



Thamyris da Silva Evangelista

**Desenvolvimento de Superfície Seletiva em Frequência
Reconfigurável Baseada na Geometria Estrela de Quatro Braços
para Aplicação em 2,4 GHz**

**João Pessoa - PB
Fevereiro de 2018**

Thamyris da Silva Evangelista

**Desenvolvimento de Superfície Seletiva em Frequência
Reconfigurável Baseada na Geometria Estrela de Quatro Braços
para Aplicação em 2,4 GHz**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal 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

Jefferson Costa e Silva, Dr.
Orientador

Alfrêdo Gomes Neto, Dr.
Coorientador

João Pessoa – PB
Fevereiro de 2018

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

E92d Evangelista, Thamyris da Silva.
Desenvolvimento de superfície seletiva em frequência reconfigurável baseada na geometria estrela de quatro braços para aplicação em 2,4 GHz / Thamyris da Silva Evangelista. – 2018.
66 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB / Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2018.
Orientador: Prof^o Jefferson Costa e Silva.
Coorientador: Prof^o Alfrêdo Gomes Neto.

1. Frequência de ressonância. 2. Superfícies seletivas em frequência. 3. Geometria estrela de quatro braços. 4. Célula unitária. 5. Frequency Selective Surfaces - FSS. 6. Diodo PIN. I. Título.

CDU 537.635

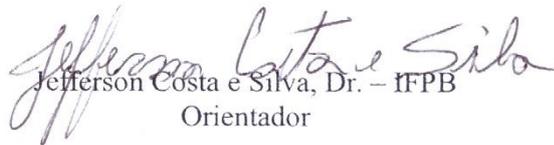
Thamyris da Silva Evangelista

**Desenvolvimento de Superfície Seletiva em Frequência
Reconfigurável Baseada na Geometria Estrela de Quatro Braços
para Aplicação em 2,4 GHz**

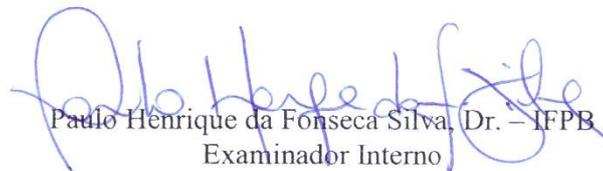
Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no domínio da Engenharia Elétrica.

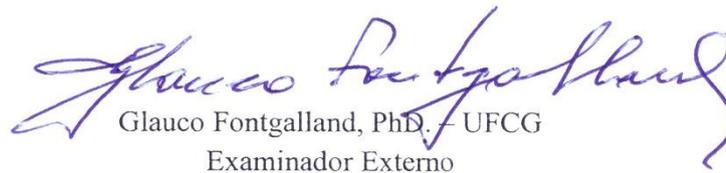
Dissertação de mestrado defendida e aprovada em 27/02/18.

BANCA EXAMINADORA


Jefferson Costa e Silva, Dr. – IFPB
Orientador


Alfrêdo Gomes Neto, Dr. – IFPB
Coorientador


Paulo Henrique da Fonseca Silva, Dr. – IFPB
Examinador Interno


Glauco Fontgalland, PhD. – UFCG
Examinador Externo

João Pessoa – PB
Fevereiro de 2018

“Quando nada parece dar certo, lembro-me do cortador de pedras martelando sua rocha... uma centena de vezes, sem que uma única rachadura apareça. Mas, na centésima primeira martelada a pedra se abre em duas, e eu sei que não foi aquela que conseguiu isso, mas todas as outras que vieram antes.” Jacob Riis (1849 – 1914)

Agradecimentos

A Deus, por todas as oportunidades a mim concedida e por ter me dado condições de chegar até aqui.

Aos meus pais, Maria Selma e Mozart Ferreira, por me darem amor, suporte, incentivo e me ensinarem que a educação é a coisa mais preciosa que podemos ter.

Ao meu noivo, Daniel Dias, pelo amor, compreensão e apoio incondicional, por sempre me incentivar e comemorar cada conquista.

Ao meu orientador, Jefferson Costa e Silva, por ter me acolhido desde a iniciação científica, obrigada pela oportunidade, orientação, confiança e conhecimentos compartilhados.

Ao meu coorientador, Alfrêdo Gomes Neto, pelos ensinamentos, incentivos, dedicação e disponibilidade, por ser um exemplo inspirador.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, com os quais tive a satisfação de estudar e aprender.

Ao Instituto Federal da Paraíba, por fazer parte da minha formação humana e profissional, agradeço também pelo suporte financeiro.

Aos amigos e familiares, que me apoiaram e de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos Professores, Paulo Henrique e Glauco Fontgalland, por se disporem a participar da minha banca de defesa.

Resumo

Diante da atual demanda dos sistemas de telecomunicações, as superfícies seletivas em frequência, FSS ativas e passivas, vêm atraindo a atenção de diversos grupos de pesquisa por suas inúmeras aplicações, tais como: refletores de antena, janelas eficientes, paredes inteligentes, entre outras. Neste cenário, neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de uma superfície seletiva em frequência reconfigurável baseada na geometria estrela de quatro braços para aplicação na faixa de 2400-2483,5 MHz dos padrões IEEE 802.11b/g/n (Wi-Fi) e IEEE 802.15 (*Bluetooth*). Como elemento de comutação foi utilizado o diodo PIN. São apresentados resultados numéricos, obtidos utilizando o *software* comercial ANSYS Designer que se baseia no Método dos Momentos, MoM, e resultados experimentais, observando-se uma boa concordância entre os mesmos. No estado ligado (*ON*), a partir da aplicação de uma tensão de $V = 1,8 \text{ V}$, a FSS rejeita a faixa de frequência de 2,4 GHz. Para o estado desligado, (*OFF*) a FSS deixa de atenuar esta faixa de frequência. Também foram realizadas medições da intensidade do sinal de Wi-Fi com o auxílio do *software* Homedale e os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, confirmando a eficiência da geometria proposta.

Palavras chave: Superfície Seletiva em Frequência Reconfigurável, estrela de quatro braços, diodo PIN, Padrões IEEE 802.11b/g/n e IEEE 802.15.

Abstract

Due the current demand for telecommunications systems, frequency selective surfaces, active and passive FSS, have attracted the attention of several research groups for their numerous applications, such as: reflector antennas, efficient windows, smart walls, among others. In this scenario, this work presents the development of a reconfigurable frequency selective surface based on the four arms star geometry for application in the 2400-2483.5 MHz of the IEEE 802.11b/g/n (Wi-Fi) and IEEE 802.15 (Bluetooth) standards. As a switching element, the PIN diode was used. Numerical results are presented using the ANSYS Designer commercial software, which is based on the Method of Moments, MoM, and experimental results, observing a good agreement between them. In the ON-state, from the application of a voltage of $V = 1.8$ V, the FSS rejects the 2.4 GHz frequency range. For the OFF-state, the FSS doesn't attenuate this frequency range. Measurements of the Wi-Fi signal intensity were also performed using the Homedale software and the results were very satisfactory, confirming the efficiency of the proposed geometry.

Keywords: Reconfigurable frequency selective surface, four arms star, PIN diode, IEEE 802.11b/g/n and IEEE 802.15 Standards.

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Dispositivos operando em diferentes frequências.....	14
Figura 1.2 – Torre com antenas destinadas a múltiplos serviços, tais como telefonia móvel e rádio enlaces.....	15
Figura 2.1 – Parâmetros que afetam a resposta em frequência da FSS.....	17
Figura 2.2 – FSS composta por elemento tipo <i>patch</i>	18
Figura 2.3 – FSS composta por elemento tipo abertura.....	19
Figura 2.4 – Elementos N -polos conectados pelo centro [12].....	19
Figura 2.5 – Elementos tipo espiras [12].....	20
Figura 2.6 – Elementos de interior sólido [12].....	20
Figura 2.7 – Elementos combinados [12].....	20
Figura 2.8 – Fractais [23].....	21
Figura 2.9 – Geometrias investigadas pelo GTEMA-IFPB [30].....	21
Figura 2.10 – FSS do tipo anteparo fino.....	22
Figura 2.11 – FSS do tipo anteparo espesso.....	22
Figura 2.12 – Exemplo de FSS passiva e de FSS reconfigurável.....	23
Figura 2.13 – FSS como anteparo da porta do forno de micro-ondas.....	24
Figura 2.14 – Aplicação de FSS em radome [37], [38].....	25
Figura 2.15 – Antena refletora do tipo banda dupla (<i>dual band</i>) [24].....	25
Figura 2.16 – Papel de parede com FSS para bloquear o sinal de redes sem fio [28], [42].....	26
Figura 2.17 – Aplicação de FSS em janelas eficientes [43].....	26
Figura 2.18 – Diferentes mecanismos de propagação em ambientes <i>indoor</i> [47].....	27
Figura 2.19 – Atuação das paredes inteligentes para melhoria do sistema de comunicação sem fio em ambiente <i>indoor</i> [47].....	28
Figura 2.20 – Modelo de FSS reconfigurável com diodo PIN.....	29
Figura 2.21 – FSS reconfigurável empregada em um absorvedor de radar sintonizável [61].	29
Figura 2.22 – FSS reconfigurável com geometria em forma de anéis de dupla polarização [62].	30
Figura 2.23 – FSS reconfigurável usada para controle de irradiação de uma antena [63].	30
Figura 2.24 – Ilustração do modelo do circuito equivalente.....	31
Figura 2.25 – <i>Setup</i> de medição usando antenas tipo corneta.....	33
Figura 2.26 – <i>Setup</i> de medição usando antenas tipo corneta e lentes [80].	33
Figura 2.27 – <i>Setup</i> de medição usando antenas tipo corneta e painel absorvedor.....	34

Figura 2.28 – <i>Setup</i> de medição usando antenas cornetas em uma câmara anecóica [24], [81].	34
Figura 3.1 – Estrutura do diodo PIN [83]......	35
Figura 3.2 – Curva característica do diodo PIN [84]......	36
Figura 3.3 – Diodo PIN BAR 64-03 W [55].	36
Figura 4.1 – Geometria estrela de quatro braços passo a passo [87]......	39
Figura 4.2 – Geometria com dimensões do elemento básico e célula unitária da FSS.	40
Figura 4.3 – Arranjo da FSS projetada.	40
Figura 4.4 – Etapas da fixação do diodo PIN.	41
Figura 4.5 – Bancada de trabalho utilizada para o processo de fixação dos diodos PIN.	42
Figura 4.6 – FSS fabricada com diodos PIN fixados.	42
Figura 5.1 – FSS projetadas.....	43
Figura 5.2 – FSS projetada com o diodo PIN.....	44
Figura 5.3 – Fixação de adesivo para posterior corrosão da FSS.....	44
Figura 5.4 – FSS fabricada com diodo PIN inserido e pontos de conexão para alimentação. .	45
Figura 5.5 – <i>Setup</i> de medição para FSS ideal, polarização <i>x</i> , estado <i>OFF</i>	46
Figura 5.6 – <i>Setup</i> de medição para FSS ideal, polarização <i>y</i> , estado <i>OFF</i>	46
Figura 5.7 – <i>Setup</i> de medição para FSS com diodo PIN.....	46
Figura 5.8 – Resposta em frequência, polarização <i>x</i> , FSS ideal, estado <i>OFF</i>	47
Figura 5.9 – Resposta em frequência, polarização <i>x</i> , FSS estado <i>ON</i> , comparada com o diodo diretamente polarizado.	48
Figura 5.10 – Resposta em frequência, polarização <i>x</i> , FSS com diodo PIN.	49
Figura 5.11 – Resposta em frequência, polarização <i>y</i> , FSS ideal, estado <i>OFF</i>	50
Figura 5.12 – Resposta em frequência, polarização <i>y</i> , FSS estado <i>ON</i> , comparada com o diodo diretamente polarizado.	51
Figura 5.13 – Resposta em frequência, polarização <i>y</i> , FSS com diodo PIN.	51
Figura 5.14 – <i>Setup</i> de medição da intensidade do sinal de Wi-Fi com apresentação da antena, polarização <i>y</i> , estado <i>ON</i>	53
Figura 5.15 – <i>Setup</i> de medição da intensidade do sinal de Wi-Fi, polarização <i>y</i>	53
Figura 5.16 – Resposta da intensidade de sinal de Wi-Fi apresentado no <i>notebook</i> , polarização <i>y</i> , FSS com diodo PIN.	54
Figura 5.17 – Resposta da intensidade de sinal de Wi-Fi, polarização <i>y</i> , FSS com diodo PIN.	54

Figura 6.1 – Resposta em frequência, polarização y , FSS com diodo PIN, tensão $V1 = 0,0$ V.	56
Figura 6.2 – Resposta em frequência, polarização y , FSS com diodo PIN, tensão $V2 = 1,8$ V.	57

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Resultados da polarização x	49
Tabela 2 – Resultados da polarização y	52
Tabela 3 – Resultados obtidos para tensão V1.....	56
Tabela 4 – Resultados obtidos para tensão V2.....	57

Lista de Siglas

IP	<i>Internet Protocol</i> – Protocolo de Internet
FSS	<i>Frequency Selective Surface</i> – Superfície seletiva em frequência
GTEMA	Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado
IFPB	Instituto Federal da Paraíba
RFSS	Superfícies seletivas em frequência reconfiguráveis
IEEE	<i>Institute of Electric and Electronic Engineers</i> – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
MoM	<i>Method of Moments</i> – Método dos Momentos
RCS	<i>Radar Cross Section</i> – Seção Reta Radar
GSM	<i>Global System for Mobile Communication</i> – Sistema global para comunicações móveis
FEM	<i>Finite Element Method</i> – Método do elemento finito
FDTD	<i>Finite Difference Time Domain</i> – Diferenças finitas no domínio do tempo
WCIP	<i>Wave Concept Iterative Procedure</i> – Método Iterativo das Ondas
CAD	<i>Computer Aided Design</i> – Desenho Assistido por Computador
RF	Rádio Frequência
MEMS	<i>Micro Electro Mechanical Systems</i> – Sistemas micro-eleto-mecânicos
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
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
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

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA	17
2.1. Classificação das FSS	18
2.1.1. Preenchimento da célula básica	18
2.1.2. Geometria do elemento da célula unitária.....	19
2.1.3. Espessura da camada de metalização	21
2.1.4. Excitação dos arranjos.....	23
2.2. Aplicações de FSS	23
2.2.1. Anteparo da porta do forno de micro-ondas	23
2.2.2. Radome	24
2.2.3. Refletores de antena	25
2.2.4. Bloqueador de redes sem fio	25
2.2.5. Janelas eficientes	26
2.2.6. Paredes inteligentes	27
2.3. FSS reconfiguráveis.....	28
2.3.1. Aplicações das FSS reconfiguráveis	29
2.4. Técnicas de análise	30
2.4.1. Caracterização numérica	30
2.4.2. Caracterização experimental	32
3. DIODOS.....	35
4. PROJETO DA FSS RECONFIGURÁVEL	38
4.1. Obtenção da geometria	38
4.2. FSS utilizada	39
4.3. Fixação dos diodos PIN	41
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS.....	43
5.1. Polarização x	47
5.2. Polarização y	49
5.3. Medições da intensidade do sinal de Wi-Fi	52
6. VARIAÇÃO ANGULAR	55
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
REFERÊNCIAS	60

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

O intenso crescimento de aplicações que utilizam os sistemas de telecomunicações demanda a disponibilidade de bandas de frequência do espectro eletromagnético e a 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 de transmitir grandes quantidades de informações simultaneamente, Figura 1.1, sem que haja interferência entre os serviços oferecidos, [1]–[6].



Figura 1.1 – Dispositivos operando em diferentes frequências.

Neste contexto, além da comunicação com o usuário final, é preciso prover enlaces de alta capacidade que possam conectar diferentes pontos das redes de telecomunicações. Embora vários desses enlaces sejam ópticos, é indispensável a utilização de enlaces via rádio. Dadas as limitações da disponibilidade de torres e outros espaços para instalação de antenas, vários sistemas de telecomunicações, com seus próprios requisitos de frequência e potência, compartilham espaços restritos [7], Figura 1.2. Consequentemente, limitar as interferências entre os diferentes sistemas, assim como maximizar a utilização das antenas torna-se cada vez mais importante. Diante dessa demanda, a utilização de superfícies seletivas em frequência, (*frequency selective surfaces*), FSS, vem atraindo a atenção de diversos grupos de pesquisa,

seja para minimizar sinais indesejáveis, seja para utilizar uma mesma antena operando em duas ou mais configurações distintas [8], [9].



Figura 1.2 – Torre com antenas destinadas a múltiplos serviços, tais como telefonia móvel e rádio enlaces.

O Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado, GTEMA, do Instituto Federal da Paraíba, IFPB, tem investido em pesquisas de novas geometrias de FSS objetivando aplicações em sistemas de telecomunicações, como por exemplo: antenas e paredes inteligentes.

Com objetivo de contribuir para o estudo das FSS, esta dissertação apresenta o desenvolvimento de superfícies seletivas em frequência reconfiguráveis, RFSS, baseadas na geometria estrela de quatro braços, tendo o diodo PIN como elemento de comutação, para uso na faixa de 2400-2483,5 MHz dos padrões IEEE 802.11b/g/n (Wi-Fi) e IEEE 802.15 (*Bluetooth*). São propostas equações iniciais de projeto e é realizada a análise numérica da FSS, usando como ferramenta computacional o *software* comercial ANSYS Designer, que se baseia no Método dos Momentos, MoM. São apresentados também os resultados da caracterização experimental, obtidos nos laboratórios do GTEMA-IFPB, confirmando, assim, os resultados numéricos.

Este trabalho está dividido nas seguintes seções:

No Capítulo 2, são apresentados os conceitos básicos sobre as superfícies seletivas em frequência, sendo descritas suas características e classificações quanto ao preenchimento da célula unitária, à geometria disposta sobre a camada dielétrica e à espessura da camada de metalização. Também são mostradas algumas das principais técnicas de análise e aplicações dessas estruturas.

No Capítulo 3, são apresentadas as principais características do diodo PIN utilizado neste trabalho.

No Capítulo 4, é realizada a descrição da geometria estrela de quatro braços e a técnica utilizada para a fixação dos diodos.

No Capítulo 5, são apresentados os resultados numéricos e experimentais para a FSS desenvolvida neste trabalho, além dos resultados de medição da intensidade do sinal de Wi-Fi, utilizando a mesma estrutura.

No Capítulo 6, são apresentados os resultados obtidos com a variação angular da estrutura.

As considerações finais sobre o trabalho desenvolvido e também sugestões de trabalhos futuros para a continuidade desta pesquisa estão contidas no Capítulo 7.

CAPÍTULO 2

2. SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA

As superfícies seletivas em frequência são arranjos periódicos que apresentam comportamento similar ao de filtros eletromagnéticos. Estas estruturas são projetadas com a finalidade de refletir ou ser transparentes para ondas eletromagnéticas em diversas faixas de frequências [10]–[13]. Tais características podem ser observadas de acordo com o tipo do elemento utilizado no arranjo, seja do tipo *patch* ou abertura, que influenciam diretamente na resposta em frequência da FSS, podendo apresentar características rejeita-faixa ou passa-faixa, respectivamente [11]–[16]. Além do tipo de elemento, sua geometria, a periodicidade do arranjo, o ângulo de incidência da onda plana e o dielétrico sobre o qual a FSS é impressa, Figura 2.1, são fatores que afetam o desempenho e a resposta em frequência de uma superfície seletiva em frequência [17], [18].

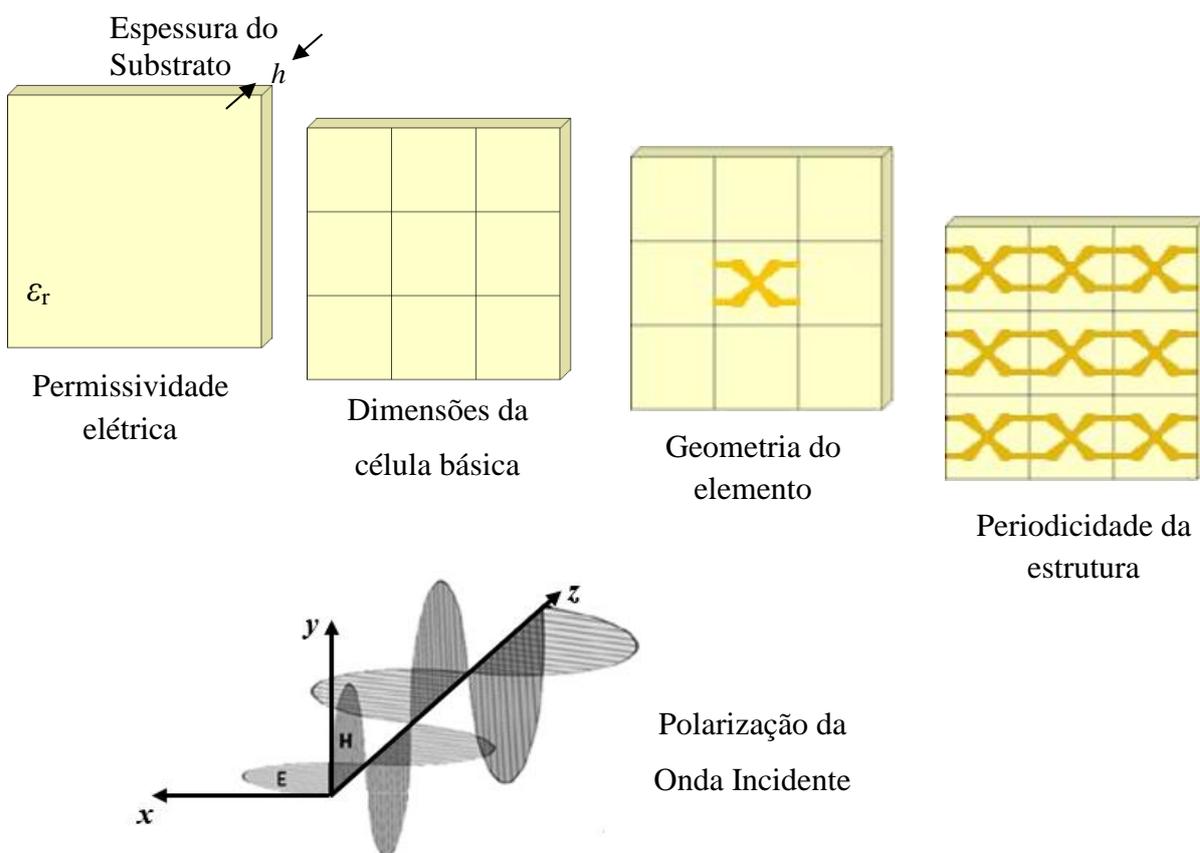


Figura 2.1 – Parâmetros que afetam a resposta em frequência da FSS.

2.1. Classificação das FSS

As FSS podem ser classificadas de diferentes formas. A seguir são apresentadas algumas dessas classificações.

2.1.1. Preenchimento da célula básica

Com relação ao preenchimento da célula básica existem dois tipos de superfícies seletivas em frequência: a FSS composta por elemento do tipo *patch* e a FSS com elementos do tipo abertura.

Na FSS composta por elemento do tipo *patch*, Figura 2.2 (a), a estrutura comporta-se como um circuito LC em série, Figura 2.2 (b), com características de um filtro rejeita-faixa, Figura 2.2 (c), pois à medida que os elementos entram em ressonância, o arranjo irradia a potência incidente na direção da reflexão, até que na frequência de ressonância da estrutura, ele se comporta como um condutor perfeito refletindo totalmente a onda incidente [12], [19].

Na FSS composta por elemento do tipo abertura, Figura 2.3 (a), a estrutura comporta-se como um circuito LC em paralelo, Figura 2.3 (b), com características de um filtro passa-faixa, Figura 2.3 (c), pois ao entrar em ressonância, estas estruturas tornam-se “transparentes” para a onda incidente [12], [19].

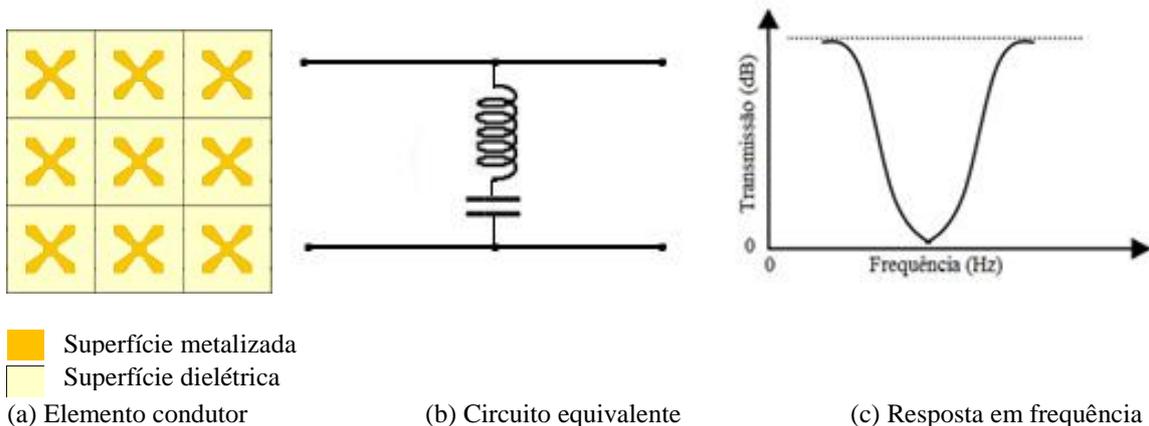
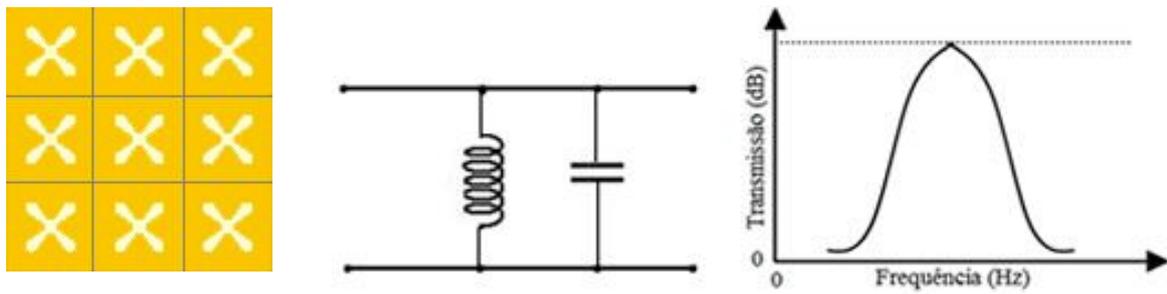


Figura 2.2 – FSS composta por elemento tipo *patch*.



Superfície metalizada
 Superfície dielétrica

(a) Elemento condutor

(b) Circuito equivalente

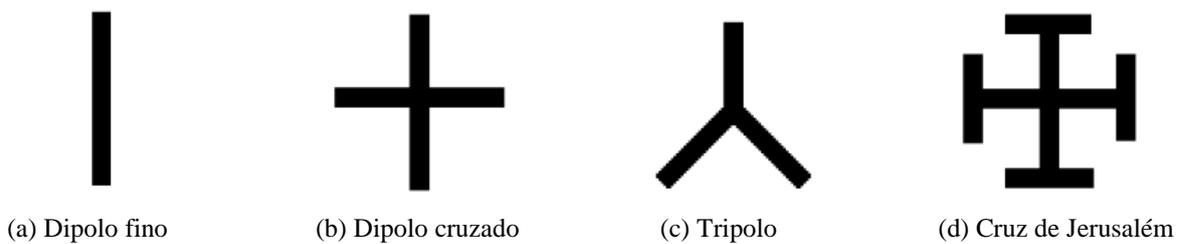
(c) Resposta em frequência

Figura 2.3 – FSS composta por elemento tipo abertura.

2.1.2. Geometria do elemento da célula unitária

A resposta em frequência de uma FSS está relacionada com o formato do elemento da célula unitária utilizado. Basicamente, esses elementos estão divididos em quatro grupos [8], [12], [19], [20]:

Grupo I: Reúne os elementos do tipo *N*-polos conectados pelo centro. As formas mais conhecidas são o dipolo fino, dipolo cruzado, tripolo, cruz de Jerusalém, como apresentado na Figura 2.4, entre outros.



(a) Dipolo fino

(b) Dipolo cruzado

(c) Tripolo

(d) Cruz de Jerusalém

Figura 2.4 – Elementos *N*-polos conectados pelo centro [12].

Grupo II: Corresponde aos elementos do tipo espira. Os tipos mais conhecidos são a espira quadrada, espira quadrada dupla, espiras quadradas com grade, anéis circulares concêntricos, Figura 2.5, entre outros.

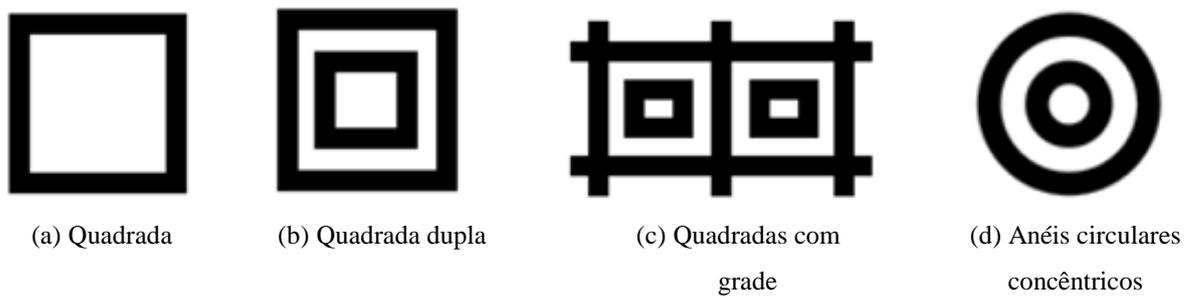


Figura 2.5 – Elementos tipo espiras [12].

Grupo III: Formado pelos elementos de preenchimento sólido. Os elementos podem assumir várias formas geométricas como os *patches* quadrados, retangulares, hexagonais e circulares, Figura 2.6, entre outros.

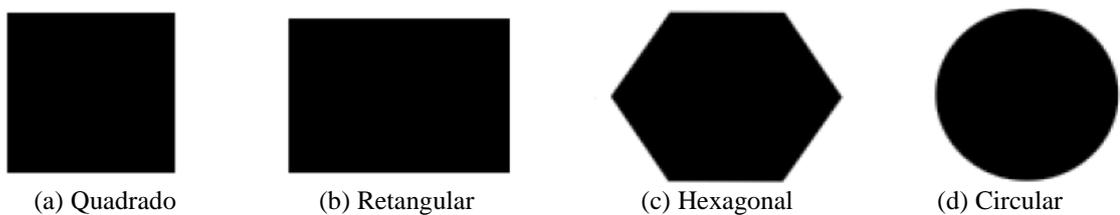


Figura 2.6 – Elementos de interior sólido [12].

Grupo IV: Composto por elementos formados a partir de combinações de dois ou mais elementos dos grupos anteriores, Figura 2.7.

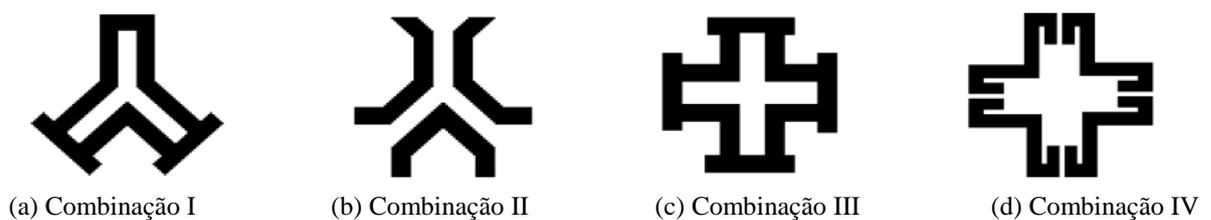


Figura 2.7 – Elementos combinados [12].

Além das formas citadas anteriormente, podemos também destacar o uso de elementos fractais em FSS, Figura 2.8. Este tipo de elemento apresenta como características principais a redução da dimensão dos elementos e a operação em múltiplas faixas de frequência [21]–[23].

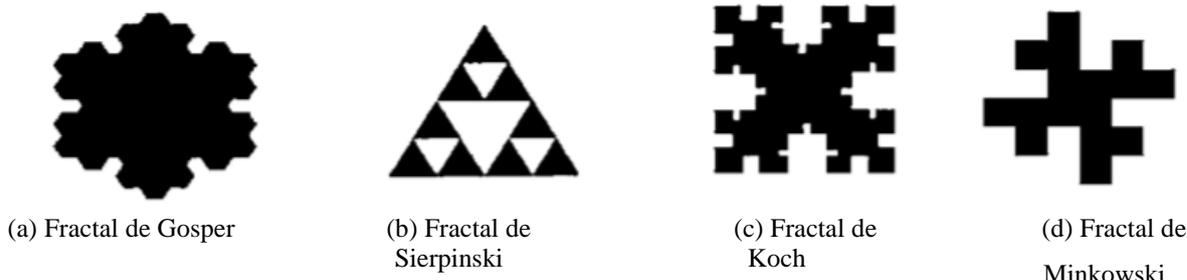


Figura 2.8 – Fractais [23].

Existem infinitas possibilidades quanto à geometria dos elementos básicos, que geram FSS com respostas em frequência com diferentes características [24], [25]–[27]. Neste contexto, o Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado, GTEMA, do Instituto Federal da Paraíba, IFPB, tem investigado, entre outras, as geometrias estrela de quatro braços, matrioska e em forma de U [6], [28], [29], Figura 2.9. Esta investigação é realizada com base em análises estimativas, resultados numéricos e resultados experimentais.



Figura 2.9 – Geometrias investigadas pelo GTEMA-IFPB [30].

2.1.3. Espessura da camada de metalização

Uma FSS pode ainda ser classificada como do tipo anteparo fino e anteparo espesso, de acordo com a espessura da camada de metalização. Uma FSS do tipo anteparo fino, Figura 2.10, 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 o comprimento de onda no espaço livre para a frequência de ressonância da FSS. Este 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 [8], [19].

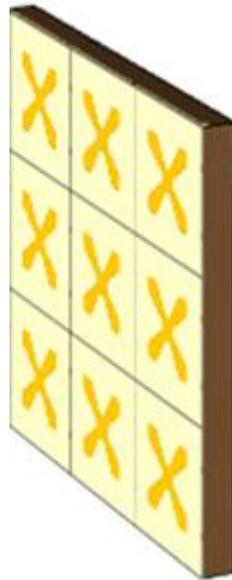


Figura 2.10 – FSS do tipo anteparo fino.

A FSS do tipo anteparo espesso, ou em cascata, possui uma camada de metalização mais espessa ou uma dupla camada de metalização, consistindo em duas FSS idênticas separadas por um dielétrico, Figura 2.11, [31]. 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. Porém, essas FSS são mais pesadas, sua fabricação requer uma maior precisão e, conseqüentemente, seu custo é elevado [32], [33].

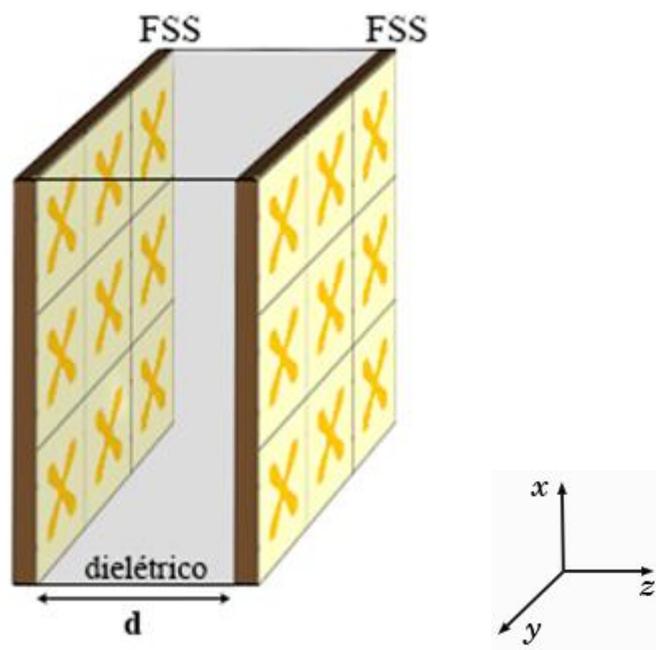
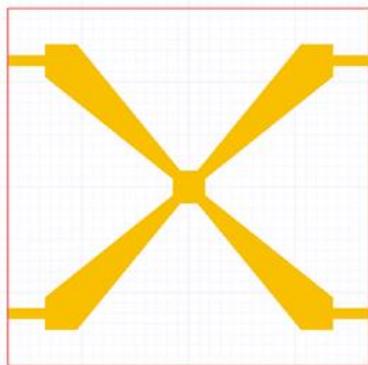


Figura 2.11 – FSS do tipo anteparo espesso.

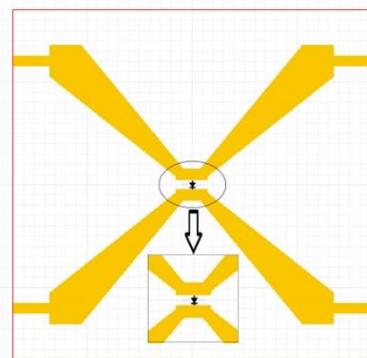
2.1.4. Excitação dos arranjos

Uma FSS pode ser classificada pela forma que ela é excitada, sendo as duas principais definições FSS passivas e FSS ativas ou reconfiguráveis [11].

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, Figura 2.12 (a), em que os arranjos dos elementos podem refletir ou ser transparentes para 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 sem a inserção de componentes externos (diodos, chaves, varactores, etc.) [27]. No segundo caso a FSS é reconfigurável e sua resposta em frequência pode ser modificada eletronicamente [34], ou mecanicamente [35]. Para uma reconfiguração eletrônica, as FSS incorporam dispositivos ativos, Figura 2.12 (b). Estes são incorporados aos elementos impressos ou depositados no substrato, e quando ativados modificam as dimensões efetivas das células básicas, alterando a sua resposta em frequência [19].



(a) FSS passiva, sem os diodos PIN.



(b) FSS reconfigurável, com a inserção dos diodos PIN.

Figura 2.12 – Exemplo de FSS passiva e de FSS reconfigurável.

2.2. Aplicações de FSS

As aplicações das FSS podem ser encontradas nas mais diversas faixas do espectro eletromagnético, incluindo micro-ondas, ondas milimétricas e terahertz [8], [11], [12], [36]. A seguir são apresentados alguns exemplos.

2.2.1. Anteparo da porta do forno de micro-ondas

Uma das aplicações de FSS mais conhecidas é o anteparo da porta do forno de micro-ondas doméstico, Figura 2.13. Nesta aplicação, a FSS opera como um filtro, refletindo energia na faixa de micro-ondas (aproximadamente 2,45 GHz) e permitindo a passagem da faixa de frequência de luz visível [11].



Figura 2.13 – FSS como anteparo da porta do forno de micro-ondas.

2.2.2. 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 [8], [11]. Na Fig. 2.14 é apresentado um exemplo de FSS utilizada como radome.



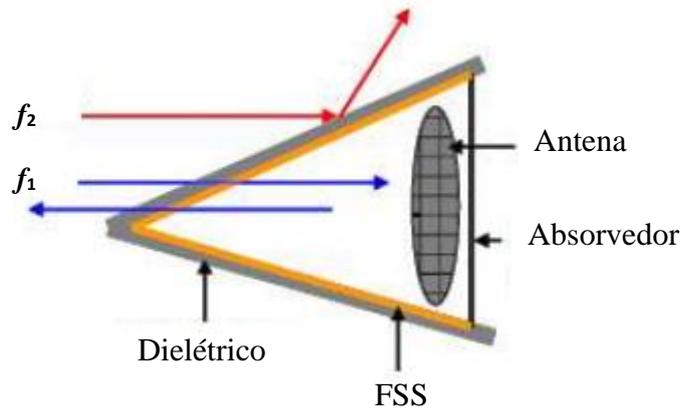


Figura 2.14 – Aplicação de FSS em radome [37], [38].

2.2.3. Refletores de antena

As FSS podem ser utilizadas para obter maior eficiência de antenas refletoras, como por exemplo, as antenas do tipo banda dupla (*dual band*). Na Figura 2.15 é ilustrado um sistema deste tipo, em que o alimentador 2 é 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 transparente para a faixa de frequência do alimentador 2 [39], [40].

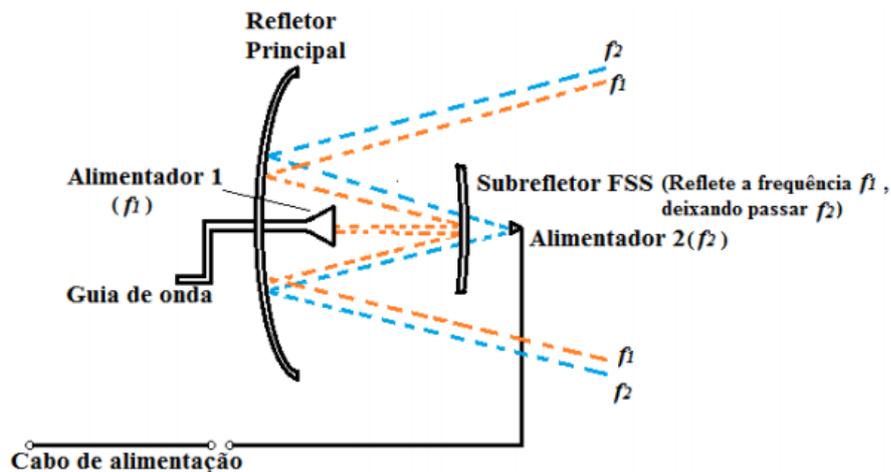


Figura 2.15 – Antena refletora do tipo banda dupla (*dual band*) [24].

2.2.4. Bloqueador de redes sem fio

Recentemente, as FSS têm sido empregadas em painéis de parede com o objetivo de oferecer segurança ao fluxo de informações de redes locais sem fio, minimizando a transmissão do sinal para fora das edificações, Figura 2.16. O papel de parede com FSS pode ser utilizado

em escritórios e empresas, reduzindo o risco de acesso não autorizado às informações contidas na rede, pois a estrutura age como um filtro rejeita-faixa, bloqueando a faixa de frequência destinada à propagação do sinal de redes sem fio [41].

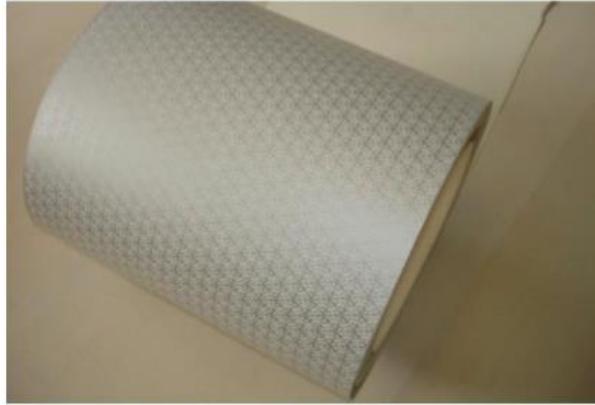


Figura 2.16 – Papel de parede com FSS para bloquear o sinal de redes sem fio [28], [42].

2.2.5. Janelas eficientes

Uma outra aplicação interessante para FSS é sua utilização em janelas eficientes, aumentando a eficiência energética de construções. A FSS atua como um filtro bloqueando a radiação eletromagnética na região do infravermelho e é transparente para a parte visível do espectro e da telefonia celular, impedindo a transferência de calor de fora para dentro do ambiente [24], conforme ilustrado na Figura 2.17.

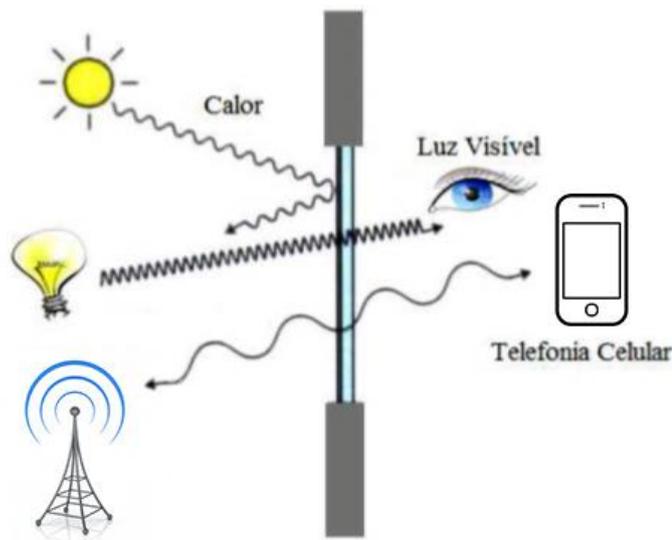
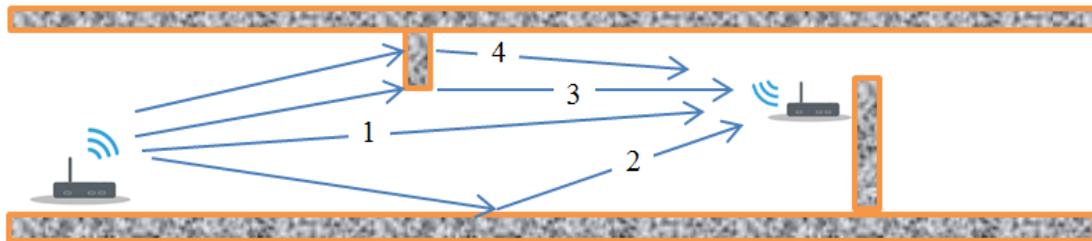


Figura 2.17 – Aplicação de FSS em janelas eficientes [43].

2.2.6. Paredes inteligentes

No projeto de edificações as condições da propagação eletromagnética passam a chamar cada vez mais a atenção, principalmente em construções com um grande número de ambientes de uso comum (escritórios, consultórios médicos, lojas, etc.), por apresentarem uma elevada densidade de usuários, propagação em ambiente *indoor* e alta taxa de reuso de frequências; ou em ambientes que requerem um nível de segurança diferenciado (hospitais, presídios, embaixadas, etc.) [44]–[46].

Uma das dificuldades enfrentadas pelos projetistas é a complexidade dos mecanismos de propagação eletromagnética, com diferentes princípios, tais como: reflexão, difração, refração, além do sinal direto, Figura 2.18. Considere-se ainda que padrões como o 802.11 e suas variações, comercialmente denominados Wi-Fi, podem operar em diferentes faixas de frequência, com diferentes larguras de banda [47].



(1) sinal direto, (2) sinal refletido, (3) sinal difratado, (4) sinal refratado

Figura 2.18 – Diferentes mecanismos de propagação em ambientes *indoor* [47].

Neste contexto, a utilização de superfícies seletivas em frequência, vem sendo intensivamente investigada como uma das opções para aumentar a eficiência dos sistemas de comunicação sem fio em ambientes *indoor*, assim como limitar a intensidade de sinais eletromagnéticos em ambientes específicos, através da implementação de paredes inteligentes [43], [45], [46], [48]–[50]. As paredes inteligentes favorecem o sinal desejado e/ou evitam uma recepção indesejada, Figura 2.19. Por apresentarem características tais como baixo custo, peso e volume reduzidos, as FSS vêm sendo utilizadas na implementação de paredes inteligentes.

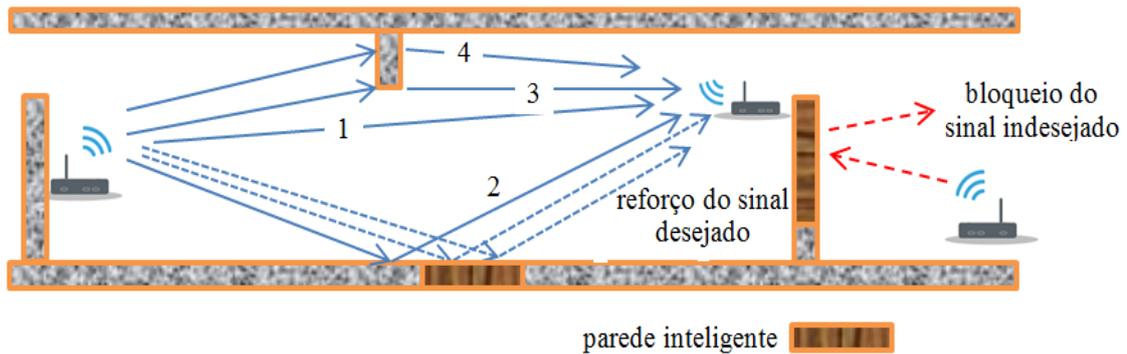


Figura 2.19 – Atuação das paredes inteligentes para melhoria do sistema de comunicação sem fio em ambiente *indoor* [47].

2.3. FSS reconfiguráveis

As FSS podem ser sintonizadas, ou reconfiguradas, por meio da alteração da sua resposta em frequência, modificando, por exemplo, as propriedades eletromagnéticas do substrato, que pode ser alterado utilizando, ferrita como substrato e aplicando um campo magnético estático na estrutura, ou utilizando dielétrico líquido e modificando o seu volume [19], [51]–[53]. Outra alternativa pode ser através da modificação da geometria da FSS por meio da alteração da orientação do arranjo mecanicamente, por deslocamento ou rotação mecânica, utilizando motores ou micro-motores, sendo que, neste caso, os elementos metálicos da FSS são projetados com o intuito de modificar a orientação ou posição para alterar a frequência de operação [53]–[55]. Além dessas, pode-se ainda incorporar dispositivos (diodos PIN, varactores, chave MEMS, etc.), Figura 2.20, que quando adequadamente polarizados alteram as características eletromagnéticas da FSS, [9], [56]–[60]. Neste trabalho é utilizada a incorporação de diodos PIN à FSS para obtenção de uma resposta em frequência reconfigurável.

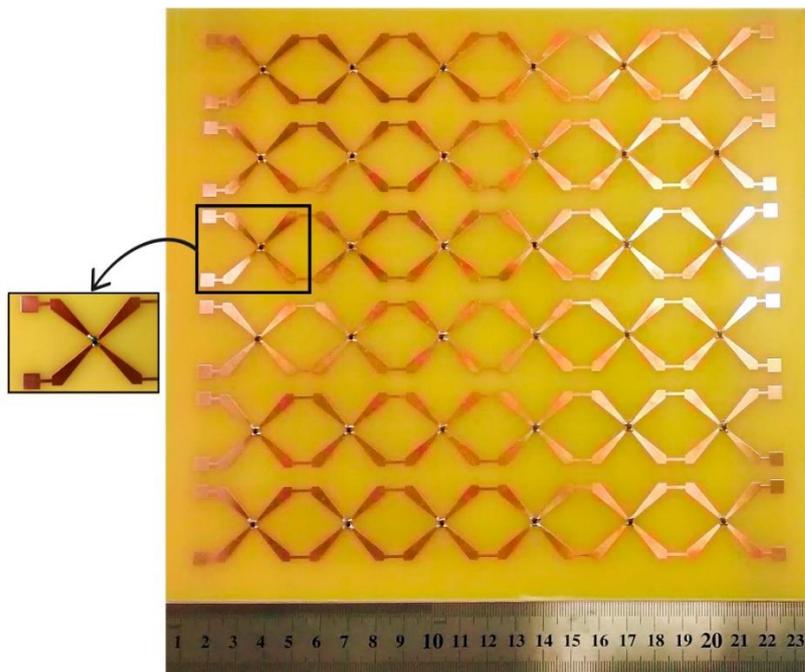


Figura 2.20 – Modelo de FSS reconfigurável com diodo PIN.

2.3.1. Aplicações das FSS reconfiguráveis

Pesquisas sobre FSS reconfiguráveis têm sido desenvolvidas para diversos tipos de aplicações. Um exemplo de FSS reconfiguráveis é apresentado na Figura 2.21, em que a estrutura é empregada em um absorvedor de radar sintonizável para reduzir a RCS (*Radar Cross Section*) de antenas [61]. Na Figura 2.22 a FSS reconfigurável com geometria em forma de anéis de dupla polarização é utilizada para modificar a arquitetura eletromagnética e o controle da propagação de ondas eletromagnéticas em edifícios [62].



Figura 2.21 – FSS reconfigurável empregada em um absorvedor de radar sintonizável [61].



Figura 2.22 – FSS reconfigurável com geometria em forma de anéis de dupla polarização [62].

Em [63] é apresentada uma aplicação prática de uma FSS reconfigurável, usada para o controle de irradiação de uma antena na frequência de 1,8 GHz, Figura 2.23

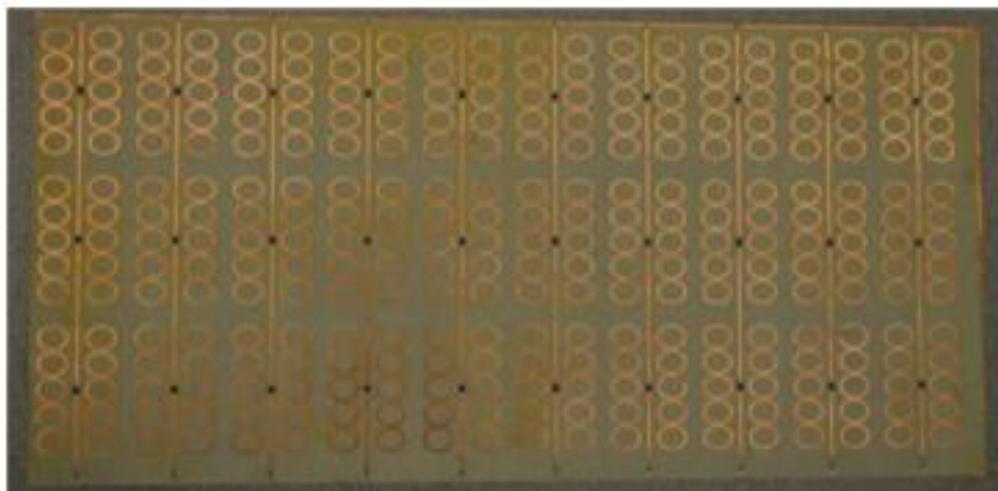


Figura 2.23 – FSS reconfigurável usada para controle de irradiação de uma antena [63].

2.4. Técnicas de análise

Existem diversas técnicas que podem ser utilizadas para se obter as características de uma FSS. Basicamente é feita a caracterização numérica seguida da caracterização experimental. Nesta seção serão descritas algumas dessas técnicas.

2.4.1. Caracterização numérica

Alguns autores desenvolveram fórmulas simples e aproximadas que determinam as características de transmissão e de reflexão para as FSS tipo *patches* condutores ou aberturas. Porém, essas fórmulas possuem limitações para algumas aplicações específicas, podendo apresentar resultados imprecisos [19], [64], [65], principalmente para frequências mais elevadas e ressonâncias de ordem superior.

Um dos primeiros métodos utilizados na análise das superfícies seletivas em frequência foi o casamento modal [43], que permite uma análise detalhada da resposta em frequência e da polarização para diferentes ângulos de incidência. Associado a esta técnica, surgiu o método do circuito equivalente, um modelo simples que apresenta resultados satisfatórios do comportamento da FSS. Neste modelo a espessura do substrato, as dimensões do elemento e sua geometria são relacionadas a componentes indutivas e capacitivas, formando um circuito LC [66], [67], Figura 2.24.

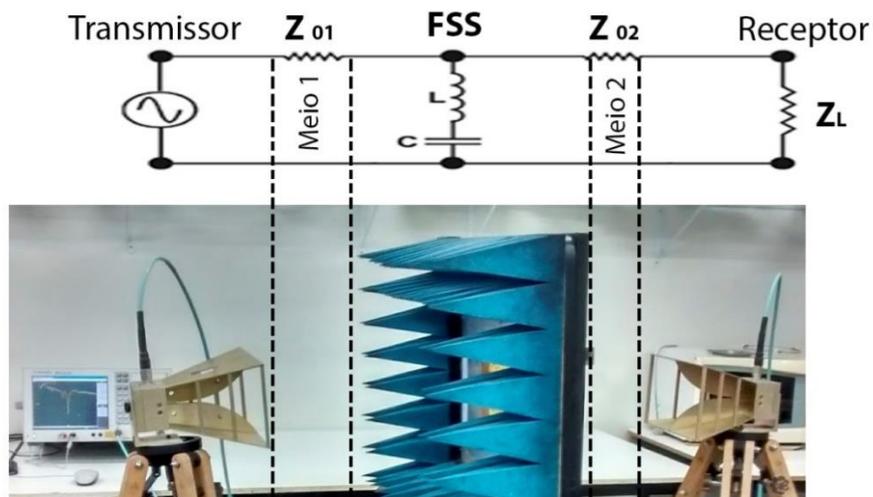


Figura 2.24 – Ilustração do modelo do circuito equivalente.

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*) [68], [69];
- Método dos Elementos Finitos (FEM – *Finite-Element Method*) [70], [71];
- Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD – *Finite Difference Time Domain*) [72], [73];
- Método Iterativo das Ondas (WCIP – *Wave Concept Iterative Procedure*) [74], [75];

Nas soluções numéricas desta dissertação foi utilizado o *software* comercial ANSYS Designer, ferramenta CAD (Projeto Assistido por Computador) para circuitos e simulações, que utiliza como princípio de funcionamento o Método dos Momentos (MoM). Neste método, as correntes de superfície são usadas para modelar o *patch* de microfita e as correntes de polarização volumétricas são usadas para modelar os campos ao longo do substrato dielétrico. É baseado em equações integrais dos potenciais eletromagnéticos, que são transformadas em equações algébricas e podem ser resolvidas numericamente. Além disso, leva em conta o efeito das ondas de superfície fora do limite físico do *patch* bidimensional, provendo uma solução mais exata [76].

Em paralelo à análise das estruturas podem ser implementadas várias técnicas de otimização da FSS, a fim de melhorar a resposta em frequência, a polarização e o comportamento em relação ao ângulo de incidência. Dentre estas técnicas é possível destacar o uso da inteligência computacional, como é o caso das redes neurais e dos algoritmos genéticos [77]–[79].

2.4.2. Caracterização experimental

Após a etapa de caracterização numérica a FSS é fabricada e submetida a procedimentos experimentais, sendo possível medir suas propriedades de transmissão e reflexão. Este processo tem como objetivo validar os resultados obtidos numericamente.

O *setup* de medição mais básico para medir as propriedades de transmissão ou reflexão de FSS é o sistema apresentado na Figura 2.25, com antenas tipo corneta de ganhos padronizados. A FSS é posicionada entre as duas antenas, em que uma delas funciona 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 x é obtida rotacionando a FSS em 90° [11], [20], [24].

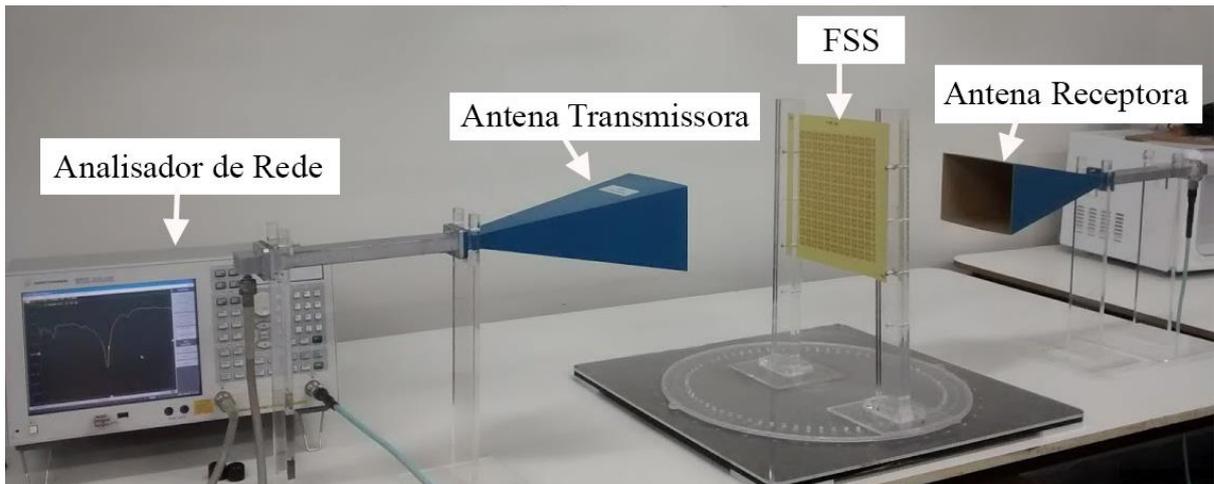


Figura 2.25 – *Setup* de medição usando antenas tipo corneta.

Dados imprecisos podem ser obtidos devido às difrações ocasionadas pelas bordas da FSS, originadas devido à largura de feixe das antenas corneta 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-faixa, [24]. Para otimizar as medições pode-se utilizar lentes em conjunto com as antenas tipo corneta, Figura 2.26.

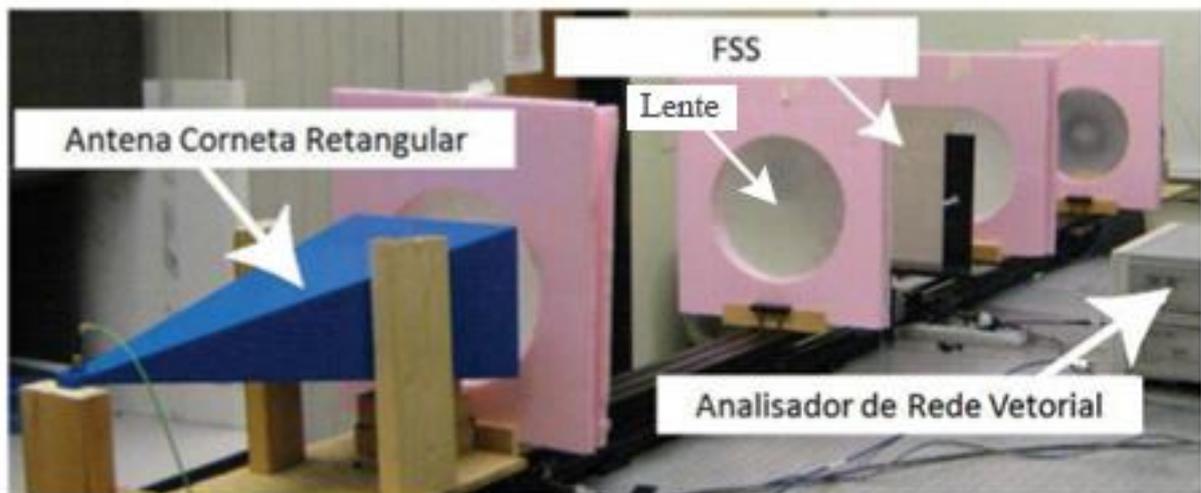


Figura 2.26 – *Setup* de medição usando antenas tipo corneta e lentes [80].

Outra maneira de minimizar as difrações nas bordas da FSS é a utilização de painéis absorvedores em torno da estrutura, como exemplificado na Figura 2.27. Na caracterização experimental realizada neste trabalho foi utilizada esta configuração.

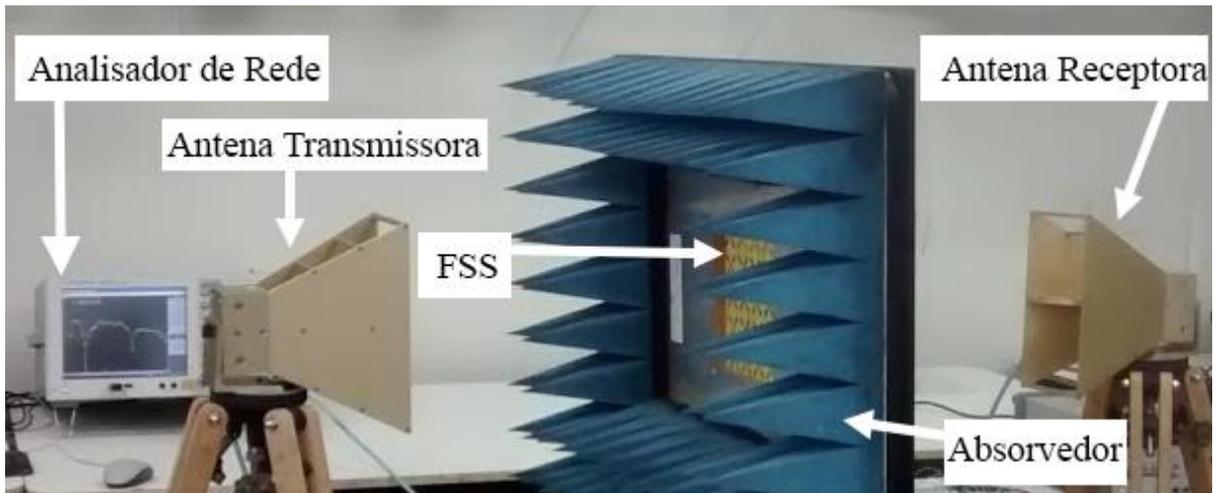


Figura 2.27 – *Setup* de medição usando antenas tipo corneta e painel absorvedor.

Com o objetivo de obter maior precisão nos resultados, o comportamento da FSS pode ser analisado em uma câmara anecóica, Figura 2.28. Esse ambiente é livre de interferências, pois é coberto de materiais absorvedores que eliminam reflexões desnecessárias, assim como evitam os sinais externos. Neste ambiente de medição ainda pode se utilizar as lentes apresentadas na Figura 2.26 para minimizar as difrações nas bordas da FSS.

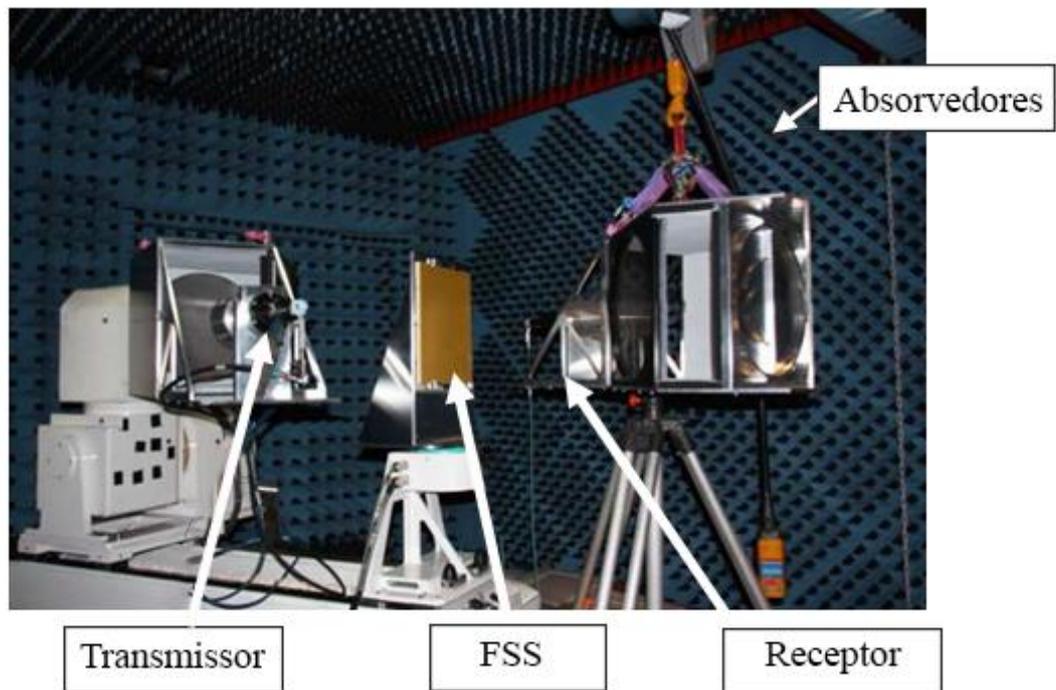


Figura 2.28 – *Setup* de medição usando antenas cornetas em uma câmara anecóica [24], [81].

CAPÍTULO 3

3. DIODOS

As FSS reconfiguráveis eletronicamente necessitam de dispositivos que alterem a sua geometria básica e, conseqüentemente, a sua resposta em frequência. Um desses dispositivos é o diodo PIN, que será descrito neste capítulo, pois foi utilizado nesta dissertação.

O diodo PIN é um dispositivo semiconductor que opera como um resistor variável em aplicações de RF e micro-ondas. Basicamente, é um componente 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 [82]. Possui a característica de controlar valores de potência de RF relativamente altos 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 e baixo peso, [83], [84]. Na Figura 3.1 é ilustrada a estrutura do diodo PIN.

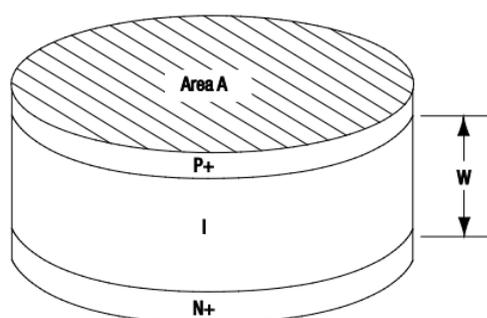


Figura 3.1 – Estrutura do diodo PIN [83].

O diodo PIN é útil para modulação em amplitude de um sinal de RF, quando a corrente de controle é variada continuamente. Pode ser chaveado 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 como defasador de sinais de RF [82], [84].

A curva característica do diodo PIN, visualizada na Figura 3.2, determina a variação da corrente na polarização direta I_D , em função da tensão da sua tensão de junção, V_D . Uma

característica importante do diodo PIN é a sua tensão direta (V_F) para um dado valor de corrente DC fixo [84].

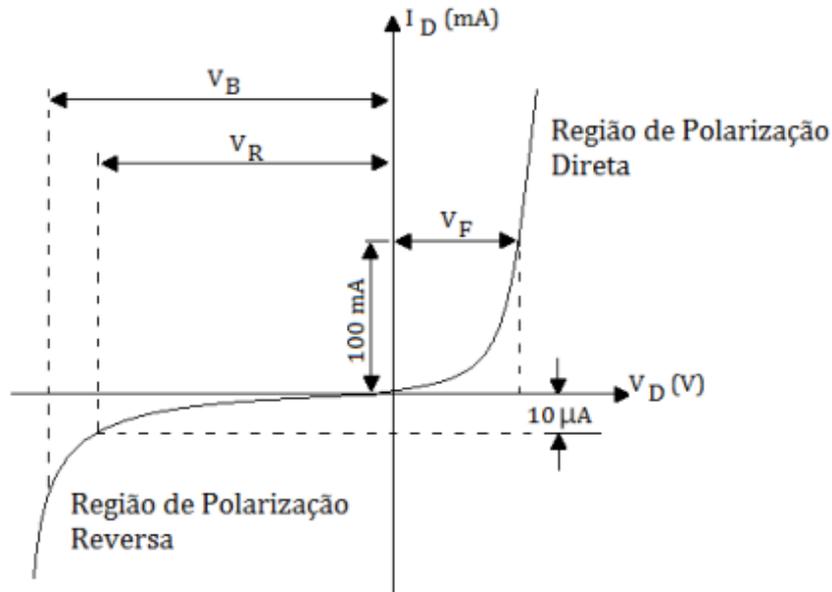


Figura 3.2 – Curva característica do diodo PIN [84].

Os níveis de corrente reversa (I_R) em um diodo PIN são uma garantia do fabricante de que não mais que a quantidade especificada, geralmente alguns microampères, de corrente reversa deva fluir quando V_R é aplicada [83].

De acordo com [84] 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;

Neste trabalho foi utilizado o diodo PIN modelo BAR 64-03W fabricado por Infineon Technologies, Figura 3.3.

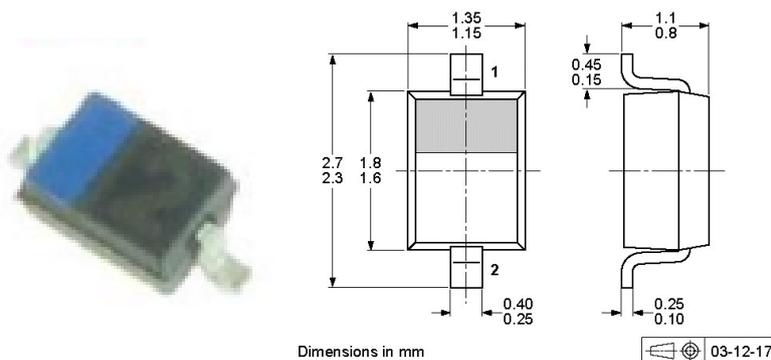


Figura 3.3 – Diodo PIN BAR 64-03 W [55].

Algumas de suas características são [55]:

- 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 Ω para uma corrente de 100 mA;
- Faixa de frequência de operação de 1 MHz a 6 GHz.

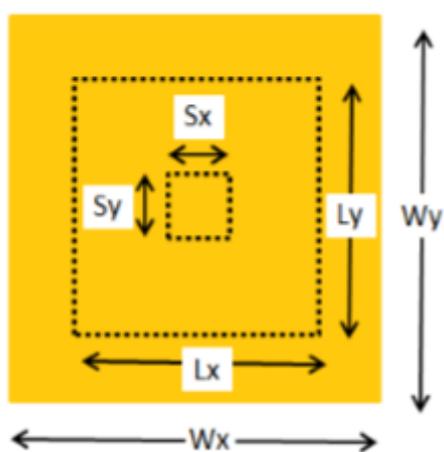
CAPÍTULO 4

4. PROJETO DA FSS RECONFIGURÁVEL

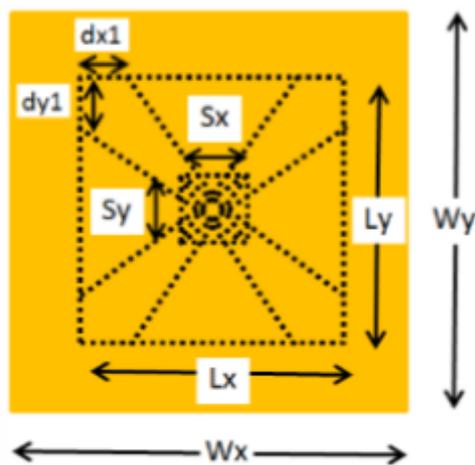
A seguir são apresentadas as etapas do projeto de uma FSS reconfigurável baseada na geometria estrela de quatro braços para aplicação em 2,4 GHz, utilizando o diodo PIN como elemento de comutação.

4.1. Obtenção da geometria

O projeto inicia-se com uma célula unitária com dimensões W_x e W_y , Figura 4.1 (a). Em seguida, é adicionando um *patch* retangular convencional, com dimensões L_x e L_y e uma área de comutação com dimensões S_x e S_y , localizado no centro do *patch*. As dimensões dos braços da estrela são definidas por L_x , L_y (mesmas dimensões do *patch*), $dx1$, $dy1$ (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 Figura 4.1 (b). Finalmente, é retirada a parte da camada de metalização que não constitui a estrela de quatro braços e é obtida a estrutura desejada, Figura 4.1 (c). Para inserir um elemento de comutação, um diodo PIN, por exemplo, é introduzida uma fenda no ponto de comutação, separando os braços inferior e superior, Figura 4.1 (d) [28], [30], [33], [85]–[87].



(a) Célula básica e área de comutação.



(b) Linhas partindo das bordas do *patch* até o ponto de comutação.

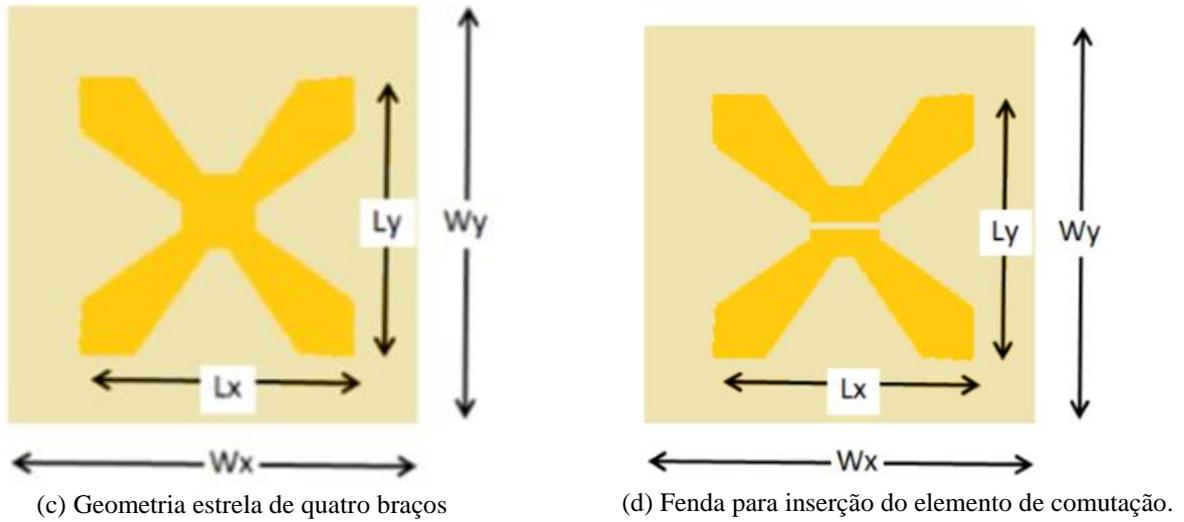


Figura 4.1 – Geometria estrela de quatro braços passo a passo [87].

O cálculo das dimensões da FSS é geralmente baseado na experiência do engenheiro de micro-ondas, juntamente com um processo de otimização numérica. Entretanto, expressões para obtenção das dimensões iniciais e estimativa das frequências de ressonância auxiliam no procedimento de projeto. Para a geometria estrela de quatro braços, a equação (1), estabelecida a partir das pesquisas realizadas no GTEMA-IFPB, fornece uma boa aproximação para a frequência de ressonância, especialmente quando $h \ll \lambda_0$.

$$f_{res} (GHz) = \frac{0,3}{2 Lefe} \quad (1)$$

$$\text{onde, } Lefe = Lx + Ly \quad (2)$$

A frequência de ressonância calculada utilizando (1) é de 2,78 GHz, que apresenta uma boa concordância como o valor simulado para a frequência de ressonância. Entretanto, após a inserção dos diodos PIN houve um deslocamento de aproximadamente 15% para menos na frequência de ressonância. Esta diferença pode ser atribuída ao fato de na simulação não ter considerado os efeitos reativos do diodo PIN. Esses resultados serão discutidos no Capítulo 5.

4.2. FSS utilizada

Na Figura 4.2 é possível observar as dimensões da geometria utilizada. Para servir como ponto de conexão da alimentação dos diodos PIN, linhas finas foram introduzidas. Nota-se que considerando a FSS como um todo, Figura 4.3, cada linha de células pode ser controlada

individualmente, o que é bastante interessante, tanto no processo de fabricação, como no processo de teste da FSS.

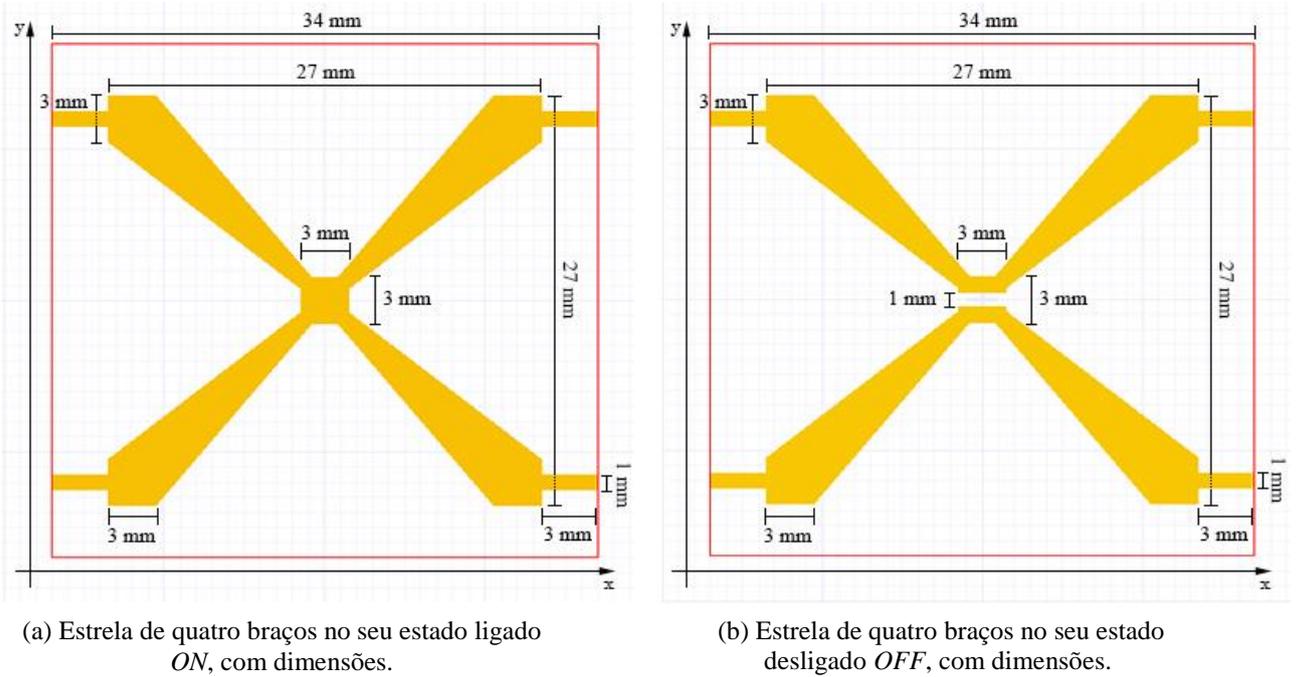


Figura 4.2 – Geometria com dimensões do elemento básico e célula unitária da FSS.

A FSS apresenta um número total de 36 células, com 6×6 elementos, como ilustrado na Figura 4.3.

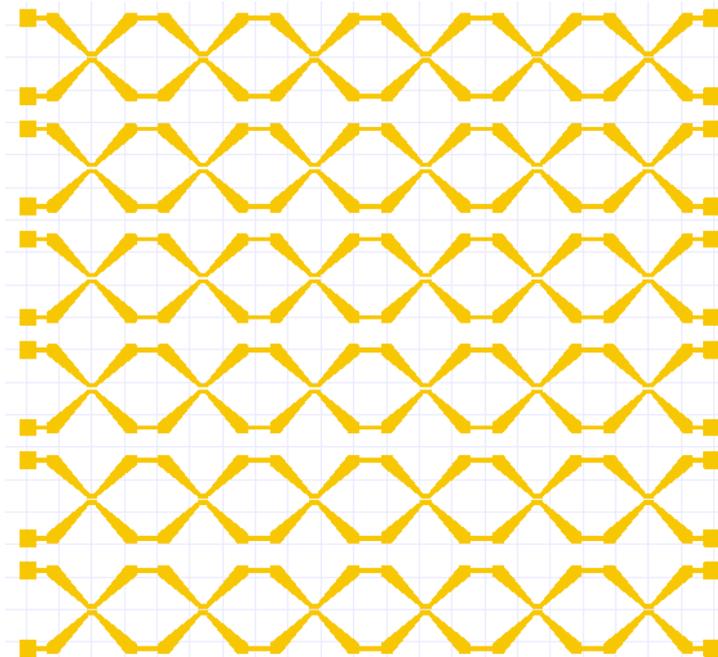


Figura 4.3 – Arranjo da FSS projetada.

4.3. Fixação dos diodos PIN

Após a fabricação da FSS, os diodos PIN foram fixados utilizando-se 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° [88]. A vazão de ar utilizada foi 12 L/min, com uma temperatura de 310 C°.

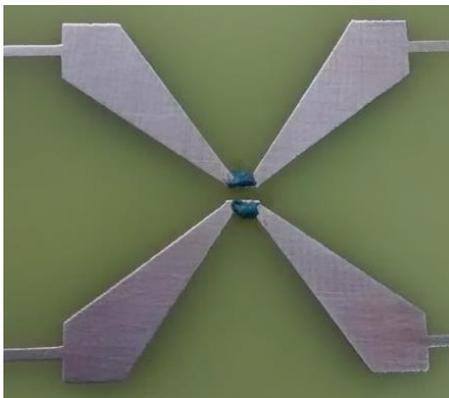
O procedimento para fixação dos diodos PIN na FSS é realizada de acordo com as etapas seguintes:

I – Após a fabricação e limpeza da superfície são inseridos dois pontos de pasta de solda na área de fixação do diodo PIN, Figura 4.4 (a).

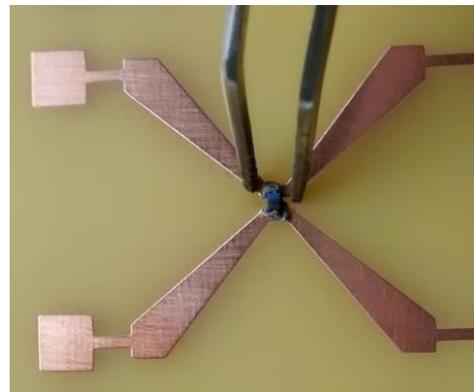
II – Em seguida é introduzido o diodo entre os dois pontos da pasta de solda com a ajuda de uma pinça, Figura 4.4 (b).

III – Com a estação de retrabalho é direcionado o ar quente sobre os terminais do diodo PIN, gerando o aquecimento da pasta de solda, Figura 4.4 (c).

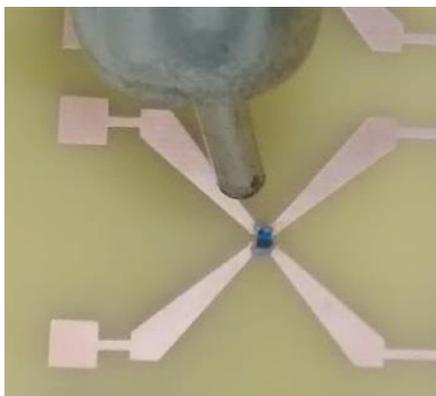
IV – Dessa maneira o diodo é fixado na placa, Figura 4.4 (d).



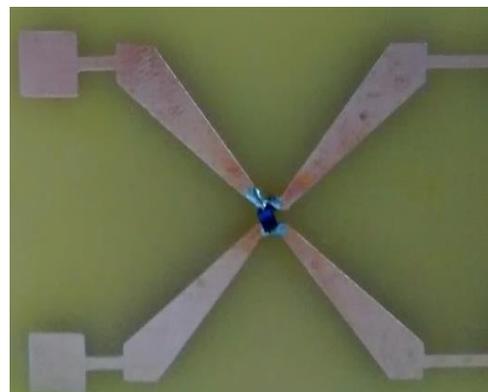
(a) Etapa I



(b) Etapa II



(c) Etapa III



(d) Etapa IV

Figura 4.4 – Etapas da fixação do diodo PIN.

Com este processo os 36 diodos PIN são fixados na FSS e com o uso de um multímetro é feito o teste de continuidade. É importante destacar que este teste é feito linha por linha na estrutura. Na Figura 4.5 é apresentada a bancada de trabalho utilizada e na Figura 4.6 a FSS após a fixação do diodo PIN.

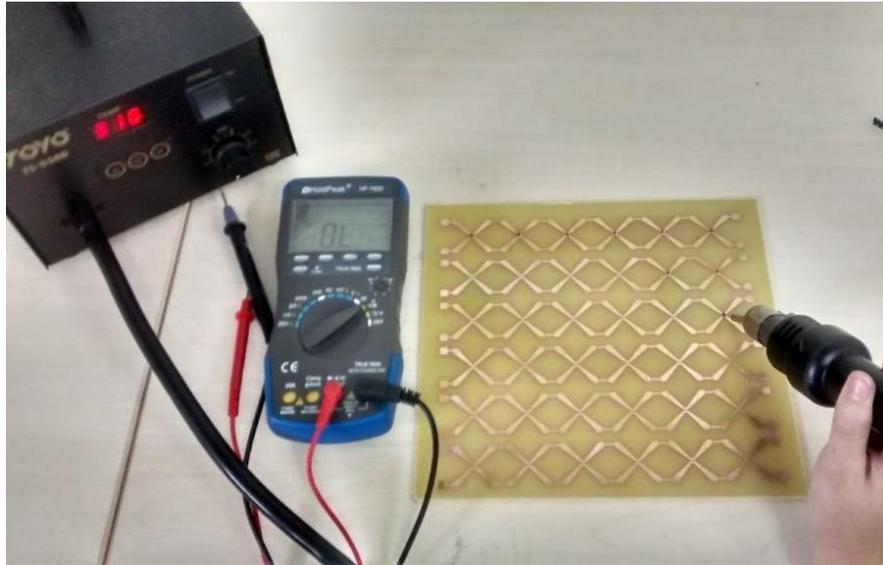


Figura 4.5 – Bancada de trabalho utilizada para o processo de fixação dos diodos PIN.

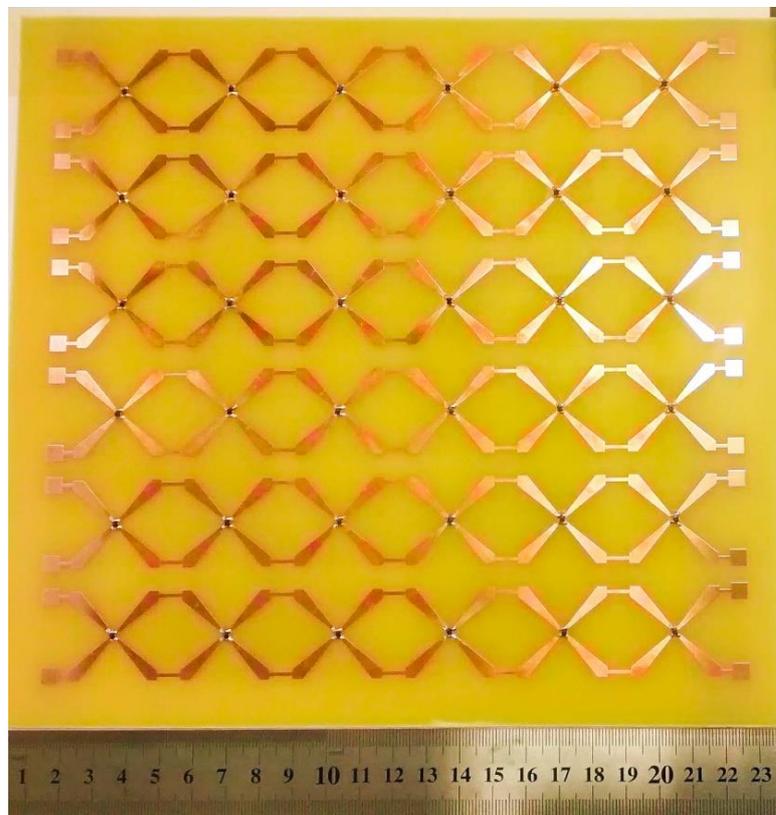
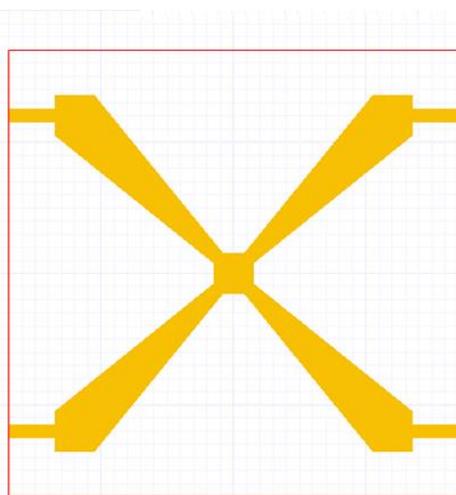


Figura 4.6 – FSS fabricada com diodos PIN fixados.

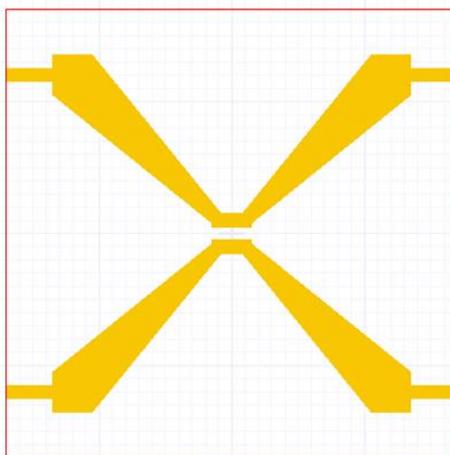
CAPÍTULO 5

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

Os resultados numéricos foram obtidos utilizando o *software* de simulação ANSYS Designer, que implementa o método dos momentos. Na caracterização numérica e experimental da FSS é considerado o substrato de baixo custo FR-4, com 1,6 mm de espessura, constante dielétrica $\epsilon_r = 4,4$ e tangente de perdas de 0,02. Na Figura 5.1 é apresentada a FSS, estado *ON*, (a), estado *OFF*, (b). Observe-se que neste caso os estados *ON* e *OFF* são ideais. Na Figura 5.2 representa-se a FSS com o diodo PIN inserido.



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



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

Figura 5.1 – FSS projetadas.

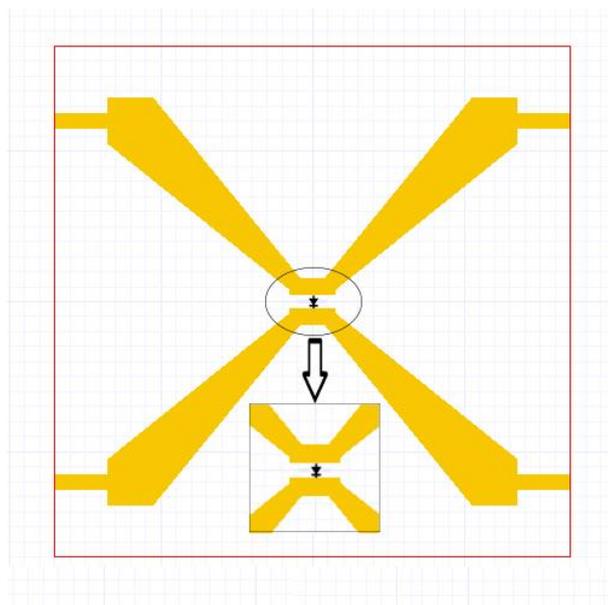


Figura 5.2 – FSS projetada com o diodo PIN.

O protótipo foi fabricado utilizando técnicas de circuito impresso, por meio do procedimento de fixação de adesivo, Figura 5.3 e posterior corrosão com percloroeto de ferro.

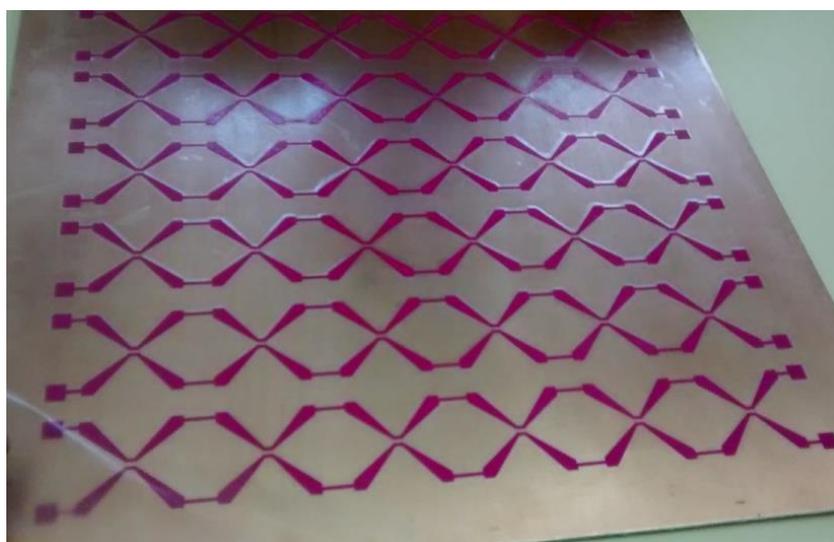


Figura 5.3 – Fixação de adesivo para posterior corrosão da FSS.

A FSS foi construída em uma placa medindo 240 mm × 230 mm. Na Figura 5.4 é apresentada a FSS fabricada com o diodo PIN inserido e seus pontos de conexão para alimentação.

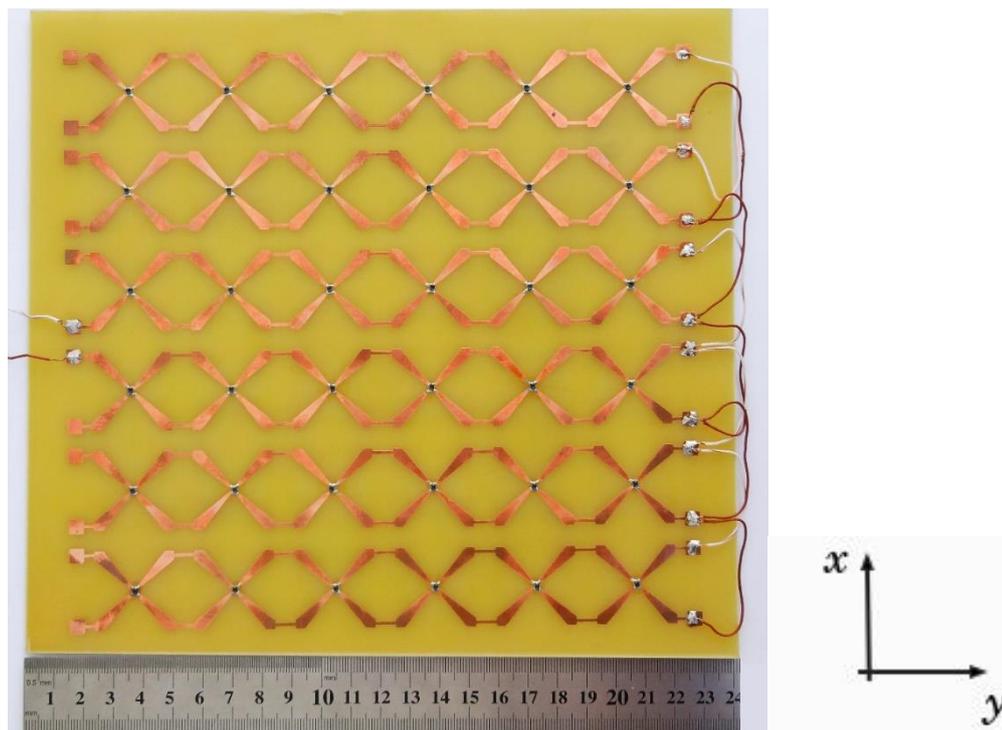


Figura 5.4 – FSS fabricada com diodo PIN inserido e pontos de conexão para alimentação.

Os resultados experimentais foram obtidos no Laboratório de Micro-ondas do GTEMA-IFPB, utilizando um analisador de redes Agilent E5071C, duas antenas do tipo corneta *double ridge guide* A. H. Systems, modelo SAS-571 (700 MHz a 18 GHz) [89] com distância de aproximadamente 80 cm entre elas e um painel absorvedor. É medido o módulo do coeficiente de transmissão, S_{21} (dB), caracterizando a resposta em frequência da FSS. O *setup* de medição é apresentado na Figura 5.5 para o caso da FSS ideal, estado *OFF*, polarização x; Figura 5.6, FSS ideal, estado *OFF* polarização y e Figura 5.7 para FSS com diodo PIN. Neste caso, foi usada uma fonte de tensão e dois resistores de 150Ω em paralelo, para limitar a corrente nos diodos. Destaque-se que o campo elétrico foi mantido fixo na direção y e que para a polarização x, a FSS foi rotacionada em 90° .

Na simulação numérica e nos resultados experimentais, foram consideradas as polarizações x e y, com incidência da onda eletromagnética normal à FSS. Posteriormente serão apresentados os resultados obtidos com a variação angular na polarização y.



Figura 5.5 – *Setup* de medição para FSS ideal, polarização x, estado *OFF*.



Figura 5.6 – *Setup* de medição para FSS ideal, polarização y, estado *OFF*.

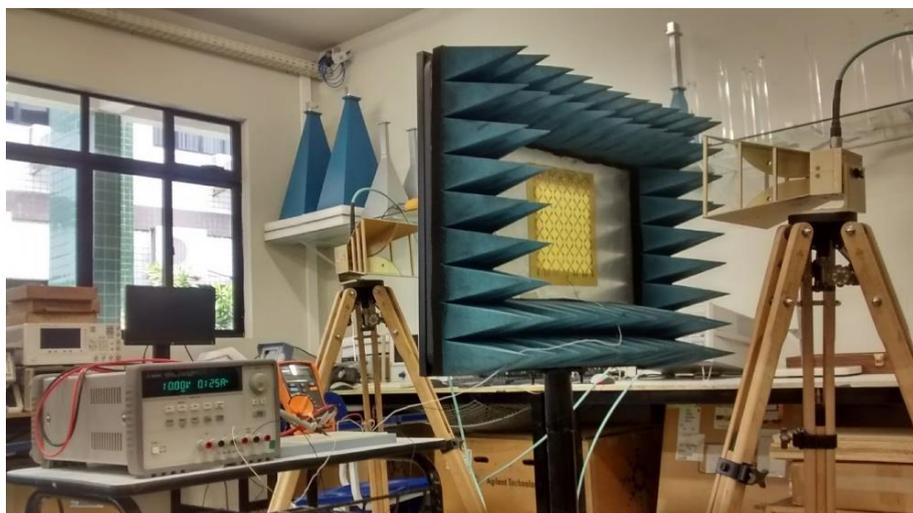


Figura 5.7 – *Setup* de medição para FSS com diodo PIN.

5.1. Polarização x

Os resultados numéricos e experimentais são apresentados considerando a faixa de frequência de 1,0 GHz a 10,0 GHz. Na Figura 5.8 é possível observar as respostas em frequência para a FSS ideal considerando o estado desligado, *OFF*, em que o diodo PIN no estado *OFF* é representado por uma fenda. A frequência de ressonância simulada foi 4,83 GHz e a medida 4,96 GHz, apresentando uma diferença de 2,69%. Neste trabalho foi utilizado como referência os valores simulados. Na Tabela 1 é apresentado um resumo dos resultados obtidos. As variações observadas no início da faixa de frequência decorrem das limitações do processo de medição, quando o comprimento de onda é relativamente grande comparado às dimensões do painel de medição aproximadamente (20 cm x 20 cm) e o ganho das antenas é baixo.

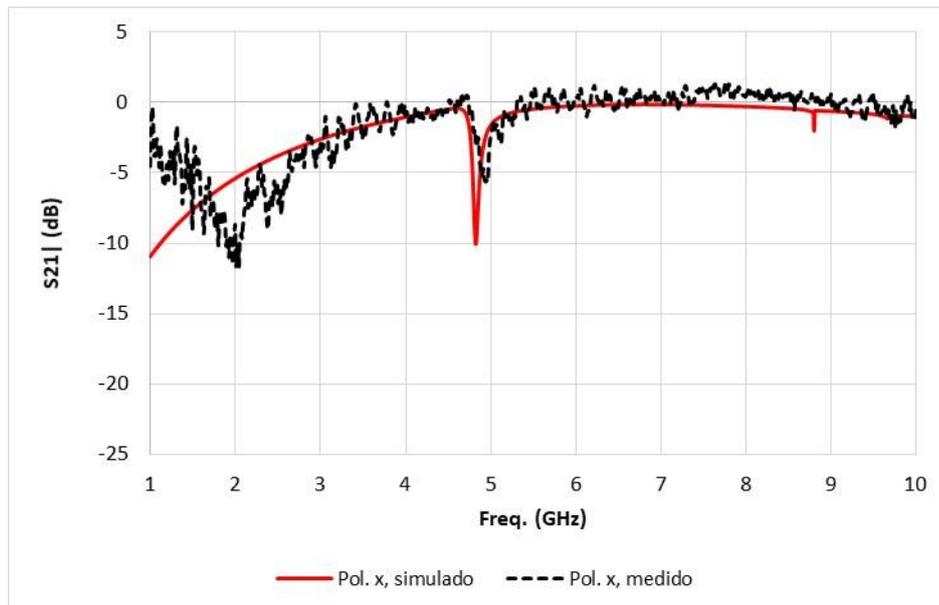


Figura 5.8 – Resposta em frequência, polarização x, FSS ideal, estado *OFF*.

Após analisado o comportamento da FSS ideal, foram inseridos os diodos PIN. Na Figura 5.9 são apresentadas as respostas em frequência para a FSS considerando o estado ligado, *ON*. Na medição foi aplicada a tensão de 1,8 V para obter o estado ligado. Observa-se uma boa concordância entre resultados medidos e simulados. A frequência de ressonância simulada foi 4,83 GHz e a medida 4,94 GHz, apresentando uma diferença de 2,27%. Observe-se que para a simulação foi considerado o diodo ideal, ou seja, apenas o ponto de comutação, sem a fenda. Na Tabela 1 é apresentado um resumo dos resultados obtidos. Observa-se que a resposta em frequência da FSS é praticamente a mesma para os estados *ON* e *OFF*, o que é

esperado para a polarização x , visto que na região de comutação o campo elétrico é praticamente nulo.

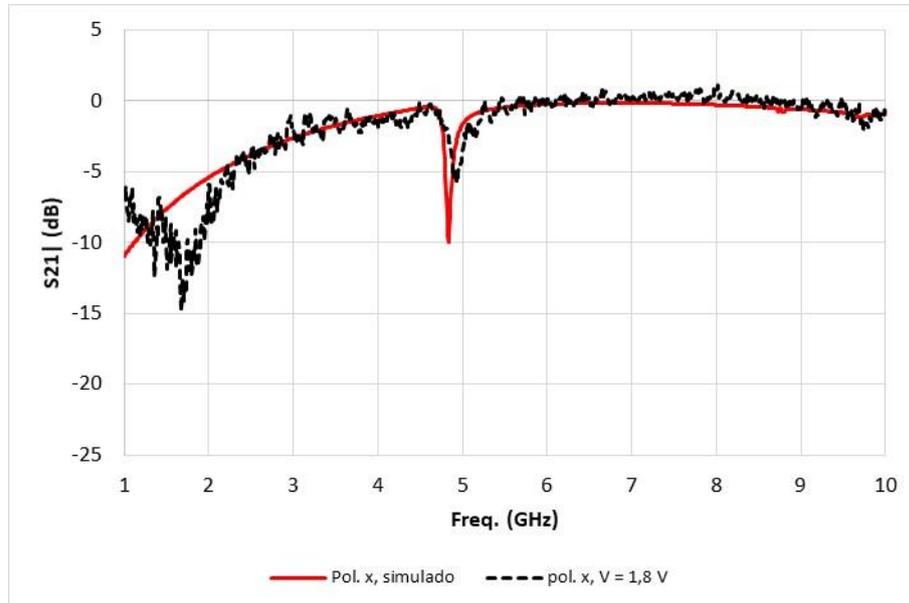


Figura 5.9 – Resposta em frequência, polarização x , FSS estado *ON*, comparada com o diodo diretamente polarizado.

A caracterização da FSS também foi feita com diferentes níveis de tensão sendo aplicados ao diodo PIN. Na Figura 5.10 são apresentados os resultados para 0,0 V (estado *OFF*), em torno da região de transição, 0,8 V e para 1,8 V (estado *ON*), confirmando que praticamente não há variação da resposta em frequência na polarização x , para diferentes tensões aplicadas aos diodos PIN.

Embora o diodo PIN tenha uma especificação para operar até 6 GHz, os resultados experimentais foram medidos até 10,0 GHz, para avaliar a viabilidade de usar o citado diodo além da sua faixa de frequência especificada.

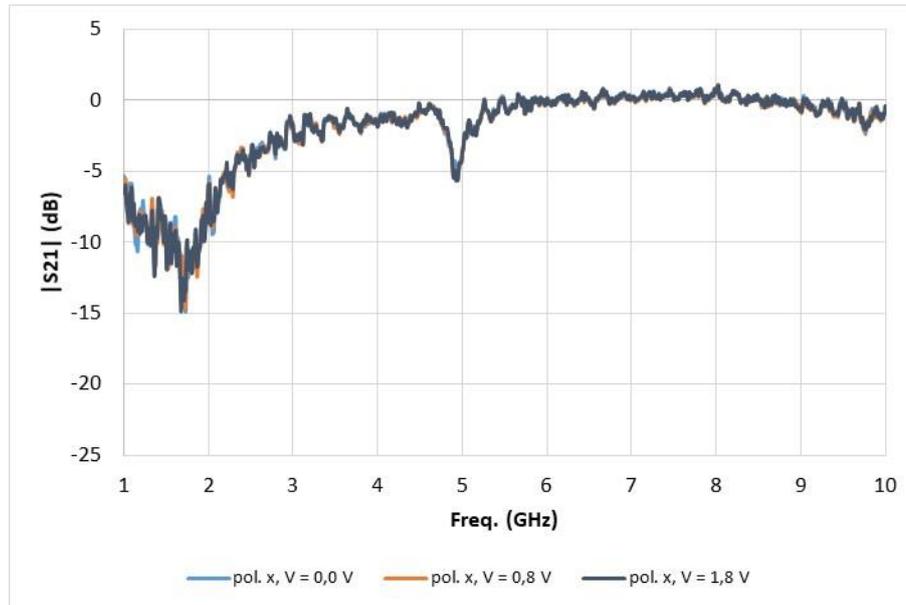


Figura 5.10 – Resposta em frequência, polarização x , FSS com diodo PIN.

Tabela 1 – Resultados da polarização x .

Tipo de FSS		Frequência (GHz)		Diferença (%)
		Valor simulados	Valores medidos	
FSS sem Diodos	<i>OFF - Ideal</i>	4,83	4,96	2,69
	<i>ON - Ideal</i>	4,83	—	—
FSS com Diodos	<i>OFF</i>	—	4,94	—
	<i>Transição</i>	—	4,94	—
	<i>ON</i>	—	4,94	—

5.2. Polarização y

Para o caso da FSS ideal também serão considerados os estados desligado, *OFF*, e ligado, *ON*. Na Figura 5.11 é possível observar as respostas em frequência para a FSS ideal considerando o estado desligado, *OFF*. A frequência de ressonância simulada foi 5,31 GHz e a medida 5,46 GHz, apresentando uma diferença de 2,82%. Na Tabela 2 é apresentado um resumo dos resultados obtidos.

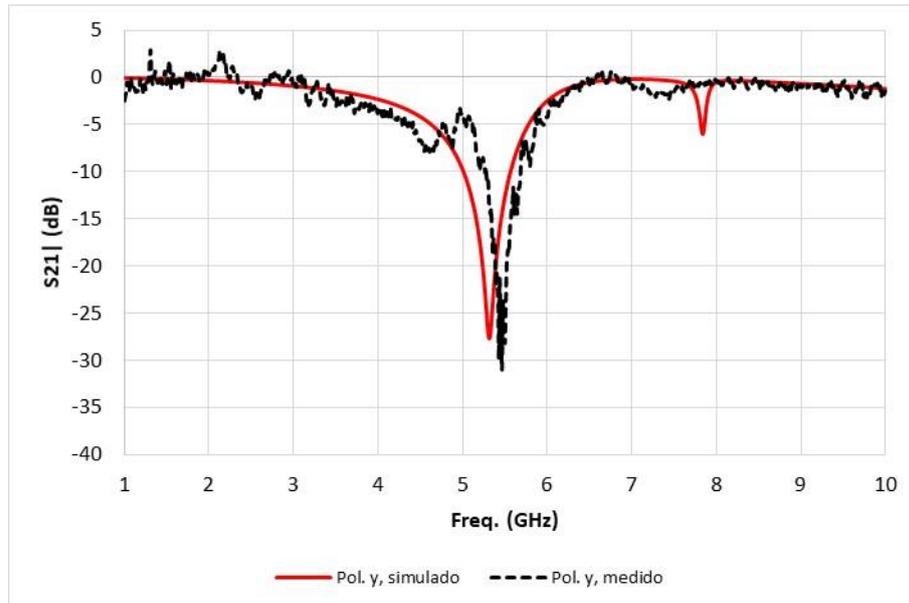


Figura 5.11 – Resposta em frequência, polarização y, FSS ideal, estado *OFF*.

Na Figura 5.12 são apresentadas as respostas em frequência para a FSS considerando o estado ligado, *ON*. A frequência de ressonância simulada foi 2,78 GHz e a medida 2,42 GHz, apresentando uma diferença de 14,87%. Esta diferença pode ser atribuída ao fato de na simulação não ter sido inserido o diodo PIN. Portanto, a inserção dos diodos PIN corresponde a um deslocamento de aproximadamente 15% para menos na frequência de ressonância, quando comparado ao modelo ideal. Isto ocorre devido aos elementos reativos introduzidos com esses dispositivos. Destaca-se ainda que a frequência de ressonância calculada utilizando (1) é de 2,78 GHz, praticamente o mesmo valor considerando o modelo ideal na simulação.

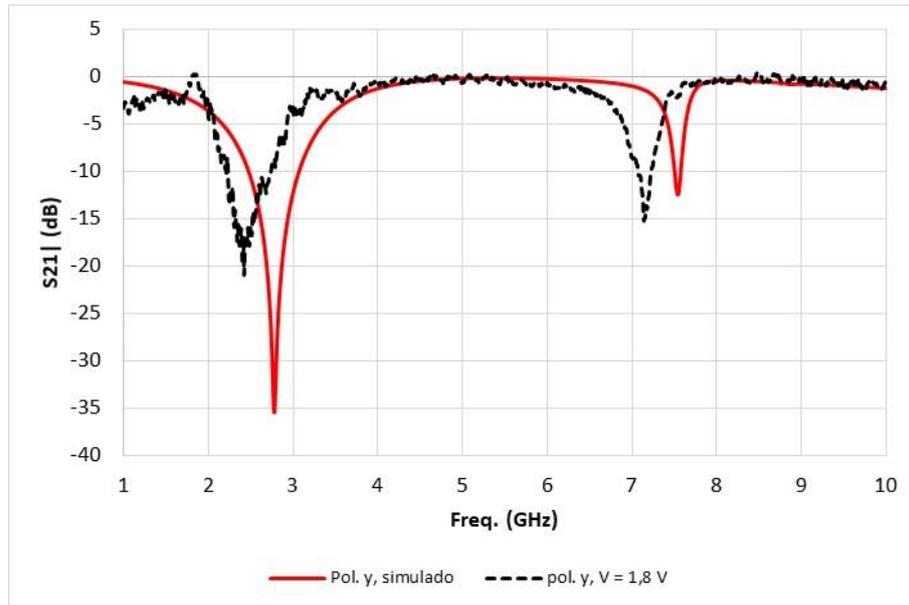


Figura 5.12 – Resposta em frequência, polarização y, FSS estado *ON*, comparada com o diodo diretamente polarizado.

A caracterização da FSS, na polarização y, também foi feita com diferentes níveis de tensão sendo aplicados ao diodo PIN. Na Figura 5.13 são apresentados os resultados para 0,0 V (estado *OFF*), em torno da região de transição 0,8 V e para 1,8 V (estado *ON*).

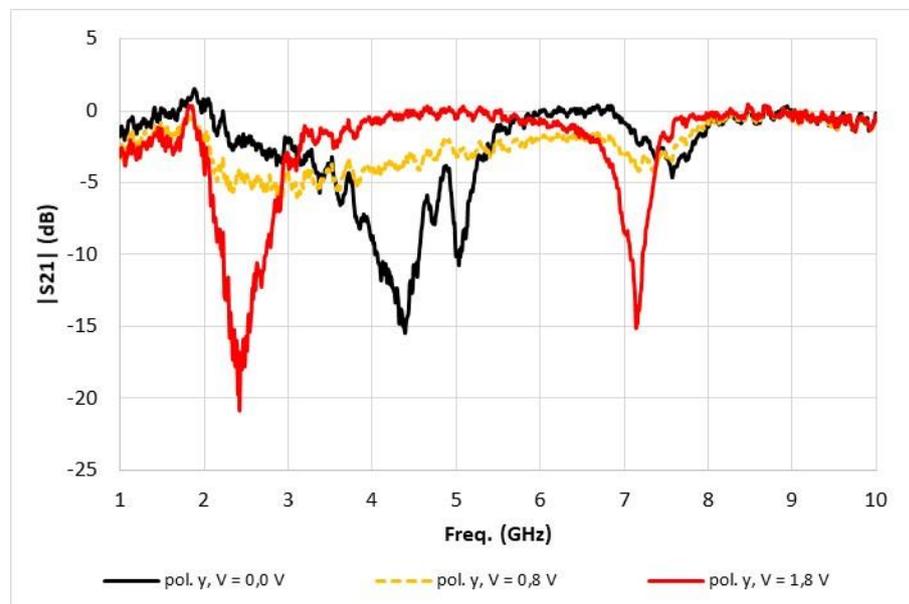


Figura 5.13 – Resposta em frequência, polarização y, FSS com diodo PIN.

Dos resultados observados na Figura 5.13, pode ser destacado que na frequência de interesse, 2,42 GHz, foi possível obter uma variação de mais de 15 dB, para uma mudança do estado *OFF* para o estado *ON*. Além disso, na região de transição, na faixa de frequência

considerada, a FSS não apresenta nenhuma frequência de ressonância, o que é uma característica bastante atrativa para algumas aplicações.

Tabela 2 – Resultados da polarização y.

Tipo de FSS		Frequência (GHz)		Diferença (%)
		Valor simulados	Valores medidos	
FSS sem Diodos	<i>OFF - Ideal</i>	5,31	5,46	2,82
	<i>ON - Ideal</i>	2,78	—	—
FSS com Diodos	<i>OFF</i>	—	4,39	—
	<i>Transição</i>	—	—	—
	<i>ON</i>	—	2,42	—

5.3. Medições da intensidade do sinal de Wi-Fi

Neste trabalho também foi realizada a medição da intensidade do sinal de Wi-Fi, na faixa de 2400-2483,5 MHz dos padrões IEEE 802.11b/g/n (Wi-Fi), quando aplicado à FSS reconfigurável projetada, utilizando uma antena tipo Yagi-Uda AMXY-2400-16, com 16 elementos, (2400 - 2483 MHz) e ganho de 16 dBi. Foi utilizado um painel absorvedor, uma fonte de tensão e dois resistores de 150 Ω em paralelo, para limitar a corrente nos diodos, além do *notebook* com o *software* Homedale. A distância entre a antena e a FSS foi de aproximadamente 40 cm. O Homedale monitora o sinal de múltiplos pontos de acesso WLAN [90]. Para estas medições foi considerada apenas a polarização y, pois é para essa polarização que foi observada a característica de reconfiguração da FSS.

O *setup* de medição é apresentado nas Figuras 5.14 e 5.15. Nas Figura 5.16 e 5.17 é observada a intensidade do sinal obtido através do *software* de monitoramento. Inicialmente os diodos PIN estão no estado *OFF*, portanto a RFSS não atenua o sinal de Wi-Fi. A partir da mudança para o estado ON, o sinal de Wi-Fi apresenta uma atenuação de pelo menos 20 dB, o que é um resultado bastante interessante, confirmando, portanto, a reconfiguração da FSS.

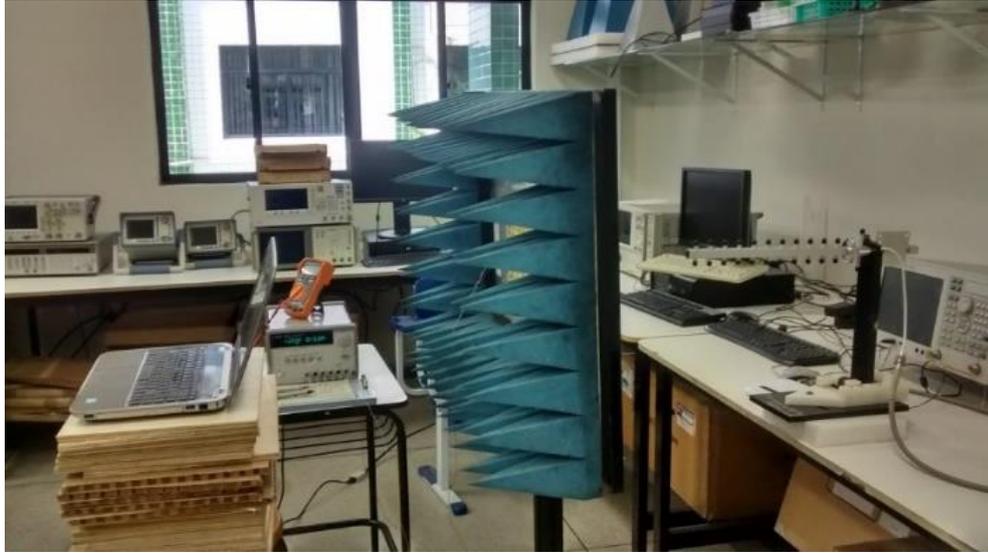


Figura 5.14 – *Setup* de medição da intensidade do sinal de Wi-Fi com apresentação da antena, polarização y, estado *ON*



Figura 5.15 – *Setup* de medição da intensidade do sinal de Wi-Fi, polarização y.



Figura 5.16 – Resposta da intensidade de sinal de Wi-Fi apresentado no *notebook*, polarização y, FSS com diodo PIN.

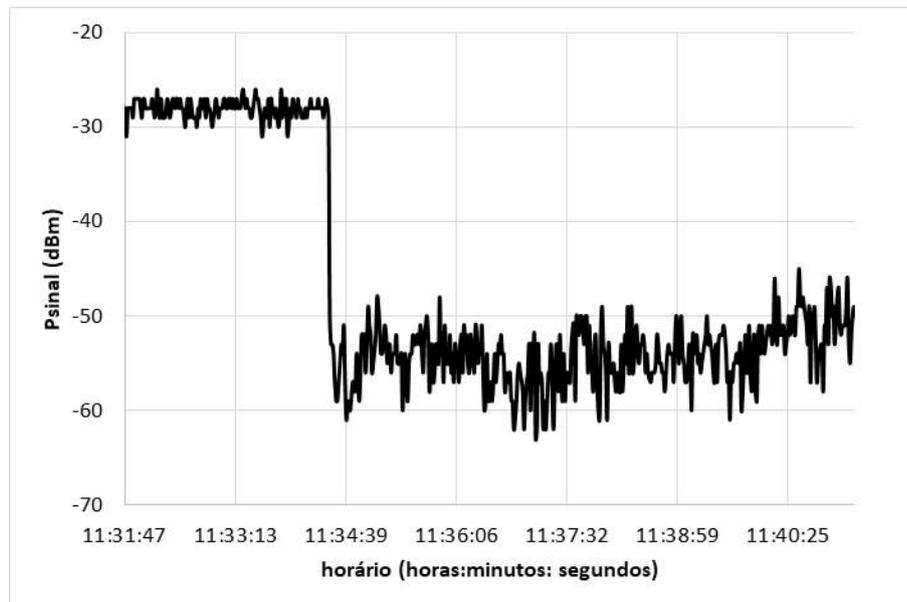


Figura 5.17 – Resposta da intensidade de sinal de Wi-Fi, polarização y, FSS com diodo PIN.

CAPÍTULO 6

6. VARIAÇÃO ANGULAR

Foram realizadas também medições da incidência da onda eletromagnética na FSS considerando a variação angular. Neste caso, foi considerada apenas a polarização *y*, visto que na polarização *x* a resposta em frequência não é afetada pela mudança dos estados *ON* e *OFF*. Foi utilizado o mesmo *setup* de medição apresentado anteriormente: um analisador de redes Agilent E5071C, duas antenas do tipo cornetas *double ridge guide* A. H. Systems, modelo SAS-571 (700 MHz a 18 GHz) [89] com distância de aproximadamente 80 cm entre elas, uma fonte de tensão e dois resistores de 150 Ω em paralelo, para limitar a corrente nos diodos, além de um painel absorvedor com base giratória, conforme apresentado nas Figuras 5.5–5.7

Foram considerados os estados desligado, *OFF*, e ligado, *ON*. Na Figura 6.1 é possível observar as respostas em frequência para a FSS considerando o estado desligado, *OFF*. Aplicou-se uma tensão de 0,0 V (estado *OFF*) e foram utilizados os seguintes ângulos: 0°, 15°, 30° e 45°. Para uma incidência de 15° foi obtido uma diferença de 0,91%, uma incidência de 30° apresentou uma diferença de 8,25% e uma incidência de 45° apresentou 17,43% de diferença. Esses resultados foram calculados utilizando como referência a incidência de 0°. A variação da frequência de ressonância é maior para a incidência angular a partir de 30°, entretanto, essa variação é decorrente muito mais das limitações do *setup* de medição. Ainda assim, não aparece nenhuma ressonância na faixa de frequência de interesse (2,4 GHz). Na Tabela 3 é apresentado um resumo dos resultados obtidos.

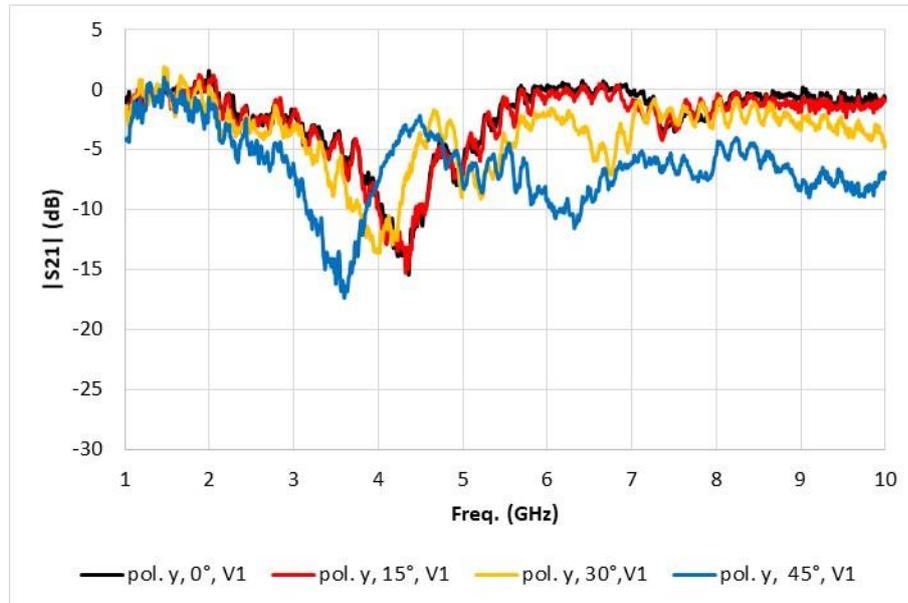


Figura 6.1 – Resposta em frequência, polarização y, FSS com diodo PIN, tensão V1 = 0,0 V.

Tabela 3 – Resultados obtidos para tensão V1.

Tensão V1 = 0,0 V	
Ângulos	Valores medidos (GHz)
0°	4,36
15°	4,32
30°	4,00
45°	3,60

Na Figura 6.2 é possível observar as respostas em frequência para a FSS considerando o estado ligado, *ON*. Aplicou-se uma tensão de 1,8 V (estado *ON*), e utilizou-se os seguintes ângulos: 0°, 15°, 30° e 45°. Para uma incidência de 15° foi obtido uma diferença de 2,41%, uma incidência de 30° apresentou uma diferença de 2,01% e uma incidência de 45° apresentou 1,61% de diferença. Esses resultados foram calculados utilizando como referência a incidência de 0°. Neste caso, mesmo para o ângulo de incidência de 45°, praticamente não há variação da frequência de ressonância, indicando uma boa estabilidade angular. Na Tabela 4 é apresentado um resumo dos resultados obtidos.

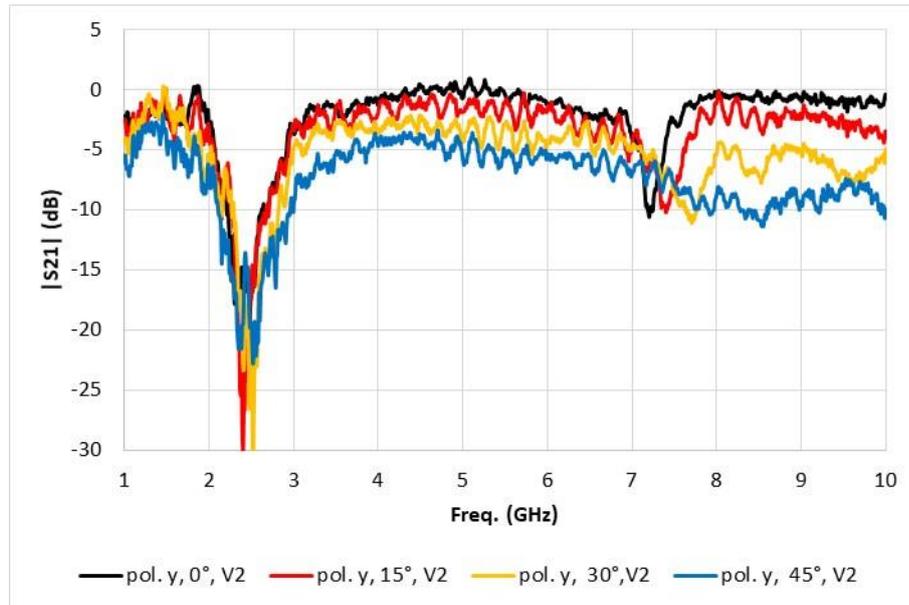


Figura 6.2 – Resposta em frequência, polarização y, FSS com diodo PIN, tensão $V_2 = 1,8$ V.

Tabela 4 – Resultados obtidos para tensão V_2 .

Tensão $V_2 = 1,8$ V	
Ângulos	Valores medidos (GHz)
0°	2,48
15°	2,42
30°	2,53
45°	2,52

CAPÍTULO 7

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento e a caracterização de uma superfície seletiva em frequência reconfigurável, RFSS, baseada na geometria estrela de quatro braços, tendo o diodo PIN como elemento de comutação para aplicação na faixa de 2400-2483,5 MHz dos padrões IEEE 802.11b/g/n (Wi-Fi) e IEEE 802.15 (*Bluetooth*).

Inicialmente, foi feito um estudo sobre as superfícies seletivas em frequência, destacando seus conceitos básicos, sendo descritas suas características e classificações. Também foi apresentada uma breve descrição da teoria sobre os diodos PIN. A geometria estrela de quatro braços foi descrita e as equações iniciais de projeto propostas. Uma vez estabelecidas as condições do projeto, a RFSS foi projetada e caracterizada numericamente. Em seguida a FSS foi fabricada e caracterizada experimentalmente, considerando as polarizações x e y , diferentes estados de polarização dos diodos PIN (*ON* e *OFF*), bem como diferentes ângulos de incidência.

O processo de fabricação da FSS e da fixação dos diodos PIN foi descrito. Na análise experimental, foi utilizado um *setup* de medição contendo antenas tipo corneta *double ridge guide* A. H. Systems, modelo SAS-571 (700 MHz a 18 GHz), um painel absorvedor, uma fonte de tensão e um analisador de redes.

Os resultados numéricos e experimentais são apresentados utilizando-se uma faixa de frequência de 1,0 GHz a 10,0 GHz. Inicialmente, 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*. Observou-se que para a polarização x , a comutação do diodo PIN, *ON* ou *OFF*, não altera a resposta em frequência da FSS, o que é esperado, considerando que o campo elétrico é praticamente nulo na região de comutação para essa polarização. A caracterização da estrutura também foi feita com diferentes níveis de tensão sendo aplicados ao diodo PIN: 0,0 V (estado *OFF*), em torno da região de transição 0,8 V e 1,8 V (estado *ON*).

Para a polarização y , também foi considerado os estados desligado, *OFF*, e ligado, *ON*. No estado *OFF* a FSS deixa de atenuar a faixa de 2,4 GHz. No estado *ON*, a partir da aplicação de uma tensão de $V = 1,8$ V, a FSS rejeita a faixa de frequência estabelecida neste trabalho.

Em seguida, foi feita a medição da intensidade do sinal experimentalmente com o auxílio do *software* Homedale e os resultados foram bastante satisfatórios, pois no estado *OFF*,

a RFSS não atenua o sinal de Wi-Fi e a partir da mudança para o estado ligado, o sinal de Wi-Fi apresenta uma atenuação de pelo menos 20 dB, confirmando, portanto, a reconfiguração da FSS.

Por fim, foram realizadas as medições da incidência da onda eletromagnética na FSS considerando a variação angular e constatou-se que pequenas variações angulares não alteram a resposta em frequência da estrutura.

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

- Modelar o diodo com os seus parâmetros fornecidos pelo fabricante;
- Utilizar outro tipo de elementos de comutação, como, por exemplo, o diodo varicap ou chaves MEMS;
- Aplicar a geometria proposta em antenas inteligentes.

TRABALHOS PUBLICADOS:

Neto, Alfredo Gomes; Costa e Silva, Jefferson; Mamedes, Deisy Formiga; da Silva Souza, Juliete; da Silva Evangelista, Thamyris, “Frequency selective surface based on open trapezoidal rings geometry,” in *2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, 2017, Águas de Lindóia. *2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, 2017. v. 1. p. 1–5.

A. Gomes Neto, J. C. Silva, J. S. Souza, M. O. Alencar, T. S Evangelista, “Desenvolvimento de uma FSS Banda Dupla para Aplicações em Paredes Inteligentes,” in *XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais – SBrT, 2017*, São Paulo.

A. Gomes Neto, J. C. Silva, T. S Evangelista, “Desenvolvimento de superfície seletiva em frequência reconfigurável baseada na geometria estrela de quatro braços para aplicação em 2,4 GHz”, in *II Simpósio de Pós-Graduação e Inovação do IFPB (SIMPIF) 2017*, João Pessoa, novembro 2017, p. 498–499.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Clegg e A. Weisshaar Eason. “Future radio spectrum access,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 3, pp.239–241, 2014.
- [2] P. Kong, X. W. Yu, L. Miao and J. J. Jiang, “Switchable frequency selective surfaces absorber/reflector for wideband applications,” in *2014 IEEE International Conference on Ultra-WideBand (ICUWB)*, Paris, France, September 2014, pp. 256–259.
- [3] 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,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 7, pp. 3652–3656, July 2014.
- [4] I. Acharya and R. Ramesh, “FSS reflector surface for gain enhancement of a monopole slot antenna,” in *2015 IEEE International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP)*, Melmaruvathur, India, October 2015, pp. 0388–0391.
- [5] F. Yu, L. Zhang, Q. H. Liu, L. Ye and Y. Liu, “Cost efficiency adaptive antenna system based on active frequency selective surface,” in *2015 IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB)*, Montreal, Canada, October 2015, pp. 1–3.
- [6] Hilner de Paiva Almeida Ferreira, **Matrioska: Uma Proposta de Geometria para FSS Multibandas**,: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Paraíba, Brasil, Dissertação de Mestrado, 2014.
- [7] A. Gomes Neto, A. G. D’Assunção Junior, J. C. Silva, I. S. S. Lima, L. C. M. d. Moura, R. G. G. d. Carvalho, “Ajuste da resposta em frequência de FSS com geometria estrela de quatro braços,” in *Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica, Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, MOMAG 2014*, Curitiba, Brasil, 30 agosto a 2 setembro, pp. 610–613.
- [8] J. C. Vardaxoglou, **Frequency Selective Surfaces - Analysis and Design**, Research Studie, England, 1997.
- [9] A. Edalati e T. A. Denidni, “Frequency selective surfaces for beam-switching applications,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 1, pp. 195–200, Jan. 2013.
- [10] R. Mittra, C. H. Chan e T. Cwik, “Techniques for Analyzing Frequency Selective Surfaces – A Review,” *Proceedings of the IEEE*, vol.76, no. 12, pp. 1593–1615, Dec. 1988.
- [11] T. K. Wu, **Frequency Selective Surface and Grid Array**, **John Wiley & Sons, INC.**, New York, 1995.
- [12] B. A. Munk, **Frequency Selective Surfaces: Theory and Design**, Wiley, New York 2000.
- [13] K. Delihacioglu, S. Uckun, T. Ege, “L-Shaped Frequency Selective Surfaces as Conducting Elements on Chial Slab,” *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, vol. 8, no. 4, pp. 1398–1401, 2006.

- [14] Rossana Moreno Santa Cruz, **Análise e Otimização de Superfícies Seletivas de Frequência Utilizando Redes Neurais Artificiais e Algoritmos de Otimização Natural**,: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, Brasil, Tese de Doutorado, 2009.
- [15] R. M. S. Cruz, P. H. F. Silva, A. G. D'Assunção, "Synthesis of Crossed Dipole Frequency Selective Surfaces Using Genetic Algorithms and Artificial Neural Networks," in *2009 International Joint Conference on Neural Networks*, Atlanta, New York, July 2009, pp. 627–633.
- [16] R. H. C. Maniçoba, A. G. D'Assunção, A. L. P. S. Campos, "Improving Stop-Band Properties of Frequency Selective Surface with Koch Fractal Elements," in *2010 International Workshop on Antenna Technology*, Lisbon, Portugal, March 2010, pp. 1–4.
- [17] S. Uçkun, T. Ege, "Three Concentric Rings as Frequency Selective Surfaces on Isotropic Chiral Slabs," *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, vol. 8, no. 1, pp. 345–349, 2006.
- [18] D. Singh, A. Kumar, S. Meena, V. Agarwala, "Analysis of Frequency Selective Surfaces for Radar Absorbing Materials," *Progress in Electromagnetics Research B*, vol. 38, pp. 297–314, 2012.
- [19] A. L. P. de S. Campos, **Superfícies Seletivas em Frequência: Análise e Projeto**, Editora IFRN, Brasil, 2009.
- [20] André Nascimento da Silva, **Análise dos Campos Eletromagnéticos de FSS com Geometria Fractal**,: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Paraíba, Brasil, Trabalho de Conclusão de Curso, 2012.
- [21] J. Romeu and Y. Rahmat-Samii, "Fractal FSS: A novel dual-band frequency selective surface," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 48, no. 7, pp. 1097–1105, Jul. 2000.
- [22] P. H. F. Silva, A. L. P. S. Campos e E. E. C. Oliveira, "Design of miniaturized frequency selective surfaces using Minkowski Island fractal," *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 9, no. 1, 2010.
- [23] E. E. C. Oliveira, P. H. F. Silva, A. L. P. S. Campos e A. G. d'Assunção, "Small-size quasi-fractal patch antenna using the Minkowski curve," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 52, no. 4, 2010.
- [24] Josiel do Nascimento Cruz, **Caracterização de FSS com Geometria Matrioska Aberta**,: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Paraíba, Brasil, Dissertação de Mestrado, 2015.
- [25] D. S. Weile, E. Michielssen and K. Gallivan, "Reduced-order modeling of multiscreen frequency-selective surfaces using Krylov-based rational interpolation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 49, no. 5, pp. 801–813, May 2001.

- [26] D. S. Weile and E. Michielssen, “Analysis of frequency selective surfaces through the blazing onset using rational Krylov model-order reduction and Woodbury singularity extraction,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 49, no. 10, pp. 1470-1478, Oct. 2001.
- [27] Ghaffer Iqbal Kiani, **Passive, Active e Absorbing Frequency Selective Surfaces for Wireless Communication Applications**,: Macquarie University, Sydney, Australia, Tese de Doutorado, 2009.
- [28] Isaac Silva Sousa Lima, **Caracterização de FSS com Geometria em Forma de Estrela de Quatro Braços**,: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Paraíba, Brasil, Dissertação de Mestrado, 2014.
- [29] André Nascimento da Silva, **Caracterização de FSS com Geometria em Forma de U**,: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Paraíba, Brasil, Dissertação de Mestrado, 2014.
- [30] Leidiane Carolina Martins de Moura, **Caracterização de FSS com Geometria Estrela de Quatro Braços Tipo Fenda**,: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Paraíba, Brasil, Dissertação de Mestrado, 2015.
- [31] 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,” *Progress In Electromagnetics Research Letters*, vol. 28, pp. 53–62, 2012.
- [32] D. B. Webb, E. Michielssen and R. Mittra, “Thick frequency selective surfaces”, in 1992 *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Chicago, IL, USA, June 1992, vol. 4, pp. 1795–1798.
- [33] Nieremberg José Pereira de Lyra Ramos, **Caracterização de Antena Tipo Refletor de Canto Utilizando Superfícies Seletiva em Frequência**,: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Paraíba, Brasil, Dissertação de Mestrado, 2016.
- [34] D. Sievenpiper, J. Schaffner, R. Loo, G. Tansonan, S. Ontiveros and R. Harold, “A tunable impedance surface performing as a reconfigurable beam steering reflector,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 50, no. 3, pp. 384–390, Mar. 2002.
- [35] D. Ferreira, I. Cuiñas, R. F. S. Caldeirinha and T. R. Fernandes, “3-D mechanically tunable square slot FSS,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 1, pp. 242–250, Jan. 2017.
- [36] O. Sushko, M. Pigeon, T. Kreouzis, C. Parini, R. Donnan, R. Dubrovka, “Low-cost inkjet-printed FSS band-pass filters for 100 and 300 GHz,” in *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Davos, Switzerland, April, 2016, pp. 1–3.
- [37] Airway, “Por dentro do “nariz” do avião,” Airway, 04 Maio 2016. [Online]. Available: <https://airway.uol.com.br/por-dentro-do-nariz-do-aviao/>. [Acesso em 03 Janeiro 2018].
- [38] P. C. Kim, D. G. Lee, I. S. Seo, 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.

[39] Y. Rahmat-Samii and A. N. Tulintseff, “Diffraction analysis of frequency selective reflector antennas,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 41, no. 4, pp. 476–487, March 1993.

[40] P. P. Sarkar, “Frequency selective surfaces: Development and prospect,” in *2015 Third International Conference on Computer, Communication, Control and Information Technology (C3IT)*, Hooghly, India, March 2015, pp. 7–8.

[41] U. Rafique, G. I. Kiani, M. M. Ahmed e S. Habib, “Frequency selective surface absorber for WLAN security,” in *2011 5th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Rome, Italy, May 2011, pp. 11–15.

[42] Ultra Downloads, “Papel de parede impede que vizinhos acessem a sua rede sem fio,” Canaltech, 13 Maio 2012. [Online]. Available: <https://canaltech.com.br/internet/Papel-de-parede-impede-que-vizinhos-acessem-sua-rede-sem-fio/>. [Acesso em 03 Janeiro 2018].

[43] M. Gustafsson, A. Karlsson, A. P. P. Rebelo and B. Widenberg, “Design of frequency selective windows for improved indoor outdoor communication,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 6, pp. 1897–1900, June 2006.

[44] M. O. Al Kalaa; W. Balid; H. H. Refai; N. J. LaSorte; S. J. Seidman; H. I. Bassen; J. L. Silberberg; D. Witters, “Characterizing the 2.4 GHz Spectrum in a Hospital Environment: Modeling and Applicability to Coexistence Testing of Medical Devices,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 59, no. 1, pp. 58–66, Feb. 2017.

[45] L. Subrt, P. Pechac, A. Vallecchi, L. Ford, R. Langley, J. Rigelsford, “Advanced modelling of intelligent walls for indoor smart environments,” in *2014 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Hague, Netherlands, April 6–11, 2014, pp. 620–622.

[46] Jiayin Roberts, **Design of a Secure Electromagnetic Building**.: University of Sheffield, Sheffield, England, PhD. Thesis, 2014.

[47] A. Gomes Neto, J. C. Silva, J. S. Souza, M. O. Alencar, T. S. Evangelista, “Desenvolvimento de uma FSS Banda Dupla para Aplicações em Paredes Inteligentes,” in *XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais*, SBrT 2017, São Paulo, Brasil, setembro, pp. 67–71.

[48] M. Raspopoulos and S. Stavrou, “Frequency selective buildings through frequency selective surfaces,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 8, pp. 2998–3005, Aug. 2011.

[49] G. I. Kiani, K. L. Ford, L. G. Olsson, K. P. Esselle, and C. J. Panagamuwa, “Switchable frequency selective surface for reconfigurable electromagnetic architecture of buildings,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 2, pp. 581–584, Feb. 2010.

- [50] In-Gon Lee, Ie-Pya Hong, “Frequency selective surface design for blinds applications,” in *2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Gothenburg, Sweden, April 2013, pp. 2753–2755.
- [51] T. K. Chang, R. J. Langley, and E. A. Parker, “Frequency selective surfaces on biased ferrite substrates,” *Electronic Letter*, vol. 30, no. 15, pp. 1193–1194, Jul. 1994.
- [52] 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.
- [53] S. V. Hum and P. C. Julien. “Reconfigurable reflectarrays and array lenses for dynamic antenna beam control: a review,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, n. 1, pp. 183–198, Jan. 2014.
- [54] 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.
- [55] S. N, Azemi, K. Ghorbani and W.S. Rowe, “A reconfigurable FSS using a spring resonator element,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 781-784, June 2013.
- [56] J. Yuan, S. Liu, X. Kong, and H. Yang, “A reconfigurable frequency selective surface for tuning multi-band frequency response separately,” In *2013 Proceedings of the International Symposium on Antennas & Propagation*, Nanjing, China, October 2013, pp. 1288–1290.
- [57] 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 *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Lisbon, Portugal, April 2015.
- [58] M. Safari, C. Shafai, and L. Safai, “Frequency selective surface implemented using MEM-switched ground plane slots,” in *2012 IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems (ICWITS)*, Maui, HI, USA, November 2012, pp. 1–4
- [59] X. Liang, L. Li, J. A. Bossard, and D. H. Werner, “Reconfigurable frequency selective surfaces with silicon switches,” in *2006 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Albuquerque, NM, USA, July 2006, pp. 189–192
- [60] M.A. Habib, M. N. Jazi, A. Djaiz, M. Nedil, and T. Denidni, “Switched-beam antenna based on EBG periodic structures,” in *2009 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Boston, MA, USA, June 2009, pp. 813–816.
- [61] 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 *2012 Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, Chicago, IL, USA, July 2012, pp. 1–2.
- [62] B. Sanz-Izquierdo and E. Parker, “Dual polarized reconfigurable frequency selective surfaces,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* , vol. 62, n. 2, pp.764–771, February 2014.

- [63] Moufida Bouzlama, Moubarek Traii, Tayeb A. Denidni and Ali Gharsallah “Beam-Switching Antenna With a New Reconfigurable Frequency Selective Surface,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 1159–1192, November 2015.
- [64] R. Dubrovka, J. Vazquez, C. Parini and D. Moore, “Equivalent circuit method for analysis and synthesis of frequency selective surfaces,” *IEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation*, vol.153, no. 3, pp. 213–220, June 2006.
- [65] 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, May 2008.
- [66] R. J. Langley e E. A. Parker, “Equivalent circuit model for arrays of square loops,” *Electronics Letters*, vol. 18, no. 7, pp. 294–296, April 1982.
- [67] R. J. Langley e E. A. Parker, “Double-square frequency-selective surfaces and their equivalent circuit,” *Electronics Letters*, vol. 19, no. 17, pp. 675–677, August 1983.
- [68] W. C. Gibson, **The Method of Moments in Electromagnetics**, Chapman & Hall /CRC, New York, 2008.
- [69] M. N. O. Sadiku, **Elementos de Eletromagnetismo**, Bookman, Brasil, 2012.
- [70] J. L Volaskis, A. Chatterjee, and L. C. Kempel, **Finite Element Method for Electromagnetics, Antennas, Microwave Circuits, and Scattering Applications**, Wiley-IEEE Press, USA, 1998.
- [71] T. Itoh, G. Pelosi and P. P. Silvester, **Finite Element Software for Microwave Engineering**, Wiley, New York, 1996.
- [72] P. Harms, R. Mittra and W. Ko, “Implementation of the periodic boundary condition in the finite-difference time-domain algorithm for FSS structures,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 42, no. 9, pp. 1317–1324, September 1994.
- [73] N. Kaneda, B. Houshmand and T. Itoh, “FDTD analysis of dielectric resonators with curved surfaces,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 45, no. 9, pp. 1645–1649, September 1997.
- [74] 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.
- [75] M. Titaouine, A. G. Neto, H. Baudrand, and F. Djahli, “WCIP method applied to active frequency selective surfaces,” *Journal of Microwaves*, vol. 6, no. 1, pp. 1–16, June 2007.
- [76] Valdez Aragão de Almeida Filho, **Arranjos Log-Periódicos Compactos em Microfita com Elementos Fractais de Koch.**: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, Brasil, Dissertação de Mestrado, 2010.
- [77] G. Manara, A. Monorchio, e R. Mittra, “Frequency selective surface design based on genetic algorithm,” *Electronics Letters*, vol. 35, no. 17, p. 1400–1401, August 1999.

- [78] S. Chakravarty, R. Mitra, e N. R. Williams, “On the application of the microgenetic algorithm to the design of broad-band microwave absorbers comprising frequency-selective surfaces embedded in multilayered dielectric media,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, no. 6, pp. 1050–1059, June 2001.
- [79] P. H. da F. Silva, R. M. S. Cruz, e A. G. D’Assuncao, “Blending PSO and ANN for Optimal Design of FSS Filters With Koch Island Patch Elements,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, no. 8, pp. 3010–3013, August 2010.
- [80] Farhad Bayatpur, **Metamaterial-Inspired Frequency-Selective Surfaces**,: Universidade de Michigan, Michigan, USA, Tese de Doutorado, 2009.
- [81] ESA, Microwave Material RF Characterization Setup. [Online]. Available: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/09/Microwave_Material_RF_Characterization_setup [Acesso em 09 Janeiro 2018].
- [82] “Applications of PIN Diodes”, Application Note 922, Hewlett Packard, November 1999. [Online]. Available: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5965-8666E.pdf>. [Acesso em 08 Janeiro 2018].
- [83] SKYWORKS, “APPLICATION NOTE Design With PIN Diodes”, [Online]. Available:http://www.skyworksinc.com/uploads/documents/Design_With_PIN_Diodes_2003_12D.pdf. Acesso. [Acesso em 08 de janeiro de 2018].
- [84] Iradilson Ferreira da Costa, **Antenas e Superfícies Seletivas de Frequência Reconfiguráveis para Sistemas de Comunicação Sem Fio**,: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, Brasil, Dissertação de Mestrado, 2009.
- [85] A. Gomes Neto, J. N. Carvalho, A. N. Silva, H. de P. A.Ferreira, I. S. S. Lima and J. I. Fernandes, “Four arms star: an useful geometry for switchable FSS,” in 2013 *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC)*, Rio de Janeiro, Brasil, August 2013, pp. 1–5.
- [86] A. Gomes Neto, J. C. e Silva, J. N. Carvalho, A. P. Costa, and L. C. M. Moura, “Band pass frequency selective surface using asymmetrical slot four arms star geometry,” *Microwave and Optical Technology Letters*, v. 58, p. 1105-1109, 2016.
- [87] João Batista de Oliveira Silva, **Desenvolvimento de Superfícies Seletivas em Frequência com Banda Dupla de Operação Baseadas na Geometria Estrela de Quatro Braços Associada a Anéis Trapezoidais**,: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Paraíba, Brasil, Dissertação de Mestrado, 2016.
- [88] Estação de re-trabalho SMD Toyo. [Online] Available: http://www.tektoyo.com.br/produto_descricao.php?id=93&. [Acesso em 19 Dezembro 2017].
- [89] SAS-571 datasheet. [Online] Available: http://www.ahsystems.com/datasheets/SAS-571_Horn_Antenna_Datasheet.pdf. [Acesso em 19 Dezembro 2017].
- [90] O Homedale. [Online]. Available: <https://homedale.br.uptodown.com/windows>. [Acesso em 21 Dezembro 2017].