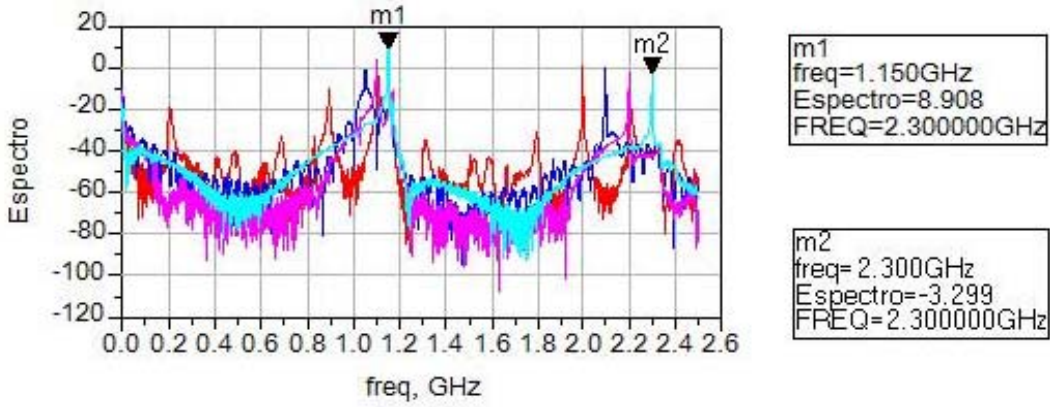

Figura 79: Espectro de saída do divisor#3 para uma potência de entrada de -4 dBm e a freqüência variando de 2,0 a 2,3 GHz.

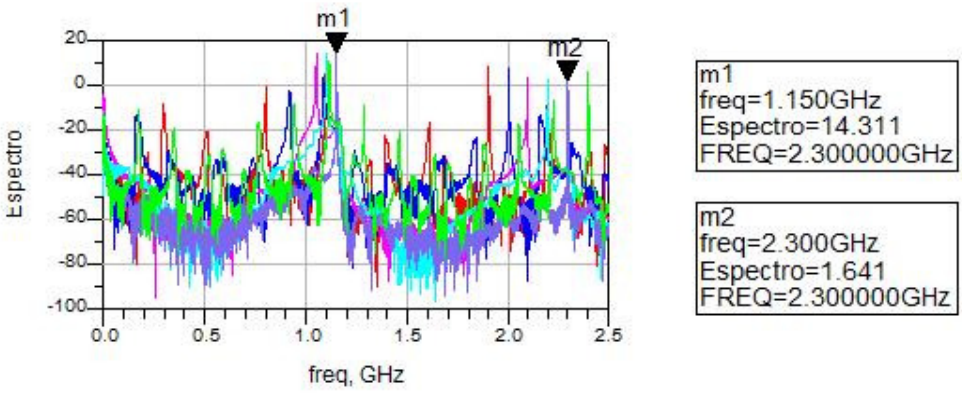

Figura 80: Espectro de saída do divisor#3 para uma potência de entrada de 0 dBm e a freqüência variando de 1,9 a 2,4 GHz.

6.3.4. Resultados obtidos para o divisor#4

Da Figura 81 percebe-se que para uma potência de -9 dBm de entrada o divisor#4 não apresenta divisão de freqüência. O processo de divisão de freqüência inicia-se com uma potência de -7 dBm, na freqüência de 2,1 GHz, sendo observado na Figura 82. Na Figura 83 é apresentada uma banda passante de 300 MHz (2,0 a 2,3 GHz), para uma potência de 0 dBm. Fazendo uma comparação com o divisor#3, divisor#4 tem um limiar de potência para início da geração subharmônica menor (-7 dBm contra -5 dBm). A banda obtida para 0 dBm de entrada foi maior (300 MHz contra 200 MHz) e com níveis de potência do sinal de saída, em ambos os casos, de cerca de 14 dBm. Verifica-se, assim, que o casamento da entrada realizado melhorou tanto a sensibilidade quanto a banda de operação do divisor de freqüência.

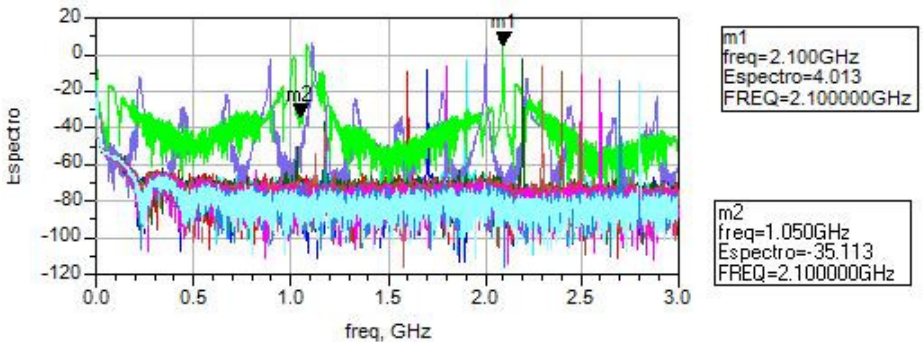

Figura 81: Espectro de saída do divisor#4 para uma potência de entrada de -9 dBm e a freqüência variando de 1,6 a 2,8 GHz.

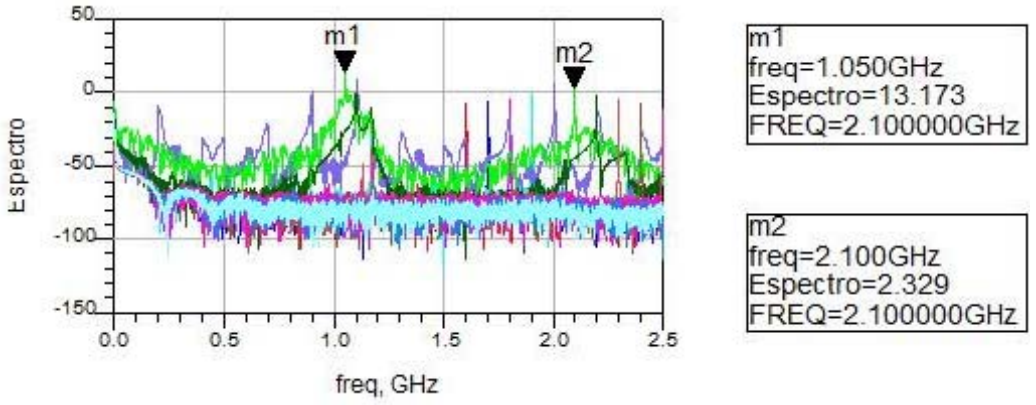

Figura 82: Espectro de saída do divisor#4 para uma potência de entrada de -7 dBm e a freqüência variando de 1,6 a 2,5 GHz.

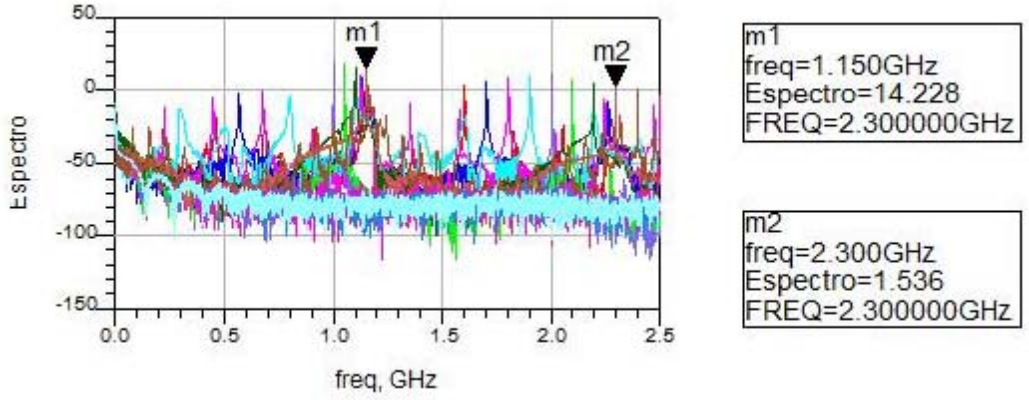

Figura 83: Espectro de saída do divisor#4 para uma potência de entrada de 0 dBm e a freqüência variando de 1,6 a 2,5 GHz.

6.3.5. Resultados obtidos para o divisor#5

Da Figura 84 percebe-se que para uma potência de -10 dBm de entrada o divisor#5 não apresenta divisão de freqüência. O processo de divisão de freqüência inicia-se com uma potência de -1 dBm, na freqüência de 2,0 GHz, sendo observado na Figura 85. Na Figura 87 é verificada que para uma potência de 0 dBm banda o circuito gera subharmômnico em 2,0 GHz, apenas.

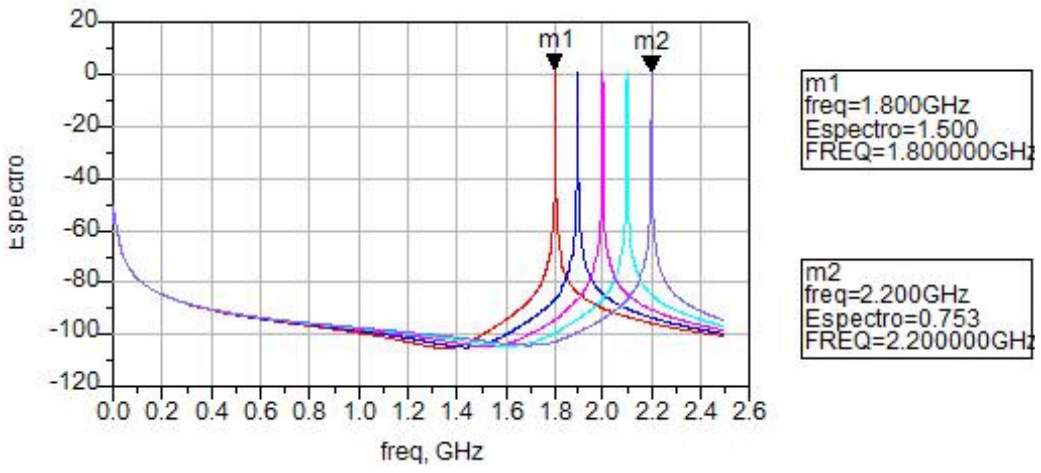

Figura 84: Espectro de saída do divisor#5 para uma potência de entrada de -10 dBm e a freqüência variando de 1,8 a 2,2 GHz.

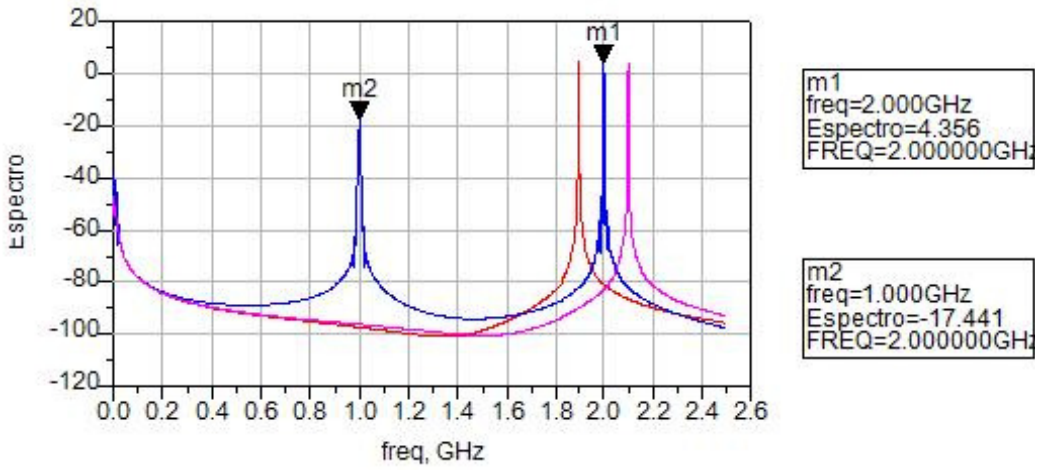

Figura 85: Espectro de saída do divisor#5 para uma potência de entrada de -1 dBm e a freqüência variando de 1,9 a 2,1 GHz.

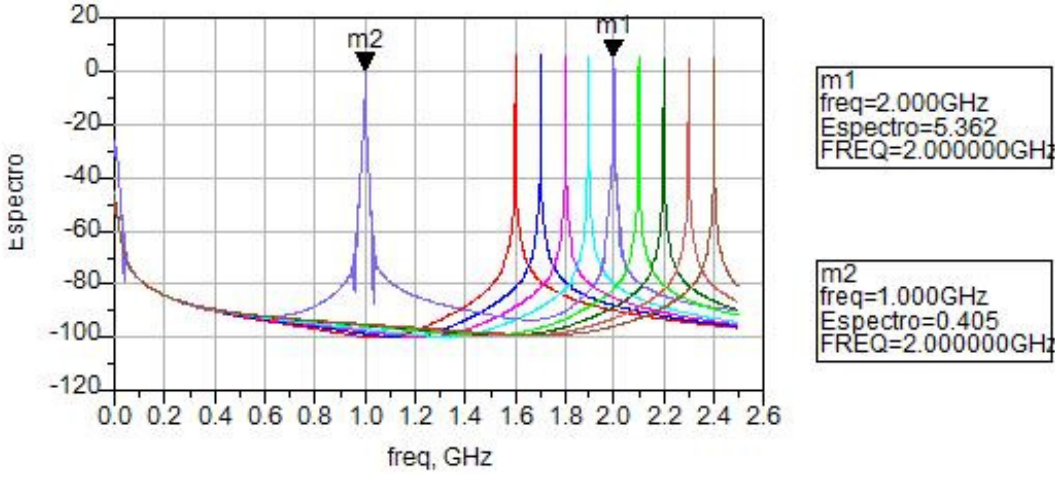

Figura 86: Espectro de saída do divisor#5 para uma potência de entrada de 0 dBm e a freqüência variando de 1,6 a 2,4 GHz.

6.3.6. Resultados obtidos para o divisor#6

Da Figura 87 percebe-se que para uma potência de -10 dBm de entrada o divisor#6 não apresenta divisão de freqüência nas freqüências de 1,9GHz a 2,0 GHz. O processo de divisão de freqüência inicia-se com uma potência de -8 dBm, na freqüência de 2,0 GHz, sendo observado na Figura 88. Na Figura 89 é apresentada uma banda passante de 100 MHz (1,9 a 2,0 GHz), para uma potência de 0 dBm. Fazendo uma comparação com o divisor#5, o divisor#6 tem um limiar de potência para início da geração subharmônica menor (-8 dBm contra -1 dBm). A banda obtida para 0 dBm de entrada foi maior (100 MHz contra a geração apenas em 2,0 GHz) e com níveis de potência do sinal de saída mais elevados (11 dBm contra 5 dBm, para 2,0 GHz). Verifica-se, assim, que o casamento da entrada realizado melhorou tanto a sensibilidade quanto a banda de operação do divisor de freqüência.

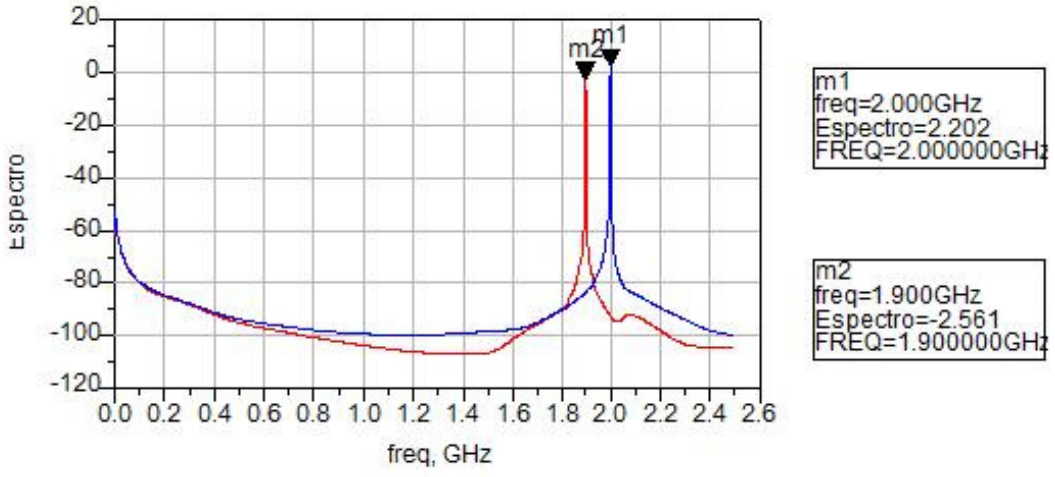

Figura 87: Espectro de saída do divisor#6 para uma potência de entrada de -10 dBm e a freqüência variando de 1,8 a 2,0 GHz.

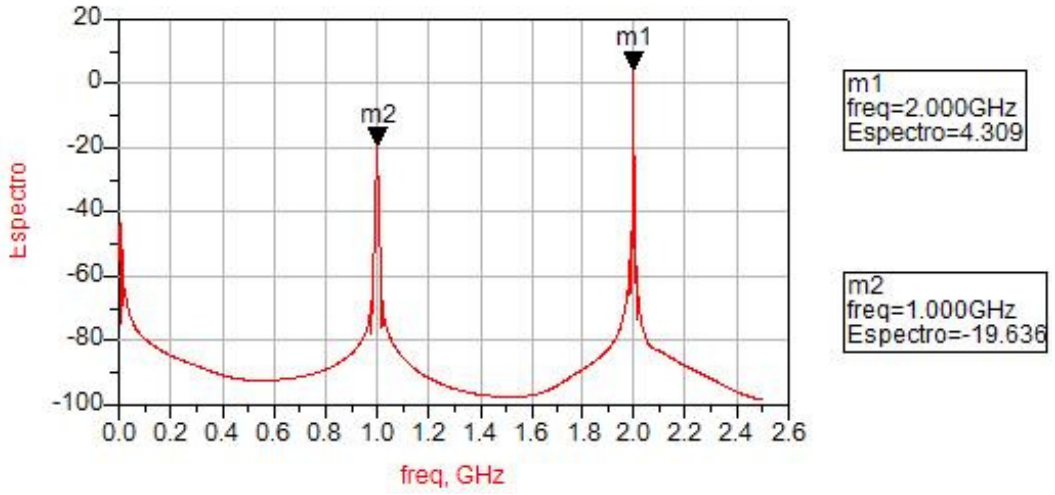

Figura 88: Espectro de saída do divisor#6 para uma potência de entrada de -8 dBm na freqüência 2,0 GHz.

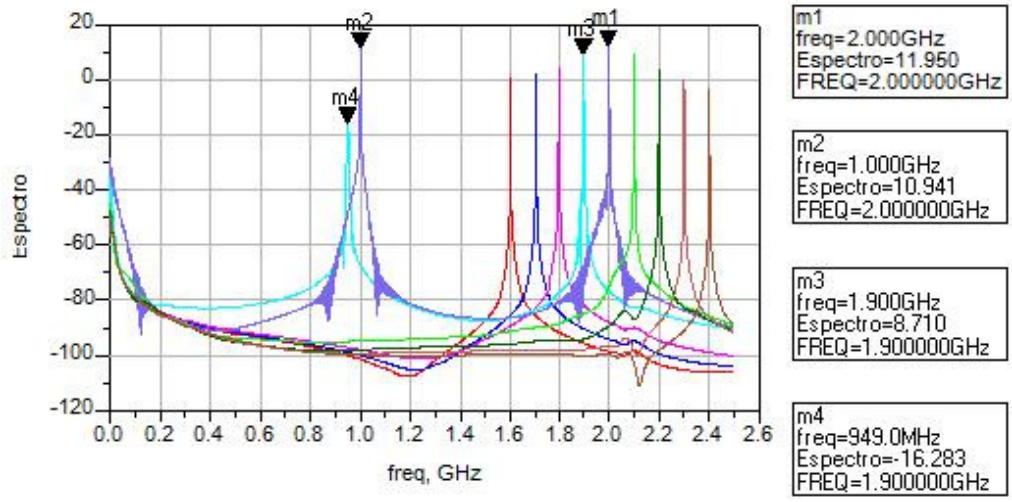

Figura 89: Espectro de saída do divisor#6 para uma potência de entrada de 0 dBm e a freqüência variando de 1,6 a 2,4 GHz.

6.3.7. Resultados obtidos para o divisor#7

A Figura 90 exibe o espectro de saída obtido com o divisor#7, para uma variação da freqüência do gerador entre 1,6 e 2,4 GHz e uma potência de -10 dBm, pode-se verificar que não há geração do subharmônico. Como observado na Figura 91 o processo de divisão inicia-se na freqüência de 2 GHz, para uma potência de entrada de -6 dBm. Da Figura 92 depreende-se que a banda passante do divisor de freqüência é 100 MHz (1,9 a 2,0 GHz), para uma potência de -3 dBm. Como apresentado na Figura 93 para uma potência de 0 dBm, apenas, obtêm-se sinal subharmônico em 1,9 GHz.

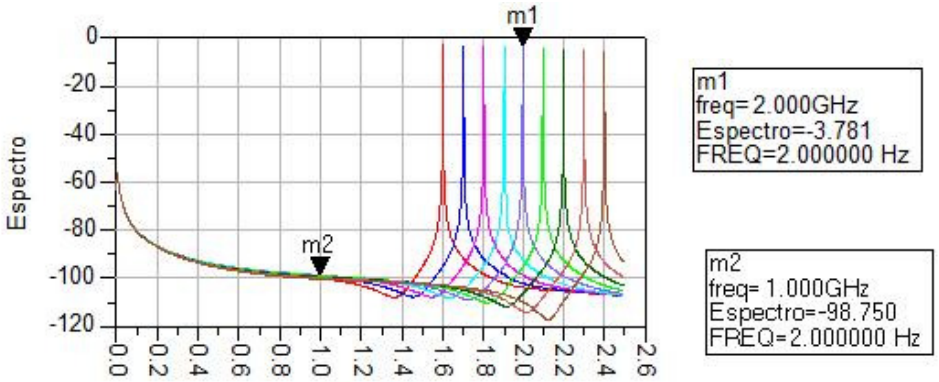

Figura 90: Espectro de saída do divisor#7 para uma potência de entrada de -10 dBm e a freqüência variando de 1,6 a 2,4 GHz.

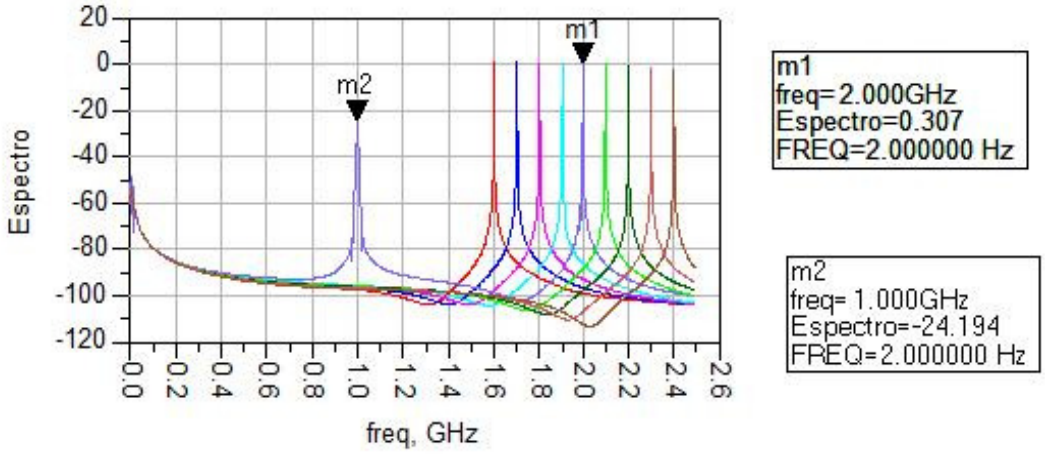

Figura 91: Espectro de saída do divisor#7 para uma potência de entrada de -6 dBm e a freqüência variando de 1,6 a 2,4 GHz.

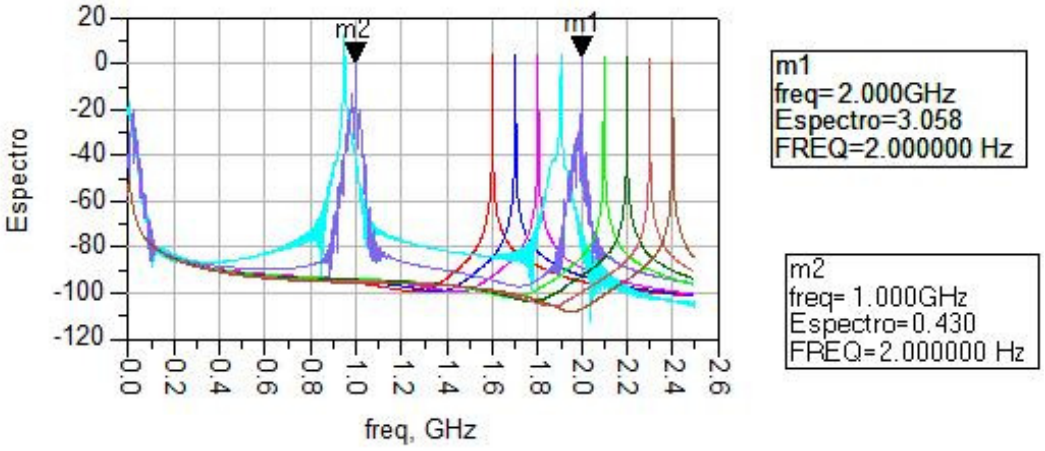

Figura 92: Espectro de saída do divisor#7 para uma potência de entrada de -3 dBm e a freqüência variando de 1,6 a 2,4 GHz.

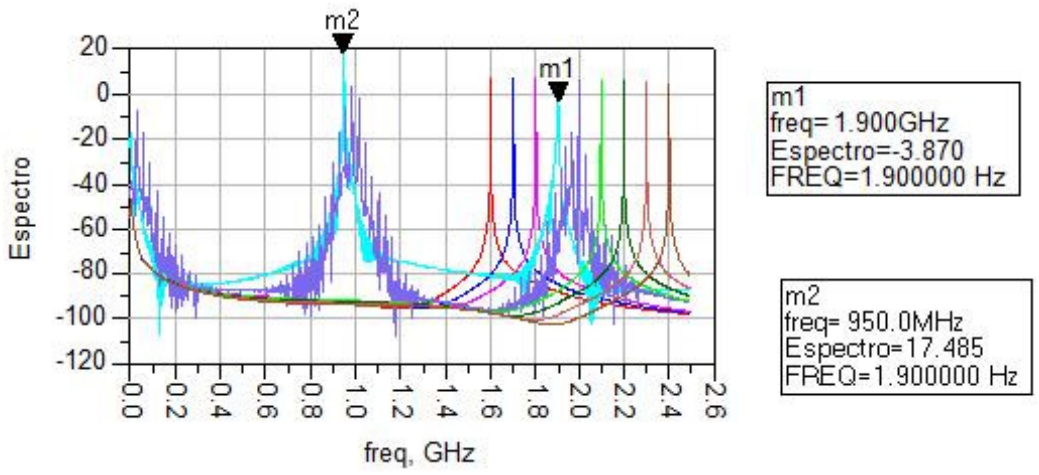

Figura 93: Espectro de saída do divisor#7 para uma potência de entrada de 0 dBm e a freqüência variando de 1,6 a 2,4 GHz.

6.3.8. Resultados obtidos para o divisor#8

A Figura 94 exibe o espectro de saída obtido com o divisor#8, para uma variação da freqüência do gerador entre 1,6 e 2,5 GHz e uma potência de -10 dBm, pode-se observar que não é gerado o subharmônico para este nível de potência de entrada. O processo de divisão inicia-se para -7 dBm em uma freqüência de 2,0 GHz como evidenciado pela Figura 95. A Figura 96 apresenta o espectro do sinal de saída para uma potência de entrada de 0 dBm, a banda de freqüência da entrada observada é de 100 MHz (1,9 a 2,0 GHz). Fazendo uma comparação com o divisor#7, o divisor#8 tem um limiar de potência para início da geração subharmônica menor (-7 dBm contra -6 dBm). A banda obtida foi semelhante, variando com a potência de entrada para o caso do divisor#7, chegando a cerca de 100 MHz (1,9 a 2,0 GHz). Porém, para um mesmo nível de potência entrada o nível de saída do divisor#8 foi bem maior. Verifica-se, assim, que o casamento da entrada realizado melhorou tanto a sensibilidade quanto o nível de potência de saída (ganho de conversão).

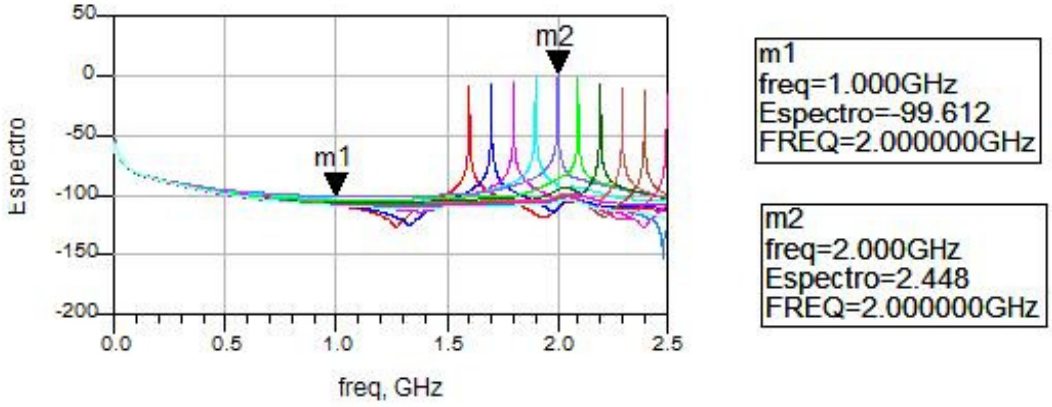

Figura 94: Espectro de saída do divisor#8 para uma potência de entrada de –10 dBm e a freqüência variando de 1,6 a 2,5 GHz.

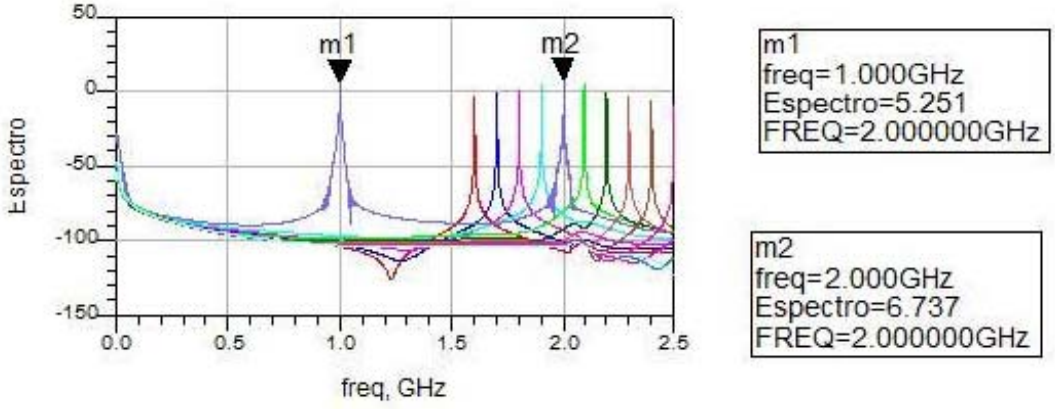

Figura 95: Espectro de saída do divisor#8 para uma potência de entrada de –7 dBm e a freqüência variando de 1,6 a 2,5 GHz.

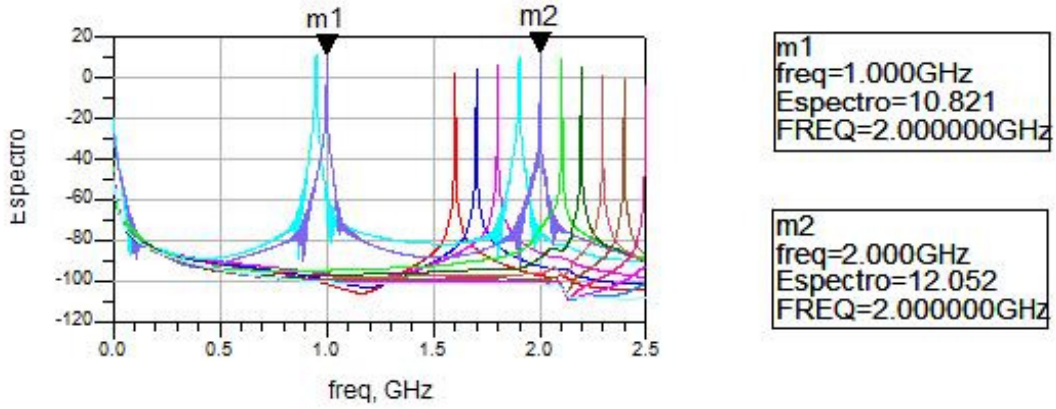

Figura 96: Espectro de saída do divisor#8 para uma potência de entrada de 0 dBm e freqüência variando de 1,6 a 2,5 GHz.

6.3.9. Resultados obtidos para o divisor#9

A Figura 97 exibe o espectro de saída obtido com o divisor#9, para uma variação da freqüência do gerador entre 2,2 e 2,5 GHz e uma potência de -10 dBm, pode-se observar que não é gerado o subharmônico para este nível de potência de entrada. Para uma potência de entrada de -6 dBm não é possível verificar-se a existência de subharmônico, como apreende-se da Figura 98. O processo de divisão inicia-se para -4 dBm em uma freqüência de 2,4 GHz como evidenciado pela Figura 99. A Figura 100 apresenta o espectro do sinal de saída para uma potência de entrada de 0 dBm, a banda de freqüência da entrada observada é de 200 MHz (2,2 a 2,4 GHz).

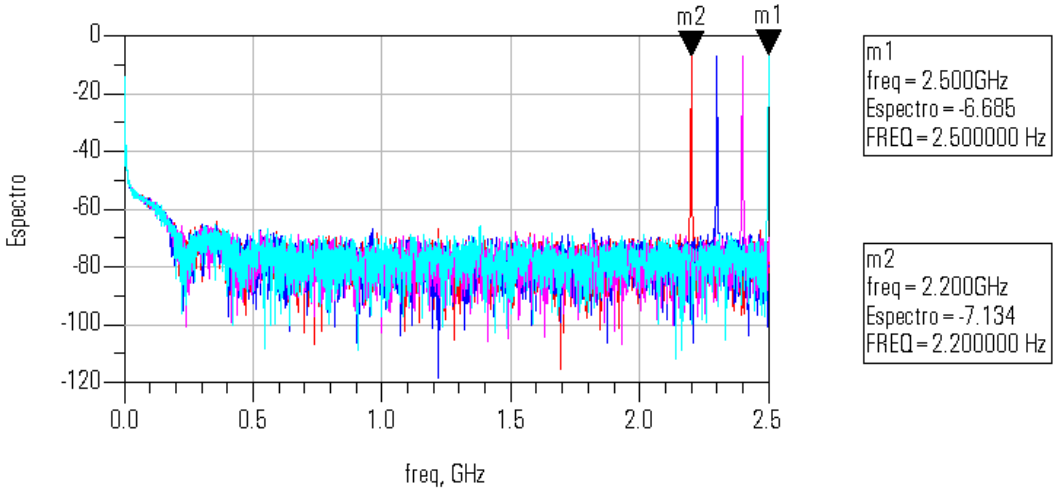

Figura 97: Espectro de saída do divisor#9 para uma potência de entrada de –10 dBm e a freqüência variando de 2,2 a 2,5 GHz.

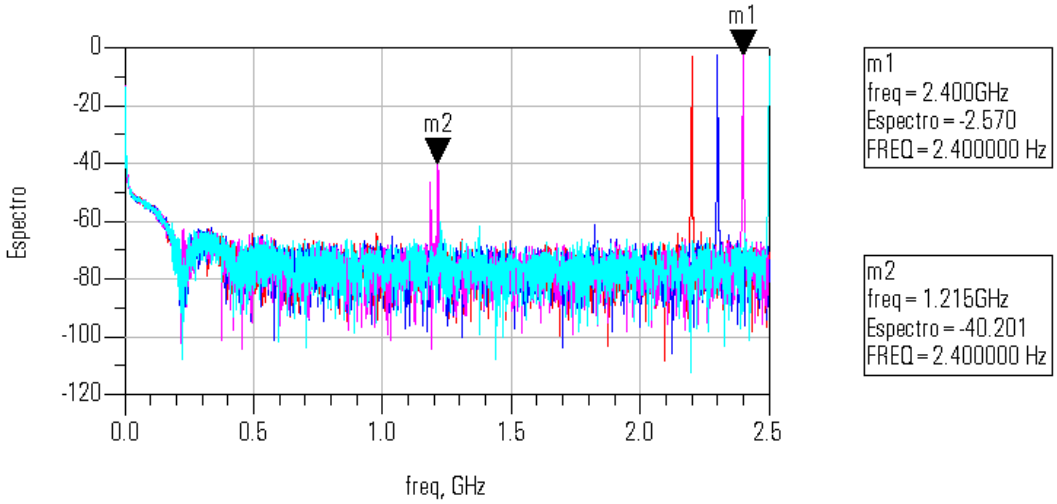

Figura 98: Espectro de saída do divisor#9 para uma potência de entrada de -6 dBm e a freqüência variando de 2,2 a 2,5 GHz.

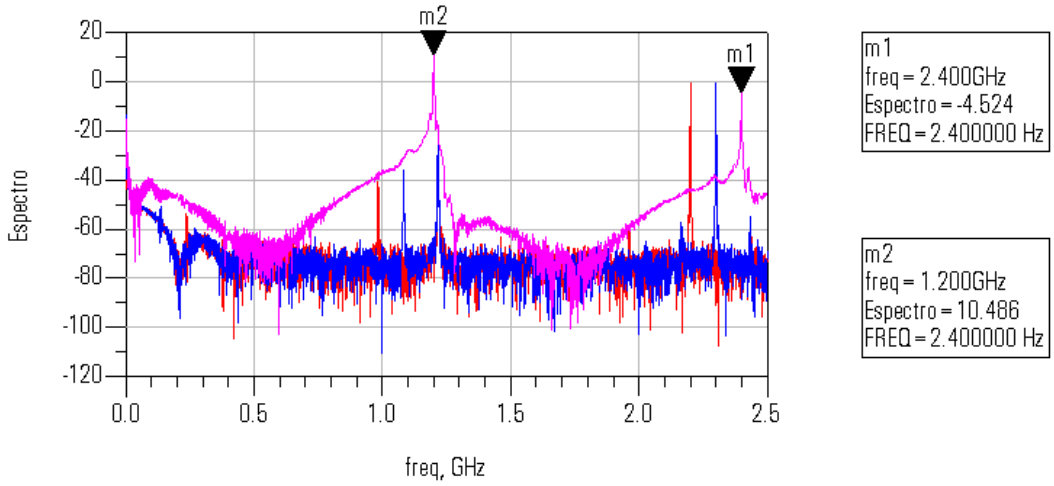

Figura 99: Espectro de saída do divisor#9 para uma potência de entrada de -4 dBm e a freqüência variando de 2,2 a 2,4 GHz.

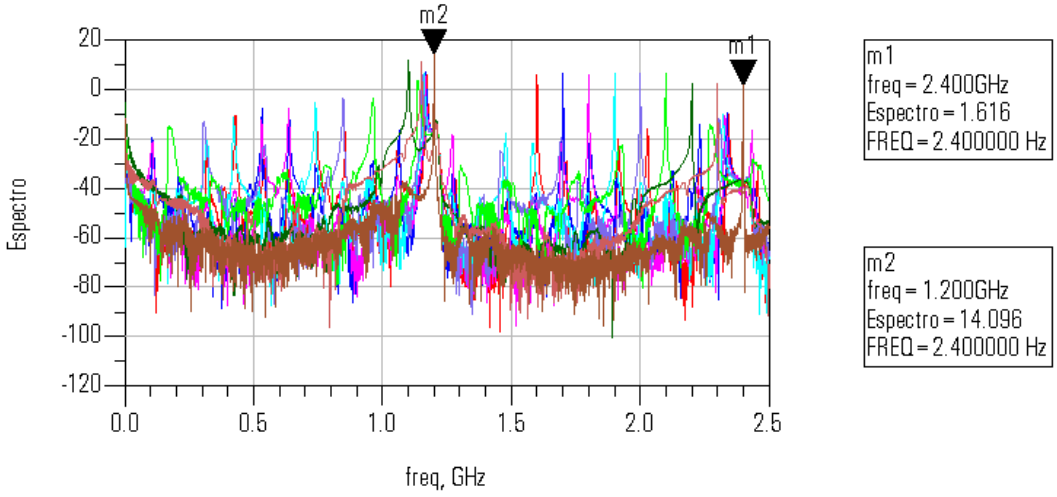

Figura 100: Espectro de saída do divisor#9 para uma potência de entrada de 0 dBm e a freqüência variando de 1,6 a 2,4 GHz.

6.3.10. Resultados obtidos para o divisor#10

A Figura 101 exibe o espectro de saída obtido com o divisor#10, para uma freqüência de 2,0 e uma potência de -30 dBm, pode-se observar que não é gerado o subharmônico para este nível de potência de entrada. Para uma potência de entrada de -10 dBm não é possível verificar-se a existência de subharmônico, como apreende-se da Figura 102. Contudo, foi observada uma oscilação em 1165 MHz, para uma freqüência de entrada de 2,1 GHz. A Figura 103 apresenta o espectro do sinal de saída para uma potência de entrada de 0 dBm, a banda de freqüência da entrada observada é de 100 MHz (2,0 a 2,1 GHz). Com uma potência de 10 dBm a banda alcançada é de 300 MHz (2,1 a 2,4 GHz), que é mais elevada que aquela obtida com 0 dBm, isto se explica, pois para $V_{ds} = 3V$ e $V_{gs} = -0{,}6V$, a impedância de entrada varia muito com o nível de potência, como já apresentado. Assim, comparando-se o divisor#10, com o divisor#9, observa-se que para um mesmo conjunto potência e freqüência de entrada, a potência do sinal de saída é maior para o divisor#10, mostrando que o casamento do circuito de entrada levou a um aumento do ganho de conversão, como era de se esperar.

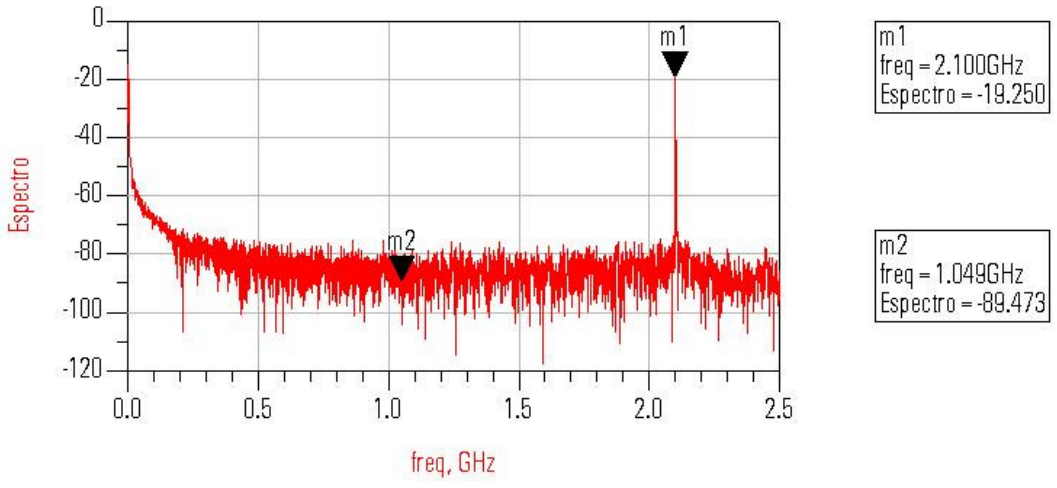

Figura 101: Espectro de saída do divisor#10 para uma potência de entrada de -30 dBm e freqüência de 2,1 GHz.

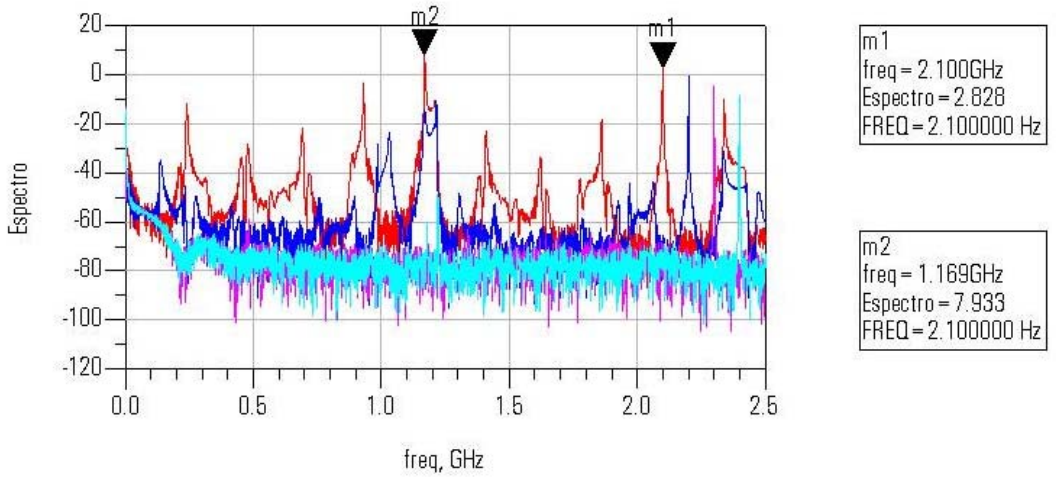

Figura 102: Espectro de saída do divisor#10 para uma potência de entrada de -10 dBm e freqüência variando de 2,1 a 2,4 GHz, com uma oscilação em 1165 MHz.

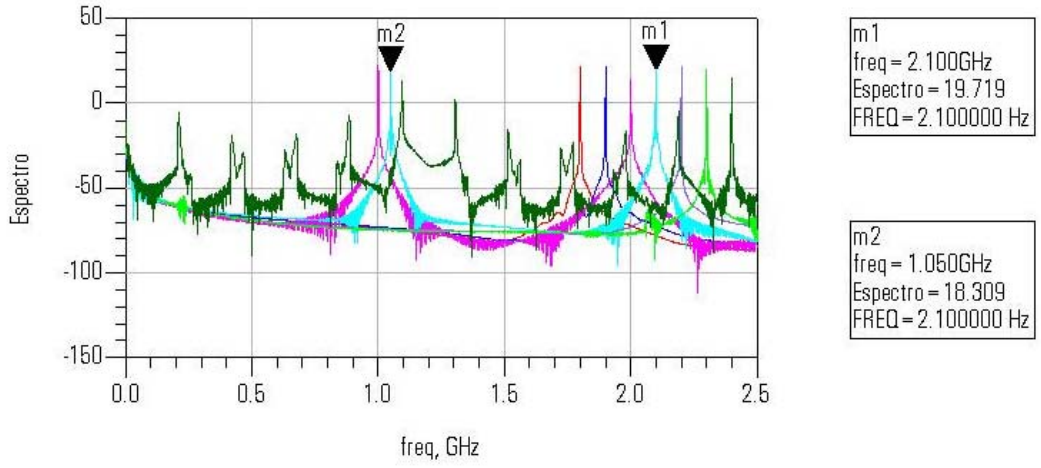

Figura 103: Espectro de saída do divisor#10 para uma potência de entrada de 0 dBm e a freqüência variando de 1,8 a 2,4 GHz.

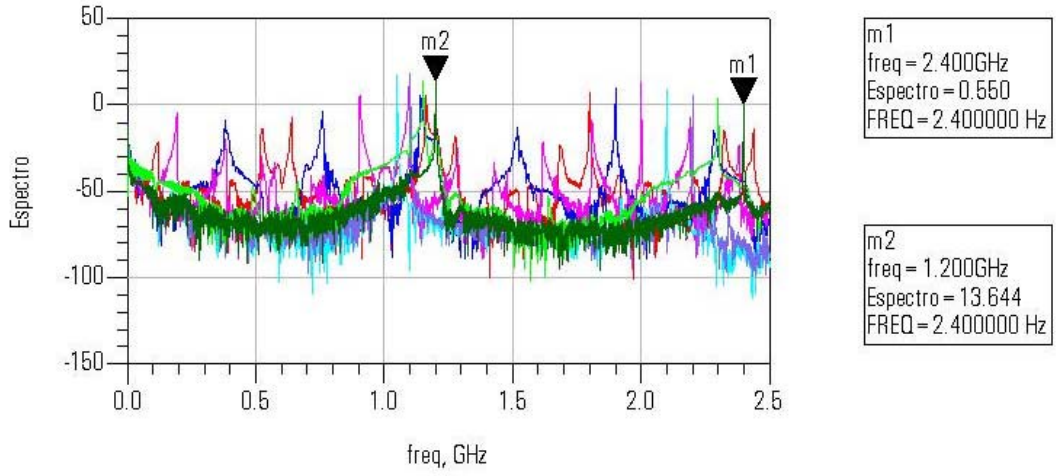

Figura 104: Espectro de saída do divisor#10 para uma potência de entrada de 10 dBm e a freqüência variando de 1,6 a 2,4 GHz.

6.3.11. Resultados obtidos para o divisor#11

A Figura 105 exibe o espectro de saída obtido com o divisor#10, para uma freqüência de 2,1 e uma potência de -30 dBm, pode-se observar que não é gerado o subharmônico para este nível de potência de entrada. Para uma potência de entrada de -12 dBm não é possível verificar-se a existência de subharmônico, como apreende-se da Figura 106. O processo de geração subharmônico inicia-se para uma potência de -10 dBm e uma freqüência de 2,3 GHz, como visto na Figura 107. A Figura 108 apresenta o espectro do sinal de saída para uma potência

de entrada de 0 dBm, a banda de freqüência da entrada observada é de 200 MHz (2,1 a 2,3 GHz).

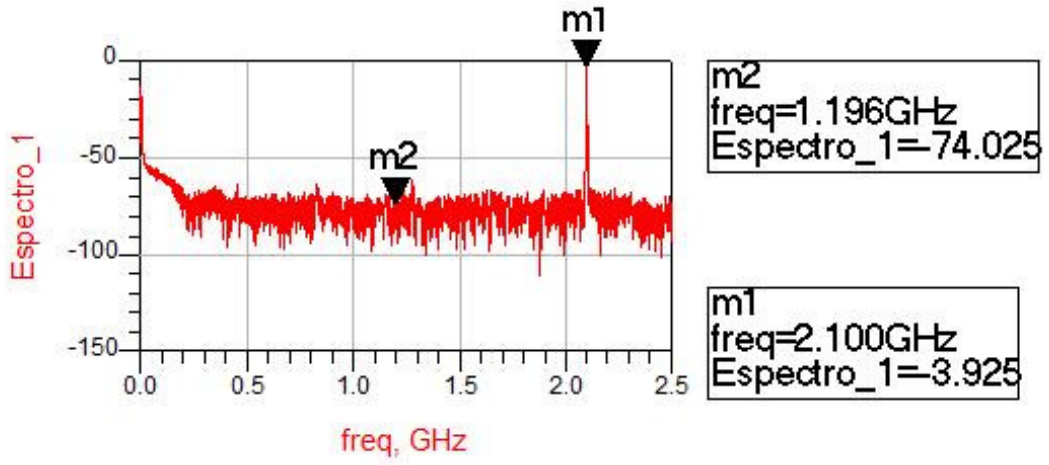

Figura 105: Espectro de saída do divisor#11 para uma potência de entrada de -30 dBm e freqüência de 2,1 GHz.

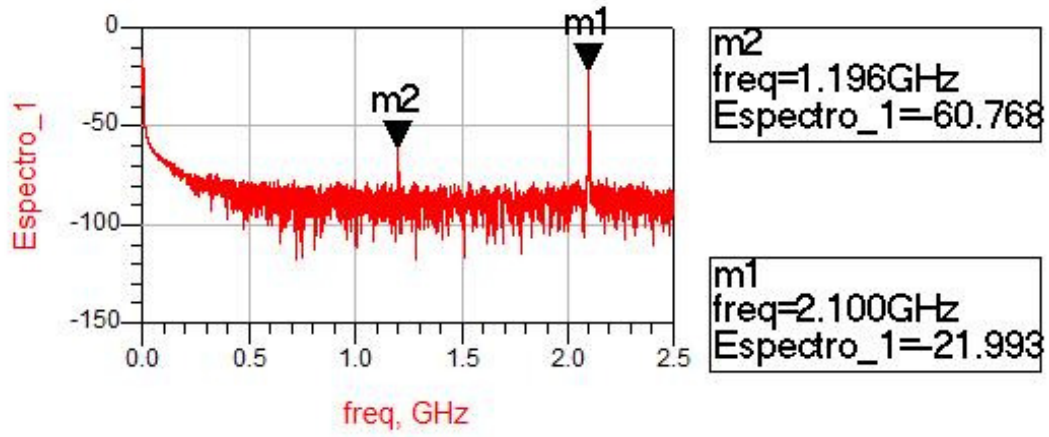

Figura 106: Espectro de saída do divisor#11 para uma potência de entrada de -12 dBm e freqüência de 2,1 GHz.

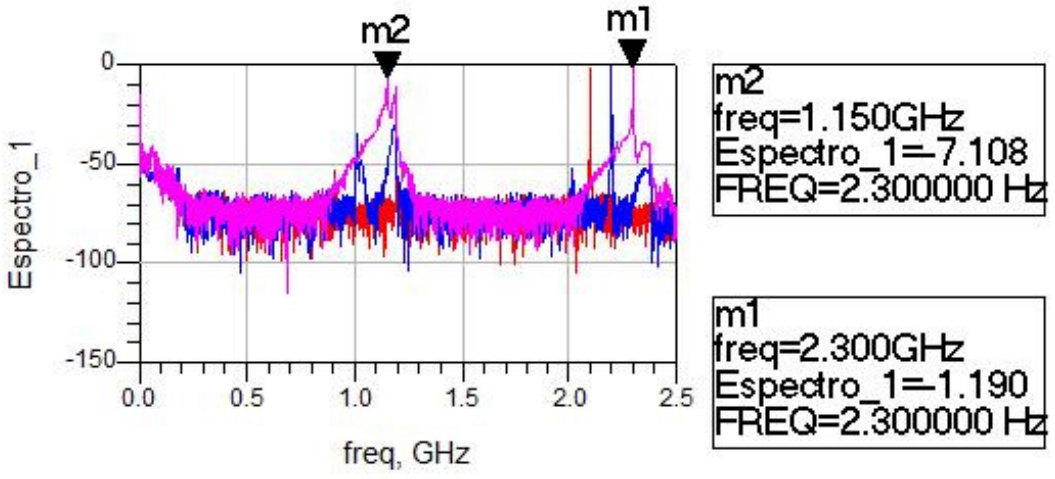

Figura 107: Espectro de saída do divisor#11 para uma potência de entrada de -10 dBm e a freqüência variando de 2,1 a 2,3 GHz.

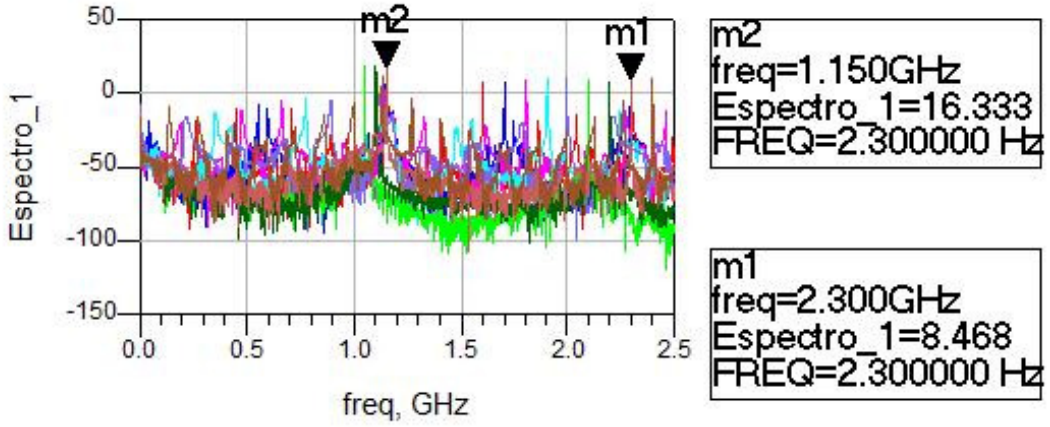

Figura 108: Espectro de saída do divisor#11 para uma potência de entrada de 0 dBm e a freqüência variando de 1,6 a 2,4 GHz.

6.3.12. Resultados obtidos para o divisor#12

A Figura 109 exibe o espectro de saída obtido com o divisor#12, para uma variação da freqüência do gerador entre 1,6 e 2,5 GHz e uma potência de -30 dBm, pode-se observar que não é gerado o subharmônico para este nível de potência de entrada. O processo de divisão inicia-se para uma potência menor que -8 dBm nas freqüências de 2,2 e 2,3 GHz como evidenciado pela Figura 110. A Figura 111 apresenta o espectro do sinal de saída para uma potência de entrada de 0 dBm, a banda de freqüência da entrada observada é de 200 MHz (2,1 a 2,3

GHz). Fazendo uma análise comparativa entre o divisor#12 e o divisor#11 verifica-se que o casamento do circuito de entrada não afetou o desempenho deste.

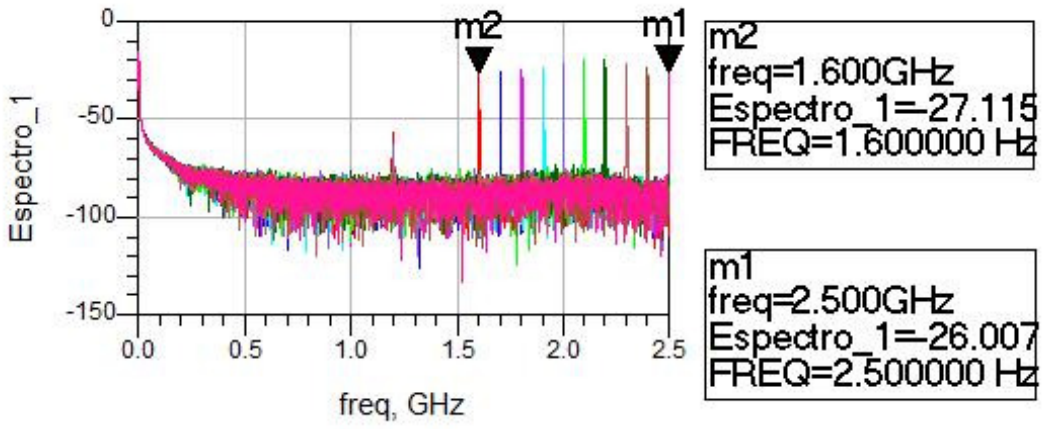

Figura 109: Espectro de saída do divisor#12 para uma potência de entrada de -30 dBm e freqüência variando de 1,6 a 2,5 GHz.

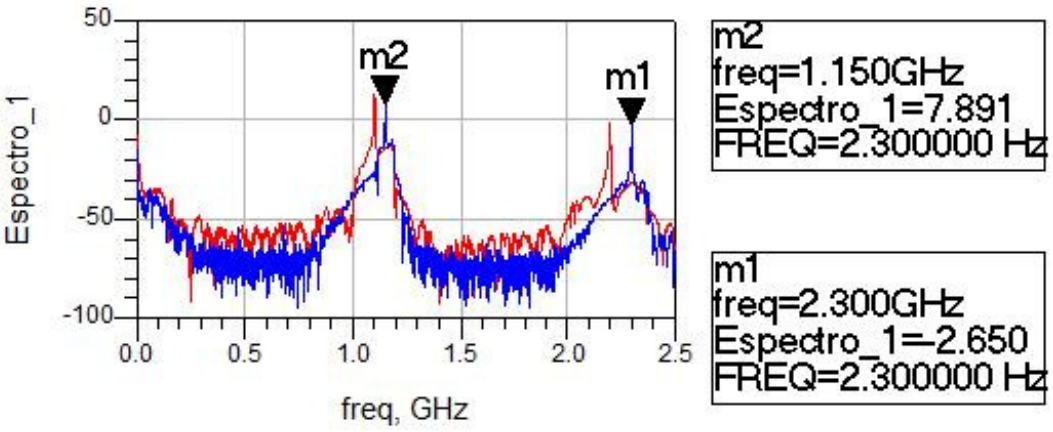

Figura 110: Espectro de saída do divisor#12 para uma potência de entrada de -8 dBm e freqüência variando de 2,2 a 2,3 GHz.

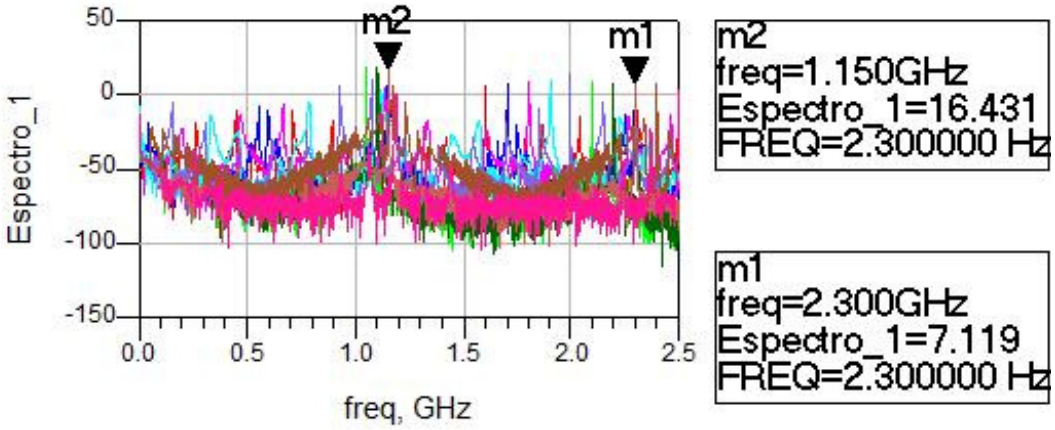

Figura 111: Espectro de saída do divisor#12 para uma potência de entrada de 0 dBm e freqüência variando de 1,6 a 2,5 GHz.

6.3.13. Resultados obtidos para o divisor#13

A Figura 112 exibe o espectro de saída obtido com o divisor#13, para uma variação da freqüência do gerador entre 1,6 e 2,4 GHz e uma potência de -6 dBm, pode-se observar que não é gerado o subharmônico para este nível de potência de entrada. O processo de divisão inicia-se para -2 dBm em uma freqüência de 2,0 GHz como evidenciado pela Figura 113. A Figura 114 apresenta o espectro do sinal de saída para uma potência de entrada de 0 dBm, apenas a freqüência de 2,0 GHz gera subharmônico, nestas condições.

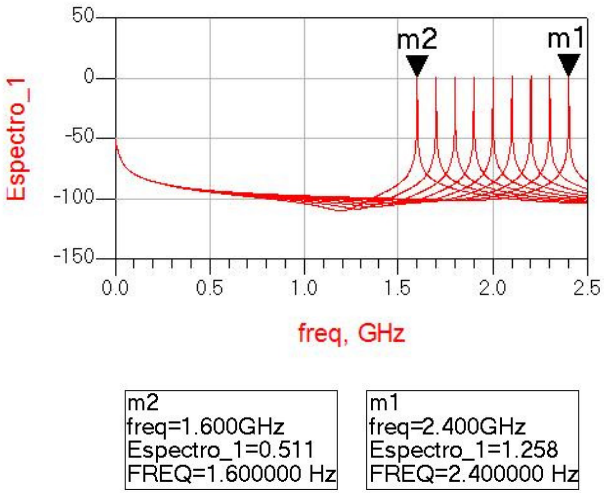

Figura 112: Espectro de saída do divisor#13 para uma potência de entrada de -6 dBm e a freqüência variando de 1,6 a 2,4 GHz.

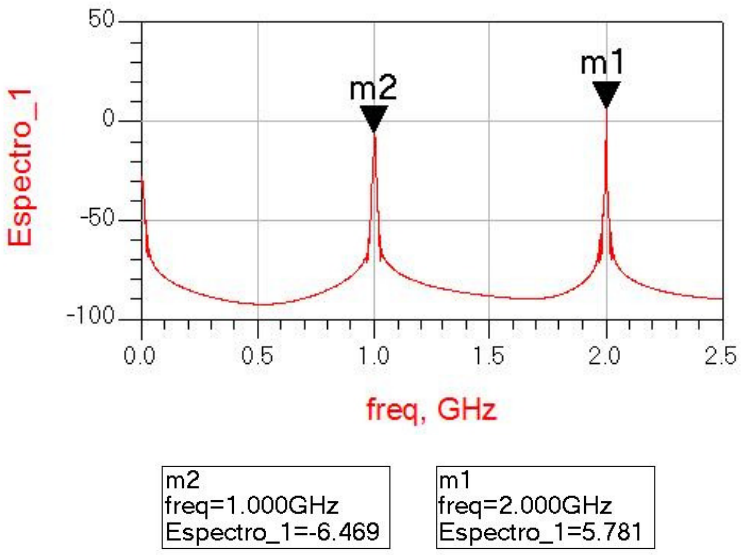

Figura 113: Espectro de saída do divisor#13 para uma potência de entrada de -2 dBm na freqüência de 2,0 GHz.

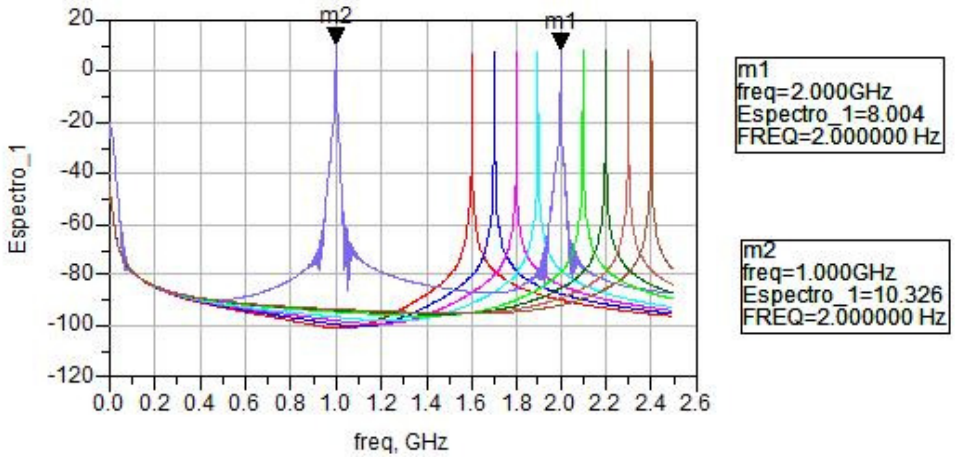

Figura 114: Espectro de saída do divisor#13 para uma potência de entrada de 0 dBm e a freqüência variando de 1,6 a 2,4 GHz.

6.3.14. Resultados obtidos para o divisor#14

A Figura 115 exibe o espectro de saída obtido com o divisor#14, para uma variação da freqüência do gerador entre 1,8 e 2,1 GHz e uma potência de -10 dBm, pode-se observar que não é gerado o subharmônico para este nível de potência de entrada. O processo de divisão inicia-se para -8 dBm em uma freqüência de 2,0 GHz como evidenciado pela Figura 116. Para uma potência de

-3 dBm o espectro pode ser visto na Figura 117, apenas a freqüência de 2,0 GHz gera subharmônico, nestas condições. A Figura 118 apresenta o espectro do sinal de saída para uma potência de entrada de 0 dBm, a banda de freqüência da entrada observada é de 100 MHz (1,9 a 2,0 GHz). Assim, comparando-se o divisor#14, com o divisor#13, observa-se que para um mesmo conjunto potência e freqüência de entrada, a potência do sinal de saída é maior para o divisor#14 e para a potência de entrada igual a 0 dBm o divisor#14 apresenta uma maior banda passante, mostrando que o casamento do circuito de entrada levou a um aumento do ganho de conversão e na banda passante, como era de se esperar.

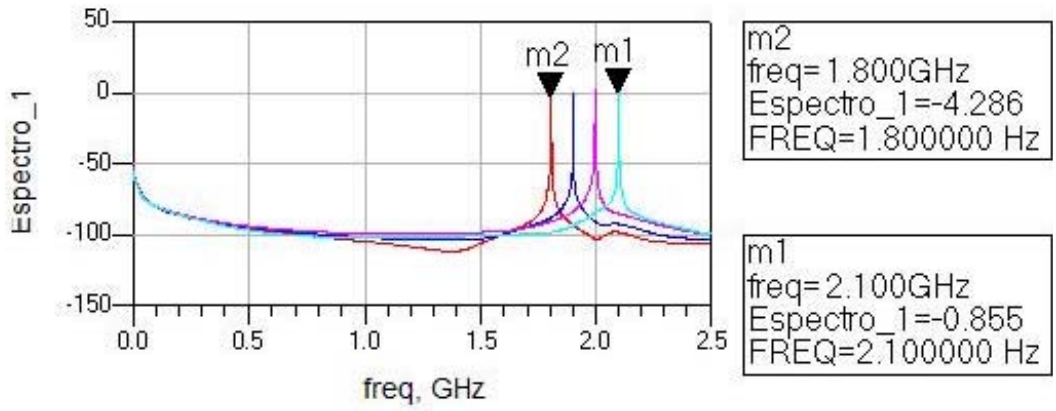

Figura 115: Espectro de saída do divisor#14 para uma potência de entrada de -10 dBm e freqüência variando de 1,8 a 2,1 GHz.

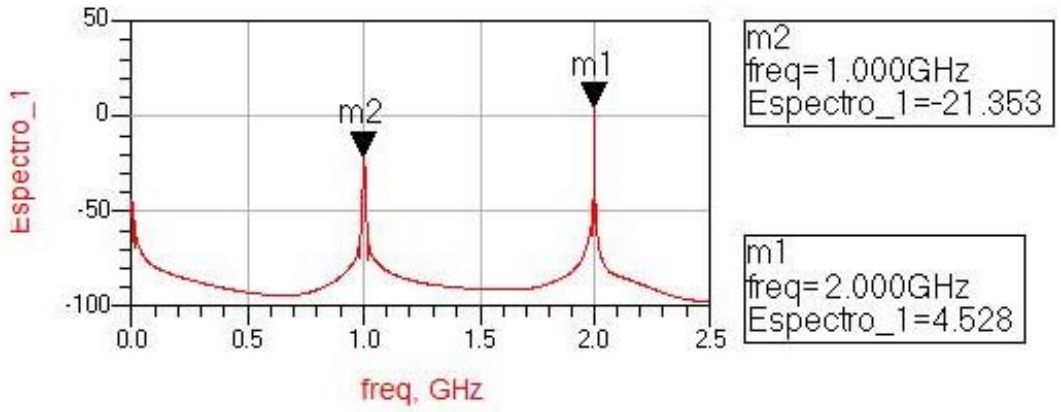

Figura 116: Espectro de saída do divisor#14 para uma potência de entrada de -8 dBm na freqüência de 2,0 GHz.

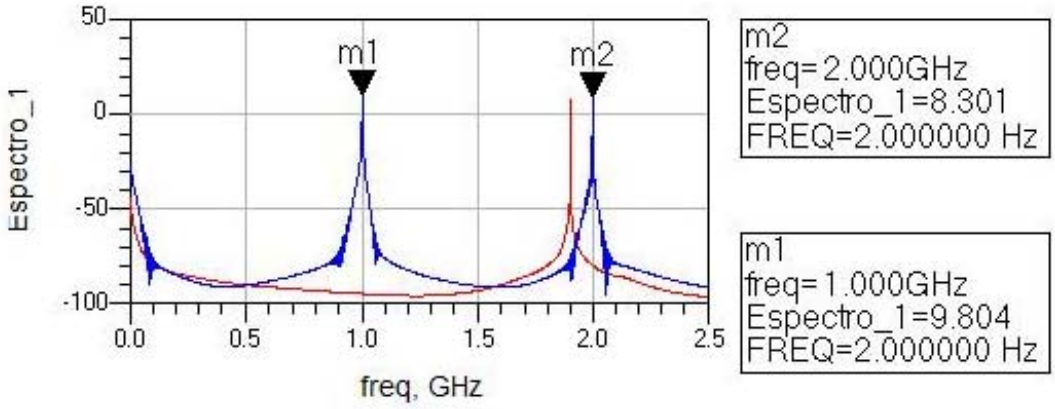

Figura 117: Espectro de saída do divisor#14 para uma potência de entrada de -3 dBm e freqüência variando de 1,9 e 2,0 GHz.

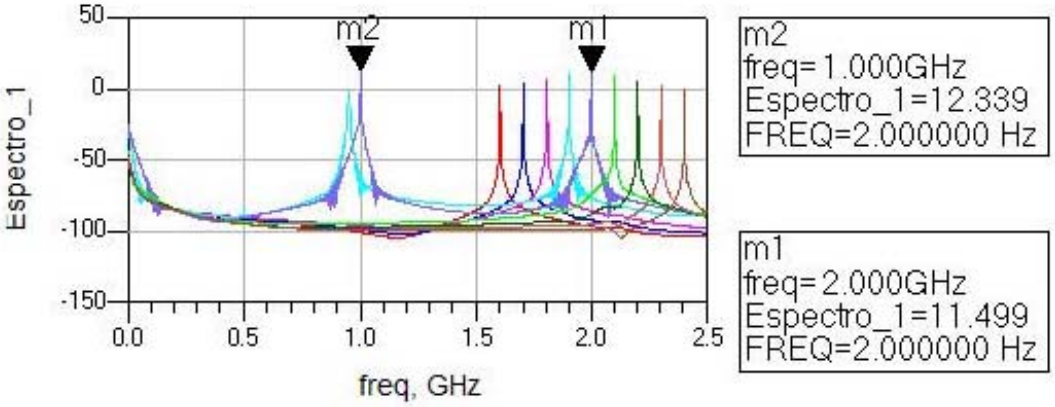

Figura 118: Espectro de saída do divisor#14 para uma potência de entrada de 0 dBm e freqüência variando de 1,6 a 2,4 GHz.

6.3.15. Resultados obtidos para o divisor#15

A Figura 119 exibe o espectro de saída obtido com o divisor#15, para uma variação da freqüência do gerador entre 1,6 e 2,4 GHz e uma potência de -10 dBm, pode-se observar que não é gerado o subharmônico para este nível de potência de entrada. O processo de divisão inicia-se para -3 dBm em uma freqüência de 2,1 GHz como evidenciado pela Figura 120. Para uma potência de 0 dBm o espectro pode ser visto na Figura 121, apenas a freqüência de 2,1 GHz gera subharmônico, nestas condições. A Figura 122 apresenta o espectro do sinal de saída para uma potência de entrada de 10 dBm, a banda de freqüência da

entrada observada é de 300 MHz (1,8 a 2,1 GHz), contudo, pode-se notar que não é gerado o subharmônico para a freqüência de 2,0 GHz.

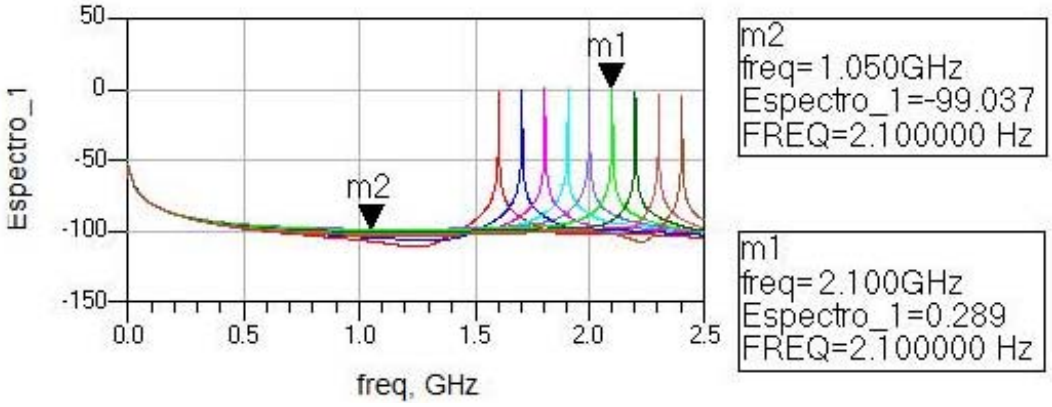

Figura 119: Espectro de saída do divisor#15 para uma potência de entrada de -10 dBm e freqüência variando de 1,6 a 2,4 GHz.

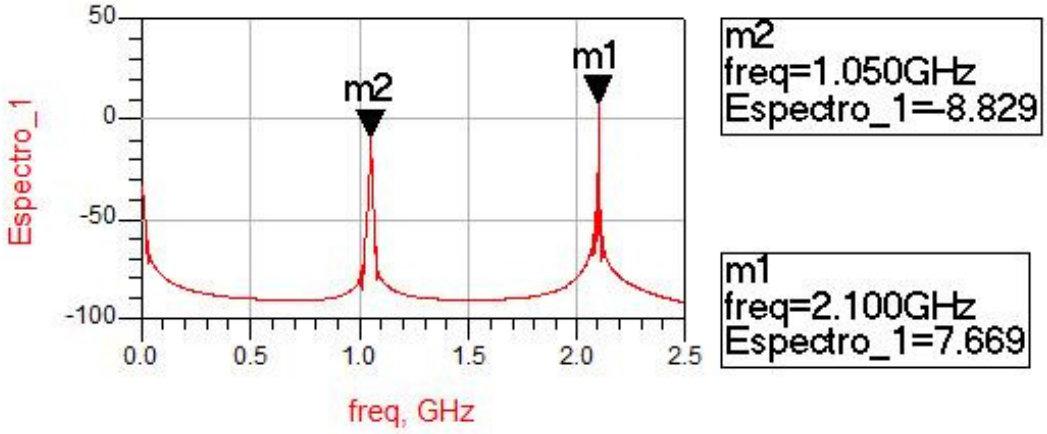

Figura 120: Espectro de saída do divisor#15 para uma potência de entrada de -3 dBm na freqüência de 2,1 GHz.

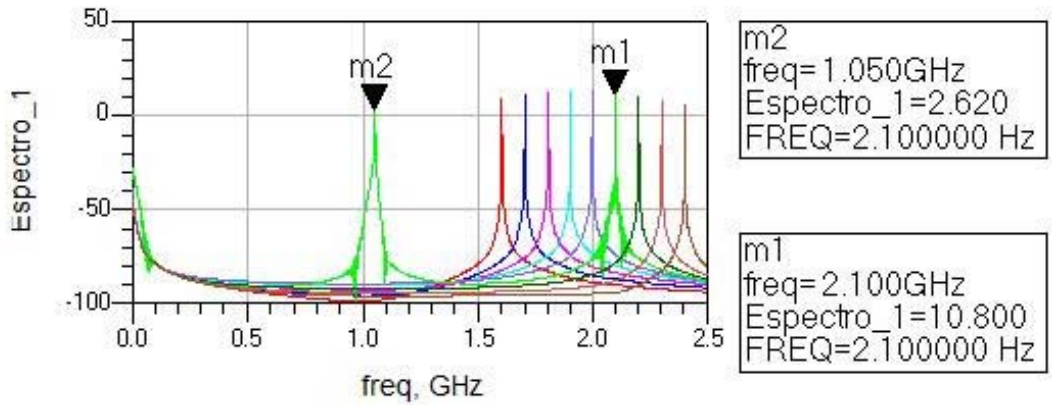

Figura 121: Espectro de saída do divisor#15 para uma potência de entrada de 0 dBm e freqüência variando de 1,6 a 2,4 GHz.

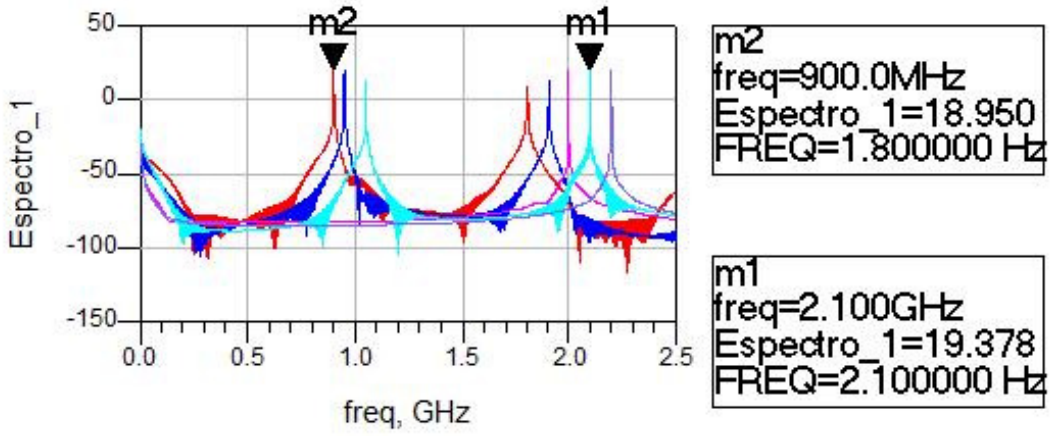

Figura 122: Espectro de saída do divisor#15 para uma potência de entrada de 10 dBm e a freqüência variando 1,8 a 2,2 GHz.

6.3.16. Resultados obtidos para o divisor#16

A Figura 123 exibe o espectro de saída obtido com o divisor#16, para uma variação da freqüência do gerador entre 1,6 e 2,4 GHz e uma potência de -10 dBm, pode-se observar que não é gerado o subharmônico para este nível de potência de entrada. O processo de divisão inicia-se para -3 dBm em uma freqüência de 2,1 GHz como evidenciado pela Figura 124. Para uma potência de 0 dBm o espectro pode ser visto na Figura 125, apenas a freqüência de 2,1 GHz gera subharmônico, nestas condições. A Figura 122 apresenta o espectro do sinal de saída para uma potência de entrada de 10 dBm, a banda de freqüência da

entrada observada é de 200 MHz (1,9 a 2,1 GHz), contudo, pode-se notar que não é gerado o subharmônico para a freqüência de 2,0 GHz. Fazendo-se uma comparação entre o divisor#16 e o divisor#15, verifica-se que o casamento do circuito de entrada não apresentou, neste caso, muita efetividade. Ambos os circuitos apresentam na simulação, freqüências para as quais o fenômeno de divisão não ocorre, muito embora, este esteja presente, sob as mesmas condições, para freqüências maiores e menores que estas. Este é um comportamento indesejável.

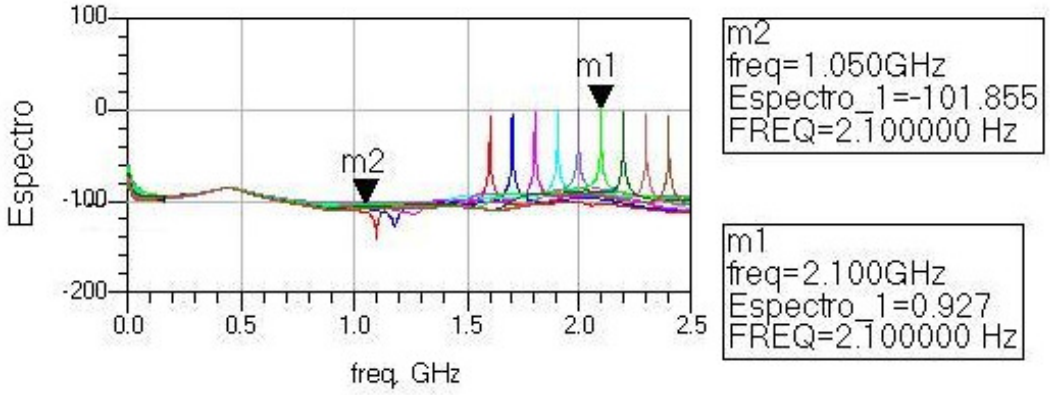

Figura 123: Espectro de saída do divisor#16 para uma potência de entrada de -10 dBm e freqüência variando de 1,6 a 2,4 GHz.

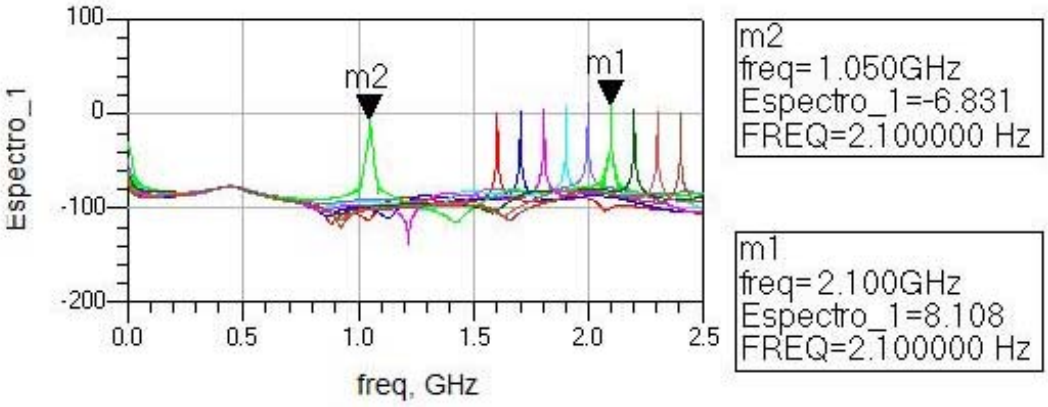

Figura 124: Espectro de saída do divisor#16 para uma potência de entrada de -3 dBm e freqüência variando de 1,6 a 2,4 GHz.

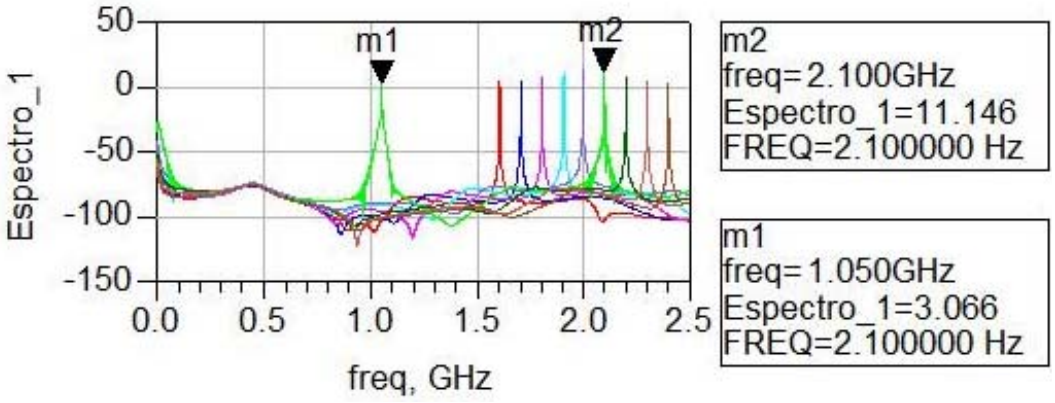

Figura 125: Espectro de saída do divisor#16 para uma potência de entrada de 0 dBm e freqüência variando de 1,6 a 2,4 GHz.

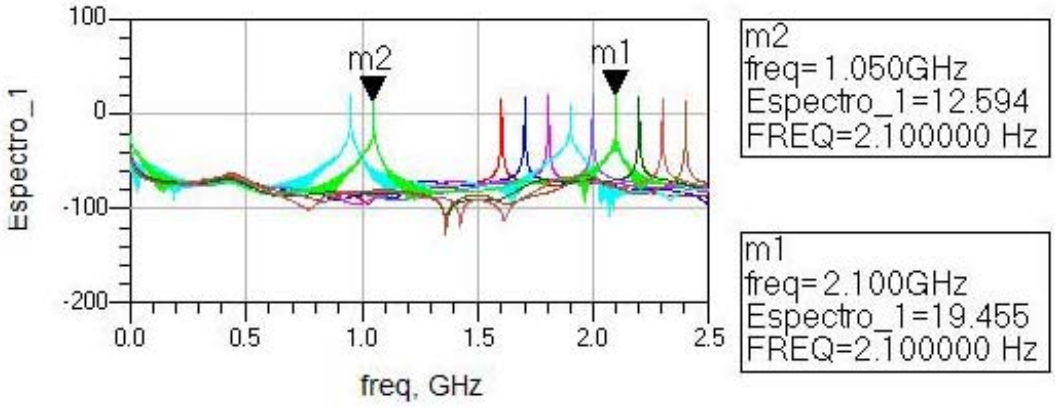

Figura 126: Espectro de saída do divisor#16 para uma potência de entrada de 10 dBm e freqüência variando de 1,6 a 2,4 GHz.

6.4. Realização experimental dos circuitos divisores de freqüência

A seguir serão apresentados os resultados experimentais obtidos com alguns circuitos divisores de freqüência realizados em substrato RT5880 da Rogers. Porém, é necessário se dizer que a maioria destes não se encontra entre aqueles apresentados até o momento, no desenvolvimento deste trabalho, pois foram realizados com base num modelo impreciso do PHEMT FPD1500SOT89, que o fabricante oferece no seu site oficial. Contudo, como os testes iniciais mostraram discordâncias com o resultado da simulação (bem maiores que aquelas evidenciadas no item 6.2 deste capítulo). Assim, o fabricante foi, reiteradamente, questionado quanto à validade do modelo por ele disponibilizado no seu site, após

o que foi fornecido através de correio eletrônico, um novo documento [103] do modelo das parasitas do PHEMT encapsulado, que foi empregado nos circuitos apresentados até o momento. Apesar do exposto, vários destes circuitos apresentaram o fenômeno de divisão de freqüência. Sendo, que a geração subharmônica só foi possível para polarizações onde $V_{gs} \leq -1V$, isto se deve pelo exposto no item 6.2 deste capítulo.

Como o projeto destes circuitos baseou-se num modelo impreciso e a polarização escolhida, inicialmente, era de $V_{ds} = 3V$ e $V_{gs} = -0{,}6V$ a banda de freqüência onde a divisão ocorre é diferente daquela projetada. Desta forma, os circuitos continuarão a serem identificados por números, sendo, por exemplo, divisor#17, o primeiro divisor, efetivamente realizado experimentalmente.

A quantidade de circuitos realizados foi limitada pelo número de PHEMTs cuja aquisição foi possível. Desta forma, não foi possível a realização de todos os circuitos apresentados no capítulo 4 e no item 6.3 deste capítulo.

Os divisores foram medidos através do esquema de montagem cuja fotografia é apresentada na Figura 127, neste foi utilizado como fonte de sinal de entrada o gerador de varredura modelo HP8350B e para a visualização do espectro de saída foi empregado o analisador de espectro modelo FSH18 da Rohde&Scharz, sendo que as telas deste foram capturados em um computador portátil por meio de um programa aplicativo (FSH View- versão 13.0) fornecido pelo fabricante. Deve ser lembrado, que o circuito do divisor paramétrico balanceado de freqüência por dois completo apresenta um balum na saída, de modo, a transformar as saídas balanceadas em uma saída desbalanceada. Assim, o sinal de saída na freqüência metade da de entrada será reforçado em 3 dB, enquanto o sinal na freqüência de entrada será, virtualmente, eliminado.

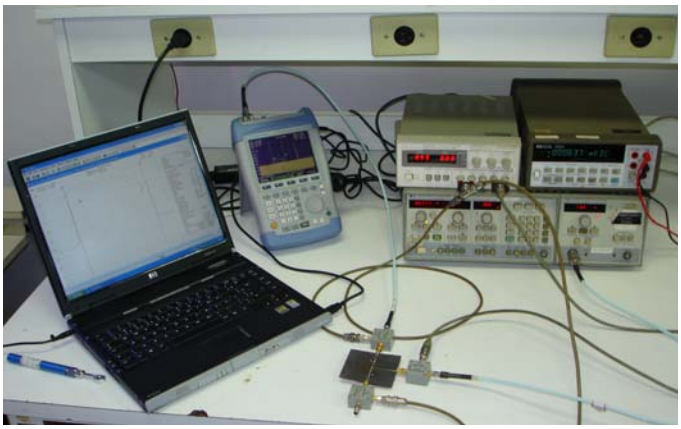

Figura 127: Fotografia do esquema de testes utilizado nas medidas experimentais dos divisores de freqüência realizados.

6.4.1. Resultados obtidos para o divisor#17

O divisor#17 é baseado numa linha acoplada com $W = 2{,}9mm$, $s = 0{,}36mm$ e $l = 25{,}19mm$, a sua fotografia pode ser visualizada na Figura 128, o resultado da simulação deste circuito para $V_{ds} = 3V$, $V_{gs} = -1V$ e potência de entrada de 0 dBm é apresentado na Figura 129.

Figura 128: Fotografia do divisor#17.

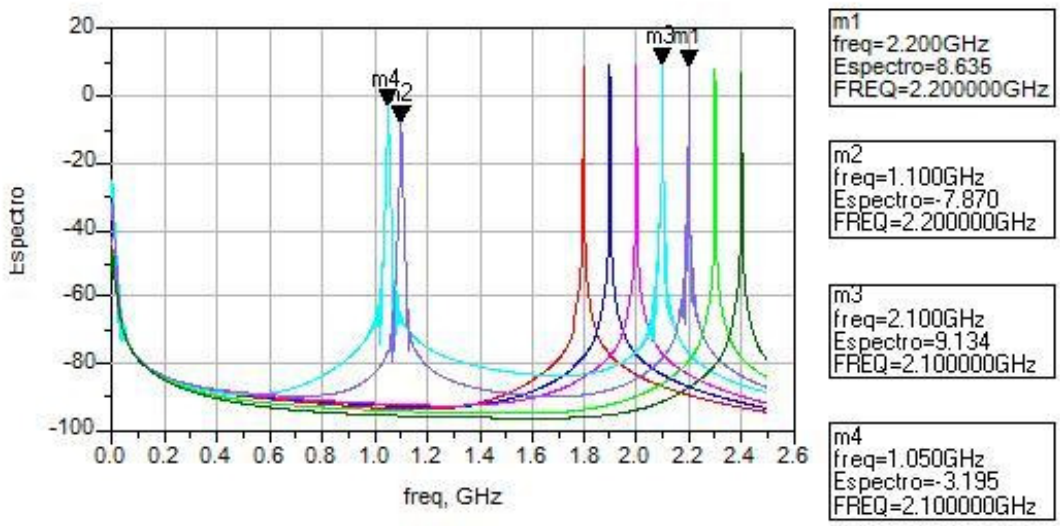

Figura 129: Resultados da simulação do divisor#17.

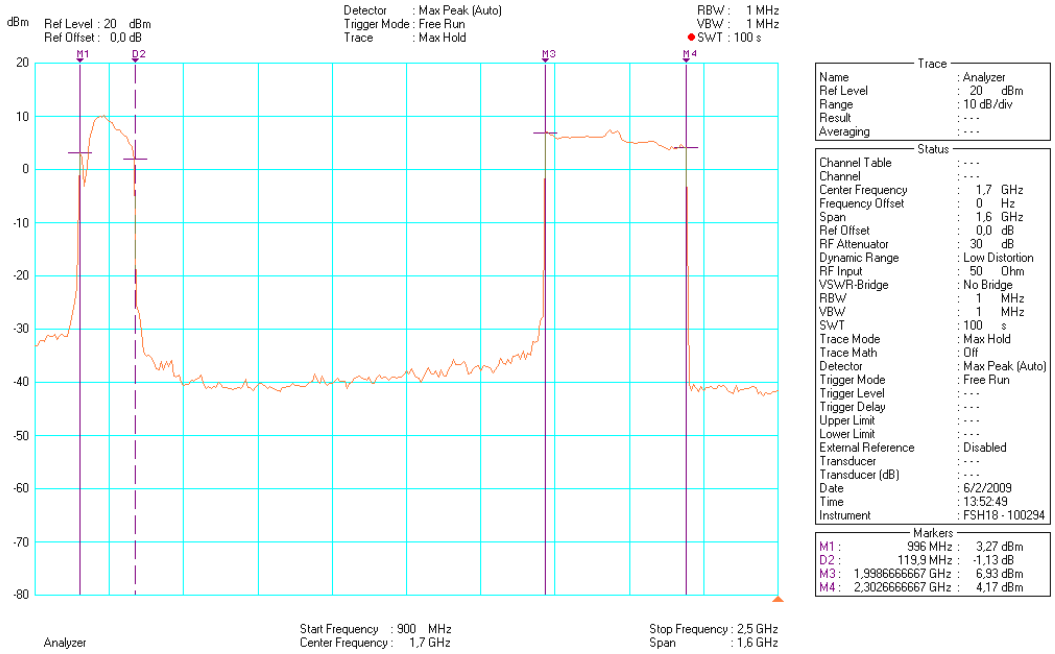

Figura 130: Espectro medido do divisor#17.

Da Figura 130 se pode observar o espectro obtido com a medida em laboratório do circuito divisor#17, para uma potência de entrada de 0 dBm. Este apresentou na prática uma faixa de operação de freqüência de entrada (1996 a 2232 MHz) de 240 MHz contra 100 MHz previsto pela simulação e um ganho médio de conversão 5 dB contra uma perda de conversão de -8 dB obtido com a simulação. A explicação para este fato é que o circuito foi projetado para um

ponto de operação diferente ($V_{ds} = 3V$ e $V_{gs} = -0{,}6V$) daquele utilizado ($V_{ds} = 3V$ e $V_{gs} = -1V$), o modelo utilizado estava incorreto e como exposto no item 6.2 os parâmetros S do PHEMT FPD1500SOT89 simulados divergem daqueles obtidos pela caracterização, sendo a resistência de entrada obtida na prática para a polarização $V_{ds} = 3V$ e $V_{gs} = -1V$ mais próxima daquela estimada para a polarização $V_{ds} = 3V$ e $V_{gs} = -0{,}6V$.

6.4.2. Resultados obtidos para o divisor#18

O divisor#18 é baseado numa linha acoplada com $W = 1{,}73mm$, $s = 0{,}64mm$ e $l = 18{,}52mm$, a sua fotografia pode ser visualizada na Figura 131, o resultado da simulação deste circuito para $V_{ds} = 3V$, $V_{gs} = -1V$ e potência de entrada de 0 dBm é apresentado na Figura 132.

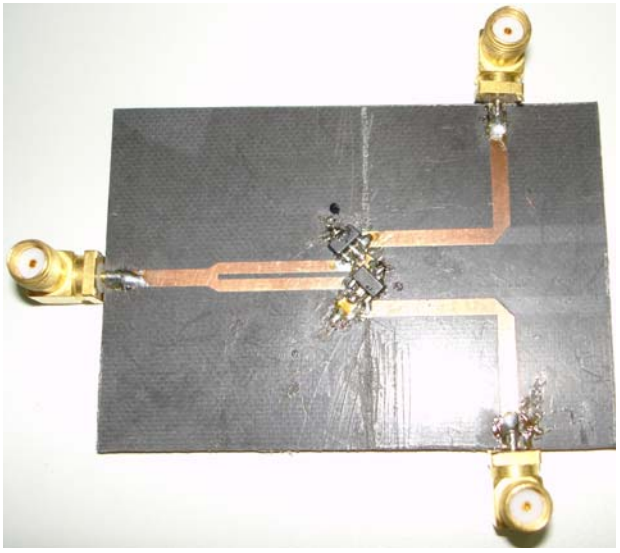

Figura 131: Fotografia do divisor#18.

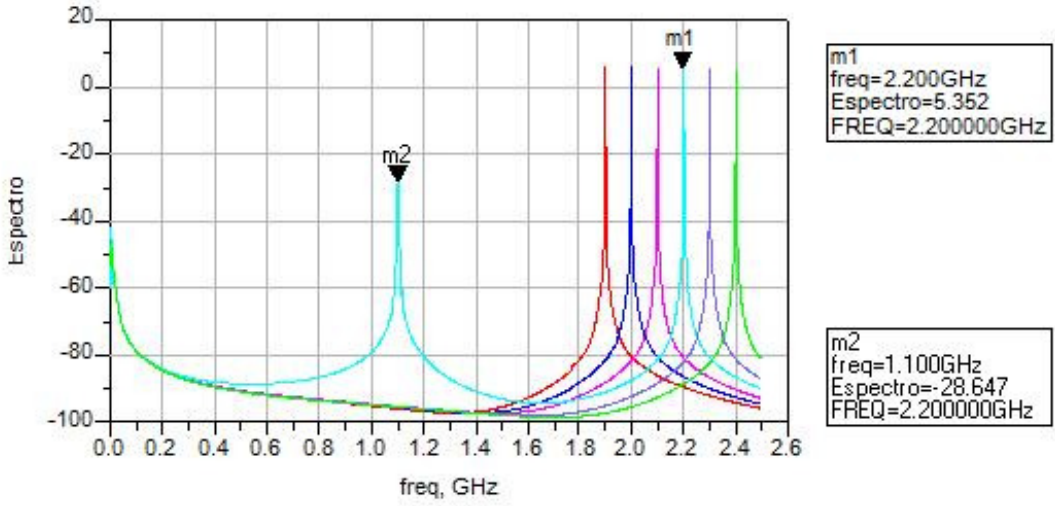

Figura 132: Resultados da simulação do divisor#18.

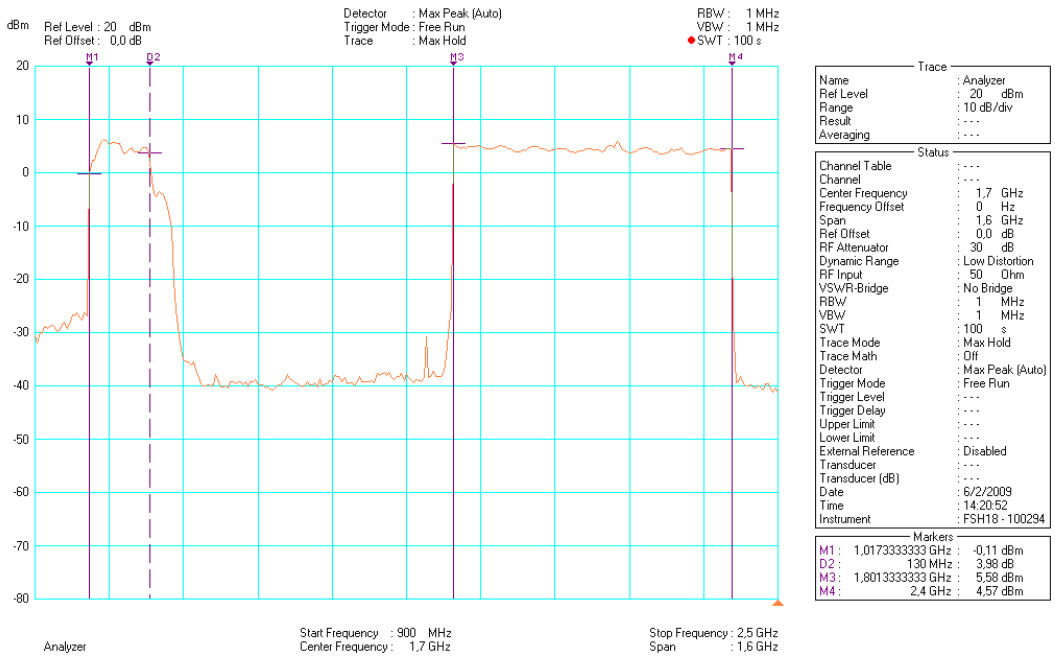

Figura 133: Espectro medido do divisor#18.

Da Figura 133 se pode observar o espectro obtido com a medida em laboratório do circuito divisor#18, para uma potência de entrada de 0 dBm. Este apresentou na prática uma faixa de operação de freqüência de entrada (2034 a 2294 MHz) de 260 MHz, já na simulação o processo de divisão estaria apenas

iniciando-se para este nível de potência. O ganho médio de conversão alcançado foi de 3 dB.

6.4.3. Resultados obtidos para o divisor#7

O divisor#7 é baseado numa linha acoplada com $W = 2{,}38mm$, $s = 1{,}42mm$ e $l = 23{,}78mm$, a sua fotografia pode ser visualizada na Figura 134. O resultado da simulação deste circuito para $V_{ds} = 3V$, $V_{gs} = -1V$ e potência de entrada de 0 dBm foi apresentado na Figura 93.

Figura 134: Fotografia do divisor#7.

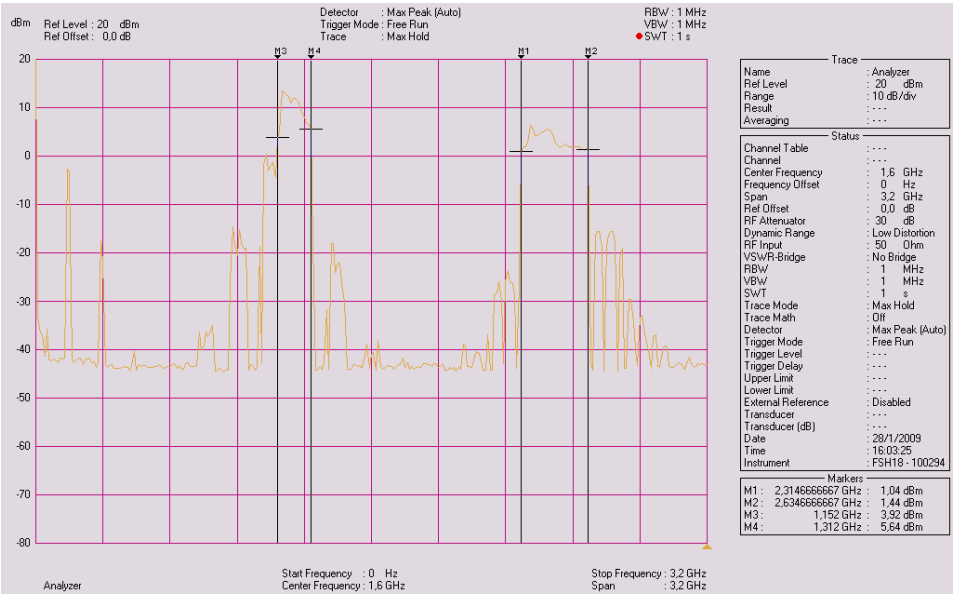

Figura 135: Espectro medido do divisor#7.

Da Figura 135 se pode observar o espectro obtido com a medida em laboratório do circuito divisor#7, para uma potência de entrada de 0 dBm. Este apresentou na prática uma faixa de operação de freqüência de entrada (2304 a 2624 MHz) de 320 MHz, bem maior do que o valor obtido (100 MHz) com a simulação para um nível de potência similar. O ganho médio de conversão alcançado foi cerca de 8 dB.

6.4.4. Resultados obtidos para o divisor#19

O divisor#19 é baseado numa linha série com $W = 4{,}87mm$ e $l = 23{,}77mm$, sendo realizada por meio de uma curva de 90º, a sua fotografia pode ser visualizada na Figura 136. O resultado da simulação deste circuito para $V_{ds} = 3V$, $V_{gs} = -1V$ e potência de entrada de 10 dBm foi apresentado na Figura 137.

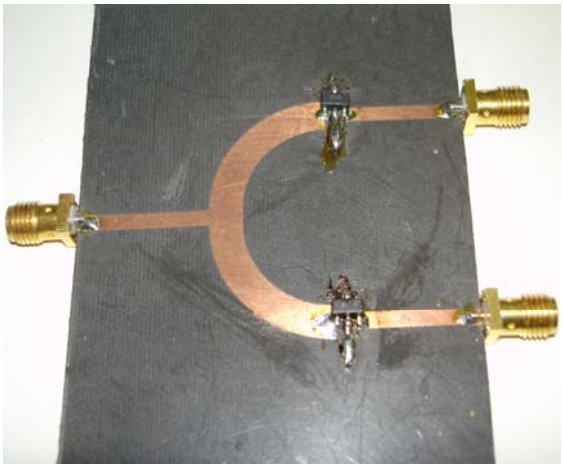

Figura 136: Fotografia do divisor#19.

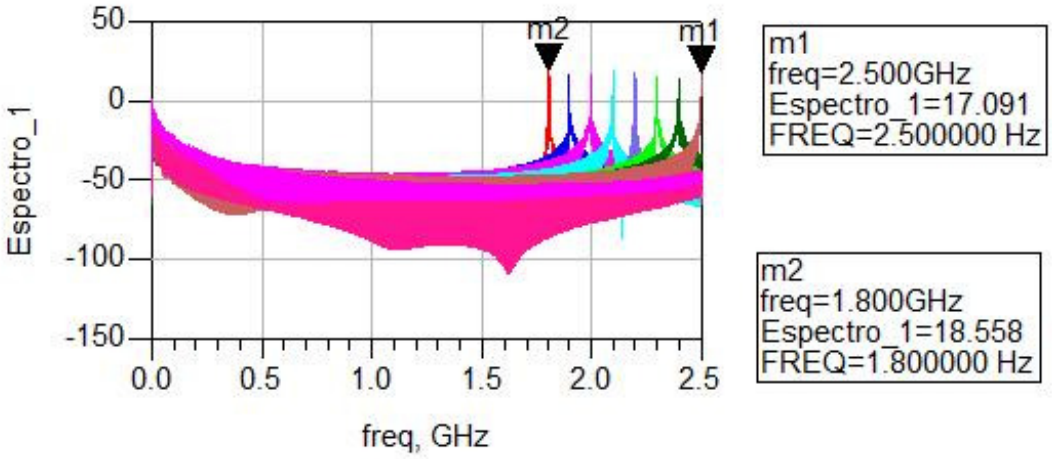

Figura 137: Resultado da simulação do divisor#19.

Da Figura 138 se pode observar o espectro obtido com a medida em laboratório do circuito divisor#19, para uma potência de entrada de 0 dBm. Este apresentou na prática uma faixa de operação de freqüência de entrada (2556 a 2864 MHz) de 308 MHz, já na simulação o processo de divisão não ocorreria para esta condição de polarização e nível de potência, como verificado na Figura 137. O ganho médio de conversão alcançado foi de cerca de 4 dB.

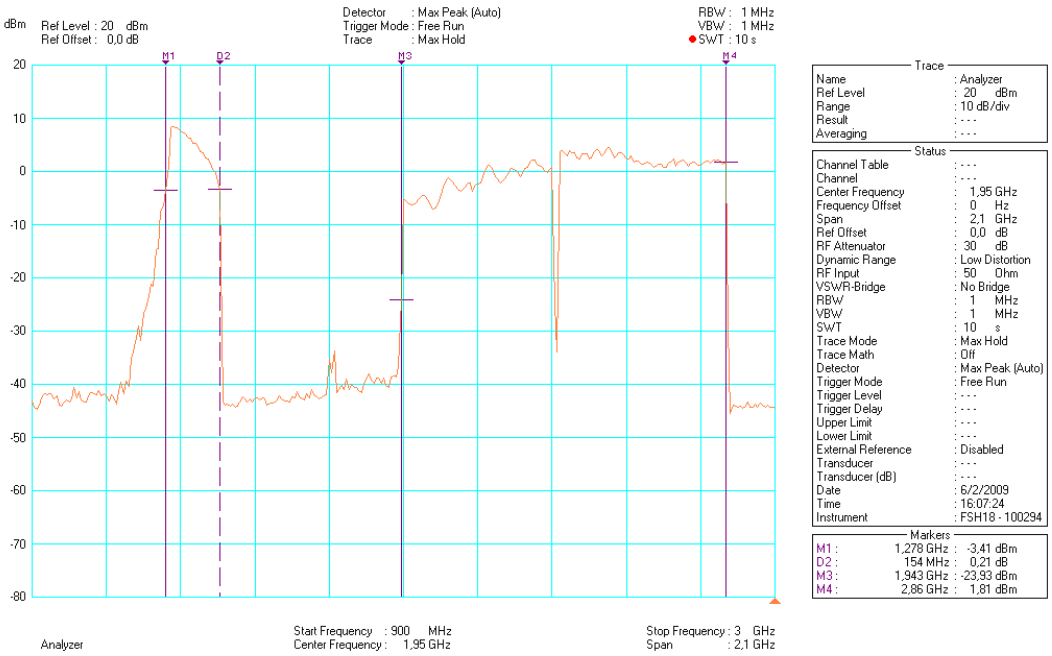

Figura 138: Espectro medido do divisor#19.

6.4.5. Resultados obtidos para o divisor#20

O divisor#20 é baseado numa linha série com $W = 2{,}4mm$ e $l = 16{,}23mm$, sendo realizada por meio de uma curva de 90º, a sua fotografia pode ser visualizada na Figura 139. O resultado da simulação deste circuito para $V_{ds} = 3V$, $V_{gs} = -1V$ e potência de entrada de 10 dBm foi apresentado na Figura 140.

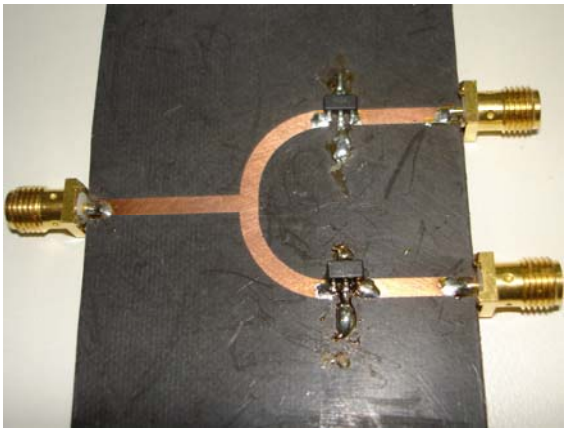

Figura 139: Fotografia do divisor#20.

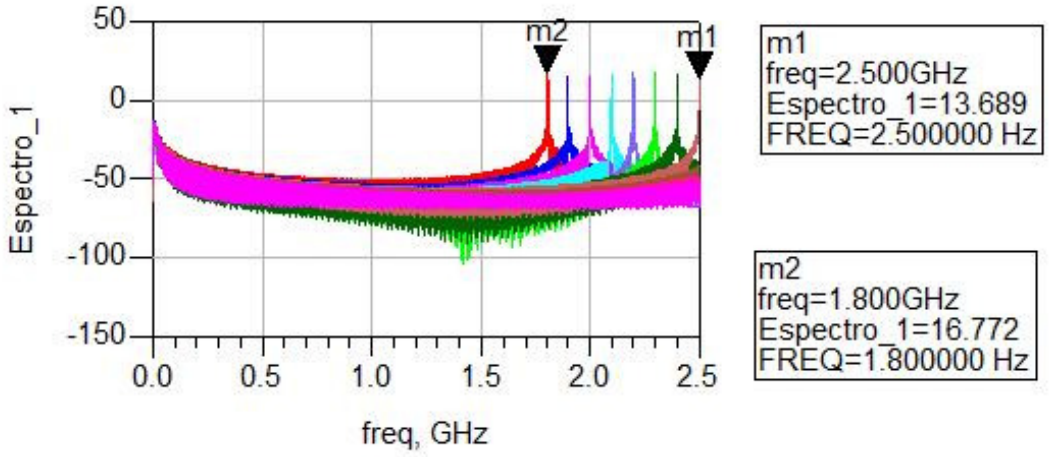

Figura 140: Resultado da simulação do divisor#20.

Da Figura 141 se pode observar o espectro obtido com a medida em laboratório do circuito divisor#20, para uma potência de entrada de 0 dBm. Este

apresentou na prática uma faixa de operação de freqüência de entrada (2380 a 2892 MHz) de 512 MHz, já na simulação o processo de divisão não ocorreria para esta condição de polarização e nível de potência, como verificado na Figura 140. O ganho de conversão apresentou uma variação muito grande (7 dB para 2380 MHz e -12 dB para 2892 MHz).

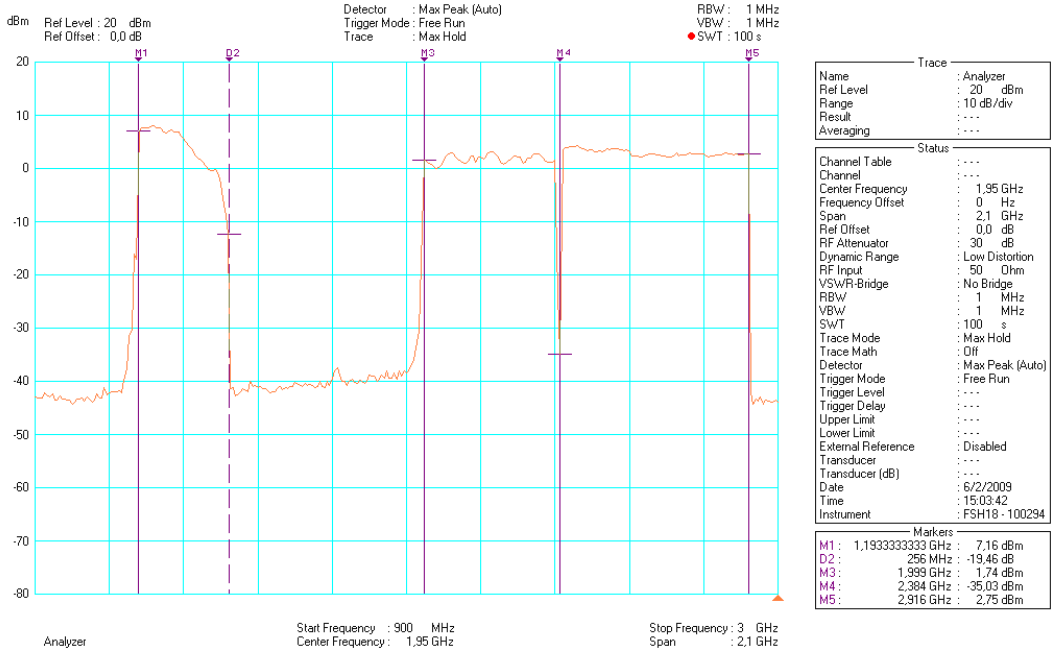

Figura 141: Espectro medido do divisor#20.

6.4.5. Resultados obtidos para o divisor#21

O divisor#21 é baseado numa linha série com $W = 2{,}4mm$ e $l = 23{,}01mm$, a sua fotografia pode ser visualizada na Figura 142. O resultado da simulação deste circuito para $V_{ds} = 3V$, $V_{gs} = -1V$ e potência de entrada de 0 dBm foi apresentado na Figura 143.

Figura 142: Fotografia do divisor#21.

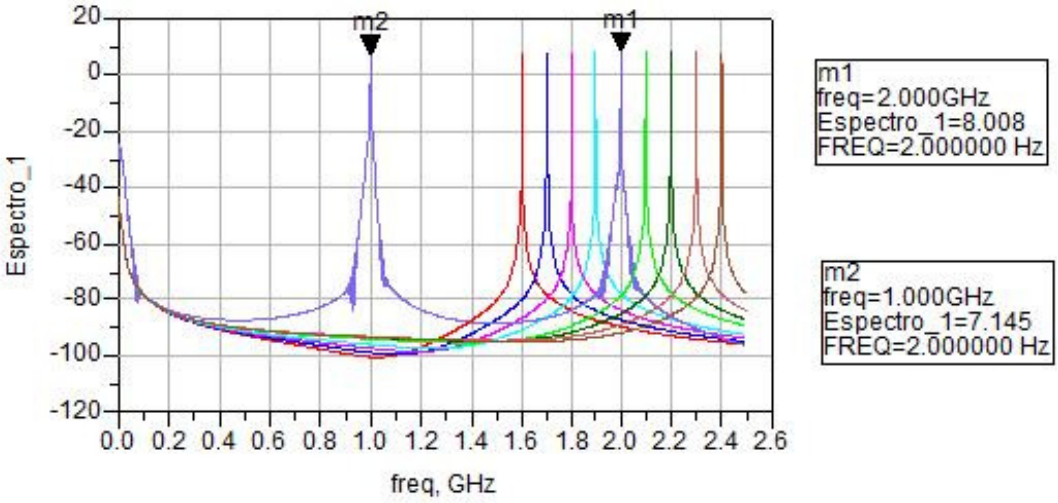

Figura 143: Resultado da simulação do divisor#21.

Da Figura 144 se pode observar o espectro obtido com a medida em laboratório do circuito divisor#21, para uma potência de entrada de 0 dBm. Este apresentou na prática uma faixa de operação de freqüência de entrada (2570 a 2810 MHz) de 240 MHz, já na simulação para 0 dBm de entrada , a divisão de freqüência ocorreria, apenas, em 2,0 GHz. O ganho de conversão apresentou uma variação muito grande (6 dB para 2570 MHz e -1,82 dB para 2810 MHz).

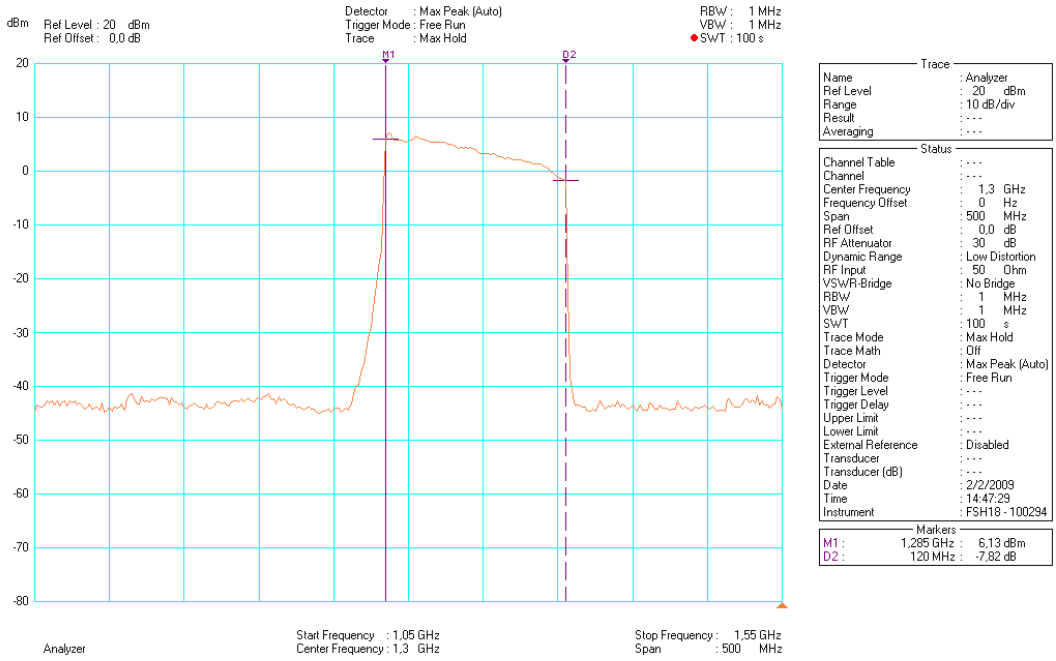

Figura 144: Espectro medido do divisor#21.

6.4.6. Resultados obtidos para o divisor#22

O divisor#22 é baseado numa linha série com $W = 2{,}4mm$ e $l = 23{,}01mm$. Contudo, neste caso foi realizada uma estrutura de casamento da entrada na freqüência de 2,0 GHz. Esta rede é composta por um *stub* em aberto com $W = 2{,}4mm$ e $l = 7{,}13mm$ e um transformador de quarto-de-onda com $W = 0{,}27mm$ e $l = 28{,}79mm$, a sua fotografia pode ser visualizada na Figura 145. O resultado da simulação deste circuito para $V_{ds} = 3V$, $V_{gs} = -1V$ e potência de entrada de 0 dBm foi apresentado na Figura 146.

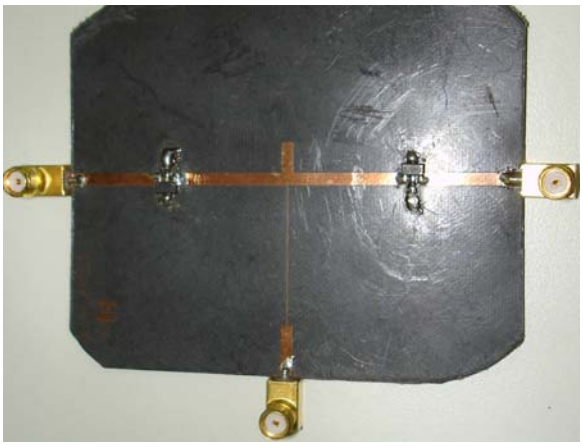

Figura 145: Fotografia do divisor#22.

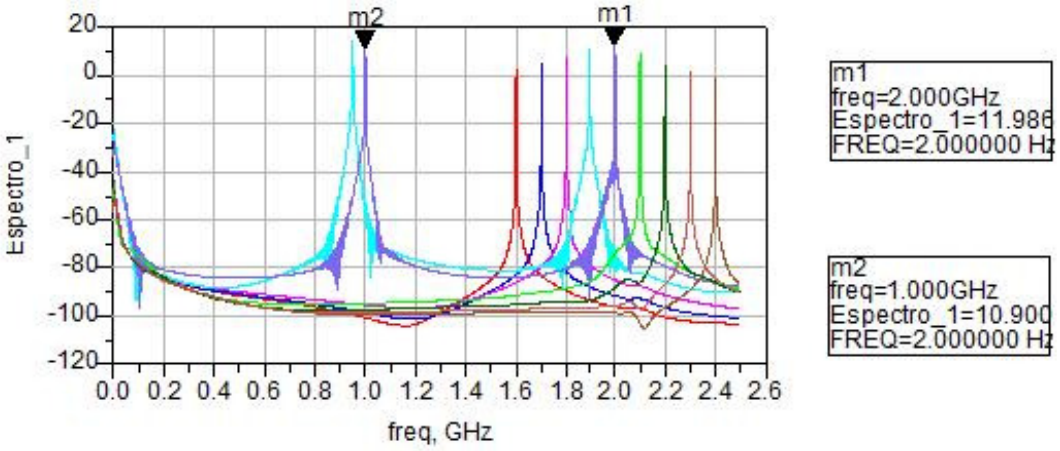

Figura 146: Resultado da simulação do divisor#22.

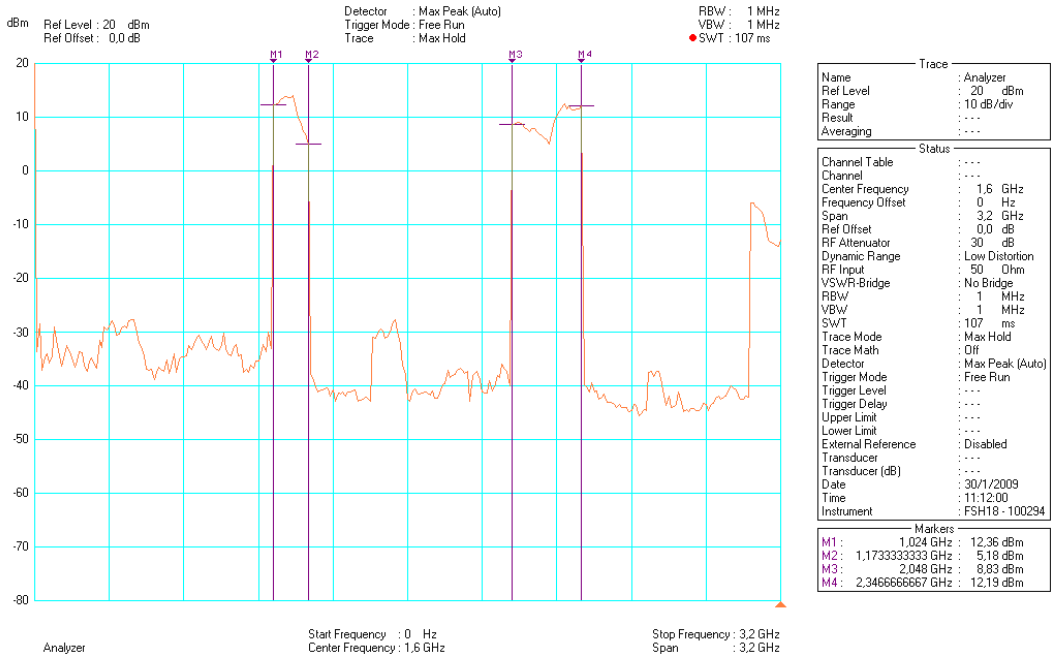

Figura 147: Espectro medido do divisor#22.

Da Figura 147 se pode observar o espectro obtido com a medida em laboratório do circuito divisor#22, para uma potência de entrada de 0 dBm. Este apresentou na prática uma faixa de operação de freqüência de entrada (2048 a 2347 MHz) de 299 MHz, já na simulação para 0 dBm de entrada , a divisão de freqüência ocorreria em uma faixa de operação compreendida entre 1,9 e 2,0 GHz. O ganho de conversão alcançado foi de 12 dB para 2048 MHz e 5 dB para 2347 MHz.

6.4.7. Resultados obtidos para o divisor#23

O divisor#23 é baseado numa linha série com $W = 2{,}4mm$ e $l = 16{,}23mm$. Contudo, neste caso foi realizada uma estrutura de casamento da entrada na freqüência de 2,0 GHz. Esta rede é composta por um *stub* em aberto com $W = 2{,}4mm$ e $l = 14{,}01mm$ e um transformador de quarto-de-onda com $W = 0{,}98mm$ e $l = 28{,}06mm$, a sua fotografia pode ser visualizada na Figura 148. O resultado da simulação deste circuito para $V_{ds} = 3V$, $V_{gs} = -1V$ e potência de entrada de 0 dBm foi apresentado na Figura 149.

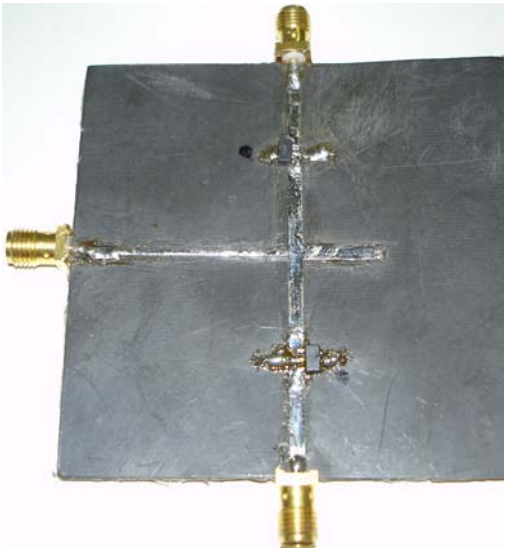

Figura 148: Fotografia do divisor#23.

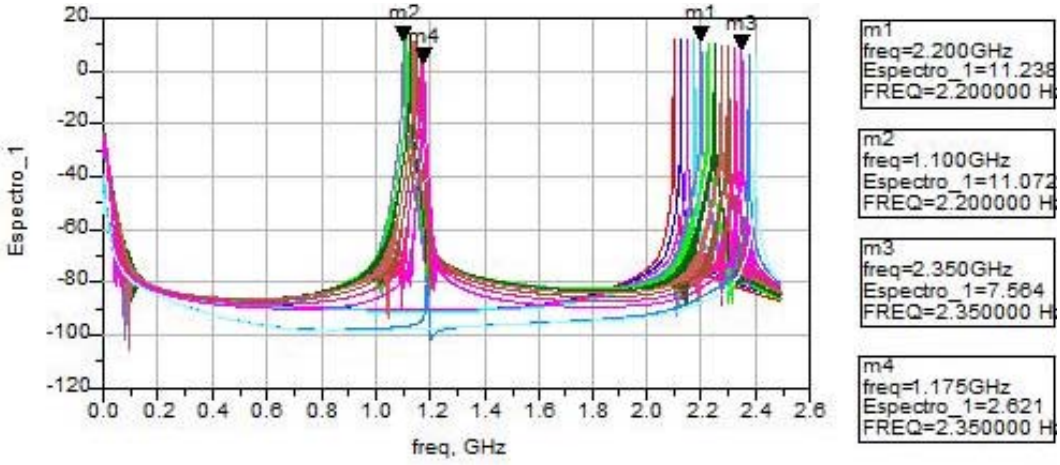

Figura 149: Resultado da simulação do divisor#23.

Na Figura 150 se pode observar o espectro obtido com a medida em laboratório do circuito divisor#23, para uma potência de entrada de 0 dBm. Este apresentou na prática uma faixa de operação de freqüência de entrada (2380 a 2700 MHz) de 220 MHz, já na simulação para 0 dBm de entrada , a divisão de freqüência ocorreria em uma faixa de operação compreendida entre 2,2 e 2,35 GHz. O ganho de conversão alcançado foi de 7 dB para 2380 MHz e -6 dB para 2700 MHz. Verificou-se para este circuito qual a maior banda de operação possível, para uma potência de entrada de 13 dBm. Assim, os valores da polarização foram variados de forma a maximizar a banda, o seguinte conjunto de

valores apresentou a melhor resposta: $V_{ds} = 3{,}98V$ e $V_{gs} = -1{,}5V$. A Figura 151 apresenta o espectro do sinal de saída medido. A largura de banda foi de 792 MHz (cerca de 28%) e a potência de saída máxima na banda foi 18 dBm e a mínima foi de -2 dBm.

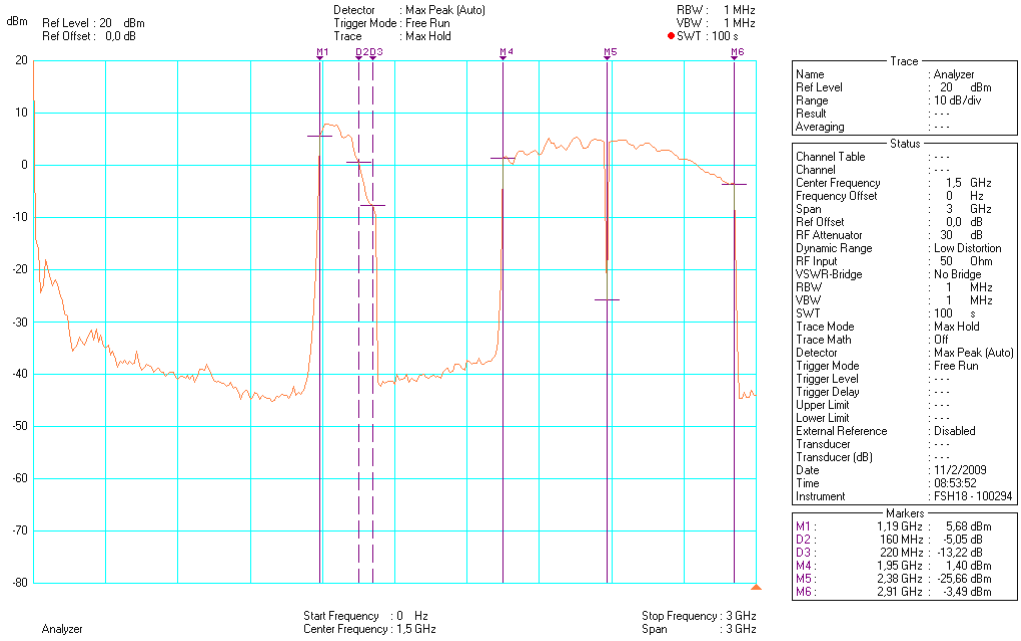

Figura 150: Espectro medido do divisor#23

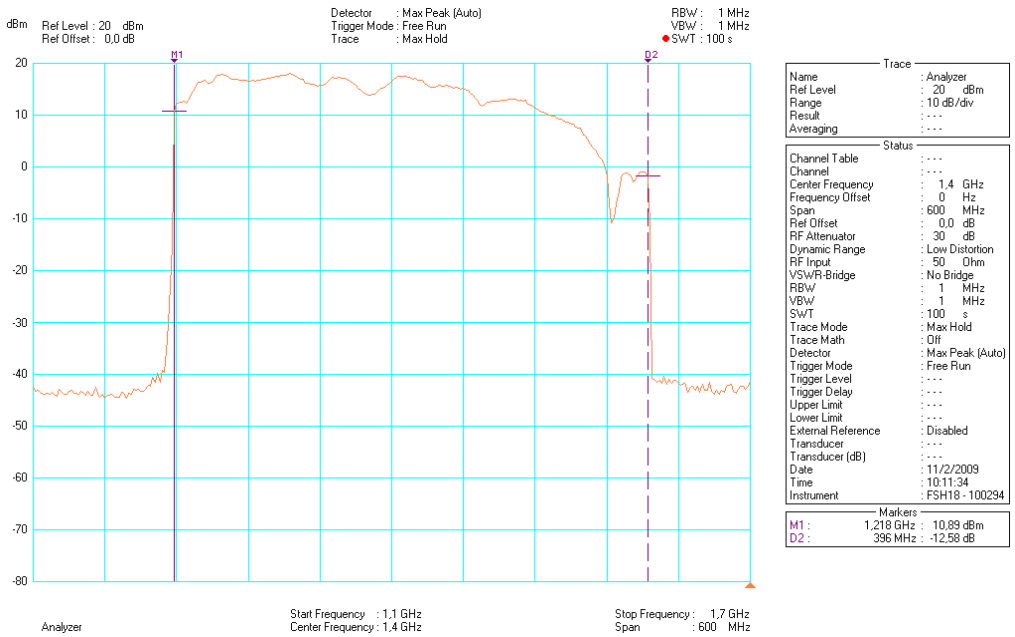

Figura 151: Espectro medido do divisor#23 para $V_{ds} = 3{,}98V$ e $V_{gs} = -1{,}5V$.

6.5. Análise dos resultados práticos

Todos os resultados obtidos na prática foram superiores àqueles simulados. Como já discutido, a razão provável é que o valor de S_{11} medido para o PHEMT FPD1500SOT89 montado em placa, para $V_{ds} = 3V$, $V_{gs} = -1V$ e potência de entrada de 0 dBm é mais próximo ao obtido com a simulação do modelo do PHEMT, para $V_{ds} = 3V$, $V_{gs} = -0{,}6V$. A Tabela 28 apresenta um resumo das características atingidas pelos divisores realizados.

Tabela 28: Resumo dos resultados obtidos com os divisores de freqüência realizados.

DIVISOR	BANDA DE OPERAÇÃO DE ENTRADA (MHz)	GANHO (dB)
divisor#17	240	2 a 10
divisor #18	260	0 a 5
divisor #7	320	4 a 13
divisor #19	308	-3 a 8
divisor #20	512	-12 a 7
divisor #21	240	-1,82 a 6
divisor #22	299	5 a 12
divisor #23	220	-6 a 7

É importante ressaltar que os circuitos realizados através de linhas em série desacopladas apresentaram uma banda de operação maior e permitiram um maior grau de liberdade em relação ao valor de V_{gs} empregado, de sorte que, o fenômeno de divisão de freqüência continua a ocorrer para valores de V_{gs} um pouco menores que -1V (por exemplo, para o divisor#23 até -1,5V), assim uma banda maior pode ser alcançada, quando o circuito é excitado por uma potência mais elevada (para o divisor#23, 13 dBm). Como estes circuitos apresentaram a divisão de freqüência para valores mais elevados de freqüência, o ganho de conversão apresenta uma queda em seu valor. Os divisores baseados em linhas acopladas apresentaram uma banda de operação um pouco menor e mostraram-se muito sensíveis ao valor de

V_{gs}, não permitindo uma variação no valor de $V_{gs} = -1V$. O ganho de conversão obtido com estes circuitos foi mais plano na banda, provavelmente, pela faixa de operação destes estar mais próxima a 2,0 GHz.