

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CAMPUS CARAÚBAS
CURSO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

MYCHAELE JALES DUARTE

**ESTUDO DA VARIAÇÃO DA PERIODICIDADE E DA ESTABILIDADE ANGULAR
DE SUPERFÍCIES SELETIVAS DE FREQUÊNCIA**

CARAÚBAS – RN

2015

MYCHAEL JALES DUARTE

**ESTUDO DA VARIAÇÃO DA PERIODICIDADE E DA ESTABILIDADE ANGULAR
DE SUPERFÍCIES SELETIVAS DE FREQUÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
(UFERSA), como exigência final para
obtenção do título de Bacharel em Ciência e
Tecnologia.

Orientador: Prof. M. Sc. Valdemir Praxedes da
Silva Neto.

CARAÚBAS – RN

2015

© Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Biblioteca Campus Caraúbas (BCC)

Setor de Informação e Referência

D812e Duarte, Mychael Jales.

Estudo da variação da periodicidade e da estabilidade angular de superfícies seletivas de frequência/ Mychael Jales -- Caraúbas, 2015.

47f.: il.

Orientador: Prof. Me. Valdemir Praxedes da Silva Neto

Monografia (Graduação em Ciência e Tecnologia) –
Universidade Federal Rural do Semi-Árido.

1. Linhas de transmissão. 2. Estabilidade angular. 3.
Geometria fractais. I. Título.

RN/UFERSA/BCC

CDD: 621.319

Bibliotecário: Eugênio Pacelli Ferreira da Costa

CRB-15/658

MYCHAEL JALES DUARTE

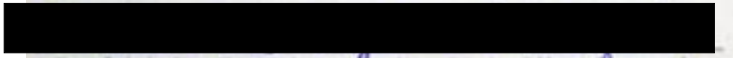
**ESTUDO DA VARIAÇÃO DA PERIODICIDADE E DA ESTABILIDADE ANGULAR
DE SUPERFÍCIES SELETIVAS DE FREQUÊNCIA**

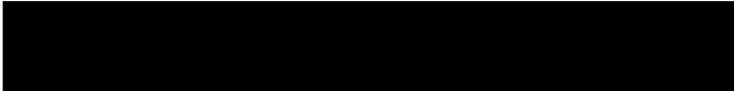
Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), como exigência final para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

APROVADO EM 02 / 02 / 15

BANCA EXAMINADORA


Prof. M. Sc. Valdemir Praxedes da Silva Neto
Orientador


Prof. M. Sc. Francisco Carlos G. da Silva Segundo
1º Membro


Prof. M.Sc. Francisco de Assis Brito Filho
2º Membro


Prof. M.Sc. Antônio Alisson Alencar Freitas
3º Membro

À todos aqueles que acreditaram que eu seria capaz de cumprir a primeira etapa do meu sonho.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus que sempre me abençoou e abençoa os meus passos. Não me deixando faltar fé nos momentos de alegria e tristeza, ainda perdoando os meus erros e sempre dando a chance de aprender com os erros e recomeçar.

Aos meus pais, Marcondes e Arita, pela educação, e sempre terem me mostrado o caminho certo a seguir, me induzindo a fazer as escolhas corretas.

A meu pai, o meu maior espelho.

À minha mãe, minha rainha.

A minha vó, que é minha segunda mãe, que sempre me apoiou e encarou tudo que vinha pela frente, sempre acreditando em mim.

Ao meu irmão, Mychel Duarte, o qual sempre me apoiou e esteve presente e disposto a ajudar sempre que precisei.

Ao meu orientador e amigo, Valdemir Neto, por ter depositado confiança e dado a oportunidade de realizar este trabalho. Pela compreensão, disponibilidade e pela sua orientação, estando sempre pronto a me guiar e corrigir. Seus ensinamentos sem dúvidas serão seguidos por toda jornada à frente, que é o curso de engenharia elétrica.

Aos meus amigos da infância e aos que conquistei até aqui, que estiveram comigo, em especial, Alice Suassuna, Hyago Saraiva, Sildean Fideles, Thaysson Oliveira e Jackson Custeau. Todos são indispensáveis pra mim.

Aos amigos de graduação, que me acompanharam durante todo esse tempo, e que levarei pelo resto de minha vida. Em especial aos que resolveram trilhar o mesmo caminho, que é a engenharia elétrica.

Aos meus mestres e doutores, que estiveram presentes durante toda a minha formação acadêmica. Vocês me instruíram desde o início e mostraram as opções e os caminhos que me possibilitaram chegar até aqui.

Aos futuros docentes da engenharia elétrica que já tive a oportunidade de ser aluno, e verificar o quão são capazes e qualificados para a formação de engenheiros eletricitas.

Ao grupo de jovens católicos do qual faço parte a mais de 3 anos, o JOVIASC (Jovens Vivenciando a Arte de Servir a Cristo), pelo apoio espiritual e momentos de distração e alegria.

E a todos aqueles que de forma direta ou indireta me ajudaram no decorrer deste trabalho.

“É necessário sempre acreditar que o sonho é possível, que o céu é o limite e que você é imbatível.”

Racionais MC's

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a influência da variação da periodicidade de superfícies seletivas de frequência no desempenho da resposta em frequência desses circuitos. Foram analisadas diversas estruturas de elementos do tipo *patch* condutor como espiras circulares, espiras com dipolos parasitas e geometrias fractais. E alguns casos de estruturas reconfiguráveis também foram analisadas. Estruturas de FSS de abertura também serão apresentadas e discutidas. Resultados para o coeficiente de transmissão e reflexão, frequência de operação e largura de banda foram obtidos por simulações usando *Ansoft HFSSTM*, por meio do método dos elementos finitos (FEM). Os resultados obtidos evidenciaram a dependência da resposta em frequência de FSS em função da periodicidade do circuito. Além disso, foi estudada a estabilidade angular de algumas estruturas de FSS em relação à incidência oblíqua da onda plana sobre a superfície do circuito. Os resultados comprovam que dependendo da geometria do elemento de FSS, o circuito manteve-se estável para diferentes ângulos de incidência da onda eletromagnética.

Palavras-Chave: Superfícies Seletivas de Frequência. Periodicidade. Estabilidade Angular. Micro-ondas.

ABSTRACT

This work presents a study on the influence of the variation of periodicity in frequency selective frequency surfaces (FSS) in the performance of the frequency response of these circuits. We analyzed various structures for conductor patch type elements as circular turns, loops with parasitic dipoles and fractal geometry. In some cases, reconfigurable structures were also analyzed. Apertures FSS structures will also be presented and discussed. Results for the coefficient of transmission and reflection, operating frequency and bandwidth were obtained by simulation using Ansoft HFSSTM through the finite element method (FEM). The results showed the dependence of the frequency response of FSS with the periodicity of the circuit basis. Furthermore, it was studied the stability of some angular FSS structures in relation to the oblique incidence of the plane wave in the circuit surface. The results show that depending on the geometry of the FSS element, the circuit has remained stable for different angles of incidence of the electromagnetic wave.

Keywords: Frequency Selective Surfaces. Periodicity. Angular Stability. Microwave.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ϵ_r – Constante dielétrica do substrato.

$\vec{E}$ - Campo elétrico.

$\vec{H}$ - Vetor campo magnético.

h - Altura do substrato.

TE - Modo Transversal Elétrico.

TM - Modo Transversal Magnético.

TEM - Modo Transversal Eletromagnético.

WCIP - Wave Concept Iterative Procedure.

MoM - Method of Moments (Método dos Momentos).

FDTD - Finite Difference Time Domain (Diferenças Finitas no Domínio do Tempo).

FEM - Finite Elements Method (Método dos Elementos Finitos).

OEM – Onda eletromagnética.

HFSS – High Frequency System Simulation

FSS – Frequency Selective Surface (Superfície Seletiva de Frequência)

BW – Largura de Banda

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1-	Resposta em frequência da FSS da Figura 3.1(b) para diferentes períodos.	29
Tabela 3.2-	Resposta em frequência da FSS da Figura 3.1(c) para diferentes períodos.	29
Tabela 3.3-	Resposta em frequência da FSS da Figura 3.1(b) para ângulos de incidência.	31
Tabela 3.4-	Resposta em frequência da FSS da Figura 3.1(c) para ângulos de incidência.	32
Tabela 3.5-	Resposta em frequência da FSS da Figura 3.6(b) para diferentes períodos.	35
Tabela 3.6-	Resposta em frequência da FSS da Figura 3.6(c) para diferentes períodos.	36
Tabela 3.7-	Resposta em frequência da FSS da Figura 3.6(b) para ângulos de incidência.	38
Tabela 3.8-	Resposta em frequência da FSS da Figura 3.6(c) para ângulos de incidência.	38
Tabela 3.9-	Resposta em frequência da FSS da Figura 3.10(a) para diferentes períodos.	40
Tabela 3.10-	Resposta em frequência da FSS da Figura 3.10(b) para diferentes períodos.	41
Tabela 3.11-	Resposta em frequência da FSS da Figura 3.10(c) para ângulos de incidência.	43
Tabela 3.12 -	Resposta em frequência da FSS da Figura 3.10(d) para ângulos de incidência.	44
Tabela 3.13-	Resposta em frequência da FSS da Figura 3.15(a) para diferentes períodos.	47
Tabela 3.14-	Resposta em frequência da FSS da Figura 3.15(b) para diferentes períodos.	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1-	Configuração típica de uma FSS: (a) Parâmetros; (b) Ângulo de incidência com o vetor normal da estrutura;	18
Figura 2.2-	Superfícies seletivas de frequência: a) Patches circulares que atuam como filtro rejeita-faixa; b) Aberturas circulares em uma folha perfeitamente condutora que atuam como filtro passa-faixa;	20
Figura 2.3-	Grupos de geometrias de elementos de FSS: (a) Grupo 1, (b) Grupo 2, (c) Grupo 3 e (d) Grupo 4.	21
Figura 2.4-	Elementos reconfiguráveis de FSS.	22
Figura 2.5-	Esquema de medição de FSS em câmara anecóica com lentes.	24
Figura 2.6-	Aplicações de FSS: (a) Porta do forno micro-ondas; (b) Entre antenas transmissoras;	25
Figura 3.1-	(a) Geometria de elemento de FSS reconfigurável: (b) aproximação para o caso dos diodos no estado ON e (c) aproximação para o caso dos diodos no estado OFF.	26
Figura 3.2-	Coeficiente de transmissão para a FSS reconfigurável da Figura 3.1(a).	27
Figura 3.3-	Estudo da variação da periodicidade: (a) Diodos ON; (b) Diodos OFF.	28
Figura 3.4-	Coeficiente de transmissão para FSS da Figura 3.1(b) variando o ângulo de incidência.	30
Figura 3.5-	Coeficiente de transmissão para FSS da Fig. 3.1(c) variando o ângulo de incidência.	31
Figura 3.6-	(a) Geometria de elemento de FSS reconfigurável: (b) aproximação para o caso dos diodos no estado ON e (c) aproximação para o caso dos diodos no estado OFF.	33
Figura 3.7-	Coeficiente de transmissão para a FSS reconfigurável da Figura 3.6(a).	33
Figura 3.8-	Estudo da variação da periodicidade: (a) FSS da Figura 3.6(b) e (b) FSS da Figura 3.6(c).	34
Figura 3.9-	Coeficiente de transmissão para FSS da Fig. 3.6(b) variando o ângulo de incidência.	37
Figura 3.10-	Elementos de FSS fractal de Cross: (a) $k=0$, dimensões; (b) $k=1$, dimensões; (c) $k=0$, FSS construída; e (d) $k=1$, FSS construída;	39

Figura 3.11-	Coeficientes de transmissão para a FSS em geometria do fractal de Cross (k=0).	40
Figura 3.12-	Coeficientes de transmissão para a FSS em geometria do fractal de Cross (k=1).	41
Figura 3.13-	Coeficiente de transmissão para FSS da Figura 3.10(c) variando o ângulo de incidência, comparando valores medidos com os simulados: (a) 0°; (b) 20°; (c) 40°; e (d) 60°;	42
Figura 3.14-	Coeficiente de transmissão para FSS da Figura 3.10(d) variando o ângulo de incidência, comparando valores medidos com os simulados: (a) 0°; (b) 20°; (c) 40°; e (d) 60°;	44
Figura 3.15-	Elementos de FSS tipo abertura: (a) Dipolo cruzado e (b) Espira quadrada.	45
Figura 3.16-	Coeficientes de transmissão para a FSS da Figura 3.15(a).	46
Figura 3.17-	Coeficientes de transmissão para a FSS da Figura 3.15(b).	47

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. SUPERFÍCIES SELETIVAS DE FREQUÊNCIA.....	18
2.1 INTRODUÇÃO.....	18
2.2 ESTRUTURA E CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS	19
2.2.1 ELEMENTOS DE FSS.....	20
2.2.2 FSS ATIVAS E PASSIVAS	21
2.3 TÉCNICAS DE ANÁLISE	22
2.4 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO.....	23
2.5 APLICAÇÕES.....	24
3. RESULTADOS NUMÉRICOS	26
3.1 INTRODUÇÃO.....	26
3.2 FSS RECONFIGURÁVEIS	26
3.2.1 ESPIRA CIRCULAR.....	26
3.1.2 ESPIRA CIRCULAR COM DIPOLO CRUZADO	32
3.2 FSS COM GEOMETRIA FRACTAL.....	38
3.3 FSS COM ELEMENTOS DO TIPO ABERTURA	45
4. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	49
REFERÊNCIAS	51

1. INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, o setor de telecomunicações tem atraído a atenção de várias indústrias de desenvolvimento tecnológico e pesquisadores, graças processo de avanço tecnológico que a sociedade vem passando não apenas nesse setor, mas em todos os setores tecnológicos. A demanda, proveniente dos consumidores, por equipamentos que sejam eficazes de fácil uso e que apresentem uma resposta rápida, são elementos que estimulam a pesquisa por novos dispositivos que atendam a essas exigências.

A fim de atender as necessidades existentes atualmente nos serviços oferecidos pelas telecomunicações, faz-se necessário o desenvolvimento de novos dispositivos para integrar os novos sistemas de comunicações. Um componente que tem sido alvo de pesquisas e otimizações é a superfície seletiva de frequência (*Frequency Selective Surface* - FSS), devido suas aplicações para a engenharia de telecomunicações serem muitas e bem atrativas, pois as FSS possuem baixo custo, peso reduzido e habilidade de integração com outros circuitos de micro-ondas, podendo ser aplicadas em sistemas de antenas refletoras, absorvedores, radomes, mísseis, aeronaves, satélites, entre outros (VARDAXOGLU, 1997).

Superfícies seletivas de frequência são filtros espaciais de ondas eletromagnéticas e, tradicionalmente, são compostas por arranjos periódicos de elementos que podem ser do tipo *patches* condutores ou aberturas, impressos em substratos dielétricos. Essas estruturas têm como objetivo separar as componentes de frequências indesejadas, das frequências que interessem, dos sinais que passarem por ela. São inúmeras as possibilidades de variar os elementos do tipo *patches* ou aberturas e se obter a resposta em frequência desejada.

Uma grande atenção tem sido dada ao estudo de FSS reconfiguráveis, pois, são capazes de mudar de forma autônoma sua resposta em frequência e isso faz com que essas estruturas possam ser empregadas em mais de um sistema de comunicações sem fio (SILVA NETO, 2010). Essa reconfiguração se apresenta como alternativa para cada vez mais aumentar a versatilidade das FSS.

Outro ponto que tem chamado bastante atenção dos pesquisadores no estudo de FSS é a utilização de geometrias fractais em seus elementos. Esse fato ocorre pelo comportamento multibanda e a dupla polarização apresentados em alguns estudos de fractais. A geometria fractal apresenta em alguns casos uma redução na largura de banda com o aumento da interação do fractal, tornando a estrutura mais seletiva, além dessas geometrias na maiorias das vezes se mostrarem estáveis com relação ao ângulo de incidência da onda eletromagnética (NÓBREGA, 2013) (SILVA NETO, 2014).

As estruturas de FSS estão cada vez mais presentes como componentes de hardware nos sistemas modernos de comunicações. Nesse sentido, é de extrema importância estudar essa categoria de circuito, de modo a possibilitar uma concepção de tais dispositivos com um alto grau de confiabilidade e eficiência.

É importante ressaltar que existe uma grande demanda científica no estudo dos fenômenos eletromagnéticos presentes nos circuitos empregados como hardware em sistemas de comunicações sem fio, por exemplo, as FSS. Desta forma, a análise de suas características espectrais é de extrema importância para a construção de novos dispositivos.

O objetivo principal deste trabalho é apresentar uma caracterização numérica para diferentes estruturas de FSS, com o auxílio do software comercial Ansoft HFSS, onde serão analisadas estruturas com geometrias euclidianas reconfiguráveis e geometria fractal, para as estruturas do tipo *patch* condutor. E geometrias euclidianas para as FSS do tipo abertura.

Pontos importantes que serão abordados nesse trabalho são, estudo sobre superfícies seletivas de frequência do tipo *patch* e abertura, estudo sobre a influência da variação da periodicidade em todas as estruturas, estudo de estabilidade angular em relação a onda plana incidente, de FSS e obtenção de resultados para os parâmetros S_{11} , S_{21} e largura de banda das FSS. A apresentação deste trabalho está organizada em 4 capítulos que são descritos a seguir.

O capítulo 2 apresenta a revisão de literatura a respeito das FSS. Serão apresentadas as informações sobre FSS, destacando suas características mais relevantes e aplicações.

O capítulo 3 apresenta os resultados numéricos obtidos neste trabalho, que dizem respeito à variação da periodicidade nas estruturas do tipo *patch* e abertura, e o estudo da estabilidade angular para as estruturas do tipo *patch*.

O capítulo 4 apresenta as conclusões destacando as contribuições mais relevantes deste trabalho.

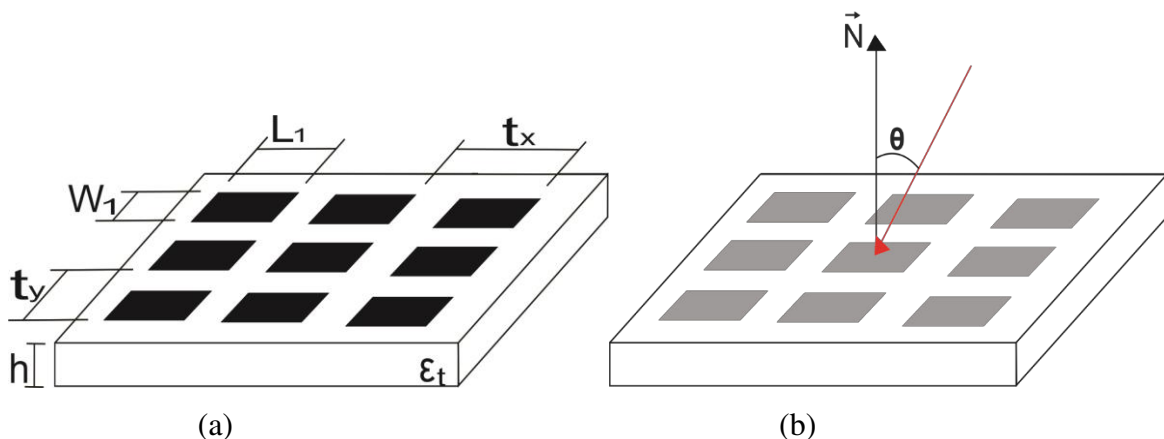
2. SUPERFÍCIES SELETIVAS DE FREQUÊNCIA

2.1 INTRODUÇÃO

Superfícies seletivas de frequência (*Frequency Selective Surfaces - FSS*) são filtros espaciais de ondas eletromagnéticas (OEM), normalmente bidimensionais e, tradicionalmente, são constituídos por arranjos periódicos de elementos que podem ser do tipo patch condutor ou abertura, comportando-se como filtro rejeita-faixa ou passa-faixa, respectivamente. As FSS são utilizadas para refletir ou transmitir as componentes de frequências desejadas em uma OEM, refletindo ou transmitindo totalmente na vizinhança dos elementos ressonantes (CAMPOS, 2009). Dependendo da resposta desejada, diferentes tipos de geometrias nos arranjos de FSS podem ser utilizados.

Os elementos de uma superfície seletiva de frequência são impressos em um substrato dielétrico, esses substratos podem conter uma ou múltiplas camadas, em função da resposta desejada. De acordo com a aplicabilidade, a resposta em frequência de uma FSS é controlada por parâmetros como, tipo do substrato dielétrico, geometria do elemento, dimensões físicas e periodicidade (SILVA NETO, 2013). Na Figura 2.1(a) é mostrada uma configuração básica de FSS. Onde os parâmetros t_x e t_y , são os períodos da estrutura, W_1 e L_1 representam as dimensões dos elementos geométricos, h é a altura do substrato e ϵ_r a constante dielétrica do substrato. Nas simulações onde são variados os períodos das estruturas, são considerados os parâmetros t_x e t_y iguais a T . À Figura 2.1(b) mostra o ângulo de incidência (θ) da onda eletromagnética com relação ao vetor normal da estrutura.

Figura 2.1 - Configuração típica de uma FSS: (a) Parâmetros; (b) Ângulo de incidência com o vetor normal da estrutura;



Fonte: Autor.

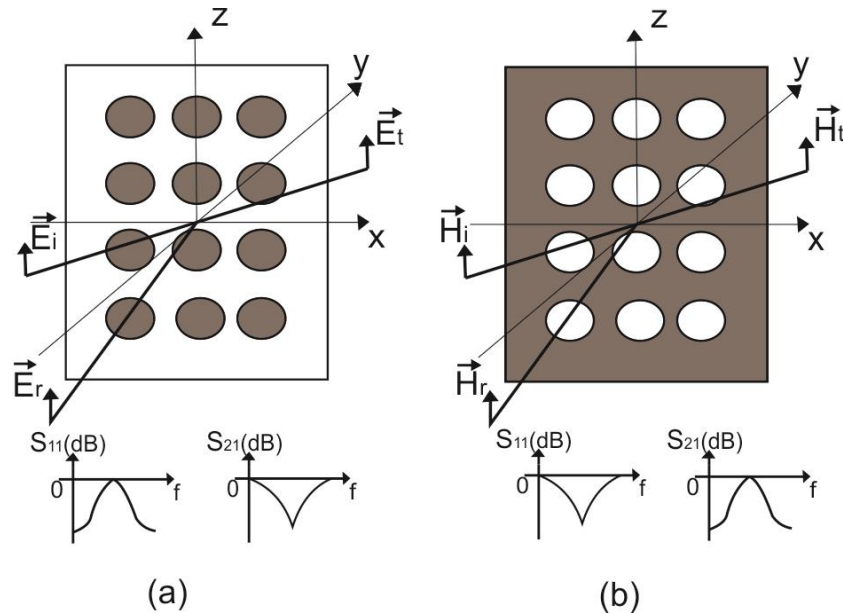
As FSS têm chamado bastante atenção dos pesquisadores por disporem de muitas aplicações, desde os setores comerciais ao científico. As aplicações são diversas, tais como sub-refletor em sistemas de antenas de refletor duplo, filtro passa-faixa existente na porta do forno de micro-ondas (MUNK, 2000).

2.2 ESTRUTURA E CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

Cada elemento de FSS ressoa e dispensa energia em torno de sua frequência de ressonância, quando existe uma onda eletromagnética incidente. Quando se utiliza elementos do tipo abertura a FSS se comporta como um filtro passa-faixa, fazendo assim, com que a onda na frequência de ressonância do dispositivo seja transmitida, caso os elementos utilizados sejam do tipo patch a FSS se comporta como um filtro rejeita-faixa, dessa forma o sinal na frequência de operação da estrutura é refletido (WU, 1995).

Quando uma onda eletromagnética entra em ressonância com os elementos de uma FSS, a onda é parcialmente refletida em sua direção especular e parcialmente transmitida para frente, como mostra a Figura 2.2. Quando os elementos são do tipo patch, representados por círculos, $\vec{E}$ é polarizado verticalmente e a frequência de ressonância é refletida com mínima perda de retorno e as demais frequências são transmitidas, já na estrutura do tipo abertura $\vec{E}$ é polarizado horizontalmente e a frequência de operação é transmitida com o mínimo de perda de inserção e as demais frequências são refletidas (NÓBREGA, 2013).

Figura 2.2 – Superfícies seletivas de frequência: a) Patches circulares que atuam como filtro rejeita-faixa; b) Aberturas circulares em uma folha perfeitamente condutora que atuam como filtro passa-faixa;



Fonte: Autor.

A importância do material dielétrico em uma FSS vai além do suporte estrutural para os elementos. O substrato também é importante para a estabilidade de frequência de ressonância para diferentes ângulos de incidência e polarização do campo incidente (WU, 1995). Adicionar dispositivos ativos nas células unitárias de uma FSS, pode trazer mais funcionalidades e configurabilidade as estruturas.

2.2.1 ELEMENTOS DE FSS

A geometria dos elementos da FSS influencia diretamente na distribuição dos campos elétricos e magnéticos, logo, na distribuição de corrente também. As geometrias utilizadas vão desde polígonos regulares, como círculos, retângulos, até configurações derivadas, como dipolos cruzados, espiras quadradas e combinações dos mesmos, e ainda existem as geometrias fractais que são bastante utilizadas também.

O pesquisador americano Bem A. Munk, 2000 divide os elementos em quatro grupos:

- Grupo 1: elementos que possuem os centros conectados ou N polos;
- Grupo 2: as espiras;
- Grupo 3: elementos com interior sólido;

- Grupo 4: combinações de elementos típicos;

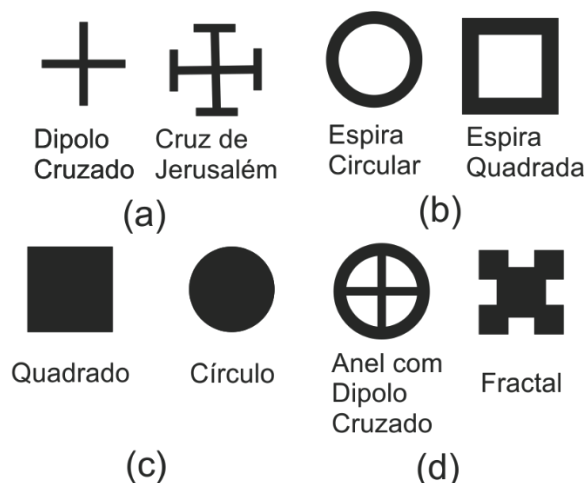
As formas mais comuns do grupo 1, são: tripolo, dipolo cruzado, dipolo fino e a cruz de Jerusalém. Algumas dessas formas podem ser vistas na Fig. 2.3(a).

O grupo 2 pode ser visto na Fig. 2.3(b), os tipos mais comuns são: anéis concêntricos, espira quadrada, espira quadrada dupla.

O grupo 3 são os elementos sólidos, suas formas mais usadas são: patches retangulares e patches circulares. A Fig. 2.3(c) mostra esses patches.

O grupo 4 é o maior, pois suas combinações são infinitas, exemplos comuns são: espira cruzada e patch circular cruzado. Esses elementos são mostrados na Figura 2.3(d).

Figura 2.3 – Grupos de geometrias de elementos de FSS: (a) Grupo 1, (b) Grupo 2, (c) Grupo 3 e (d) Grupo 4.



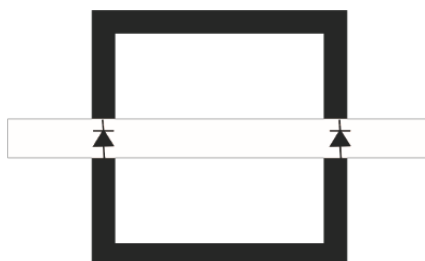
Fonte: Autor.

2.2.2 FSS ATIVAS E PASSIVAS

Uma FSS passiva é aquela que é projetada apenas para uma frequência particular, ou seja, seus elementos são impressos em substrato dielétrico de forma que não podem ser alterados depois da fabricação. A vantagem desse tipo de FSS é a fácil fabricação e a desvantagem é que não permite reconfiguração. Por outro lado, uma FSS ativa tem a mesma estrutura de uma superfície passiva, porém, nos elementos geométricos existem a inserção de alguns dispositivos ativos como capacitores variáveis, diodos ou varactores. Esses dispositivos deixam a FSS menor e com capacidade de reconfiguração, a única desvantagem é o processo de fabricação que é bem mais complexo que o da FSS passiva. Essas superfícies ativas podem ser acionadas por uma corrente de polarização ou tensão DC para os elementos metálicos. Esta

tecnologia tem sido bastante estudada recentemente (DUARTE, 2014). A Figura 2.4 mostra uma célula unitária que foi adicionada diodos PIN para torná-la reconfigurável.

Figura 2.4 – Elementos reconfiguráveis de FSS.



Fonte: Autor.

2.3 TÉCNICAS DE ANÁLISE

Com a popularização dos estudos sobre FSS surgiram diversas técnicas numéricas de análise. Essas técnicas são divididas em dois grupos: métodos aproximados e formulação de onda completa. Os métodos aproximados, para determinar as características de reflexão e de transmissão para FSS usam algumas fórmulas aproximadas e simples. Essas fórmulas diminuem o tempo computacional e produzem bons resultados para determinadas estruturas. Porém, para determinadas aplicações, podem produzir resultados imprecisos, por algumas limitações dessas fórmulas (CAMPOS, 2009). Alguns métodos de onda completa, serão apresentados a seguir.

A Técnica de Casamento Modal foi um dos primeiros métodos utilizados na análise de superfícies seletivas de frequência e também é conhecida como Método da Equação Integral, esse método permite uma análise capaz de fornecer detalhes das repostas da frequência e da polarização, junto com o entendimento físico da sua operação.

Um método que veio associado à Técnica de Casamento Modal, foi o Modelo do Circuito Equivalente, que é um método simples e que produz resultados satisfatórios, esse modelo também é conhecido como, Modelo de Linha de Transmissão, que consiste em modelar o elemento da FSS para um circuito equivalente de uma linha de transmissão formado por elementos localizados do tipo indutivo e capacitivo. A solução do circuito fornece as características de transmissão e reflexão da FSS. Esta técnica usa uma aproximação quase estática para calcular as componentes do circuito e permite uma análise computacional bastante rápida, além de caracterizar a FSS sendo eficiente porém limitado com relação à precisão (NÓBREGA, 2013).

Existem outros métodos que são chamados modelos de onda completa, esses métodos exigem maior esforço computacional e analítico, por possuírem rigorosas formulações matemáticas, eles ainda proporcionam resultados mais precisos, principalmente em frequências mais elevadas (SILVA NETO, 2013). Os métodos mais comuns, são:

- Método dos Momentos (MoM – *Method of Moments*);
- Método dos Elementos Finitos (FEM – *Finite-Element Method*);
- Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD – *Finite-Difference time domain*);
- Método das Ondas (WCIP – *Wave Concept Interactive Procedure*);

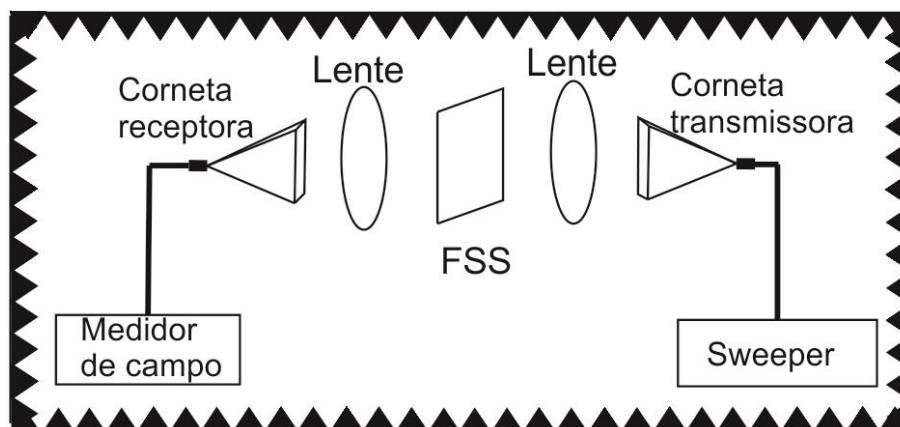
Existem também softwares comerciais que são bastante utilizados na análise de FSS, pois, oferecem plataformas simulações com um alto grau de confiança ao implementar os métodos de análise anteriormente citados. Dentre os *softwares* mais utilizados podem ser citados o Ansoft DesignerTM, Ansoft HFSSTM, CTS, entre outros. Os programas comerciais Ansoft DesignerTM e Ansoft HFSSTM, por exemplo, utilizam como método de análise de FSS o Método dos Momentos e o Método dos Elementos Finitos, respectivamente.

2.4 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO

Existem vários métodos que são utilizados para medição das propriedades de reflexão e transmissão das superfícies seletivas de frequência. O sistema de medição dispõe de cornetas direcionais acopladas a antenas transmissoras e receptoras. Ao mudar a polarização das antenas de horizontal para vertical, é possível medir as características de transmissão nos modos TM(transversal magnética) e TE(transversal elétrica), respectivamente, da FSS localizada entre as duas antenas. Outros recursos podem ser adicionados aos métodos de medição, como, lentes, câmara anecóica, entre outros, esses recursos deixam o resultado mais preciso (VARDAXOGLU, 1997).

A caracterização experimental de uma FSS pode ser realizada de maneira relativamente simples, por exemplo, utilizando antenas cornetas associadas a lentes em uma câmara anecóica. Neste caso, podem ser feitos testes em ambas as polarizações das micro-ondas, a difração nas bordas da FSS são reduzidas e podem ser feitos testes com vários ângulos de incidência de maneira simples, desde que a superfície seletiva de frequência seja iluminada pelo feixe Gaussiano estrito das lentes. Esse *setup* pode ser visto na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Esquema de medição de FSS em câmara anecóica com lentes.



Fonte: Autor.

2.5 APLICAÇÕES

As aplicações das superfícies seletivas de frequência dentro da engenharia são muitas e bem atrativas, pois as FSS possuem baixo custo, peso reduzido e habilidade de integração com outros circuitos de micro-ondas, podendo ser aplicadas em sistemas de antenas refletoras, absorvedores, radomes, mísseis, aeronaves, satélites, entre outros (WU, 1995).

A aplicação mais conhecida de uma FSS é a do anteparo da porta do micro-ondas, onde a superfície se comporta como um filtro passa-faixa, por ser um arranjo periódico de elementos do tipo abertura, ela permite que a frequência de luz visível passe enquanto rejeita a frequência de aproximadamente 2,45 GHz. Como mostra a Figura 2.6(a).

FSS podem ser utilizadas no projeto de radomes. A superfície seletiva de frequência pode ser projetada para fornecer características passa-faixa na frequência de ressonância da antena, utilizando elementos do tipo abertura. Então, o sinal passará pela antena com pouca perda por inserção. No caso de frequências não desejadas, a FSS pode apresentar características de reflexão. O radome é usado em superfícies de automóveis ou aeronaves, esse dispositivo garante um espalhamento mínimo do sinal (MUNK, 2000).

Atualmente, os estudos de superfícies seletivas de frequência para aplicações indoor (*wireless building*) têm ganhado bastante atenção dos pesquisadores. Estas aplicações são importantes para a obtenção de redes sem fio mais seguras e com um mínimo de interferência, e em outros casos também são projetadas com o intuito de proteger as pessoas da exposição à radiação eletromagnética. A Figura 2.6(b), ilustra uma aplicação muito utilizada, que é as FSS entre antenas transmissoras, evitando que o sinal de uma interfira nas outras.

Figura 2.6 – Aplicações de FSS: (a) Porta do forno micro-ondas; (b) Entre antenas transmissoras;



Fonte: www.image.slidesharecdn.com/caracterizacaodefsscomgeometriaemformadeestreladequatrobracos

3. RESULTADOS NUMÉRICOS

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados numéricos de FSS compostas por arranjos periódicos de elementos do tipo *patch* e abertura. Estes resultados apresentam um estudo sobre a periodicidade para cada estrutura e também se investiga a variação do ângulo da radiação incidente na superfície, os elementos estudados são compostos por geometrias euclidianas e uma geometria fractal. Os resultados foram obtidos através de simulações utilizando o *software* comercial Ansoft HFSS™.

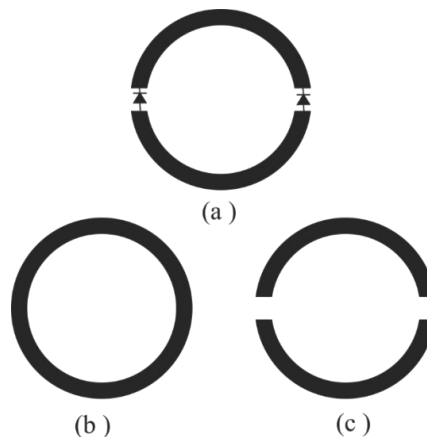
3.2 FSS RECONFIGURÁVEIS

3.2.1 ESPIRA CIRCULAR

Nesta seção serão investigadas, as características das superfícies seletivas de frequência constituídas de anéis metálicos reconfiguráveis, impressas sobre um substrato dielétrico, usando diodos PIN.

A Figura 3.1(a) apresenta a célula unitária da FSS, considerada neste trabalho. Para o estado ON do diodo, a tensão de polarização permite polarizar diretamente a junção PN, e o diodo se comporta como um curto-circuito, como mostrado na Figura 3.1(b). Quando a junção PN estiver polarizada reversamente, o diodo estará no estado OFF, sendo assim uma abertura, como mostrado na Figura 3.1(c).

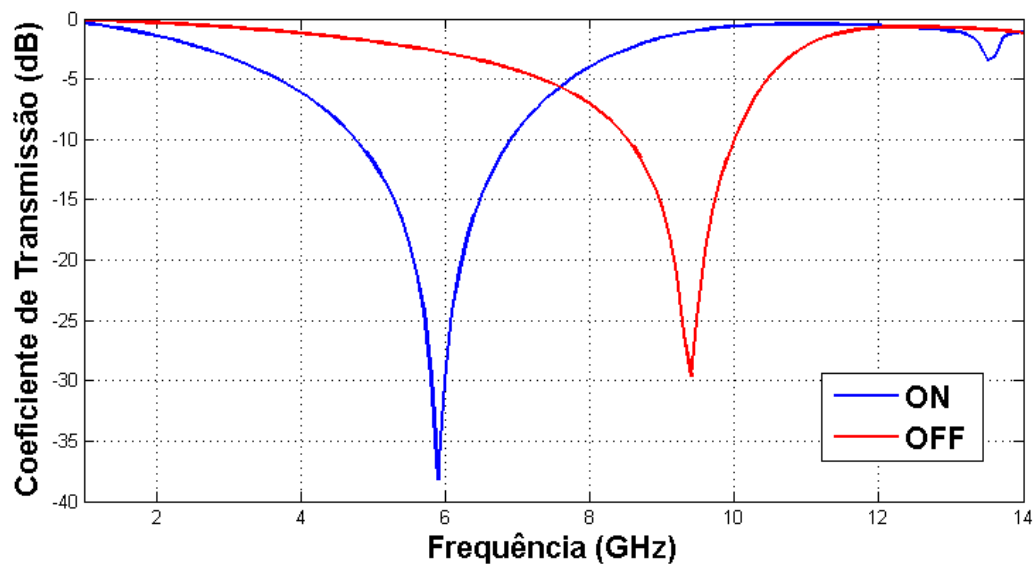
Figura 3.1 (a) Geometria de elemento de FSS reconfigurável: (b) aproximação para o caso dos diodos no estado ON e (c) aproximação para o caso dos diodos no estado OFF.



Fonte: Autor.

As FSS são constituídas por anéis de 14,25 mm de diâmetro, apresentando uma largura de 1,35 mm. Para o caso em que a FSS apresenta-se no estado OFF do diodo, o gap que surge apresenta um comprimento de 0,5 mm. As FSS foram impressas sobre um substrato de $\epsilon_r = 4,4$ e $h = 1,57$ mm. A Figura 3.2 apresenta os resultados da FSS ON e OFF, considerando uma periodicidade de 16,25 mm.

Figura 3.2 – Coeficiente de transmissão para a FSS reconfigurável da Figura 3.1(a)

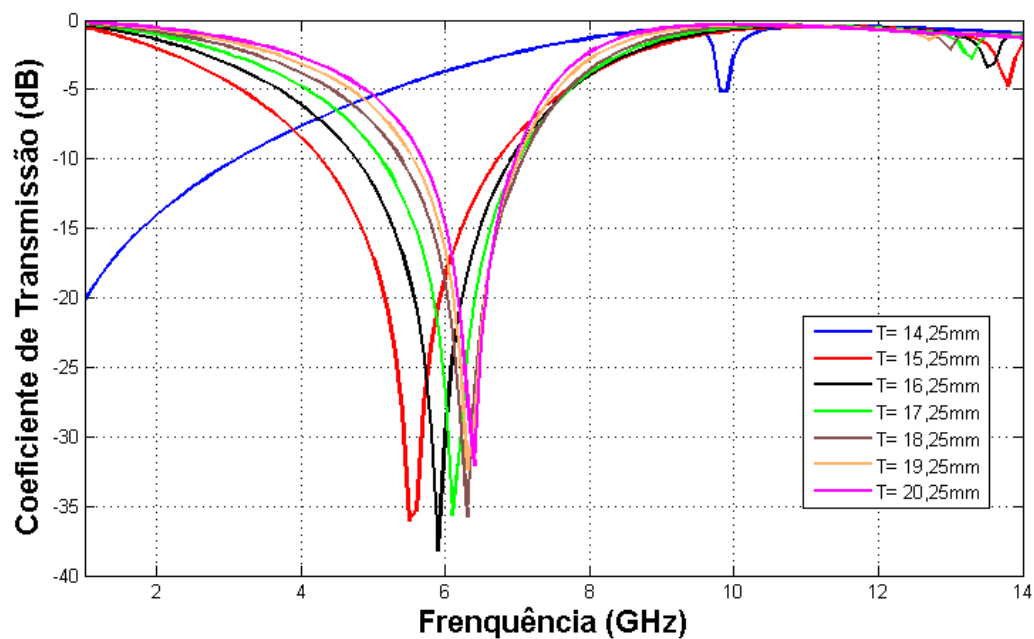


Fonte: Autor.

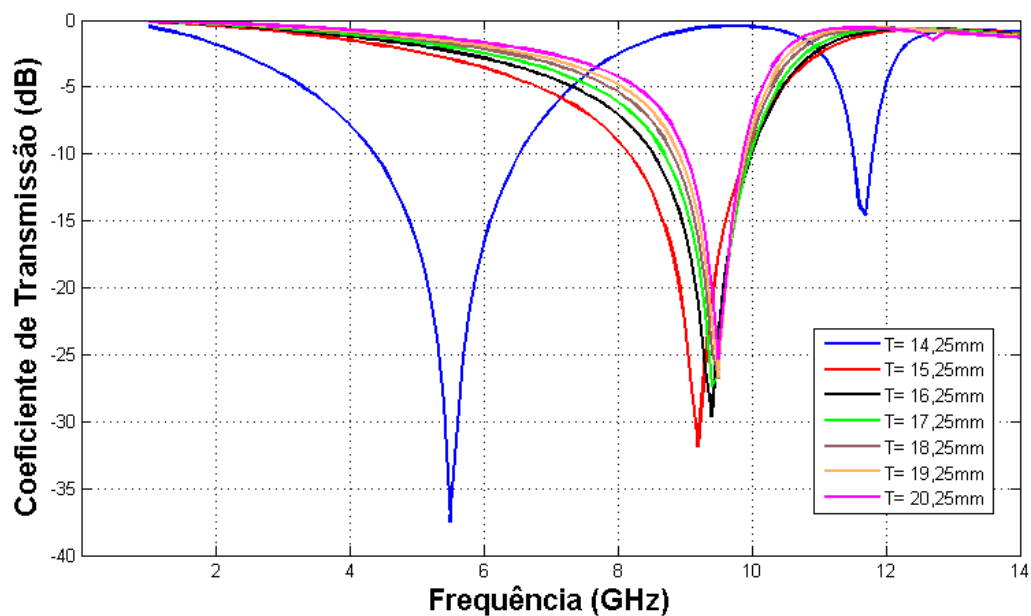
Considerando-se incidência de onda plana com polarização vertical, a FSS para o caso dos diodos conduzindo (modo ON), a estrutura apresentou uma frequência de ressonância de 5,9 GHz, com um valor de coeficiente de transmissão igual a -38,23 dB e uma largura de banda (BW) igual a 2,2 GHz para uma referência de -10 dB. Para o caso dos diodos cortados (modo OFF), a FSS apresenta comportamentos distintos dependendo do tipo de polarização da onda plana incidente. No caso considerando-se polarização vertical a FSS com os diodos cortados apresentou uma largura de banda de 1,5 GHz (para uma referência de -10 dB), centrada na frequência de 9,4 GHz e um coeficiente de transmissão de -29,60 dB.

A Figura 3.3(a) apresenta os resultados obtidos para o coeficiente de transmissão em dB, em função da frequência, para o estudo da variação da periodicidade para o caso dos diodos ON, onde o período T varia de 14,25 mm até 20,25 mm.

Figura 3.3 – Estudo da variação da periodicidade: (a) Diodos ON; (b) Diodos OFF.



(a)



(b)

Fonte: Autor.

De acordo com os dados apresentados em Figura 3.3(a), pode-se notar que com o aumento do período, tem-se o aumento na frequência de ressonância, em contra partida uma diminuição na largura de banda. É possível notar que, para o caso em que o período é do mesmo

tamanho que o elemento geométrico, a FSS não apresenta funcionamento satisfatório. A Tabela 3.1 resume os resultados apresentados.

Tabela 3.1 – Resposta em frequência da FSS da Figura 3.1(b) para diferentes períodos.

Período (mm)	Frequência de Ressonância (GHz)	BW (GHz)	S₂₁ (dB)
14,25	9,9	--	- 5,134
15,25	5,5	2,4	-36,02
16,25	5,9	2,2	-38,23
17,25	6,1	1,9	-35,64
18,25	6,3	1,6	-35,74
19,25	6,3	1,4	-32,41
20,25	6,4	1,2	-32,06

Fonte: Autor.

Analisando-se os resultados apresentados em Figura 3.3(b) nota-se que, com o aumento da periodicidade há um aumento na frequência de ressonância, mas a variação não é tão significativa quanto a do caso com os diodos ON, é perceptível também a diminuição da largura de banda e para o caso em que o período tem o mesmo tamanho do elemento da FSS, a resposta muda significativamente. A Tabela 3.2 resume os resultados para o coeficiente de transmissão em dB, em função da frequência, para o caso em que o diodo está OFF e o estudo da variação da periodicidade.

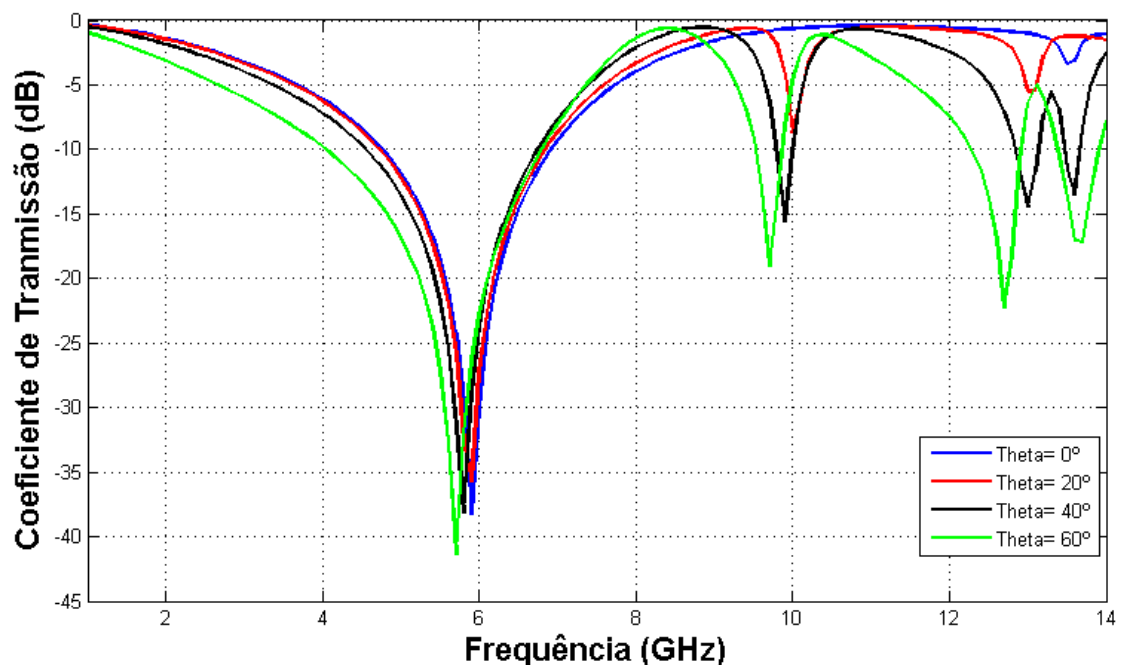
Tabela 3.2 – Resposta em frequência da FSS da Figura 3.1(c) para diferentes períodos.

Período (mm)	Frequência de Ressonância (GHz)	BW (GHz)	S₂₁ (dB)
14,25	5,5 – 11,7	2,1	-37,53 – -14,57
15,25	9,2	1,7	-31,84
16,25	9,4	1,5	-29,60
17,25	9,4	1,3	-27,37
18,25	9,5	1,1	-26,71
19,25	9,5	1,0	-26,66
20,25	9,5	0,9	-25,37

Fonte: Autor

Resultados para o estudo da estabilidade angular em relação ao ângulo de incidência da onda plana obtidos para essa geometria, para o caso do diodo ON, foi escolhido o período de 16,25 mm, por apresentar a ressonância mais próxima de 6 GHz com a maior largura de banda. A estabilidade angular é estudada através da variação do ângulo de incidência das ondas eletromagnéticas. A Figura 3.4 mostra estes resultados para o ângulo variando entre 0°, 20°, 40° e 60°.

Figura 3.4 – Coeficiente de transmissão para FSS da Fig. 3.1(b) variando o ângulo de incidência.



Fonte: Autor.

De acordo com as curvas, pode-se notar que a FSS apresenta-se um alto grau de estabilidade para a primeira banda de frequência (banda de interesse) na faixa analisada. Nas outras faixas de frequência a FSS não apresentou estabilidade em relação ao ângulo de incidência. A Tabela 3.3, apresenta os resultados para a análise de estabilidade angular para a primeira frequência de operação da FSS.

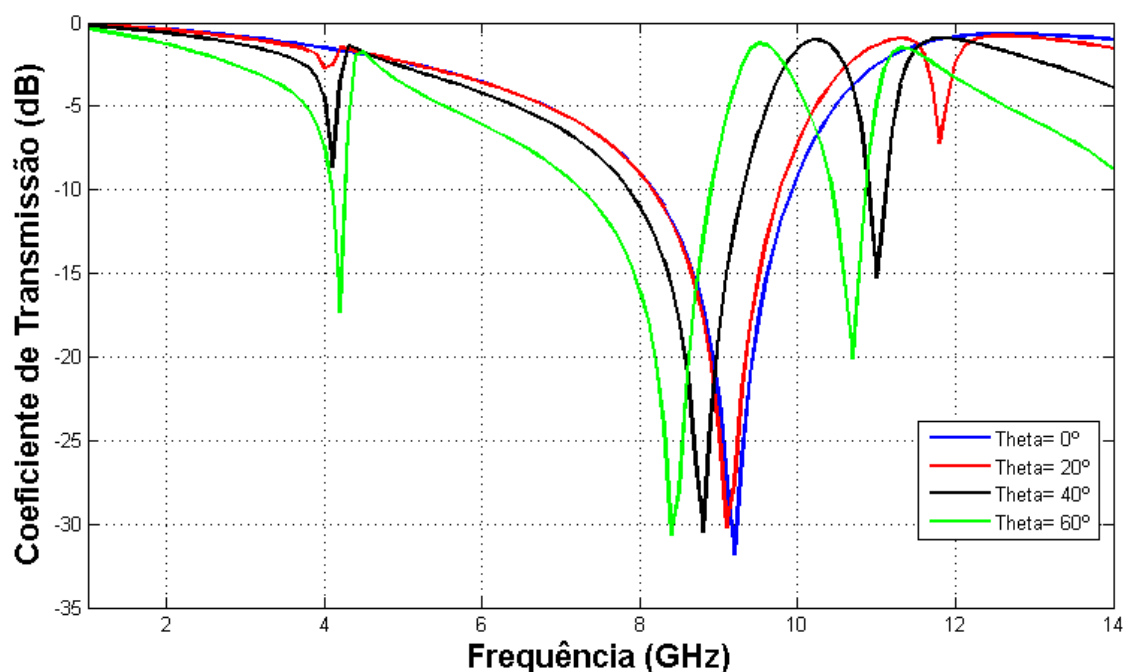
Tabela 3.3 – Resposta em frequência da FSS da Figura 3.1(b) para ângulos de incidência.

Ângulo	Frequência de Ressonância (GHz)	BW (GHz)	S ₂₁ (dB)
0°	5,9	2,2	-38,23
20°	5,9	2,0	-35,78
40°	5,8	2,1	-38,16
60°	5,7	2,6	-41,4

Fonte: Autor.

Para o caso do anel com os diodos OFF, o período escolhido para ser estudado a estabilidade angular, foi o de $T = 15,25$ mm, por apresentar frequência de ressonância mais próxima de 9,0 GHz (Banda X) e maior largura de banda. A Figura 3.5 mostra os resultados pra a variação do ângulo de incidência.

Figura 3.5 – Coeficiente de transmissão para FSS da Figura 3.1(c) variando o ângulo de incidência.



Fonte: Autor.

Os resultados apresentam uma sensibilidade da FSS em relação ao ângulo de incidência da onda plana, o que permite concluir que a FSS é instável em relação ao ângulo de incidência.

A Tabela 3.4 apresenta os resultados para a resposta em frequência da FSS considerando a faixa de transmissão na banda X.

Tabela 3.4 – Resposta em frequência da FSS da Figura 3.1(c) para ângulos de incidência.

Ângulo	Frequência de Ressonância (GHz)	BW (GHz)	S₂₁ (dB)
0°	9,2	1,7	-31,84
20°	9,1	1,6	-30,25
40°	8,8	1,4	-30,45
60°	8,4	1,6	-30,64

Fonte: Autor.

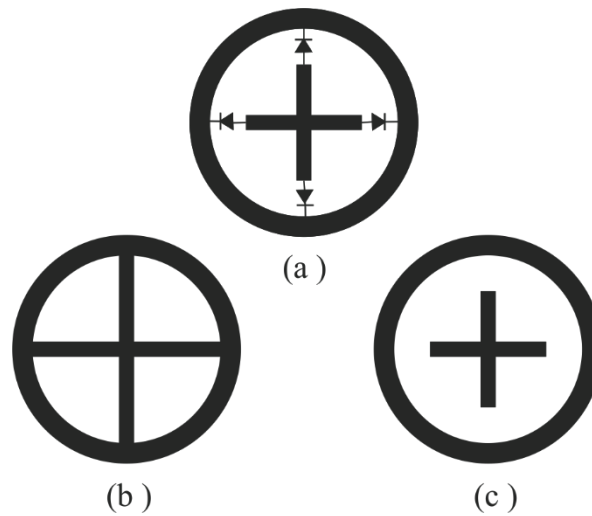
Como visto na Tabela 3.4, a FSS composta de espiras circulares com diodos no modo OFF, não é estável, com a variação do ângulo de incidência, pois, muda a sua frequência de ressonância e começa a rejeitar outras bandas de frequências, com o aumento do ângulo.

3.1.2 ESPIRA CIRCULAR COM DIPOLO CRUZADO

Neste tópico, serão apresentados os resultados numéricos dos estudos de periodicidade e estabilidade angular de uma superfície seletiva de frequência composta por espiras circulares com dipolo parasita reconfiguráveis, através de diodos PIN.

A Figura 3.6(a) mostra um elemento da FSS, estudada neste trabalho. Para o caso ON do diodo, o diodo se comporta como um curto-circuito unindo o dipolo ao anel, como mostrado na Figura 3.6(b). Quando o diodo estiver no estado OFF, sendo assim uma abertura, como mostrado na Figura 3.6(c).

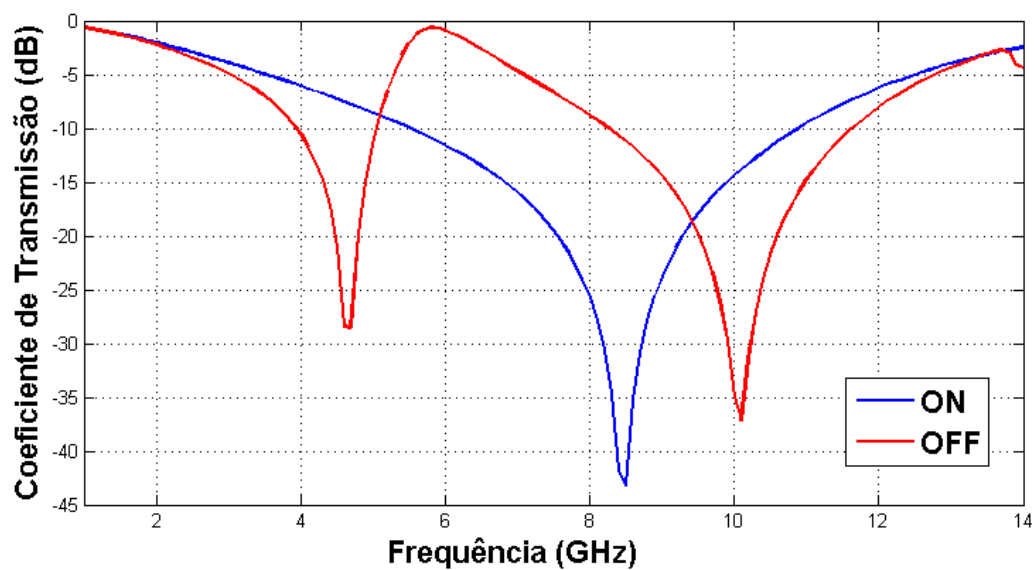
Figura 3.6 (a) Geometria de elemento de FSS reconfigurável: (b) aproximação para o caso dos diodos no estado ON e (c) aproximação para o caso dos diodos no estado OFF.



Fonte: Autor

As FSS são constituídas de anéis de 14,25 mm de diâmetro, apresentando uma largura de 1,35 mm e com dipolos cruzados de 10,55 mm de comprimento e 0,675 mm de largura. Para o caso em que o diodo está no estado OFF, o gap que surge apresenta um comprimento de 0,5 mm. As FSS foram impressas em um substrato de $\epsilon_r = 4,4$ e $h = 1,57$ mm. A Figura 3.7 apresenta os resultados da FSS ON e OFF, considerando uma periodicidade de 15,25 mm.

Figura 3.7– Coeficiente de transmissão para a FSS reconfigurável da Figura 3.6(a)

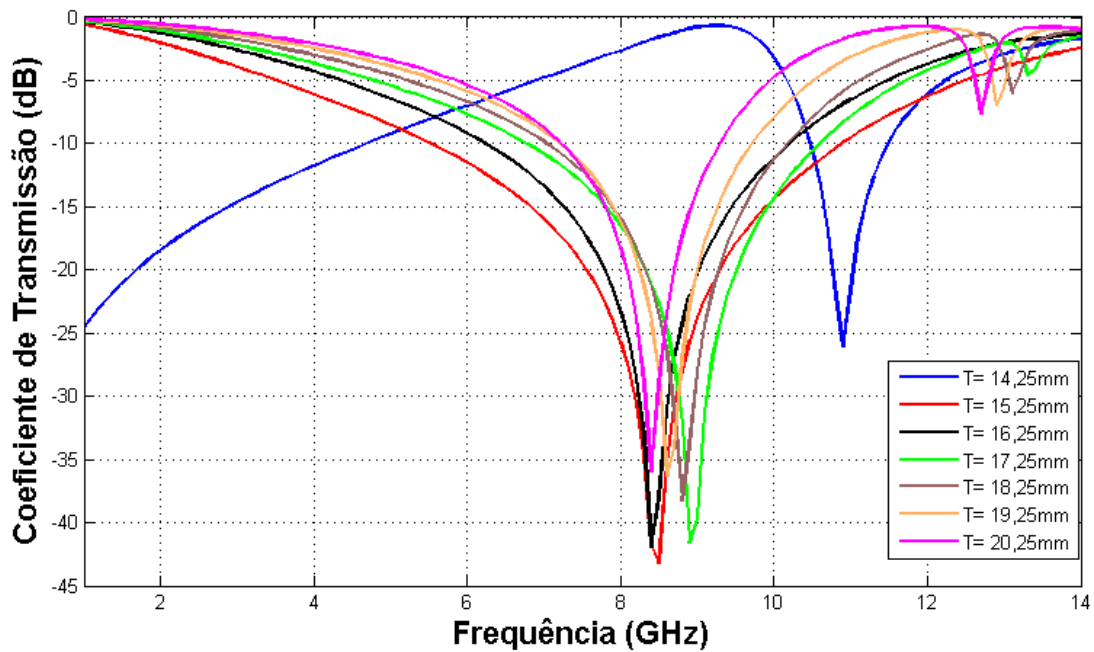


Fonte: Autor.

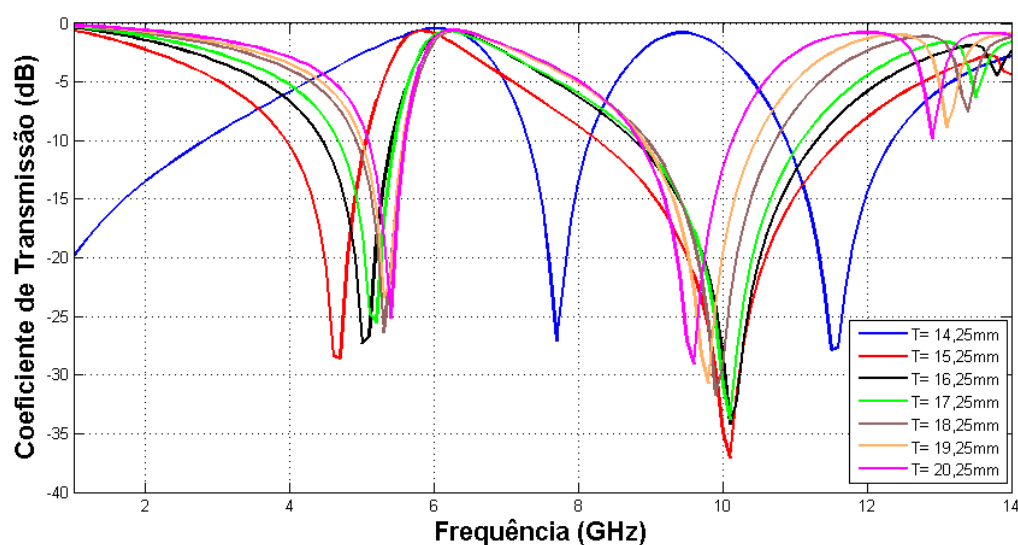
A Figura 3.7 apresenta a resposta em frequência para a FSS da Figura 3.6(a). No caso com todos os diodos conduzindo, considerando-se a incidência de onda plana com polarização vertical, a estrutura apresentou uma frequência de ressonância de 8,50 GHz, com coeficiente de transmissão igual a -43,19 dB e uma largura de banda igual a 5,40 GHz, o que permite afirmar que trata-se de uma FSS de banda larga. Para o caso em que todos os diodos estão polarizados na região de corte, a FSS apresentou um comportamento dual-band. Para a primeira banda de rejeição a frequência de ressonância foi de 4,70 GHz com atenuação de -28,55 dB, com a largura de banda de 1,10 GHz, aproximadamente. A segunda faixa de operação apresenta uma frequência de rejeição de 10,10 GHz com $S_{21} = -37,12$ dB, com largura de banda de 3,30 GHz.

A Figura 3.8 (a) descreve o estudo da periodicidade obtido a partir da FSS da Fig. 3.6(b), o caso em que os diodos estão no estado ON, o período T variou desde 14,25 mm até 20,25 mm. A Figura 3.8(b) descreve os resultados do coeficiente de transmissão para o caso em que o diodo encontra-se OFF.

Figura 3.8 - Estudo da variação da periodicidade: (a) FSS da Figura 3.6(b) e (b) FSS da Figura 3.6(c)



(a)



(b)

Fonte: Autor.

Os dados apresentados em Figura 3.8 (a) mostram que para o caso em que o período tem o mesmo comprimento que o elemento da FSS, a superfície seletiva de frequência não funciona até cerca de 9 GHz, entrando em ressonância logo após na frequência de 10,9 GHz, resultado que difere bastante para o caso dos outros períodos. Para os períodos a partir de 15,25 mm, a frequência de ressonância cresceu, voltando a baixar nos períodos iguais a 19,25 mm e 20,25 mm, enquanto que a largura de banda só diminuiu significativamente para todos os casos. A Tabela 3.5 apresenta um estudo parametrizado da periodicidade nestas situações.

Tabela 3.5 – Resposta em frequência da FSS da Figura 3.6(b) para diferentes períodos.

Período (mm)	Frequência de Ressonância (GHz)	BW (GHz)	S₂₁ (dB)
14,25	10,9	1	- 26,12
15,25	8,5	5,4	-43,19
16,25	8,4	3,9	-41,98
17,25	8,9	3,8	-41,55
18,25	8,8	3,2	-38,32
19,25	8,6	2,5	-36,35
20,25	8,4	2,1	-35,97

Fonte: Autor

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 3.6 e nas curvas da Figura 3.8 (c) percebe-se que mais uma vez, quando o período usado tem o mesmo comprimento que o da geometria, a FSS tem sua resposta bastante diferente que nos outros períodos estudados. Já nos períodos a partir de 15,25 mm, a primeira frequência de ressonância aumenta, enquanto a segunda diminui. As larguras das duas bandas diminuem significativamente com o aumento do período.

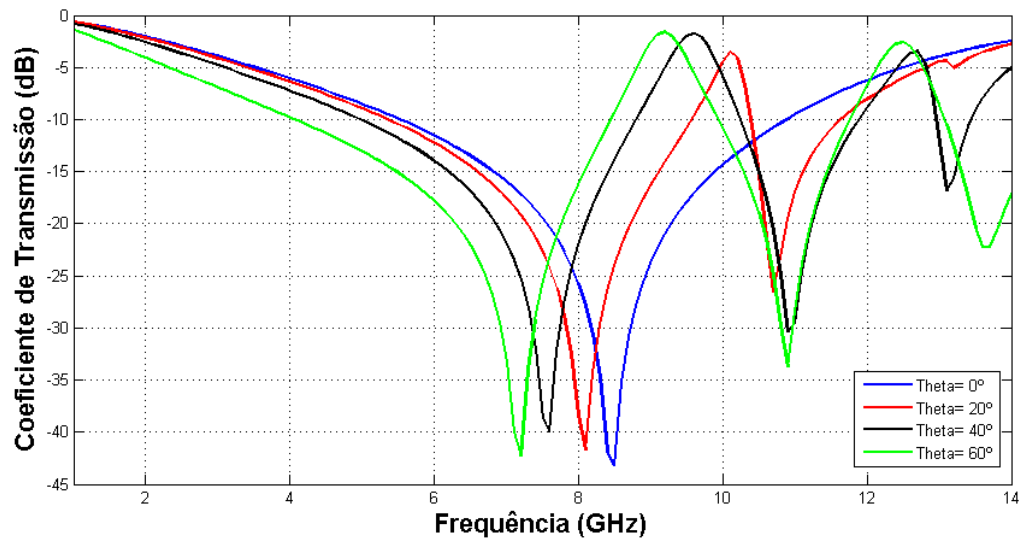
Tabela 3.6 – Resposta em frequência da FSS da Figura 3.6(c) para diferentes períodos.

Período (mm)	Frequência de Ressonância (GHz)	BW (GHz)	S₂₁ (dB)
14,25	7,7 – 11,5	0,8 – 1,5	- 27,08 – -27,85
15,25	4,7 – 10,1	1,1 – 3,3	-28,55 – -37,12
16,25	5,0 – 10,1	1,0 – 2,5	-27,33 – -34,22
17,25	5,2 – 10,1	0,7 – 2,2	-25,52 – -34,22
18,25	5,3 – 9,9	0,7 – 1,7	-26,38 – -31,71
19,25	5,3 – 9,8	0,6 – 1,6	-33,40 – -30,67
20,25	5,4 – 9,6	0,5 – 1,2	-25,10 – -29,01

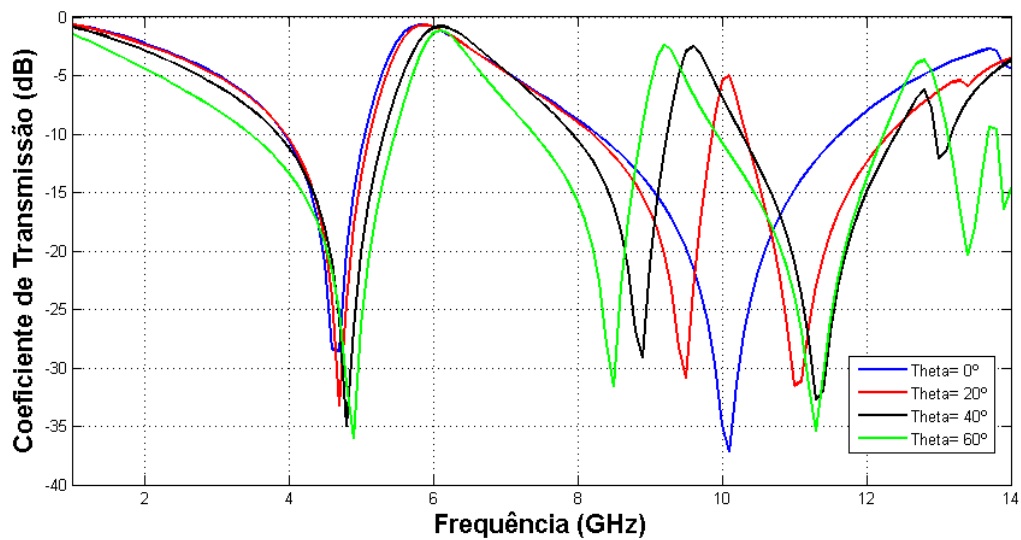
Fonte: Autor.

Outros resultados que foram obtidos para essa estrutura reconfigurável, foi o da variação do ângulo de incidência da onda eletromagnética, para os casos do diodo no estado ON e OFF. A Figura 3.9(a) apresenta os resultados para o caso do diodo ON, com os seguintes ângulos de incidência 0°, 20°, 40° e 60°. O período escolhido para esse estudo foi o de 15,25 mm, por apresentar maior largura de banda.

Figura 3.9 – Coeficiente de transmissão para FSS da Figura 3.6(b) variando o ângulo de incidência.



(a)



(b)

Fonte: Autor.

A Figura 3.9(a) mostra que a estrutura da Figura 3.6(b) é totalmente instável, pois, além de variar a frequência de ressonância, também acontece o surgimento de novas bandas de frequências. A Tabela 3.7 descreve esses resultados numericamente, conspirando todas as bandas de presentes na resposta da FSS.

Tabela 3.7 – Resposta em frequência da FSS da Figura 3.6(b) para ângulos de incidência.

Ângulo	Frequência de Ressonância (GHz)	BW (GHz)	S ₂₁ (dB)
0°	8,5	5,4	-43,19
20°	8,1 – 10,7	4,2 – 1,2	-41,68 – -26,51
40°	7,6 – 10,9 – 13,1	3,9 – 1,7 – 0,6	-40,02 – -30,41 – -16,81
60°	7,2 – 10,9 – 13,6	4,5 – 1,9 – 0,9	-42,33 – -33,71 – -22,24

Fonte: Autor.

A Figura 3.9(b) descreve os resultados para a variação do ângulo de incidência para o caso em que o diodo encontra-se OFF, o período escolhido foi o de 15,25 mm por apresentar uma maior largura de banda. Com o resumo dos resultados da Tabela 3.8, nota-se que para o caso do diodo OFF a FSS também é instável com relação ao ângulo de incidência, com o aumento do ângulo a superfície seletiva de frequência permite que outras bandas de frequências sejam rejeitadas.

Tabela 3.8 – Resposta em frequência da FSS da Figura 3.6(c) para ângulos de incidência.

Ângulo	Frequência (GHz)	BW (GHz)	S ₂₁ (dB)
0°	4,7 – 10,1	1,1 – 3,3	-28,55 – -37,12
20°	4,7 – 9,5 – 11,0	1,1 – 1,6 – 1,9	-33,27 – -30,85 – -31,54
40°	4,8 – 8,9 – 11,3 – 13,0	1,4 – 1,2 – 2,1 – 0,2	-35,03 – -29,16 – -32,72 – -12,09
60°	4,9 – 8,5 – 11,3 – 13,4	2,0 – 1,5 – 2,2 – 1,0	-36,01 – -31,63 – -35,44 – -20,32

Fonte: Autor.

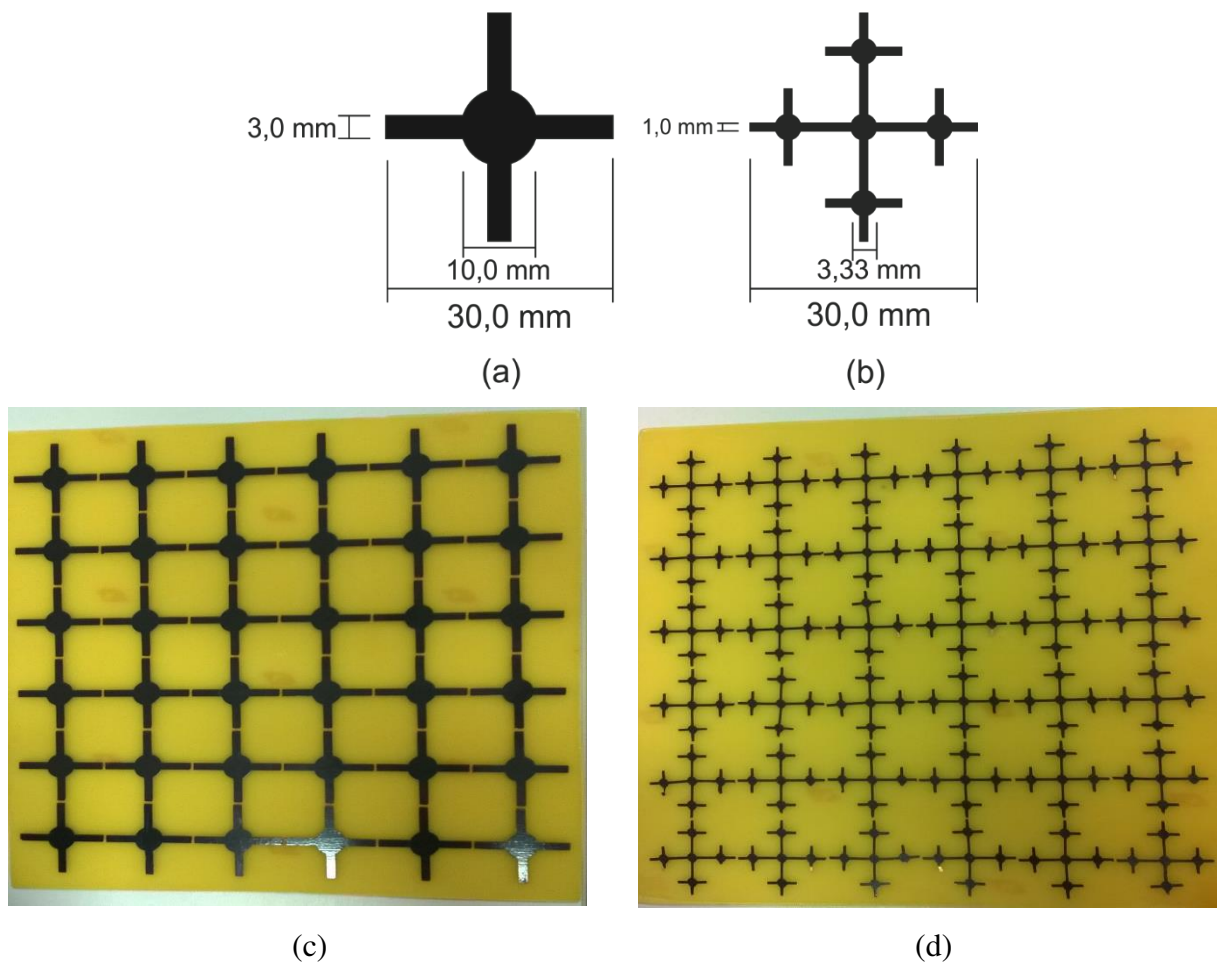
3.2 FSS COM GEOMETRIA FRACTAL

Nesta seção serão investigados o estudo da periodicidade e da estabilidade angular para FSS periódicas compostas por elementos fractais, a geometria utilizada é o *Cross Fractal*, nos níveis $k=0$ e $k=1$. Esses tipos de geometrias tem chamado atenção dos estudiosos para desenvolvimento de FSS por vários motivos tais como a possibilidade de miniaturização das

estruturas e a estabilidade quanto ao ângulo de incidência da onda eletromagnética sobre a superfície dos circuitos.

A Figura 3.10 apresenta as geometrias estudadas nesta análise. A Figura 3.10(a) mostra o elemento gerador ($k=0$), assim como as dimensões com que ele foi construído. A Figura 3.10(b) descreve o fractal no nível $k=1$ e suas dimensões. Já as Figuras 3.10(c) e (d), mostram as FSS construídas. As FSS foram construídas em um substrato de $\epsilon_r = 4,4$ e $h = 1,57$ mm.

Figura 3.10 – Elementos de FSS fractal de Cross: (a) $k=0$, dimensões; (b) $k=1$, dimensões; (c) $k=0$, FSS construída; e (d) $k=1$, FSS construída;

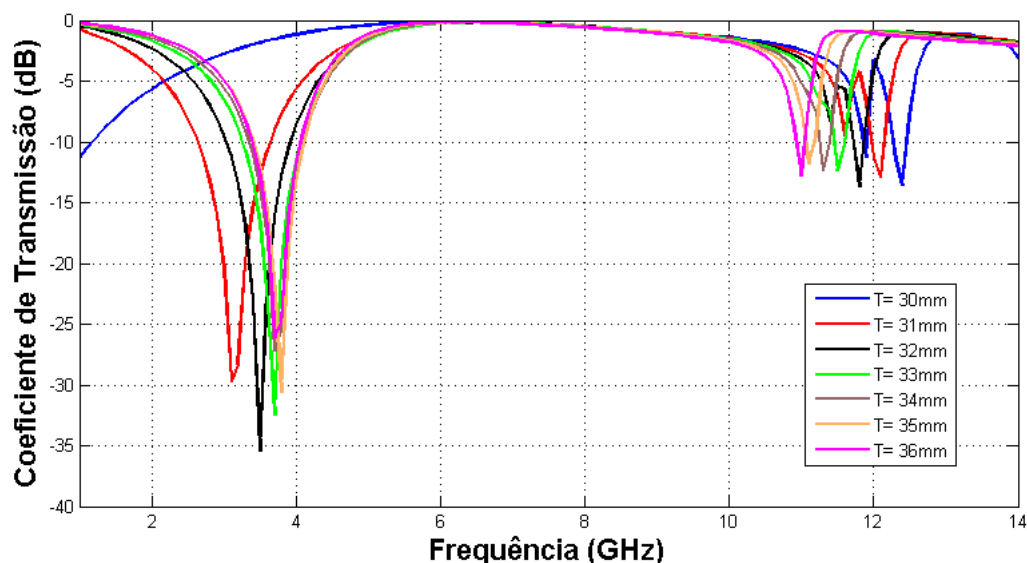


Fonte: Autor.

A Figura 3.11 apresenta os coeficientes de transmissão, em função das frequência, para o elemento gerador, variando sua periodicidade, desde 30,0 mm, até 36,0 mm. De acordo com os dados mostrados, para o caso do período de 30,0 mm a FSS quase não funciona, rejeitando apenas uma pequena banda de frequência, com coeficiente de transmissão pouco abaixo de -10 dB. Já para os outros períodos iniciando em 31,0 mm, é notável que com o aumento do período,

a primeira frequência de ressonância aumenta até o período de 35,0 mm, enquanto que a segunda frequência diminui. No que diz respeito a largura de banda, há uma diminuição apenas de $T=32,0$ mm para $T = 33,0$ mm. A Tabela 3.9 apresenta os resultados dessa análise, considerando uma referência de -10 dB para a banda passante.

Figura 3.11 – Coeficientes de transmissão para a FSS em geometria do fractal de Cross ($k=0$).



Fonte: Autor.

Tabela 3.9 – Resposta em frequência da FSS da Figura 3.10(a) para diferentes períodos.

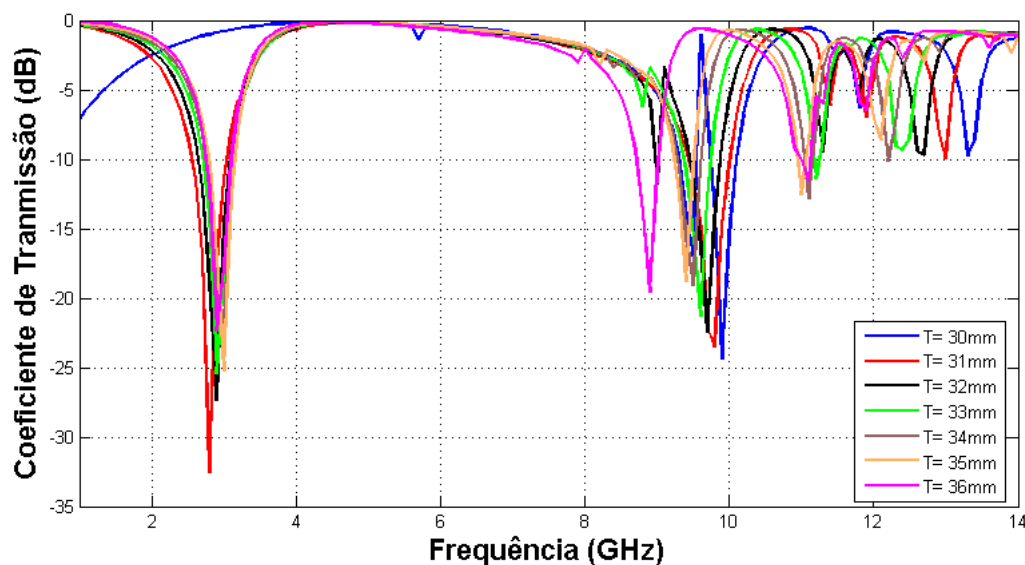
Período (mm)	Frequência (GHz)	BW (GHz)	S_{21} (dB)
30,0	12,4	0,2	- 13,55
31,0	3,1	0,9	-29,72
32,0	3,5	0,9	-35,44
33,0	3,7	0,7	-32,50
34,0	3,7	0,7	-27,22
35,0	3,8	0,7	-30,57
36,0	3,7	0,7	-26,09

Fonte: Autor.

A Figura 3.12 apresenta os coeficientes de transmissão, em função das frequências para o fractal de Cross no nível $k=1$, de acordo com a variação da periodicidade. Pelos dados é possível observar que para o período igual a 30,0 mm a FSS comporta-se de maneira parecida

a partir da frequência de 8 GHz. Para os outros períodos a estrutura responde de forma semelhante até a frequência de 8 GHz sem mudanças significativas, já para frequências a partir de 8 GHz sofre variações maiores nas outras frequências de ressonância.

Figura 3.12 – Coeficientes de transmissão para a FSS em geometria do fractal de Cross ($k=1$).



Fonte: Autor.

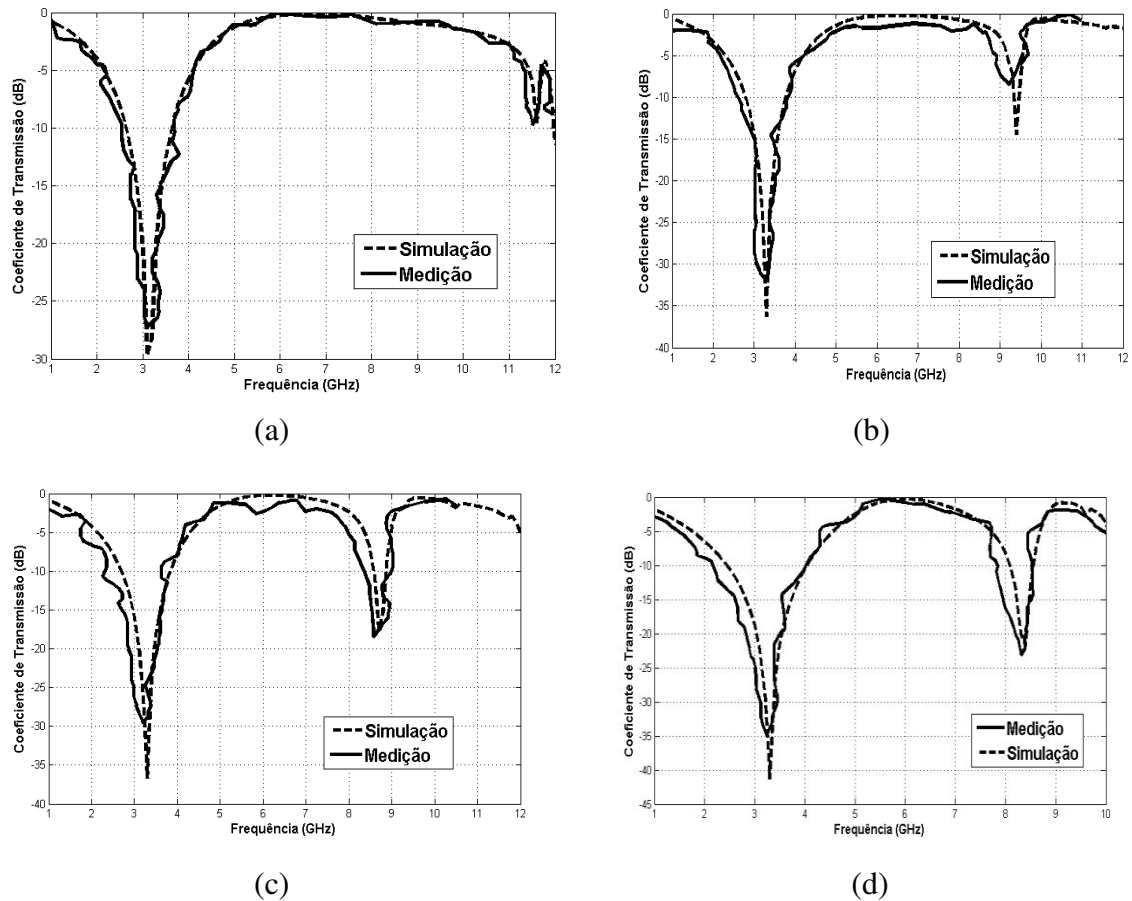
Considerando-se uma referência de -10dB e dentro da faixa de frequência analisada, a Tabela 3.10 apresenta os resultados da resposta em frequência para a FSS em *Cross Fractal* para $k=2$. Baseando-se nesses resultados pode-se identificar o perfil *multiband* dessa estrutura.

Tabela 3.10 – Resposta em frequência da FSS da Figura 3.10(b) para diferentes períodos.

Período (mm)	Frequência (GHz)	BW (GHz)	S ₂₁ (dB)
30,0	9,9 – 9,5	0,3 – 0,2	- 24,50 – -16,99
31,0	2,8 – 9,8	0,4 – 0,5	-32,50 – -23,50
32,0	2,9 – 9,0 – 9,7	0,4 – 0,1 – 0,5	-27,30 – -22,40 – -11,76
33,0	2,9 – 9,6 – 11,2	0,4 – 0,3 – 0,1	-25,41 – -21,30 – -11,43
34,0	3,0 – 9,5 – 11,1	0,3 – 0,3 – 0,1	-21,75 – -19,00 – -12,80
35,0	3,0 – 9,4 – 11,0	0,3 – 0,3 – 0,1	-25,26 – -18,78 – -12,55
36,0	3,0 – 8,9 – 11,1	0,3 – 0,3 – 0,1	-22,39 – -19,54 – -11,59

Para esses dois níveis do fractal de Cross, também foi estudada a estabilidade angular, variando o ângulo de incidência, o período escolhido para os dois casos foi o de 31,0 mm. A Figura 3.13 descreve os resultados para o caso do fractal gerador.

Figura 3.13 – Coeficiente de transmissão para FSS da Figura 3.10(c) variando o ângulo de incidência, comparando valores medidos com os simulados: (a) 0°; (b) 20°; (c) 40°; e (d) 60°;



Fonte: Autor.

Como mostra a Figura 3.13 a estrutura se mostra estável até a frequência de 6 GHz, a partir dessa frequência a FSS se mostra bem instável. A Tabela 3.11 apresenta esses resultados; evidenciando estabilidade na primeira faixa de transmissão.

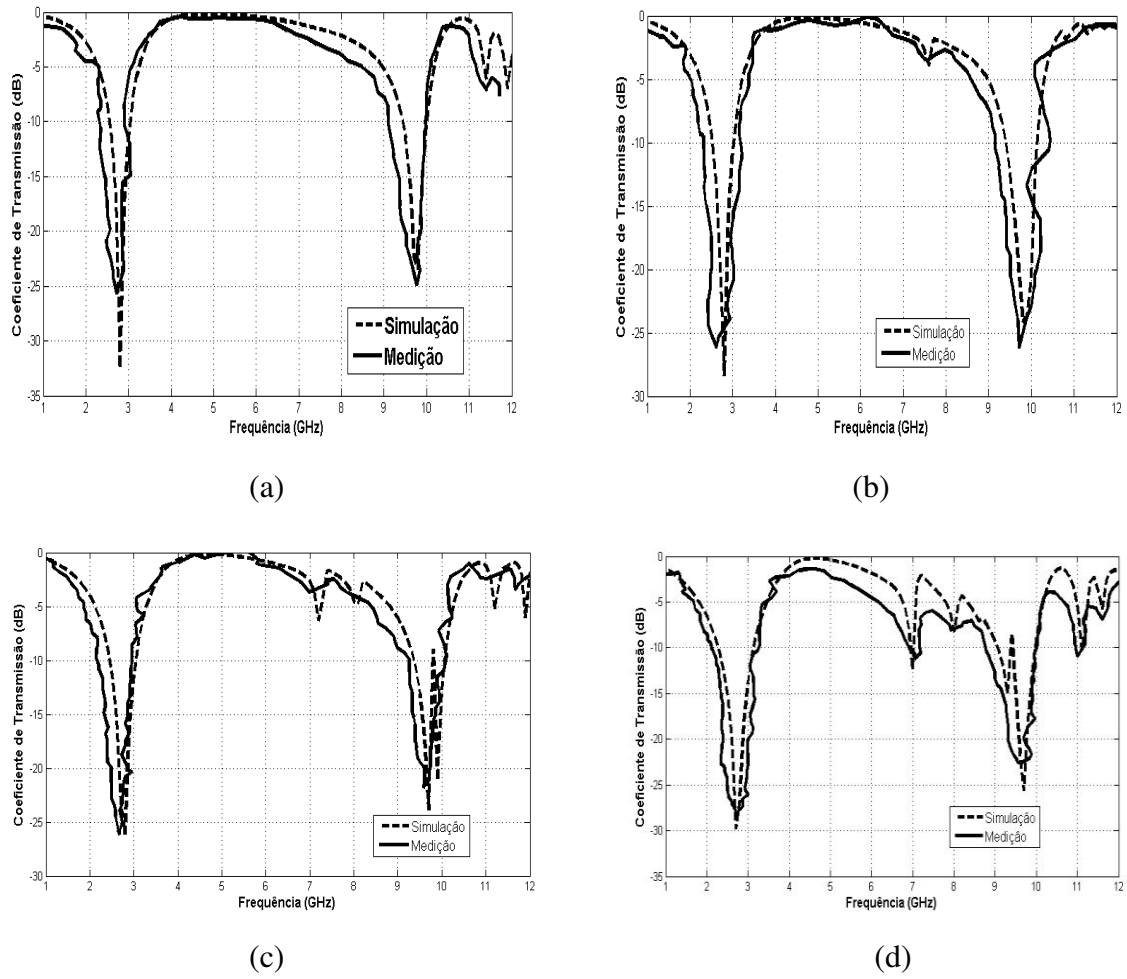
Tabela 3.11 – Resposta em frequência da FSS da Figura 3.10(c) para ângulos de incidência.

Ângulo	Frequência de Ressonância (GHz)		BW (GHz)		S ₂₁ (dB)	
	Simulação	Medição	Simulação	Medição	Simulação	Medição
0°	3,1	3,09	0,9	1,1	-29,72	-27,24
20°	3,3	3,29	0,9	1,16	-36,22	-31,87
40°	3,3	3,18	1,0	1,3	-36,65	-29,58
60°	3,3	3,24	1,5	1,7	-36,01	-34,84

Fonte: Autor.

A Figura 3.14 apresenta os resultados da FSS composta pelo fractal de Cross no nível $k=1$, para a variação do ângulo de incidência. De acordo com os resultados da Figura 3.14, assim como o elemento gerador, o $k=1$ é estável até a frequência de 6 GHz, sendo que para frequências maiores a FSS apresenta uma variação de resposta maior, com o surgimento de novas bandas de frequências. A Tabela 3.12 descreve um resumo destes resultados.

Figura 3.14 – Coeficiente de transmissão para FSS da Figura 3.10(d) variando o ângulo de incidência, comparando valores medidos com os simulados: (a) 0°; (b) 20°; (c) 40°; e (d) 60°;



Fonte: Autor.

Tabela 3.12 – Resposta em frequência da FSS da Figura 3.10(d) para ângulos de incidência.

Ângulo	Frequência de Ressonância (GHz)		BW (GHz)		S ₂₁ (dB)	
	Simulação	Medição	Simulação	Medição	Simulação	Medição
0°	2,8	2,73	0,4	0,55	-32,50	-25,68
20°	2,8	2,63	0,4	0,8	-28,34	-26,15
40°	2,8	2,70	0,5	0,8	-26,16	-25,50
60°	2,7	2,73	0,7	1,1	-29,85	-28,09

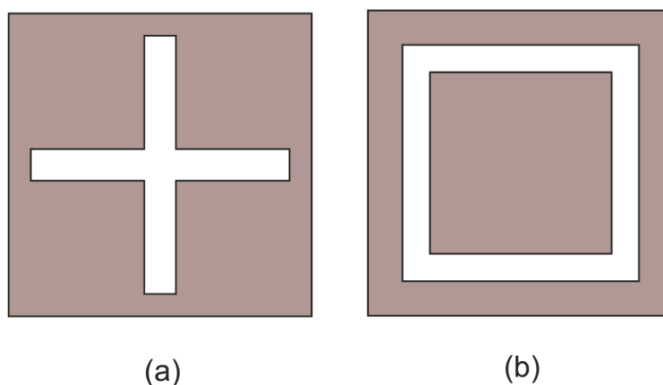
Fonte: Autor.

Como mostra os resultados das Tabelas 3.12 e 3.11, para aplicações até a frequência de 6 GHz as FSS com geometria fractal de *Cross*, se mostram estáveis.

3.3 FSS COM ELEMENTOS DO TIPO ABERTURA

Neste tópico foram estudados a influência da periodicidade em duas geometrias para FSS do tipo aberturas, que apresentam configurações de filtro passa-faixa. As duas geometrias estudadas foram dipolo cruzado e espira quadrada, a Figura 3.15 mostra estes elementos.

Figura 3.15 – Elementos de FSS tipo abertura: (a) Dipolo cruzado e (b) Espira quadrada.

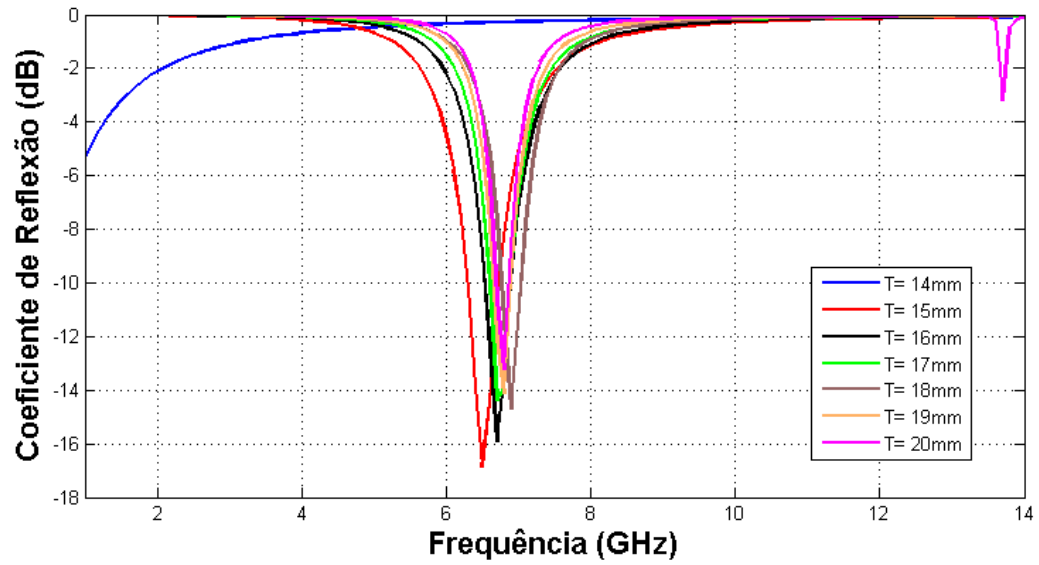


Fonte: Autor.

A FSS da Figura 3.15(a) é construída de um dipolo cruzado de 1,0 mm de largura e 14,0 mm de comprimento. Já a da Figura 3.15(b) é uma espira quadrada de 1,35 mm de largura e 14,0 mm de comprimento. As FSS foram impressas em um substrato de $\epsilon_r = 4,4$ e $h = 1,57$ mm.

Os resultados para o estudo da periodicidade da FSS de dipolos cruzados do tipo abertura são descrito na Figura 3.16.

Figura 3.16 - Coeficientes de transmissão para a FSS da Figura 3.15(a)



Fonte: Autor.

A Tabela 3.13 mostra um resumo dos resultados da Figura 3.16. De acordo com os resultados da Tabela 3.13, é notável que a FSS com o período de 14,0 mm que é igual ao comprimento do dipolo, não funcionou. Já os demais períodos, de acordo com o aumento do período a frequência de operação da estrutura aumenta, enquanto que a largura de banda diminui.

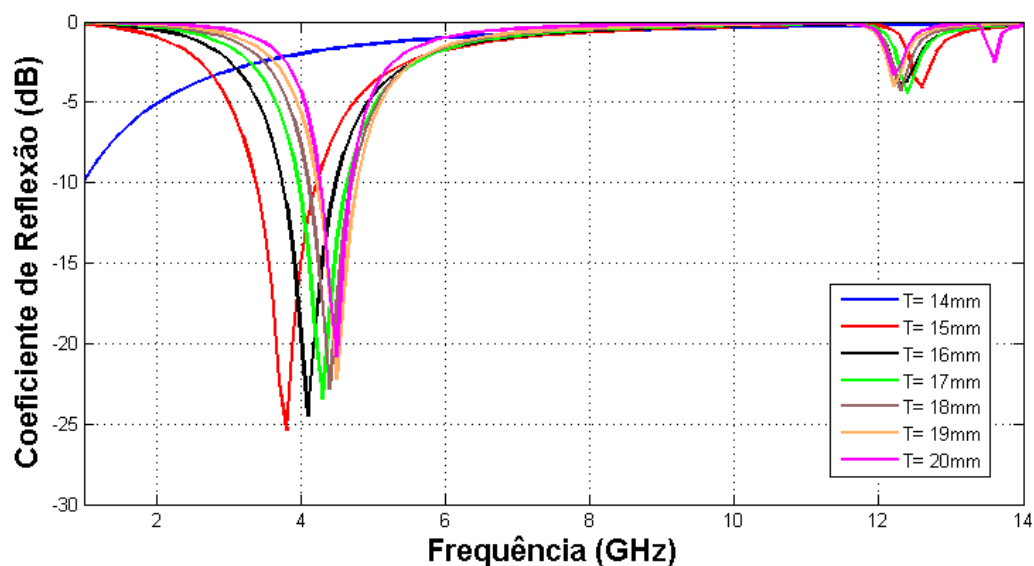
Tabela 3.13 – Resposta em frequência da FSS da Figura 3.15(a) para diferentes períodos.

Período (mm)	Frequência de Ressonância (GHz)	BW (GHz)	S ₁₁ (dB)
14,0	--	--	--
15,0	6,5	0,4	-16,88
16,0	6,7	0,4	-15,90
17,0	6,7	0,3	-14,39
18,0	6,9	0,2	-14,70
19,0	6,8	0,2	-14,14
20,0	6,8	0,2	-13,25

Fonte: Autor.

A Figura 3.17 mostra o resultado para os coeficientes de reflexão em dB, em função da frequência, do estudo da periodicidade para a FSS composta por espiras quadradas do tipo abertura.

Figura 3.17 - Coeficientes de transmissão para a FSS da Figura 3.15(b)



Fonte: Autor.

Como mostra os resultados da Figura 3.17, para o caso do período de 14,0 mm a superfície seletiva de frequência não funcionou. A Tabela 3.14 resume de forma numérica estes resultados.

Tabela 3.14 – Resposta em frequência da FSS da Figura 3.15(b) para diferentes períodos.

Período (mm)	Frequência (GHz)	BW (GHz)	S₁₁ (dB)
14,0	--	--	--
15,0	3,8	0,8	-25,40
16,0	4,1	0,7	-24,52
17,0	4,3	0,6	-23,43
18,0	4,4	0,6	-22,82
19,0	4,5	0,6	-22,20
20,0	4,5	0,4	-20,81

Fonte: Autor.

Conforme a Tabela 3.14, para os períodos a partir de 15,0 mm, com o aumento de período, acontece também a diminuição da largura de banda, enquanto que a frequência de operação da FSS aumenta.

4. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Um estudo sobre Superfícies Seletivas de Frequência foi realizado por meio de uma caracterização numérica da análise da periodicidade e da estabilidade angular para diferentes estruturas do circuito. Foram investigadas a influência do parâmetro de periodicidade de FSS no desempenho da resposta em frequência desse tipo de circuito, destacando-se os parâmetros de frequência de ressonância, largura de banda, coeficiente de transmissão e reflexão. Todos os resultados obtidos foram gerados por simulações eletromagnéticas utilizando software comercial Ansoft HFSSTM.

Inicialmente, foram estudadas estruturas reconfiguráveis de FSS baseadas em espiras circulares. A reconfiguração foi obtida pela utilização de diodo de RF do tipo PIN. Para todas as estruturas foram obtidos resultados para o coeficiente de transmissão considerando situações em que os diodos estavam com uma polarização DC externa e sem a polarização. Os resultados obtidos demonstram que a mudança no estado de polarização do diodo altera significativamente o comportamento da FSS, evidenciando a reconfiguração do circuito.

A análise de estruturas fractais de FSS foi realizada, considerando a geometria fractal em cruz. Os resultados obtidos demonstram a capacidade de miniaturização do circuito de FSS, à medida que o nível de interação do fractal aumenta. Além disso, a estrutura fractal apresentou o surgimento de novas bandas de transmissão com o aumento do nível do fractal, o que caracterizou um comportamento multi-banda para as referidas estruturas de FSS.

As análises do efeito da variação da periodicidade indicaram um grau de sensibilidade das estruturas analisadas em relação a esse parâmetro. Ao variar-se a periodicidade das FSS, a frequência de operação, a banda de transmissão e os valores do coeficiente de transmissão apresentam mudanças de comportamento. Além disso, nas análises realizadas para a estabilidade em relação ao ângulo de incidência da onda plana sobre a superfície do circuito, ficou evidente que algumas estruturas apresentam um maior grau de estabilidade.

Foi iniciado um estudo sobre superfícies seletivas de frequência com elementos do tipo abertura. Nesses casos, a variação da periodicidade apresentou-se como um parâmetro de importância no estudo do comportamento dos circuitos analisados. Foi verificado que essas estruturas também apresentam sensibilidade em seu desempenho quando se trata da variação da periodicidade.

Em trabalhos futuros, pretende-se realizar o estudo de outras geometrias de elementos de FSS como fractais geométricos complexos e aleatórios, design de novas geometrias com um alto grau de estabilidade angular, análise de FSS associadas a antenas para promover melhorias

de ganho e diretividade dessas antenas, estruturas de FSS reconfiguráveis com o uso de chaves MEMs e capacitores variáveis, estudo de estabilidade de FSS ativas, estruturas de arranjos de FSS não uniformes, utilização inteligência artificial como redes neurais, algoritmos genéticos, PSO e algoritmos bio-inspirados para algoritmos de otimização das estruturas de FSS no que diz respeito aos valores de periodicidade.

REFERÊNCIAS

CAMPOS, A.L.P.S. **Superfícies Seletivas de Frequência: Análise e Projeto**. Natal: Editora IFRN, 2009. 196p.

DUARTE, M. J; SILVA NETO, V. P. **Análise de estruturas reconfiguráveis de FSS para aplicações em sistemas modernos de comunicações sem fio**. In: I Semana de Ensino, Pesquisa e Extensão, 2014, Caraúbas.

ERDELIM, Y.E.; SERTEL, K.; GILBERT, R. A.; WRIGTH, D. E.; VOLAKIS, J.L. **Frequency selective surfaces to enhance performance of broad-band reconfigurable arrays**. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, v.50, n.12, p.1716-1726, 2002.

MEDEIROS, P.B.C.; SILVA NETO, V.P.; D'ASSUNÇÃO, A.G. **A compact and stable design of FSS with radial slit circular elements using an iterative method**. *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 57, nº 3, pp. 729 – 733, 2015.

MINTRA, R.; CHANG, C.H; CWIK, T. **Techniques for analyzing frequency selective surfaces: A review**. *IEEE Proceeding* 7, pp. 1593 – 1615, 1988.

MUNIS, A; FUSCO, V. **Characterization of switchable substrateless frequency selective surfaces**. *International Journal on Electrical Engineering and Informatic, Nova Iorque*, v.1, n.1, p.42, 2009.

MUNK, B.A. **Frequency Selective Surfaces: theory and design**. New York: John Wiley & Sons, 2000.

NÓBREGA, C.L. **Análise e projeto de superfície seletiva de frequência com elementos pré-fractais para aplicações em comunicações indoor**. Natal: UFRN, 2013. Tese de Doutorado

SILVA, P.H.F; NOBREGA, C.L.; SILVA, M.R.; D'ASSUNÇÃO, A.G. **Optimal design of frequency selective surfaces with fractal motifs**. *IET Microwave Antennas and Propagation*, nº 8, pp.627 – 631, 2014.

SILVA NETO, V.P. **Caracterização de circuitos planares de micro-ondas pelo método iterativo das ondas**. Natal: UFRN, 2013. Dissertação de Mestrado

SILVA NETO, V. P. **Monopolo de Microfita Reconfigurável para Aplicações em Sistemas de Comunicações Sem Fio**. In: XXI Congresso de Iniciação Científica, 2010, Natal. Biodiversidade e Cultura: Vida na Terra e no Mar. Natal: UFRN, v.1, n.1, p. 92, 2010.

SUNG, G. H. H; SOWERBY, K.W., NEVE, W.M.J.; WILLIAMSON, A.G. **A frequency selective wall for interference reduction in wireless indoor environments**. EUA: IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 48, pp. 29-37, 2006.

VARDAXOGLU, J.C. **Frequency selective surfaces: analysis and design**. Nova Iorque: Wiley, 1997.

WU, T.K. **Frequency selective surface and grid array**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1995.