



Andrécia Pereira da Costa

Implementação de uma Superfície Seletiva em Frequência Reconfigurável Baseada na Geometria Estrela de Quatro Braços

João Pessoa/PB
Setembro de 2016

Andrécia Pereira da Costa

Implementação de uma Superfície Seletiva em Frequência Reconfigurável Baseada na Geometria Estrela de Quatro Braços

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Telecomunicações
Linha de Pesquisa: Eletromagnetismo Aplicado

Alfrêdo Gomes Neto, Dr – IFPB.
Orientador

João Pessoa – PB
Setembro de 2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP
Biblioteca Nilo Peçanha – IFPB, *Campus* João Pessoa

C837i Costa, Andrécia Pereira da.
Implementação de uma superfície seletiva em
frequência reconfigurável baseada na geometria estrela
de quatro braços / Andrécia Pereira da Costa. – 2016.
75 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) –
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da
Paraíba – IFPB / Coordenação de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, 2016.
Orientador: Prof. Alfrêdo Gomes Neto.

1. Superfície Seletiva em Frequência Reconfigurável
- RFSS. 2. Geometria estrela de quatro braços. 3. Diodo
PIN. 4. Programa WCIP. I. Título.

CDU 621.3.018.4

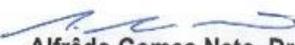
Andrécia Pereira da Costa

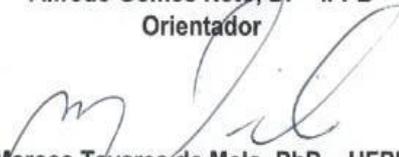
Implementação de uma Superfície Seletiva em Frequência Reconfigurável Baseada na Geometria Estrela de Quatro Braços

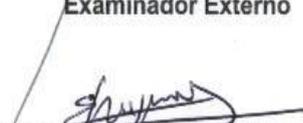
Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no domínio da Engenharia Elétrica.

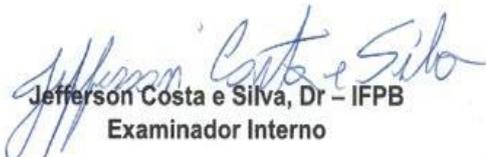
Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 06/09/2016.

BANCA EXAMINADORA


Alfrêdo Gomes Neto, Dr – IFPB
Orientador


Marcos Tavares de Melo, PhD – UFPE
Examinador Externo


Emmanuel Benoît Jean Baptiste Dupouy, PhD – IFPB
Examinador Interno


Jefferson Costa e Silva, Dr – IFPB
Examinador Interno

João Pessoa – PB
Setembro de 2016

Agradecimentos

A Deus, por ter me proporcionado força, foco e fé em chegar até aqui, momento de realizar essa grande conquista.

Agradeço imensamente a minha família, em especial a meus pais Francisca e José pelo amor, paciência e confiança depositada, acreditaram sempre no meu potencial.

A todos que contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento deste trabalho, especialmente a meu orientador Alfrêdo Gomes Neto, pela dedicação, paciência, disponibilidade, confiança e ensinamentos, levarei comigo todo aprendizado durante o curso.

Aos professores da banca examinadora: pela honra em tê-los para avaliação dessa dissertação.

Aos meus amigos que conquistei no mestrado, aprendi muito com cada um de vocês, onde juntos compartilhamos tristezas, alegrias e, hoje, vitórias.

Aos amigos da minha cidade de Cachoeira dos índios, Cajazeiras e João Pessoa, sempre me apoiaram nessa caminhada.

A minha prima Jociana pela paciência, confiança, companheirismo e amizade, onde, dividimos o mesmo teto durante esse tempo que passei aqui em João Pessoa.

Ao programa de pós-graduação, PPGEE, e todos os professores que fazem parte do mesmo.

Ao IFPB - Campus João Pessoa, pela oportunidade de crescimento profissional na realização deste curso, e também ao apoio financeiro ofertado pela CAPES através do instituto, onde fui bolsista durante o mestrado.

A todos, obrigada!

“Que caminho estranho percorri até chegar a essa conquista! Mais valeu todo esforço e sacrifício”.

“Força, foco e fé”.

“Temos medo daquilo que não conseguimos entender”

(Autor desconhecido)

Resumo

As superfícies seletivas em frequência reconfiguráveis, RFSS, vêm despertando a atenção de diversos grupos de pesquisa por suas inúmeras aplicações. Entre essas aplicações, as edificações inteligentes, ou a arquitetura eletromagnética das edificações, tem recebido uma especial atenção, principalmente nos ambientes com uma grande densidade de usuários e uma elevada quantidade de espaços de uso comum. Neste trabalho é proposta uma RFSS baseada na geometria estrela de quatro braços tipo fenda com bordas, tendo como elemento de comutação o diodo PIN. São apresentados resultados numéricos obtidos utilizando o programa WCIPAGA10, baseado no método iterativo das ondas, e resultados experimentais, observando-se uma concordância muito boa entre os mesmos. Apesar da dependência da polarização, a simplicidade do circuito de polarização dos diodos, sem uso de capacitores ou indutores, assim como a diferença de atenuação de pelo menos 20 dB entre os estados ligado e desligado, tornam a RFSS proposta potencialmente atrativa, incentivando a continuidade deste trabalho, buscando novas configurações e aplicações.

Palavras chave: RFSS, estrela de quatro braços, diodo PIN, WCIP.

Abstract

Reconfigurable frequency selective surfaces, RFSS, have aroused the attention of several research groups for its numerous applications. Among these applications, the smart buildings or electromagnetic architecture of buildings have received a special attention, principally in environments with a large density of users and an elevated amount of space in common use. In this work a RFSS based in the slot four arms star geometry with edges is proposed, a PIN diode is used as switching element. The numerical results, obtained using the WCIPAGA10 program based on Wave Interactive Method, are shown. The experimental results showed a good agreement when compared to simulated ones. Although the dependence of polarization, the simplicity of the bias circuit of the diodes without using capacitors or inductors, as well as at least 20 dB attenuation difference between the on and off states, make RFSS proposed potentially attractive, encouraging continuity this work, seeking new sets and applications.

Keywords: RFSS, four arms star, PIN diode, WCIP.

Lista de figuras

Figura 1-1- Sistemas multifrequenciais	15
Figura 1-2- Torre com antenas destinadas a múltiplos serviços.....	166
Figura 1-3- Geometria da FSS.....	166
Figura 1-4- Parâmetros que afetam a resposta em frequência da FSS.....	17
Figura 1-5- Exemplos de FSS reconfigurável.....	18
Figura 1-6- Exemplos de geometrias desenvolvidas no GTEMA-IFPB	19
Figura 1-7- Geometria estrela de quatro braços tipo fenda com bordas.....	19
Figura 2-1- Tipos de elementos da FSS- <i>patch</i> condutor	21
Figura 2-2- Tipos de elementos da FSS-abertura	22
Figura 2-3- Grupo 1: n- polos conectados pelo centro	22
Figura 2-4- Grupo 2: Espiras.....	23
Figura 2-5- Grupo 3: Interior Sólido.....	23
Figura 2-6- Grupo 4: Combinações.....	23
Figura 2-7- Grupo 5: Elementos Fractais	24
Figura 2-8- FSS do tipo espessura de duas camadas.....	25
Figura 2-9- Arranjos periodicos: caso passivo e caso ativo.....	26
Figura 2-10- Aplicações de FSS como anteparo na porta do forno de micro-ondas.....	26
Figura 2-11- Exemplos de uso de radome	27
Figura 2-12- Sistema refletor e receptor multibanda utilizando FSS.....	28
Figura 2-13- FSS em Cascata	28
Figura 2-14- Aplicação de FSS em janelas eficientes.....	29
Figura 2-15- Circuito equivalente, <i>setup</i> de medição	30
Figura 2-16- <i>Setup</i> de medição para FSS.....	31
Figura 2-17- Esquema de um <i>setup</i> de medições da FSS com lentes	32
Figura 2-18- Esquema de medição da FSS com câmara anecóica.....	32
Figura 2-19- Configurações de FSS reconfigurável	33
Figura 2-20- Técnicas utilizadas na FSS reconfigurável	34
Figura 2-21- FSS reconfigurável	35
Figura 2-22- Modelo de FSS reconfiguravel.....	35
Figura 2-23- FSS reconfigurável	36
Figura 3-1- Estrutura do diodo PIN	37
Figura 3-2- Curva característica do diodo PIN.....	38
Figura 3-3- Diodo PIN BAR 64-03 W	39
Figura 4-1- Característica de comutação da estrela de quatro braços simétrica	42

Figura 4-2- Processo de construção da estrela de quatro braços	43
Figura 4-3- Geometria com dimensões do elemento básico e célula unitária da FSS	44
Figura 4-4- Arranjo da FSS projetada	45
Figura 4-5- Passo a passo da fixação do diodo PIN	46
Figura 4-6- FSS fabricada.....	47
Figura 5-1- Geometria da FSS 40mm x 40mm	48
Figura 5-2- FSS fabricada – Dimensões totais 200 mm x 200 mm, 5 x 5 células de 40 mm x 40 mm, sem diodos, antes do processo de corrosão.....	49
Figura 5-3- FSS fabricada – Dimensões totais 200 mm x 200 mm, 5 x 5 células de 40 mm x 40 mm, com diodos fixados. Linha de alimentação em destaque	49
Figura 5-4- Detalhe das linhas de alimentação	50
Figura 5-5- <i>Setup</i> de medição.....	51
Figura 5-6- Esquema ilustrativo do circuito de alimentação para uma linha da FSS.	51
Figura 5-7- Resposta da frequência, polarização x – estado <i>OFF</i>	52
Figura 5-8- Resposta da frequência, polarização x – estado <i>ON</i>	53
Figura 5-9- Resposta da frequência, polarização x – estado <i>ON-OFF</i>	53
Figura 5-10- Resposta da frequência, polarização y – estado <i>OFF</i>	54
Figura 5-11- Resposta da frequência, polarização y – estado <i>ON</i>	55
Figura 5-12- Resposta da frequência, polarização y – estado <i>ON-OFF</i>	55
Figura 5-13- Resposta da frequência para os diferentes níveis de tensão, polarização direta.....	56
Figura 5-14- Resposta da frequência para os diferentes níveis de tensão, polarização inversa.....	57
Figura 5-15- Representação das combinações da RFSS	58
Figura 5-16- Resposta da frequência para as diferentes configurações das FSS	59
Figura 5-17- Comparação da resposta em frequência para as configurações F11111 e F11011.....	59
Figura 5-18- Comparação da resposta em frequência para as configurações F11100 e F01110.....	60
Figura 5-19- Configurações F111000 e F11100 deslocada.....	60
Figura 5-20- Comparação da resposta em frequência para as configurações F10001 e F00011.....	61
Figura 5-21- Comparação da resposta em frequência para as configurações F01010 e F10101.....	61

Lista de tabelas

Tabela 1-1 - Tensão dos resistores na polarização direta dos diodos.....	74
Tabela 1-2 - Tensão dos resistores na polarização inversa dos diodos	74
Tabela 1-3 - Tensão dos resistores nas combinações da FSS	75

Lista de siglas

<i>FSS</i>	<i>Frequency Selective Surface</i> , Superfície seletiva em frequência
GTEMA	Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado
IFPB	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
<i>FDTD</i>	<i>Finite Difference Time Domain</i> , Diferenças finitas no domínio do tempo
<i>FEM</i>	<i>Finite Element Method</i> , Método do elemento finito
<i>MoM</i>	<i>Method of Moments</i> , Método dos momentos
<i>WCIP</i>	<i>Wave Concept Iterative Procedure</i> , Método iterativo das ondas
<i>RFID</i>	<i>Radio Frequency Identification</i> , Identificação por rádio frequência
<i>RF</i>	Rádio Frequência
RFSS	Superfície seletiva em frequência reconfigurável
<i>MEMS</i>	<i>Micro Electro Mechanical Systems</i>
<i>WLAN</i>	<i>Wireless Local Area Network</i>
<i>RCS</i>	<i>Radar Cross Section</i>
<i>GSM</i>	<i>Global System for Mobile Communication</i> , Sistema global para comunicações móveis
<i>IEEE</i>	<i>Institute of Electric and Electronic Engineers</i> (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)
ϵ_r	Constante dielétrica relativa, permissividade dielétrica relativa
FR-4	Substrato de Fibra de vidro
S ₂₁	Módulo Coeficiente de Transmissão
h	Altura do substrato
λ_0	Comprimento de onda
<i>WLAN</i>	<i>Wireless Local Area Network</i> - Rede de área local sem-fio
W_x	Comprimento da célula em x
W_y	Comprimento da célula em y
L_x	Comprimento do <i>patch</i> e dos braços da estrela em x
L_y	Comprimento do <i>patch</i> e dos braços da estrela em y
S_x	Comprimento do ponto de comutação em x
S_y	Comprimento do ponto de comutação em y
d_{x_1}	Comprimento do corte retangular da extremidade do braço em x
d_{y_1}	Comprimento do corte retangular da extremidade do braço em y

Sumário

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
Lista de Siglas	xii
1. Introdução	15
2. Superfícies seletivas em frequência	21
2.1.1. Formas dos elementos	22
2.1.2. Espessura da camada de metalização	24
2.1.3. Excitação dos arranjos	25
2.2. Aplicações de FSS	26
2.2.1.1. Anteparo da porta de forno de micro-ondas	26
2.2.1.2. Radome	27
2.2.1.3. Refletores de antenas	27
2.2.1.4. Cascadeamento de estruturas	28
2.3. Técnicas de análise	29
2.3.1. Caracterização numérica	29
2.3.2. Caracterização experimental	31
2.4. FSS reconfiguráveis	33
2.4.1. Aplicações das FSS reconfiguráveis	34
3. Diodos	37
3.1. Diodos PIN	37
3.2. Diodo varicap/varactor	39
3.3. Chaves MEMS	40
4. Descrição do projeto	42
4.1. Caracterização da FSS	42
4.1.1. Obtenção da geometria	43
4.1.2. FSS utilizadas	44
4.2. Fixação dos diodos PIN	45
5. Resultados	48
5.1. Comportamento da FSS com todas as linhas de células unitárias ativadas ou desativadas simultaneamente	52
5.1.1. Polarização x	52
5.1.2. Polarização y	54
5.2. Caracterização da FSS com diferentes níveis de tensão	56
5.3. Caracterização da FSS com diferentes linhas de células unitárias ativadas	57

6. Conclusão	63
6.1. Considerações finais	63
6.2. Trabalhos futuros.....	64
Referências	65
Apêndice A	74

1.Introdução

O avanço tecnológico que vem ocorrendo no desenvolvimento de dispositivos com tecnologia planar, resulta da necessidade crescente de implementação de dispositivos com dimensões e peso cada vez menores, para aplicações diversas, principalmente nos sistemas de comunicação sem fio. Com esse avanço e o aumento contínuo da oferta de serviços de comunicações, surge a necessidade cada vez maior de transmitir grandes quantidades de informações simultaneamente, demandando por estruturas que operem em diferentes faixas de frequência sem que haja interferência ou impedimento entre os serviços oferecidos, [1]–[7]. Além das unidades móveis, Fig. 1-1 com operação em diversas bandas de frequência e as suas limitações de volume e peso, os enlaces de comunicação de alta capacidade via rádio, também recebem uma especial atenção, visto que existem restrições para alocação de antenas, Fig. 1-2. Mais recentemente, as redes de sensores sem fio para aplicações industriais têm representado um novo desafio para os engenheiros de micro-ondas e antenas, [8], [9].



Figura 1-1- Sistemas multifrequenciais [10].



Figura 1-2- Torre com antenas destinadas a múltiplos serviços [7].

Uma estrutura que vem atraindo a atenção de diversos grupos de pesquisa são as superfícies seletivas em frequência, *frequency selective surfaces*, FSS. Fundamentalmente, as FSS são formadas por arranjos periódicos em uma ou duas dimensões, impressos sobre um substrato dielétrico, Fig. 1-3, e que apresentam uma resposta em frequência dependente da geometria do elemento básico do arranjo, do tipo de elemento (abertura ou camada de metalização), das características do dielétrico (altura, constante dielétrica, tangente de perdas, etc.), da periodicidade do arranjo e da polarização da onda incidente, Fig. 1-4, [11]–[14].

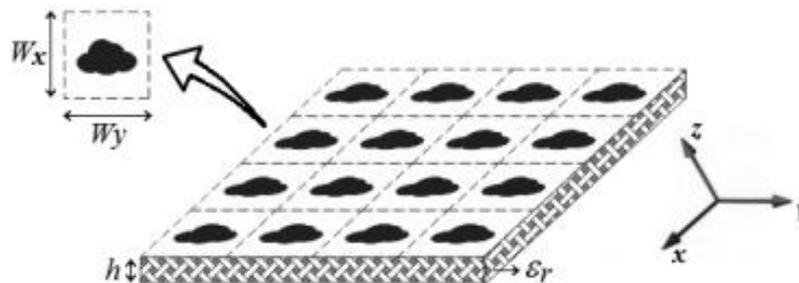


Figura 1-3- Geometria da FSS [10].

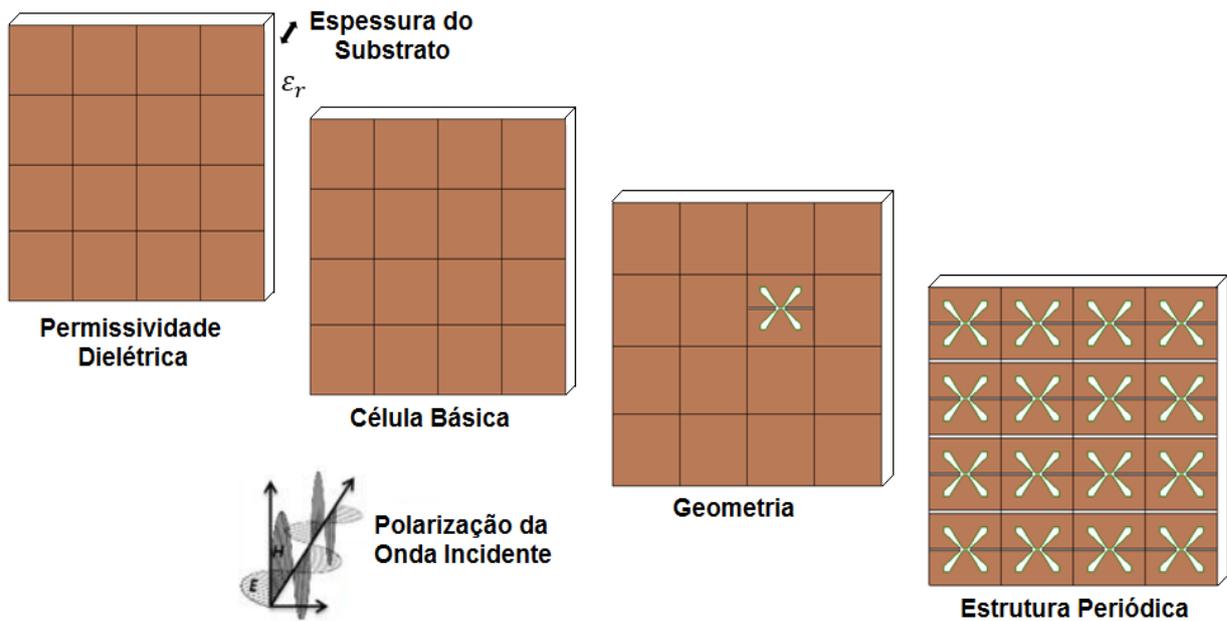
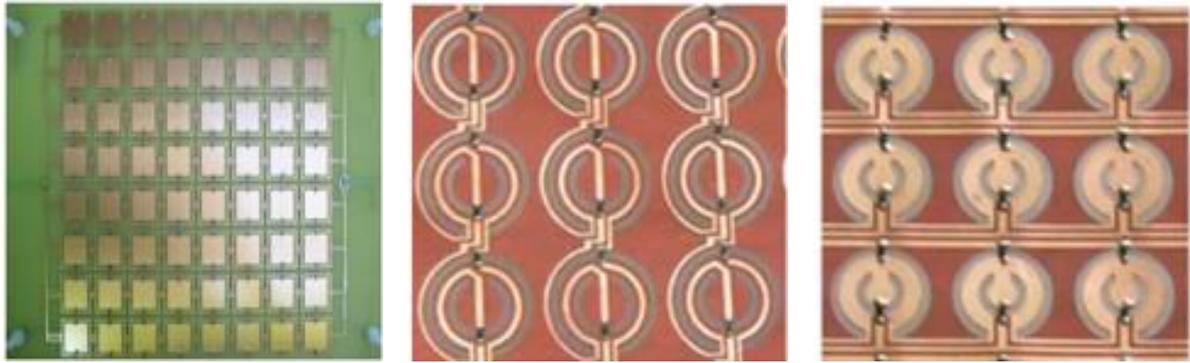


Figura 1-4 – Parâmetros que afetam a resposta em frequência da FSS.

Mais recentemente, FSS reconfiguráveis, RFSS, ou FSS ativas, *active FSS*, AFSS, vêm sendo utilizadas em diversas aplicações, tais como: reduzir o número de antenas necessárias para determinadas funcionalidades de sistemas; elementos de controle programável com realimentação para aumentar a taxa de transferência, reduzir erros e ruídos; bloqueio de sinais para aumento da segurança; otimização do consumo de energia; aplicações em rádio cognitivo; sistemas de múltiplas-entradas e múltiplas-saídas de alto desempenho, [15]–[21].

As FSS reconfiguráveis, Fig. 1-5, são estruturas comutadas eletronicamente, que necessitam de alguns métodos para obtenção de uma resposta de frequência variável [22]. Um desses métodos é obtido a partir da inserção de dispositivos como diodos PIN ou chaves MEMS na FSS, com os quais é possível modificar a sua resposta em frequência, modificando a geometria equivalente [23].



(a) AFSS multibanda [24]

(b) AFSS multibanda [25]

(c) AFSS sintonizável [25]

Figura 1-5- Exemplos de FSS reconfigurável.

Um dos parâmetros de maior flexibilidade no projeto de uma FSS é a geometria da célula unitária [26], [27]. A partir de estudos realizados no GTEMA-IFPB, foram propostas novas geometrias para o elemento básico da FSS, tais como: Matrioska [5], [6] Fig. 1-6 (a), estrela de quatro braços [7], [10] Fig. 1-6 (b), geometria em forma de U [28] Fig. 1-6 (c). Dentre essas geometrias, a geometria estrela de quatro braços, foi desenvolvida visando aplicações em FSS reconfiguráveis [7]. Em [10] foi proposta a FSS com geometria estrela de quatro braços tipo fenda com bordas, Fig. 1-7. Entretanto, nas estruturas anteriormente estudadas no GTEMA-IFPB, os estados de comutação ligado e desligado são simulados e caracterizados experimentalmente de maneira ideal, onde o elemento de comutação é substituído por uma fenda (desligado) ou uma fita metálica (ligado). Neste trabalho é apresentada a implementação de uma FSS reconfigurável utilizando diodos PIN como elemento de comutação e geometria estrela de quatro braços tipo fenda com bordas. Trata-se, portanto, de um desafio para o GTEMA-IFPB, onde é dada continuidade às pesquisas sobre FSS, investigando-se agora as FSS reconfiguráveis, RFSS, também denominadas FSS ativas, AFSS.



(a) Geometria Matrioska

(b) Geometria estrela de quatro braços

(c) Geometria em forma de U

Figura 1-6-Exemplos de geometrias desenvolvidas no GTEMA-IFPB

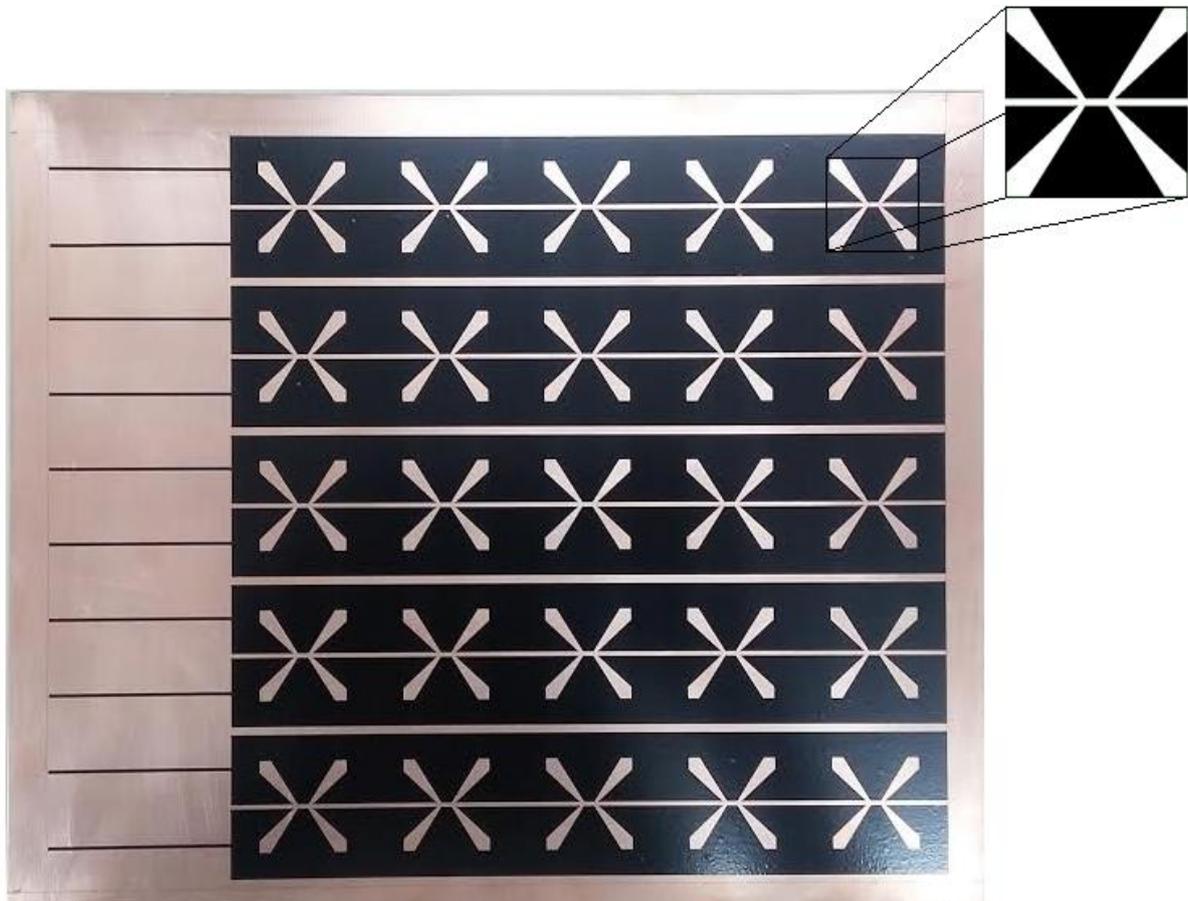


Figura 1-7- Geometria estrela de quatro braços tipo fenda com bordas

Este trabalho está dividido da seguinte forma:

No capítulo dois são apresentados os tipos de superfícies seletivas em frequência, bem como suas classificações quanto à geometria, preenchimento da célula unitária e espessura da camada de metalização. Também são apresentadas as principais aplicações para superfícies seletivas em frequência e as FSS reconfiguráveis.

No capítulo três são apresentados os tipos de diodo bem como, as características do diodo utilizado neste trabalho.

No capítulo quatro é apresentada a descrição do projeto deste trabalho, apresentando as características das superfícies seletivas em frequência, os elementos ativos utilizados, técnica utilizada para a fixação dos diodos.

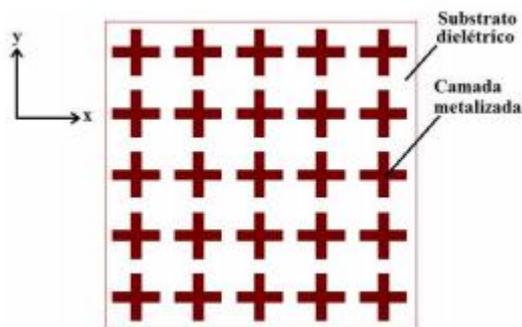
No capítulo cinco são apresentados os resultados obtidos através das caracterizações numérica e experimental, comparando os valores obtidos, para as superfícies seletivas em frequência reconfigurável utilizando os diodos PIN.

No capítulo seis são feitos comentários sobre os resultados obtidos, as considerações finais sobre todo o trabalho desenvolvido e também sugestões de trabalhos futuros para a continuidade desta pesquisa.

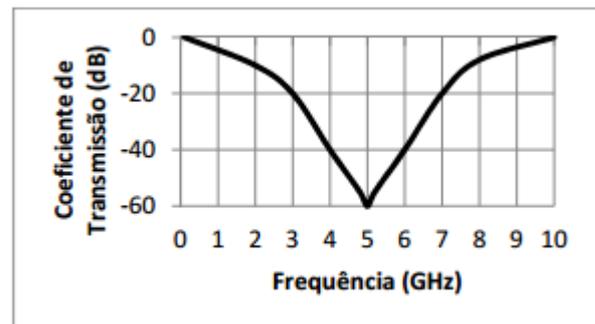
2. Superfícies seletivas em frequência

As FSS são estruturas geralmente compostas por arranjos periódicos de elementos impressos sobre um substrato, que se comportam como um filtro espacial, com uma resposta em frequência que tanto pode ser do tipo rejeita faixa, para as geometrias tipo *patch* condutor, Fig. 2-1, como passa faixa, para as geometrias tipo fenda, ou *slot*, Fig. 2-2, [29]. A FSS do tipo abertura opera como um filtro passa-faixa e na medida em que os elementos vão entrando em ressonância, a estrutura vai se tornando transparente para a onda incidente, até que na frequência de ressonância da estrutura, ocorre a transmissão total da onda, ou seja, o sinal passa através da estrutura com um mínimo de perda de inserção. Consequentemente, para frequências fora da faixa de ressonância, o sinal é refletido [30], [31], [32].

Por outro lado, a FSS com elementos do tipo *patch* condutor, funciona como um filtro rejeita-faixa. Neste caso os elementos vão entrando em ressonância e, com isso, eles radiam a potência incidente na direção de reflexão, até que na frequência de ressonância da estrutura, ela se comporta como um condutor perfeito refletindo toda a energia eletromagnética incidente [26], [27], [30], [33].

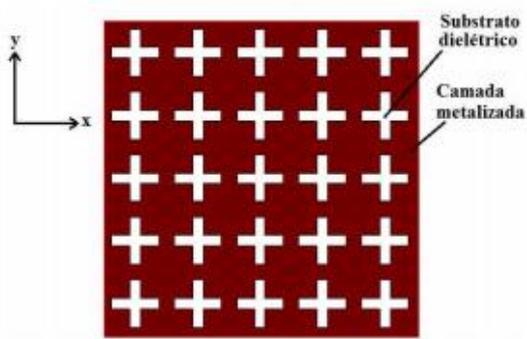


Tipo *patch* condutor [5]

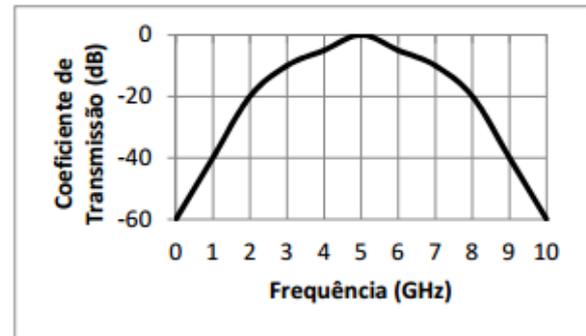


Comportamento eletromagnético característico da estrutura [5]

Figura 2-1 – Tipos de elementos da FSS – *patch* condutor.



Tipo abertura [5]



Comportamento eletromagnético característico da estrutura [5]

Figura 2-2 – Tipos de elementos da FSS – abertura.

2.1.1. Formas dos elementos

A característica única de uma FSS pode ser gerada a partir da combinação de elementos geométricos apresentados em grupos distintos, que estão relacionados com a resposta em frequência e também a largura de banda da FSS, podendo ser ajustadas com esses elementos combinados, [29].

Basicamente, os elementos estão divididos em quatro grupos [26]:

Grupo I: relaciona-se aos n-pólos conectados pelo centro. São exemplos desse grupo o dipolo fino, o dipolo cruzado, a cruz de Jerusalém e o tripolo, Fig. 2-3.

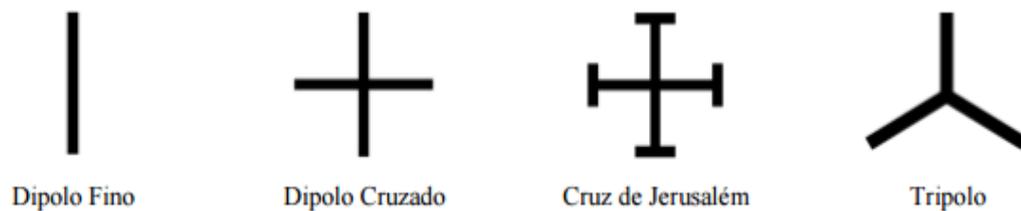


Figura 2-3 - Grupo 1: n-pólos conectados pelo centro [5], [26].

Grupo II: refere-se aos elementos do tipo espira. Os mais conhecidos são as espiras quadradas, quadradas duplas, quadradas com grades e os anéis circulares concêntricos, Fig. 2-4.

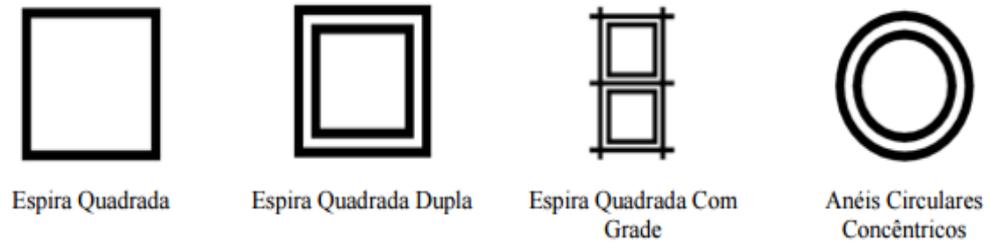


Figura 2-4 - Grupo 2: Espiras [5], [26].

Grupo III: composto pelos elementos de interior sólido, Fig. 2-5. Os mais comuns são: os *patches* retangulares, hexagonais e circulares.

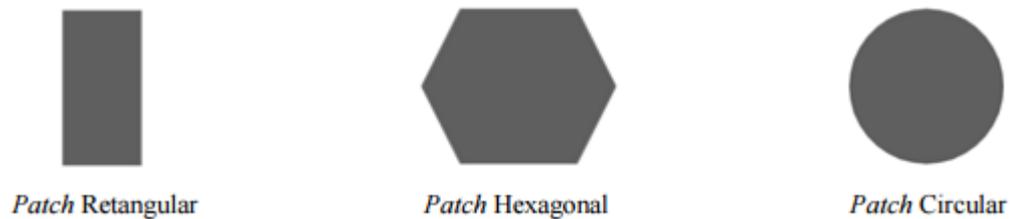


Figura 2-5 - Grupo 3: Interior Sólido [5], [26].

Grupo IV: constituído por elementos formados a partir da modificação e combinação de elementos típicos dos grupos anteriores. A lista de elementos é infinita. Na Fig. 2-6 são apresentados exemplos de elementos deste grupo.



Figura 2-6 - Grupo 4: Combinações [10], [26], [28].

Também podemos destacar a utilização de elementos fractais em FSS, Fig. 2-7, que apresentam redução da dimensão dos elementos e operação em múltiplas faixas de frequência, [5], [34].

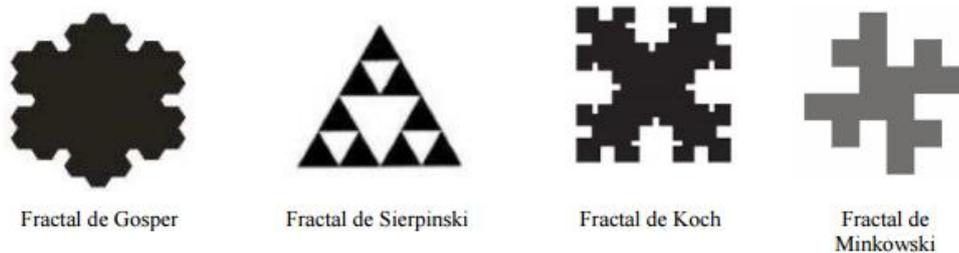


Figura 2-7 - Elementos Fractais [5], [34].

Para Ferreira [6], as formas e configurações possíveis para os elementos de uma FSS são limitadas apenas pela imaginação do projetista. Neste sentido, uma variedade de estudos sobre novas geometrias combinadas com o uso de novos materiais é investigada com vistas a melhorar o desempenho dessas estruturas. Além da geometria da camada metalizada, o projeto de uma FSS deve considerar outros fatores determinantes para a sua resposta em frequência:

- Parâmetros do substrato: características como espessura, constante dielétrica, uniformidade da superfície, dentre outros;
- Espaçamento entre elementos: a distância entre os elementos geométricos periódicos está diretamente relacionada à sua forma de alinhamento e ao nível de influência eletromagnética de uns sobre os outros;
- Ângulo de incidência e polarização: a forma como a onda eletromagnética incide sobre a superfície, interfere no comportamento de transmissão e reflexão da estrutura.

2.1.2. Espessura da camada de metalização

Uma FSS pode ainda ser classificada como um anteparo resultado da combinação da camada de metalização com o dielétrico. Através da espessura do elemento sobre o dielétrico, a FSS pode ser do tipo anteparo fino ou anteparo espesso. Uma FSS do tipo anteparo fino, usualmente, refere-se a elementos fabricados com tecnologia de circuito impresso, em que a espessura da camada de metalização é menor que $0,001\lambda_0$, onde λ_0 é igual ao comprimento de onda no espaço livre para a frequência de ressonância da FSS. Esse tipo de estrutura possui como principal vantagem, a possibilidade da construção de uma FSS com pequeno volume,

baixo peso e menor custo em relação às FSS do tipo anteparo espesso. A FSS do tipo anteparo espesso possui uma camada de metalização mais espessa ou uma dupla camada de metalização, consistindo em duas FSS idênticas separadas por um dielétrico, Fig. 2-8, [10], [35]. Entre as vantagens das FSS de anteparo espesso, ou de FSS empilhadas com duas ou mais camadas, estão a transição mais rápida da banda passante para a banda de rejeição, *roll-off*, e a banda passante mais plana [35], [36], [37], [38].

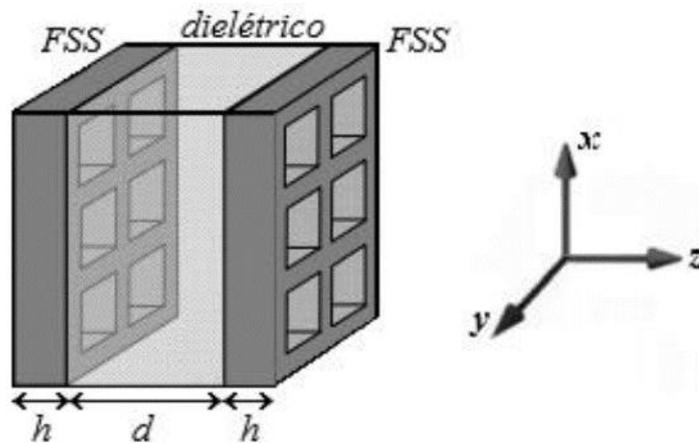


Figura 2-8 - FSS do tipo espessa de duas camadas [37].

2.1.3. Excitação dos Arranjos

Quanto à forma de excitação dos arranjos na estrutura, as FSS podem ser excitadas por uma onda plana incidente ou por geradores individuais conectados a cada elemento. No primeiro caso, a estrutura é chamada de FSS passiva, em que os arranjos dos elementos, provocam a transmissão ou reflexão da onda incidente aplicada. As FSS passivas apresentam como vantagem a facilidade de projeto e fabricação, porém tem como desvantagem o fato de não poderem ser reconfiguradas [39] sem a inserção de componentes externos (diodos, chaves, varactores, etc.). No segundo caso, geradores de tensão são acoplados aos elementos, devendo possuir a mesma amplitude e variações lineares de fase ao longo de todo o arranjo [26], sendo, neste caso, as FSS consideradas como ativas. Na Fig. 2-9 são apresentados os dois casos.

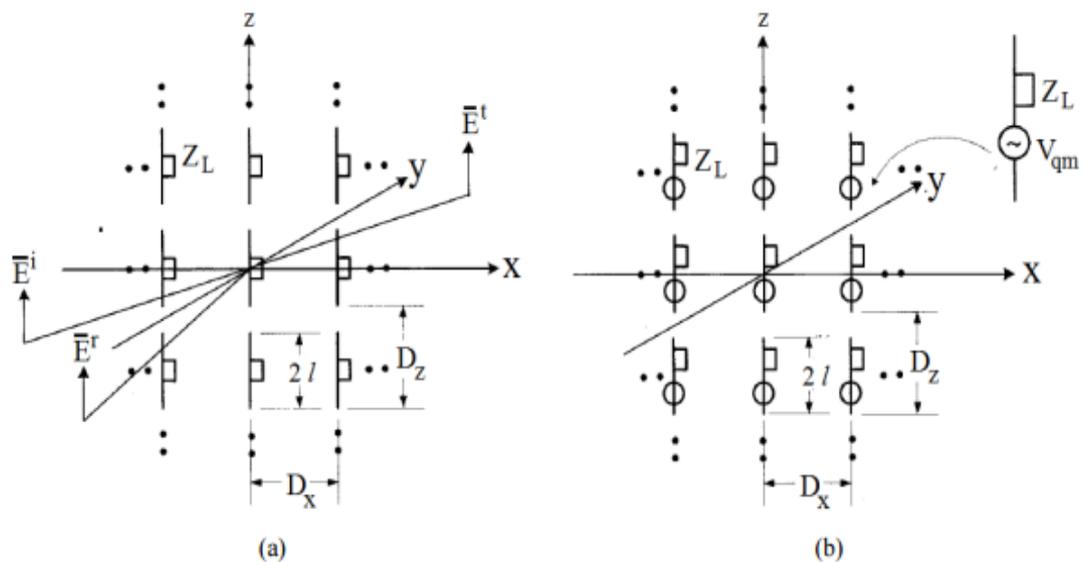


Figura 2-9 - Arranjos periódicos: (a) caso passivo (b) caso ativo [5].

2.2. Aplicações de FSS

As FSS apresentam inúmeras aplicações que ocorrem em diversas frequências do espectro eletromagnético. São apresentadas a seguir exemplos dessas aplicações.

2.2.1.1. Anteparo da porta de forno de micro-ondas

A propriedade reflexiva da FSS é utilizada em fornos de micro-ondas doméstico Fig. 2-10. A FSS atua como um bloqueador na porta do forno de micro-ondas e possui características de um filtro passa-altas, deixando passar frequências na faixa de luz visíveis e rejeitando as faixas de micro-ondas em torno de 2,45 GHz.



Figura 2-10 - Aplicação de FSS como anteparo na porta do forno de micro-ondas [28].

2.2.1.2. Radome

As FSS também são bastante utilizadas nos radomes, fornecendo características de um filtro passa-faixa. O sinal na frequência de operação da antena passa através do radome com um mínimo de perdas de inserção e fora da banda o sinal é refletido, evitando-se interferências indesejadas. [5], [27]. Na Fig. 2-11, são mostrados exemplos de FSS utilizadas como radome.

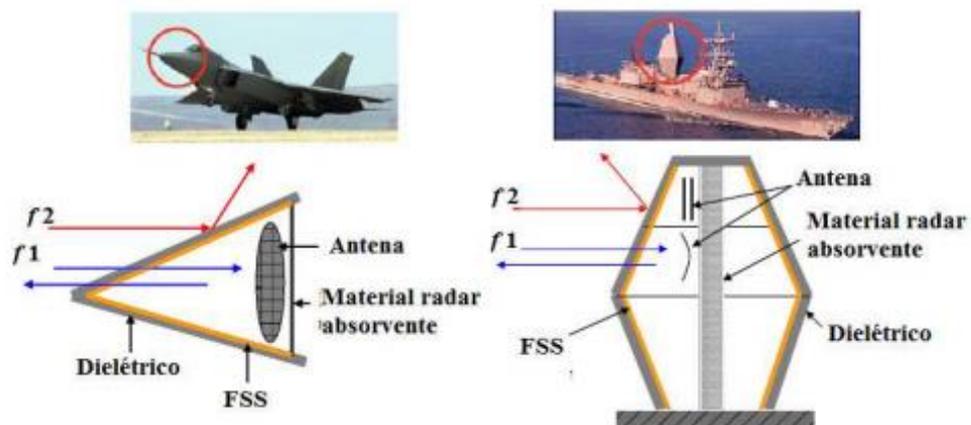


Figura 2-11 - Exemplos de uso de radome [5], [40].

2.2.1.3. Refletores de antenas

As FSS podem ser utilizadas para obter maior eficiência de antenas refletoras, como por exemplo, as antenas do tipo banda dupla (*dual band*), Fig. 2-12, onde é ilustrado um sistema de antena do tipo banda dupla, apresentando o alimentador 2 colocado no ponto focal do refletor principal, enquanto que o alimentador 1 é colocado no ponto focal do sub-refletor, que é formado por uma FSS. Esse anteparo é projetado para refletir a faixa de frequência para o alimentador 1, mas é totalmente transparente para a faixa de frequência do alimentador 2 [41], [42].

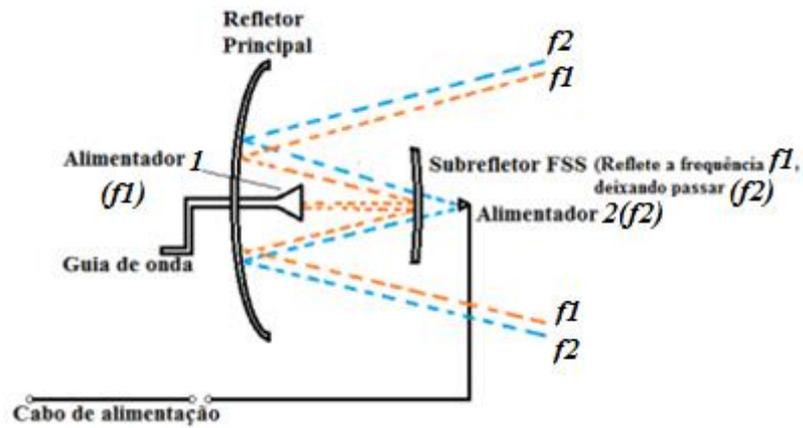


Figura 2-12 – Sistema refletor e receptor banda dupla utilizando FSS [5], [42].

2.2.1.4. Cascateamento de estruturas

Outra aplicação encontrada na literatura, é o cascateamento de estruturas para bloqueio de sinais de comunicação, Fig. 2-13. Utilizadas em redes sem fio WLAN (*Wireless Local Area Network*), a função da FSS com elementos do tipo dipolo em cruz condutivo é atuar como refletor dos sinais WLAN, permitindo a passagem de sinais de telefonia celular, a característica de absorção é alcançada colocando a segunda FSS, com elementos do tipo dipolo em cruz resistivo a frente da primeira FSS [43].

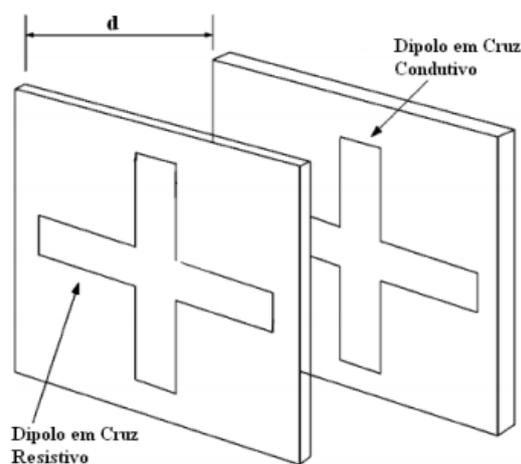


Figura 2-13 - FSS em Cascata [43].

Outra aplicação interessante para FSS é a sua utilização como janelas eficientes, atuando como um filtro, a FSS bloqueia a radiação eletromagnética na região do infravermelho e é transparente a parte visível do espectro, rejeitando a transferência de calor de fora para dentro do ambiente [5], conforme ilustrado na Fig. 2.14.

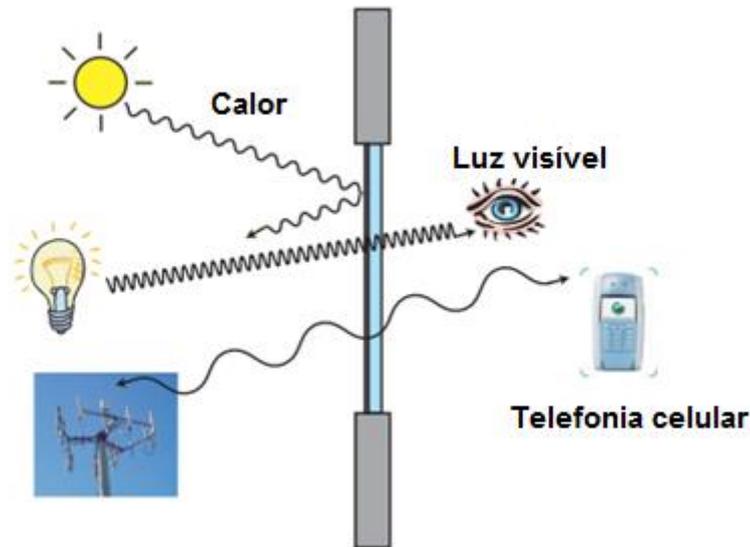


Figura 2-14 - Aplicação de FSS em janelas eficientes [44].

2.3. Técnicas de Análise

2.3.1. Caracterização Numérica

Existem diversas técnicas utilizadas para analisar as FSS. Alguns autores desenvolveram fórmulas simples e aproximadas que determinam as características de transmissão e de reflexão para as FSS tipo *patches* condutores ou aberturas retangulares. Sendo que, essas fórmulas possuem limitações para algumas aplicações específicas, podendo apresentar resultados imprecisos. [30], [45], [46], principalmente para frequências mais elevadas e ressonâncias de ordem superior.

A técnica de modelagem do circuito equivalente para FSS, Fig. 2-15, requer recursos computacionais muito limitados quando comparados aos métodos de análise de onda completa e, portanto, é útil para predizer com rapidez o desempenho das estruturas. A modelagem também proporciona uma visão física útil sobre o modo

como funciona a FSS quando seus parâmetros são alterados. O método de expansão modal, também é empregado para analisar as FSS [30].

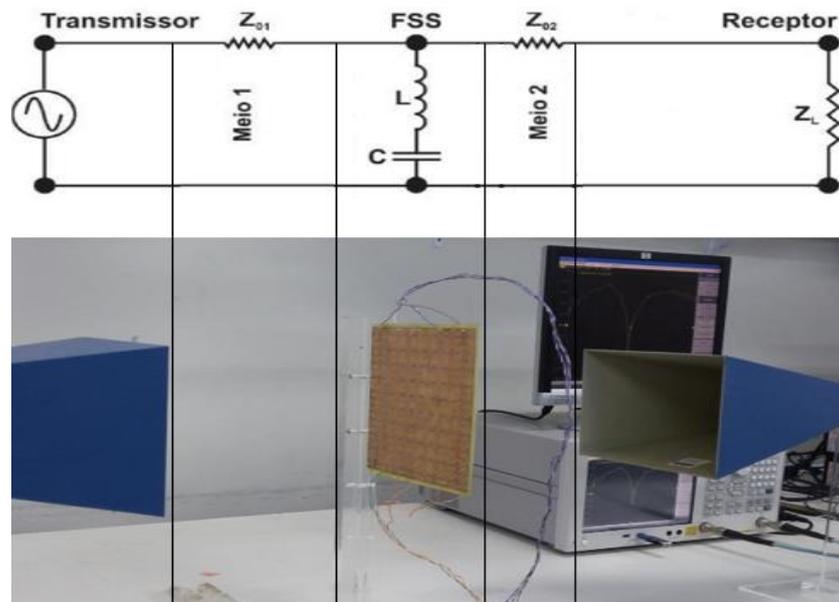


Figura 2-15 - Circuito equivalente, *setup* de medição.

Com o avanço da tecnologia vários métodos computacionais foram sendo utilizados, com soluções mais precisas, principalmente em frequências mais elevadas, incluindo frequências de ressonâncias de ordem superior.

Pode-se citar entre outros métodos numéricos empregados na análise de FSS:

- Método dos Momentos (MoM – *Method of Moments*) [47], [48];
- Método dos Elementos Finitos (FEM – *Finite-Element Method*) [49], [50];
- Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD – *Finite Difference Time Domain*) [51], [52];
- Método Iterativo das Ondas (WCIP – *Wave Concept Iterative Procedure*) [53], [54];

Outras técnicas podem ser utilizadas para a caracterização numérica das FSS em conjunto com esses métodos, mas neste trabalho será utilizado o método iterativo das ondas, WCIP (*software WCIPAGA10*).

2.3.3. Caracterização Experimental

Alguns métodos são empregados para medir as propriedades de transmissão e reflexão das FSS. Neste trabalho, o sistema de medição utilizado consiste de cornetas direcionais de ganhos padronizados com distâncias de aproximadamente 70 cm entre as antenas e um analisador de rede. A FSS é posicionada entre as duas antenas cornetas, como ilustrado na Fig. 2-16, uma das antenas funcionando como transmissora e a outra receptora. A onda eletromagnética emitida incide sobre a FSS, que reflete ou deixa passar parte da potência, de acordo com suas características. A potência que atravessa a FSS, potência transmitida, é captada pela antena receptora e assim é possível caracterizar a resposta em frequência da FSS. A medição na polarização invertida é obtida rotacionando a FSS em 90° [5], [55], [56].

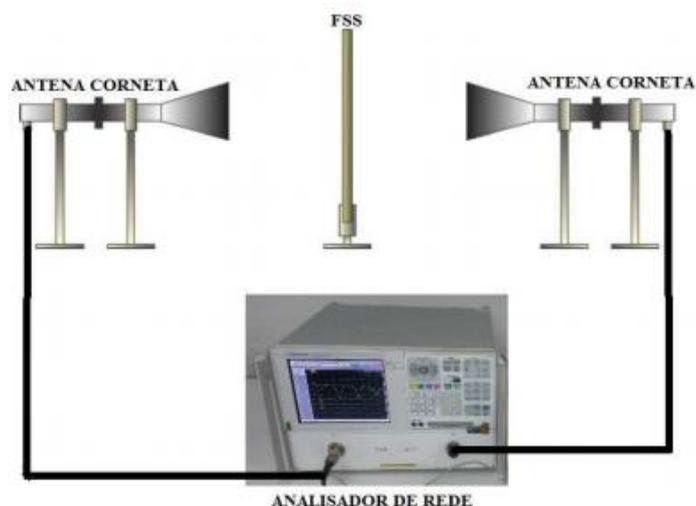


Figura 2-16 - *Setup* de medição para FSS [5].

Dados imprecisos podem ser obtidos devido às difrações ocasionadas pelas bordas da FSS, originadas devido à largura de feixe das antenas cornetas e ao tamanho relativamente pequeno da FSS. Outra fonte de erros nesta técnica de medição é a presença de sinais refletidos no próprio ambiente de medição, sendo esses mais críticos quando se deseja caracterizar FSS passa-faixas, [5]. Para otimizar as medições pode-se utilizar lentes em conjunto com as antenas cornetas, Fig. 2-17. Além de melhores resultados, também é obtido uma redução significativa do efeito da difração nas extremidades, desde que um feixe estreito e Gaussiano produzido pelas lentes incida sobre a FSS [5], [56].

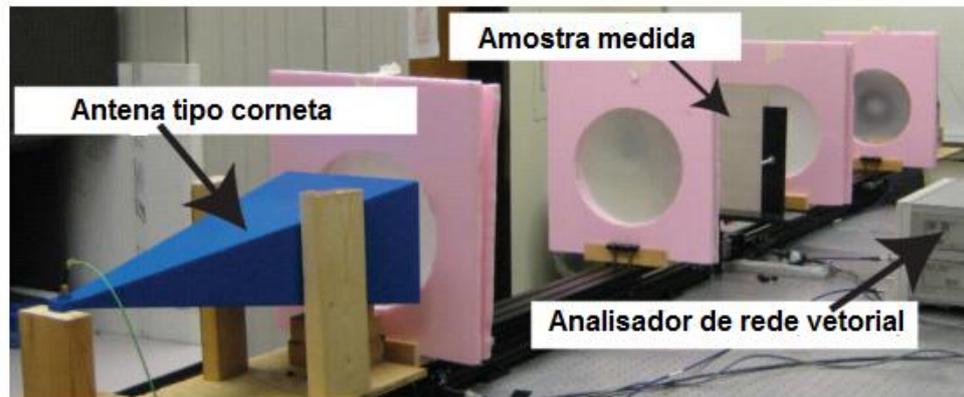


Figura 2-17 - Esquema de um *setup* de medições de FSS com lentes [29].

Quando se deseja obter maior precisão nos resultados, o desempenho da FSS pode ser testado em uma câmara anecóica, Fig. 2-18. Onde esse ambiente é livre de interferências, sendo revestidos de materiais absorvedores que eliminam reflexões desnecessárias.

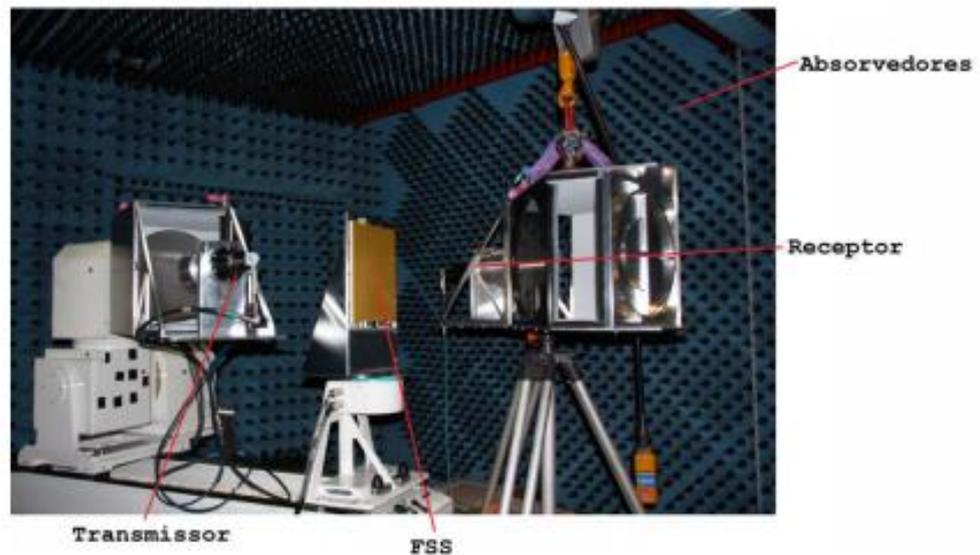
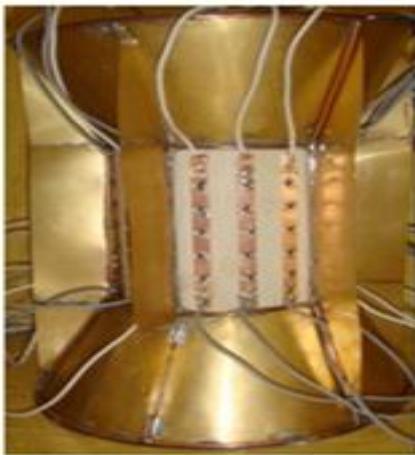


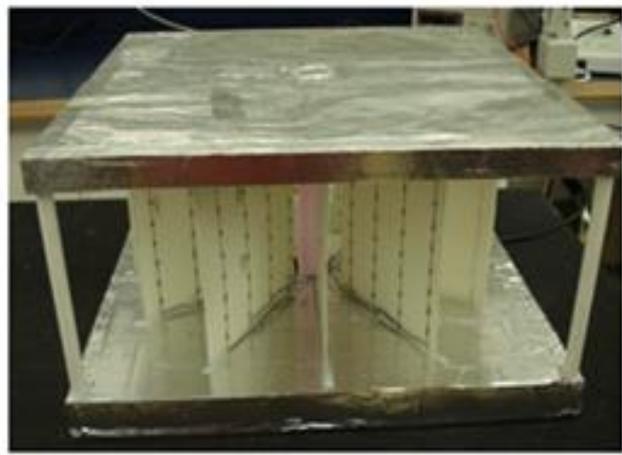
Figura 2-18 - Esquema de medição da FSS com câmara anecóica [5].

2.4. FSS reconfiguráveis

As FSS podem ser sintonizadas, ou reconfiguradas, por meio da alteração da sua resposta em frequência, seja modificando as propriedades eletromagnéticas do substrato, que pode ser alterado utilizando, por exemplo, ferrita como substrato e aplicando um campo magnético estático na estrutura, ou utilizando dielétrico líquido e modificando o seu volume [30], [57], [58], [59]; ou através da modificação da geometria da FSS utilizando uma sintonia mais fina da frequência por meio da orientação do arranjo mecanicamente, por deslocamento ou rotação mecânica, utilizando motores ou micro-motores, sendo que nesse caso, os elementos metálicos da FSS são projetados com o intuito de modificar a orientação ou posição para alterar a frequência de operação [57], [60], [61]; ou ainda pela incorporação de dispositivos (diodos PIN, varactores, chave MEMS, etc.), Fig. 2-19, que quando adequadamente polarizados alteram as características eletromagnéticas da FSS, [21], [62]–[68]. Neste trabalho é utilizada a incorporação de diodos PIN à FSS para obtenção de uma resposta em frequência reconfigurável.



(a) Comutação do feixe com base na estrutura cilíndrica [64]



(b) Comutação do feixe com base em estruturas periódicas [68]

Figura 2-19 - Configurações de FSS reconfigurável

As figuras a seguir apresentam duas das técnicas anteriormente descritas, utilizada para projetar uma FSS reconfigurável. Uma das formas utilizadas é o uso de diodos entre as partes metálicas dos elementos da FSS, Fig. 2-20 a) e Fig. 2-20 b). O diodo é chaveado (*ON*) e desligado (*OFF*) para mudar a frequência, alterando-se o

fluxo de corrente na FSS e, conseqüentemente, o campo irradiado. A Outra forma utilizada consiste na mudança da disposição do arranjo mecanicamente [69].

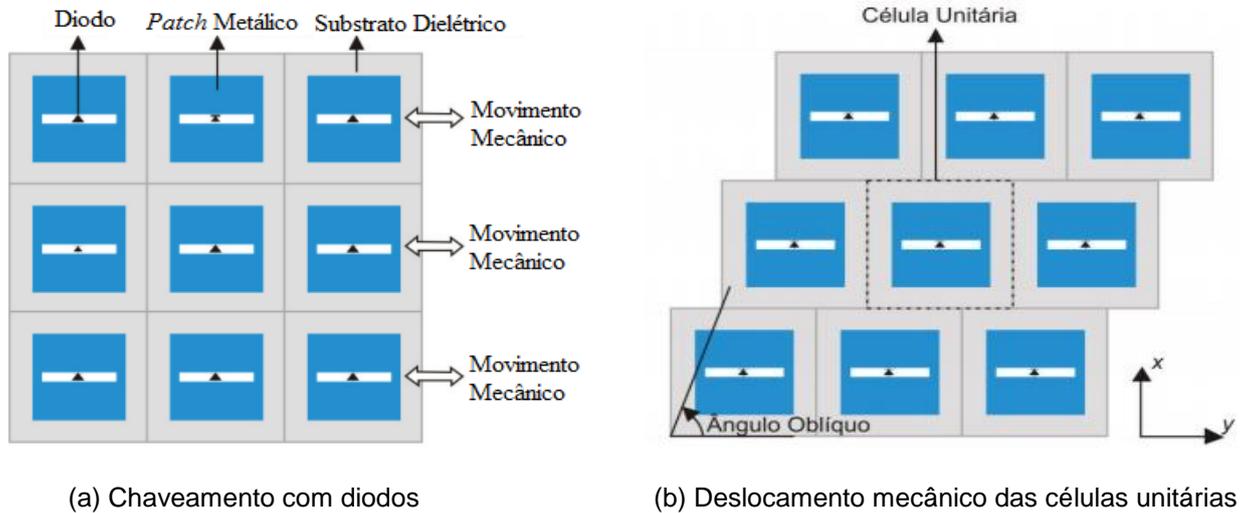


Figura 2-20 – Técnicas utilizadas na FSS reconfigurável [69], [37].

2.4.1. Aplicações das FSS reconfiguráveis

Pesquisas sobre FSS reconfiguráveis têm sido desenvolvidas, para diversos tipos de aplicações, principalmente para aplicações que requerem alta potência e baixo custo. Nas FSS reconfiguráveis, as propriedades em frequência podem ser variadas no tempo por meio do controle de dispositivos semicondutores incorporados aos elementos impressos ou depositando esses elementos em substratos nos quais suas propriedades possam ser ajustadas, como por exemplo, substratos de ferrita. A Fig. 2-21 representa uma FSS reconfigurável. [43], [70], [71].

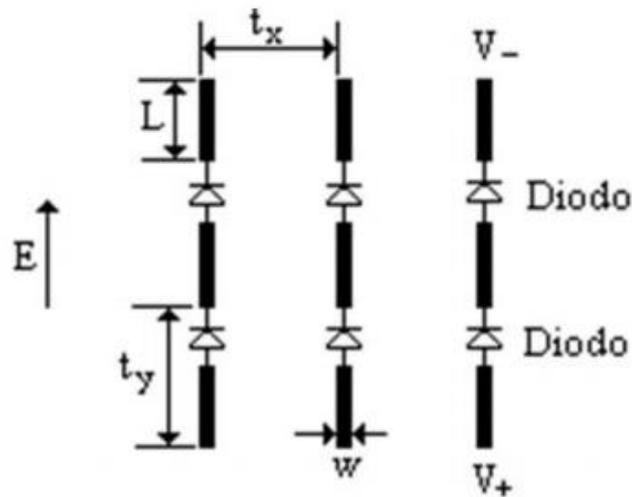


Figura 2-21 – FSS reconfigurável [43].

Outros exemplos de FSS reconfiguráveis é apresentado na Fig. 2-22 (a), onde a FSS reconfigurável é empregada em um absorvedor de radar sintonizável para reduzir a RCS (*Radar Cross Section*) de antenas, [72]. Observa-se também a FSS reconfigurável com geometria em forma de anéis de dupla polarização, Fig. 2-22 (b), [21], é utilizada para modificar a arquitetura eletromagnética e o controle da propagação de ondas eletromagnéticas de edifícios. Ambas aplicações, são capazes de sintonizar uma ampla faixa de frequência, fornecendo sinal de maior qualidade nos sistemas de comunicações.



(a) FSS reconfigurável é empregada em um absorvedor de radar sintonizável [72]



(b) FSS reconfigurável com geometria em forma de anéis de dupla polarização [21]

Figura 2-22 - Modelo de FSS reconfigurável.

Em [73] são apresentadas aplicações práticas de uma FSS reconfigurável, usada para transmissão de protocolo de rede GSM, aplicada em sala de edifícios, pode ser visualizado o modelo da FSS reconfigurável na Fig. 2-23.

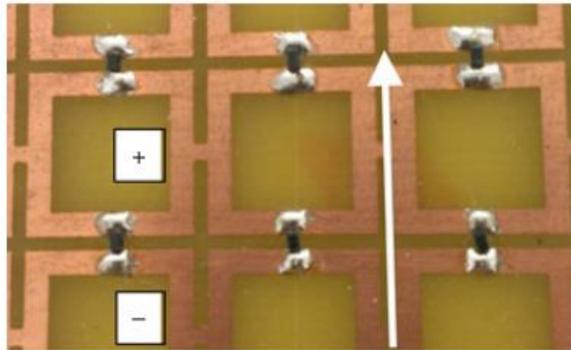


Figura 2-23 - FSS reconfigurável [73].

3. Diodos

3.1. Diodos PIN

Nos arranjos periódicos as propriedades da frequência podem ser variadas no tempo por meio do controle de dispositivos semicondutores a exemplo dos diodos PIN. O diodo PIN é um dispositivo semicondutor de silício constituído de uma camada de material intrínseco de alta resistividade, de área e espessura finitas, contida entre camadas altamente dopadas de materiais tipo P e N cuja impedância, nas frequências de micro-ondas, é controlada por uma excitação DC, [74]. Possui a característica de controlar altos valores de potência RF com valores muito baixos de tensão DC. Sob certas circunstâncias, comporta-se como uma resistência quase pura na faixa de frequência RF, com um valor de resistência que pode ser variado sobre uma faixa de aproximadamente 1Ω até $10 \text{ k} \Omega$ através do uso de uma tensão DC ou uma corrente de controle de baixa frequência. Apresenta tamanho reduzido, facilidade no projeto, alta velocidade de chaveamento, baixo peso e é muito utilizado em aplicações para circuitos miniaturizados de controle de sinais RF. É também considerado um resistor controlado por corrente nas frequências de rádio e micro-ondas, [75] – [78], Na Fig. 3-1 é ilustrada a estrutura do diodo PIN.

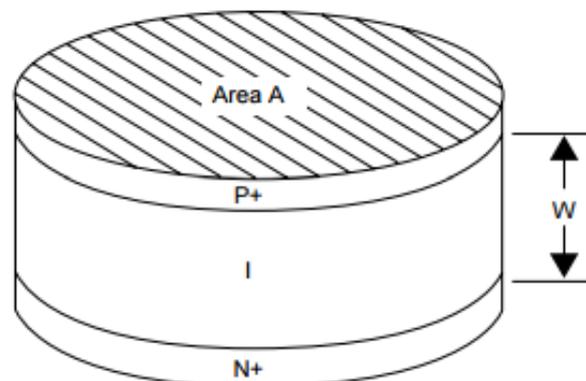


Figura 3-1 – Estrutura do diodo PIN [76].

O diodo PIN é útil para modulação em amplitude de um sinal de RF, quando a corrente de controle é variada continuamente. Pode ser chaveada entre os estados de *ON* (polarização direta) e *OFF* (polarização reversa) ou em passos discretos, o dispositivo é útil para o chaveamento, modulação de pulsos, atenuação e defasador de sinais de RF [74], [76].

A curva característica do diodo PIN, visualizada na Fig. 3-2, determina a tensão DC para um nível de corrente na polarização direta. A classificação do diodo PIN é geralmente dada por sua tensão direta (V_F) para o valor DC fixo, [76].

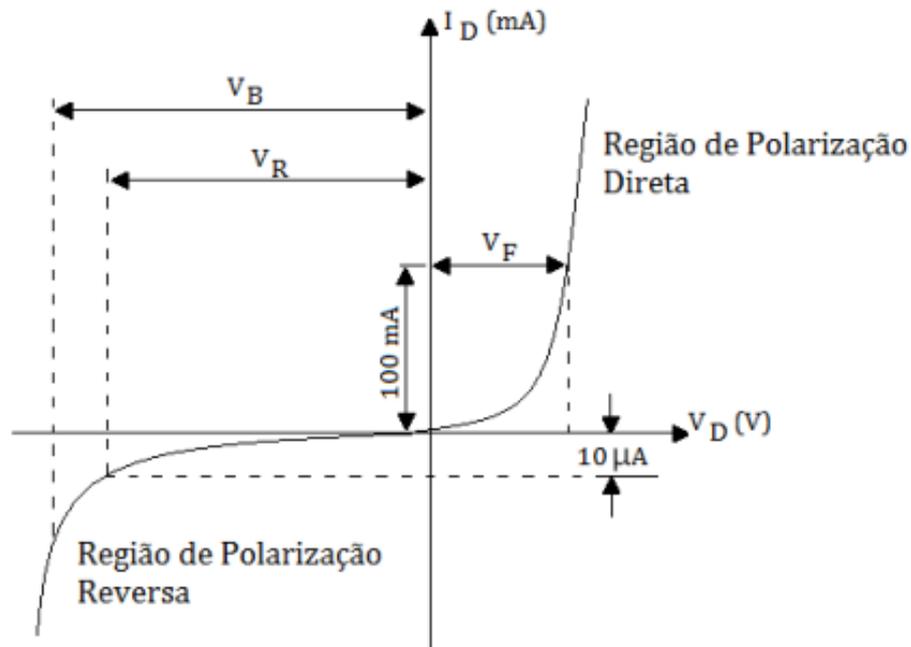


Figura 3-2 – Curva característica do diodo PIN [76].

De acordo com [76] os parâmetros necessários para definir um diodo PIN são:

- R_S - Resistência em série quando polarizado diretamente;
- C_T - Capacitância total a 0 V ou polarizado diretamente;
- R_P - Resistência em paralelo quando em 0 V ou polarizado reversamente;
- V_R - Máxima tensão DC permissível para polarização reversa;
- τ - Tempo de vida dos portadores.

3.2. Diodo Varicap/ Varactor

Diodo varicap, ou diodo varactor, ou diodo de capacitância variável (*variable capacitance*), é um tipo de diodo que possui uma capacitância que varia a tensão aplicada, [79]. Quando reversamente polarizados, os diodos semicondutores apresentam em sua junção PN, uma capacitância que é devida à presença de portadores de carga separados por uma zona de depleção. Ao variar a tensão nos terminais desse diodo, varia a separação destes portadores, ou seja, a largura, o que equivale a aumentar o meio dielétrico entre as placas energizadas de um capacitor. Dessa forma, atuando sobre a tensão no diodo, se obtém uma resposta na capacitância gerada, [79], [80], [81].

A aplicação mais comum é no controle do oscilador local em receptores multicanal, como os usados em telefones móveis usados na comunicação sem fio (celular), WLAN e receptores TV. A não linearidade faz com que também sejam úteis como multiplicadores de frequência, [82].

Neste trabalho foi utilizado o diodo PIN modelo BAR 64-03W fabricado por Infineon Technologies, Fig. 3-3. Algumas de suas características são [61]:

- Máxima corrente direta: 100 mA;
- Máxima tensão reversa de 150 V;
- Máxima capacitância de 0,35 pF para uma tensão reversa de 20 V;
- Tensão direta de 1,1 V para uma corrente de 50 mA;
- Resistência 1,35 Ohms para uma corrente de 100 mA;
- Faixa de frequência de operação de 1 MHz a 6 GHz.

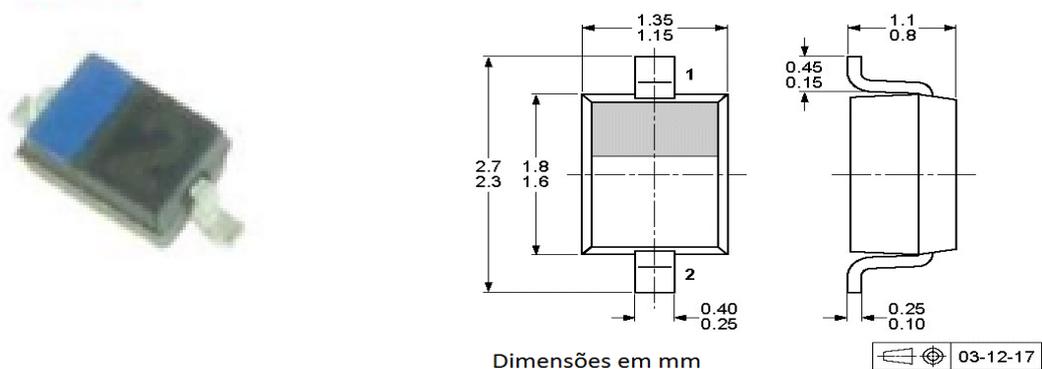


Figura 3-3 - Diodo PIN BAR 64-03 W [61].

3.3. Chaves MEMS

Os sistemas micro-eleto-mecânicos - MEMS (*MicroElectroMechanical Systems*), são tecnologias que permitem a fabricação de dispositivos eletromecânicos de dimensões submilimétricas, empregando técnicas de produção de circuitos integrados. Em circuitos de RF, o interesse pela utilização de dispositivos MEMS decorre do fato de eles apresentarem ótimo desempenho em altas frequências, minimizando reflexões e perdas, reduzindo a distorção, a interferência de sinais externos e ruído, [83], [84], [85].

Os principais componentes utilizados na tecnologia MEMS são: indutores, capacitores variáveis, cavidades ressonantes e chaves.

As chaves MEMS de RF são dispositivos que se utilizam da movimentação mecânica para alcançar em uma linha de transmissão RF um circuito aberto ou fechado. São classificadas em, topologia: serie ou paralela; tipo mecânico: chaves de membrana ou de alavanca; tipo de contato: metálico ou capacitivo; orientação: lateral ou em linha; movimento: vertical ou lateral; atuador: eletrostático, térmico, piezo-elétrico ou magnético, [86]. As mais utilizadas são as chaves capacitivas paralelas sobre guia de onda coplanar. Essas chaves, no estado atuado, apresentam alta isolamento em frequências altas. Porém, em frequências mais baixas, sua perda de retorno é baixa, no estado não atuado. Assim, faz-se necessário otimizar conjuntamente essas características, que, de outro modo, podem limitar significativamente a banda de operação da chave, [83] – [90].

A modelagem de chaves MEMS são utilizadas para melhorar o desempenho e a funcionalidade de arquiteturas de sistemas de RF com significativa redução de complexidade e custo [91], [92].

Alguns requisitos necessários das chaves para RF, [86]:

- Baixa perda de inserção e baixa reflexão ou perda de retorno, no estado atuado;
- Alta isolamento, no estado não atuado;
- Baixo custo;
- Alta confiabilidade;
- Dimensões reduzidas;

- Alta linearidade;
- Baixas tensões de operações;
- Alta capacidade de potência.

As chaves MEMS são aplicadas em: sistemas de comunicação sem fio; sistemas de comunicação por satélite; radares automotivos; antenas reconfiguráveis; radares para sistemas de defesa e sistemas de instrumentação [91], [93], [94].

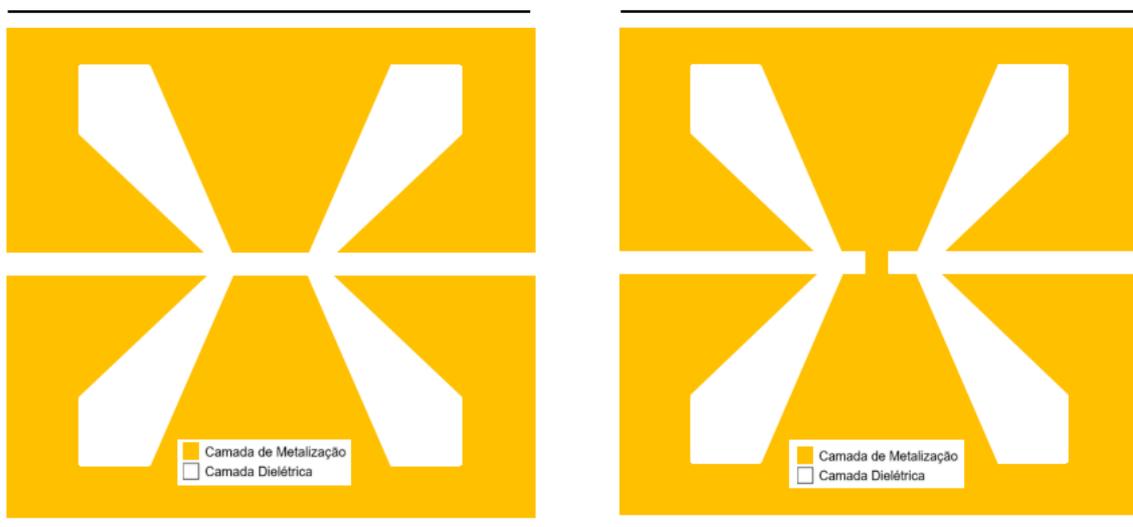
4. Descrição do projeto

O objetivo deste trabalho é implementar uma FSS reconfigurável baseada na geometria estrela de quatro braços em fenda com bordas, utilizando o diodo PIN, caracterizando o seu comportamento numericamente e experimentalmente.

4.1. Caracterização da FSS

Para este trabalho foi escolhido a geometria do elemento básico no formato da estrela de quatro braços simétrica do tipo elemento abertura, padrão que foi desenvolvido no GTEMA e continua tendo suas variações estudadas.

A escolha da estrela de quatro braços simétrica, em virtude de suas características que possibilitam a miniaturização e a comutação [10], na Fig. 4-1, o que possibilita a construção de uma superfície seletiva em frequência reconfigurável.



(a) Estrela de quatro braços no seu estado desligado (*OFF*)

(b) Estrela de quatro braços no seu estado ligado (*ON*)

Figura 4-1 - Característica de comutação da estrela de quatro braços simétrica.

A abertura inserida na parte central do elemento básico da FSS, Fig. 4-1 (b), altera a sua resposta em frequência, possibilitando assim variar sua frequência de ressonância [38]. Essa variação pode ser obtida utilizando, por exemplo, diodos PIN como elementos de comutação.

4.1.1. Obtenção da geometria

Pode-se observar na Fig. 4-2 o processo de obtenção da geometria estrela de quatro braços. Se define inicialmente a célula unitária com dimensões W_x e W_y , Fig. 4-2 (a). Em seguida, é inserido um *patch* retangular de dimensões L_x e L_y , centralizado no *patch*. O ponto de comutação é delimitado ao centro do *patch* com dimensões S_x e S_y . Considerando a geometria simétrica em relação aos eixos (horizontal e vertical), as dimensões dos braços da estrela são definidas por L_x , L_y (mesmas dimensões do *patch*), d_{x1} , d_{y1} (espaçamento da fenda triangular ao vértice do *patch* retangular) e posteriormente, são traçadas diagonais das extremidades dos braços da estrela até o canto oposto do ponto de comutação Fig. 4-2 (b). Na sequência, a camada metálica que constitui a estrela de quatro braços é retirada, dando forma ao elemento do tipo *patch* Fig. 4-2 (c) [10],[38]. Concluindo, a partir da geometria estrela de quatro braços tipo fenda é inserida uma fenda central e duas bordas, Fig. 4-1. Note que dessa forma as partes superior e inferior da geometria estão isoladas, conectadas apenas pelo diodo PIN. Detalhes do cálculo da frequência de ressonância e do comportamento da geometria estrela de quatro braços são apresentados em [10] e em [95].

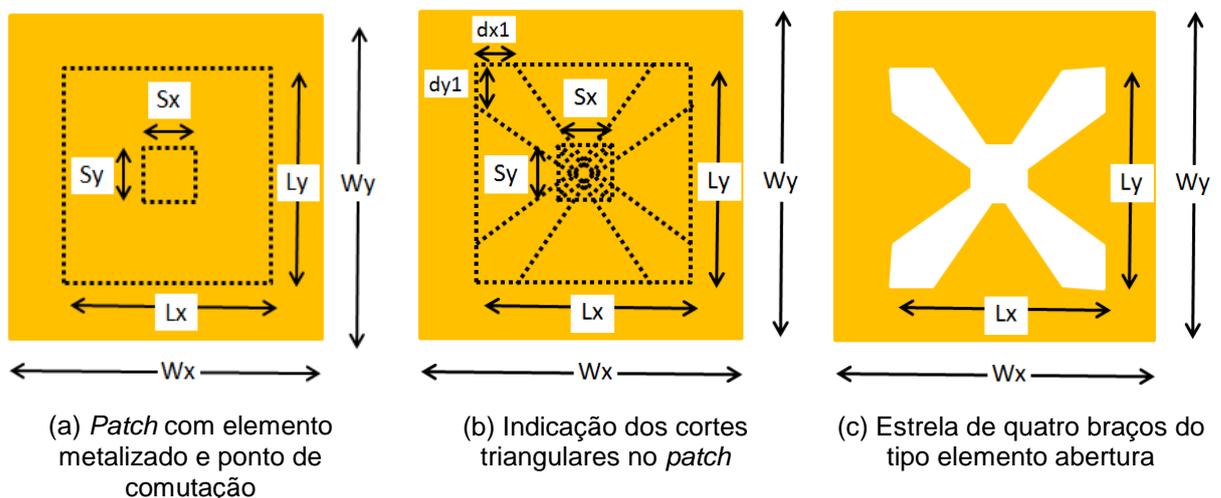


Figura 4-2 - Processo de construção da estrela de quatro braços.

A fenda central, foi inserida com o objetivo de permitir o ponto de comutação nessa região da estrutura, Fig. 4-3, sendo suas dimensões compatíveis com o diodo PIN utilizado nesse trabalho. Considerando idealmente, a presença ou ausência da fita caracteriza a estrutura no estado ligado *On* (com fita) ou desligado, *Off* (sem fita).

4.1.2. FSS utilizadas

Para este trabalho foi utilizada a superfície seletiva em frequência, com geometria estrela de quatro braços tipo fenda com bordas. A Fig. 4-3 apresenta o tamanho da célula unitária detalhando as suas dimensões.

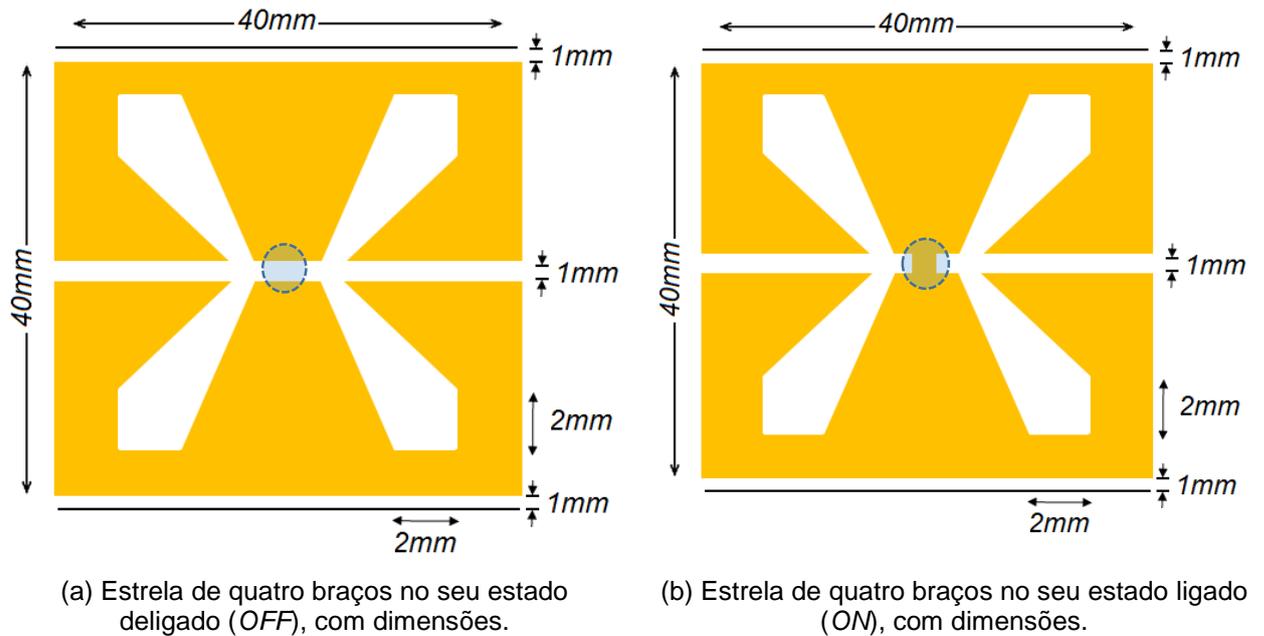


Figura 4-3 - Geometria com dimensões do elemento básico e célula unitária da FSS.

A FSS foi construída em uma placa medindo 200 mm x 200 mm e as células unitárias foram agrupadas em arranjos de 5 x 5, como ilustrada na Fig. 4-4.

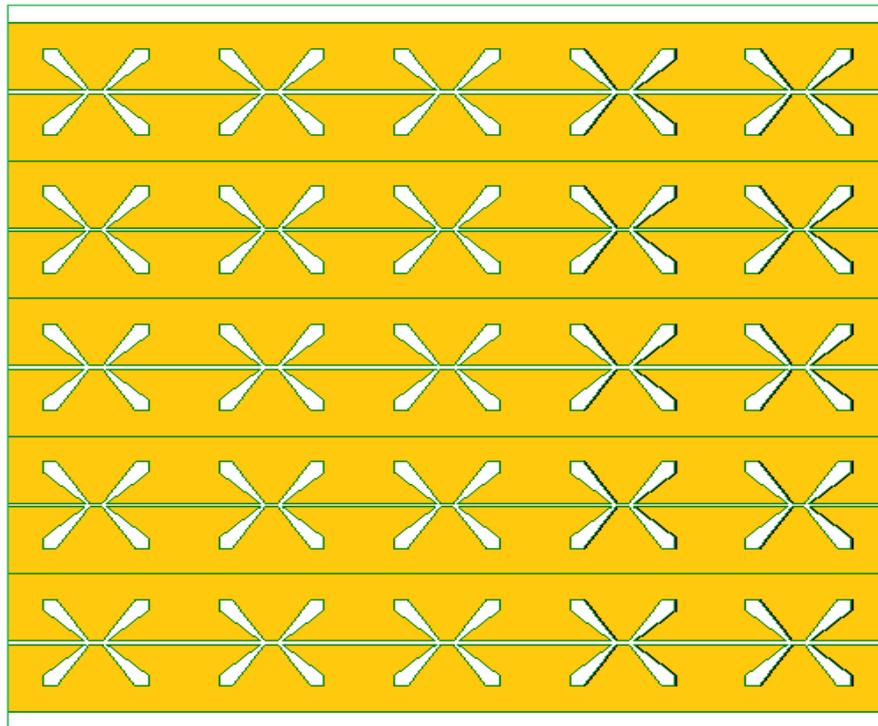


Figura 4-4– Arranjo da FSS projetada.

4.2. Fixação dos diodos PIN.

Após a fabricação da superfície seletiva em frequência, foram fixados os diodos PIN, o que será descrito a seguir.

Para realizar a fixação dos diodos PIN foi necessário utilizar a pasta de solda MBO A11/L 1301EV e a estação de retrabalho SMD modelo TS-850D, com temperatura ajustável de 100 C° a 480 C° [96]. O volume de ar utilizado foi 12 L/min, com uma temperatura de 280 C°. O passo a passo será detalhado nas figuras a seguir.

- i- O processo inicia-se após a fabricação da FSS, Fig. 4-5 (a), fixando um diodo em cada célula por vez;
- ii- Dois pontos de pasta de solda são colocados na área de fixação do diodo PIN, Fig. 4-5 (b), e em seguida coloca-se o diodo PIN entre os dois pontos da pasta de solda, Fig. 4-5 (c) com o auxílio de uma pinça Fig. 4-5 (d);
- iii- Com a estação de retrabalho devidamente configurada, direcione o ar quente sobre os terminais do diodo PIN uniformemente, Fig. 4-5 (e), até que a pasta de solda se aqueça, unindo-se aos terminais do diodo PIN;
- iv- Retire o ar quente e a pasta de solda ficará enrijecida, sendo o diodo é fixado na placa, Fig. 4-5 (f).

- v- O processo é repetido para todas as células e os 25 diodos PIN fixados na FSS. A Fig. 4-6 (a) apresenta a FSS antes da fixação do diodo PIN e a Fig. 4-6 (b) apresenta a FSS após a fixação do diodo PIN.

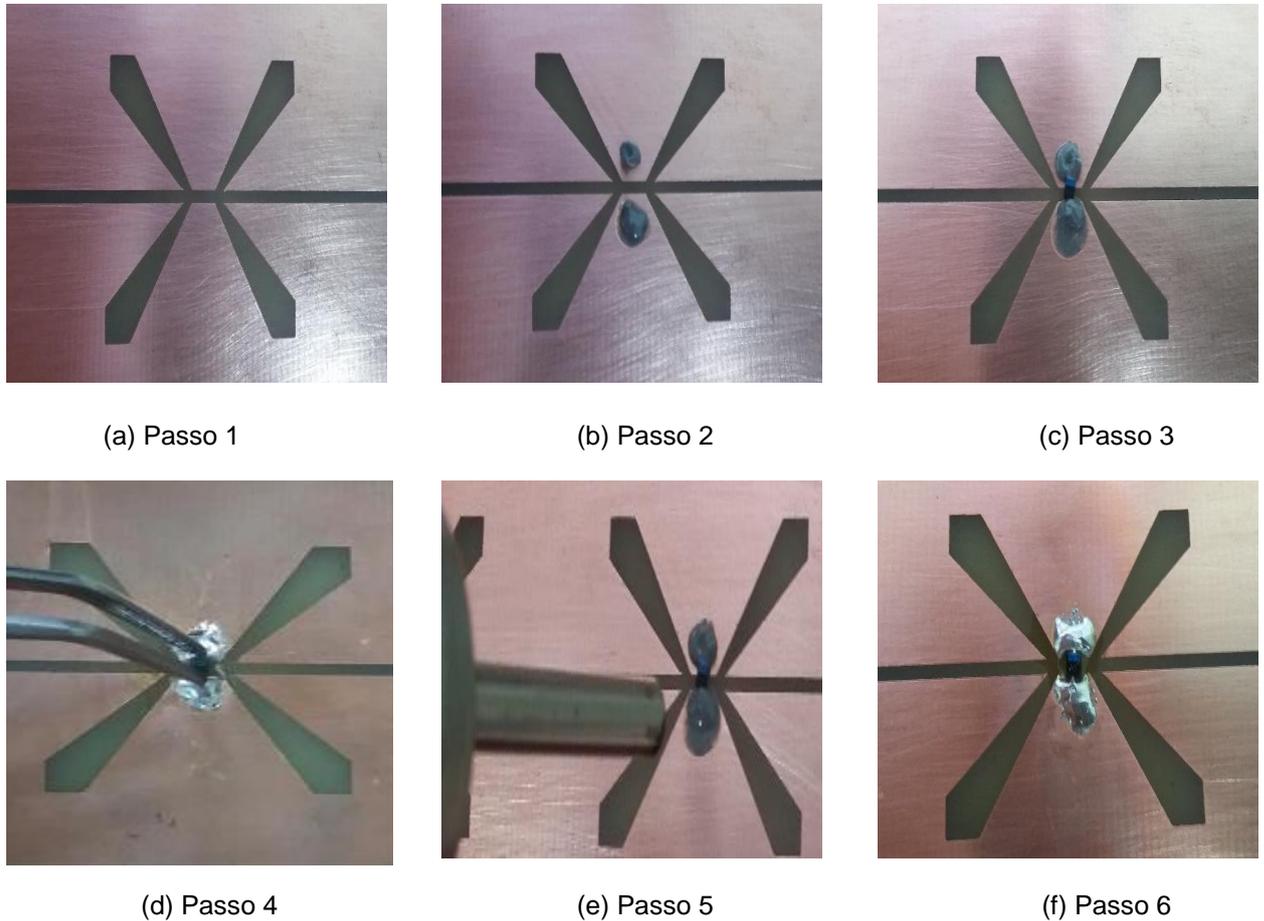
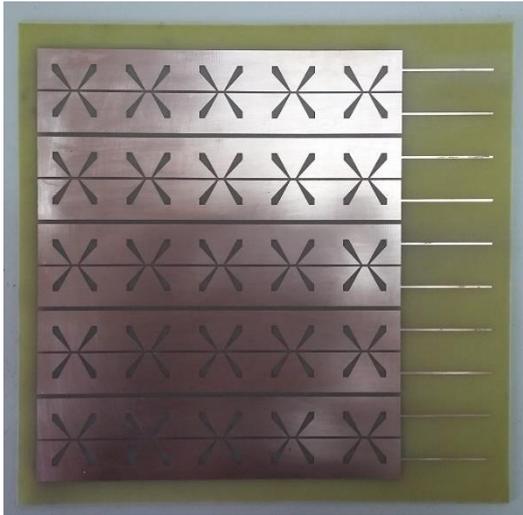


Figura 4-5- Passo a passo da fixação do diodo PIN.

Nota-se ainda na Fig. 4-6 as linhas de alimentação, inseridas na parte lateral da FSS, que apresentam um comportamento indutivo, servindo como um circuito de polarização simplificado.



(a) FSS antes da fixação do diodo PIN



(b) FSS após a fixação do diodo PIN

Figura 4-6- FSS fabricada

5. Resultados

A FSS foi projetada e fabricada utilizando um substrato de baixo custo, FR-4, com 1,5 mm de espessura, constante dielétrica $\epsilon_r = 4,4$ e tangente de perdas de 0,02. A geometria considerada para a célula unitária é apresentada na Fig. 5-1, sendo que a FSS apresenta um número total de 25 células, 5×5 elementos, cada um com 40 mm \times 40 mm, com uma configuração simétrica de 12 mm \times 12 mm. Além disso, foram introduzidas bordas entre cada linha de células unitárias com dimensão de 1 mm \times 40 mm, Fig. 5-2. Note-se que a parte em cor preta é apenas o adesivo. No centro de cada célula unitária foi introduzida uma fenda com dimensões 1 mm \times 40 mm, separando a célula unitária em duas partes. Linhas com 1 mm de largura foram introduzidas, Fig. 5-3, e por apresentarem um comportamento indutivo, servem como circuito de polarização [97], [98]. Desta maneira, cada linha de células unitárias pode ser controlada individualmente, Fig. 5-4. O protótipo foi fabricado utilizando técnicas de circuito impresso, por meio do procedimento de fixação de adesivos e posterior corrosão com percloroeto de ferro.

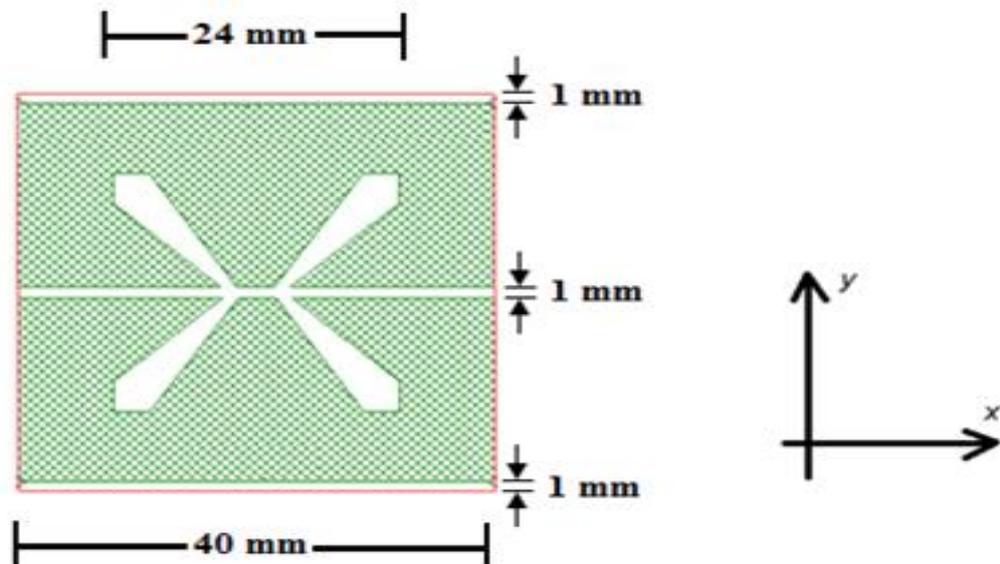


Figura 5-1- Geometria da FSS - 40 mm \times 40 mm.

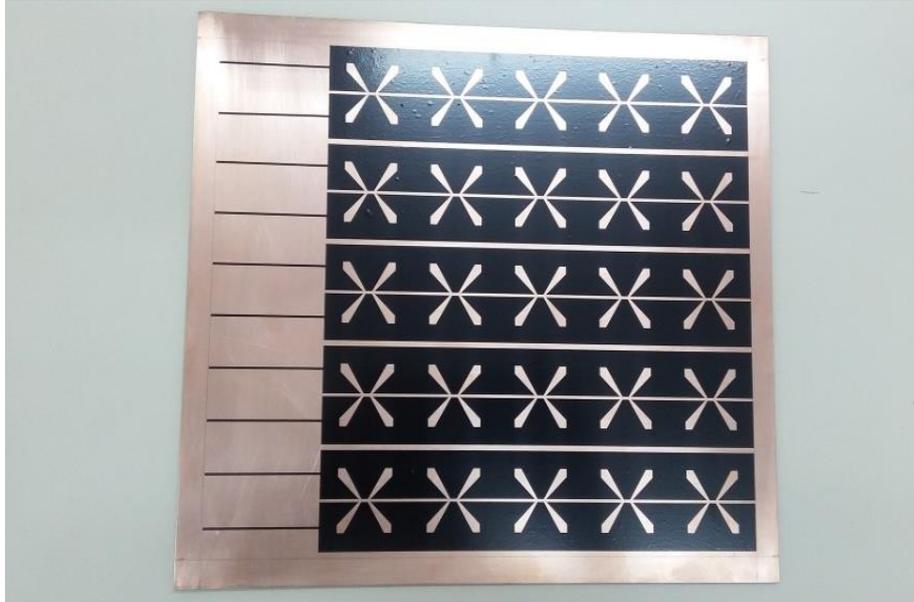


Figura 5-2 – FSS fabricada - Dimensões totais 200 mm x 200 mm, 5 x 5 células de 40 mm x 40 mm, sem diodos, antes do processo de corrosão.

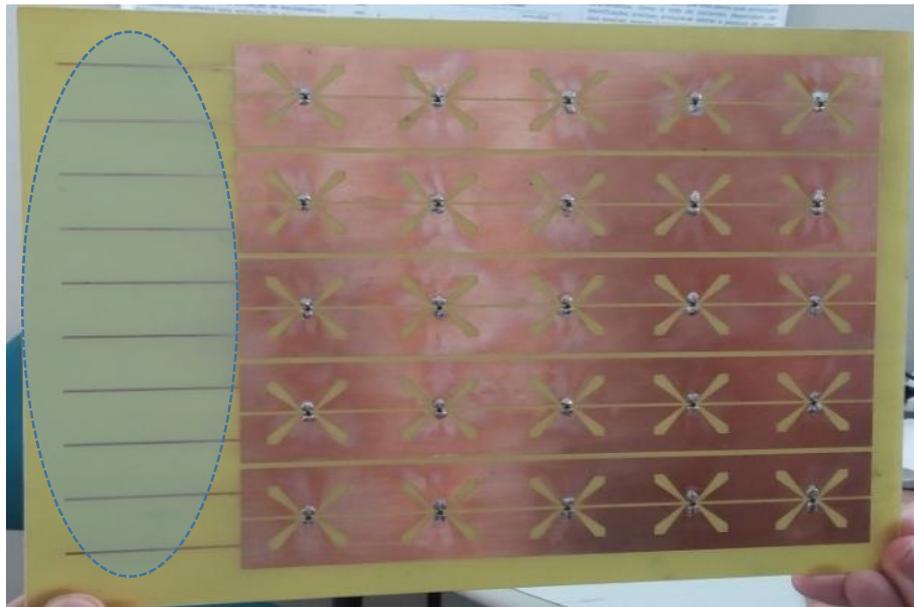


Figura 5-3 – FSS fabricada - Dimensões totais 200 mm x 200 mm, 5 x 5 células de 40 mm x 40 mm, com diodos fixados. Linhas de alimentação em destaque.

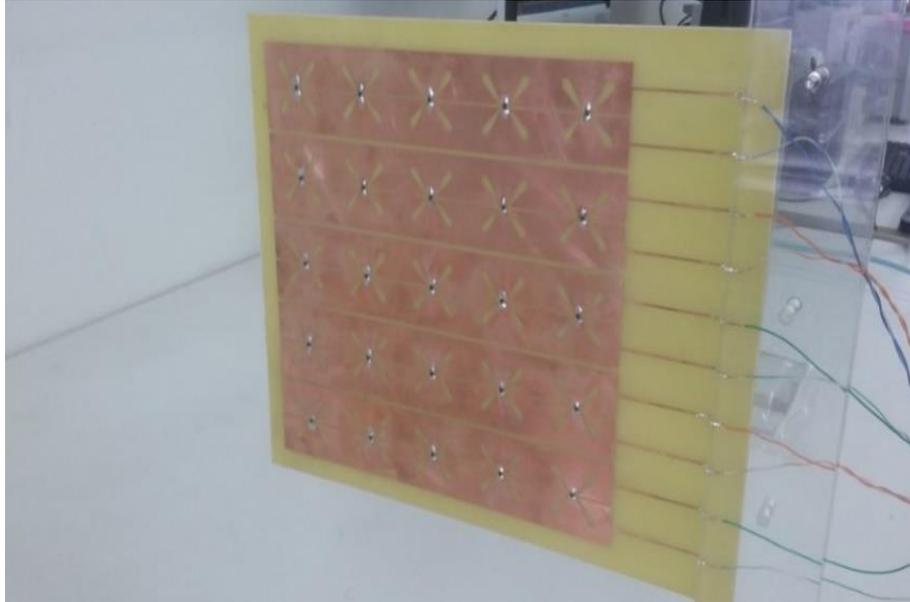


Figura 5-4 – Detalhe das linhas de alimentação.

Para a caracterização numérica foi utilizado o programa computacional WCIPAGA10, baseado no método iterativo das ondas, desenvolvido no GTEMA/IFPB. Na discretização da célula unitária foram utilizados 180×180 pontos, e no processo iterativo 150 iterações. Destaque-se que o número de pontos aqui citado é para o caso em que apenas uma célula unitária é analisada, ou seja, quando todas as linhas de células unitárias são ativadas ou desativadas simultaneamente.

Os resultados experimentais foram obtidos no Laboratório de Micro-ondas do GTEMA/IFPB, utilizando um analisador de redes Agilent E5071C e antenas tipo corneta, Pasternack, PE-9861-20, com ganho de 20 dB, além da fonte de tensão e resistores de 150Ω para limitar a corrente nos diodos Fig. 5-5.

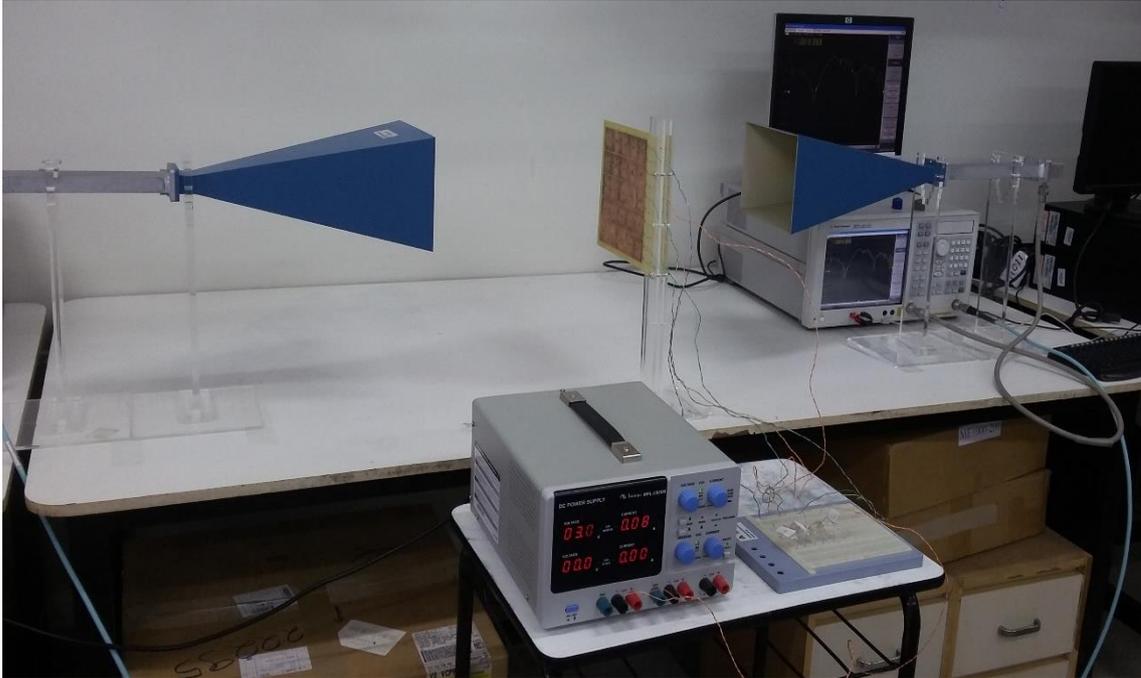


Figura 5-5 – Setup de medição.

A distância entre as duas antenas cornetas foi de aproximadamente 70 cm, operando na faixa de frequência 3,5 GHz a 7,0 GHz. O circuito de polarização dos diodos PIN é ilustrado na Fig. 5-6.

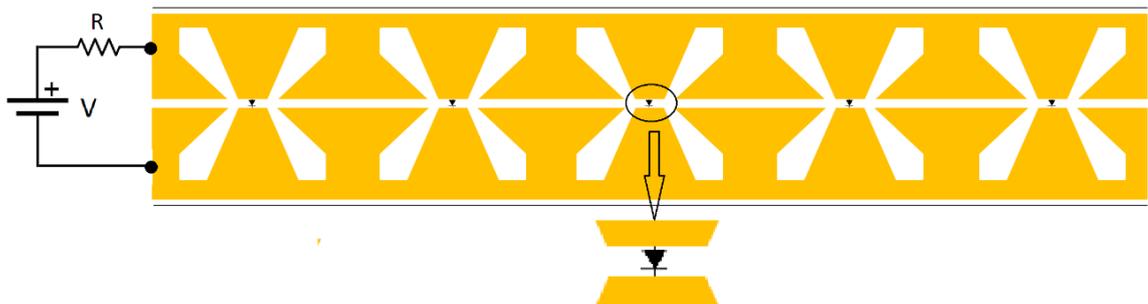


Figura 5-6 – Esquema ilustrativo do circuito de alimentação para uma linha da FSS.

Tanto na simulação numérica, como nos resultados experimentais, foram consideradas as polarizações x e y , com incidência da onda eletromagnética normal à FSS.

5.1. Comportamento da FSS com todas as linhas de células unitárias ativadas ou desativadas simultaneamente.

Neste caso, todas as cinco linhas das células unitárias estão submetidas à mesma tensão, simultaneamente. Dessa forma, todos os diodos PIN estarão ou no estado desligado, *OFF*, $V = 0,0$ V, ou no estado ligado, *ON*, $V = 2,5$ V.

5.1.1. Polarização x

Na Fig. 5-7 são apresentadas as respostas em frequência para a FSS considerando o estado desligado, *OFF*, 0,0 V. Os resultados numéricos e experimentais são apresentados de 3,5 GHz a 7,0 GHz. Os resultados experimentais se iniciam em 3,5 GHz em função das antenas utilizadas nas medições. Mesmo o diodo PIN sendo especificado para operar até 6 GHz, os resultados experimentais foram medidos até 7,0 GHz, pois se observa uma concordância entre os resultados numéricos e experimentais, indicando que essa faixa adicional de 6,0 GHz até 7,0 GHz, pode ser utilizada.

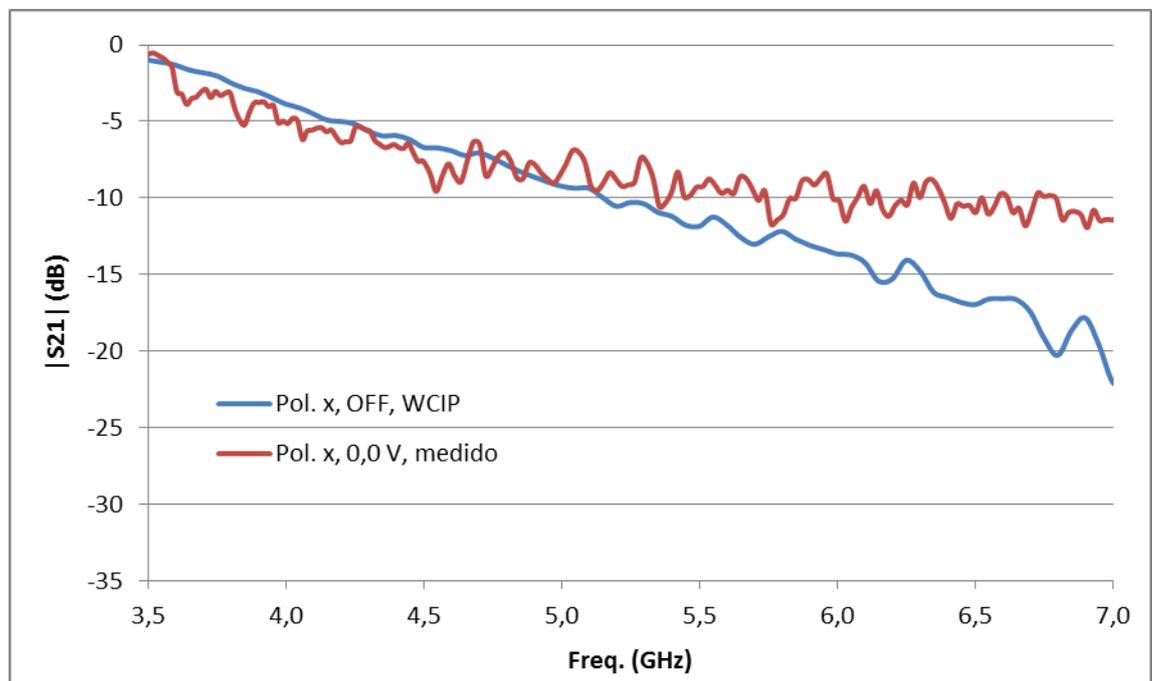


Figura 5-7 – Resposta da frequência, polarização x - estado *OFF*.

Para o estado ligado, *ON*, 2,5 V, as respostas em frequência são apresentadas na Fig. 5-8.

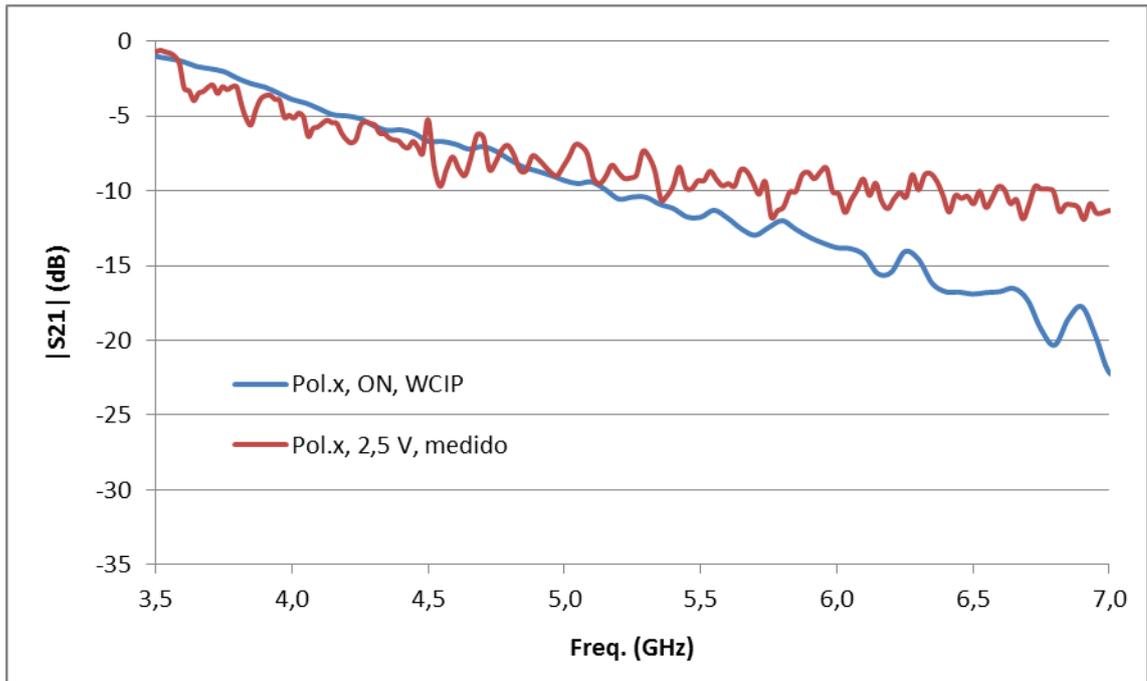


Figura 5-8 – Resposta em frequência, polarização x - estado ON.

Ao comparar as respostas em frequência dos estados *ON-OFF* para a polarização x, observa-se que praticamente não há diferenças entre os resultados, Fig. 5-9. Isto é esperado porque para a polarização x, o campo elétrico é praticamente nulo na região do diodo PIN.

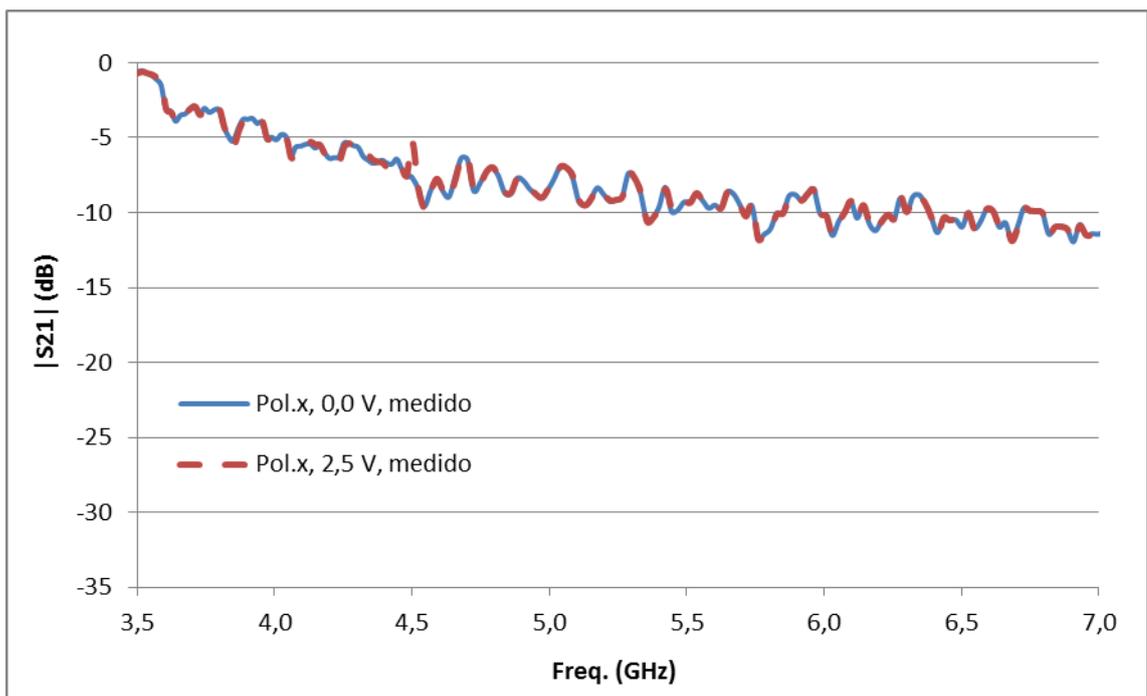


Figura 5-9 – Resposta da frequência, polarização x - ON-OFF

5.1.2. Polarização y

Analogamente à polarização y , na Fig. 5-10 as respostas em frequência da FSS para o estado desligado são apresentadas na faixa de 3,5 GHz a 7,0 GHz, observando-se uma boa concordância dos resultados medidos e simulados, principalmente para as frequências de ressonância. Para a faixa de frequência de interesse, 3,5 GHz a 7,0 GHz, essa boa concordância fica mais evidente.

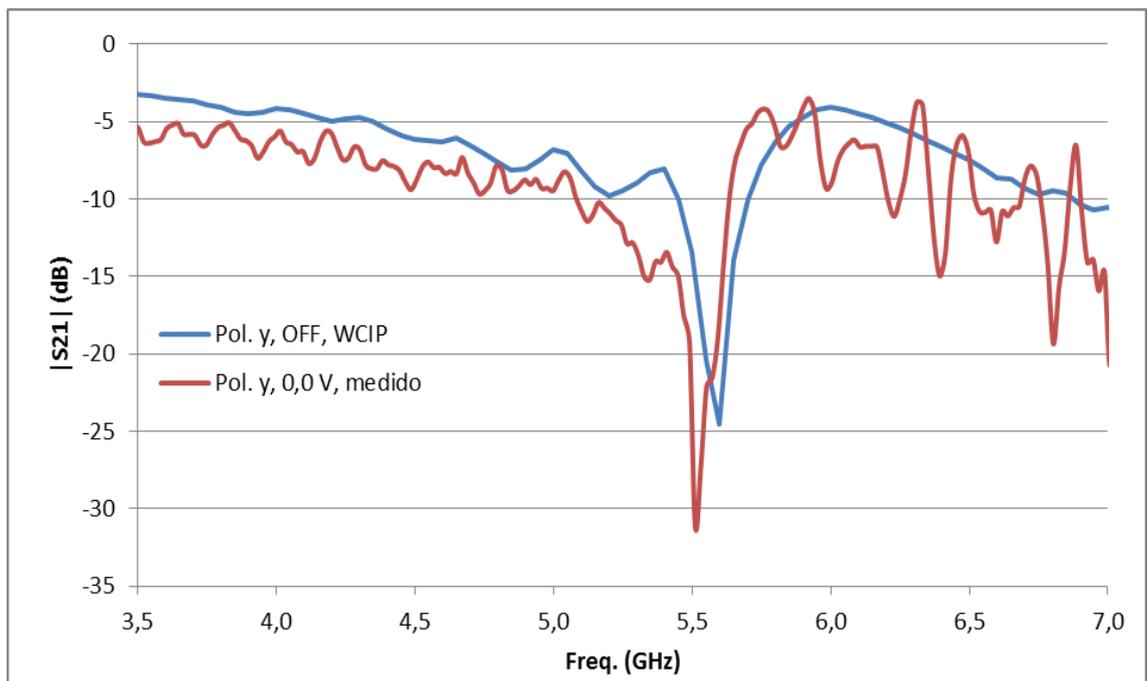


Figura 5-10 – Resposta da frequência, polarização y - estado *OFF*.

Para o estado *ON*, $V = 2,5$ V, as respostas em frequência são apresentadas na Fig. 5-11. Mesmo considerando um diodo ideal, observa-se uma concordância muito boa entre os resultados numéricos e medidos. Além disso, a ressonância observada em 6,25 / 6,50 GHz, com diodo fora da faixa de frequência de operação, indica que se pode trabalhar pelo menos até o limite de faixa de frequência superior, e, dependendo do caso, um pouco além desse limite.

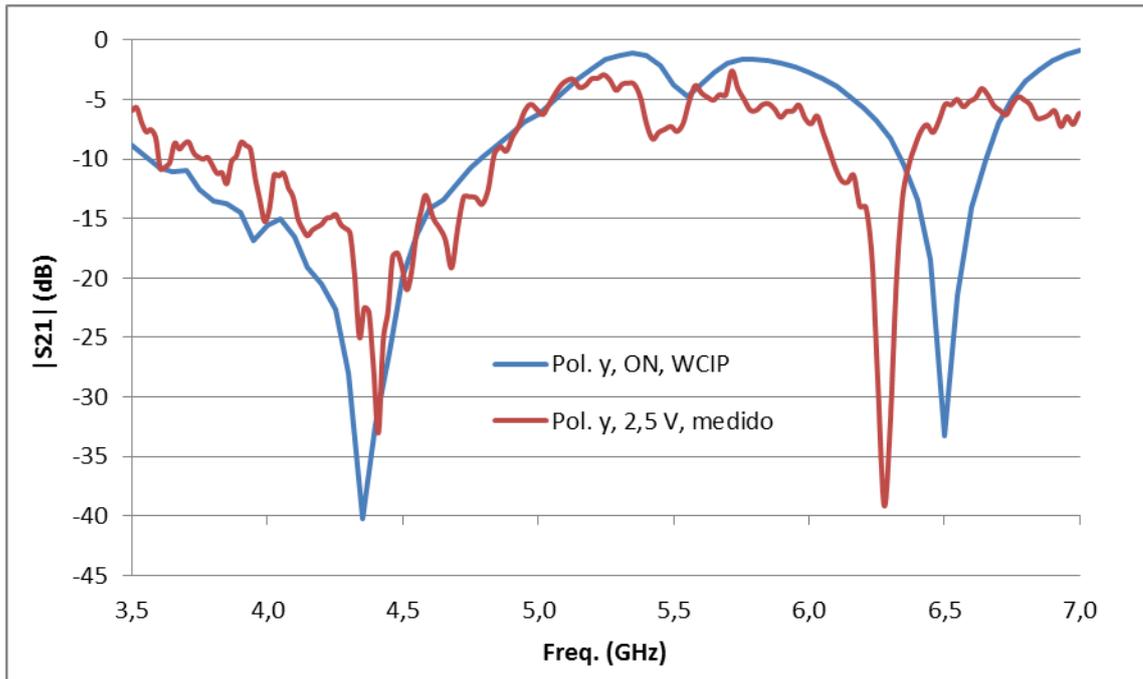


Figura 5-11 – Resposta da frequência, polarização y - estado ON.

Na Fig. 5-12 são comparados os resultados experimentais para os estados ligado e desligado. Ao comparar os estados *ON-OFF* para a polarização y, observamos que em 4,4 GHz, pelo menos, 20 dB de atenuação *OFF-ON*, que é um resultado muito interessante. Além disso, a segunda ressonância, em 6,25 GHz, pode ser explorada.

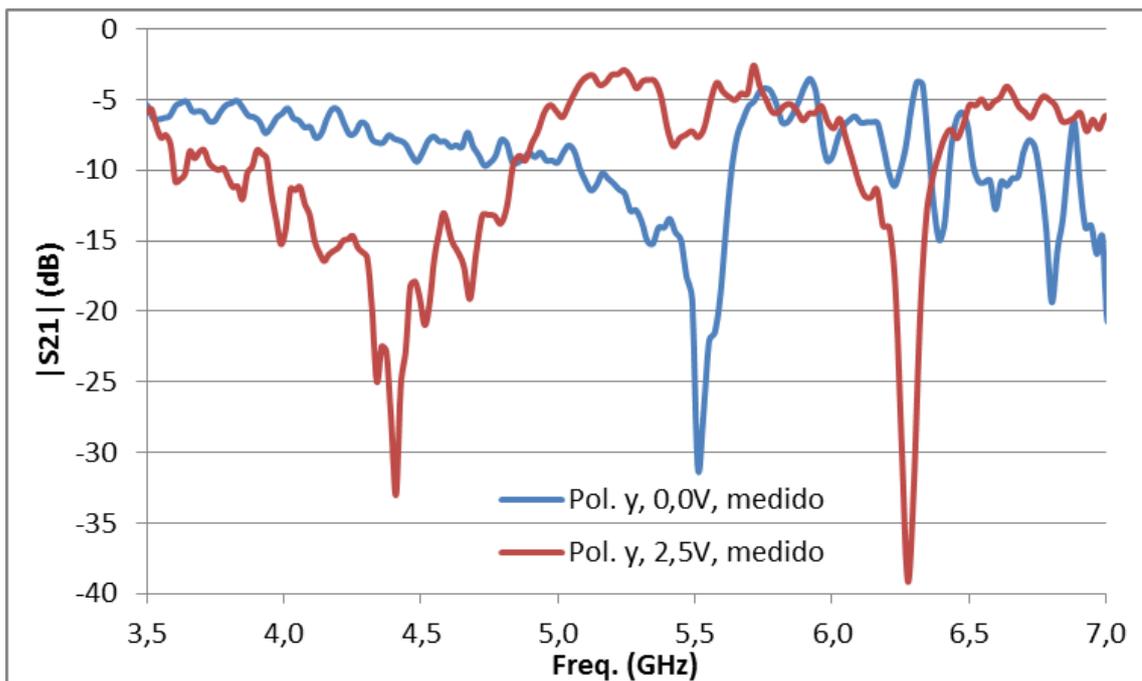


Figura 5-12 – Resposta da frequência, polarização y - estado ON-OFF.

5.2. Caracterização da FSS com diferentes níveis de tensão

Os resultados mostrados a seguir equivalem à resposta em frequência da FSS para diferentes níveis de tensão de polarização dos diodos PIN. Neste caso, apenas a polarização y é considerada. São apresentados resultados experimentais de 3,5 GHz a 7,0 GHz.

Nota-se na Fig. 5-13 a resposta em frequência nos níveis de tensão 0 V, 1,0 V, 2,0 V e 3,0 V. Quando o diodo está polarizado diretamente na tensão de 0 V, a FSS apresenta uma frequência de ressonância em 5,51 GHz e atenuação de -31,1 dB. Quando aumenta a tensão para 1,0 V desloca-se a frequência de ressonância para 4,36 GHz e atenuação de -22,7 dB. Já com tensão em 2,0 V surge outra frequência de ressonância em 4,38 GHz e atenuação de -34,7 dB. Com tensão de 3,0 V continua com a mesma frequência apenas diminuído a intensidade ressoante em 4,38 GHz e atenuação de -28,4 dB. Algumas oscilações aparecem após 6 GHz, faixa essa de interesse de operação do diodo PIN utilizado neste trabalho.

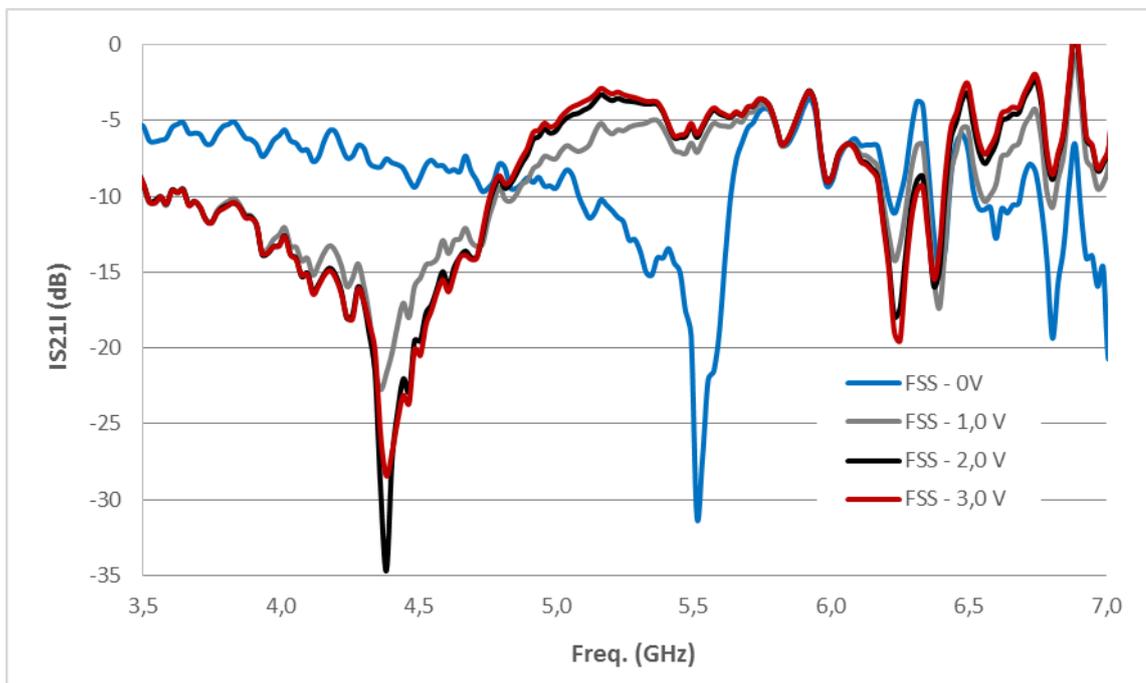


Figura 5-13– Resposta em frequência para os diferentes níveis de tensão, polarização direta.

As curvas apresentadas na Fig. 5-14 referem-se ao comportamento da frequência de ressonância, a partir dos diferentes níveis de tensão, -0 V, -1,0 V, -2,0 V, -3,0 V. Agora o diodo PIN encontra-se polarizado inversamente. Observa-se que as curvas

coincidem com todos os níveis de tensão. Surge algumas oscilações a partir de 6 GHz, destacando que o diodo opera na faixa de frequência até 6 GHz.

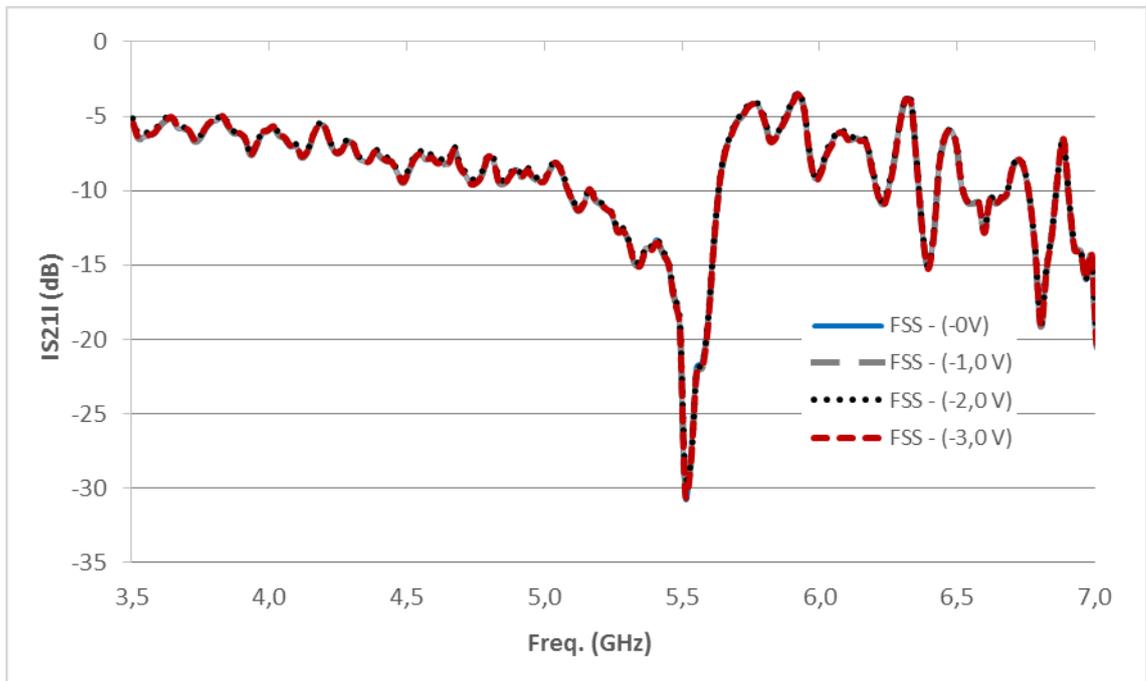


Figura 5-14– Resposta em frequência para os diferentes níveis de tensão, polarização inversa.

5.3. Caracterização da FSS com diferentes linhas de células unitárias ativadas

Considera-se aqui que as linhas de células unitárias não são todas ativadas simultaneamente. Apenas a polarização y é considerada, pois, como já visto anteriormente, a resposta em frequência da FSS não é afetada pelo funcionamento do diodo PIN para a polarização x . São apresentados os resultados experimentais na faixa de operação 3,5 GHz a 6,0 GHz.

É adotada a seguinte notação: “1” diodo PIN conduzindo, 3,0 V; “0”, diodo PIN não conduzindo, 0,0 V. Por exemplo, F01110 indica que a primeira e a quinta linha de células unitárias permanecem com os diodos PIN sem conduzir, enquanto que as nas demais linhas de células unitárias os diodos PIN conduzem. As configurações estão detalhadas na Fig.5-15.

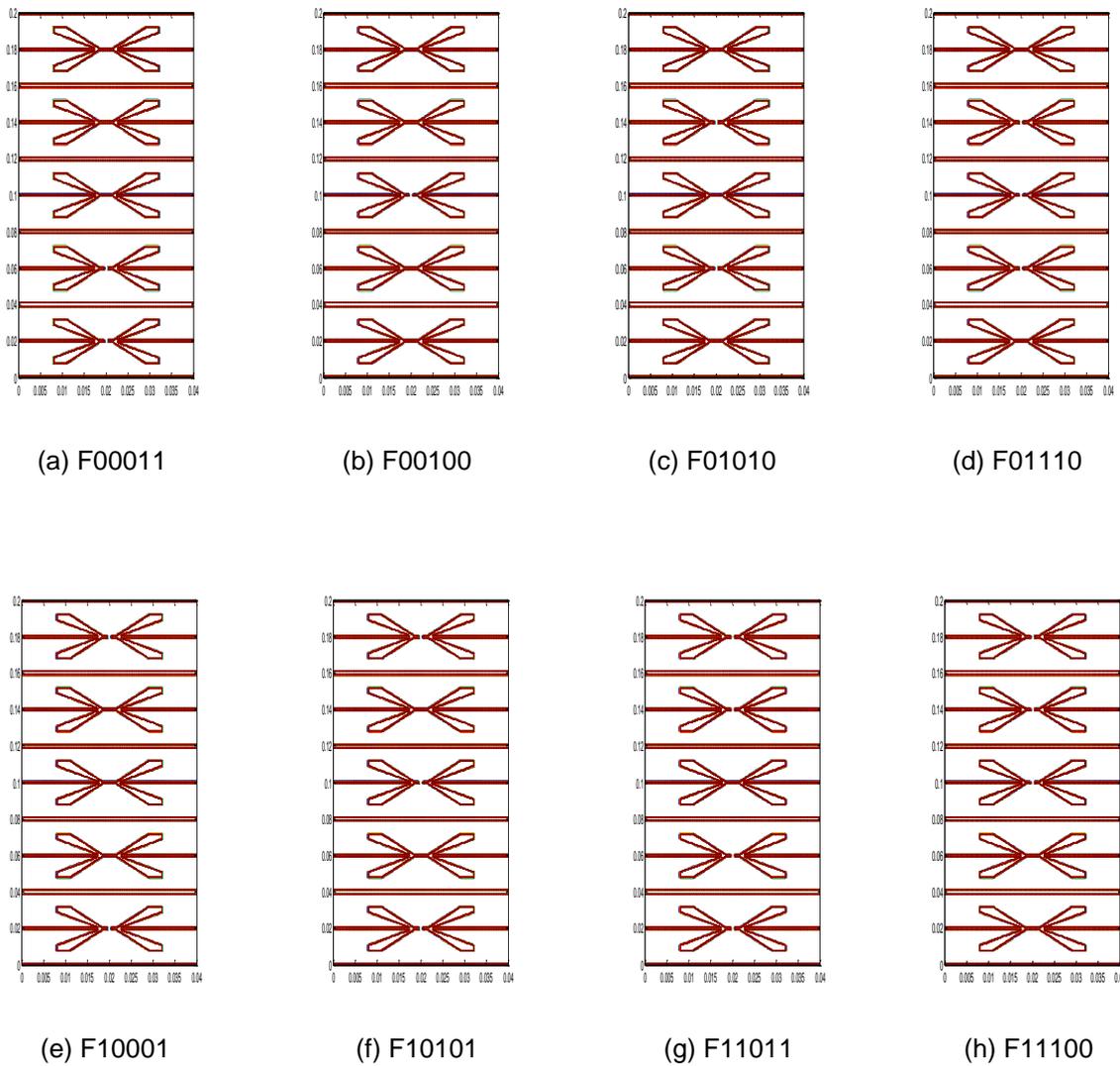


Figura 5-15– Representação das combinações da RFSS.

Inicialmente, sejam considerados os resultados experimentais para as respostas em frequência de todas as combinações analisadas, Fig. 5-16. Observa-se que as respostas em frequência variam com a configuração. Entretanto, algumas características podem ser agrupadas como será detalhado a seguir.

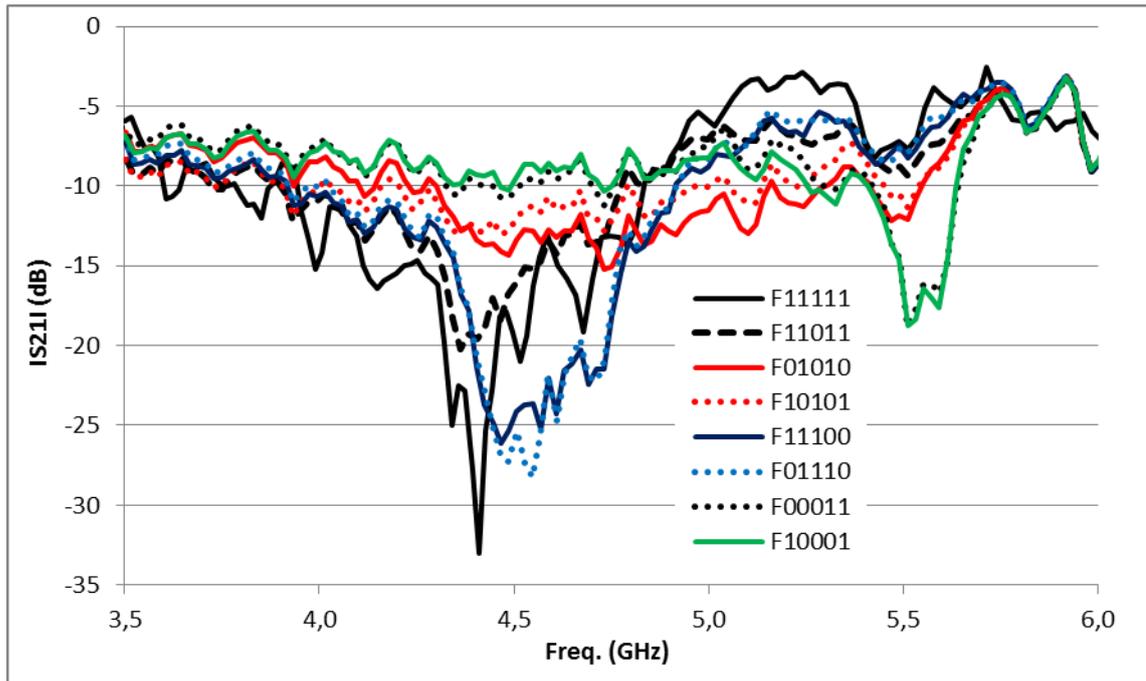


Figura 5-16– Resposta em frequência para as diferentes configurações das FSS.

Na Fig. 5-17 são comparadas as configurações F11111 e F11011. Como apenas uma linha de células unitárias difere uma configuração da outra, as duas praticamente apresentam a mesma frequência de ressonância, modificando apenas a intensidade da ressonância.

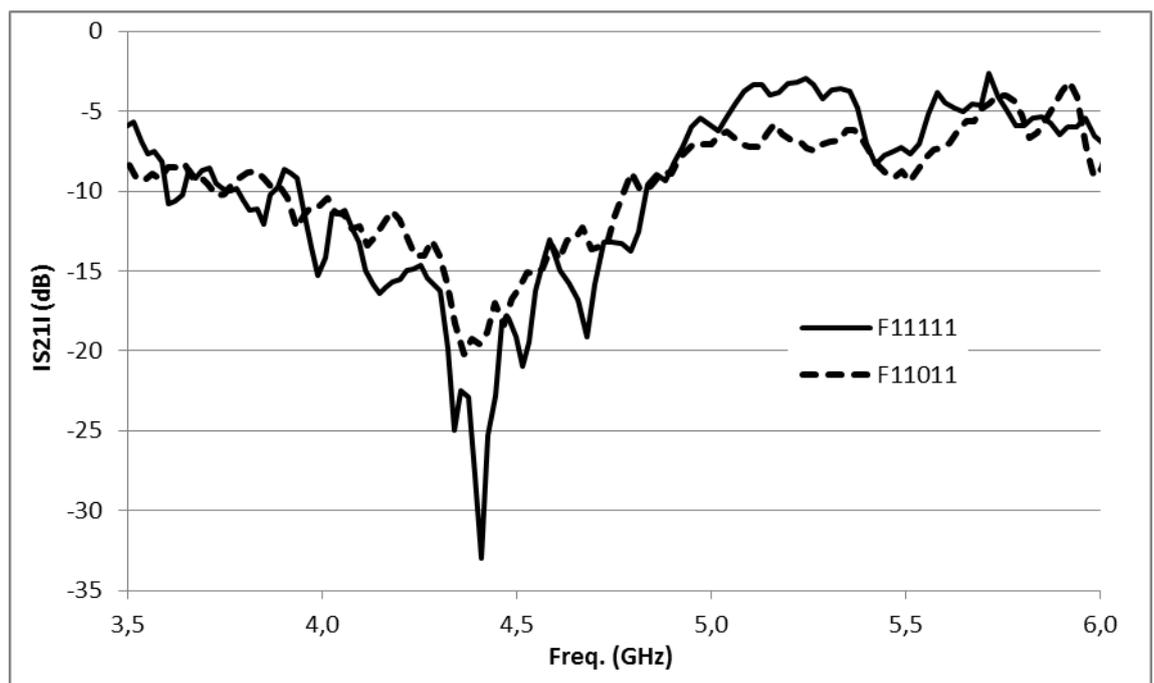


Figura 5-17– Comparação da resposta em frequência para as configurações F11111 e F11011.

Na Fig. 5-18 são comparadas as configurações F11100 e F01110. Inicialmente, comparando com a configuração F11111, observa-se uma maior frequência de ressonância, assim como uma maior largura de banda. Por outro lado as configurações F11100 e F01110 apresentam praticamente a mesma resposta em frequência, o que se justifica quando considera-se que essas estruturas são periódicas e, teoricamente, infinitas. Assim sendo, as estruturas F11100 e F01110 são equivalentes, como pode ser visto na Fig. 5-19.

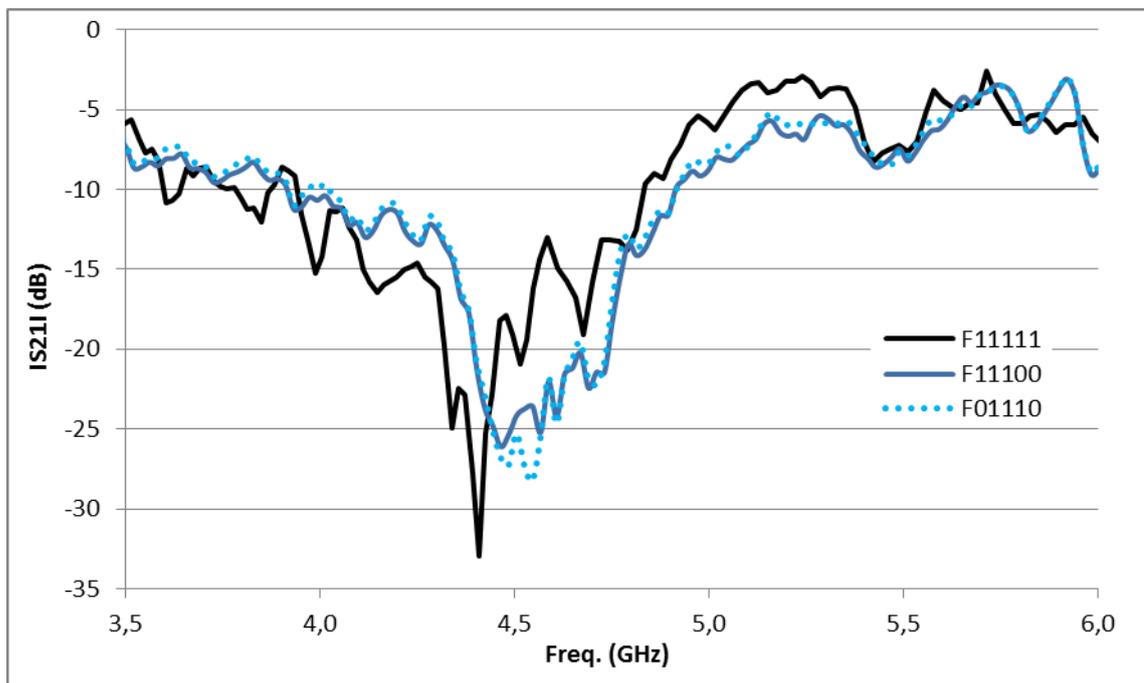


Figura 5-18– Comparação da resposta em frequência para as configurações F11100 e F01110.

1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

a) Configuração F11100

0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

b) Configuração F01110

1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

c) Configuração F01110 deslocada, equivalente à configuração F11100.

Figura 5-19–Configurações F11100 e F11100 deslocada.

Na Fig. 5-20 são comparadas as configurações F10001 e F00011. Comparado com a configuração F11111, praticamente não se observa a ressonância em torno de 4,4 GHz, uma vez que apenas duas linhas de células unitárias são ativadas. Novamente se observa a equivalência das configurações F10001 e F00011. Um

comportamento análogo é observado para as configurações F01010 e F10101, Fig. 5-21.

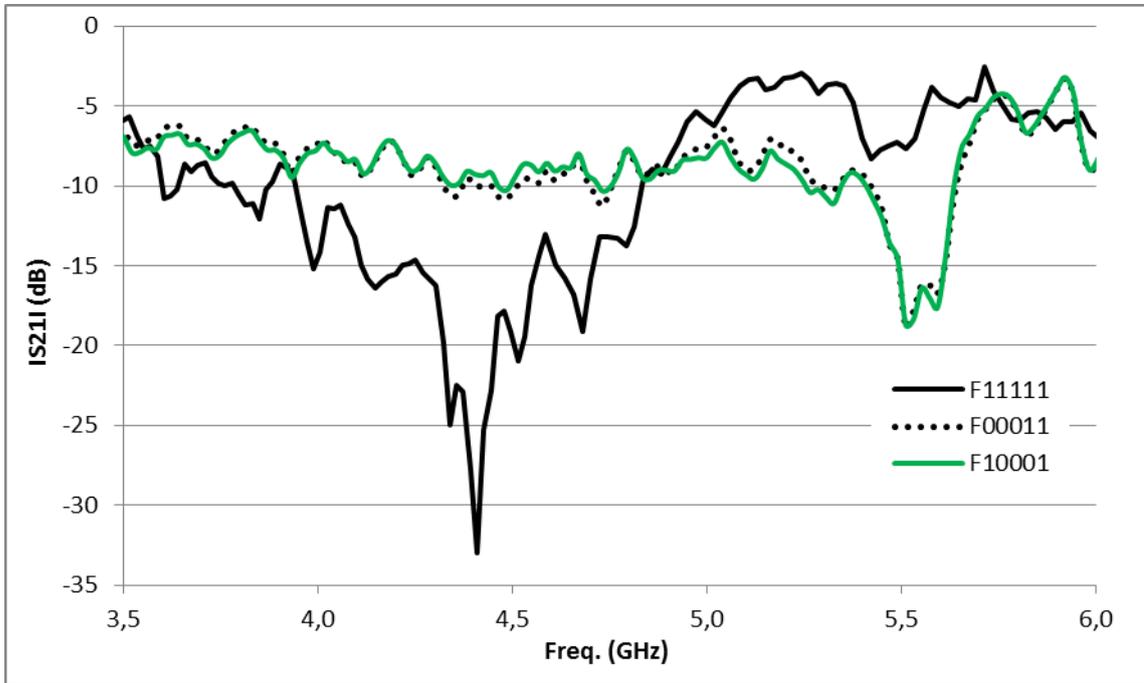


Figura 5-20– Comparação da resposta em frequência para as configurações F10001 e F00011.

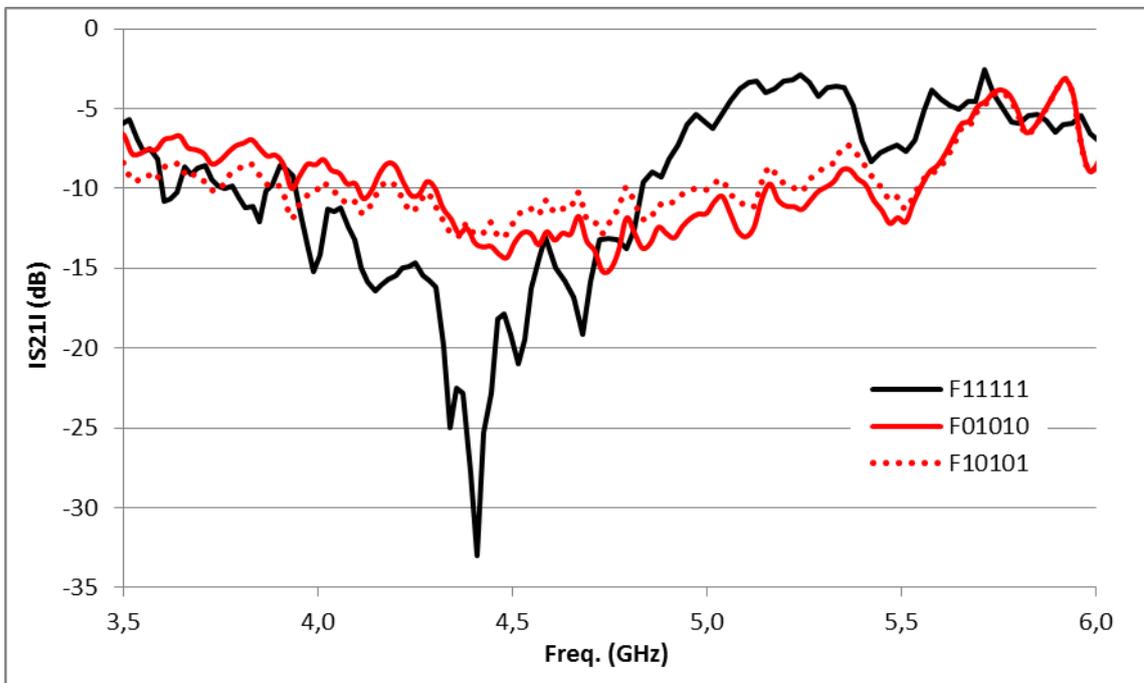


Figura 5-21– Comparação da resposta em frequência para as configurações F01010 e F10101.

Concluindo esta seção, verifica-se que a resposta em frequência da FSS é modificada de acordo com a configuração adotada, ou seja, com as linhas de células ativadas e desativadas. Entretanto, é preciso ter em mente que algumas dessas configurações são equivalentes.

6. Conclusão

6.1. Considerações finais

Este trabalho teve por objetivo apresentar a caracterização de uma superfície seletiva em frequência reconfigurável, RFSS, baseada na geometria estrela de quatro braços tipo fenda com bordas, tendo o diodo PIN como elemento de comutação.

Durante o trabalho foram observados os comportamentos numérico e experimental da RFSS. Na caracterização numérica foram obtidos resultados a partir do método iterativo das ondas, WCIP, utilizando o *software* WCIPAGA10. O processo de fabricação da FSS e da fixação dos diodos PIN foi descrito, assim como o procedimento experimental.

Foram considerados para os resultados numéricos e experimentais as polarizações x e y , com incidência da onda eletromagnética normal à FSS, sendo considerados os estados ligado, *ON*, e desligado, *OFF*. Inicialmente foi analisado o comportamento da FSS com todas as linhas de células unitárias ativadas ou desativadas simultaneamente. Observou-se que para a polarização x , a comutação do diodo PIN, *ON* ou *OFF*, não altera a resposta em frequência da FSS. Para a polarização y observa-se claramente a reconfiguração da FSS, obtendo-se uma diferença de no mínimo 20 dB entre os estados *ON* ou *OFF*. Para as polarizações x e y , estados de comutação *ON* e *OFF*, verificou-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais.

Foi realizada a caracterização da RFSS com diferentes níveis de tensão de polarização dos diodos PIN, sendo possível identificar a partir de qual valor de tensão os diodos mudam de estado de comutação. Os diodos PIN foram polarizados reversamente, com diferentes níveis de tensão e verificou-se que, praticamente, não ocorria alteração na resposta em frequência da FSS, quando comparada a tensão de 0,0 V. a

Foi ainda analisada a RFSS com diferentes linhas de células unitárias ativadas, destacando-se que é preciso considerar que algumas combinações dos estados de ativação das linhas de células unitárias são equivalentes.

Trabalhos futuros

Como proposta para continuidade deste trabalho, novas pesquisas podem ser desenvolvidas, como exemplo:

- Investigar diferentes geometrias;
- Utilizar outro tipo de elementos de comutação, como, por exemplo, o diodo varicap ou chaves MEMS;
- Modelar o diodo com os seus parâmetros fornecidos pelo fabricante;
- Comparar numericamente outros métodos de simulação, a exemplo do HFSS, CST;
- Aplicar a geometria proposta em antenas inteligentes;

Referências

- [1] P. Kong, X. W. Yu, L. Miao and J. J. Jiang, "Switchable frequency selective surfaces absorber/reflector for wideband applications," *Ultra-WideBand (ICUWB), 2014 IEEE International Conference on. IEEE*, Paris, September 2014.
- [2] J. H. Barton, C. R. Garcia, E. A. Berry, R. G. May, D. T. Gray and R. C. Rumpf, "All-dielectric frequency selective surface for high power microwaves," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 62, n.7, pp. 3652-3656, 2014.
- [3] I. Acharya and R. Ramesh, "FSS reflector surface for gain enhancement of a monopole slot antenna," In *Communications and Signal Processing (ICCSP), 2015 International Conference on. IEEE*, Chengdu, October 2015.
- [4] F. Yu, L. Zhang, Q. H. Liu, L. Ye and Y. Liu, "Cost efficiency adaptive antenna system based on active frequency selective surface," In *Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB), 2015 IEEE International Conference on. IEEE*, Montreal, October 2015.
- [5] Josiel do Nascimento Cruz, **Caracterização de FSS com Geometria Matrioska Aberta**, Paraíba: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Dissertação de Mestrado, 2015.
- [6] Hilner de Paiva Almeida Ferreira, **Matrioska: Uma Proposta de Geometria para FSS Multibandas**, Paraíba: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Dissertação de Mestrado, 2014.
- [7] Isaac Silva Sousa Lima, **Caracterização de FSS com Geometria Estrela de Quatro Braços**, Paraíba: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Dissertação de Mestrado, 2014.
- [8] R. D. Gomes, M. S. Alencar, I. E. Fonseca and A. C. Lima Filho. "Desafios de redes de sensores sem fio industriais," *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, vol. 4, pp. 1-12, 2014.
- [9] M. Virili, A. Georgiadis, K. Niotaki, A. Collado, F. Alimenti, P. Mezzanotte, L. Roselli and N.B. Carvalho, "Design and optimization of an antenna with thermo-electric generator (TEG) for autonomous wireless nodes," In *RFID Technology and Applications Conference (RFID-TA), 2014 IEEE*, Tampere, Finland, pp. 21-25, 8-9 Sep, 2014.

- [10] Leidiane Carolina Martins de Moura, **Caracterização de FSS com Geometria Estrela de Quatro Braços Tipo Fenda**, Paraíba: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Dissertação de Mestrado, 2015.
- [11] M. Md. Shukor, M. Z. A. Abd Aziz, B. H. Ahmad, M. K. Suaidi, M. F. Johar, M. A. Othman and M. F. Abd Malek, "Characteristic impedance modelling of circular loop and square loop frequency selective surface (FSS) on hybrid material," In *Technology Management and Emerging Technologies (ISTMET), 2014 International Symposium on IEEE*, Bandung, May 2014.
- [12] R. D. Seager, A. Chauraya, J. Bowman, M. Broughton and N. Nimkulrat, "Fabrication of fabric based frequency selective surfaces (FSS)," In *Antennas and Propagation (EuCAP), 2014 8th European Conference on . IEEE*, Haia, April 2014.
- [13] Aqeel H. Naqvi and T. Farooq, "A super wideband printed antenna with enhanced gain using FSS structure," *Applied Sciences and Technology (IBCAST), 2015 12th International Bhurban Conference on . IEEE*, Islamabad, Jan 2015.
- [14] S. Monni, D. J. Bekers, M.V. Wanum, R.V Dijk, A. Neto, G. Gerini and F. E. Van Vliet, "Protection of RF electronics using tuneable frequency selective surfaces," *EuCAP 2009*. Berlin, March 2009.
- [15] A. Mansoul, F. Ghanem, M. R. Hamid and M. Trabelsi, "A selective frequency-reconfigurable antenna for cognitive radio applications," *Antennas and Wireless Propagation Letters*, IEEE, vol. 13, pp. 515-518, 2014.
- [16] Jiayin Roberts, **Design of a Secure Electromagnetic Building**, Tese de Doutorado, University of Sheffield, 2014.
- [17] A. Vallecchi, R. J. Langley and A. G. Schuchinsky. "Reconfigurable frequency selective surfaces with interleaved spiral slots," *Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), IEEE*, Memphis, July 2014.
- [18] F. Deng, X. Xi, J. Li, and F. Ding, "A method of designing a field-controlled active frequency selective surface," *Antennas and Wireless Propagation Letters*, IEEE, 14, pp. 630-633, 2015.
- [19] F. Deng, "Design of a new active frequency selective surface (FSS)," *Antennas and Propagation (APCAP), 2014 3rd Asia-Pacific Conference on . IEEE*, July 2014.
- [20] S. Thakur, R. L. Yadava and S. Das, "AFSS superstrate integrated microstrip antennas- a progressive study," *3 rd IEEE International Advance Computing Conference (IACC-2013)*, Ghaziabad, pp. 22-23, Feb 2013.

- [21] B. Sanz-Izquierdo and E. Parker, "Dual polarized reconfigurable frequency selective surfaces," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 62, n. 2, pp.764-771, 2014.
- [22] G. Kiani, K. L. Ford, L. G. Olsson, K. P. Esselle and C. J. Panagamuwa, "Switchable frequency selective surface for reconfigurable electromagnetic architecture of buildings," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 58, n. 2, pp. 581-584, 2010.
- [23] E. Parker and S. B. Savia, "Active frequency selective surfaces with ferroelectric substrates," *Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings*, vol. 148, no. 2, pp. 103-108, Apr 2001.
- [24] Communications. [Online]. Available: <https://www.shef.ac.uk/eee/research/cr/research/tuneable>. [Acesso em 03 Janeiro de 2016].
- [25] Engineering and Digital Arts. [Online]. Available: https://www.eda.kent.ac.uk/research/theme_project.aspx?pid=144. [Acesso em 04 Janeiro de 2016].
- [26] B. A. Munk, **Frequency Selective Surfaces - Theory and Design**, New York: Wiley, 2000.
- [27] J. C. Vardaxoglou, **Frequency Selective Surfaces - Analysis and Design**, England: Research Studies Press, 1997.
- [28] André Nascimento da Silva, **Caracterização de FSS com Geometria em Forma de U**, Dissertação de mestrado do IFPB, João pessoa – PB, abril 2014.
- [29] F. Bayatpur, **Metamaterial-Inspired Frequency-Selective Surfaces**, Tese de Doutorado. The University of Michigan, 2009.
- [30] A. L. P. S. Campos, **Superfícies Seletivas em Frequência – Análise e Projeto**. Editora IFRN, Natal 2009.
- [31] P. C. Kim, W. S. Chin, D. G. Lee and I. S. Seo, "EM characteristics of the RAS composed of E-glass/epoxy composite and single dipole FSS element," *Composite Structures*, vol. 75, pp. 601-609, 2006.
- [32] X. Li and J. Yun-Feng, "Analysis on transmission properties of Ka waveband frequency selective surface," *Microwave Conference Proceedings (CJMW)*, Hangzhou, April 2011.
- [33] R. Mittra, C. H. Chan and T. Cwik, "Techniques for analyzing frequency selective surfaces – a review," *IEEE Proceedings*, vol.12, pp. 1593-1615, 1988.

- [34] P. H. F. Silva, A. L. P. S. Campos and E. E. C. Oliveira, "Design of miniaturized frequency selective surfaces using Minkowski Islandfractal," *Journal of Microwaves, Opt. Electromagnetic Applications*, vol. 9, no. 1, 2010.
- [35] S. Narayan, K. Prasad, R. U. Nair, e R. M. Jha, "A novel EM analysis of double-layered thick FSS based on MM-GSM technique for radome applications," *Prog. Electromagn. Res. Lett.*, vol. 28, pp. 53–62, 2012.
- [36] D. B. Webb, E. Michielssen, e R. Mittra, "Thick frequency selective surfaces," in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 1992 Digest*, 1992, pp. 1795–1798 vol.4.
- [37] K. Elmahgoub, F. Yang, Z. A. Elsherbeni, "Desing of Novel Reconfigurable Frequency Selective Surfaces with Two Control Techniques," *Progress In Eletromagnetics Research C*, vol. 35, pp. 135-145, 2013.
- [38] Nieremberg José Pereira de Lyra Ramos, **Caracterização de Antena Tipo Refletor de Canto Utilizando Superfícies Seletiva em Frequência**, Dissertação de Mestrado, IFPB, João Pessoa, Brasil, 2016.
- [39] Ghaffer Iqbal Kiani Passive, **Active e Absorbing Frequency Selective Surfaces for Wireless Communication Applications**, Sindney, Australia: Macquarie University, Tese de Doutorado, 2009.
- [40] P. C. Kim, D. G. Lee, I. S. Seo and G. H. Kim, "Low-observable radomes composed of composite sandwich constructions and frequency selective surface," *Compos Sci Technol*, vol. 68, no. 9, pp. 2163-2170, 2008.
- [41] Y. Rahmat-Samii and A. N. Tulintseff, "Diffraction analysis of frequency selective reflector antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.41, n. 4, pp. 476-487, 1993.
- [42] S. P. Pratim, "Frequency selective surfaces: Development and prospect," *Computer, Communication, Control and Information Technology (C3IT), 2015 Third International Conference on. IEEE*, West Bengal, February 2015.
- [43] Robson Hebraico Cipriano Maniçoba, **Estudo Comparativo de Técnicas de Cascadeamento de Superfícies Seletivas em Frequência**, Dissertação de Mestrado em Engenharia elétrica, UFRN, Natal, 2009.
- [44] M. Gustafsson, A. Karlson, A. P. P. Rebelo, B. Widenberg, "Design of frequency selective windows for improved indoor outdoor communications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, pp. 1897–1900, 2006.

- [45] R. Dubrovka, J. Vazquez, C. Parini and D. Moore, "Equivalent circuit method for analysis and synthesis of frequency selective surfaces," In *Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings*, vol.153, n. 3, pp. 213-220, 2006.
- [46] A. Fallahi, M. Mishrikey, C. Hafner, and R. Vahldieck, "Efficient procedures for the optimization of frequency selective surfaces," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, n. 5, pp. 1340-1349, 2008.
- [47] W. C. Gibson, **The Method of Moments in Electromagnetics**, New York, USA: Chapman & Hall /CRC, 2008.
- [48] M. N. O. Sadiku, **Elements of Electromagnetics**, 3rd. Ed., Oxford University Press, 2001.
- [49] J. L Volaskis, A. Chatterjee, and L. C. Kempel, "Finite Element Method for Electromagnetics, Antennas, Microwave Circuits, and Scattering Applications," Florida, USA: *Wiley-IEEE Press*, 1998.
- [50] T. Itoh, G. Pelosi and P. P. Silvester, **Finite Element Software for Microwave Engineering**, New York: Wiley, 1996.
- [51] P. Harms, R. Mittra and W. Ko, "Implementation of the periodic boundary condition in the finite-difference time-domain algorithm for FSS structures," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, pp. 1317-1324, August 2002.
- [52] N. Kaneda, B. Houshmand and T. Itoh, "FDTD analysis of dielectric resonators with curved surfaces," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 45, pp. 1645-1649, 1997.
- [53] M. Titaouine, N. Raveu, A. G. Neto, and H. Baudrand, "The WCIP method: Theory and applications," *Advances in Engineering Research*, vol. 6, pp. 143-176, December 2008.
- [54] M. Titaouine, A. G. Neto, H. Baudrand, and F. Djahli, "WCIP method applied to active frequency selective surfaces," *Journal of Microwaves*, vol. 6, pp. 1-16, 2007.
- [55] André Nascimento da Silva, **Análise dos Campos Eletromagnéticos de FSS com Geometria Fractal**, João Pessoa, PB: IFPB, Trabalho de conclusão de curso, 2012.
- [56] T. K. Wu, **Frequency Selective Surfaces and Grid Arrays**, New York: John Wiley & Sons, 1995.
- [57] T. K. Chang, R. J. Langley, and E. A. Parker, "Frequency selective surfaces on biased ferrite substrates," *IEE Electronic Letter*, vol. 30, n. 15, pp. 1193-1194, 1994.

- [58] J. -C. Zhang, Y. -Z. Yin, and R. Yi, "Resonant characteristics of frequency selective surfaces on ferrite substrates," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 95, pp. 355-364, 2009.
- [59] S. V. Hum and P. -C. Julien. "Reconfigurable reflectarrays and array lenses for dynamic antenna beam control: a review," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 62, n. 1, pp. 183-198, 2014.
- [60] K. ElMahgoub, F. Yang, and A. Z. Elsherbeni, "Design of novel reconfigurable frequency selective surfaces with two control techniques," *Progress In Electromagnetics Research C*, vol.35, pp. 135-145, 2013.
- [61] S. N, Azemi, K. Ghorbani and W.S. Rowe, "A reconfigurable FSS using a spring resonator element," *Antennas and Wireless Propagation Letters*, IEEE, vol. 12, pp. 781-784, 2013.
- [62] BAR 6403W E6327 Infineon Technologies | Mouser, [ONLINE].Available: file:///C:/Users/IFPB/Downloads/BAR%206403W%20E6327%20Infineon%20Technologies%20_%20Mouser.pdf. [Acesso em 25 Setembro 2015].
- [63] J. Yuan, S. Liu, X. Kong, and H. Yang, "A reconfigurable frequency selective surface for tuning multi-band frequency response separately," In *Antennas & Propagation (ISAP), 2013 Proceedings of the International Symposium on*. IEEE. vol. 2, pp. 1288-1290, Nanjing, October 2013.
- [64] H. Zahra, S. Rafique, M.F. Shafique, and K. P. Esselle, "A switchable frequency selective surface based on a modified Jerusalem-Cross unit cell," In *Antennas and Propagation (EuCAP), 2015 9th European Conference on* , pp.1-2, Lisbon, April 2015.
- [65] A. Edalati, and T. Denidni, "Frequency selective surfaces for beam-switching applications," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 61, n. 1, pp. 195-200, 2013.
- [66] M. Safari, C. Shafai, and L. Safai, "Frequency selective surface implemented using MEM-switched ground plane slots," In *Wireless Information Technology and Systems (ICWITS), 2012 IEEE International Conference on*. IEEE, pp. 1-4, Maui, November 2012.
- [67] X. Liang, L. Li, J. A. Bossard, and D. H. Werner, "Reconfigurable frequency selective surfaces with silicon switches," In *Antennas and Propagation Society International Symposium 2006*, IEEE, pp. 189-192, 2006.
- [68] M.A. Habib, M. N. Jazi, A. Djaiz, M. Nedil, and T. Denidni, "Switched-beam antenna based on EBG periodic structures," In *Microwave Symposium Digest, 2009. MTT'09. IEEE MTT-S International*, IEEE, pp. 813-816, 2009.

- [69] Francisco Carlos Gurgel da Silva Segundo, **Análise e Projeto de Superfícies Seletivas em Frequência Multibanda e/ou Banda Larga**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFRN, Natal, 2014.
- [70] A. Tennant and B. Chambers, "A single-layer tuneable microwave absorber using an active FSS," In *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 14, no. 1, pp. 46-47, Jan. 2004.
- [71] L. B. Sjögren, Hong-Xia Liu, Xiaohui Qin, C. W. Domier and N. C. Luhmann, "Phased array operation of a diode grid impedance surface," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 42, no. 4, pp. 565-572, Apr 1994.
- [72] Q. Chen, J.J. Jiang, X.X. Xu, L. Zhang, L. Miao and S.W. Bie, "A thin and broadband tunable radar absorber using active frequency selective surface," In *Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, IEEE, Chicago, July 2012.
- [73] K. L. Ford, J. Roberts, S. Zhou, G. Fong and J. Rigelsford, "Reconfigurable frequency selective surface for use in secure electromagnetic buildings," In *Electronics Letters*, vol. 49, no. 14, pp. 861-863, July 4 2013.
- [74] "Applications of PIN Diodes", Application Note 922, Hewlett Packard.
- [75] G. Hiller, Design with PIN diodes, Application Note AG312, MA-COM, Inc.
- [76] Iradilson Ferreira da Costa, **Antenas e Superfícies Seletivas de Frequência Reconfiguráveis para Sistemas de Comunicação Sem Fio**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFRN, Natal, 2009.
- [77] G. Hiller, "Design with PIN diodes", Application Note AG312, MA-COM, Inc.
- [78] "PIN Diodes", Renesas Application Note, March 2007. [ONLINE]. Disponível: http://www.skyworksinc.com/uploads/documents/Design_With_PIN_Diodes_200312D.pdf. Acesso em 09 de agosto de 2016.
- [79] [ONLINE]. Disponível : <https://pt.wikipedia.org/wiki/Varicap>. Acesso em 24 de abril de 2016.
- [80] Varicap. Instituto Newton C. Braga. Disponível: <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/891-varicaps-art126>. Acesso em 24 de abril de 2016.
- [81] [ONLINE]. Disponível : <http://www.ecured.cu/Diodovaricap>. Acesso em 24 de abril de 2016.

- [82] Eduardo Lourenço e Sá. **Implementação de um sistema para otimização de amplificadores de potência em micro-ondas, baseado num sintonizador de impedâncias em estado sólido.** Tese de Doutorado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores Major Telecomunicações. Universidade do Porto, 2008.
- [83] Nathanson, H.C, Newell, W. E, Wickstorm, R.A and Davis Jr.J.R, "The Resonant Gate Transistor", *IEEE Trans. On Electron Dev.* Vol. 14, n. 3, pp. 117-133, 1967.
- [84] C. L. Goldsmith, Zhimin Yao, S. Eshelman and D. Denniston, "Performance of low-loss RF MEMS capacitive switches," In *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 8, no. 8, pp. 269-271, Aug 1998.
- [85] Barbin, S. E., & Silva, M. B. F. Chave MEMS capacitiva de baixo coeficiente de reflexao. *XIII Taller Iberchip*, p.139-142, 2007.
- [86] Michel Bernardo Fernandes da Silva. **Modelagem de chaves MEMS para aplicações em RF.** 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- [87] G. M. Rebeiz and J. B. Muldavin, "RF MEMS switches and switch circuits," In *IEEE Microwave Magazine*, vol. 2, no. 4, pp. 59-71, Dec 2001.
- [88] Milosavljevic, Z. D, **RF MEMS Switches**, Mikrotalasna Revija, pp. 2-8, June 2004.
- [89] P. D. Grant, M. W. Denhoff and R. R. Mansour, "A Comparison between RF MEMS Switches and Semiconductor Switches," *MEMS, NANO and Smart Systems, 2004. ICMENS 2004. Proceedings. 2004 International Conference on*, 2004, pp. 515-521.
- [90] Rebeiz, G. M. **RF MEMS: Theory, Design and Techology**, John Willey, New Jersey, 2003.
- [91] G. M. Rebeiz and J. B. Muldavin, "RF MEMS switches and switch circuits," In *IEEE Microwave Magazine*, vol. 2, no. 4, pp. 59-71, Dec 2001.
- [92] C. Goldsmith, Tsen-Hwang Lin, B. Powers, Wen-Rong Wu and B. Norvell, "Micromechanical membrane switches for microwave applications," *Microwave Symposium Digest, 1995., IEEE MTT-S International*, Orlando, FL, USA, 1995, pp. 91-94 vol.1.
- [93] M. Daneshmand, R. R. Mansour and N. Sarkar, "RF MEMS waveguide switch," In *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 52, no. 12, pp. 2651-2657, Dec. 2004.

- [94] Chang won Jung, Ming-jeer Lee, G. P. Li and F. De Flaviis, "Reconfigurable scan-beam single-arm spiral antenna integrated with RF-MEMS switches," In *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 2, pp. 455-463, Feb. 2006.
- [95] Alfredo Gomes Neto, Jefferson Costa e Silva, Joabson Nogueira de Carvalho, Andrécia P. da Costa, and Leidiane Carolina M. de Moura, "Bandpass frequency selective surface using asymmetrical slot four arms star geometry," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 58, pp. 1105–1109, May 2016.
- [96] Estação de re-trabalho SMD. Toyo.[ONLINE].Available:http://www.tektoyo.com.br/produto_descricao.php?id=93& [Acesso em 04 Agosto 2016].
- [97] K. C. Gupta, Ramesh Garg and I. J. Bahl, **Microstrip Lines and Slotlines**, Artech House Publishers, 2nd Ed, 1996.
- [98] J. S. Wong, and M. J. Lancaster, "Microstrip filters for RF/microwave applications," 2002.

Apêndice A

TABELA 1-1 -Tensão dos resistores na polarização direta dos diodos.

R1(Ω)	R2(Ω)	R3(Ω)	R4(Ω)	R5(Ω)	Tensão da Fonte (V)	Tensão do multímetro (V)
147,4	147,2	147,5	147,3	147,3		
0	0	0	0	0	0	0
9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	0,5	0,4959
2,77	2,781	2,779	2,778	2,780	0,6	0,6407
61,2	61,7	61,7	61,5	61,8	1,0	0,6407
333,5	336,5	336,1	336,1	336,0	1,0	1
0,840	0,844	0,844	0,842	0,845	1,5	1,557
1,211	1,218	1,220	1,199	1,219	2,0	1,952
1,799	1,787	1,782	1,797	1,798	2,5	2,549
2,272	2,274	2,270	2,271	2,273	3,0	3,036

TABELA 1-2 -Tensão dos resistores na polarização inversa dos diodos.

Tensão (mV) R1	Tensão (mV) R2	Tensão (mV) R3	Tensão (mV) R4	Tensão (mV) R5	Tensão da Fonte (V)	Tensão do multímetro (V)
0	0	0	0	0	0	0
0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	-0,5	-0,5503
0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	-1,0	-1,013
0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	-1,5	-1,465
0,4	0,5	0,5	0,4	0,5	-2,0	-2,024
0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	-2,5	-2,485
0,4	0,6	0,5	0,3	0,4	-3,0	-2,958
0,4	0,7	0,8	0,8	0,9	-3,5	-3,522

TABELA 1-3 -Tensão dos resistores nas combinações da FSS.

Combinação	Tensão R1	Tensão R2	Tensão R3	Tensão R4	Tensão R5	Tensão da Fonte (V)	Tensão do multímetro
F01010	0	0	0	0	0	0	-2,5 mV
F01010	0,3 mV	-2,380 V	0,8 mV	-2,374 V	0,4 mV	-3,0	-3,145V
F10101	-1,1 mV	-1,2 mV	-1,2mV	-1,2 mV	-1,1mV	0	1,4 mV
F10101	2,216 V	-0,4 mV	2,218 V	-0,4 mV	2,217 V	3,0	2,976V
F10001	-0,5 mV	-0,6 mV	0,0 mV	-0,5 mV	-0,6 mV	0	2mV
F10001	2,246 V	-0,6 mV	-0,6 mV	-0,6 mV	2,248 V	3,0	3,006 V
F01110	-1,4 mV	-2,330 V	-2,331 V	-2,329 V	0,8mV	-3,0	-3,095 V
F01110	0,8 mV	-4,244 V	-4,244 V	-4,225 V	1,4 mV	-5,0	-5,04 V
F11011	2,194 V	2,243 V	-0,6 mV	2,242 V	2,245 V	-3,0	-3,003 V