



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
E DE COMPUTAÇÃO



**DESENVOLVIMENTO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DE FSS
COM ELEMENTOS FRACTAIS DE GOSPER EM
ESTRUTURAS DE MULTICAMADAS**

ALBANISA FELIPE DOS SANTOS

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (área de concentração: Telecomunicações) como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação.

Orientador: Prof. Dr. Adaildo Gomes D'Assunção

Número de ordem PPgEEC: M396

Natal, RN, Julho 2013

621.396.67

UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede
Catalogação da Publicação na Fonte

Santos, Albanisa Felipe dos.

Desenvolvimento teórico e experimental de FSS com elementos fractais de Gosper em estruturas de multicamadas. / Albanisa Felipe dos Santos. – Natal, RN, 2013.

72 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Adaildo Gomes D'Assunção.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Superfícies Seletivas de Frequência- Dissertação. 2. FSS - Dissertação. 3. Fractais de Gosper - Dissertação. 4. FSS acopladas- Dissertação. 5. Cascadeamento de FSS – Dissertação. I. D'Assunção, Adaildo Gomes. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

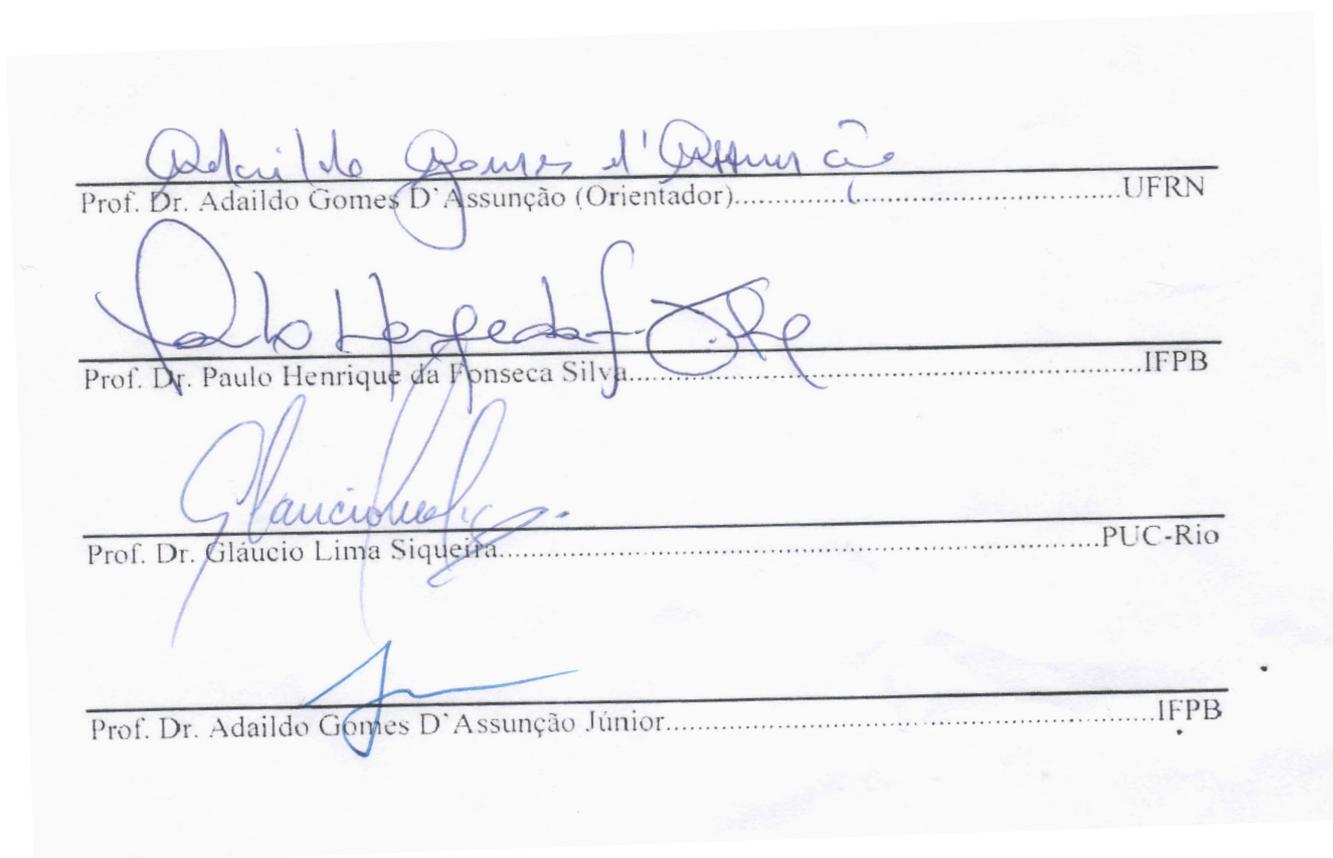
RN/UF/BCZM

CDU 621.396.67

Desenvolvimento Teórico e Experimental de FSS com Elementos Fractais de Gosper em Estruturas de Multicamadas

Albanisa Felipe dos Santos

Dissertação de Mestrado aprovada em 25 de julho 2013 pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



“Apenas quando somos instruídos pela realidade é que podemos mudá-la”

Bertolt Brecht

Agradecimentos

A Deus, por ter me dado a oportunidade de estar viva. À minha família, que ajudou a formar o meu caráter. Aos meus pais, que me criaram e me educaram. Aos meus irmãos, que sempre foram meu exemplo e orgulho. Aos meus sobrinhos, por existirem e me trazerem diversas alegrias. Ao meu namorado Alisson, que sempre me ajudou e me acolheu diante das dificuldades.

Aos diversos mestres que ao darem seus exemplos de vida, fizeram com que a aprendizagem fosse verdadeira. Aos meus orientadores Dr. Adaildo Gomes D'Assunção e Dr. Paulo Henrique da Fonseca Silva, por acreditarem em meu potencial e pela dedicação e tempo que sempre me foi dispensado. Aos muitos amigos que fiz nessa caminhada, em especial: Marcelo, Diego, Clarissa, Wellington, Leilane e Gustavo, pela vivência em laboratório. Aos professores que me deram enorme apoio ao longo da vida acadêmica.

À amiga Rossana Moreno, pela grande contribuição e incentivo.

Ao CNPq, pelo suporte financeiro, e ao GMA, CLBI, INCT/CSF e o GTEMA, por cederem espaço e recursos necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

Enfim, aos que, embora não citados, contribuíram de forma significativa nesta dissertação.

Resumo

A propriedade de autosimilaridade dos fractais é investigada para o desenvolvimento de superfícies seletivas de frequência (*frequency selective surfaces* - FSS) com várias bandas de rejeição. Em particular, são considerados fractais de Gosper, na definição dos formatos dos elementos das FSS. Por conta da dificuldade de impressão de detalhes dos elementos das FSS, são considerados apenas elementos, com até três iterações fractais. As simulações foram realizadas com o uso do programa comercial *Ansoft Designer*. Para fins de validação de resultados, foram construídos vários protótipos de FSS com elementos fractais. No processo de fabricação, os formatos dos elementos fractais foram desenhados com auxílio de ferramentas de CAD (*computer aided design*). Os protótipos construídos foram medidos através de um analisador de redes vetorial (modelo N3250A, da *Agilent Technologies*). A utilização de elementos fractais nas estruturas de FSS consideradas permitiu verificar que o aumento do nível fractal possibilita a redução do tamanho dos elementos, porém reduz a largura de banda das mesmas. Neste sentido, é também investigado o efeito produzido pelo cascadeamento de estruturas de FSS. As estruturas cascadeadas consideradas são formadas por duas FSS separadas por uma camada dielétrica, cuja distância é variada para determinação do efeito produzido na largura de banda da geometria acoplada. Especificamente, foram consideradas estruturas de duas FSS acopladas através de camadas de ar e de fibra de vidro. Para fins de comparação de resultados, foram projetados, construídos e medidos diversos protótipos de FSS, em estruturas isoladas e acopladas. Foi observada concordância entre os resultados simulados e medidos, nos casos considerados. Também foi observado que o uso das estruturas cascadeadas, além de aumentar a largura de banda, permitiu, em alguns casos, aumentar o número de bandas de operação na faixa de frequência considerada. Na continuidade deste trabalho, pretende-se investigar a utilização de outras geometrias fractais, no caso de estruturas de FSS isoladas, e de camadas múltiplas, no caso de estruturas de FSS acopladas, para aplicações específicas em filtros, antenas de alto ganho e absorvedores.

Palavras chaves: Superfície seletiva de frequência, FSS, fractal de Gosper, FSS acopladas, cascadeamento de FSS.

Abstract

The fractal self-similarity property is studied to develop frequency selective surfaces (FSS) with several rejection bands. Particularly, Gosper fractal curves are used to define the shapes of the FSS elements. Due to the difficulty of making the FSS element details, the analysis is developed for elements with up to three fractal levels. The simulation was carried out using Ansoft Designer software. For results validation, several FSS prototypes with fractal elements were fabricated. In the fabrication process, fractals elements were designed using computer aided design (CAD) tools. The prototypes were measured using a network analyzer (N3250A model, Agilent Technologies). Matlab software was used to generate compare measured and simulated results. The use of fractal elements in the FSS structures showed that the use of high fractal levels can reduce the size of the elements, at the same time as decreases the bandwidth. We also investigated the effect produced by cascading FSS structures. The considered cascaded structures are composed of two FSSs separated by a dielectric layer, which distance is varied to determine the effect produced on the bandwidth of the coupled geometry. Particularly, two FSS structures were coupled through dielectric layers of air and fiberglass. For comparison of results, we designed, fabricated and measured several prototypes of FSS on isolated and coupled structures. Agreement was observed between simulated and measured results. It was also observed that the use of cascaded FSS structures increases the FSSs bandwidths and, in particular cases, the number of resonant frequencies, in the considered frequency range. In future works, we will investigate the effects of using different types of fractal elements, in isolated, multilayer and coupled FSS structures for applications on planar filters, high-gain microstrip antennas and microwave absorbers.

Keywords: Frequency selective surface, FSS, Gosper fractal, coupled FSS, FSS cascading.

Sumário

Lista de Figuras	09
Lista de Tabelas	13
Lista de Símbolos e Abreviaturas	14
Resumo	15
Abstract	16
1. Introdução	17
2. Superfícies Seletivas de Frequência	19
2.1 Introdução	19
2.2 Estrutura e Características Principais	19
2.3 Técnicas de Análise	21
2.4 Cascadeamento de FSS	22
2.5 Conclusão	24
3. Geometria Fractal	25
3.1 Introdução	25
3.2 Classificação dos Fractais	27
3.3 Geometria Fractal de Gosper	28
3.4 Conclusão	30
4. Resultados Simulados e Medidos	31
4.1 Introdução	31

4.2 FSS Projetadas com a Geometria Fractal de Gosper	31
4.3 Resultados das FSS Projetadas com Geometria Fractal de Gosper	34
4.4 FSS Projetadas com a Geometria Fractal de Gosper Multicamadas	40
4.5 Resultados das FSS Projetadas com Geometria Fractal de Gosper Multicamadas	54
4.6 Conclusão	66
5. Conclusões	67
Referências	69

Lista de Figuras

Capítulo 2

2.1. Configuração típica de uma FSS	21
2.2. Formatos típicos de elementos de FSS do tipo <i>Patch</i> condutor. (a) quadrado, (b) retangular, (c) circular, (d) triangular, (e) elíptico e (f) anelar.	22
2.3. Configuração típica de duas FSS acopladas através de uma região dielétrica	23
2.4. Configuração típica de duas FSS, do tipo <i>freestanding</i> , acopladas através de uma região dielétrica.	24

Capítulo 3

3.1. Formação do floco de neve de Koch.	27
3.2. Conjunto de Mandelbrot.	28
3.3. Curva de Koch: (a) nível 0; (b) nível 1; (c) nível 2; (d) nível 3.	30
3.4. Ilustração do <i>Patch</i> na forma de hexágono gerador para o fractal de Gosper, conhecido como nível 0 ($k = 0$).	31
3.5. Formação do fractal de Gosper, (a) nível 1 (b) nível 2.	32
3.6. Ilustração de patches com três níveis de iteração fractal: (a) $k = 1$; (b) $k = 2$; (c) $k = 3$	32

Capítulo 4

4.1. Simulações com mudança nos lados do hexágono.	34
4.2. Simulações de elementos com mesmo lado e periodicidades diferentes.	35
4.3. Tela do software Ansoft Designer mostrando os parâmetros usados no início do projeto.	36
4.4. Resultados simulados para as FSS projetadas com elementos fractais de Gosper.	37

4.5. Esquema de medição de uma FSS.	38
4.6. Fotografia do setup usado para a medição de uma FSS.	38
4.7. Fotografias de quatro protótipos de FSS com elementos fractais de Gosper: (a) nível 0, (b) nível 1, (c) nível 2 e (d) nível 3.	39
4.8. Comparação entre os resultados medido e simulado para $k = 0$	40
4.9. Comparação entre os resultados medido e simulado para $k = 1$	40
4.10. Comparação entre os resultados medido e simulado para $k = 2$	41
4.11. Comparação entre os resultados medido e simulado para $k = 3$	41
4.12. Comparação dos níveis K0K3 com K3K0 a uma separação de 1 mm um do outro.	43
4.13. Comparação dos níveis K0K3 com K3K0 a uma separação de 5 mm um do outro.	43
4.14. Vista em 3D da tela do software de simulação mostrando as duas células separadas por uma camada de ar.	44
4.15. Simulação do cascadeamento de duas estruturas nível 0.	45
4.16. Simulação do cascadeamento de duas estruturas nível 0 e nível 1.	45
4.17. Simulação do cascadeamento de duas estruturas nível 0 e nível 2.	46
4.18. Simulação do cascadeamento de duas estruturas nível 0 e nível 3.	46
4.19. Simulação do cascadeamento de duas estruturas nível 1.	47
4.20. Simulação do cascadeamento de duas estruturas: nível 1 e nível 2.	47
4.21. Simulação do cascadeamento de duas estruturas: nível 1 e nível 3.	48
4.22. Simulação do cascadeamento de duas estruturas nível 2.	48
4.23. Simulação do cascadeamento de duas estruturas: nível 2 e nível 3.	49
4.24. Simulação do cascadeamento de duas estruturas nível 3.	49
4.25. Simulação do cascadeamento de duas estruturas de nível 0 com FR4 entre elas.	51
4.26. Simulação do cascadeamento de duas estruturas nível 0 e nível 1 com FR4 entre elas.	51

4.27. Simulação do cascadeamento de duas estruturas nível 0 e nível 2 com FR4 entre elas.	52
4.28. Simulação do cascadeamento de duas estruturas nível 0 e nível 3.	52
4.29. Simulação do cascadeamento de duas estruturas nível 1 com FR4 entre elas. . .	53
4.30. Simulação do cascadeamento de duas estruturas: nível 1 e nível 2 com FR4 entre elas.	53
4.31. Simulação do cascadeamento de duas estruturas: nível 1 e nível 3 com FR4 entre elas.	54
4.32. Simulação do cascadeamento de duas estruturas nível 2 com FR4 entre elas. . .	54
4.33. Simulação do cascadeamento de duas estruturas: nível 2 e nível 3 com FR4 entre elas.	55
4.34. Simulação do cascadeamento de duas estruturas nível 3 com FR4 entre elas. . .	55
4.35. Fotografia dos parafusos e porcas usadas na medição.	56
4.36. Detalhe da colocação dos parafusos de teflon numa FSS multicamada.	57
4.37. Placa de FR4 após a retirada da cobertura de cobre.	57
4.38. Nível 0 e nível 1 sem separação entre as FSS.	59
4.39. Nível 0 e nível 1 com 10 mm de separação entre as FSS.	59
4.40. Nível 0 e nível 1 com FR4 de 0,75mm entre as FSS.	60
4.41. Nível 0 e nível 2 sem separação entre as FSS.	60
4.42. Nível 0 e nível 2 com 1 mm de separação entre as FSS.	61
4.43. Nível 0 e nível 2 com FR4 de 0,75mm entre as FSS.	61
4.44. Nível 0 e nível 3 sem separação entre as FSS.	62
4.45. Nível 0 e nível 3 com 1 mm de separação entre as FSS.	62
4.46. Nível 0 e nível 3 com FR4 de 1,50 mm entre as FSS.	63
4.47. Nível 1 e nível 2 sem separação entre as FSS.	63
4.48. Nível 1 e nível 2 com 6 mm de separação entre as FSS.	64
4.49. Nível 1 e nível 2 com FR4 de 0,75mm entre as FSS.	64

4.50. Nível 1 e nível 3 sem separação entre as FSS.	65
4.51. Nível 1 e nível 3 com 1 mm de separação entre as FSS.	65
4.52. Nível 1 e nível 3 com FR4 de 0,75mm entre as FSS.	66
4.53. Nível 1 e nível 3 com FR4 de 1,50 mm entre as FSS.	66
4.54. Nível 2 e nível 3 sem separação entre as FSS.	67
4.55. Nível 2 e nível 3 com 5 mm de separação entre as FSS.	67
4.56. Nível 2 e nível 3 com FR4 de 0,75 mm entre as FSS.	68

Lista de Tabelas

Capítulo 4

4.1. Comparação dos resultados das principais ressonâncias.	40
4.2. Organização das simulações de duas FSS com ar entre elas.	42
4.3. Organização das simulações de duas FSS com FR4 entre elas.	48
4.4. Organização das medições de FSS acopladas.	56

Lista de Símbolos e Abreviaturas

λ – Comprimento de onda

r – Fator de escala

f_r – Frequência de ressonância

ϵ_r – Permissividade elétrica relativa

BW – *Bandwidth*

CAD - *Computer aided design*

D_s – Dimensão de similaridade

FDTD - Método das diferenças finitas no domínio do tempo

FSS – *Frequency selective surface*

FR4 – Laminado de fibra de vidro

h – Espessura do substrato dielétrico

d – Distância entre as FSS acopladas

H_h – Altura do hexágono

k – Nível de iteração fractal

L_h – Lado do hexágono

MoM – Método dos momentos

N_i – Número de iterações

P – Periodicidade da FSS

P_x – Periodicidade da FSS na direção x

P_y – Periodicidade da FSS na direção y

RF – Radiofrequência

$\tan\delta$ – Tangente de perdas

Capítulo 1

Introdução

As novas tecnologias na área das telecomunicações evoluem cada vez mais rapidamente. Para atender às necessidades desse novo panorama, diversos estudos vêm sendo realizados em estruturas de microfita para uso na área de micro-ondas, tais como: filtros, antenas e arranjos periódicos. Uma das vertentes é o estudo de superfícies seletivas de frequência. Estas estruturas periódicas são bem apropriadas devido à característica de seleção de sinais desejáveis em uma dada faixa de frequências de interesse.

Com o intuito de atender aos requisitos das aplicações atuais das comunicações sem fio, os filtros de micro-ondas são continuamente otimizados em busca de melhor desempenho, dimensões compactas e baixo custo. O uso da geometria fractal é uma excelente técnica para realizar melhoramentos em FSS funcionando como filtros de ondas eletromagnéticas. Contudo, à medida que o nível de iteração fractal aumenta, observa-se o estreitamento da largura de banda nas respostas das FSS com elementos fractais. Uma forma de solucionar o problema da faixa estreita é a combinação estruturas em multicamadas. É de grande importância estudar o comportamento das estruturas quando combinadas entre si, seja com ar ou com outro material entre as camadas.

O objetivo deste é realizar um estudo do comportamento das FSS de Gosper ao combiná-las em camadas. Estas FSS de camadas simples podem ser separadas por camadas dielétricas de ar ou outro material dielétrico. Neste trabalho, são considerados apenas elementos fractais, com até três iterações fractais. As simulações são realizadas com o uso do programa comercial Ansoft Designer. Os leiautes dos elementos são desenhados com auxílio de ferramentas de CAD (*Computer Aided Design*). Alguns protótipos dessas estruturas são construídos e posteriormente medidos através de um analisador de redes vetorial (modelo N3250A, da Agilent Technologies). Este estudo também inclui a investigação do comportamento da largura de banda, em estruturas de FSS acopladas com camadas múltiplas.

Nas pesquisas realizadas recentemente sobre a utilização de FSS, é possível perceber a importância de estruturas de multibanda. Em [1], os autores apresentam uma investigação

sobre o uso de *slots* em FSS. As FSS consideradas apresentaram características de multibanda, em geometrias compactas, sendo a simulação efetuada através do *Ansoft Design*. Em [2] as propriedades de FSS são avaliadas através de uma abordagem de circuitos equivalentes. Os resultados são comparados com simulações que utilizaram o método dos momentos (MoM).

O uso de geometrias fractais nas células das FSS também é um tema atual e com muitas aplicações. Em [3], o autor investigou o comportamento espectral das estruturas com geometrias fractais e comparou várias estruturas, como as encontradas em [4]. Em [5], foi apresentado o uso de geometria fractal em FSS com duas ou três bandas, dependendo da quantidade de repetições que são utilizadas para gerar a geometria correspondente. Além disso, a simetria das estruturas empregadas com elementos *patches* correspondentes a combinações de fractais de Minkowski, tapete de Sierpinski e dipolo cruzado, proporcionou polarização dupla. A simulação das estruturas foi efetuada através de dois métodos, o MoM e o FDTD, além da construção e medição. Destaca-se o uso de laminados com fibra de vidro como substrato para construção das estruturas.

Uma forma de solucionar um dos maiores problemas gerado pelo aumento do nível de iteração fractal em estruturas que utilizam geometria fractal é o uso da técnica de cascadeamento das estruturas, como visto em [6] e [7]. No primeiro, o autor usa o método de Galerkin para estudar as características de transmissão e reflexão das estruturas multicamadas para uso em sistema de antenas para comunicação via satélite, enquanto no segundo usa a geometria fractal de Koch e projeta FSS cascadeadas com ar entre elas.

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos. O Capítulo 2 aborda a teoria básica de superfícies seletivas de frequência e o cascadeamento dessas estruturas. O Capítulo 3 descreve sucintamente a teoria de fractais com ênfase nos fractais de Gosper. O Capítulo 4 mostra os resultados simulados e medidos para as FSS simples e os resultados de simulações das FSS de multicamadas, separadas por ar e por fibra de vidro. O Capítulo 5 apresenta as considerações finais e propostas de continuidade do trabalho. Ao final, são apresentadas as referências usadas neste trabalho.

Capítulo 2

Superfícies Seletivas de Frequência

2.1 Introdução

Este capítulo apresenta uma fundamentação teórica para o estudo de FSS, ressaltando suas estruturas e características principais, as geometrias usuais dos seus elementos (dos tipos *patch* ou abertura) e os substratos utilizados, além das vantagens e desvantagens de aplicações em sistemas de comunicação e radar, por exemplo.

A FSS é uma estrutura planar periódica do tipo *patch* ou do tipo abertura que vem sendo estudada para aplicações específicas também na atividade aeroespacial, como em radomes, para melhorar os desempenhos das antenas.

2.2 Estrutura e Características Principais

As superfícies seletivas de frequência são estruturas periódicas bidimensionais, utilizadas em sistemas de comunicações de micro-ondas [8]-[11], em uma grande variedade de aplicações, com especificações de filtros rejeita-faixa ou passa-faixa, dependendo do tipo de elemento do arranjo (*patch* ou abertura, respectivamente). Desta forma, uma FSS é capaz de selecionar os sinais desejáveis em uma faixa de frequência de interesse. Com o intuito de atender aos requisitos das aplicações atuais das comunicações sem fio, os filtros de micro-ondas são continuamente otimizados em busca de melhor desempenho, dimensões compactas e baixo custo. A principal vantagem das FSS é a facilidade de projeto e análise, associada à obtenção de resultados precisos, de maneira eficiente. A Figura 2.1 ilustra a configuração típica de uma FSS com *patches* condutores.

As FSS são estruturas planares compostas por arranjos periódicos impressos sobre substratos dielétricos, com uma ou mais camadas, que podem operar em faixas de frequência distintas. Estes arranjos periódicos são descritos por células que podem conter elementos do tipo *patches* condutores ou aberturas. Quando expostas à radiação eletromagnética, as FSS ressoam em determinadas frequências que dependem das propriedades do substrato dielétrico, da geometria e do espaçamento utilizado entre as células [12]-[14]. No momento que um

elemento do tipo dipolo é alimentado por um sinal de microondas e seu comprimento é um múltiplo de meio comprimento de onda ($\lambda/2$), ocorrem ressonâncias e um espalhamento da energia radiada. Quando esses dipolos são colocados como um arranjo, a energia radiada por todos os elementos é coerente com a direção de reflexão [15].

Conseqüentemente, as mais variadas aplicações para tais estruturas têm sido investigadas. Elas são muito importantes em sistemas de comunicações, sistemas de radar, sistemas de comunicação por satélite, sistemas de antenas, radomes, foguetes, mísseis, filtros eletromagnéticos para antenas refletoras, estruturas absorvedoras, etc. [16].

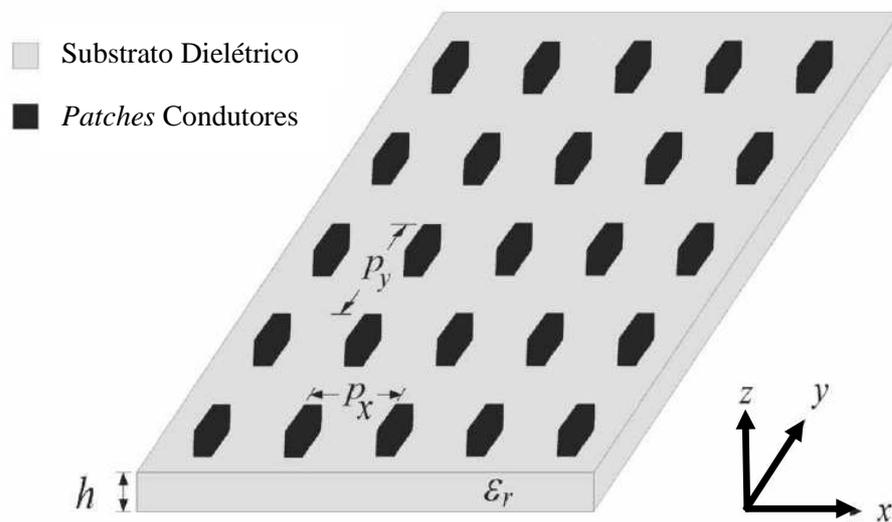


Fig. 2.1: Configuração típica de uma FSS.

Os últimos anos vêm sendo marcados por um avanço tecnológico no sentido de desenvolver estruturas e dispositivos com tecnologia planar, como as FSS, e isto é decorrente da necessidade crescente de implementação de dispositivos e do desenvolvimento de circuitos para as mais diversas aplicações [16].

A aplicação mais conhecida de uma FSS é o anteparo da porta do forno de micro-ondas. Este anteparo funciona como um filtro passa-faixa que deixa passar a luz visível e rejeita a faixa de frequência utilizada no forno de micro-ondas, em torno de 2,45 GHz [17].

A investigação dos efeitos produzidos pela utilização de novos materiais na confecção de FSS é de grande interesse para o desenvolvimento científico e tecnológico, em face da possibilidade de melhoria das características de diversos dispositivos e circuitos

usados em altas frequências. Portanto, o estudo de novas geometrias, combinadas com o uso de novos materiais, pode melhorar o desempenho dessas estruturas [14].

O formato do *patch* é um fator importante no projeto de FSS, sendo utilizadas tanto formas geométricas regulares (quadrada, circular, elíptica, triangular e anel, por exemplo), como estruturas complexas (como os fractais geométricos). O material condutor normalmente utilizado na confecção dos *patches* condutores das estruturas de FSS é o cobre. A Figura 2.2 apresenta formas usuais de elementos *patches* condutores empregados em superfície seletiva de frequência (FSS).

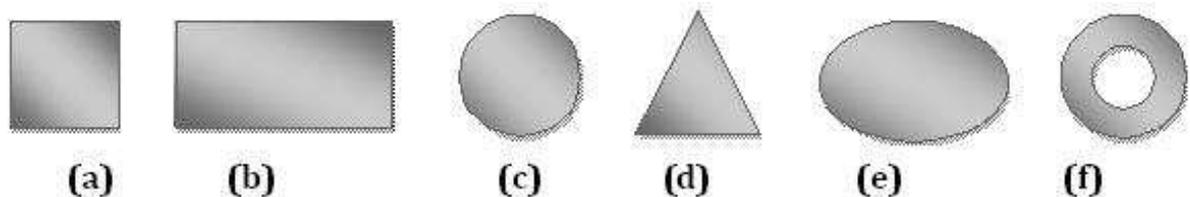


Fig. 2.2: Formatos típicos de elementos de FSS do tipo *patch* condutor. (a)quadrado, (b) retangular, (c) circular, (d) triangular, (e) elíptico e (f) anelar.

Os materiais utilizados como substratos podem ser dielétricos isotrópicos, dielétricos anisotrópicos, ferrimagnéticos e metamateriais. Na maioria das aplicações, são utilizados substratos dielétricos isotrópicos com permissividades relativas na faixa de $2 \leq \epsilon_r \leq 10$.

2.3 Técnicas de Análise

As FSS podem ser analisadas através de métodos aproximados, como o dos circuitos equivalentes, e de métodos rigorosos, como os de onda completa. O mais simples desses métodos é o do circuito equivalente. Na utilização do método dos circuitos equivalentes, o elemento do arranjo periódico é modelado através de componentes capacitivos e/ou indutivos. A solução do circuito resultante fornece as características de transmissão e reflexão da estrutura de FSS. Já que o método usa uma aproximação quase-estática para calcular as componentes do circuito, é um método aproximado, embora eficiente e sua precisão é adequada para diversas aplicações [18].

Dentre os métodos rigorosos, o mais empregado é o Método dos Momentos (MoM). Neste método, as correntes superficiais são utilizadas para modelar o *patch* de microfita e as correntes de polarização volumétrica são utilizadas para modelar os campos ao longo do

material dielétrico Este método considera o efeito das ondas de superfície fora do limite físico do *patch* bidimensional, fornecendo uma solução mais precisa [19]. Um outro método de expansão modal é o do gradiente conjugado [20]. Neste caso, verifica-se um grande esforço computacional, sendo desaconselhável para a análise de FSS com elementos mais complexos. Em [21], o método do vetor potencial de Hertz é empregado na análise de FSS.

Em combinação com esses métodos, podem ser utilizadas técnicas de inteligência artificial, como algoritmos genéticos e redes neurais, na análise e/ou síntese de FSS [22]-[27].

Programas comerciais também são bastante usados na análise de FSS. Dentre estes, destacam-se o *Ansoft Designer*, o *Ansoft HFSS* e o *CST Microwave Studio*. Neste trabalho, é utilizado o *Ansoft Designer*, que emprega o Método dos Momentos (MoM) e apresenta resultados consistentes, a despeito da complexidade dos formatos dos *patches* condutores.

2.4 Cascadeamento de FSS

O cascadeamento de FSS corresponde à utilização de geometrias acopladas. A estrutura da Figura 2.3 é composta por duas FSS de elementos *patches* condutores, que são separadamente impressos sobre uma camada de material dielétrico, constituindo isoladamente as duas FSS que, posteriormente, são acopladas através de uma camada dielétrica.

As dimensões dos elementos das duas FSS isoladas (FSS1 e FSS2), usualmente são desiguais. Além disso, os formatos podem ser distintos.

Na Figura 2.3, a região dielétrica é constituída por cinco camadas. As camadas 1 e 5 são preenchidas com ar. As camadas 2 e 4 são preenchidas com materiais dielétricos, normalmente, utilizados na confecção de placas de circuitos impressos, tais como fibra de vidro, materiais cerâmicos, polímeros e alumina, dentre outros. A camada 3 pode ser de ar, fibra de vidro, por exemplo.

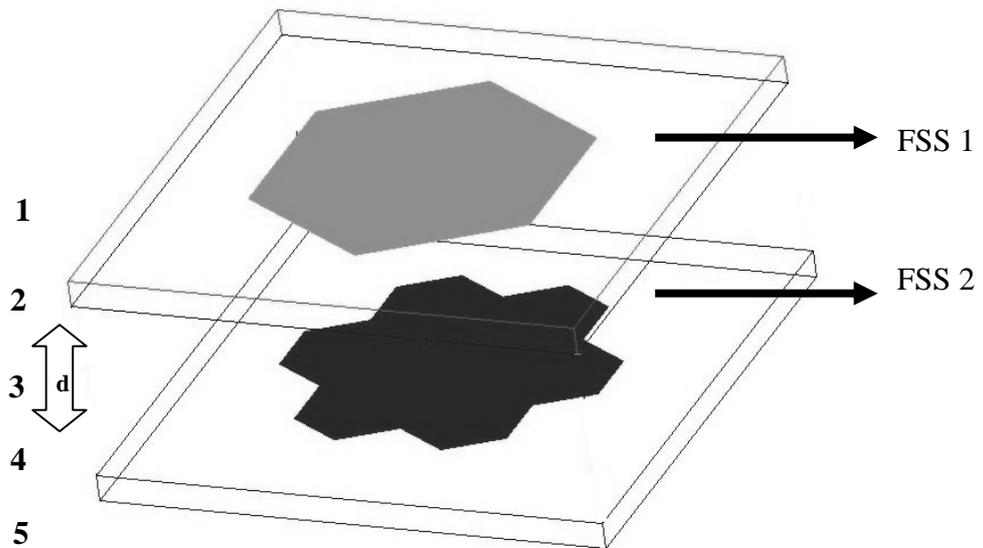


Fig. 2.3: Configuração típica de duas FSS acopladas através de uma região dielétrica.

Quando são utilizadas FSS do tipo *freestanding*, a geometria da Figura 2.3 se reduz à da Figura 2.4, sendo composta por três regiões dielétricas.

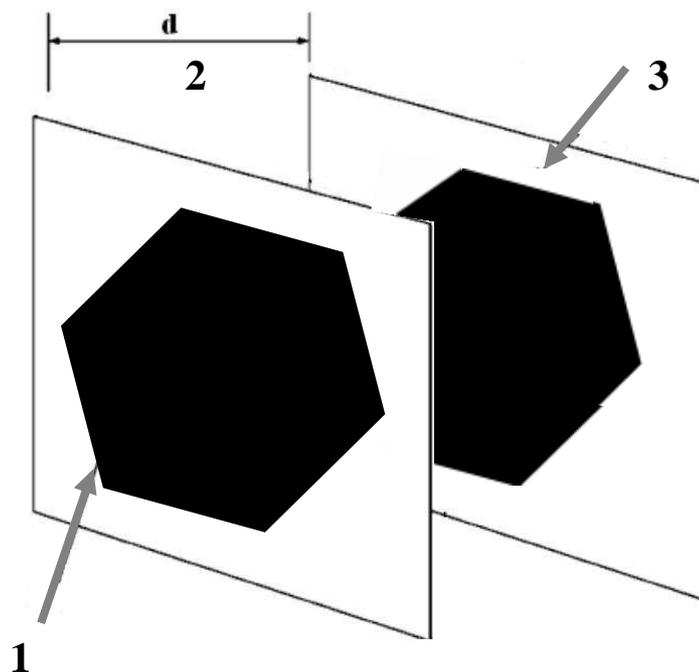


Fig. 2.4: Configuração típica de duas FSS, do tipo *freestanding*, acopladas através de uma região dielétrica.

A Figura 2.3 mostra uma configuração típica de duas FSS acopladas. Quando se realiza projetos com FSS impressas sobre substratos dielétricos, uma das grandes dificuldades é a largura de banda estreita que essas estruturas apresentam. A solução deste problema pode ser obtida com o uso de cascadeamento de estruturas de FSS, por exemplo.

Uma FSS pode ser analisada através de métodos rigorosos e métodos aproximados. O método utilizado na realização das análises, neste trabalho, foi o método dos momentos (MoM), que é um método de onda completa, usado para distribuição de correntes desconhecidas na FSS, que dependem fortemente da geometria dos seus elementos. Este método foi utilizado na análise de estruturas que utilizam geometria fractal, apesar do esforço computacional requerido, para estruturas com elementos fractais até o nível de iteração $k = 3$.

Um modo para facilitar a análise é utilizar métodos aproximados. Dentre estes, destaca-se o que emprega a técnica da matriz de espalhamento, a qual permite representar a solução da análise de uma FSS em termos dos parâmetros de espalhamento. Uma vantagem associada a este método é que ele permite a análise do cascadeamento de FSS, incluindo geometrias complexas [28], [29].

2.5 Conclusão

O estudo de superfícies seletivas de frequência, ao longo dos anos, tem despertado o interesse de muitos pesquisadores por conta da facilidade de construção e das muitas aplicações. Especificamente, têm sido investigadas as propriedades de configurações de FSS utilizando novas geometrias, novas formas de elementos e novos materiais, por exemplo. Diversas técnicas de análise têm sido utilizadas na caracterização e no projeto de FSS, com o objetivo de melhorar suas respostas em frequência. Ultimamente, alguns softwares comerciais têm se transformado em ferramentas essenciais nesses estudos, contribuindo para a obtenção de estruturas de banda larga, por exemplo. É possível verificar que técnicas de cascadeamento utilizadas atualmente têm apresentado resultados interessantes e efetivo uso, por exemplo, para aumentar a largura de banda, muito desejável para uso de diversos serviços em uma mesma estrutura.

Capítulo 3

Geometrias Fractais

3.1 Introdução

O termo *fractal*, do latim *fractus*, significa quebrar, fracionar, irregular, e refere-se a uma superfície com características especiais, que não pode ser explicada a partir da matemática Euclidiana. Este termo foi originalmente proposto por Mandelbrot [11] para descrever um conjunto de formas irregulares, que apresentam a propriedade de autossimilaridade em sua construção geométrica. Desde a sua descoberta, diversas aplicações foram realizadas em muitos ramos da ciência e da engenharia. Uma dessas áreas é denominada eletrodinâmica fractal. Na eletrodinâmica fractal, a geometria fractal é combinada com a teoria eletromagnética, para solucionar problemas complexos de antenas, propagação e espalhamento de sinais.

A idéia da geometria fractal surgiu com alguns estudos científicos realizados entre 1857 e 1913. Em 1872, Karl Weierstrass descreveu uma função contínua, porém não diferenciável em todo o seu domínio. Helge Von Koch, em 1904, fez infinitas adições de triângulos ao perímetro de um triângulo inicial, cujo nome ficou popularmente conhecido como “flocos de neve de Koch”, mostrado na Figura 3.1.

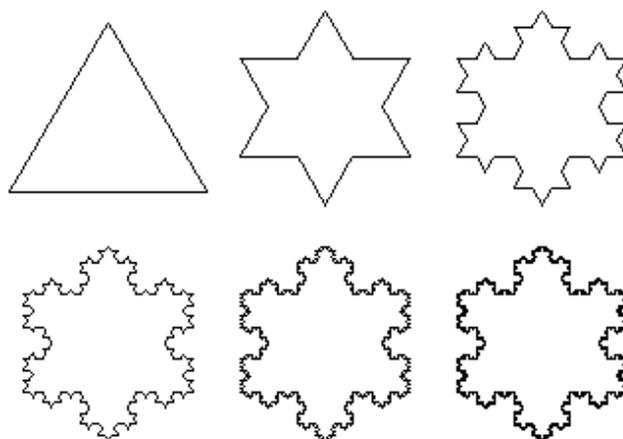


Fig. 3.1: Formação do floco de neve de Koch.

O matemático Benoit B. Mandelbrot, estudando a teoria de dimensão de Euclides, percebeu que determinadas figuras repetiam sua estrutura completa em escalas cada vez menores. A tais figuras deu-se o nome de fractais. O fractal mais conhecido é o conjunto de Mandelbrot, ilustrado na Figura 3.2.

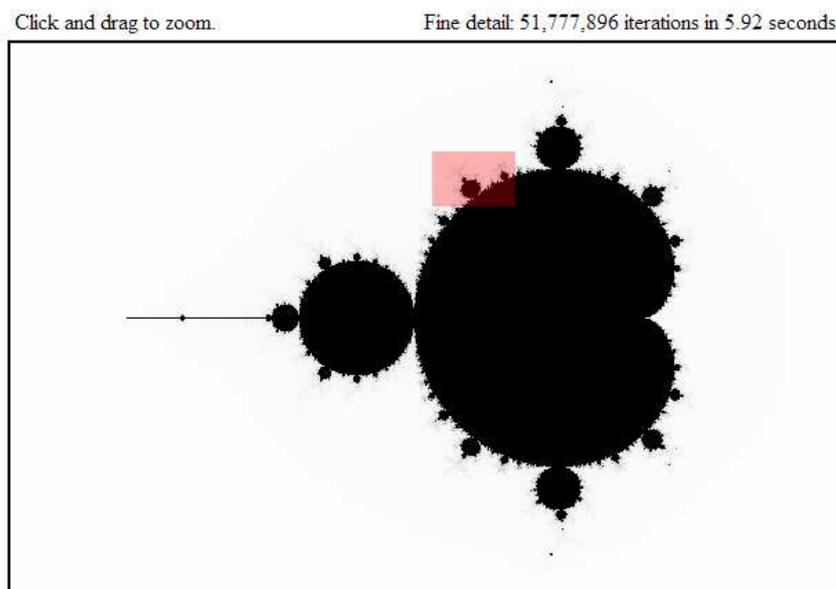


Fig. 3.2: Conjunto de Mandelbrot. Fonte: Microsoft (2013)

Não há uma definição precisa de um fractal, apenas algumas características que podem ser observadas e permitem identificar se a geometria é um fractal. Objetivamente, Kenneth Falconer [15] indicou as seguintes características principais de uma estrutura fractal:

Estrutura fina em qualquer escala: uma estrutura fina consiste em um detalhamento infinito, em que sucessivas ampliações de um fractal levam a mais e mais detalhes;

Não é descrita de maneira simples por função analítica ou em linguagem geométrica tradicional, pois são construídas através de processos iterativos;

Autossimilaridade, ou seja, ter o mesmo aspecto em qualquer ângulo de observação. A forma se repete, e esta repetição pode ser de tamanho igual ou diferente;

A razão de similaridade do conjunto fractal pode ser expressa de acordo com (3.1), que representa uma simplificação para encontrar a dimensão fractal, quando se trata de fractais geométricos.

$$D_s = \frac{\log(Ni)}{\log\left(\frac{1}{r}\right)} \quad (3.1)$$

Em (3.1), D_s indica a dimensão de similaridade, N_i o número de iterações e r a razão ou o comprimento da superfície.

3.2 Classificação dos Fractais

Os fractais determinísticos, também conhecidos como fractais geométricos, são aqueles cuja geração, a partir de uma figura geradora Euclidiana, é feita através de um processo iterativo. Portanto, são fractais com autossimilaridade exata ou perfeita, sendo aqueles fractais em que a ampliação de uma determinada parte reproduz exatamente o todo, sem falhas ou defeitos.

Existem diversos exemplos de fractais geométricos, como a curva de Koch (Figura 3.3), o conjunto de Cantor e o triângulo de Sierpinski, dentre muitos outros que atualmente são usados para os mais diversos fins.

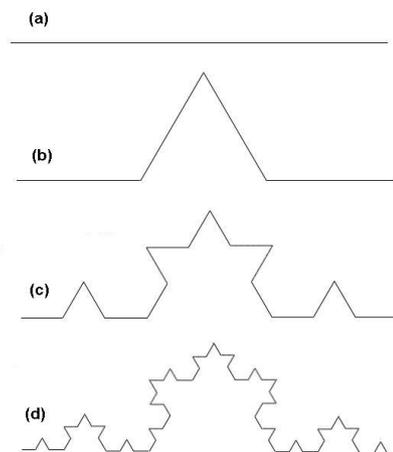


Fig. 3.3: Curva de Koch: (a) nível 0; (b) nível 1; (c) nível 2; (d) nível 3.

Em geral, as estruturas que existem na natureza não são representadas por figuras geométricas. Os fractais naturais são sempre recheados de “imperfeições” e “defeitos”, situados aleatoriamente, de tal maneira que uma parte do fractal, quando ampliada, apenas se assemelha ao todo [16], como é o caso do romanesco (*Brassicaoleraceavar.botrytis*), uma espécie de brócolis.

Os fractais de fuga são definidos por uma relação de recorrência em cada ponto do espaço (tal como o plano complexo). Exemplos deste tipo são o conjunto de Mandelbrot e o fractal de Lyapunov. Estes também são chamados de fractais gerados por computador.

3.3 Geometria Fractal de Gosper

A geometria fractal desse trabalho se baseia em trabalhos do cientista da computação norte-americano, Robert William Gosper Jr., conhecido como Bill Gosper. Ele também é reconhecido por seu trabalho em representações de frações continuadas de números reais, e por auxiliar no algoritmo (que leva seu nome) para achar formas aproximadas de identidades hipergeométricas. A curva de Gosper é uma curva de preenchimento de espaço [29], [30].

Os fractais utilizados nas duas estruturas são conhecidos como Fractais de Gosper, e foram projetados a partir de um arranjo periódico convencional de *patches* hexagonais. Recentemente esses fractais foram usados para projetos de filtros rejeita faixa com terra truncado [30]. A Figura 3.4 ilustra o hexágono usado para gerar o referido fractal. O lado do hexágono é dado por L_h e H_h é a altura, obtida através de (3.2):

$$H_h = L_h \sqrt{3} \quad (3.2)$$

A Figura 3.6 ilustra os três níveis de iteração fractal (k) analisados neste trabalho. A lei de formação de um fractal de Gosper, baseado em uma geometria hexagonal, é expressa por (3.3):

$$L_h(k) = \frac{L_h(k-1)}{\sqrt{7}} \quad (3.3)$$

em que, $k = 1, 2$ e 3 , representando o primeiro, segundo e terceiro níveis de iteração. Para o elemento gerador, apresentado na Figura 3.5, considera-se $k = 0$. Os hexágonos de lado $L_h(k)$, obtidos através de (3.3), são colocados ao redor de um dos hexágonos formados, e as lacunas que são formadas por esse processo devem ser preenchidas. Assim como se visualiza na Figura 3.5, onde P representa a periodicidade da célula, sendo P_x a periodicidade na direção x e P_y a periodicidade na direção y .

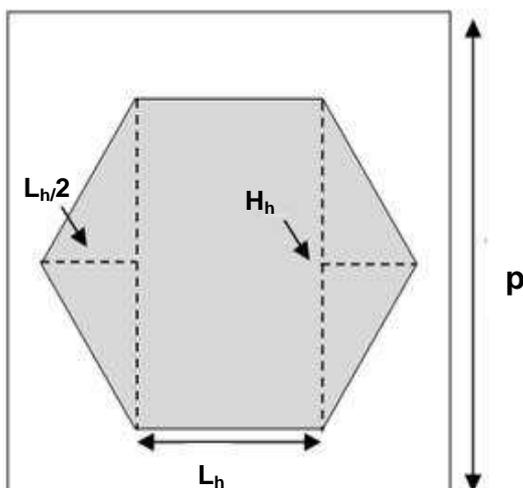


Fig. 3.4: Ilustração do Patch na forma de hexágono gerador para o fractal de Gosper, conhecido como nível 0 ($k = 0$).

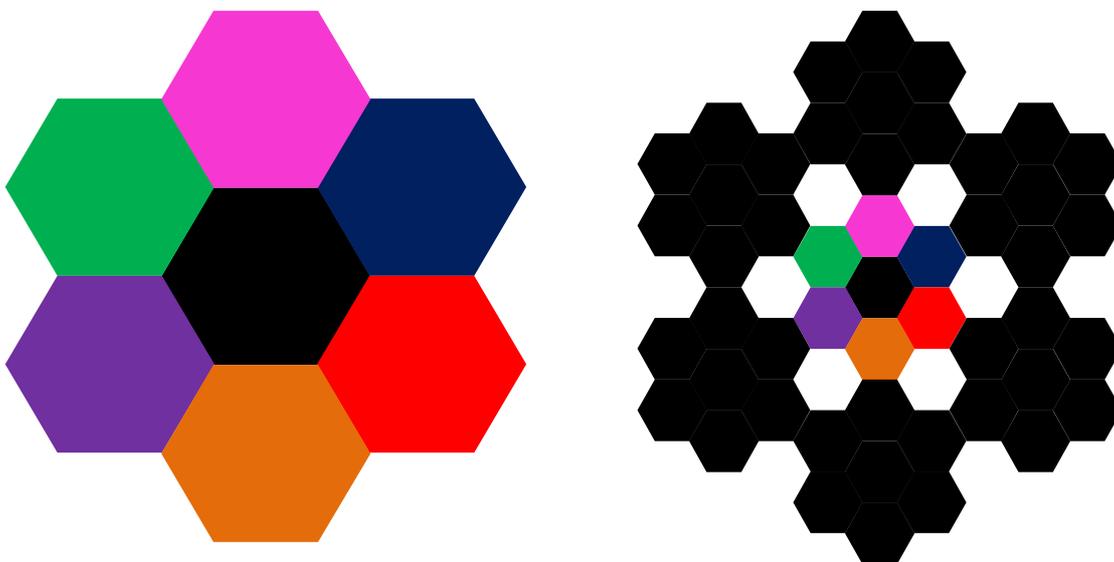


Fig. 3.5: Formação do fractal de Gosper, (a) nível 1 (b) nível 2.

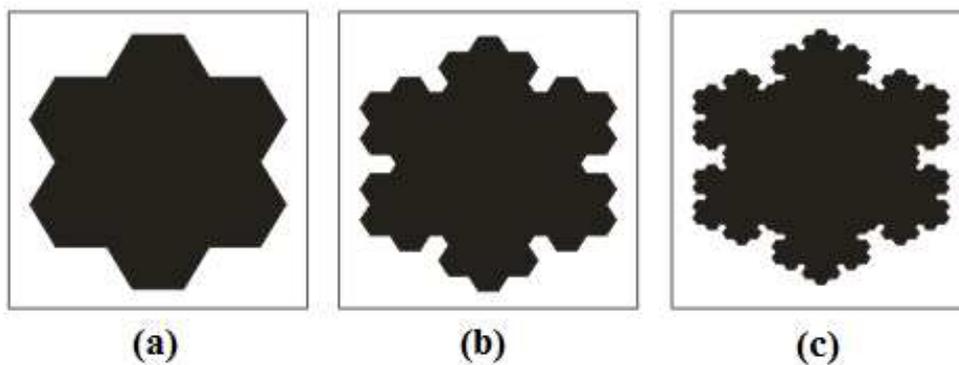


Fig. 3.6: Ilustração de *patches* com três níveis de iteração fractal: (a) $k = 1$; (b) $k = 2$; (c) $k = 3$.

3.4 Conclusão

A utilização de geometrias fractais tem permitido melhorar as propriedades de diversos dispositivos e circuitos de micro-ondas e antenas. Mais precisamente, os fractais determinísticos vêm sendo utilizados para auxiliar a construção de dispositivos eletromagnéticos, como filtros, antenas e FSS. O fractal utilizado neste trabalho foi o de Gosper, que tem como elemento gerador um hexágono.

Capítulo 4

Resultados Simulados e Medidos

4.1 Introdução

Os projetos de estruturas de FSS apresentados neste trabalho utilizam a geometria fractal de Gosper (mostrada na seção 3.3). Foram utilizadas laminados de cobre (*copper clad*) sobre substrato dielétrico de fibra de vidro (FR-4), de permissividade elétrica relativa $\epsilon_r = 4,4$, espessura $h = 1,5$ mm e tangente de perdas $\tan\delta = 0,02$.

Os fractais de Gosper são formas geométricas cuja complexidade aumenta com o aumento das repetições de padrões pré-definidos, assim como em muitos fractais.

4.2 FSS Projetadas com a Geometria Fractal de Gosper

Uma FSS com elementos fractais é uma solução bastante competitiva em relação as FSS projetadas com elementos da geometria euclidiana, uma vez que as características inerentes à geometria fractal permitem o desenvolvimento de filtros espaciais compactos e com desempenho superior, em relação a estruturas convencionais, pois em diversos trabalhos são observados a diminuição das dimensões físicas da estrutura para uma mesma frequência de operação.

Para iniciar o projeto, foi necessário escolher os parâmetros como: tipo de FSS (*patch* ou abertura); formato do *patch*, que nesse caso foi o da geometria fractal de Gosper; A permissividade elétrica (ϵ_r) que nesse caso foi escolhido 4,4, por se tratar do laminado já existente nos laboratórios da UFRN, bem como a altura do dielétrico $h = 1,5$ mm;

O hexágono (elemento inicial) é formado pelo comprimento do lado, ou seja, o valor do lado é importante para definir as dimensões do elemento gerador que foi projetado para ressoar entre 7 e 13 GHz, por conta das limitações do equipamento de medição, lembrando que à medida que o nível fractal aumenta ocorre um deslocamento da ressonância para frequências menores. Ainda existe a possibilidade de projetar e construir níveis fractais de

ordens mais elevadas. Entretanto, a construção das FSS com *patches* fractais de níveis de iteração maiores apresentam detalhes que dificultam o processo de fabricação. Foram realizadas simulações para as estruturas de FSS com vários comprimentos do lado do hexágono, como mostrado na Figura 4.1. Os demais parâmetros estruturais das FSS são permissividade elétrica relativa $\epsilon_r = 4,4$, espessura $h = 1,5$ mm e tangente de perdas $\tan\delta = 0,02$. Observa-se que à medida que o comprimento do lado do hexágono aumenta a largura de banda da FSS diminui.

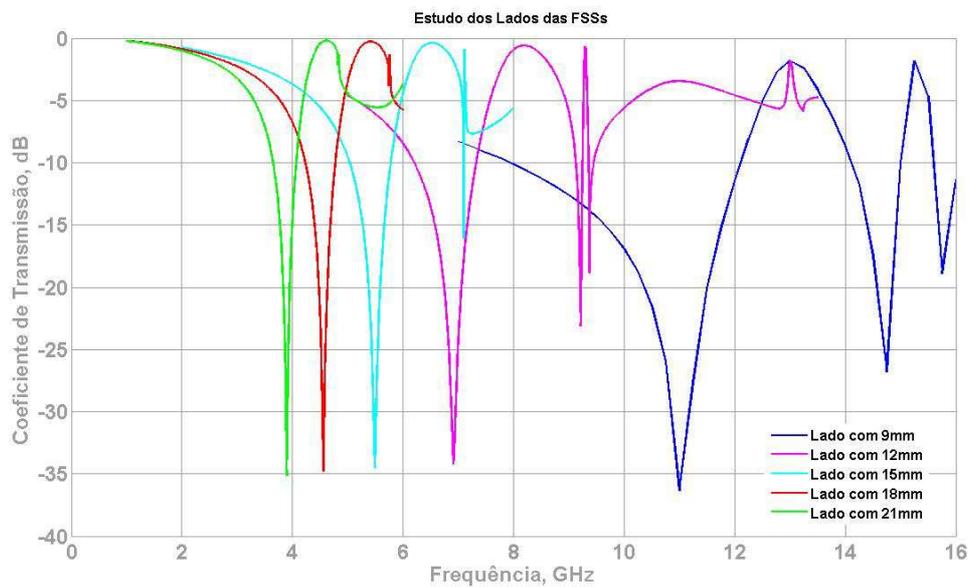


Fig. 4.1: Simulações com mudança nos lados do hexágono.

O lado escolhido para o projeto inicial das FSS de Gosper foi de 9 mm, que usando a equação 3.2, resulta em uma altura de aproximadamente 12,73 mm.

O próximo passo foi a escolha da periodicidade. Foi mantido o valor de 9 mm de lado e variada a periodicidade da FSS, assim como mostrado na Figura 4.2, onde foi escolhido o elemento que apresentou melhor coeficiente de transmissão e maior largura de banda, além de uma segunda banda, muito procurada nas estruturas modernas de telecomunicações, por ser possível usá-la para mais de uma aplicação, ou seja, escolhida a estrutura com periodicidade igual a 20 mm. Os demais parâmetros são permissividade elétrica relativa $\epsilon_r = 4,4$, espessura $h = 1,5$ mm e tangente de perdas $\tan\delta = 0,02$.

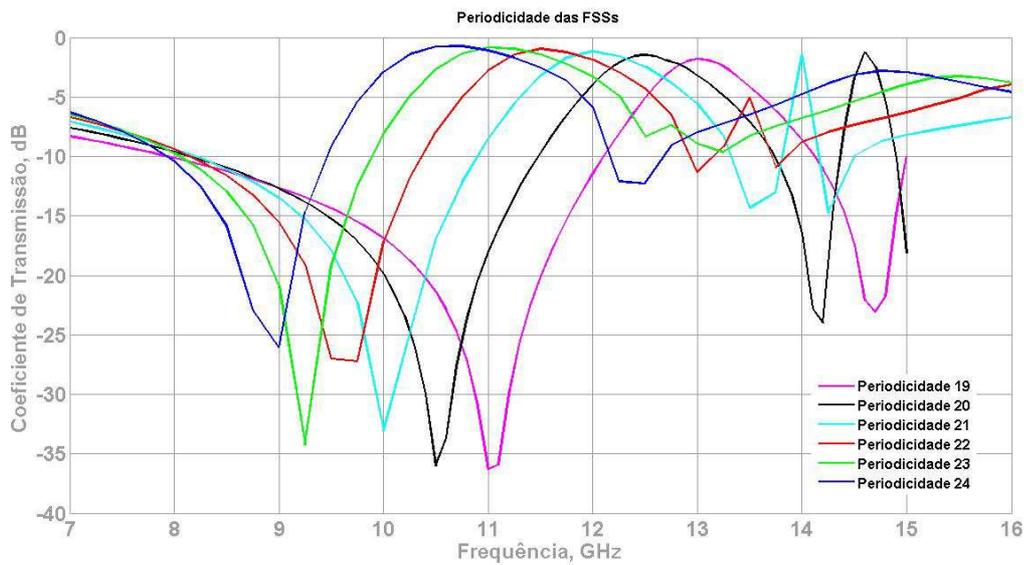


Fig. 4.2: Simulações de elementos com mesmo lado e periodicidades diferentes.

Na Figura 4.3, é mostrada a tela do *software* de simulação onde foi colocado os parâmetros iniciais do projeto. Desta forma, foi realizada uma análise de filtros espaciais através de estruturas periódicas de FSS, combinadas com elementos fractais de Gosper [31], para aplicações em sistemas de comunicações, especialmente nas faixas de frequência características das bandas X (8–12 GHz) e Ku (12–18 GHz). Para isto, foi realizada uma série de simulações no *software* comercial Ansoft Designer, caracterizando um estudo paramétrico para a escolha do elemento iniciador da geometria fractal. Foi escolhido um elemento de *patch* hexagonal, com ressonâncias em 10,5 GHz e 14 GHz, faixas de frequências escolhidas de acordo com o modelo do analisador de redes vetoriais usado na medição, apresentando um comportamento *dual-band* (banda dupla).

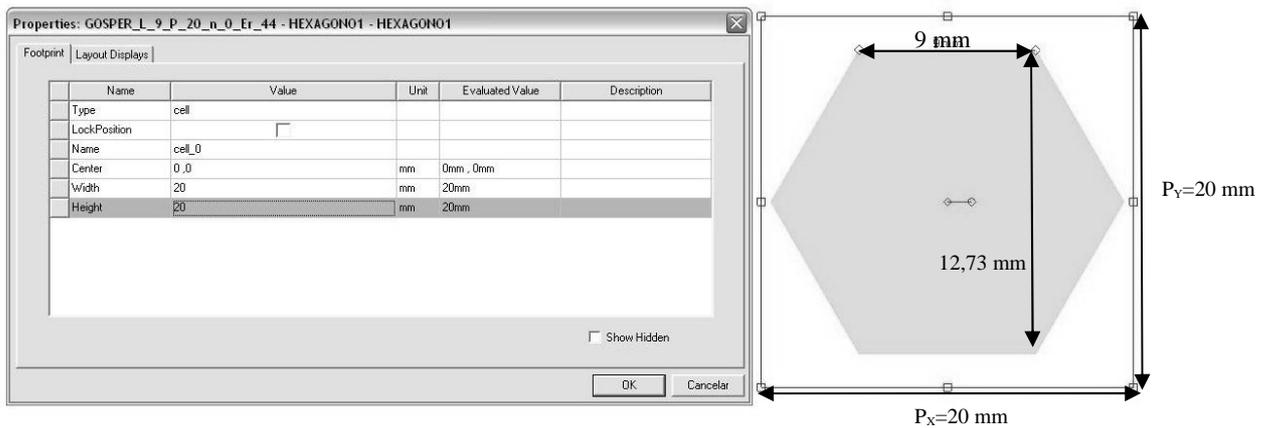


Fig. 4.3: Tela do software Ansoft Designer mostrando os parâmetros usados no início do projeto.

A partir deste elemento, foram obtidos três níveis de iteração fractal, com os quais é possível ajustar a frequência de ressonância e, conseqüentemente, a largura de banda das estruturas. Quatro FSS foram escolhidas para fabricação e medição nos laboratórios do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), para comprovação da análise realizada. Os resultados experimentais validaram então o desempenho das estruturas e a sua utilidade em várias aplicações de filtros rejeita-faixa.

4.3 Resultados das FSS Projetadas com Geometria Fractal de Gosper

Para todos os resultados apresentados neste trabalho, foi considerada a incidência normal de uma onda plana uniforme.

A Figura 4.4 mostra os resultados simulados obtidos com o uso do *software* comercial Ansoft Designer, referentes às estruturas de FSS com elementos fractais de Gosper projetadas. Os demais parâmetros são permissividade elétrica relativa $\epsilon_r = 4,4$, periodicidades P_X e $P_Y = 20$ mm, espessura $h = 1,5$ mm e tangente de perdas $\tan\delta = 0,02$. É observado o comportamento do coeficiente de transmissão (em dB) em função da frequência (em GHz) para o elemento gerador ($k = 0$) e as três iterações fractais ($k = 1, 2$ e 3).

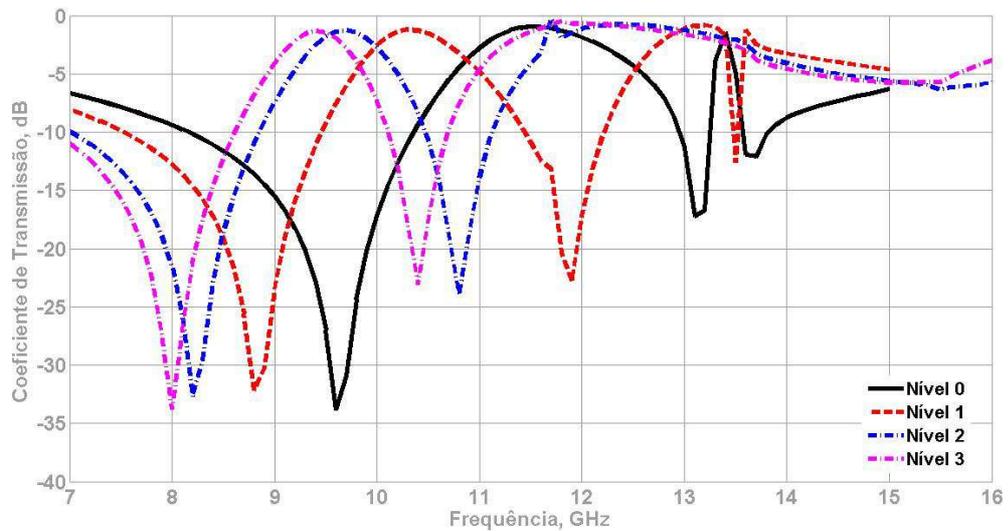


Fig. 4.4: Resultados simulados para as FSS projetadas com elementos fractais de Gosper.

Verifica-se que, com a introdução da geometria fractal, os arranjos periódicos passam a apresentar um comportamento de banda dupla, com dois valores de frequência de ressonância. Para cada iteração, observa-se que ambas as ressonâncias apresentam uma perda inferior a -10 dB, o que significa uma forte rejeição, tornando possível sua aplicação como filtros rejeita-faixa nas faixas de frequência de interesse.

Uma característica do projeto de FSS com fractais de Gosper é a sua flexibilidade, de fato, o comportamento destas estruturas periódicas com elementos fractais permite ajustar as frequências de ressonância e a largura de banda sem modificar o tamanho original da estrutura. Isto é possível porque, com o aumento do número de iterações fractais, há uma diminuição dos valores de f_r e BW. Consequentemente, esta característica da estrutura proposta facilita a sintonização do filtro FSS para uma dada aplicação.

Foram escolhidas quatro estruturas de FSS para a fabricação de protótipos e posterior medição. A Figura 4.5 ilustra um esquema simplificado de como é realizada a medição de uma FSS. As medições foram realizadas nos laboratórios do IFPB, com um analisador de redes vetorial (N5230A, Agilent Technologies), que abrange a faixa de frequências de 300 kHz a 13,5 GHz, além de duas antenas cornetas, cabos, conectores e outros acessórios. É adotada nas medições uma distância de separação de no mínimo 10 cm entre as antenas. A Figura 4.6 reproduz uma fotografia do *setup* usado para a medição dos protótipos de FSS fabricados.

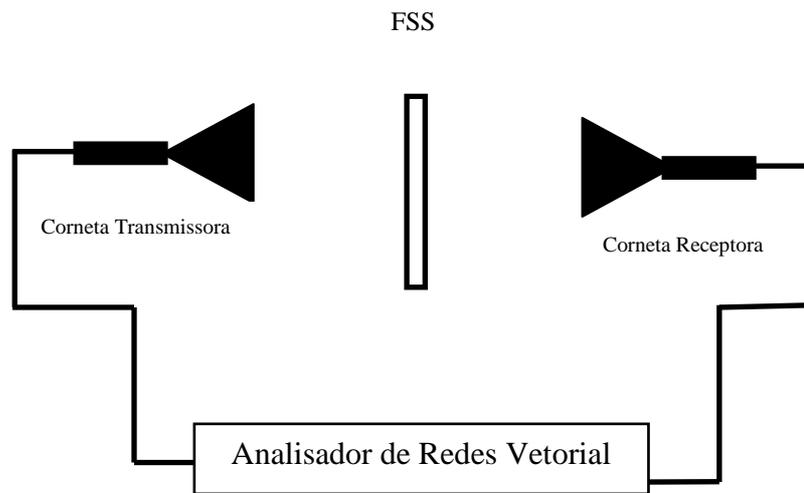


Fig. 4.5: Esquema de medição de uma FSS.

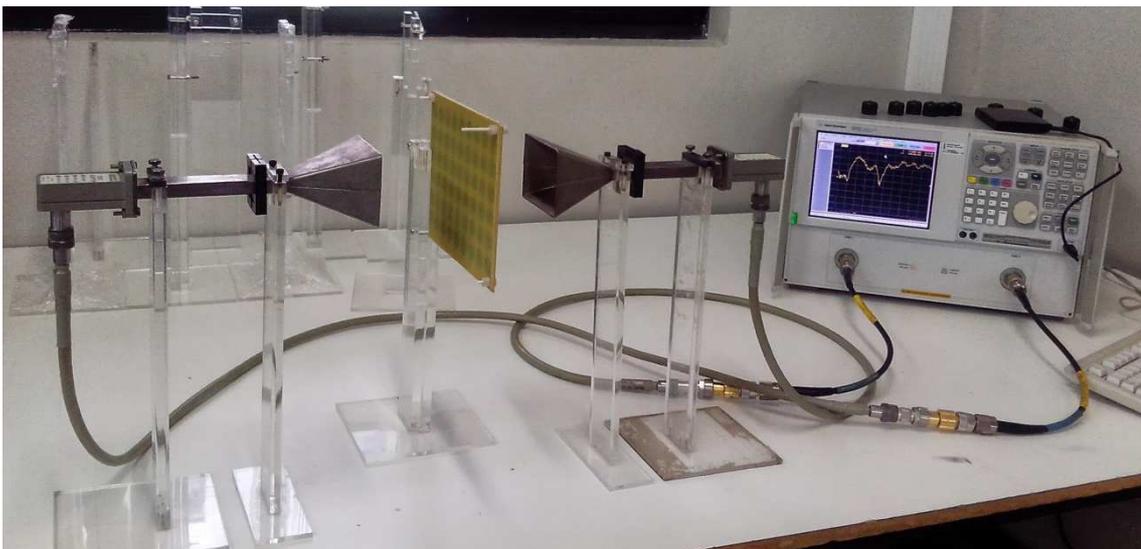


Fig. 4.6: Fotografia do setup usado para a medição de uma FSS.

A Figura 4.7 apresenta fotografias dos quatro protótipos construídos (um para cada iteração fractal), que foram usados nas medições.

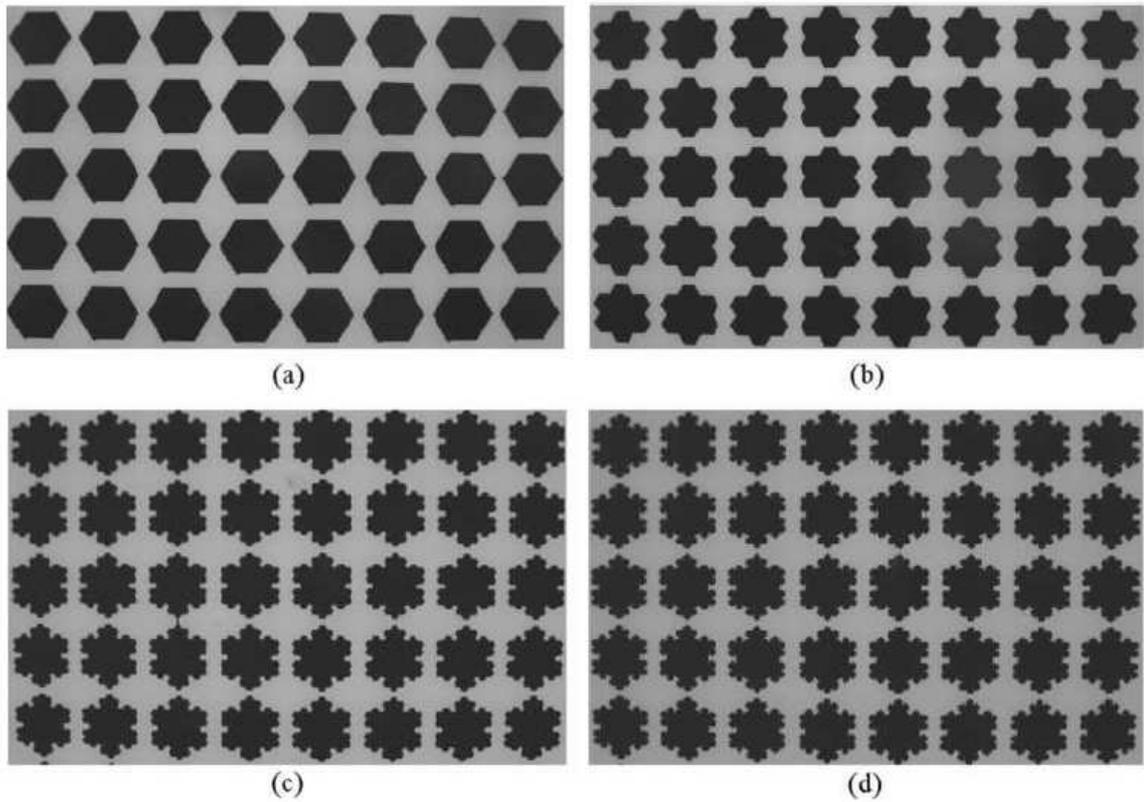


Fig. 4.7: Fotografias de quatro protótipos de FSS com elementos fractais de Gosper: (a) nível 0, (b) nível 1, (c) nível 2 e (d) nível 3.

As Figuras 4.8 a 4.11 apresentam as comparações gráficas realizadas entre os resultados medidos e simulados, para as FSS mostradas na Figura 4.7, com os níveis $k = 0, 1, 2, 3$, respectivamente. Os demais parâmetros estruturais são permissividade elétrica relativa $\epsilon_r = 4,4$, periodicidades P_X e $P_Y = 20$ mm, espessura $h = 1,5$ mm e tangente de perdas $\tan\delta = 0,02$. Verificou-se que: à medida que o nível de iteração fractal aumenta, a largura de banda da FSS diminui. Os valores numéricos obtidos para as frequências de ressonância e larguras de banda são dados na Tabela 4.1.

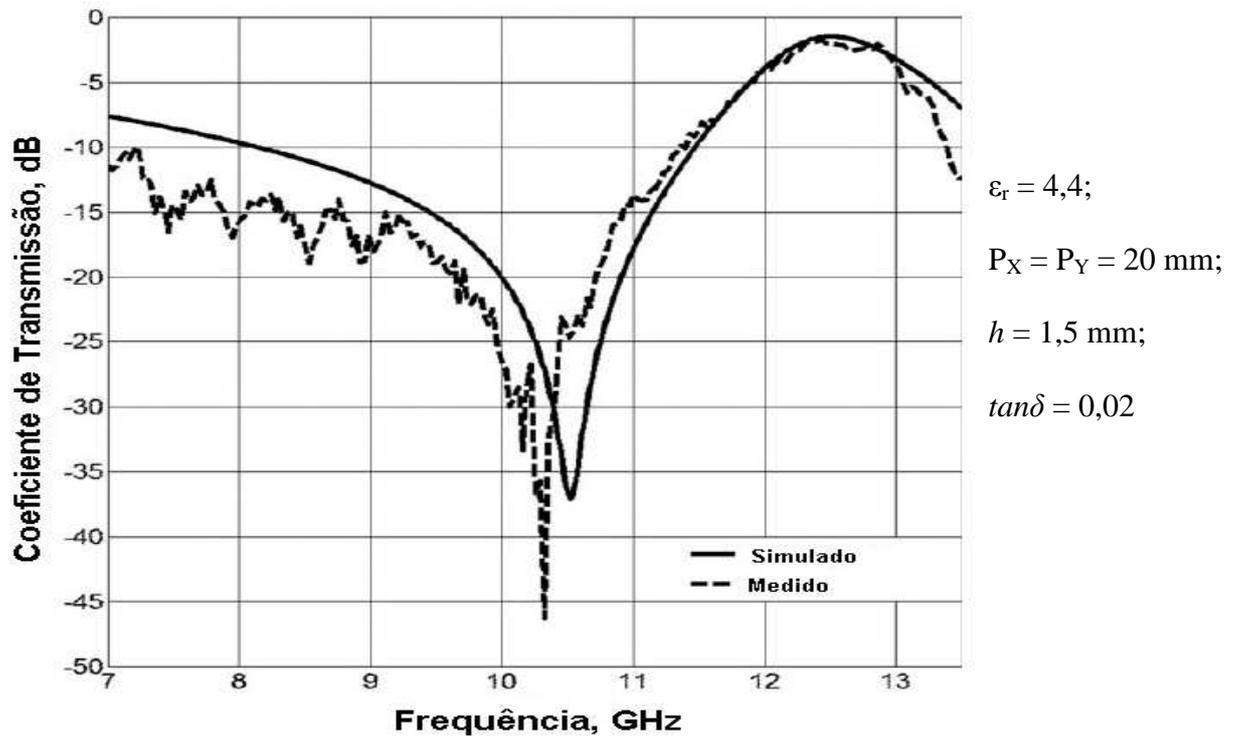


Fig. 4.8: Comparação entre os resultados medido e simulado para $k = 0$.

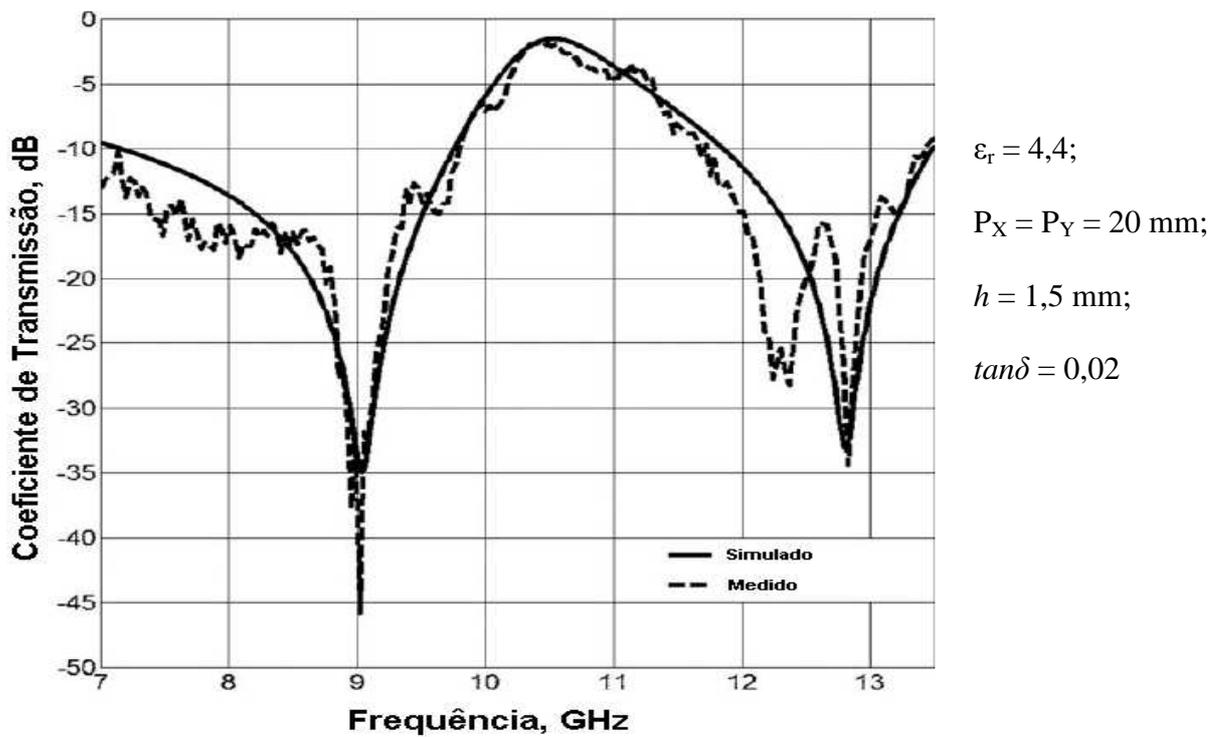


Fig. 4.9: Comparação entre os resultados medido e simulado para $k = 1$.

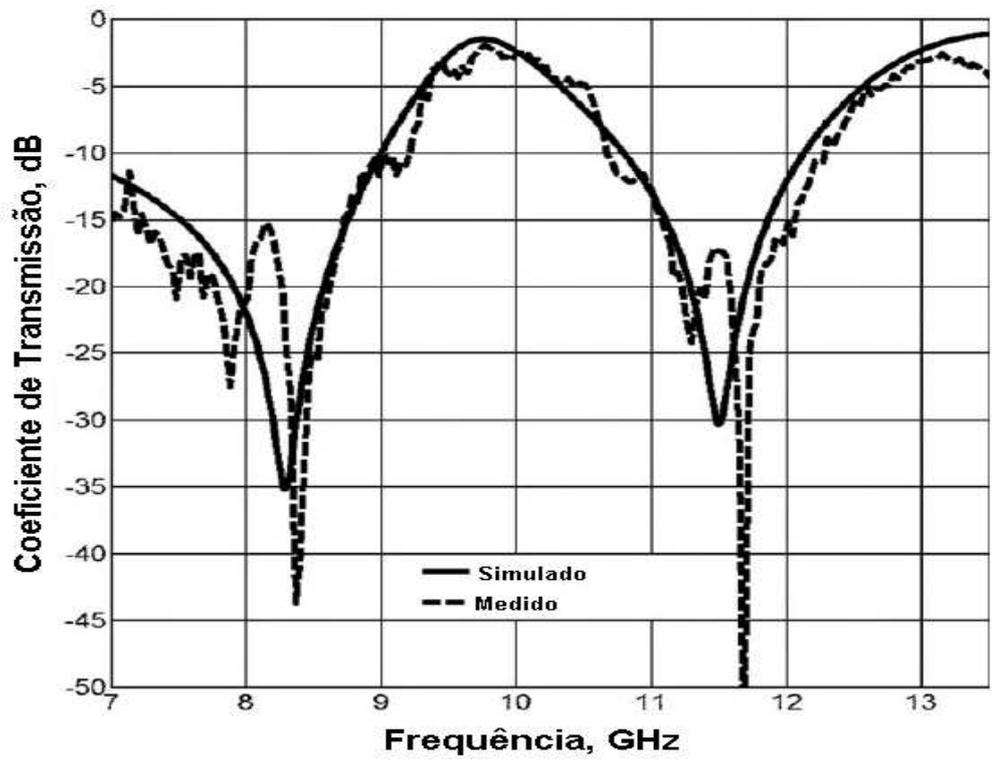


Fig. 4.10: Comparação entre os resultados medido e simulado para $k = 2$.

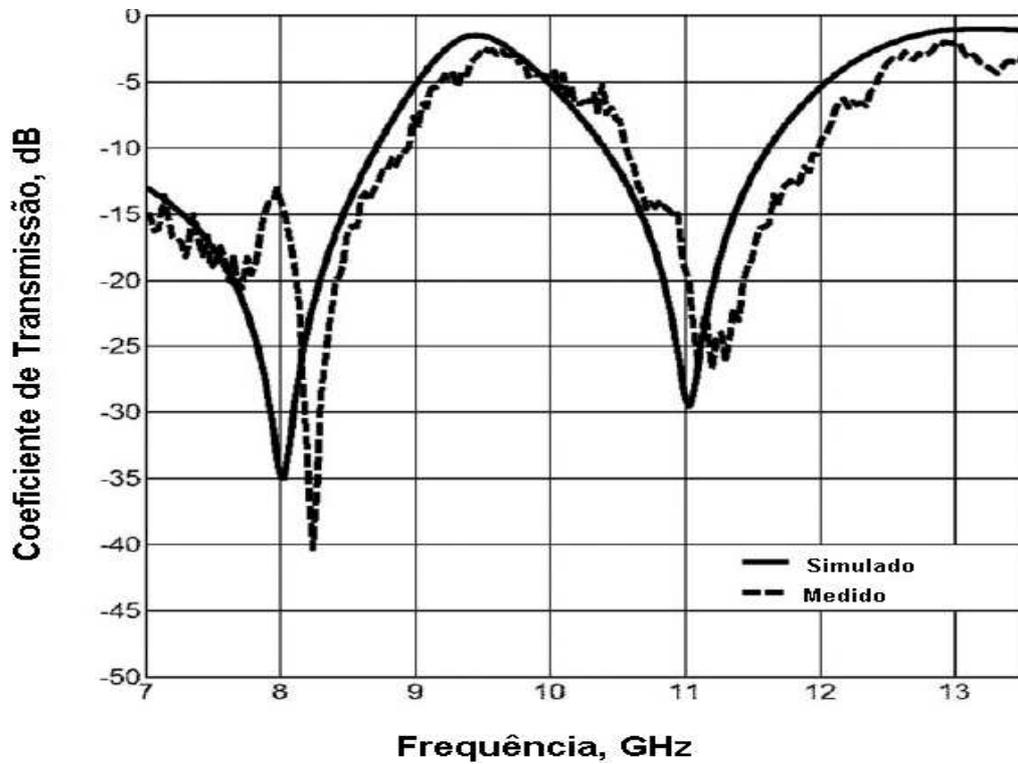


Fig. 4.11: Comparação entre os resultados medido e simulado para $k = 3$.

A Tabela 4.1 apresenta uma comparação dos resultados medidos e simulados das principais respostas encontradas nas Figuras de 4.8 a 4.11 para uma perda de retorno de -10 dB. A medição do elemento gerador só foi possível na primeira ressonância, por questões de limitações no aparelho de medição.

Tabela 4.1: Comparação dos resultados das principais ressonâncias.

k	Resultados Simulados (GHz)				Resultados Medidos (GHz)				Erros Percentuais			
	1º Ressonância		2º Ressonância		1º Ressonância		2º Ressonância		1º Ressonância		2º Ressonância	
	f_r	BW	f_r	BW	f_r	BW	f_r	BW	f_r	BW	f_r	BW
0	10,520	3,323	14,199	0,500	10,320	4,124	--	--	1,94%	+24,10%	--	--
1	9,040	2,588	12,810	1,628	9,018	2,667	12,826	1,709	0,24%	+2,96%	0,12%	+4,97%
2	8,288	1,996	11,500	1,331	8,367	2,018	11,686	1,609	0,95%	+1,10%	1,62%	+20,88%
3	8,014	1,707	11,028	1,217	8,237	1,941	11,200	1,428	2,78%	+13,71%	1,55%	+17,34%

4.4 FSS Projetadas com a Geometria Fractal de Gosper Multicamadas

A partir dos resultados teóricos e experimentais obtidos para as FSS com camada única e das análises dos dados da Tabela 4.1, verificou-se que com o aumento do nível do *patch* fractal de Gosper, a largura de banda tornava-se mais estreita. Um método para a solução deste possível problema é o cascadeamento dessas estruturas. A partir de então, fez-se um estudo sistemático para observar a resposta de FSS multicamadas em termos de largura de banda destes filtros espaciais rejeita faixa. Em particular, foram testadas várias combinações de cascadeamento entre as FSS apresentadas na Figura 4.8

Nas simulações das estruturas cascadeadas, observou-se que a ordem de disposição das FSS não afetava significativamente os resultados. Assim, os resultados das simulações da combinação da FSS de nível 0 (elemento gerador Figura 3.4) com a FSS de nível 3 (Figura 3.6c) para distâncias de 1 mm (Figura 4.12) e de 5 mm (Figura 4.13), independem de qual delas está colocada na primeira ou na segunda posição. Assim, a primeira delas tanto pode ser a de nível 0 (K0), ou a de nível 3 (K3).

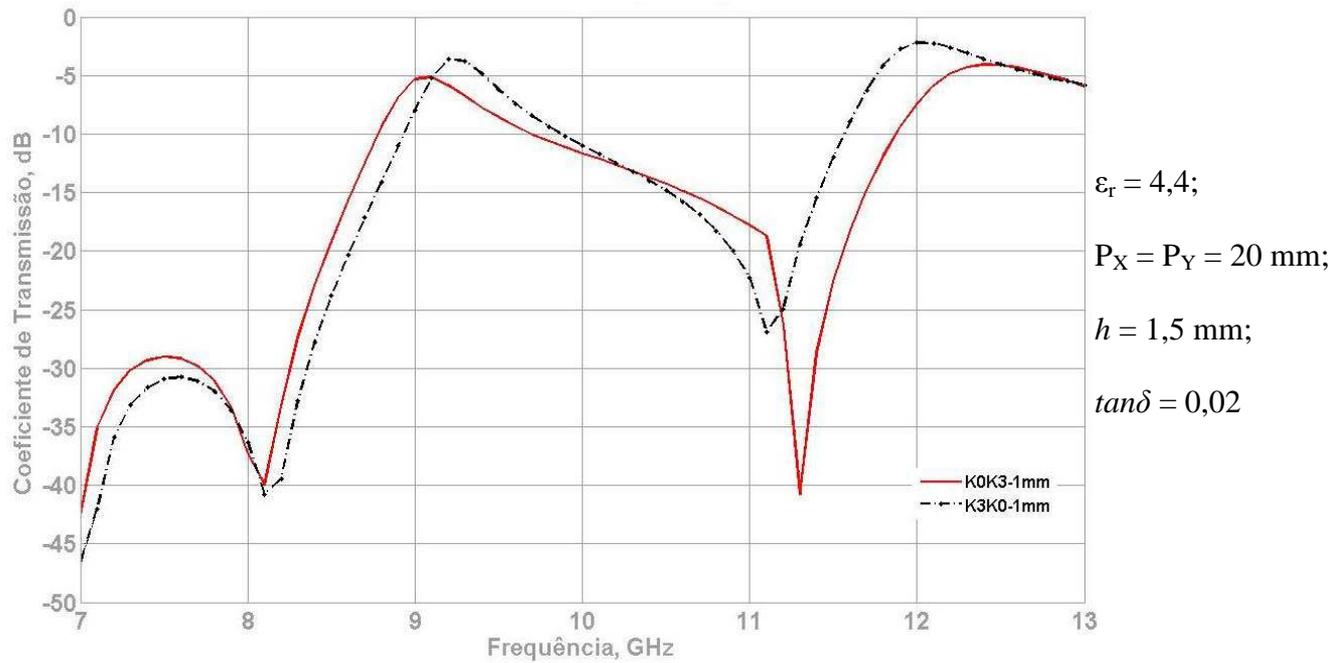


Fig. 4.12: Comparação dos níveis K0K3 com K3K0 a uma separação de 1 mm um do outro.

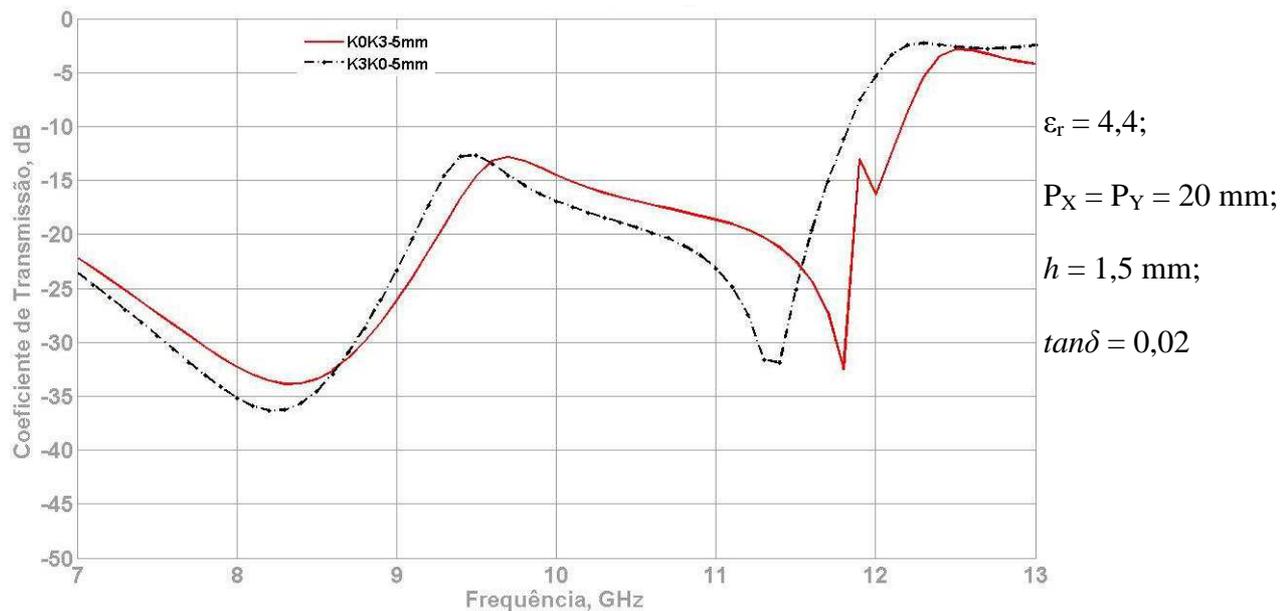


Fig. 4.13: Comparação dos níveis K0K3 com K3K0 a uma separação de 5 mm um do outro.

Foram realizadas as simulações dessas estruturas com passo de 1 mm, começando sem espaçamento entre as placas e concluindo quando a separação entre elas (distância d) chega a 10 mm. A Figura 4.14 mostra as células separadas por uma camada de ar

(representada pelas linhas na cor azul). Foram escolhidos alguns valores desse universo de simulações para apresentar nos gráficos das figuras organizados de acordo com a Tabela 4.2.

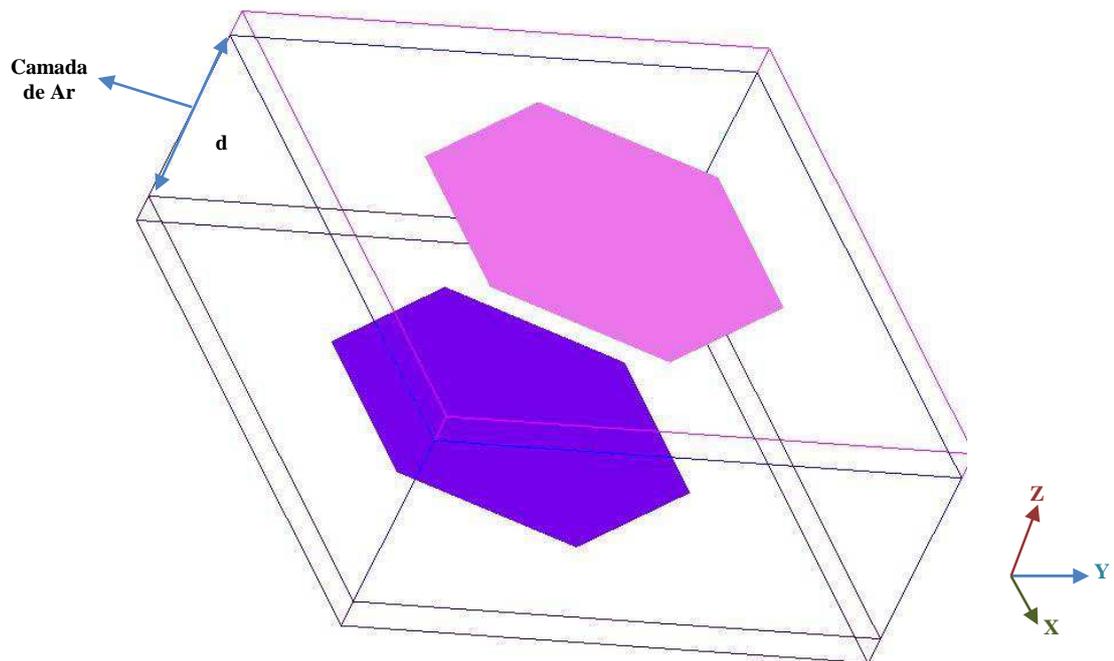


Fig. 4.14: Vista em 3D da tela do software de simulação mostrando as duas células separadas por uma camada de ar.

Tabela 4.2: Organização das simulações de duas FSS com ar entre elas.

Figura	Combinação de níveis fractais
4.15	Nível 0 com nível 0
4.16	Nível 0 com nível 1
4.17	Nível 0 com nível 2
4.18	Nível 0 com nível 3
4.19	Nível 1 com nível 1
4.20	Nível 1 com nível 2
4.21	Nível 1 com nível 3
4.22	Nível 2 com nível 2
4.23	Nível 2 com nível 3
4.24	Nível 3 com nível 3

A Figura 4.15 apresenta as simulações do cascadeamento de duas estruturas de nível 0, para alguns valores da distância entre elas.

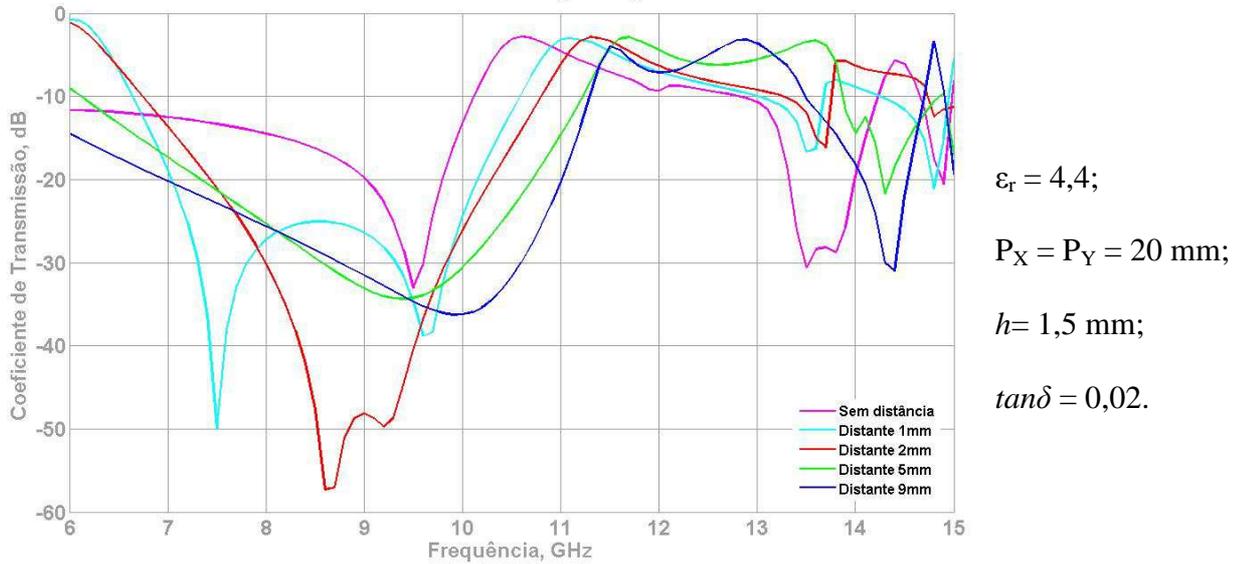


Fig. 4.15: Simulação do cascadeamento de duas estruturas nível 0.

A Figura 4.16 apresenta as simulações do cascadeamento de duas estruturas, sendo uma de nível 0 e outra de nível 1, para alguns valores da distância entre elas.

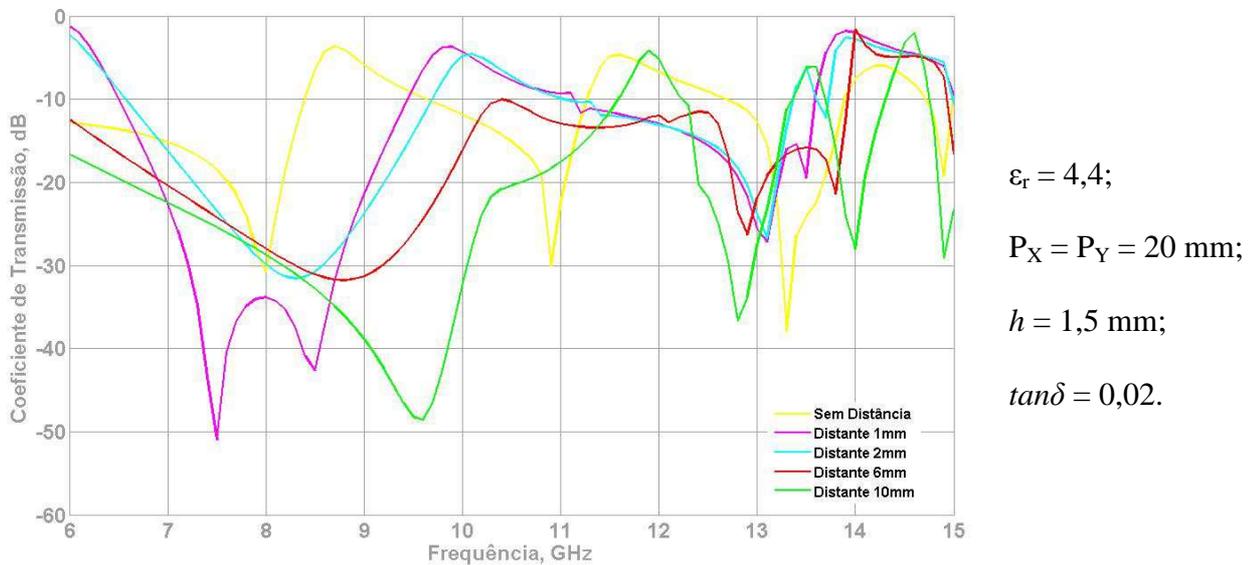


Fig. 4.16: Simulação do cascadeamento de duas estruturas nível 0 e nível 1.

A Figura 4.17 apresenta as simulações do cascadeamento de duas estruturas, sendo uma de nível 0 e outra de nível 2, para alguns valores da distância entre elas.

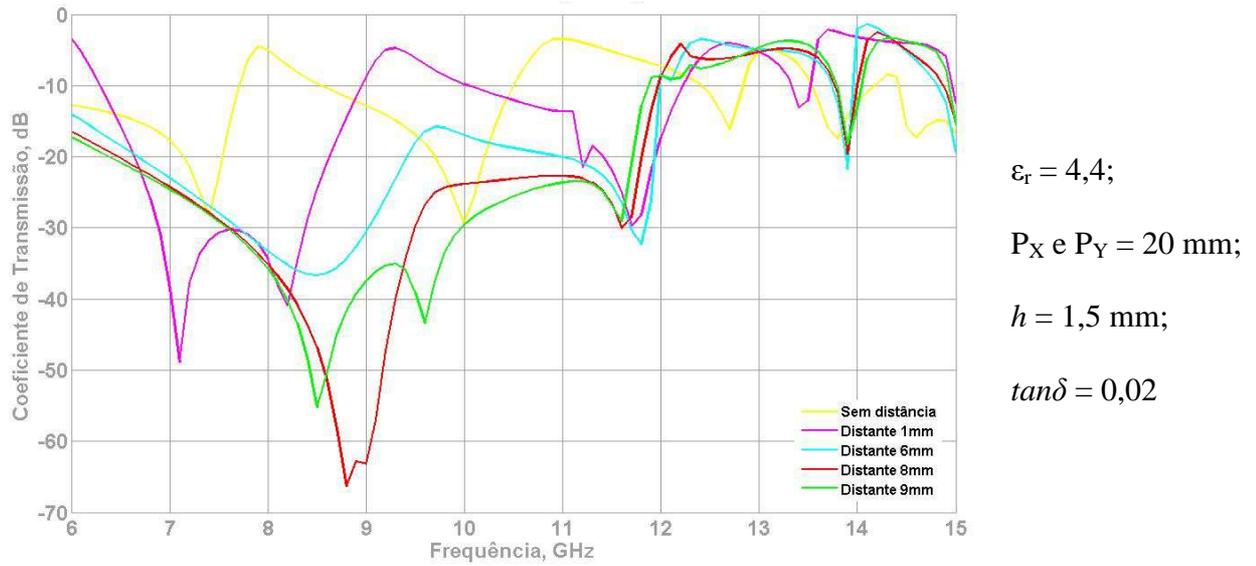


Fig. 4.17: Simulação do cascadeamento de duas estruturas: nível 0 e nível 2.

A Figura 4.18 apresenta as simulações do cascadeamento de duas estruturas, sendo uma de nível 0 e outra de nível 3, para alguns valores da distância entre elas.

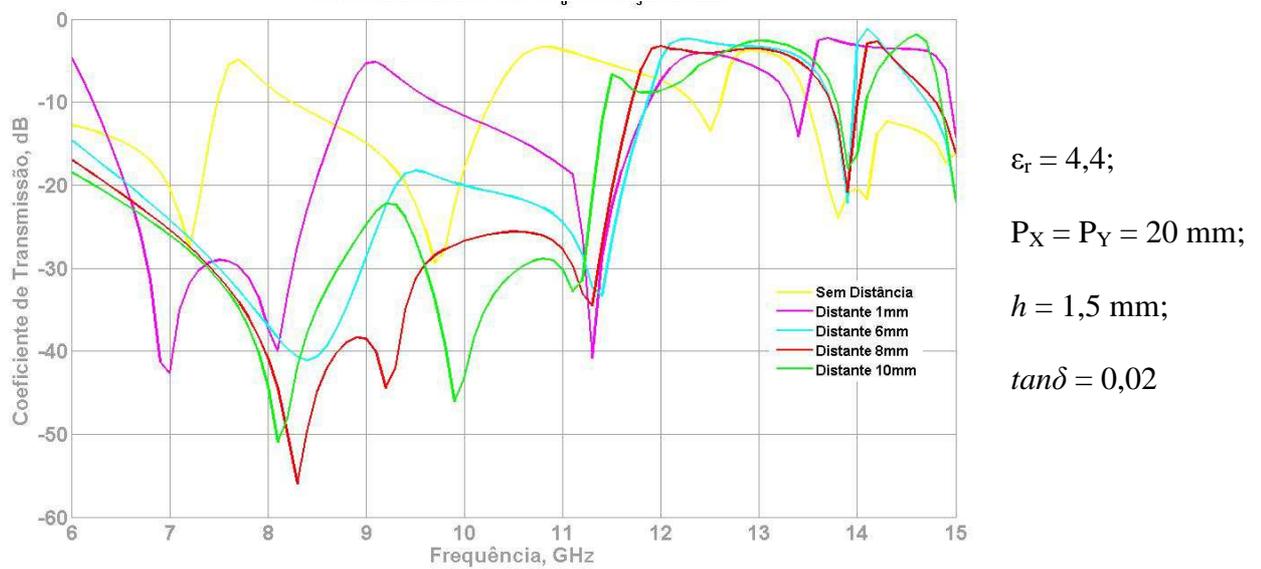


Fig. 4.18: Simulação do cascadeamento de duas estruturas nível 0 e nível 3.

A Figura 4.19 apresenta as simulações do cascadeamento de duas estruturas de nível 1, para alguns valores da distância entre elas.

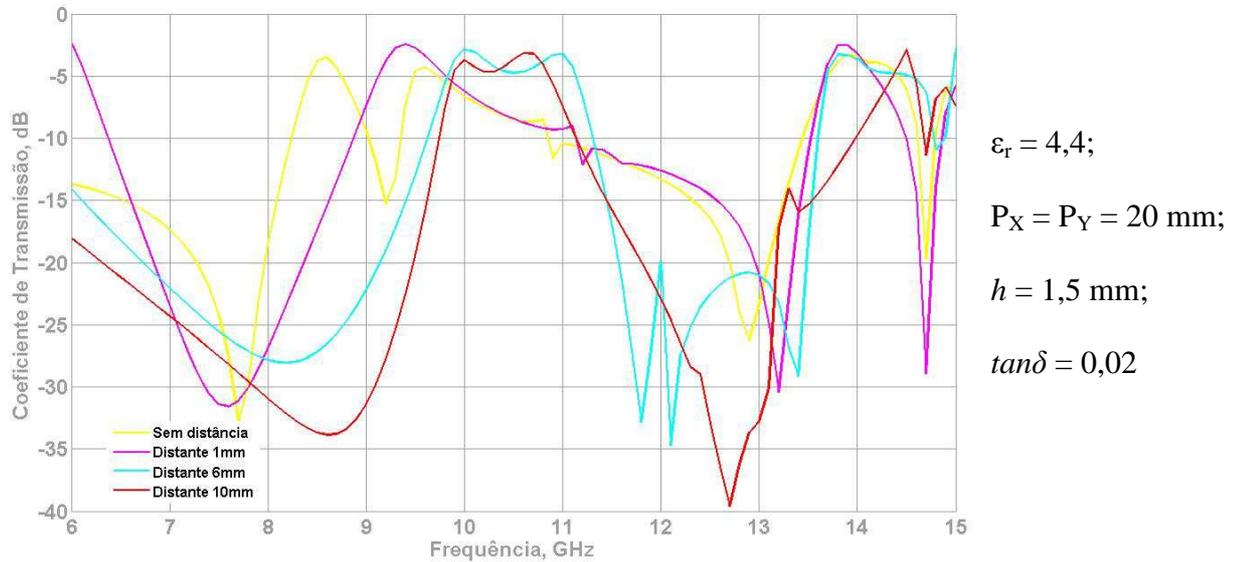


Fig. 4.19: Simulação do cascadeamento de duas estruturas de nível 1.

A Figura 4.20 apresenta as simulações do cascadeamento de duas estruturas, sendo uma de nível 1 e outra de nível 2, para alguns valores da distância entre elas.

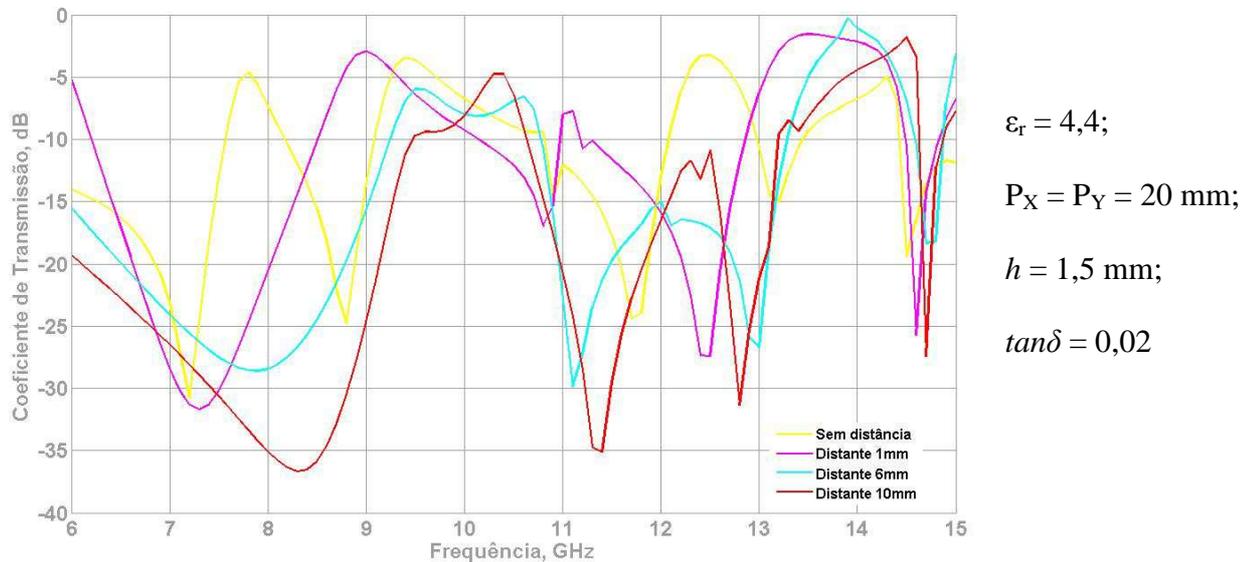


Fig. 4.20: Simulação do cascadeamento de duas estruturas: nível 1 e nível 2.

A Figura 4.21 apresenta as simulações do cascadeamento de duas estruturas, sendo uma de nível 1 e outra de nível 3, para alguns valores da distância entre elas.

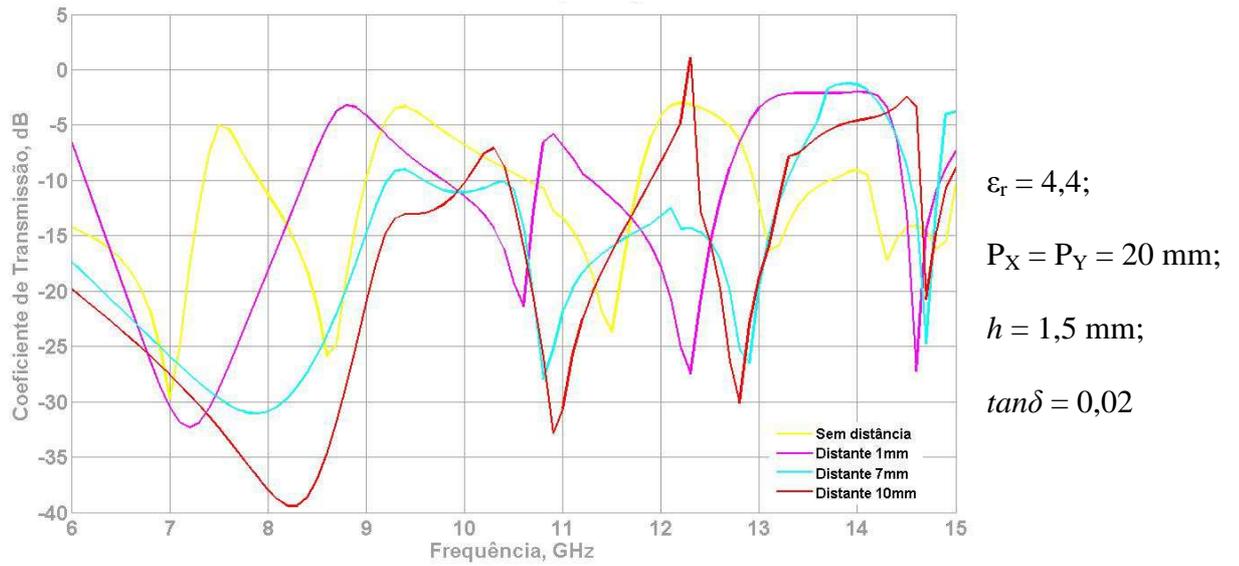


Fig. 4.21: Simulação do cascadeamento de duas estruturas: nível 1 e nível 3.

A Figura 4.22 apresenta as simulações do cascadeamento de duas estruturas de nível 2, para alguns valores da distância entre elas.

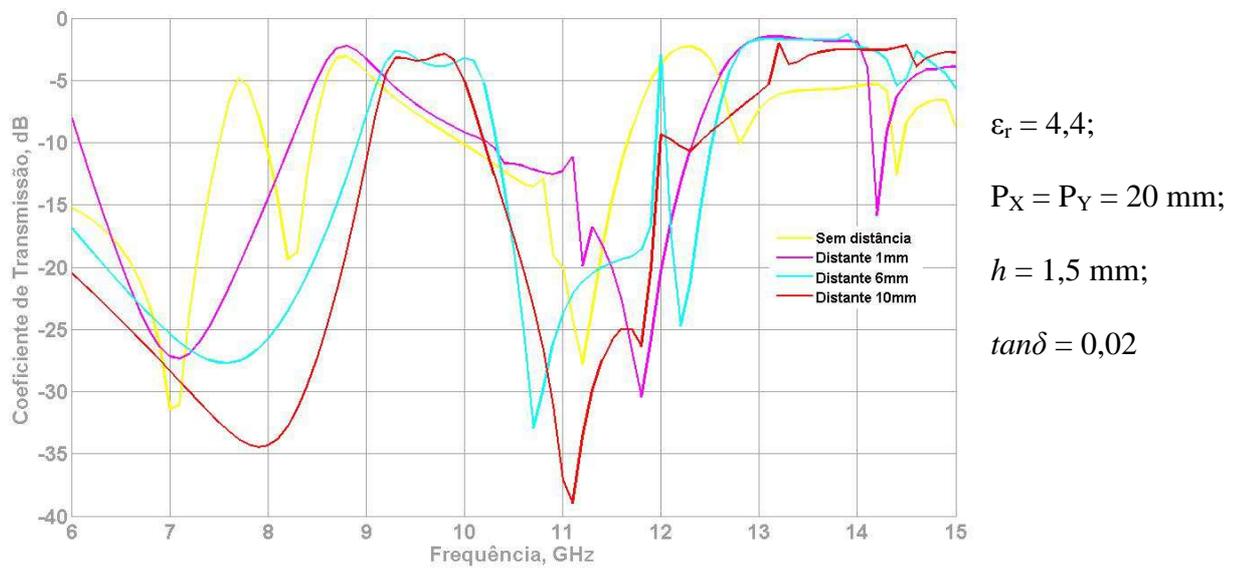


Fig. 4.22: Simulação do cascadeamento de duas estruturas de nível 2.

A Figura 4.23 apresenta as simulações do cascadeamento de duas estruturas, sendo uma de nível 2 e outra de nível 3, para alguns valores da distância entre elas.

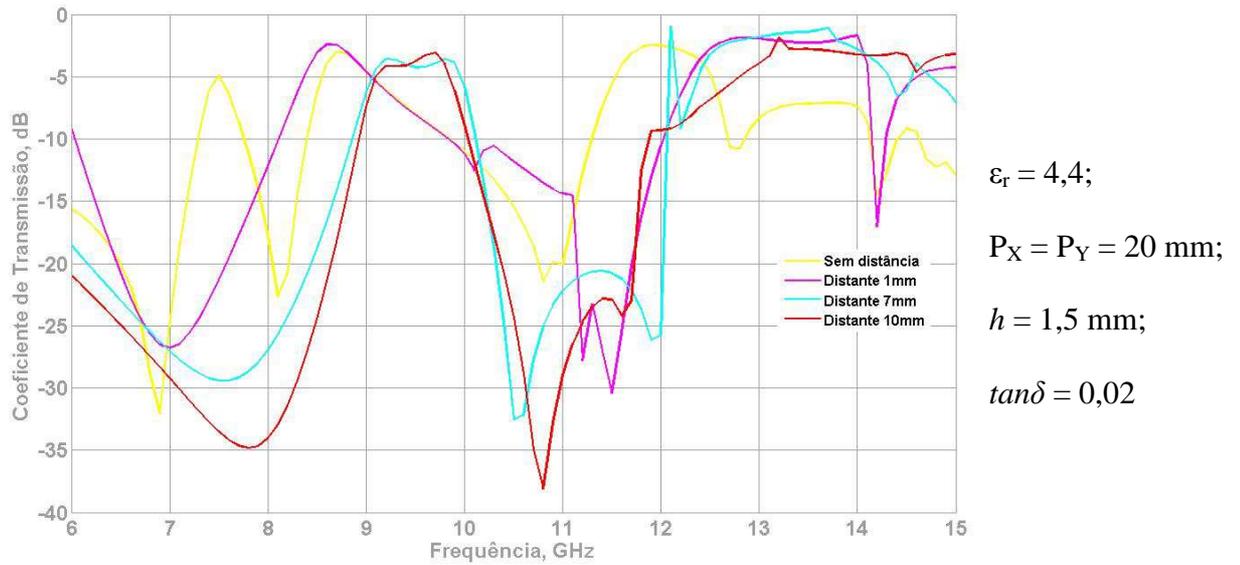


Fig. 4.23: Simulação do cascadeamento de duas estruturas: nível 2 e nível 3.

A Figura 4.24 apresenta as simulações do cascadeamento de duas estruturas de nível 3, para alguns valores da distância entre elas.

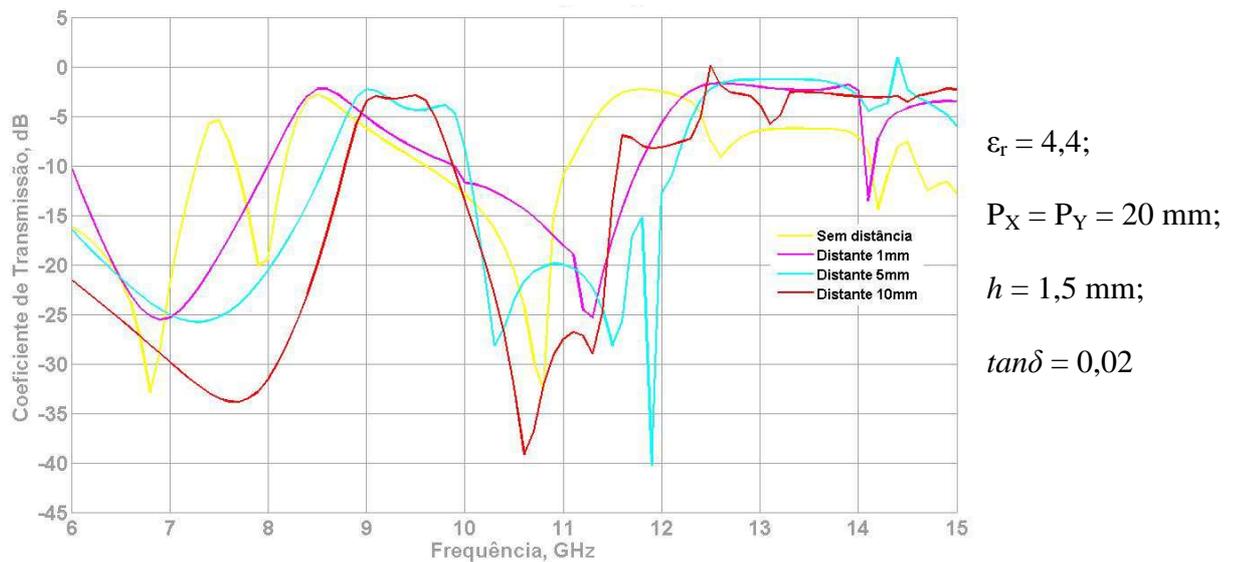


Fig. 4.24: Simulação do cascadeamento de duas estruturas de nível 3.

A partir dos resultados obtidos, iniciou-se um estudo de comportamento das FSS multicamadas, em termos de largura de banda, quando o acoplamento é feito entre elas, porém com outros materiais dielétricos ao invés de ar. Foi utilizado o mesmo dielétrico (FR4) das FSS com duas espessuras diferentes: 0,75 mm e 1,50 mm. Os resultados gráficos apresentados

em seguida, que são correspondentes às simulações realizadas, são organizados de acordo com a Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Organização das simulações de duas FSS com FR4 entre elas

Figura	Combinação de níveis fractais
4.25	Nível 0 com nível 0
4.26	Nível 0 com nível 1 ou nível 1 com nível 0
4.27	Nível 0 com nível 2 ou nível 2 com nível 0
4.28	Nível 0 com nível 3 ou nível 3 com nível 0
4.29	Nível 1 com nível 1
4.30	Nível 1 com nível 2 ou nível 2 com nível 1
4.31	Nível 1 com nível 3 ou nível 3 com nível 1
4.32	Nível 2 com nível 2
4.33	Nível 2 com nível 3 ou nível 3 com nível 2
4.34	nível 3 com nível 3

A Figura 4.25 apresenta as simulações do cascadeamento de duas estruturas de nível 0, com alguns valores de distâncias entre elas, porém ao invés de ar entre as estruturas, foi colocada uma placa de dielétrico FR4 entre elas.

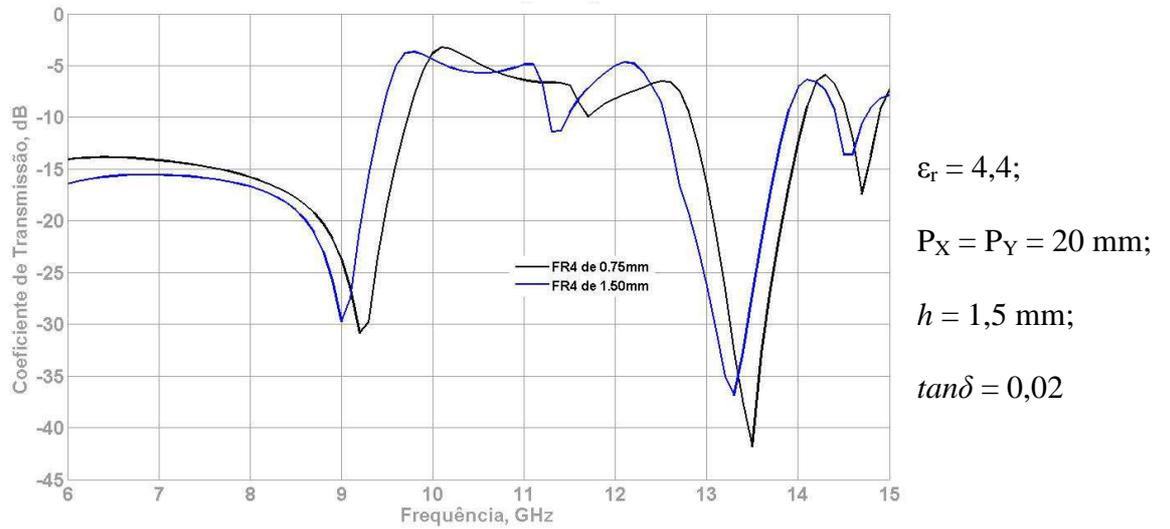


Fig. 4.25: Simulação do cascadeamento de duas estruturas de nível 0 com FR4 entre elas.

A Figura 4.26 apresenta as simulações do cascadeamento de duas estruturas, sendo uma de nível 0 e outra de nível 1, com alguns valores de distâncias entre elas, porém ao invés de ar entre as estruturas, foi colocada uma placa de dielétrico FR4 entre elas.

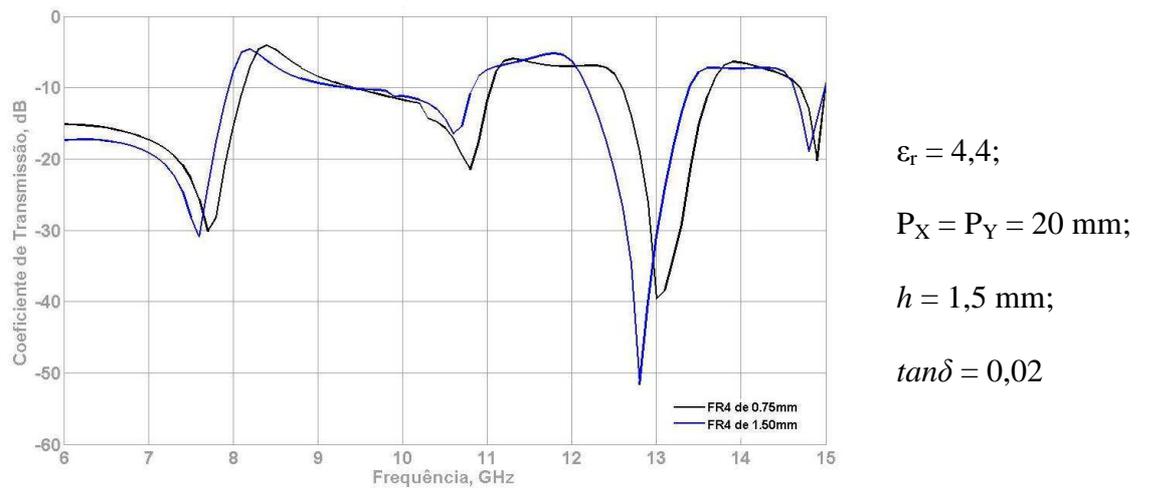


Fig. 4.26: Simulação do cascadeamento de duas estruturas: nível 0 e nível 1 com FR4 entre elas

A Figura 4.27 apresenta as simulações do cascadeamento de duas estruturas, sendo uma de nível 0 e outra de nível 2, com alguns valores de distâncias entre elas, porém ao invés de ar entre as estruturas, foi colocada uma placa de dielétrico FR4 entre elas.

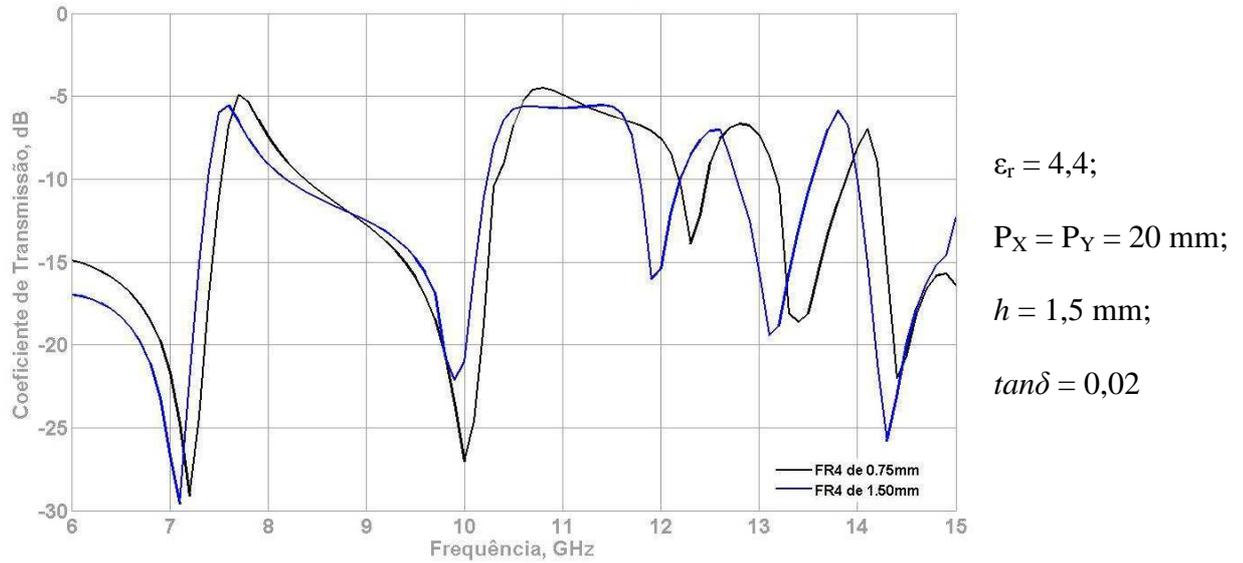


Fig. 4.27: Simulação do cascadeamento de duas estruturas: nível 0 e nível 2 com FR4 entre elas.

A Figura 4.28 apresenta as simulações do cascadeamento de duas estruturas, sendo uma de nível 0 e outra de nível 3, com alguns valores de distâncias entre elas, porém ao invés de ar entre as estruturas, foi colocada uma placa de dielétrico FR4 entre elas.

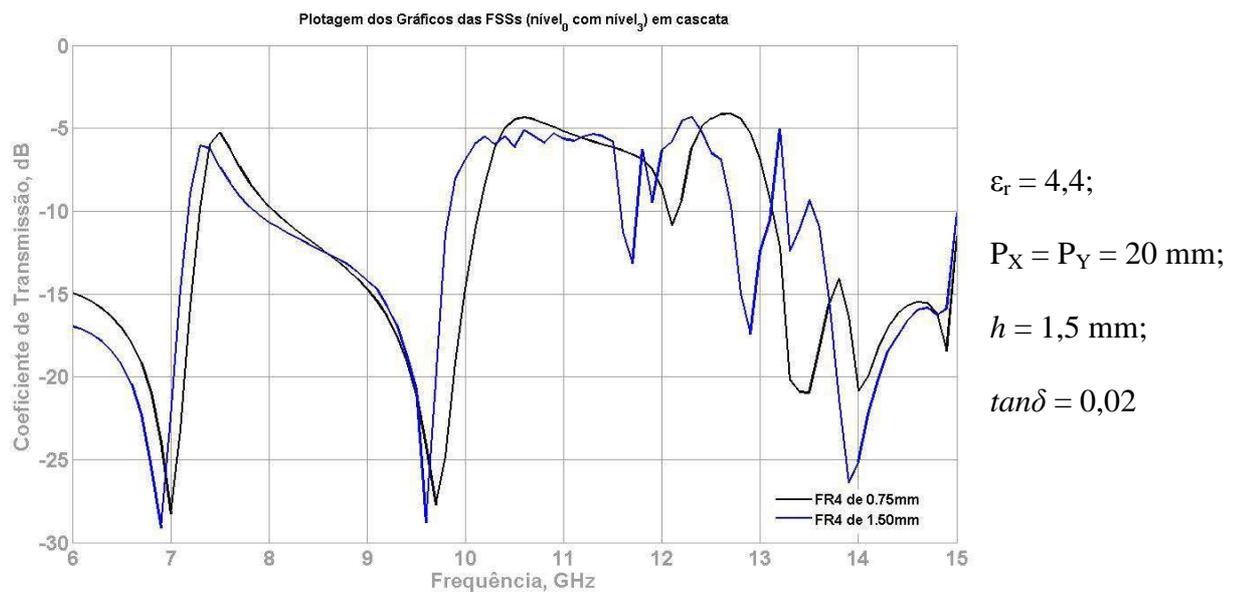


Fig. 4.28: Simulação do cascadeamento de duas estruturas: nível 0 com nível 3 com FR4 entre elas.

A Figura 4.29 apresenta as simulações do cascadeamento de duas estruturas de nível 0, com alguns valores de distâncias entre elas, porém ao invés de ar entre as estruturas, foi colocada uma placa de dielétrico FR4 entre elas.

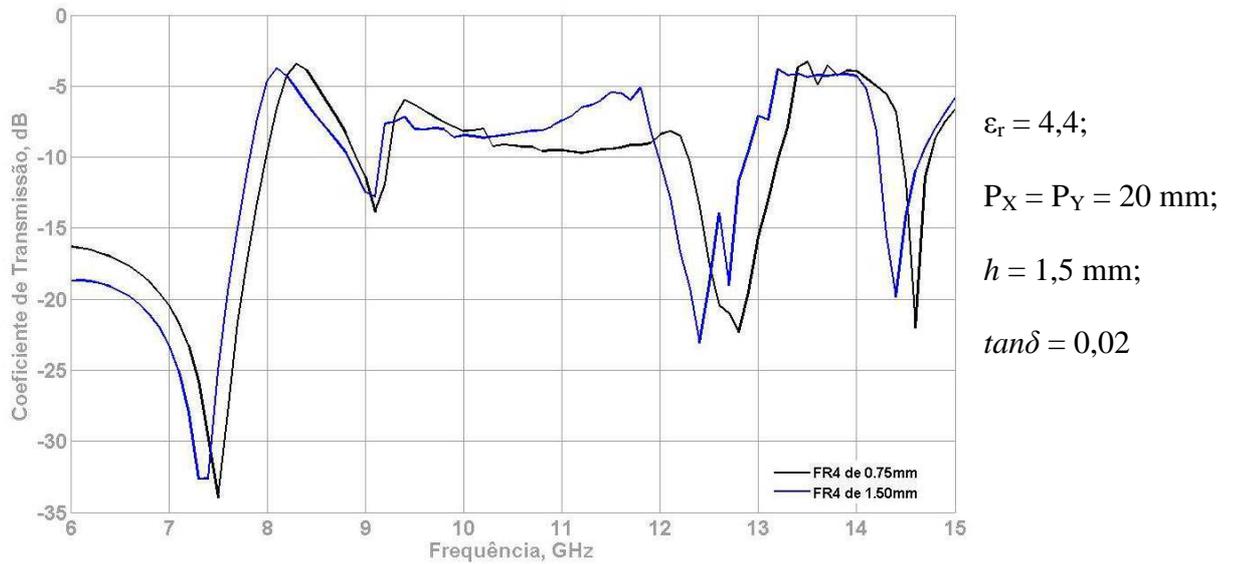


Fig. 4.29: Simulação do cascadeamento de duas estruturas de nível 1 com FR4 entre elas.

A Figura 4.30 apresenta as simulações do cascadeamento de duas estruturas, sendo uma de nível 1 e outra de nível 2, com alguns valores de distâncias entre elas, porém ao invés de ar entre as estruturas, foi colocada uma placa de dielétrico FR4 entre elas.

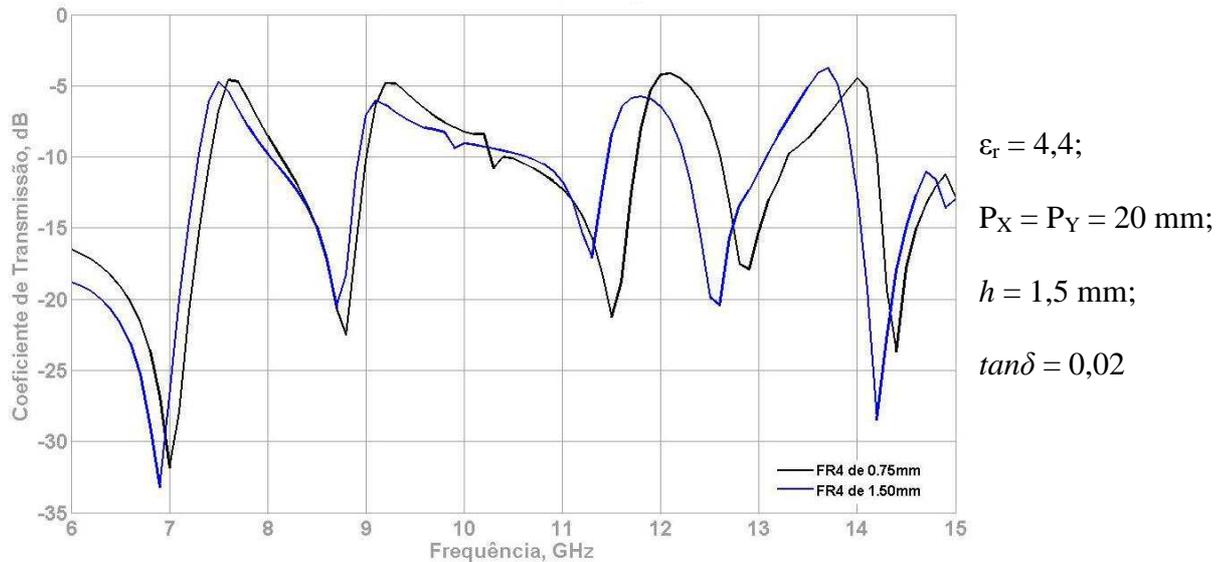


Fig. 4.30: Simulação do cascadeamento de duas estruturas: nível 1 e nível 2 com FR4 entre elas.

A Figura 4.31 apresenta as simulações do cascadeamento de duas estruturas, sendo uma de nível 1 e outra de nível 3, com alguns valores de distâncias entre elas, porém ao invés de ar entre as estruturas, foi colocada uma placa de dielétrico FR4 entre elas.

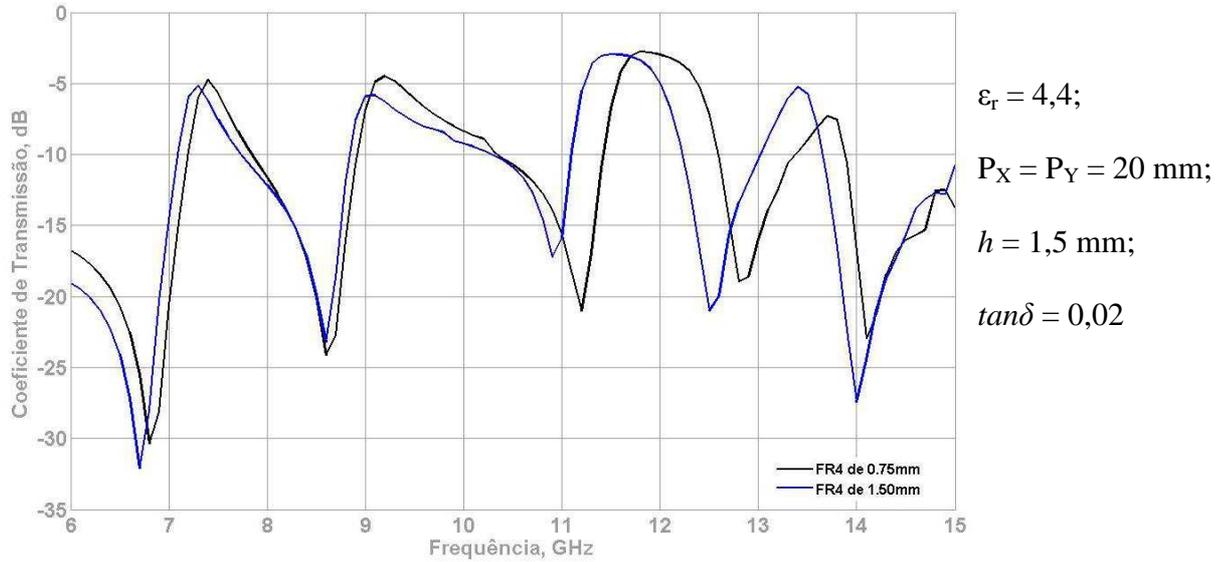


Fig. 4.31: Simulação do cascadeamento de duas estruturas nível 1 e nível 3 com FR4 entre elas.

A Figura 4.32 apresenta as simulações do cascadeamento de duas estruturas de nível 2, com alguns valores de distâncias entre elas, porém ao invés de ar entre as estruturas, foi colocada uma placa de dielétrico com FR4 entre elas.

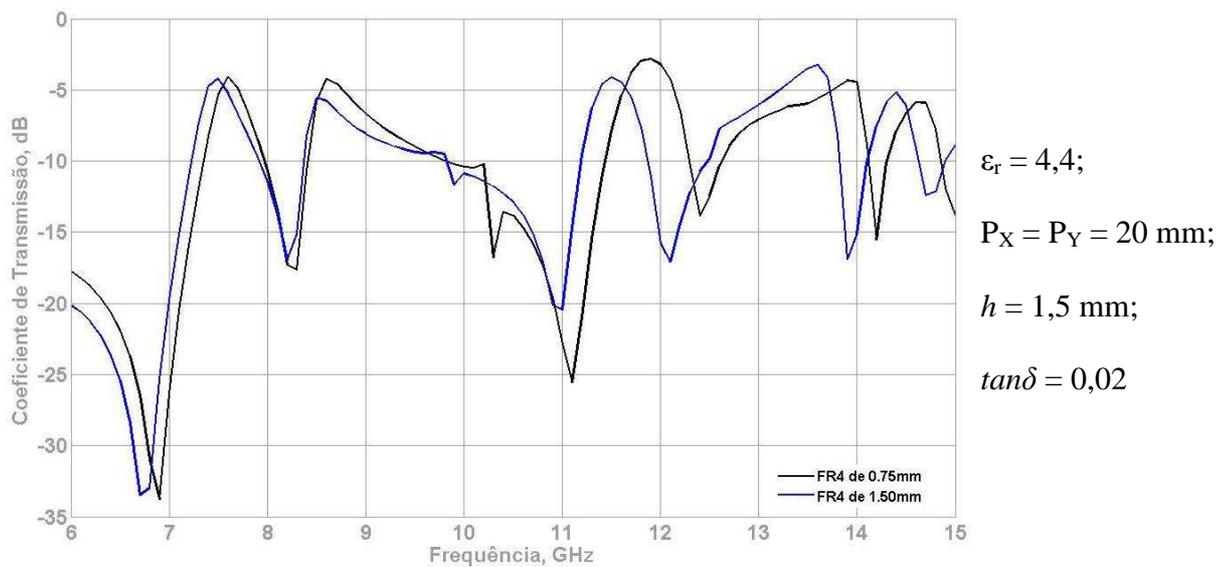


Fig. 4.32: Simulação do cascadeamento de duas estruturas nível 2 com FR4 entre elas.

A Figura 4.33 apresenta as simulações do cascadeamento de duas estruturas, sendo uma de nível 2 e outra de nível 3, com alguns valores de distâncias entre elas, porém ao invés de ar entre as estruturas, foi colocada uma placa de dielétrico FR4 entre elas.

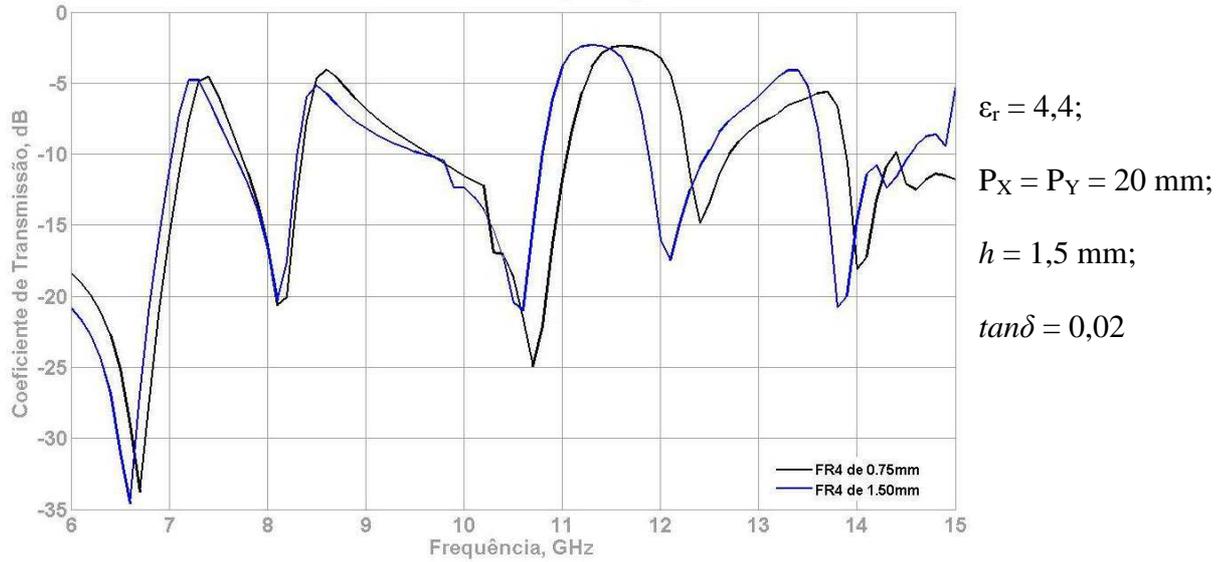


Fig. 4.33: Simulação do cascadeamento de duas estruturas nível 2 e nível 3 com FR4 entre elas.

A Figura 4.34 apresenta as simulações do cascadeamento de duas estruturas de nível 3, com alguns valores de distâncias entre elas, porém ao invés de ar entre as estruturas, foi colocada uma placa de dielétrico FR4 entre elas.

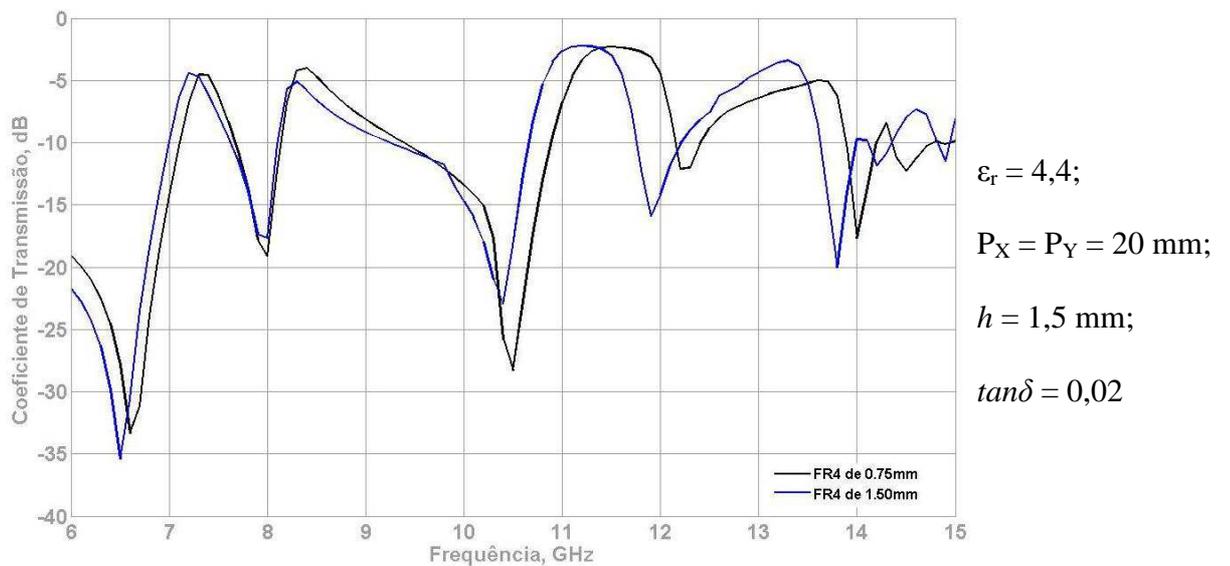


Fig. 4.34: Simulação do cascadeamento de duas estruturas nível 3 com FR4 entre elas.

4.5 Resultados das FSS Projetadas com Geometria Fractal de Gosper Multicamadas

Para a medição dos protótipos de FSS fabricados foi montado um *setup* de medição (ver Figura 4.6) no Laboratório de Medidas em Telecomunicações do IFPB. Para o cascadeamento das estruturas com separação de ar foram utilizadas porcas e parafusos de teflon, produzidos pelos laboratórios de mecânica da UFRN, Figura 4.35. Em seguida os parafusos foram colocados em furos anteriormente ajustados para o perfeito alinhamento das células das FSS (ver Figura 4.36).



Fig. 4.35: Fotografia dos parafusos e porcas usadas na medição.

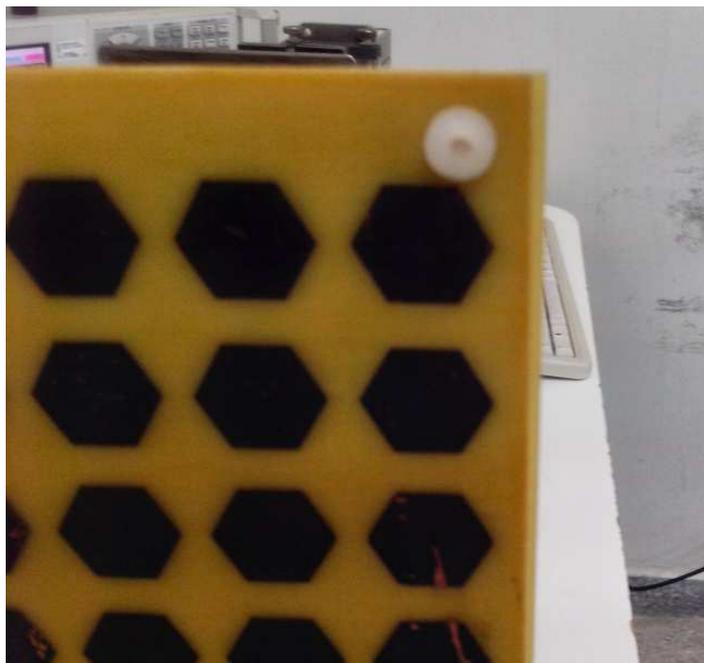


Fig. 4.36: Detalhe da colocação dos parafusos de teflon numa FSS multicamada.

Para a medição das estruturas cascadeadas com FR4 entre elas, foram preparadas em solução de percloroeto de ferro duas placas dielétricas com espessuras de 0,75 mm e 1,5 mm, esta última mostrada na imagem da Figura 4.37.

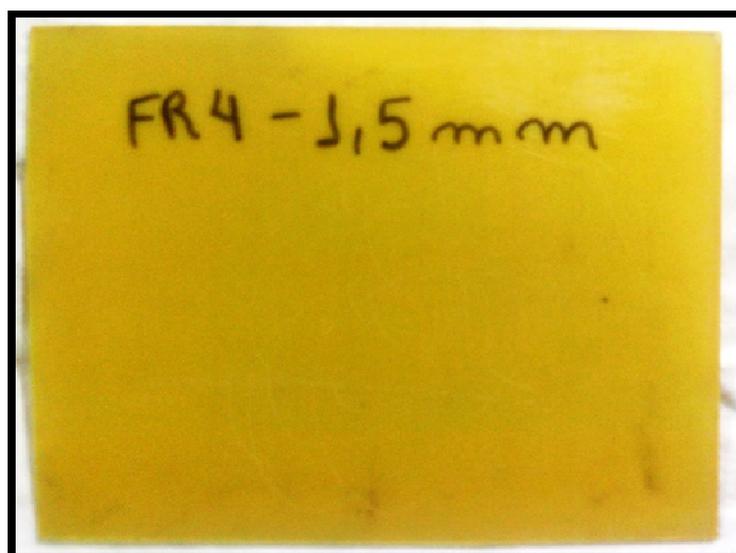


Fig. 4.37: Placa de FR4 após a retirada da cobertura de cobre.

A apresentação dos estudos comparativos entre os resultados teóricos e experimentais obtidos é feita de acordo com a ordem indicada na Tabela 4.

Tabela 4.4: Organização das medições de FSS acopladas.

Nível	Figuras	Tipo de cascadeamento
K0K1	4.38	Sem separação entre FSS
	4.39	Com uma separação de 10,00 mm entre FSS
	4.40	Com placa de FR4 de 0,75 mm entre FSS
K0K2	4.41	Sem separação entre FSS
	4.42	Com uma separação de 1,00 mm entre FSS
	4.43	Com placa de FR4 de 0,75 mm entre FSS
K0K3	4.44	Sem separação entre FSS
	4.45	Com uma separação de 1,00 mm entre FSS
	4.46	Com placa de FR4 de 1,50 mm entre FSS
K1K2	4.47	Sem separação entre as placas
	4.48	Separação de 6 mm entre as placas
	4.49	Placa de FR4 de 0,75 mm entre as placas
K1K3	4.50	Sem separação entre as placas
	4.51	Separação de 1 mm entre as placas
	4.52	Placa de FR4 de 0,75 mm entre as placas
	4.53	Placa de FR4 de 1,50 mm entre as placas
K2K3	4.54	Sem separação entre as placas
	4.55	Separação de 5 mm entre as placas
	4.56	Placa de FR4 de 0,75 mm entre as placas

As Figuras 4.38, 4.39 e 4.40 apresentam os resultados comparativos das estruturas cascadeadas usando as FSS de nível 0 e nível 1, sendo na Figura 4.38 sem nenhuma separação

entre as placas, onde a linha cheia apresenta a curva dos resultados simulados e a pontilhada dos resultados medidos.

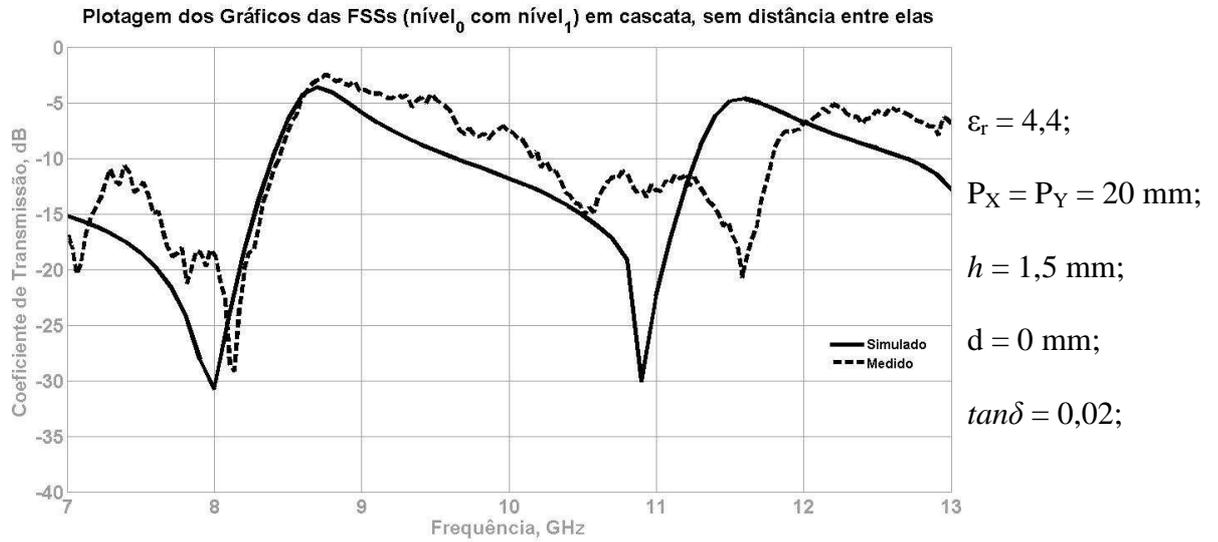


Fig. 4.38: Nível 0 e nível 1 sem separação entre as FSS.

Na Figura 4.39 com 10 mm de separação entre as placas onde a linha cheia apresenta a curva dos resultados simulados e a pontilhada dos resultados medidos.

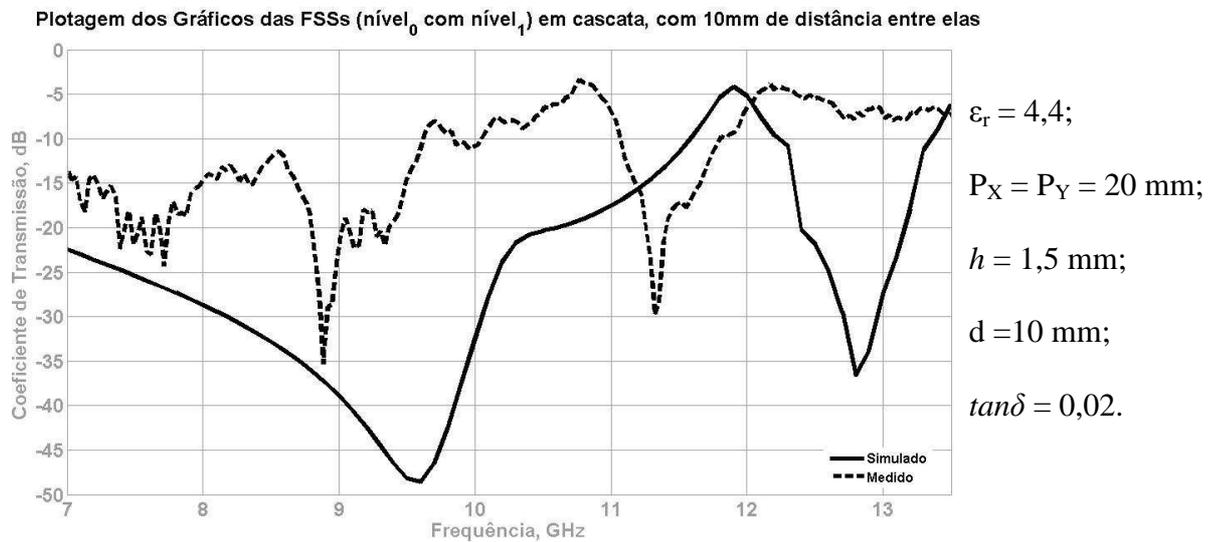


Fig. 4.39: Nível 0 e nível 1 com 10 mm de separação entre as FSS.

Na Figura 4.40 as duas placas estão separadas por uma placa de FR4 de 0,75 mm de altura, linha cheia apresenta a curva dos resultados simulados e a pontilhada dos resultados medidos.

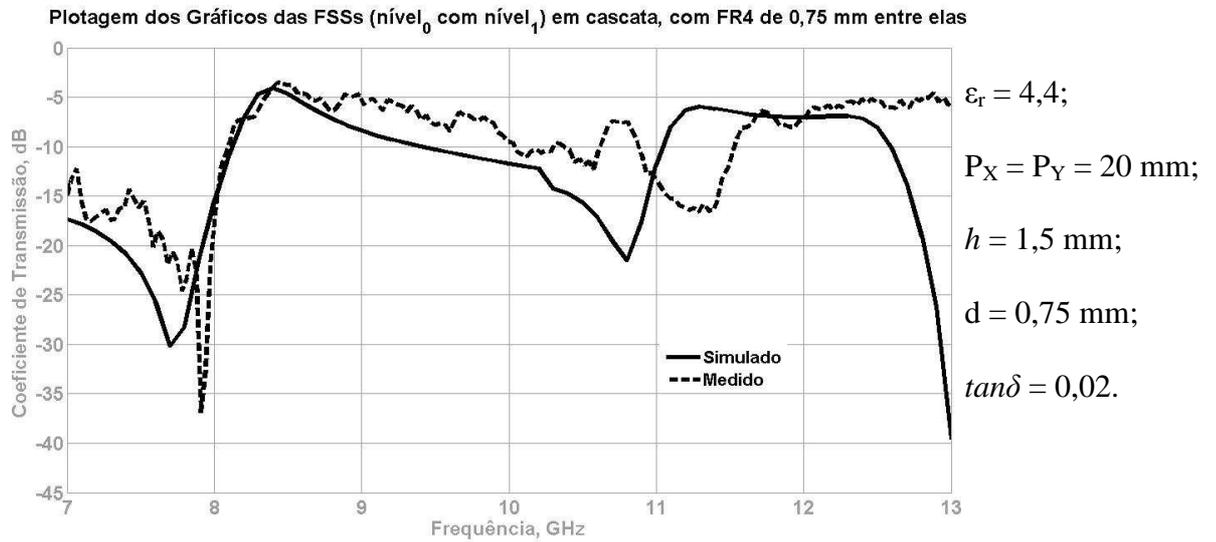


Fig. 4.40: Nível 0 e nível 1 com FR4 de 0,75mm entre as FSS.

As Figuras 4.41, 4.42 e 4.43 apresentam os resultados comparativos das estruturas cascadeadas usando as FSS de nível 0 e nível 2, sendo na Figura 4.41 sem nenhuma separação entre as placas. A linha cheia apresenta a curva dos resultados simulados e a pontilhada dos resultados medidos.

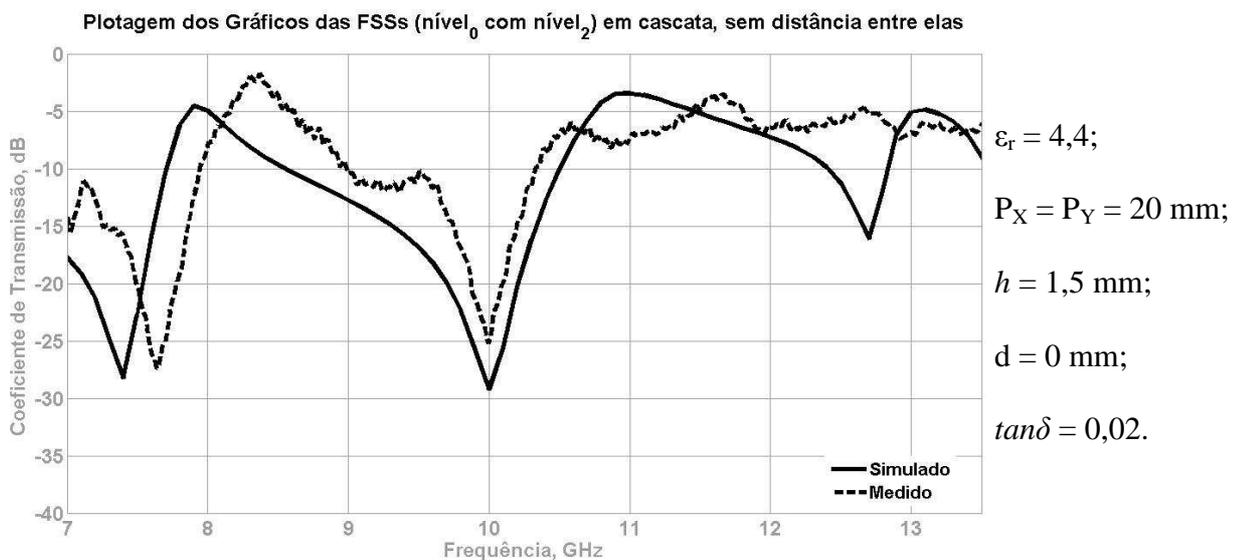


Fig. 4.41: Nível 0 e nível 2 sem separação entre as FSS.

Na Figura 4.42 com 1 mm de separação entre as placas onde a linha cheia apresenta a curva dos resultados simulados e a pontilhada dos resultados medidos.

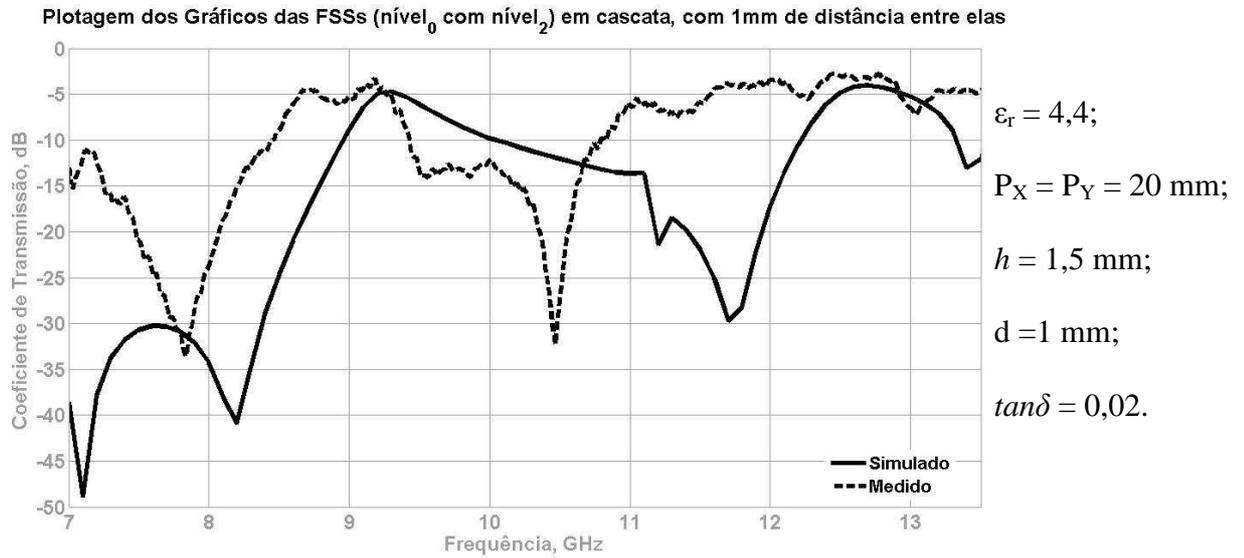


Fig. 4.42: Nível 0 e nível 2 com 1 mm de separação entre as FSS.

Na Figura 4.43 as duas placas estão separadas por uma placa de FR4 de 0,75mm de altura, linha cheia apresenta a curva dos resultados simulados e a pontilhada o resultado medido.

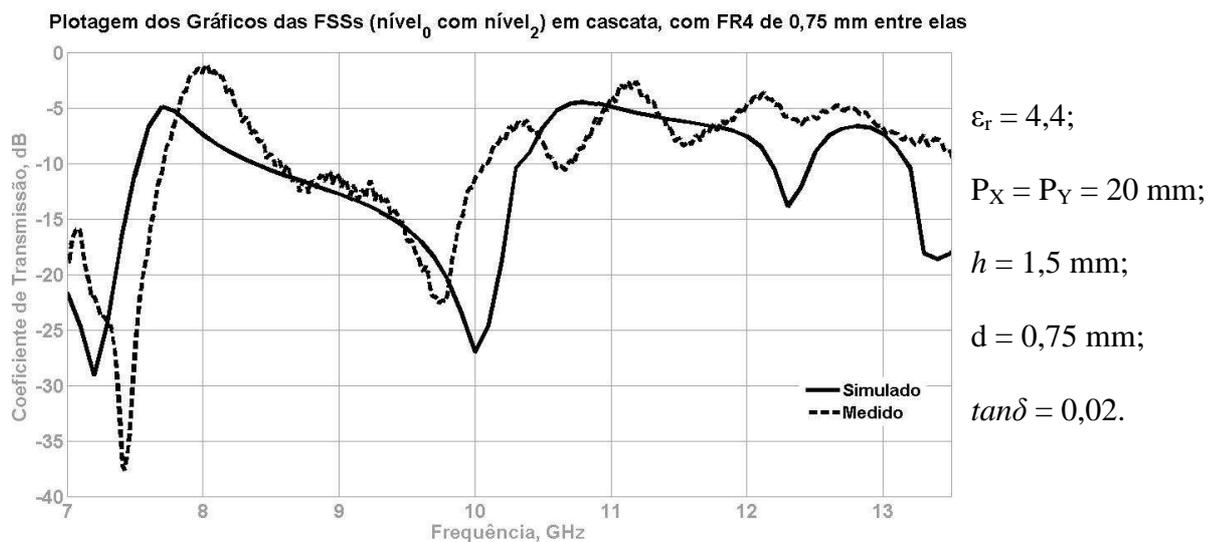


Fig. 4.43: Nível 0 e nível 2 com FR4 de 0,75mm entre as FSS.

As Figuras 4.44, 4.45 e 4.46 apresentam os resultados comparativos das estruturas cascadeadas usando as FSS de nível 0 e nível 3, sendo na Figura 4.44 sem nenhuma separação entre as placas. A linha cheia apresenta a curva dos resultados simulados e a pontilhada dos resultados medidos.

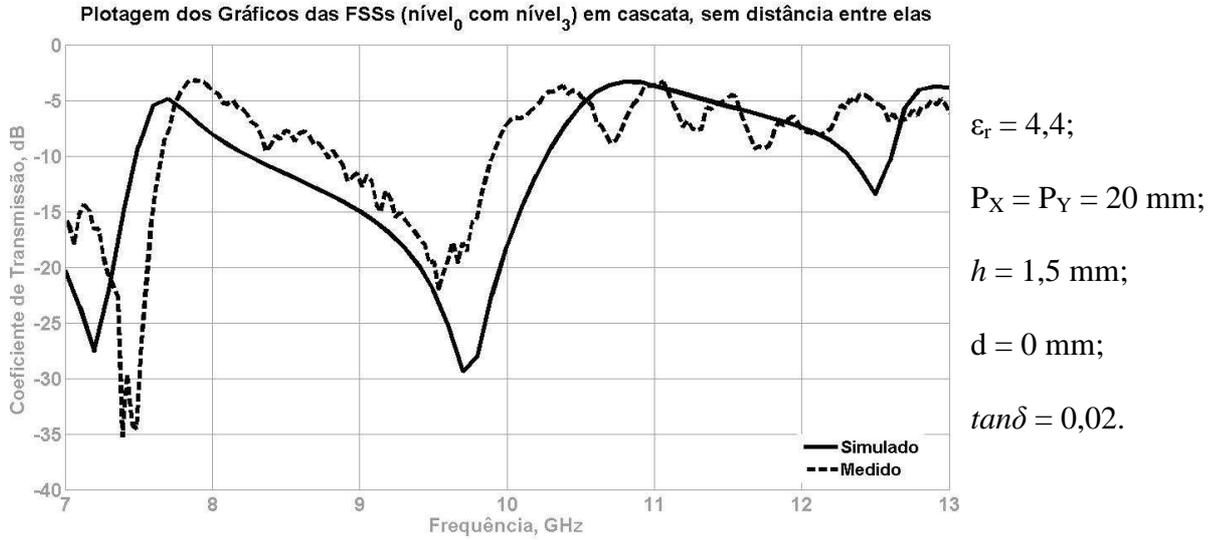


Fig. 4.44: Nível 0 e nível 3 sem separação entre as FSS.

Na Figura 4.45 com 1 mm de separação entre as placas onde a linha cheia apresenta a curva dos resultados simulados e a pontilhada o resultado medido.

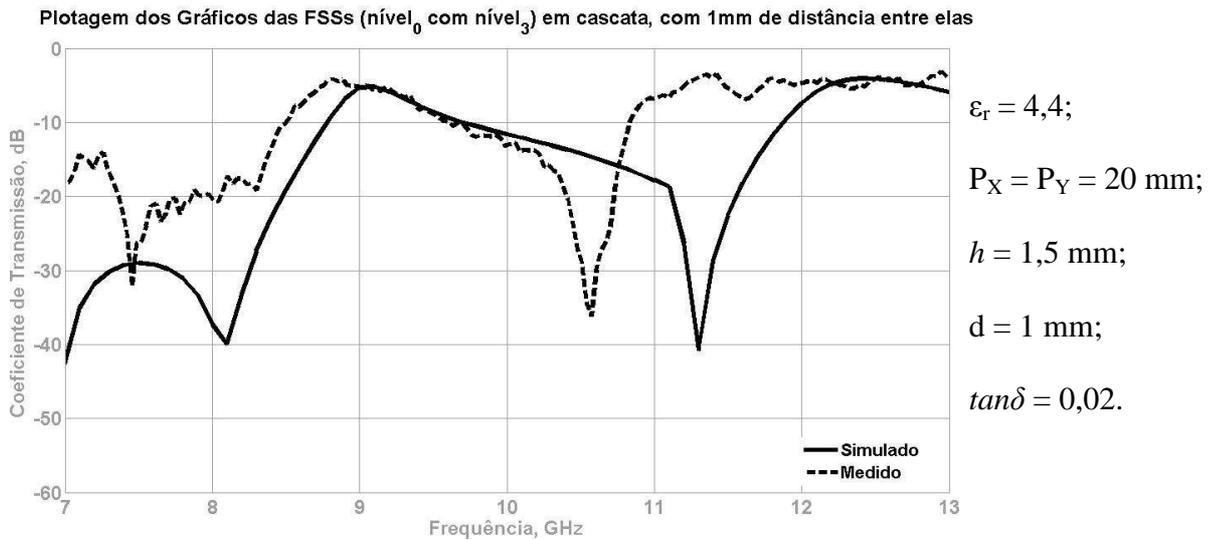


Fig. 4.45: Nível 0 e nível 3 com 1 mm de separação entre as FSS.

Na Figura 4.46 as duas placas estão separadas por uma placa de FR4 de 1,50mm de altura, onde a linha cheia apresenta a curva dos resultados simulados e a pontilhada dos resultados medidos.

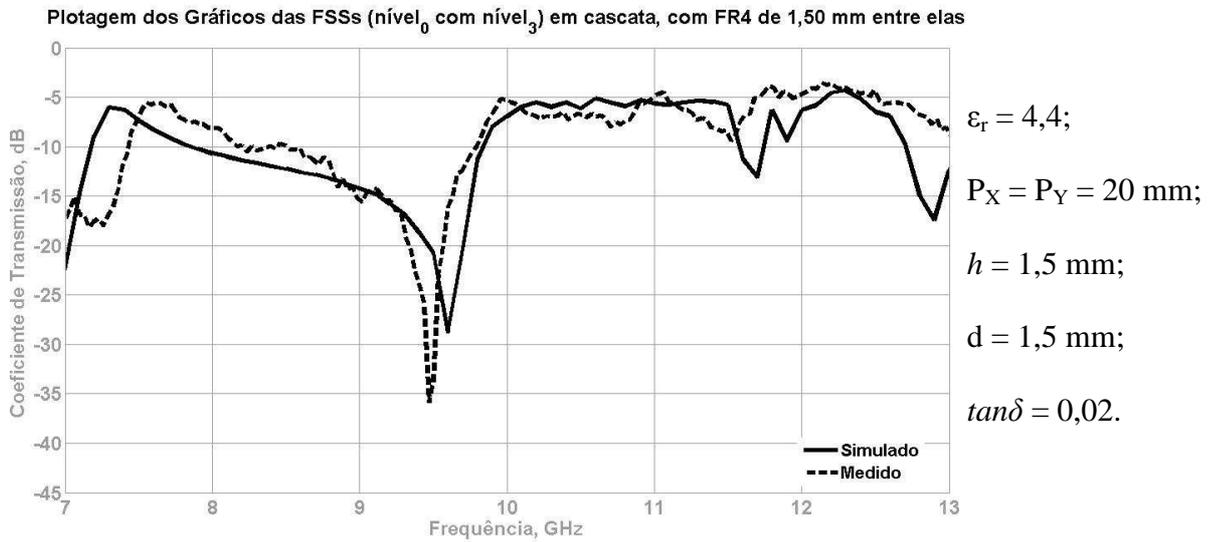


Fig. 4.46: Nível 0 e nível 3 com FR4 de 1,50 mm entre as FSS.

As Figuras 4.47, 4.48 e 4.49 apresentam os resultados comparativos das estruturas cascadeadas usando as FSS de nível 1 e nível 2, sendo na Figura 4.47 sem nenhuma separação entre as placas. A linha cheia apresenta a curva dos resultados simulados e a pontilhada dos resultados medidos.

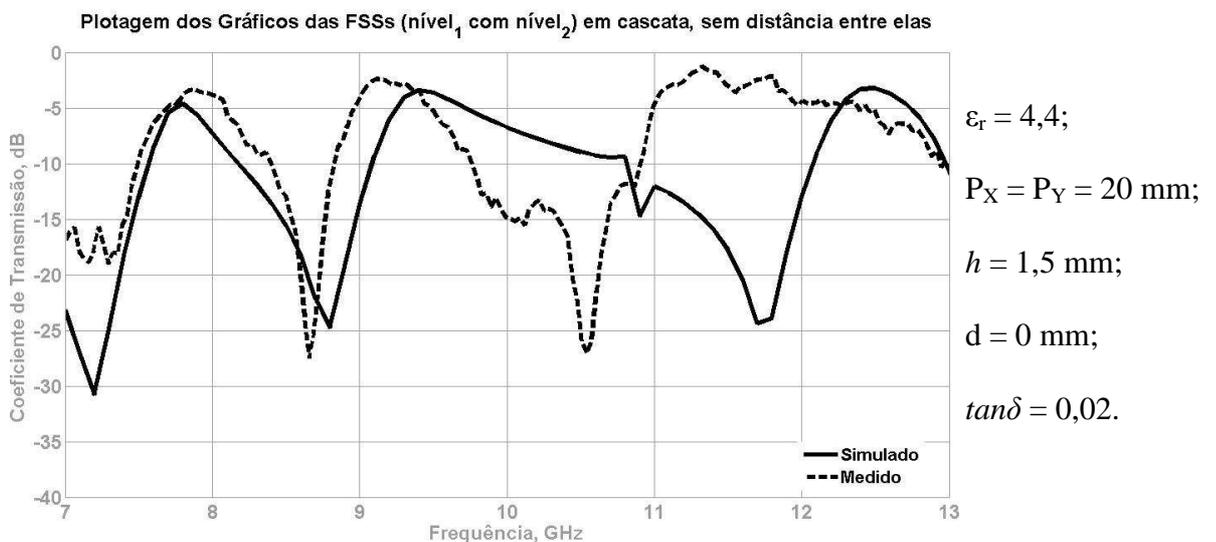


Fig. 4.47: Nível 1 e nível 2 sem separação entre as FSS.

Na Figura 4.48 com 6 mm de separação entre as placas onde a linha cheia apresenta a curva dos resultados simulados e a pontilhada dos resultados medidos.

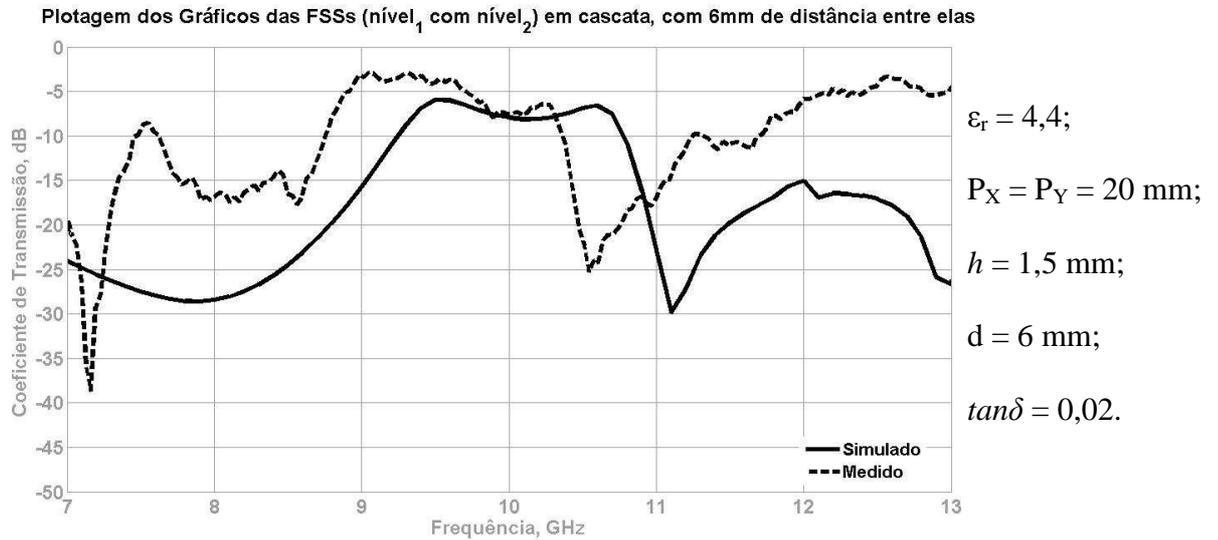


Fig. 4.48: Nível 1 e nível 2 com 6 mm de separação entre as FSS.

Na Figura 4.49 as duas placas estão separadas por uma placa de FR4 de 0,75 mm de altura, onde a linha cheia apresenta a curva dos resultados simulados e a pontilhada dos resultados medidos.

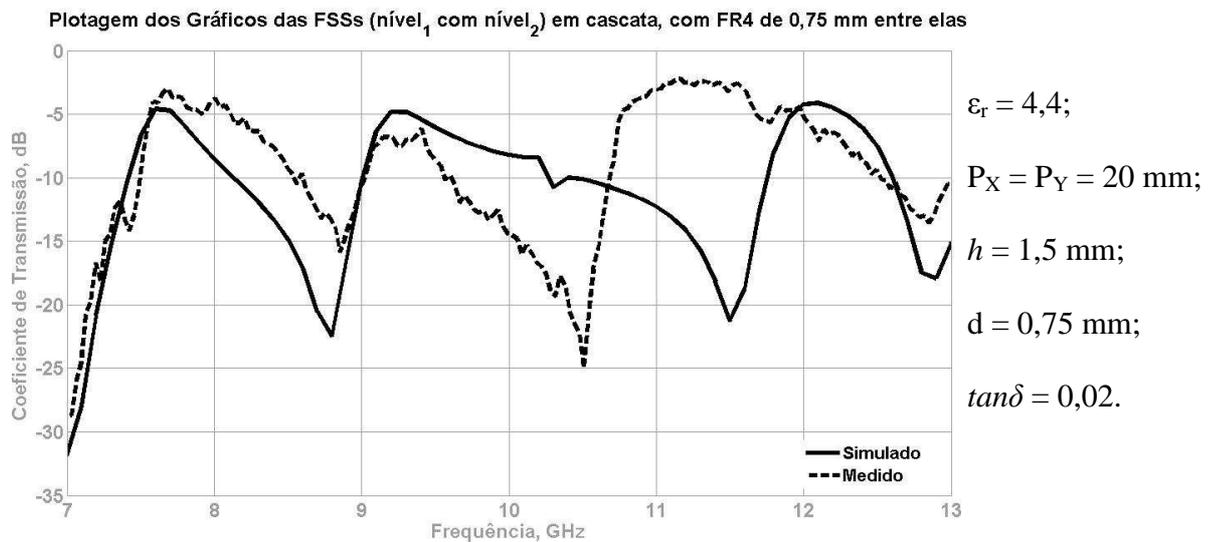


Fig. 4.49: Nível 1 e nível 2 com FR4 de 0,75 mm entre as FSS.

As Figuras 4.50, 4.51, 4.52 e 4.53 apresentam os resultados comparativos das estruturas cascadeadas usando as FSSs de nível 1 e nível 3, sendo na Figura 4.50 sem nenhuma separação entre as placas. A linha cheia apresenta a curva dos resultados simulados e a pontilhada dos resultados medidos.

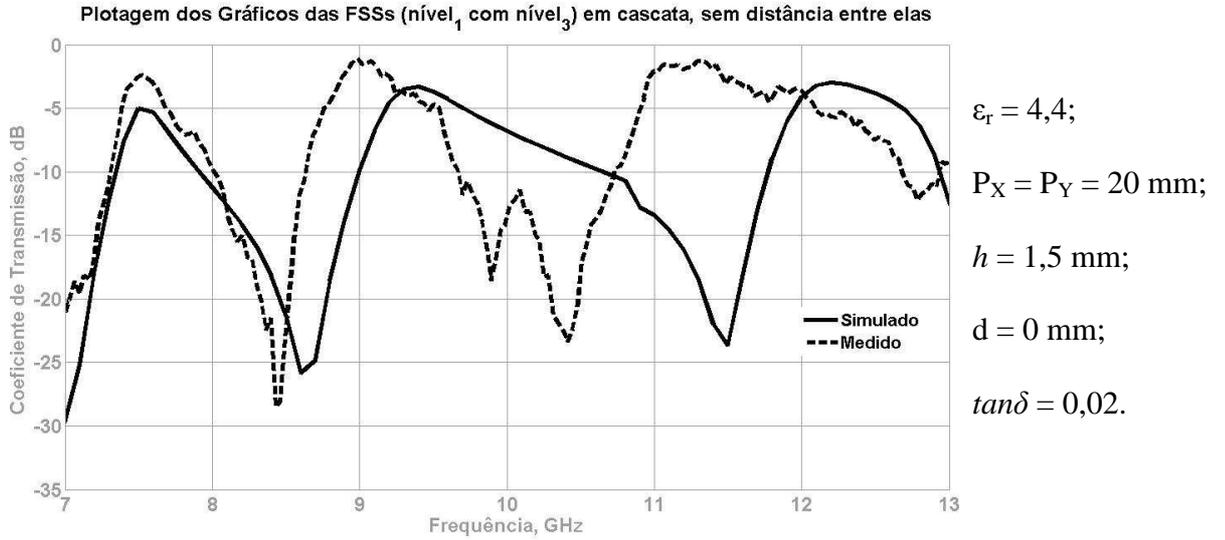


Fig. 4.50: Nível 1 e nível 3 sem separação entre as FSS.

Na Figura 4.51 com 1 mm de separação entre as placas onde a linha cheia apresenta a curva dos resultados simulados e a pontilhada dos resultados medidos.

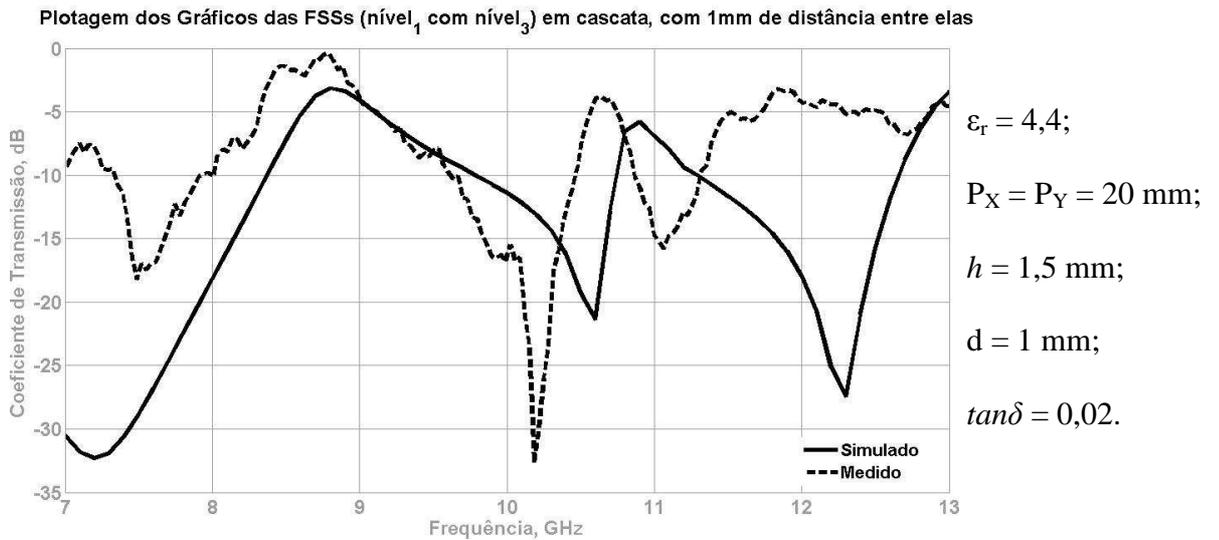


Fig. 4.51: Nível 1 e nível 3 com 1 mm de separação entre as FSS.

Na Figura 4.52 as duas placas estão separadas por uma placa de FR4 de 0,75 mm de altura, onde a linha cheia apresenta a curva dos resultados simulados e a pontilhada dos resultados medidos.

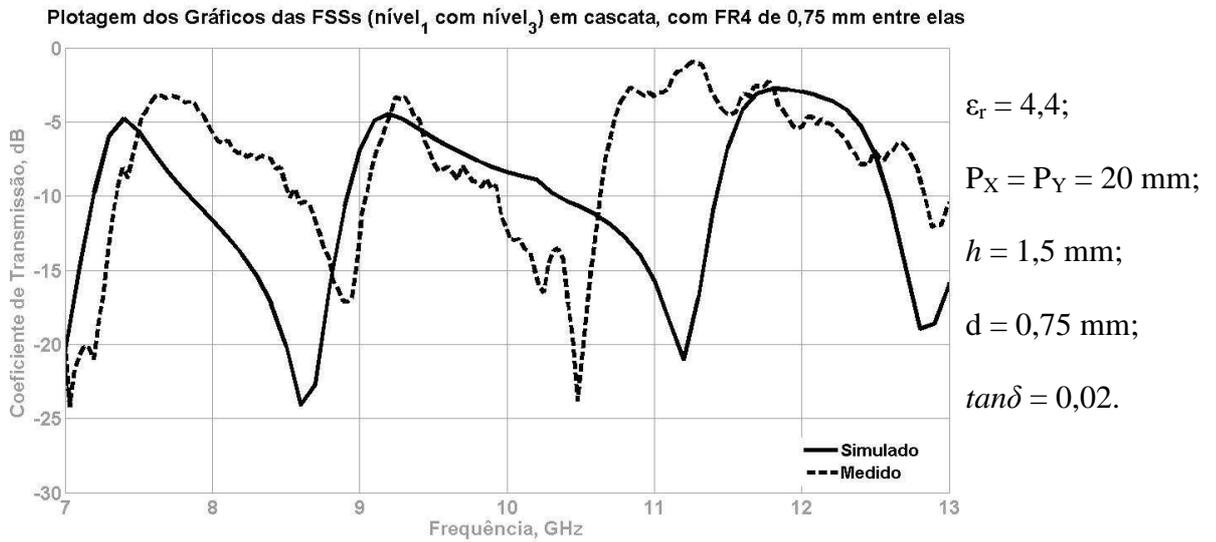


Fig. 4.52: Nível 1 e nível 3 com FR4 de 0,75 mm entre as FSS.

Na Figura 4.53 as duas placas estão separadas por uma placa de FR4 de 1,50 mm de altura, onde a linha cheia apresenta a curva dos resultados simulados e a pontilhada dos resultados medidos.

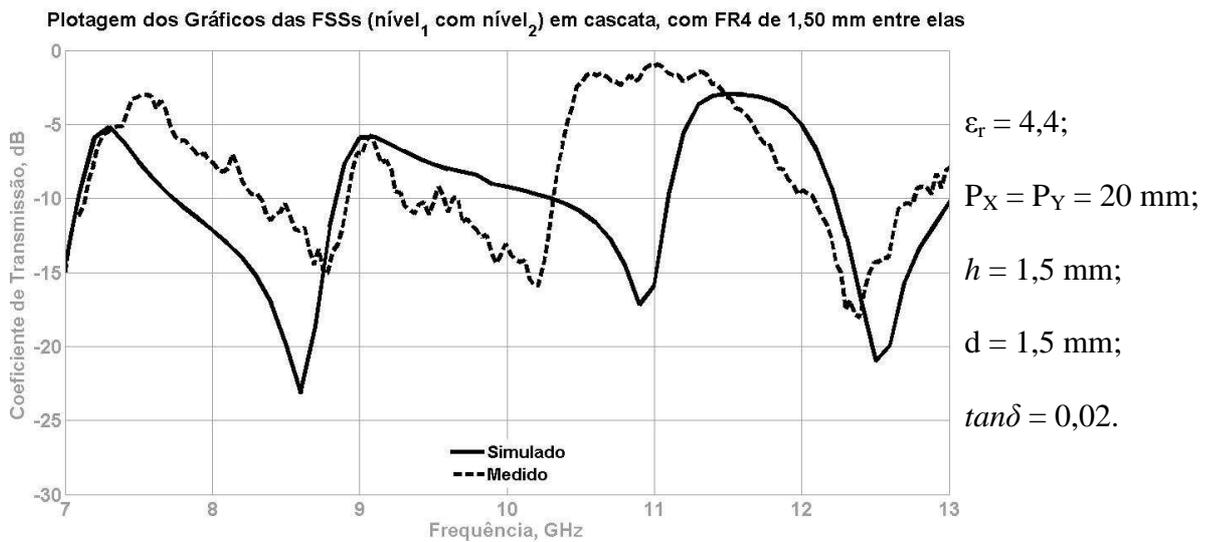


Fig. 4.53: Nível 1 e nível 3 com FR4 de 1,50 mm entre as FSS.

As Figuras 4.54, 4.55 e 4.56 apresentam os resultados comparativos das estruturas cascadeadas usando as FSS de nível 2 e nível 3, sendo na Figura 4.54 sem nenhuma separação entre as placas. A linha cheia apresenta a curva dos resultados simulados e a pontilhada dos resultados medidos.

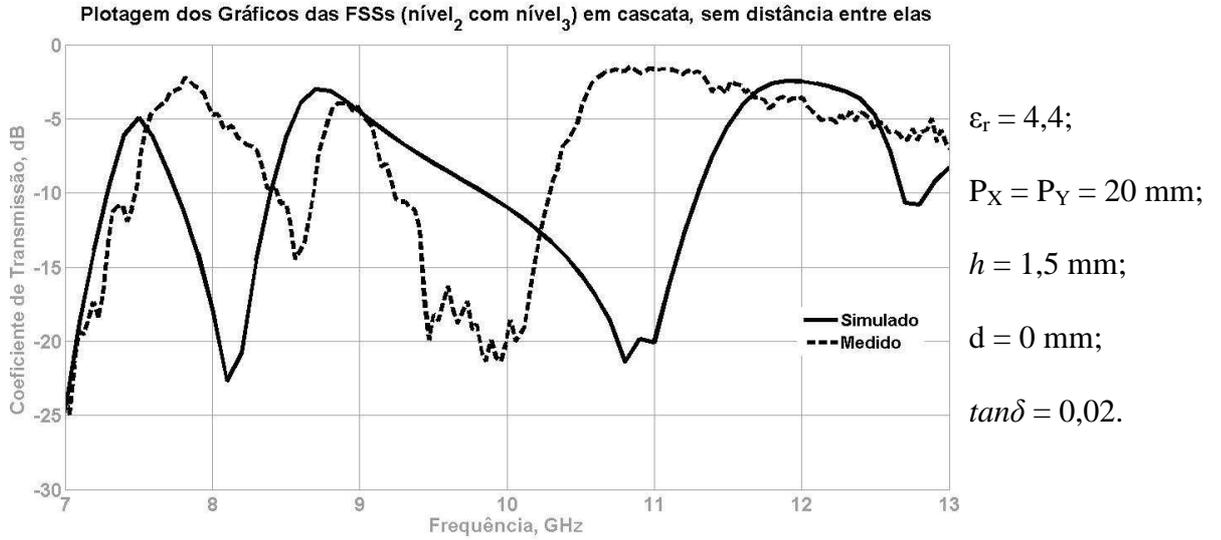


Fig. 4.54: Nível 2 e nível 3 sem separação entre as FSS.

Na Figura 4.55 com 5 mm de separação entre as placas onde a linha cheia apresenta a curva dos resultados simulados e a pontilhada dos resultados medidos.

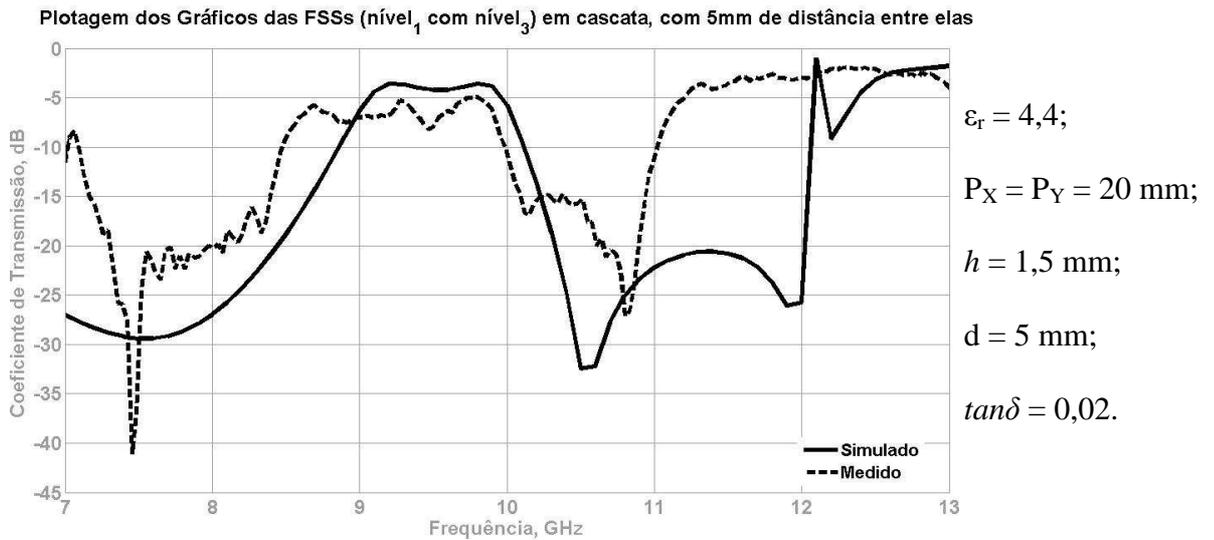


Fig. 4.55: Nível 2 e nível 3 com 5 mm de separação entre as FSS.

Na Figura 4.56 as duas placas estão separadas por uma placa de FR4 de 0,75 mm de altura, onde a linha cheia apresenta a curva dos resultados simulados e a pontilhada dos resultados medidos.

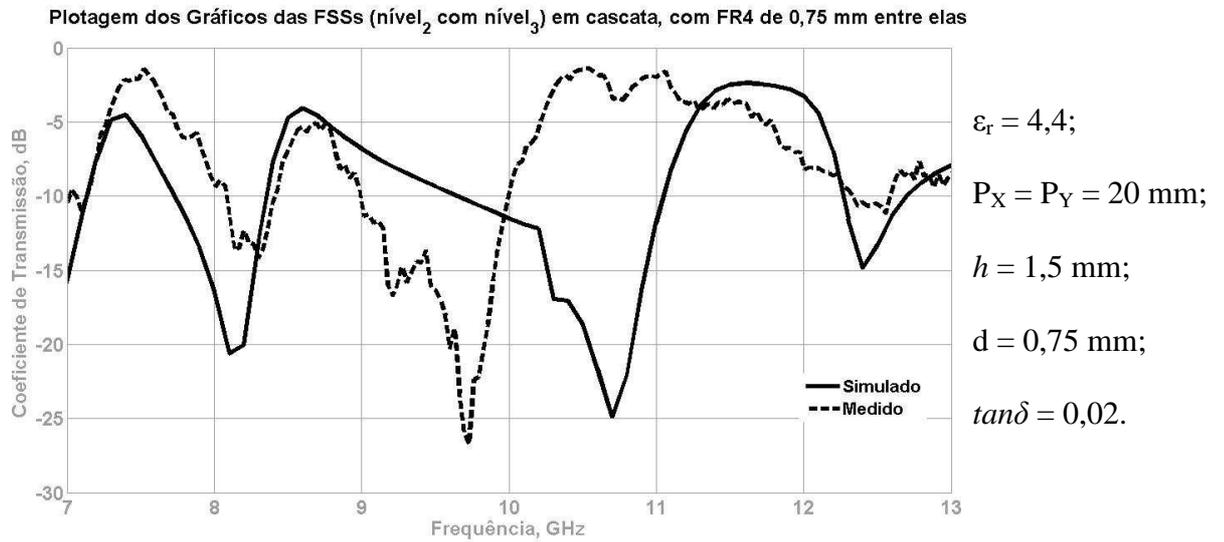


Fig. 4.56: Nível 2 e nível 3 com FR4 de 0,75 mm entre as FSS.

4.6 Conclusão

Foram realizadas simulações das combinações dos níveis 0, 1, 2 e 3 dos *patches* das FSS usando geometria fractal de Gosper com variações a cada 1 mm numa faixa de 0 a 10 mm de distância. Posteriormente foram realizadas as medições e comparadas às simulações. Algumas das curvas geradas foram apresentadas. Para cada combinação uma curva apresentou o resultado para o cascadeamento sem distância entre os dielétricos, com alguma distância entre as mesmas e placas separadas com FR4 entre elas.

Capítulo 5

Conclusões

Este trabalho apresentou o desenvolvimento teórico e experimental de superfícies seletivas de frequência com elementos fractais de Gosper em camada simples e em multicamadas. As FSS atuam como filtros rejeita-faixa, com comportamento de banda dupla nas bandas X e Ku. Dada a simetria dos elementos fractais, as FSS também apresentam polarização dupla. As estruturas foram projetadas utilizando a geometria de Gosper em três níveis de iteração, a partir de um arranjo periódico de *patches* hexagonais. Um substrato dielétrico de fibra de vidro com camada simples foi utilizado no projeto das estruturas propostas. A análise teórica das propriedades de transmissão das FSS projetadas foi realizada através de simulações com o *software* comercial Ansoft Designer.

O projeto de uma FSS com elementos fractais de Gosper mostrou ser uma solução interessante para aplicações que requeiram filtros espaciais compactos e com resposta de banda dupla. O funcionamento das estruturas periódicas projetadas com elementos fractais permitiu ajustar seus parâmetros eletromagnéticos (f_r e BW), sem modificar seu tamanho original. Isto foi possível porque, com o aumento do número de iterações fractais, há uma diminuição dos valores de f_r e BW. De fato, esta característica da estrutura proposta facilitou a sintonização do filtro FSS para as bandas X e Ku.

A partir da validação dos resultados das estruturas projetadas, verificou-se que o aumento do nível de iteração fractal provocou a redução da largura de banda do filtro espacial. Por tal motivo foi iniciado o estudo das características de FSS multicamadas, desenvolvidas através do cascadeamento de FSS de camada simples. Para a separação dielétrica entre as FSS de camada simples considerou-se o ar e a fibra de vidro (material FR4). Cada separação dielétrica foi ajustada com o uso de parafusos apropriados de teflon. As simulações realizadas foram concordantes com as características esperadas e descritas na literatura.

Na continuidade deste trabalho, pretende-se investigar a utilização de outras geometrias fractais, no caso de estruturas de FSS isoladas, e de camadas múltiplas, no caso de

estruturas de FSS acopladas, para aplicações específicas em filtros, antenas de alto ganho e absorvedores, por exemplo. Além disso, pretende-se avaliar a estabilidade angular das FSS consideradas, tanto das estruturas isoladas como das acopladas.

Referências Bibliográficas

- [1] A. Chatterjee, S. Biswas, D. Chanda e P. P Sarkar, "A polarization independent compact multi-band Frequency Selective Surface", Nirma University International Conference on Engineering (NUiCONE), pp. 1-4, 2011.
- [2] F. Costa, A. Monorchio e G. Manara, "Efficient Analysis of Frequency-Selective Surfaces by a Simple Equivalent-Circuit Model", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 54, no. 4, pp. 35-48, 2012.
- [3] C. L. Nóbrega, M. R. Silva, W. C. Araújo, P. H. F. Silva e A. G. D'Assunção, "Analysis of frequency selective surfaces with T-shaped pre-fractals patch elements", 2011 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), pp. 694-696, 2011.
- [4] B. B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*, W. H. Freeman and Co., New York, 1983.
- [5] J. P. Gianvittorio, J. Romeu, S. Blanch e Y. Rahmat-Samii, "Self-similar prefractal frequency selective surfaces for multiband and dual-polarized applications", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 51, no. 11, pp. 3088-3096, 2003.
- [6] S. Agahi e R. Mittra, "Design of a cascaded frequency selective surface as a dichroic subreflector", IEEE AP-S International Symposium on Antennas and Propagation, pp. 88-91, 1990.

- [7] R. H. C. Maniçoba, A. G. D'Assunção e A. L. P. S. Campos, "Wide stop-band cascaded frequency selective surfaces with Koch fractal elements", 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC), Chicago, IL, p. 1, 2010.
- [8] E. S. R. Montalvão, "Uma proposta de FSS com geometria simplificada", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2010.
- [9] R. M. S. Cruz, P. H. F. Silva e A. G. D'Assunção, "Neuromodeling stop band properties of Koch island patch elements for FSS filter design", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 51, no. 12, pp. 3014-3019, 2009.
- [10] E. E. C. Oliveira, A. L. P. S. Campos e P. H. F. Silva, "Miniaturization of frequency selective surfaces using fractal Koch curves", *Microwave and Optical Technology Letters*, v. 51, no. 8, pp. 1983-1986, 2009.
- [11] L. M. Araújo, "Análise teórica e experimental de superfícies seletivas de frequência e suas aplicações em antenas planares". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2009.
- [12] D. L. Jaggard, "Fractal electrodynamics: wave interactions with discretely self-similar structures". C. Baun e H. Kritikos (eds.), "Electromagnetic symmetry", pp. 231-281, Washington, DC, Taylor and Francis Publishers, 1995.
- [13] D. L. Jaggard, "Fractal electrodynamics: from super antennas to superlattices", J. L. Vehel, E. Lutton e C. Tricot (eds.), "Fractals in engineering", pp. 204-221, New York, Springer-Verlag, 1997.
- [14] D. H. Werner, "An overview of fractal electrodynamics research", 11th Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics (ACES), vol. II, pp. 964-969, Monterey, CA, Naval Postgraduate School, 1995.

- [15] B. A. Munk, *Frequency Selective Surfaces – Theory and Design*, New York, USA, John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [16] P. L. Silva, “Modelagem de superfícies seletivas de frequência e antenas de microfita utilizando redes neurais artificiais”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2006.
- [17] T. K. Wu, *Frequency Selective Surface and Grid Array*, New York, USA, John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [18] N. Marcuvitz, *Waveguide Handbook*, New York, Dover, 1965.
- [19] C. C. Chen, “Transmission of microwave through perforated flat plates of finite thickness”, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 21, no. 1, pp. 1-6, 1973.
- [20] R. Mittra, C. H. Chan e T. Cwik, “Techniques for analyzing frequency selective surfaces – a review”, *IEEE Proceedings*, vol. 76, no. 12, pp. 1593-1615, 1988.
- [21] A. L. P. S. Campos, A. G. D’Assunção e M. L. C. Gomes Neto, “Analysis of frequency selective surfaces at millimeter wave band using the Hertz vector potential method”, *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, vol. 26, no. 6, pp. 843-854, 2005.
- [22] G. Manara, A. Monorchio e R. Mittra, “Frequency selective surfaces desing based on genetic algorithm”, *Electronics Letters*, vol. 35, no. 17, pp. 1400-1401, 1999.
- [23] L. Li, D. H. Werner, J. A. Bossard e T. S. Mayer, “A model-based parameter estimation technique for wide-band interpolation of periodic moment method impedance matrices with application to genetic algorithm optimization of frequency selective surfaces”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 3, pp. 908-924, 2006.

- [24] J. A. Bossard, D. H. Werner, T. S. Mayer, J. A. Smith, Y. U. Tang, R. P. Drupp e L. Li, "The design and fabrication of planar multiband metallodielectric frequency selective surfaces for infrared applications", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 4, pp. 1265-1276, 2006.
- [25] S. Cui, D. S. Weile e J. L. Volaskis, "Novel planar electromagnetic absorber designs using genetic algorithms", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 6, pp. 1811-1817, 2006.
- [26] C. H. Chan, J. N. Hwang e D. T. Davis, "Multilayered frequency selective surface design using artificial neural networks", *IEEE AP-S International Symposium on Antennas and Propagation*, vol. 3, pp. 18-25, 1992.
- [27] M. R. Silva, C. L., Nóbrega, P. H. F. Silva e A. G. D'Assunção, "Application of Bio-Inspired Algorithms and Neural Networks for Optimal Design of Fractal Frequency Selective Surfaces", *Real-World Applications of Genetic Algorithms*, Intech, pp. 27-51, 2012.
- [28] R. Dubrovka, J. Vazquez, C. Parini e D. Moore, "Multi-frequency and multi-layer frequency selective surface analysis using modal decomposition equivalent circuit method", *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 30, no. 3, pp. 492-500, 2009.
- [29] H. Fukuda, M. Shimizu, e G. Nakamura, New Gosper space filling curves, *Proc. International Conference on Computer Graphics and Imaging - CGIM2001*, pp. 34-38, Hawaii, 2001.
- [30] M. Smierzchalski, P. Kurgan e M. Kitlinski, "Improved selectivity compact band-stop filter with Gosper fractal-shaped defected ground structures", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 52, no. 1, pp. 227-229, 2010.

- [31] S. Reed, L. Desclos, C. Terret e S. Toutain, “Patch antenna size reduction by means of inductive slots”, *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 29, no. 2, pp. 79-81, 2001.
- [32] J. Bossard, D. Werner, T. Mayer e R. Drupp, “A novel design methodology for reconfigurable frequency selective surfaces using genetic algorithms”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, pp. 1390-1400, 2005.