

# Projeto Acoplador Rat-race

**Disciplina:** PSI3482 - Antenas, Micro-ondas e Óptica Moderna

**Nome:** Igor Costa Doliveira

**NUSP:** 11391446

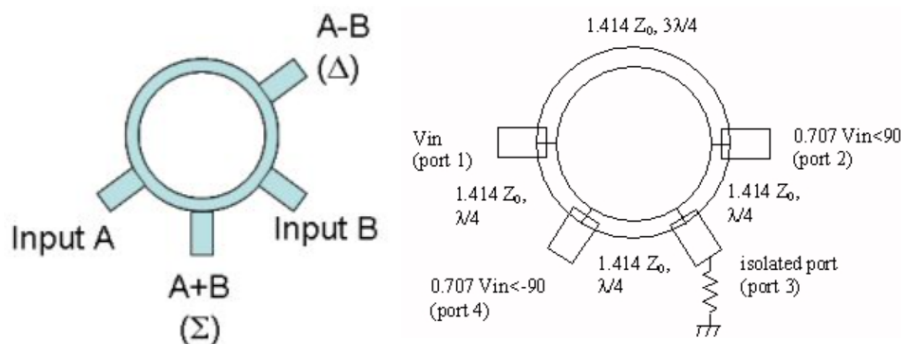
## 1. INTRODUÇÃO

O acoplador rat-race (acoplador de anel ou corrida de ratos) é um dispositivo utilizado para distribuir energia entre várias portas em um circuito de micro-ondas. Ele é utilizado em aplicações de combinação e divisão de sinais, deslocadores de fases, divisor de fase, antenas, osciladores e amplificadores. Neste projeto ele será utilizado como um divisor de sinal, no qual haverá um sinal de entrada e dois sinais de saída.

O sistema é dividido em algumas partes e elas estão explicadas abaixo:

- **Anel Circular:** É uma linha de transmissão circular no qual um sinal de entrada é aplicado em uma das portas.
- **Portas de saída:** Possui duas portas de saída ou mais, estão localizadas a 90 graus uma da outra para distribuir o sinal de entrada.
- **Linhas de transmissão de 180 ou 90 graus:** Conecta a porta de entrada e saída para proporcionar um deslocamento de fase de 180 ou 90 graus ( $3\lambda/4$  ou  $\lambda/4$ ).

Figura 1 - Estrutura do Acoplador Rat-Race.



As vantagens deste acoplador em relação a outros circuitos é que ele oferece um alto grau de isolamento entre as portas (portas de saída estão bem protegidas contra a influência do sinal de entrada). Além disso, possui uma ampla banda de frequência para o projeto visto que pode ser mais compacto que outros acopladores (aplicações de espaço limitado). Por último, possui uma baixa perda de inserção justamente por ter dimensões mais compactas do que outros circuitos.

Neste sistema a constante dielétrica do substrato influencia diretamente na velocidade de propagação dos sinais transmitidos na linha, assim alterando a frequência de operação do sistema. Constantes maiores resultam em um maior deslocamento de fase a uma dada distância. Já a espessura do substrato influencia a impedância da linha e a impedância do acoplador, no qual também altera o deslocamento de fase e a banda de frequências do acoplador, quanto maior a espessura maior a banda de frequências.

## 2. PROJETO E RESULTADOS

O desempenho de um acoplador é encontrado observando suas características, abaixo se encontram as propriedades mais importantes do rat-race:

- Largura da banda.
- Casamento de cada porta (S11, S22, S33 e S44).
- Perda de inserção (S12 e S14).
- Isolamento entre as portas de saída (S24).
- Limitações físicas e em sua manufatura.
- Porta de entrada (S1), saída 1 (S2), saída 2 (S4) e isolada (S3).

Idealmente a potência que entrar pela porta de entrada será distribuída igualmente pelas portas de saída, logo cada saída receberá metade da potência **S12 ideal = S14 ideal = -3dB**, neste contexto não haverá acoplamento parasita **S24, S11, S22, S33 e S44 nulas** entre as portas. Já a diferença de comprimento entre as portas de saída faz com que idealmente a fase seja **(S12) - (S14) = 180 graus**.

Já na prática é esperado que **S12 e S14 sejam < -3dB** e a fase entre as portas seja **ligeiramente diferente de 180 graus** visto que o comprimento entre elas não é simétrico. Além disso, é esperado um acoplamento parasita entre as portas de saída S24, porém será admitido um valor **< -20dB** como aceitável. Com isso, foi possível desenvolver a tabela de especificações abaixo, onde utilizei o mesmo substrato das outras atividades e a frequência de sistemas de GPS 1.5GHz:

Frequência de operação	Substrato	$\epsilon_r$	H (mm)	t (um)	$\sigma_{gold}$	$\tan(\delta)$
1.5 GHz	Cu	2,6	1,016	18	$4 \cdot 10^{-7}$	0,0013

A parte crítica deste projeto é calcular cada trecho circular do acoplador para ele ter uma impedância característica de  $\sqrt{2} \cdot Z_0$ , onde  $Z_0$  é a impedância das portas ( $Z_0 = 50 \Omega$ ). Portanto, cada trecho circular deverá ter resistência igual a

$\sqrt{2} \cdot 50 \approx 70.71\Omega$ . Além disso, temos que projetar a distância entre cada porta (S23, S34, S41) como sendo  $\lambda/4$  e entre S12 como  $3\lambda/4$  para atribuir as propriedades desejadas (divisor de sinal) ao acoplador, logo o perímetro do segmento circular será igual  $\lambda/4 + \lambda/4 + \lambda/4 + 3\lambda/4 = 3\lambda/2$  (**540°**). Já as linhas das portas serão projetadas com impedância de  $50\Omega$  e  $30^\circ$ .

Foi utilizada a ferramenta LineCalc do software ADS para encontrar os comprimentos dos dois trechos do circuito, abaixo se encontram os cálculos.

Figura 2 - Cálculo das dimensões do segmento circular.

Component Type: MLIN ID: MLIN: MLIN\_DEFAULT

Substrate Parameters

ID	MSUB_DEFAULT	
H	1.016	mm
Hu	3.9e+34	mil
T	18.000	um
Cond	4.1e7	N/A
TanD	0.001	N/A
Rough	0.000	mil

Physical

W	1.556520	mm
L	208.446000	mm
		N/A
		N/A

Synthesize Analyze

Electrical

Z0	70.710	Ohm
F FFF	540.000	deg
		N/A
		N/A
		N/A

Calculated Results

K\_Eff = 2.068  
A\_DB = 0.130  
SkinDepth = 0.079

Figura 3 - Cálculo das dimensões das portas.

Component Type: MLIN ID: MLIN: MLIN\_DEFAULT

Substrate Parameters

ID	MSUB_DEFAULT	
H	1.016	mm
Hu	3.9e+34	mil
T	18.000	um
Cond	4.1e7	N/A
TanD	0.001	N/A
Rough	0.000	mil

Physical

W	2.783060	mm
L	11.353200	mm
		N/A
		N/A

Synthesize Analyze

Electrical

Z0	50.000	Ohm
F FFF	30.000	deg
		N/A
		N/A
		N/A

Calculated Results

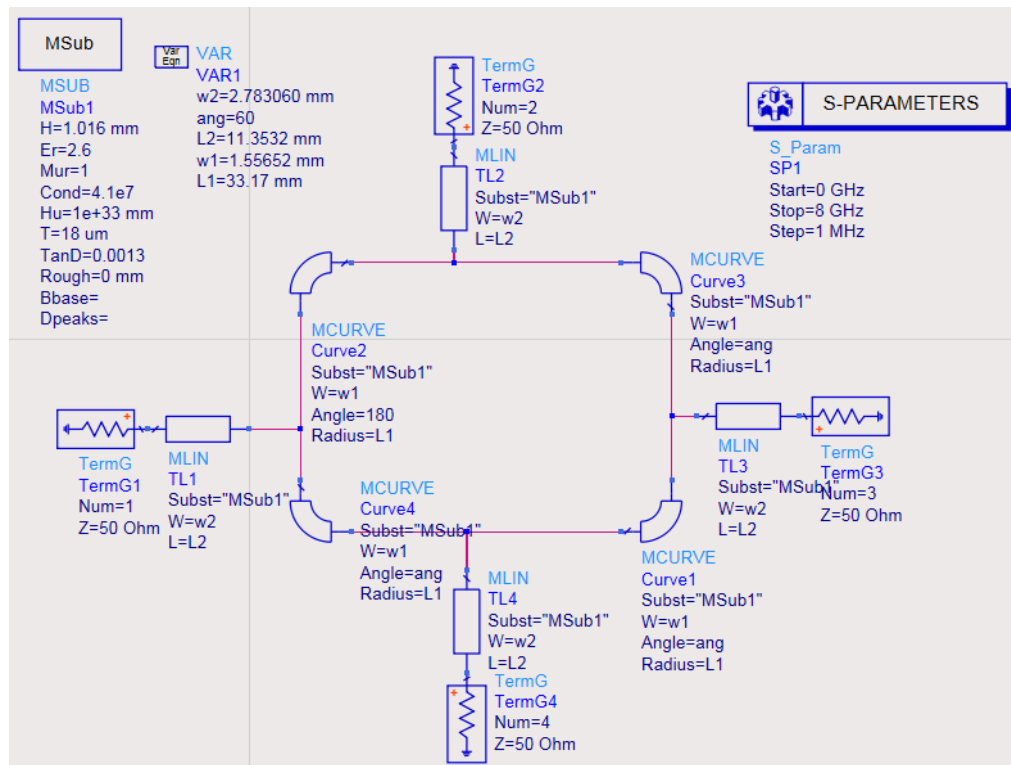
K\_Eff = 2.152  
A\_DB = 0.006  
SkinDepth = 0.079

As dimensões encontradas estão apresentadas abaixo e são fabricáveis, visto que as espessuras e comprimentos são todos maiores de 1,5 mm.

Trecho circular	W1 (mm)	Perímetro (mm)	L1 (mm): $2\pi L = P$	Porta	W2 (mm)	L2 (mm)
70,71Ω 560°	1,56	208,44	33,17	50Ω 30°	2,783	11,353

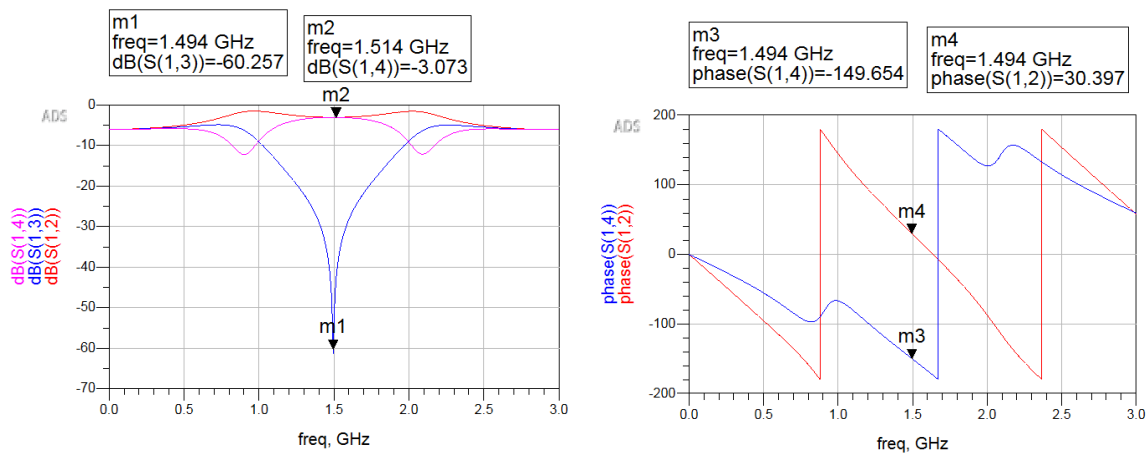
Por fim, foi projetado o circuito no Schematics do ADS com todos os parâmetros obtidos anteriormente, ele está ilustrado na figura 4.

Figura 4 - Schematics do acoplador.



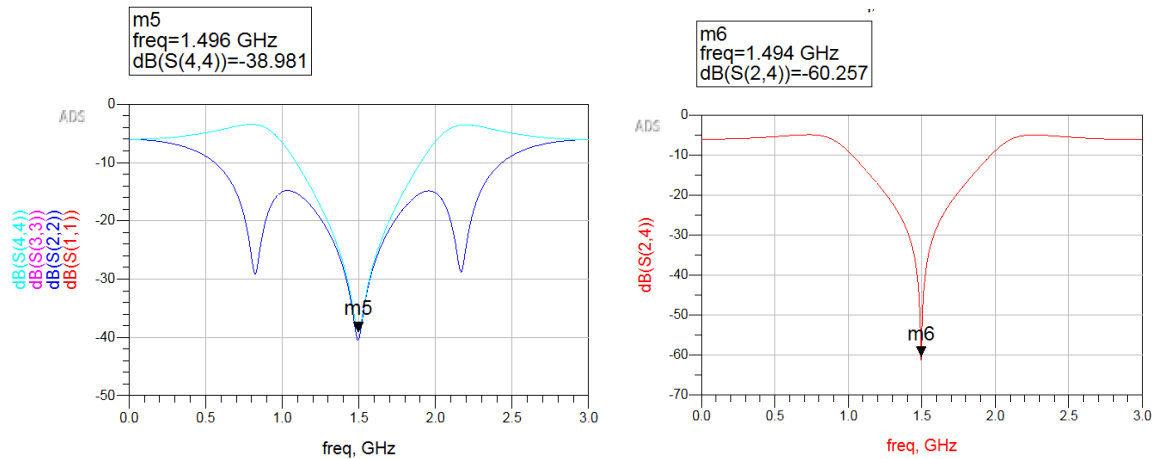
Realizando a simulação é possível visualizar na figura 5 exatamente o que era esperado da perda de inserção entre as portas de entrada e saída. Próximo de 1,5 GHz os sinais S12 e S14 apresentaram potência de -3,07 dB (metade da potência de entrada para cada saída) e a porta S13 apresentou potência praticamente nula < -20dB. Além disso, a diferença de fase entre os sinais S12 e S14 foi de  $30,34^\circ + 149,65^\circ = 179,99^\circ$  como o esperado anteriormente.

Figura 5 - Perda de inserção nas portas de entrada e saída.



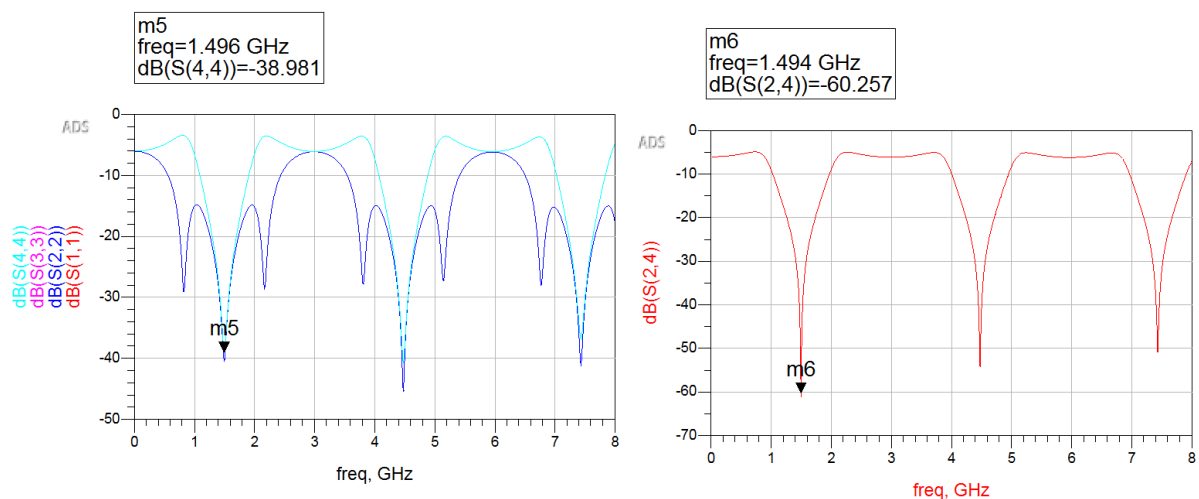
Já na figura 6 é possível ver que ocorreu o casamento das portas dos sinais S11, S22, S33, S44 < -20dB. Também ocorreu o isolamento entre as portas de saída S24 como o esperado teoricamente.

Figura 6 - Casamento de cada porta e isolamento entre saídas.



Também foi simulado o sistema com uma frequência maior de 3 vezes 1,5GHz para observar o que ocorre nas frequências múltiplas da frequência de operação. Na figura 7 é possível observar que o circuito teve as suas características iguais em uma periodicidade de 3x da frequência de operação (4,5 GHz).

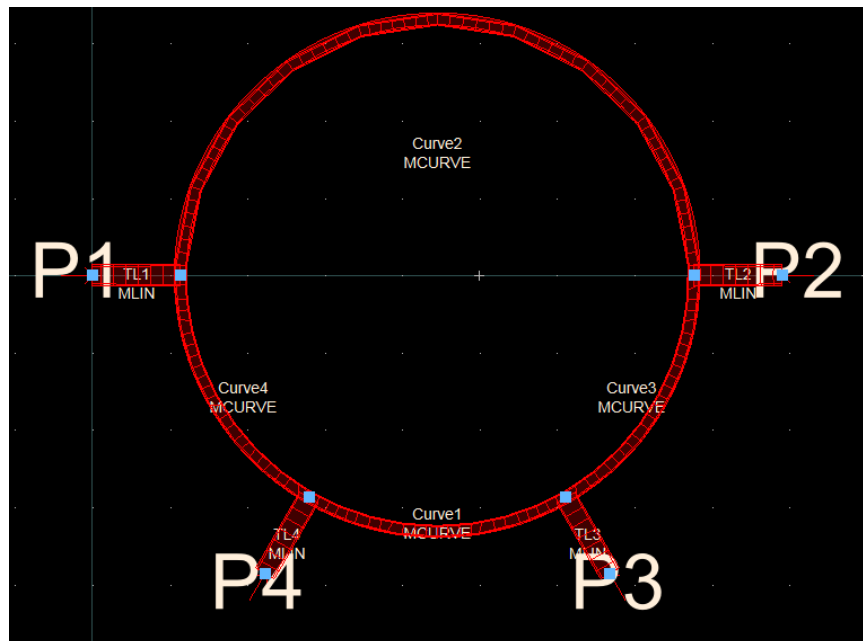
Figura 7 - Simulação com frequência 3x.



Portanto, a simulação no Schematic apresentou as características ideais do acoplador Rat-race. Na frequência de interesse de 1,5 GHz observa-se a divisão da potência entre as entradas 2 e 4 com o valor de -3dB (metade da potência de entrada para cada saída). Também a oposição das fases entre as saídas foi de 180° como o desejado.

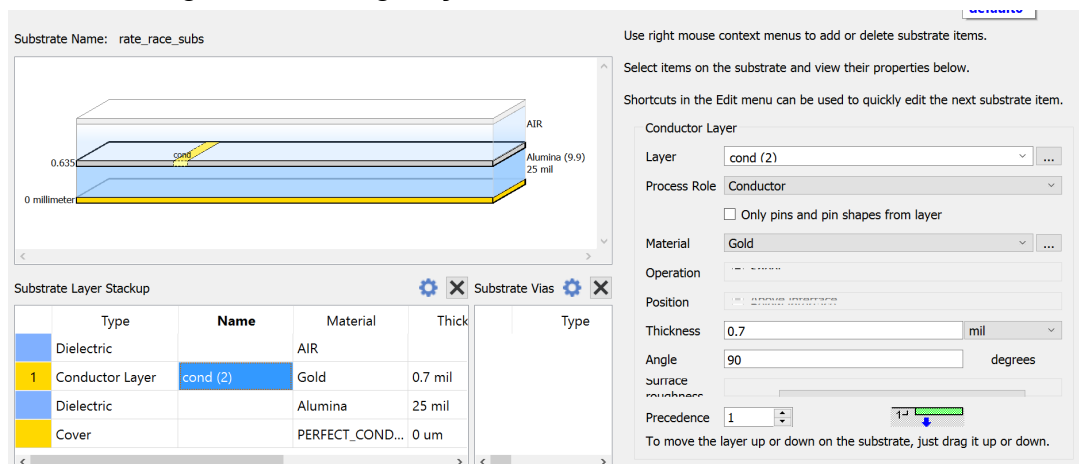
Após as simulações pelo Schematics ocorrerem como o esperado foi gerado o layout do circuito no Momentum do ADS. Ele está ilustrado na figura 8.

Figura 8 - Layout do acoplador rat-race no Momentum.



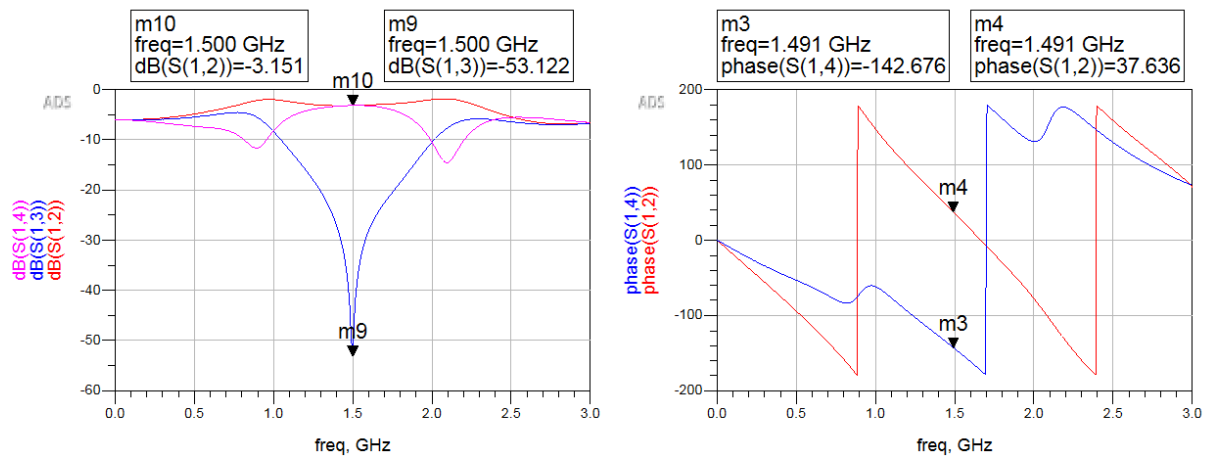
Foram configurados o dielétrico como Alumina e a camada condutora como ouro ( $C = 4,1e7$ ) ilustrado na figura 9.

Figura 9 - Configurações do dielétrico e da camada condutora.



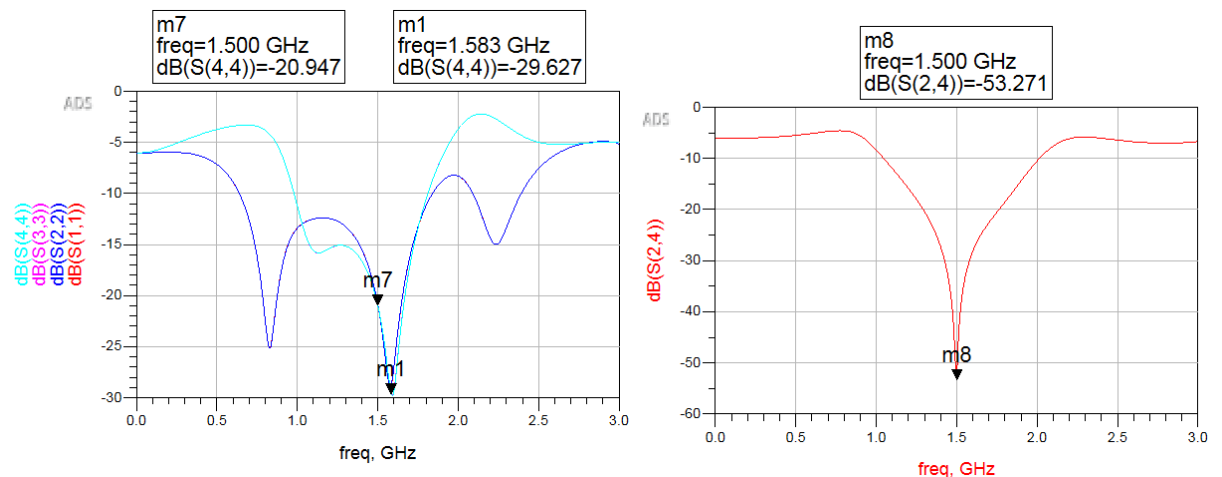
Realizando a simulação é possível visualizar na figura 10 que as portas de entrada e saída dos sinais S12 e S14 apresentaram potência de -3,15 dB e assim uma perda de inserção próxima ao ideal. Já a porta S13 apresentou potência praticamente nula  $< -20\text{dB}$ . Além disso, a diferença de fase entre os sinais S12 e S14 foi de  $142,67^\circ + 37,63^\circ = 180,3^\circ$ , muito próximo de  $180^\circ$  como o esperado.

Figura 10 - Perda de inserção nas portas de entrada e saída no Momentum.



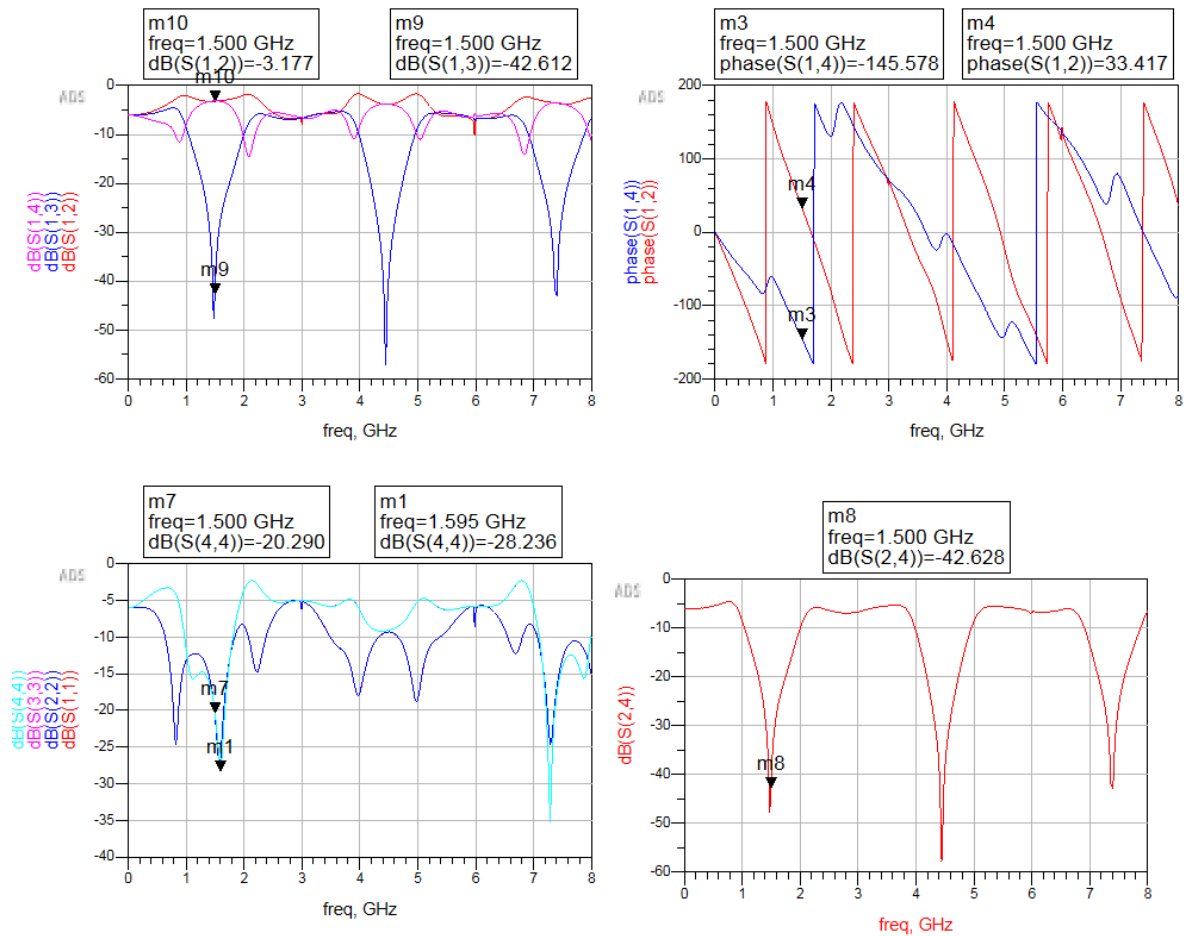
Já na figura 11 é possível ver que o casamento das portas dos sinais S11, S22, S33, S44 foi alterado drasticamente (-20,94 dB) em relação ao Schematics, porém ainda se encontram na margem esperada < -20dB. Já o isolamento entre as portas de saída S24 não foi alterado e permaneceu abaixo de -20dB.

Figura 11 - Casamento das portas e isolamento entre saídas no Momentum.



Por último, foi simulado o sistema com uma frequência maior de 3 vezes 1,5GHz para observar o que ocorre nas frequências múltiplas da frequência de operação. Na figura 12 é possível observar que o circuito também teve as suas características iguais em uma periodicidade de 3x da frequência de operação (4,5 GHz).

Figura 12 - Simulação com frequência 3x no Momentum.



### 3. ANÁLISE

Os resultados obtidos nas duas simulações estão apresentados na tabela abaixo.

Sistema	BW (isolação < -20dB)	BW% (isolação < -20dB)/ope	Perda de Inserção (S12, S14)	Casamento das Portas (S11,S22,S33,S44)	Isolação das Portas (S24 e S13)
Schematic	0,52 GHz	35%	-3,07 dB	-38,7 dB	-60,3 dB
Momentum	0,51 GHz	34%	<b>-3,15 dB</b>	<b>-20,94 dB</b>	<b>-53,27 dB</b>

Para calcular a banda de operação foi utilizado as margens entre a frequência de operação que atingiu uma isolação menor que -20 dB, como é possível visualizar no gráfico 11, logo a diferença entre essas frequências foi de 0,51 GHz que equivale a 34%.



Observamos uma boa isolamento das portas de saída do circuito (S24), há pouquíssima transmissão entre elas  $< -20$  dB, dentro da margem especificada no projeto. Além disso, a perda de inserção ficou com  $-3,15$  dB quase ideal, diminuiu um pouco em relação ao Schematics devido às outras perdas encontradas no material, como dimensões circulares erradas e perdas por casamento (reflexão). O casamento das portas alterou drasticamente em relação ao Schematics porém ainda se encontra na margem ideal do circuito ( $< 20$  dB).

Com isso é possível afirmar que o projeto do Momentum apresentou as especificações desejadas no começo do projeto, visto que a porta de entrada (S1) está transferindo praticamente metade da energia para as portas de saída (S2 e S4) com baixa perda de inserção e isolamento das portas. Algo a melhorar do projeto seria o casamento das portas que apresentaram próximo a  $-20$  dB. A defasagem entre as portas de entrada continuam praticamente iguais aos ideais. Portanto, é possível afirmar que o substrato foi ideal para o desafio proposto e as dimensões encontradas para o sistema são facilmente manufaturadas na realidade, logo foi feito um bom projeto.

#### **4. REFERÊNCIAS**

<https://www.microwaves101.com/encyclopedias/rat-race-couplers>

[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7888823/mod\\_folder/content/0/Couplers2021.pdf?forcedownload=1](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7888823/mod_folder/content/0/Couplers2021.pdf?forcedownload=1)