

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

GIORDANO JOSÉ PINHEIRO

SISTEMA DE MEDIÇÃO DE FREQUÊNCIA INSTANTÂNEA DE 4 BITS BASEADO EM  
SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA

Recife

2018

GIORDANO JOSÉ PINHEIRO

SISTEMA DE MEDIÇÃO DE FREQUÊNCIA INSTANTÂNEA DE 4 BITS BASEADO EM  
SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Fotônica.

Orientador: Prof. Marcos Tavares de Melo, Ph.D.

Recife

2018

Catálogo na fonte

Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

P654s

Pinheiro, Giordano José.

Sistema de medição de frequência instantânea de 4 bits baseado em superfícies seletivas em frequência / Giordano José Pinheiro. - 2018.

72 folhas, il.; tab., abr. sigl.

Orientador: Prof. Marcos Tavares de Melo, Ph.D.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, 2018.

Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Elétrica. 2. FSS. 3. IFMS. 4. Sinais desconhecidos. I. Melo, Marcos Tavares de (Orientador). II. Título.

UFPE

621.3 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-239



**Universidade Federal de Pernambuco**  
***Pós-Graduação em Engenharia Elétrica***

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE  
DISSERTAÇÃO DO MESTRADO ACADÊMICO DE

**GIORDANO JOSÉ PINHEIRO**

TÍTULO

**“SISTEMA DE MEDIÇÃO DE FREQUÊNCIA INSTANTÂNEA  
DE 4 BITS BASEADO EM SUPERFÍCIES SELETIVAS  
EM FREQUÊNCIA”**

A comissão examinadora composta pelos professores: MARCOS TAVARES DE MELO DES/UFPE; ANTONIO JERONIMO BELFORT DE OLIVEIRA, DES/UFPE e LAURO RODRIGO GOMES DA SILVA LOURENÇO NOVO, DES/UFPE sob a presidência do primeiro, consideram o candidato **GIORDANO JOSÉ PINHEIRO**  
**APROVADO.**

Recife, 07 de março de 2018.

---

**MARCELO CABRAL CAVALCANTI**  
Coordenador do PPGE

---

**MARCOS TAVARES DE MELO**  
Orientador e Membro Titular Interno

---

**LAURO RODRIGO GOMES DA SILVA  
LOURENÇO NOVO**  
Membro Titular Externo

---

**ANTONIO JERONIMO BELFORT DE  
OLIVEIRA**  
Membro Titular Interno

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, do conhecimento e pela graça de realizar sonhos.

Agradeço aos meus familiares pelo amor incondicional. Em especial a minha esposa e minha filha Ananda por estarem sempre ao meu lado. Minha mãe, pai e irmã por sempre terem me apoiado nessa jornada.

Agradeço aos colegas da INFRAERO por sempre terem me apoiado nos momentos necessários.

Ao professor Marcos Tavares pela oportunidade de participar do programa de mestrado, por ter dedicado seu tempo e um pouco de seu conhecimento e pela paciência de compreender meu tempo de dedicação.

Aos amigos que fiz no laboratório, em especial aos que tive maior contato: Hawson, Marcelo, Manu e Cris. Obrigado pelo conhecimento compartilhado neste período.

Ao professor Alfredo e ao colega Thayuan pelo apoio dado no IFPB.

Agradeço também a todos os docentes e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), bem como aos funcionários do Departamento de Eletrônica e Sistemas.

A equipe do “TV”.

E por fim a todos que estiveram ao meu lado nesta jornada.

“Tudo que você já escutou, viu, ou descobriu  
não é nem mesmo o começo daquilo que você  
realmente precisa saber.”

(Farid ud-Din Attar)

## RESUMO

Com o aumento do número de sistemas de radiação, muitas vezes sem a devida fiscalização dos órgãos competentes, aumenta a importância dos dispositivos para identificação de sinais desconhecidos. Nesse sentido, desenvolvido ao longo das últimas décadas, os Sistemas de Medição de Frequência Instantânea (do inglês *Instantaneous Frequency Measurement System* - *IFMS*) são amplamente utilizados em sistemas eletrônicos para fins militares e em sistemas inteligentes, com a capacidade de detecção instantânea de sinais desconhecidos. Será apresentado, portanto, neste trabalho de dissertação, um conjunto de quatro superfícies seletivas em frequência (FSSs), a partir de estruturas do tipo dipolo simples. Estas FSSs integrarão um *IFMS* de 4 bits em substituição principalmente aos discriminadores de frequência tradicionais, como por exemplo os interferômetros. Um *IFMS* de 4 bits será apresentado com resolução de projeto de 346,25 MHz para cada uma das 16 sub-bandas distribuídas na faixa de frequência entre 3,21 GHz e 8,75 GHz. Os resultados da modelagem computacional realizada na ferramenta CST *Microwave Studio*, bem como aqueles obtidos das medições utilizando um instrumento analisador de redes sobre as FSSs fabricadas serão apresentados e devidamente comparados. O parâmetro analisado nas simulações e medições foi o coeficiente de transmissão,  $S_{21}$ , entre duas antenas do tipo corneta utilizadas nas medições e representadas pelas portas 1 e 2 das simulações computacionais.

Palavras-chave: FSS. *IFMS*. Sinais desconhecidos.

## **ABSTRACT**

With the increase in the number of radiation systems, often without due control of the competent organs, the importance of devices for identifying unknown signals increases. In this sense, developed over the last decades, the Instantaneous Frequency Measurement System (IFMS) systems are widely used in electronic systems for military purposes and in intelligent systems, with the ability to instantly detect unknown signals. It will be presented, therefore, in this work of dissertation, a set of four selective surfaces in frequency (FSSs), from simple dipole type structures. These FSSs will integrate a 4-bit IFMS instead of traditional frequency discriminators such as interferometers. A 4-bit IFMS will therefore be presented with a 346.25 MHz design resolution for each of the 16 sub-bands distributed in the frequency range between 3.21 GHz and 8.75 GHz. The results of the computational modeling performed in CST Microwave Studio tool, as well as those obtained from measurements using a network analyzer instrument on the fabricated FSSs, will be presented and properly compared. The parameter analyzed in the simulations and measurements was the transmission coefficient,  $S_{21}$ , between two antennas of the horn type used in the measurements and represented by the ports 1 and 2 of the computational simulations.

Keywords: FSS. IFMS. Unknown signs.



## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1-</b> Estrutura planar periódica bidimensional. ....                                                                                                    | 17 |
| <b>Figura 2-</b> (a) FSS tipo abertura; (b) FSS tipo <i>patch</i> e suas respectivas respostas em frequência. ....                                                 | 18 |
| <b>Figura 3-</b> Correspondência entre as respostas características de filtros. ....                                                                               | 18 |
| <b>Figura 4-</b> Arranjo de dipolos (filtro rejeita-faixa) e seu circuito equivalente.....                                                                         | 20 |
| <b>Figura 5-</b> Filtros de grades metálicas e circuitos equivalentes: (a) indutivo e (b) capacitivo. ....                                                         | 20 |
| <b>Figura 6-</b> Principais geometrias das FSSs do grupo 1.....                                                                                                    | 21 |
| <b>Figura 7-</b> Principais geometrias das FSSs do grupo 2.....                                                                                                    | 21 |
| <b>Figura 8-</b> Principais geometrias das FSSs do grupo 3.....                                                                                                    | 22 |
| <b>Figura 9-</b> FSS híbrida composta com elementos do tipo espira .....                                                                                           | 23 |
| <b>Figura 10-</b> Aplicação das FSSs: Anteparo do forno de micro-ondas. ....                                                                                       | 24 |
| <b>Figura 11-</b> Parâmetros da onda transversal elétrica (TE): (a) Fitas metálicas paralelas; (b) Ângulo de incidência $\phi$ ; (c) Circuito equivalente.....     | 25 |
| <b>Figura 12-</b> Parâmetros da onda transversal magnética (TM): (a) Fitas metálicas paralelas; (b) Ângulo de incidência $\theta$ ; (c) Circuito equivalente. .... | 27 |
| <b>Figura 13-</b> (a) FSS com geometria espira quadrada; (b) Circuito equivalente.....                                                                             | 28 |
| <b>Figura 14-</b> FSS com geometria espira quadrada.....                                                                                                           | 28 |
| <b>Figura 15-</b> FSS com geometria espira quadrada dupla.....                                                                                                     | 29 |
| <b>Figura 16-</b> FSS com geometria Cruz de Jerusalém e seu circuito equivalente. ....                                                                             | 29 |
| <b>Figura 17-</b> FSS disposta entre duas camadas dielétricas .....                                                                                                | 31 |
| <b>Figura 18-</b> Arquitetura dos <i>IFMS</i> convencionais. ....                                                                                                  | 34 |
| <b>Figura 19-</b> Arquitetura proposta para o sistema <i>IFM</i> . ....                                                                                            | 35 |
| <b>Figura 20-</b> Respostas em frequência teórica para o sistema <i>IFM</i> de 4 bits .....                                                                        | 37 |
| <b>Figura 21-</b> Geometria das células unitárias para as FSSs propostas. (a) FSS1. (b) FSS2. (c) FSS3. (d) FSS4. ....                                             | 40 |

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 22-</b> Fotografia das FSSs fabricadas. (a) FSS1. (b) FSS2. (c) FSS3. (d) FSS4.....                        | 40 |
| <b>Figura 23-</b> Imagem da função “ <i>Mesh View</i> ” do software CST ativa. ....                                  | 43 |
| <b>Figura 24-</b> Resultado simulado para a FSS1. ....                                                               | 45 |
| <b>Figura 25-</b> Distribuição da densidade de corrente na frequência de ressonância $f_r = 4,164$ GHz da FSS1. .... | 46 |
| <b>Figura 26-</b> Resultado simulado para a FSS2. ....                                                               | 46 |
| <b>Figura 27-</b> Distribuição da densidade de corrente na frequência de ressonância $f_r = 3,42$ GHz da FSS2.....   | 47 |
| <b>Figura 28-</b> Distribuição da densidade de corrente na frequência de ressonância $f_r = 8,1$ GHz da FSS2.....    | 47 |
| <b>Figura 29-</b> Resultado simulado para a FSS3. ....                                                               | 48 |
| <b>Figura 30-</b> Distribuição da densidade de corrente na frequência de ressonância $f_r = 4,516$ GHz da FSS3. .... | 48 |
| <b>Figura 31-</b> Distribuição da densidade de corrente na frequência de ressonância $f_r = 7,3$ GHz da FSS3.....    | 49 |
| <b>Figura 32-</b> Resultado simulado para a FSS4. ....                                                               | 49 |
| <b>Figura 33-</b> Distribuição da densidade de corrente na frequência de ressonância $f_r = 3,948$ GHz da FSS4.....  | 50 |
| <b>Figura 34-</b> Distribuição da densidade de corrente na frequência de ressonância $f_r = 4,94$ GHz da FSS4.....   | 50 |
| <b>Figura 35-</b> Distribuição da densidade de corrente na frequência de ressonância $f_r = 6,732$ GHz da FSS4.....  | 51 |
| <b>Figura 36-</b> Distribuição da densidade de corrente na frequência de ressonância $f_r = 8,012$ GHz da FSS4.....  | 51 |
| <b>Figura 37-</b> Esboço do sistema para medições das FSSs. ....                                                     | 54 |
| <b>Figura 38-</b> Medição experimental da FSS1 utilizando .....                                                      | 55 |
| <b>Figura 39-</b> Medição experimental da FSS3 utilizando .....                                                      | 55 |
| <b>Figura 40-</b> Comparação entre o resultado medido e simulado da FSS1.....                                        | 57 |

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 41-</b> Comparação entre o resultado medido e simulado da FSS2 e identificação dos pontos de deslocamento..... | 57 |
| <b>Figura 42-</b> Ampliação do ponto <b>1</b> da FSS2. ....                                                              | 58 |
| <b>Figura 43-</b> Ampliação do ponto <b>2</b> da FSS2. ....                                                              | 58 |
| <b>Figura 44-</b> Comparação entre o resultado medido e simulado da FSS3.....                                            | 59 |
| <b>Figura 45-</b> Comparação entre o resultado medido e simulado da FSS4 e identificação dos pontos de deslocamento..... | 59 |
| <b>Figura 46-</b> Ampliação do ponto <b>1</b> da FSS4. ....                                                              | 60 |
| <b>Figura 47-</b> Ampliação do ponto <b>2</b> da FSS4. ....                                                              | 60 |
| <b>Figura 48-</b> Ampliação do ponto <b>3</b> da FSS4. ....                                                              | 61 |
| <b>Figura 49-</b> Ampliação do ponto <b>4</b> da FSS4. ....                                                              | 61 |
| <b>Figura 50-</b> Ampliação do ponto <b>5</b> da FSS4. ....                                                              | 62 |
| <b>Figura 51-</b> Ampliação do ponto <b>6</b> da FSS4. ....                                                              | 62 |

## LISTA DE TABELA

|                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1-</b> Comparação de desempenho entre alguns elementos FSS.<br>(Legenda: 1-melhor; 2-segundo melhor.....)                                                                | 23 |
| <b>Tabela 2-</b> Código Binário e suas 16 Sub-Bandas / Palavras Digital.....                                                                                                       | 38 |
| <b>Tabela 3-</b> Faixas de frequência e seus respectivos .....                                                                                                                     | 44 |
| <b>Tabela 4-</b> Faixas de frequência e seus respectivos .....                                                                                                                     | 44 |
| <b>Tabela 5-</b> Sub-bandas identificadas e Palavras Digitais das quatro FSSs propostas obtidas a partir dos resultados <b>simulados</b> .....                                     | 52 |
| <b>Tabela 6-</b> Sub-bandas identificadas e Palavras Digitais das quatro FSSs propostas obtidas a partir dos resultados <b>medidos</b> .....                                       | 63 |
| <b>Tabela 7-</b> Comparação entre as sub-bandas identificadas e palavras digitais das quatro FSSs propostas obtidas a partir dos resultados <b>simulado</b> e <b>medido</b> . .... | 65 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|             |                                                          |
|-------------|----------------------------------------------------------|
| <i>A/D</i>  | <i>Analog / Digital</i>                                  |
| <i>BW</i>   | <i>Bandwidth</i>                                         |
| <i>DAF</i>  | <i>Analog Frequency Discriminator</i>                    |
| <i>DC</i>   | <i>Direct Current</i>                                    |
| <i>DDF</i>  | <i>Digital Frequency Discriminator</i>                   |
| <i>EW</i>   | <i>Eletronic Warfare</i>                                 |
| $F_R$       | <i>Resonance Frequency</i>                               |
| <i>FSS</i>  | <i>Frequency Selective Surface</i>                       |
| <i>IEEE</i> | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> |
| <i>IFMS</i> | <i>Instantaneous Frequency Measurement System</i>        |
| <i>RF</i>   | <i>Radio Frequency</i>                                   |
| <i>RFID</i> | <i>Radio Frequency Identification</i>                    |
| <i>TE</i>   | <i>Transversal Electrical</i>                            |
| <i>TM</i>   | <i>Transversal Magnetic</i>                              |
| <i>UWB</i>  | <i>Ultra Wide Band</i>                                   |
| $V_{NL}$    | <i>Voltage Limit Level</i>                               |

## SUMÁRIO

|          |                                                                                           |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                                   | <b>14</b> |
| 1.1      | ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....                                                             | 15        |
| <b>2</b> | <b>SUPERFICIE SELETIVA EM FREQUÊNCIA – FSS .....</b>                                      | <b>16</b> |
| 2.1      | CONCEITOS BÁSICOS .....                                                                   | 16        |
| 2.2      | TIPOS DAS FSSs .....                                                                      | 17        |
| 2.3      | GEOMETRIA.....                                                                            | 19        |
| 2.4      | APLICAÇÕES.....                                                                           | 24        |
| 2.5      | ANÁLISE APROXIMADA DAS FSS .....                                                          | 25        |
| 2.6      | SUBSTRATO DIELÉTRICO.....                                                                 | 30        |
| <b>3</b> | <b>MEDIÇÃO INSTANTÂNEA DE FREQUÊNCIA.....</b>                                             | <b>32</b> |
| 3.1      | ARQUITETURA DE UM DISCRIMINADOR DIGITAL DE FREQUÊNCIAS (DDF) ...                          | 33        |
| 3.2      | DDF SIMPLES .....                                                                         | 33        |
| 3.3      | DISCRIMINADOR PROPOSTO PARA A DISSERTAÇÃO. ....                                           | 35        |
| 3.4      | RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA PARA OS DISCRIMINADORES DE UM<br>SISTEMA <i>IFM</i> SIMPLES ..... | 36        |
| <b>4</b> | <b>PROJETO E FABRICAÇÃO DAS FSSS .....</b>                                                | <b>39</b> |
| <b>5</b> | <b>ANÁLISE DOS RESULTADOS MEDIDOS E SIMULADOS.....</b>                                    | <b>42</b> |
| 5.1      | RESULTADOS DE SIMULAÇÃO.....                                                              | 42        |
| 5.2      | CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL PARA MEDIÇÃO .....                                              | 53        |
| 5.3      | RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....                                                             | 56        |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÃO .....</b>                                                                    | <b>66</b> |
| <b>7</b> | <b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>                                              | <b>67</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                                                   | <b>68</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Com o contínuo e acelerado crescimento dos sistemas irradiantes, e os sinais desconhecidos crescendo nas mesmas proporções, faz-se necessário o estudo e a produção de dispositivos para identificação de sinais desconhecidos. Neste sentido, os *IFMS* monitoram, de forma simultânea, todas as frequências da banda para os quais foram projetados, sem a necessidade de se fazer uma varredura de espectro, detectando instantaneamente estes sinais.

A comunicação indica a transferência de informação entre um transmissor e um receptor. Com esse acelerado crescimento tecnológico e com a crescente oferta de serviços de comunicações, principalmente em aplicações sem fio, surge a necessidade cada vez maior de transmitir grandes quantidades de informações simultaneamente, muitas vezes em ambientes inseguros, e demandando por estruturas que operem em larga faixa de frequência sem que haja interferência ou impedimento entre os serviços oferecidos.

Diante do cenário atual, no qual há a necessidade de dispositivos de comunicações que requerem dimensões reduzidas e custo baixo, a utilização das superfícies seletivas em frequências, por apresentarem tais características, tem despertado bastante interesse da comunidade científica. Destaca-se o emprego dessas estruturas na construção de filtros, acopladores, antenas. Em [1,2] são apresentadas aplicações das FSSs.

As FSSs são geralmente arranjos de estruturas periódicas que se apresentam do tipo abertura ou condutor (*patche*), com a possibilidade de integração com outros sistemas de comunicação, além da operação em diferentes faixas de frequência. Esta dissertação apresenta os conceitos e aplicações das FSSs com o detalhamento exigido.

O objetivo desta dissertação é validar a utilização das FSSs num sistema de medição instantânea de frequência de 4-bits. Foram desenvolvidas estruturas de micro-ondas do tipo FSSs e utilizadas num *IFMS* de 4 bits, em substituição aos discriminadores de frequência convencionais, como os interferômetros. Vantagens para esta substituição serão explanadas ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

Para a realização deste trabalho, iniciamos pesquisas em artigos científicos de periódicos bastante conceituados na área de interesse. As FSSs foram modeladas por simulações computacionais, fabricadas no laboratório em substrato de micro-ondas, e medidas no Laboratório de Micro-ondas do IFPB *Campus* João Pessoa. Os resultados medidos e simulados obtidos para a faixa de frequências de 3,21 GHz a 8,75 GHz foram devidamente comparados.

## 1.1 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação foi escrita em cinco capítulos, os quais abordam parcialmente o projeto de estruturas de micro-ondas conhecidas como FSSs e sua aplicabilidade em um *IFMS*. A seguir será apresentada sucintamente a composição de cada um destes cinco capítulos.

O Capítulo 2 aborda os principais conceitos das FSSs, como sua classificação, tipos, geometrias e aspectos que influenciam a resposta das estruturas. Esse capítulo aborda ainda, de uma forma geral, característica dos substratos dielétricos.

No Capítulo 3 é apresentada uma descrição geral e as principais características dos sistemas de medição instantânea de frequência. Além disso, este capítulo traz com detalhes as arquiteturas de dois tipos de discriminadores de frequências: um simples; e aquele proposto neste trabalho de dissertação.

No Capítulo 4 serão apresentadas as características principais do projeto e fabricação das FSSs propostas, bem como os detalhes geométricos das células unitárias.

Por fim, o Capítulo 5 exhibe os resultados obtidos das simulações computacionais e as medições das FSSs fabricadas, além de análise comparativa entre eles.



## 2 SUPERFÍCIE SELETIVA EM FREQUÊNCIA – FSS

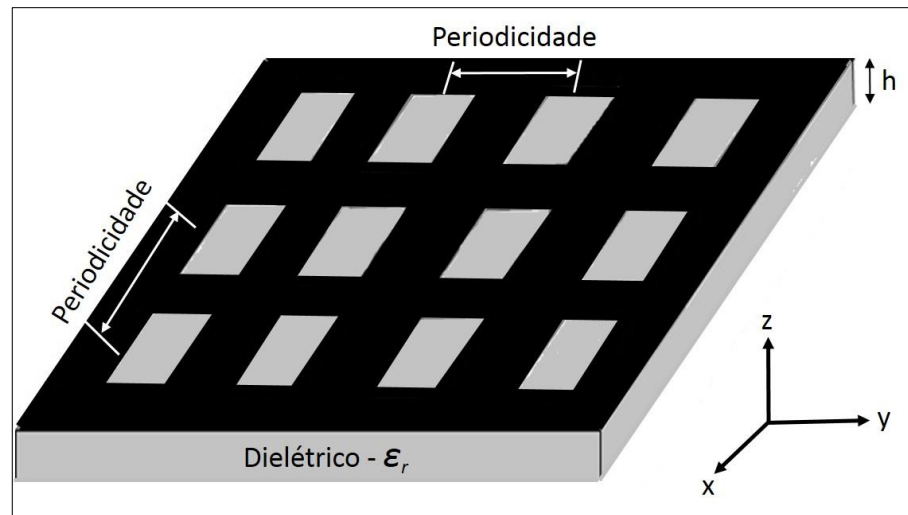
Por volta dos anos de 1750, o físico americano, David Rittenhouse, relatou cientificamente que algumas cores do espectro de luz, observadas a partir das lâmpadas dos postes de iluminação de rua, eram suprimidas quando atravessavam um lenço de seda [3]. Foi observado que essa propriedade, seletividade em frequência ou filtragem em frequência, é característica de algumas superfícies, ou seja, cada superfície pode apresentar propriedades de transmissão/reflexão para diferentes frequências de ondas incidentes ou comprimentos de onda. No entanto, outros fatores físicos e geométricos dos elementos, como o espaçamento entre si (periodicidade), ser ou não condutor, também poderiam refletir diretamente na resposta em frequência das estruturas. Desse modo, a base para os princípios da tecnologia de superfícies seletivas em frequência (FSSs), foi iniciada.

Neste capítulo serão abordados alguns dos principais conceitos e aspectos teóricos acerca das superfícies seletivas em frequência (*Frequency Selective Surfaces* – FSS). Entre estes aspectos têm-se: os conceitos básicos, tipos, geometrias e aplicações.

### 2.1 CONCEITOS BÁSICOS

As FSSs são estruturas formadas por arranjos periódicos, geralmente planares, podendo apresentar seus elementos do tipo abertura com efeito indutivo ou do tipo condutor (*patch*) com efeito capacitivo. São compostas de uma camada de metalização fixada sobre um substrato dielétrico e seus elementos podem ser impressos sobre uma ou mais camadas. Variam de acordo com o tipo do elemento, dimensões geométricas da estrutura, tipos de dielétrico e periodicidade. Na Figura 1 há um exemplo de uma FSS simples, composta por elementos do tipo retangular e substrato de espessura  $h$ .

**Figura 1-** Estrutura planar periódica bidimensional.



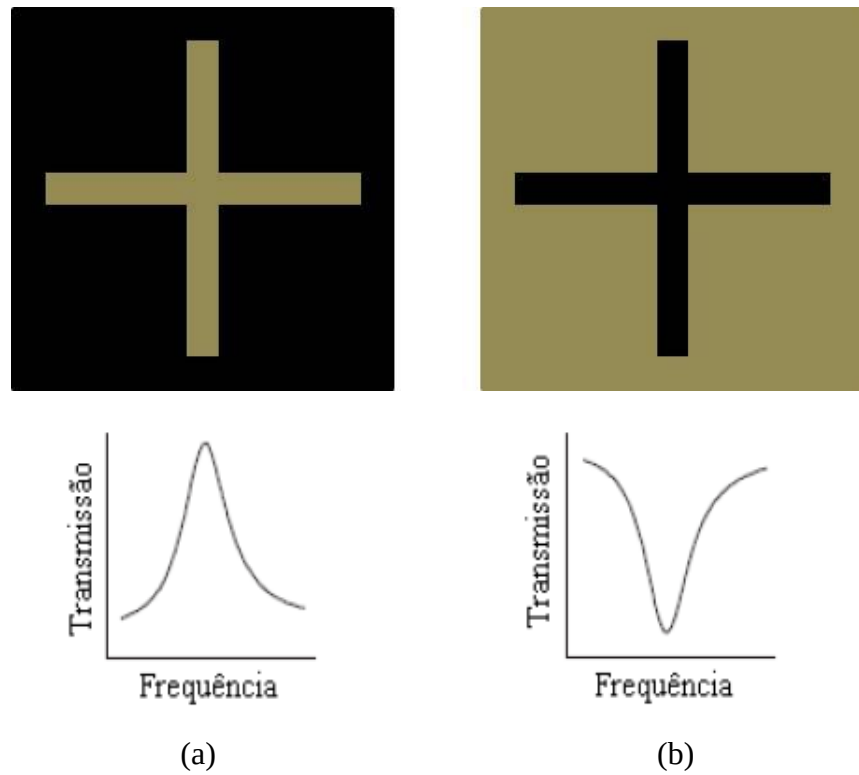
Fonte: Acervo do autor.

## 2.2 TIPOS DAS FSSs

As FSSs podem apresentar, dependendo de como seus elementos serão dispostos no substrato, características de reflexão, do tipo *patch* e de transmissão, do tipo abertura, observados na Figura 2 (os materiais condutores são representados em preto).

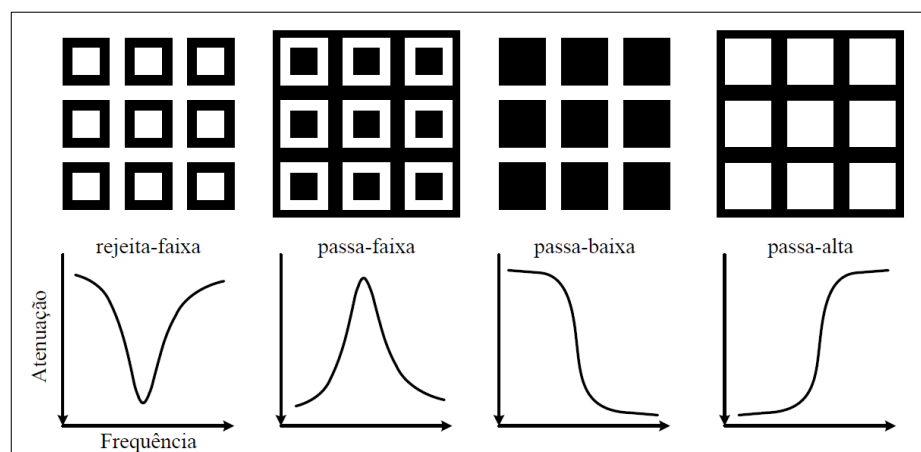
As FSSs também podem ser classificadas quanto aos tipos de respostas de filtros, de acordo com sua construção física e ou geométrica: rejeita-faixa, passa-faixa, passa-baixas e passa-altas. Na Figura 3 um conjunto com a relação entre geometria e suas respectivas respostas é apresentado [6]. Os materiais condutores estão representados em preto. Assim, a depender das características desejadas nos projetos, um ou mais tipos de respostas poderão ser utilizadas.

**Figura 2-** (a) FSS tipo abertura; (b) FSS tipo *patch* e suas respectivas respostas em frequência.



Fonte: Acervo do autor.

**Figura 3-** Correspondência entre as respostas características de filtros.



Fonte: [6]

## 2.3 GEOMETRIA

Diversos tipos de geometria para as FSSs são apresentados nas literaturas atuais, como a cruz de Jerusalém, as expiras quadradas e as expiras circulares. Exemplos de uma geometria baseada em dipolos simples podem ser observados em [7]. Para esse tipo específico de geometria, temos uma analogia entre a FSS e um filtro rejeita-faixa conforme pode ser observado na Figura 4. Durante o período de exposição às ondas eletromagnéticas, com o Campo Elétrico paralelo ao posicionamento dos dipolos, o fluxo de corrente será interrompido e as bordas dos dipolos entre eles ficarão carregadas eletricamente e consequentemente efeitos capacitivos serão produzidos. Já o efeito indutivo se dá pelo fato dos dipolos estarem em paralelo com o Campo Elétrico formando condutores da corrente de superfície.

De acordo com a teoria de circuito equivalente, a geometria dada por dipolos simples atua como filtro rejeita-faixa e a sua frequência de ressonância é definida pelo comprimento do dipolo e pelo espaçamento entre os elementos que causam o efeito capacitivo [3]. Em suma, seus elementos vão ressoando e, com isso, irradiam a potência incidente na direção de reflexão, até que na frequência de ressonância da estrutura ela se comportará como um condutor perfeito e refletirá totalmente a onda incidente. Devido às perdas dielétricas e condutoras, na incidência da onda, pequenas perdas poderão ocorrer [8].

No entanto, geometrias como a descrita anteriormente para a sua devida utilização é necessário que a onda incidente esteja linearmente polarizada e alinhada com os eixos das fitas. Caso o cenário não seja propício, ou seja, a onda não esteja parcial ou totalmente polarizada, deve-se utilizar um filtro de geometria distinta. Na Figura 5 são apresentados exemplos de estruturas como essas. Na Figura 5-a o circuito, apesar de apresentar elementos capacitivos, comporta-se como um circuito predominantemente indutivo, assim como inversamente a Figura 5-b, o arranjo comporta-se como um circuito predominantemente capacitivo, ambos devido a geometria do arranjo.

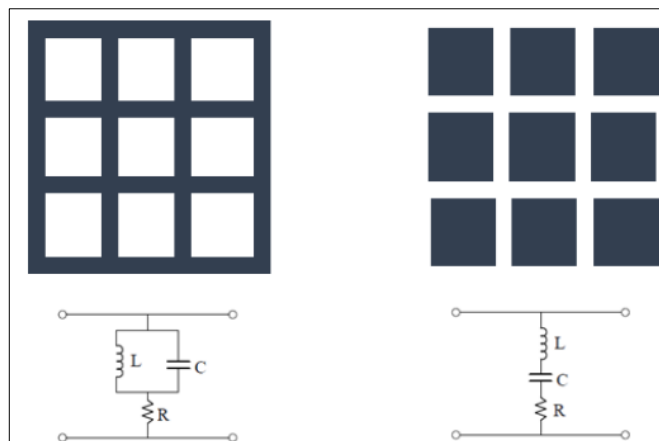
Em [3] são analisados outros tipos de geometria e suas respectivas analogias.

**Figura 4-** Arranjo de dipolos (filtro rejeita-faixa) e seu circuito equivalente.



Fonte: [3]

**Figura 5-** Filtros de grades metálicas e circuitos equivalentes: (a) indutivo e (b) capacitivo.



(a)

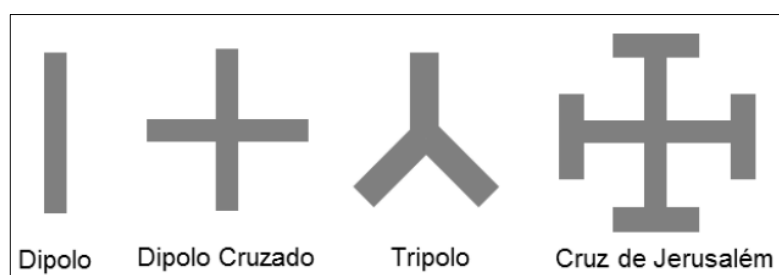
(b)

Fonte: [6]

Em regra, as FSSs podem ser divididas em quatro grandes grupos quanto a geometria de seus elementos: Grupo 1: Elementos conectados pelo centro; Grupo 2: Espiras; Grupo 3: Elementos com interior sólido; Grupo 4: Combinações dos grupos anteriores.

O grupo 1 é formado por elementos conectados pelo centro, como dipolos [7], dipolos cruzados [9], [10], tripolos e Cruz de Jerusalém [11]. Eles ressoam quando seu comprimento geométrico é metade do comprimento de onda incidente [8]. A Figura 6 apresenta as formas mais comuns. Nesta dissertação o elemento a ser utilizado será o dipolo.

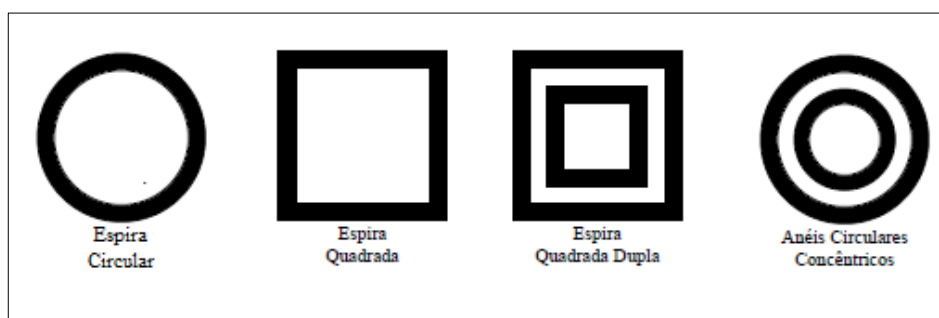
**Figura 6-** Principais geometrias das FSSs do grupo 1.



Fonte: [3]

O grupo 2 é formado por elementos do tipo espira (*loop*) [12], espira circular [13], espira quadrada [13], espira quadrada dupla e anel circular concêntrico, conforme mostrados na Figura 7. A ressonância ocorre quando o comprimento de cada meia espira é múltiplo de meio do sinal incidente, ou seja, cada meia espira atua como um elemento de dipolo [8].

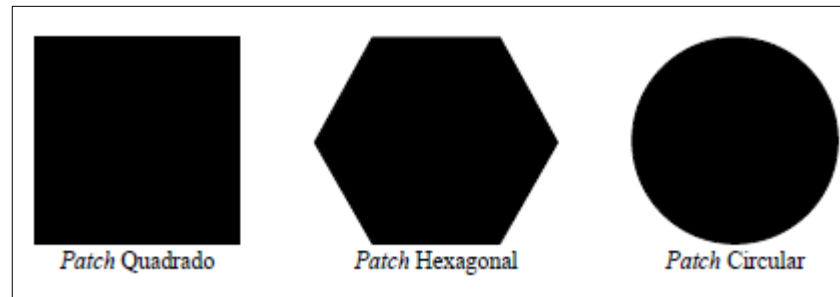
**Figura 7-** Principais geometrias das FSSs do grupo 2.



Fonte: [8]

Já o grupo 3 é constituído por elementos de interior sólido ou tipo *patch* de diversas formas (quadrado, hexagonal e circular). Em [14] e [15] são apresentados trabalhos que utilizam os elementos deste grupo. Na Figura 8 são mostrados alguns dos elementos desse grupo.

**Figura 8-** Principais geometrias das FSSs do grupo 3.

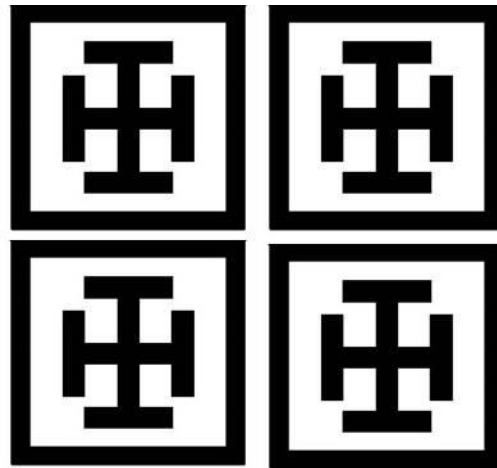


Fonte: [8]

E por fim o grupo 4, que é formado por elementos a partir da combinação de elementos dos grupos anteriores (1, 2 e 3), conforme podemos observar em [16]. Estas combinações são úteis quando a estabilidade angular é requerida devido a diferentes polarizações, que podem ser difíceis de alcançar com único elemento FSS [3]. Exemplos de arranjos híbridos, grupo 4, podem ser observados em [4] e [5]. A Figura 9 representa um exemplo desse sistema.

Na Tabela 1 é apresentada uma comparação de desempenho entre elementos das FSS mais comuns da literatura. Serão comparadas características como largura de banda e estabilidade angular [3].

**Figura 9-** FSS híbrida composta com elementos do tipo espira quadrada e dipolos cruzados



Fonte: Adaptado de [4]

**Tabela 1-** Comparação de desempenho entre alguns elementos FSS.  
(Legenda: 1-melhor; 2-segundo melhor...).

| Forma dos elementos / Grupo | Estabilidade angular | Nível de polarização cruzada | Maior largura de Banda | Menor banda de separação |
|-----------------------------|----------------------|------------------------------|------------------------|--------------------------|
| Espira Quadrada / 2         | 1                    | 1                            | 1                      | 1                        |
| Anéis Circulares / 2        | 1                    | 2                            | 1                      | 1                        |
| Cruz de Jerusalém / 1       | 2                    | 3                            | 2                      | 2                        |
| Tripolo / 1                 | 3                    | 3                            | 3                      | 2                        |
| Dipolo Cruzado / 1          | 3                    | 3                            | 3                      | 3                        |
| Dipolo / 1                  | 4                    | 1                            | 4                      | 1                        |

Fonte: Modificado de [3]

Nesta dissertação as FSSs propostas são compostas pelo elemento dipolo, grupo 1, no qual concluímos, de acordo com a Tabela 1, que esse elemento apresenta um maior nível de polarização cruzada e menor banda de separação, em relação às demais formas de elementos.



## 2.4 APLICAÇÕES

As superfícies seletivas em frequência são empregadas em diversos tipos de aplicações e áreas na Engenharia, numa grande faixa do espectro eletromagnético. Uma das aplicações mais conhecida de uma FSS é o anteparo da porta do forno de micro-ondas, no qual esse anteparo funciona como um filtro, permitindo a passagem da faixa de frequência da luz visível, comportando-se como um filtro passa-altas, e rejeitando a faixa de frequência de micro-ondas, 2,4 GHz. Na Figura 10 vemos um exemplo clássico de um forno de micro-ondas e sua respectiva tela de FSS. [17]

**Figura 10-** Aplicação das FSSs: Anteparo do forno de micro-ondas.



Fonte: [17]

Outras aplicações recentes podem ser observadas em [18], na qual as FSSs foram utilizadas como refletores de antenas, em [19] uma FSS do grupo 1 com elementos do tipo Cruz de Jerusalém foi usada como radome de comunicação 5G e em [20] as FSSs foram usadas como *tags RFID*, devidos suas características de reflexão de sinal. Devido as suas características principais, reflexão e absorção da energia eletromagnética, o uso das FSSs está apresentando aumento significativo em projetos e pesquisas. Assim, novas aplicações de FSS têm sido estudadas e desenvolvidas.

Da mesma forma, podemos citar aplicações das FSSs como superstrato, ou seja, as FSSs servirão como uma segunda camada para o dispositivo, acima do primeiro substrato, afim de aumentar a largura de banda de uma antena, [21] e usadas como sensores biológicos, devido às suas características de ressonância acentuada em sua resposta em frequência [22].

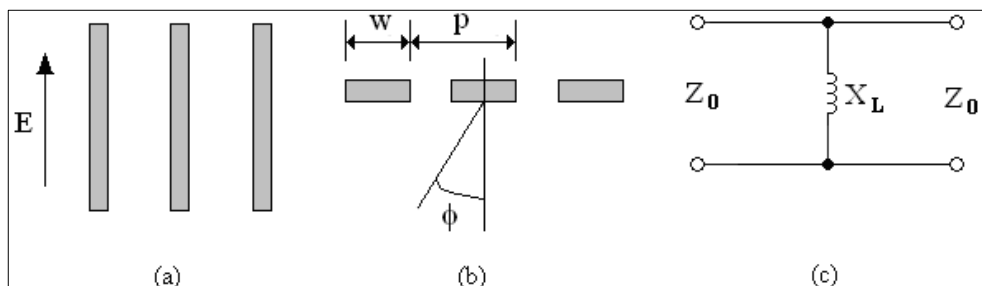
## 2.5 ANÁLISE APROXIMADA DAS FSS

A modelagem para as FSSs pelo Método do Circuito Equivalente (MCE) em situações específicas é bastante útil para prever com rapidez o desempenho dessas estruturas. Também auxilia numa análise sobre o modo como funcionam as FSSs quando seus parâmetros são alterados.

Partiremos para o desenvolvimento dos circuitos equivalentes representando primeiramente as estruturas como um circuito de arranjo infinito, de fitas condutoras paralelas, que representam as FSSs propostas para essa dissertação.

Conforme podemos observar na Figura 11, onde a incidência da onda transversal elétrica (TE) é apresentada, os dipolos, representados por fitas metálicas, Figura 11 (a), possuem espessura nula, largura  $w$  e periodicidade  $p$ . Na Figura 11 (b) é exibido o ângulo de incidência da onda ( $\phi$ ), e em (c) o circuito equivalente para esta FSS. [23]

**Figura 11-** Parâmetros da onda transversal elétrica (TE): (a) Fitas metálicas paralelas; (b) Ângulo de incidência  $\phi$ ; (c) Circuito equivalente.



Fonte: [23]

Para o cálculo da reatância indutiva equivalente  $X_L$ , conforme podemos observar na Figura 11 (c), todos os parâmetros citados anteriormente serão considerados, assim temos, conforme a equação (1) [23]:

$$\frac{X_L}{Z_0} = F(p, w, \lambda, \phi) = \frac{p \cos \phi}{\lambda} \left\{ \ln \left[ \operatorname{cosec} \left( \frac{\pi w}{2p} \right) \right] + G(p, w, \lambda, \phi) \right\} \quad (1)$$

No qual temos o valor da função  $G(p, w, \lambda, \phi)$  representado pela equação (2):

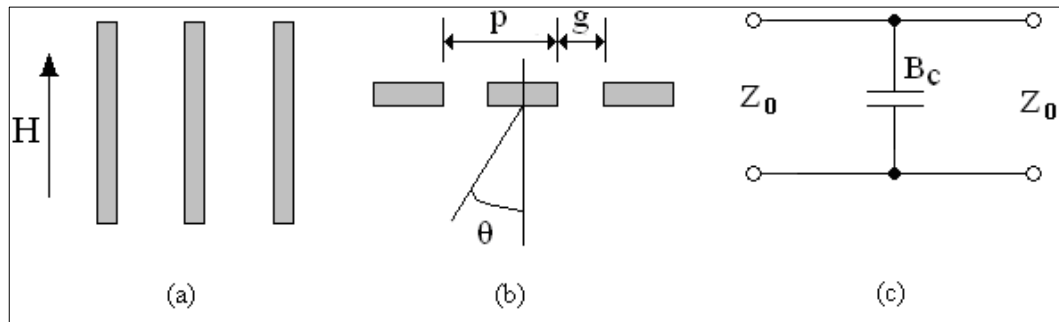
$$G(p, w, \lambda, \phi) = \frac{0,5 \left( 1 - \beta^2 \right)^2 \left[ \left( 1 - \frac{\beta^2}{4} \right) C_+ + C_- + 4\beta^2 C_+ C_- \right]}{\left( 1 - \frac{\beta^2}{4} \right) + \beta^2 \left( 1 + \frac{\beta^2}{2} - \frac{\beta^4}{8} \right) C_+ + C_- + 2\beta^6 C_+ C_-}$$

$$C_{\pm} = \frac{1}{\sqrt{1 \pm \frac{2p \sin \phi}{\lambda} - \left( \frac{p \cos \phi}{\lambda} \right)^2}} - 1$$

$$\beta = \sin \left( \frac{\pi w}{2p} \right) \quad (2)$$

Da mesma forma, na Figura 12 é apresentada a representação da incidência das ondas transversais magnéticas (TM). Aqui temos que o vetor campo magnético incidente é paralelo às fitas metálicas em um ângulo  $\theta$ . Do mesmo modo, as fitas têm periodicidade  $p$ , e uma lacuna de espaçamento  $g$ . A susceptância capacitiva é calculada conforme a equação (3) [23].

**Figura 12-** Parâmetros da onda transversal magnética (TM): (a) Fitas metálicas paralelas; (b) Ângulo de incidência  $\theta$ ; (c) Circuito equivalente.



Fonte: [23]

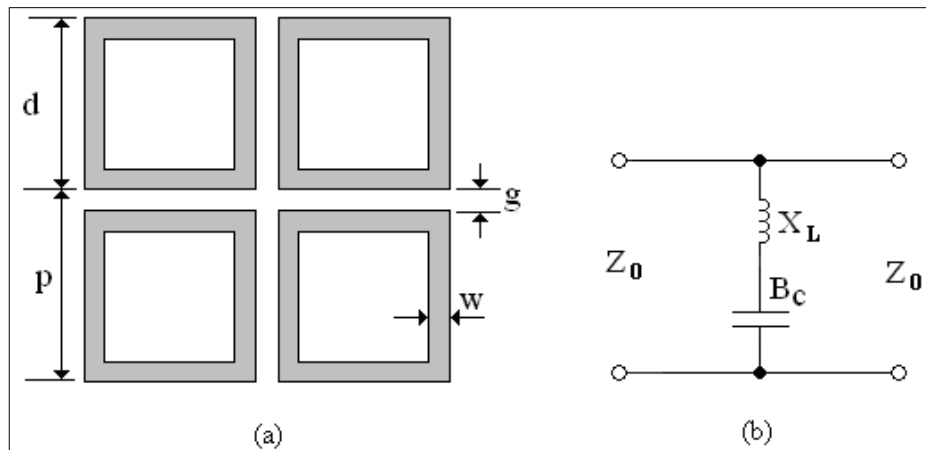
Do mesmo modo, para o cálculo da susceptância capacitiva equivalente  $B_c$ , conforme podemos observar na Figura 12 (c), todos os parâmetros citados anteriormente serão considerados. Assim temos, conforme a equação (3) [23]:

$$\frac{B_c}{Z_0} = 4F(p, w, \lambda, \theta) = \frac{4p \cos \theta}{\lambda} \left\{ \ln \left[ \operatorname{cosec} \left( \frac{\pi w}{2p} \right) \right] + G(p, w, \lambda, \theta) \right\} \quad (3)$$

Vale ressaltar que as equações (1) e (3) são válidas para comprimentos de onda e ângulos de incidência  $\theta$  no intervalo  $p$  [23]. No caso de uma polarização cruzada, as equações não serão válidas. No entanto poderão ser usadas para as ondas planas incidentes, TE e TM,

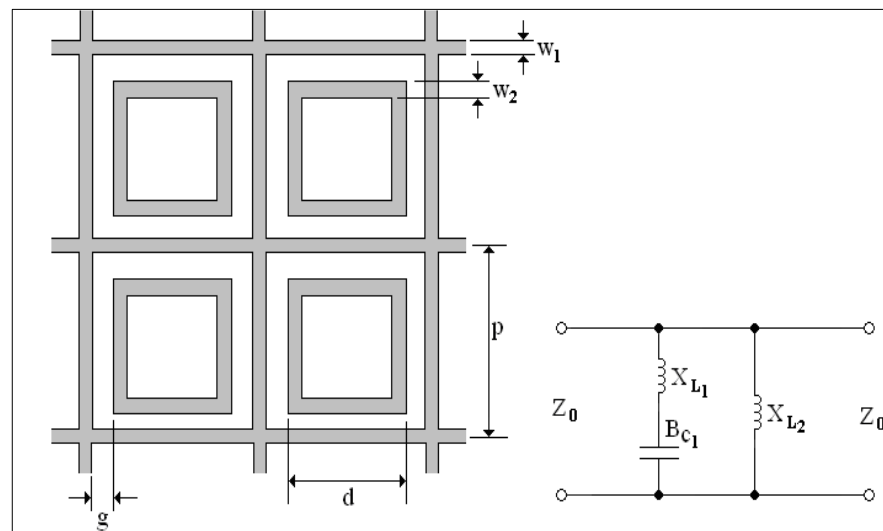
Em [23], outros modelos de circuitos equivalentes correspondentes a outras geometrias de FSS são exibidos. Na Figura 13 temos o circuito equivalente para a geometria espira quadrada. Na Figura 14, espiras quadradas com grades; na Figura 15, espiras quadradas duplas; e na Figura 16 a cruz de Jerusalém.

**Figura 13-** (a) FSS com geometria espira quadrada; (b) Circuito equivalente.



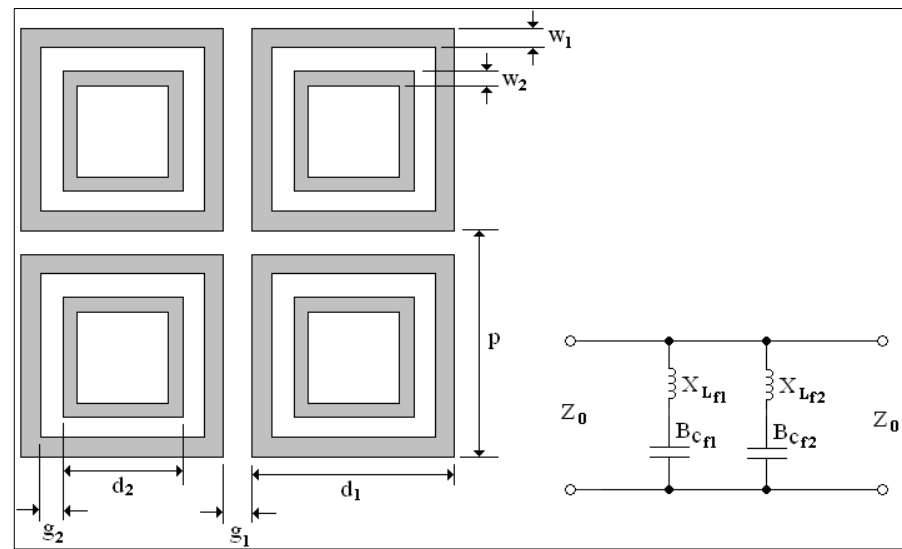
Fonte: [23]

**Figura 14-** FSS com geometria espira quadrada com grades e seu circuito equivalente.



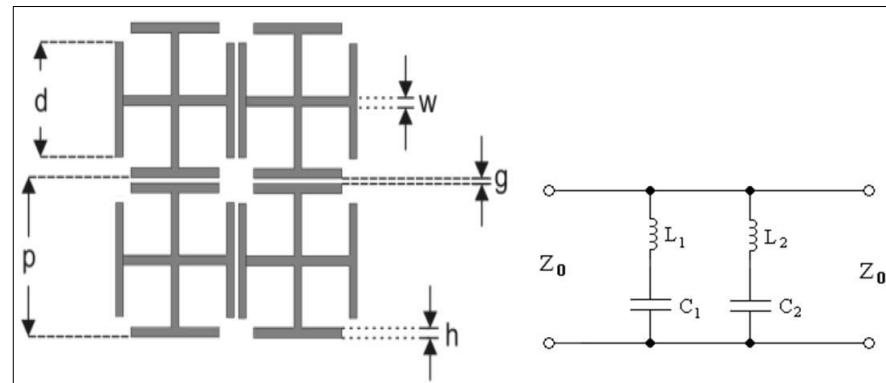
Fonte: [23]

**Figura 15-** FSS com geometria espira quadrada dupla e seu circuito equivalente.



Fonte: [23]

**Figura 16-** FSS com geometria Cruz de Jerusalém e seu circuito equivalente.



Fonte: [23]

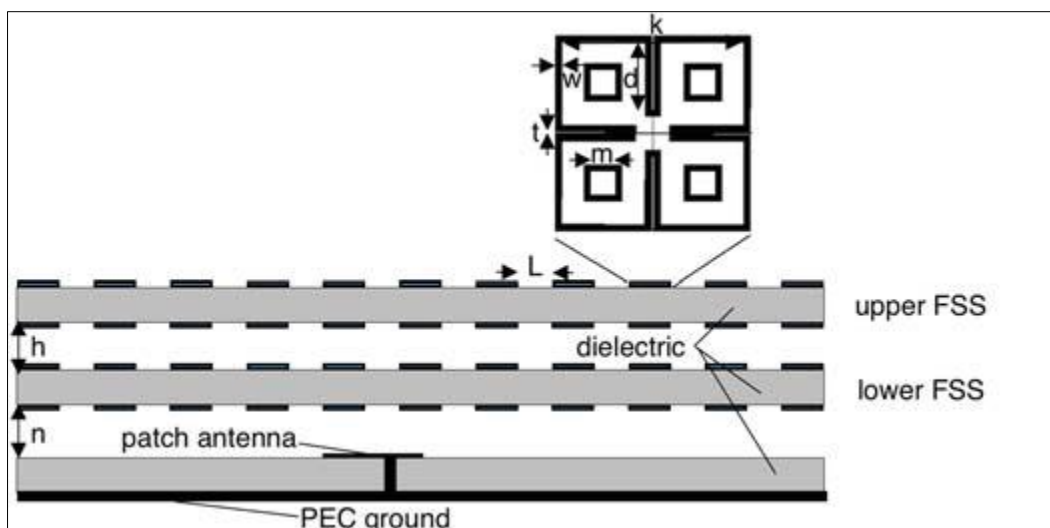
## 2.6 SUBSTRATO DIELÉTRICO

De importância ímpar nos projetos de micro-ondas, os substratos dielétricos têm ganhado importância ao longo dos anos. A frequência de ressonância,  $f_r$ , de uma FSS dependerá da geometria e dimensão dos elementos individuais que a compõem. Por exemplo, para o grupo de elementos conectados pelo centro, grupo 1, haverá ressonância quando o comprimento do dipolo for aproximadamente igual a  $\lambda/2$ , como indicado no caso dos elementos dipolo, conforme visto anteriormente.

No entanto, além da geometria e dimensões dos elementos, a frequência de ressonância dependerá muito dos substratos dielétricos, que são usados para fornecer suporte mecânico para o material condutor e estabilidade na resposta à variação angular.

As FSSs podem ser dispostas em diferentes tipos de arranjos quanto suas posições em relação aos substratos dielétricos empregados. Como exemplo, uma dada FSS se encontra entre duas ou mais camadas de substratos, como pode ser observado na Figura 17 [24]; Além disso, uma FSS pode ser disposta sobre apenas um substrato, que é o caso da FSS proposta para essa dissertação. Assim, devido à influência das camadas dielétricas que circundam a FSS, a frequência de ressonância resultante será reduzida por um fator  $\sqrt{\epsilon_{eff}}$ , a partir da frequência de projeto original [25].

**Figura 17-** FSS disposta entre duas camadas dielétricas



Fonte: [24]

Outras características dos substratos podem influenciar no valor da frequência de ressonância, como observadas em [25], na qual cita, por exemplo, que a frequência de ressonância é sensível à espessura do substrato.



### 3 MEDIÇÃO INSTANTÂNEA DE FREQUÊNCIA

Devido à capacidade de determinar todas as suas bandas de frequências dentro de um canal ao mesmo tempo, sem a necessidade de varredura de espectro, os Sistemas de Medição de Frequência Instantânea (*IFMS*) são amplamente utilizados, por exemplo, em sistemas de inteligência eletrônica, do inglês *Electronic Warfare (EW)* e inteligência para a detecção de sinais desconhecidos [26 e 37].

Nos sistemas de comunicação em que é necessária a identificação do emissor de origem e separação de sinais, o *IFMS* apresenta ampla aplicabilidade. Nos últimos anos, criou a capacidade, por exemplo, de medir amplitude, largura de pulso, distância entre a fonte e os sinais de RF (Radiofrequência). [27]

Os circuitos discriminadores são partes importantes dos sistemas *IFM* [28]. Os sinais de saída destes discriminadores dependem do valor de frequência do sinal de entrada, sinal original. São amplamente encontrados em receptores de equipamentos de detecção de sinais de micro-ondas e são constantemente aplicados em projetos civis e militares [29]. Como exemplos da utilização dos discriminadores podemos citar os receptores *Bluetooth*, satélites, radares de prevenção de colisão e equipamentos eletrônicos para fins militares. [27].

Na literatura é possível identificar dois tipos de discriminadores de frequência: os analógicos e os digitais, os DAF e os DDF, respectivamente. Nesta dissertação focaremos nos discriminadores digitais, que fornecem uma palavra binária na sua saída associada a uma sub-banda de frequência à qual o sinal de entrada irá pertencer, ou seja, teremos uma saída em formato digital, sendo o sinal na entrada do sistema um sinal que sempre será RF, analógico.

Alguns exemplares de discriminadores digitais de frequências podem ser encontrados comercialmente e operam normalmente na faixa de 0,5 a 40 GHz, apresentando em suas características uma saída digital de até 14 bits e com a capacidade de identificar e analisar sinais simultâneos [30].

Nos estudos atuais, do mesmo modo identificamos diversos registros relacionados aos sistemas *IFM*, como em [31 e 32], nos quais as medições da frequência de micro-ondas ocorreram com suporte fotônico. Já em [33] os dispositivos de onda acústica de superfície são usados nos sistemas *IFM*.

### 3.1 ARQUITETURA DE UM DISCRIMINADOR DIGITAL DE FREQUÊNCIAS (DDF)

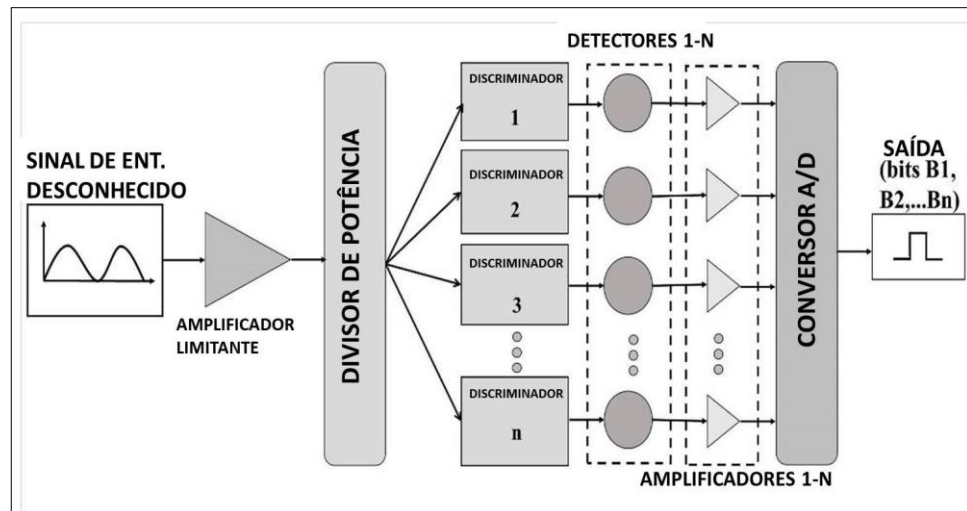
Os receptores *IFM* convencionais apresentam alguns circuitos como: amplificador limitador, detectores, divisor de potência, discriminadores e conversor analógico-digital. O elemento essencial desses sistemas são os discriminadores de frequência.

Uma variedade de sistemas discriminadores foi apresentada na literatura para uso em sistemas *IFM*, como podemos observar em [34], na qual um interferômetro usando um microcontrolador de baixo custo é apresentado, em [35], baseado em um filtro multibanda e em [36] no qual um novo e compacto interferômetro baseado no conceito fractal é apresentado.

### 3.2 DDF SIMPLES

Na Figura 18 temos um diagrama em blocos de uma arquitetura para os sistemas *IFM* convencionais. Nela seus circuitos são divididos em blocos individuais e um sinal desconhecido é recebido na entrada do sistema. Após a passagem pelos estágios seguintes, um sinal digital é obtido na sua saída.

**Figura 18-** Arquitetura dos *IFMS* convencionais.



Fonte: Acervo do autor.

O primeiro elemento do sistema é o amplificador limitador, com a função de amplificação seletiva de sinais de RF de baixa potência com boa relação sinal/ruído, que representa um filtro passa-faixa. Esse filtro é sintonizado na banda de operação do sistema em execução. Seu objetivo é proporcionar um ganho alto ao sinal, que consequentemente contribuirá para o aumento da sensibilidade do receptor, além de minimizar o efeito da entrada simultânea de sinais com frequências diferentes daquelas para qual o dispositivo foi projetado, pois, conforme podemos observar na entrada do sistema, o sinal é desconhecido.

O segundo elemento em sequência são os divisores de potência, os quais têm a função de dividir igualmente a potência do sinal a partir do amplificador limitador e transmitir cada sinal gerado aos discriminadores de frequências.

O próximo estágio, representado pelos discriminadores, é constituído pelo elemento principal dos *IFMS* e que serão convenientemente substituídos neste trabalho pelas FSSs propostas. Como por exemplo, em [36] os interferômetros são os elementos que compõem os discriminadores dos *IFMS*.

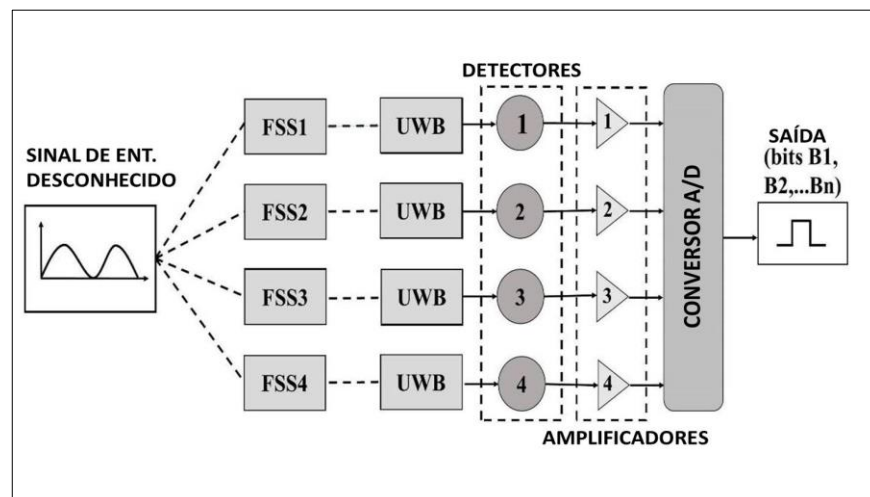
O penúltimo elemento do sistema é composto pelos detectores, que são os responsáveis pela detecção em quadratura desses sinais. É nesse estágio que o sistema fornece uma tensão *DC* aos amplificadores e seguidamente aos conversores A/D, último estágio do sistema. Por fim é no último estágio que haverá a análise dos níveis de tensão oriundos dos detectores com um nível de referência ( $V_{NL}$ ). É este limiar/nível de tensão que determina o nível lógico de cada detector e consequentemente a faixa de frequência na qual se encontra o sinal desconhecido de entrada.

O nível lógico “0” será representado quando a tensão do detector ficar abaixo do  $V_{NL}$  e nível lógico “1” representado quando a tensão do detector ficar acima do  $V_{NL}$ . Na prática, as tensões de referência nos discriminadores não precisam ser iguais. Nos capítulos posteriores uma maior explanação desse assunto será discutida.

### 3.3 DISCRIMINADOR PROPOSTO PARA A DISSERTAÇÃO.

Será proposto nesta dissertação um novo arranjo para os sistemas discriminadores de frequência, com o emprego das superfícies seletivas em frequência, antenas *UWB* e um conversor analógico-digital, como componentes principais, conforme podem ser observados na Figura 19.

**Figura 19-** Arquitetura proposta para o sistema *IFM*.



Fonte: Acervo do autor.

Para se obter uma conversão digital, vários discriminadores (1...n) deverão ser colocados em paralelo e um nível limite de tensão ( $V_{NL}$ ) é fixado para a conversão digital. No caso desta dissertação, quatro FSSs serão colocadas em paralelo para obtenção do sinal na saída do conversor A/D. Já em [36], um conjunto de interferômetros foram dispostos em paralelo para o resultado esperado ser obtido. Cada FSS será responsável por um bit da palavra digital de 4 bits na saída do sistema. Para um sistema que apresente N bits, ou seja, com N FSS, teremos a capacidade de identificar  $2^n$  sub-bandas dentro da banda de projeto.

A frequência de resolução ( $f$ ) é dada por [36]:

$$f = \frac{BW}{2^n} \quad (4)$$

em que  $BW (= f_{máx} - f_{mín})$  representa a largura de banda do sistema.

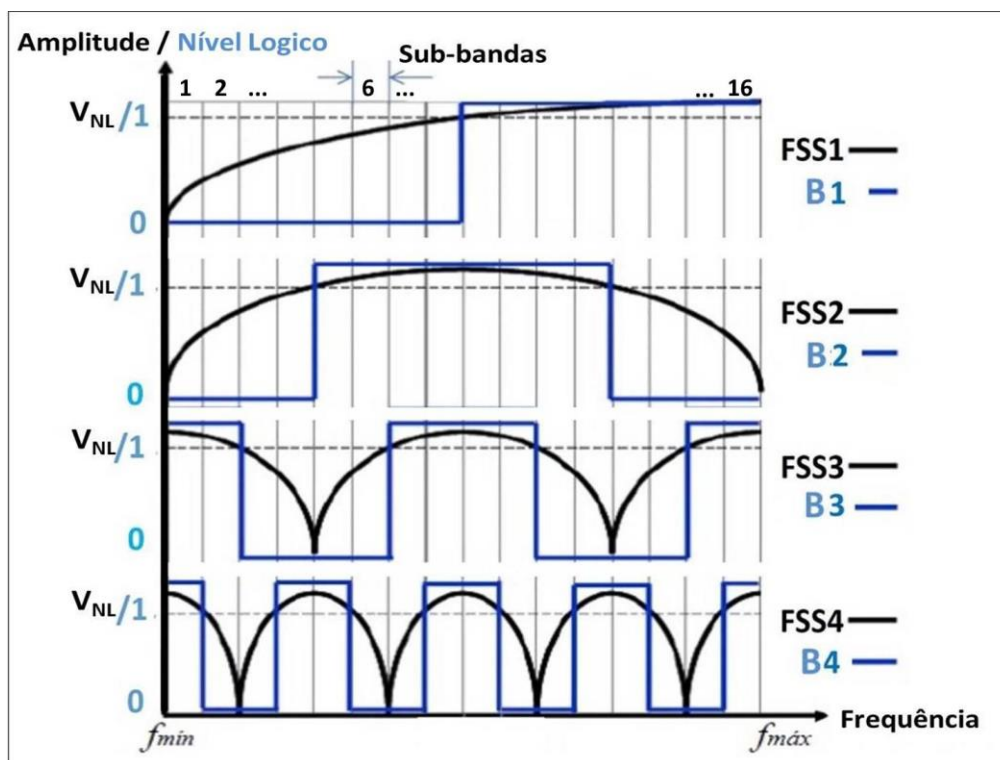
No caso do sistema proposto para essa dissertação, para o valor de  $f$  teremos:  $BW (= f_{máx} - f_{mín}) = 8,75 \text{ GHz} - 3,21 \text{ GHz} = 5,54 \text{ GHz}$  e o valor de  $2^n$  será igual a  $2^4=16$ , conforme já explanado anteriormente. Logo o valor de projeto da frequência de resolução do sistema será igual a  $f = 5,54/16 = 346,25 \text{ MHz}$ . No entanto, os valores das sub-bandas de frequência, obtidos nas simulações e medições, apresentaram deslocamentos devido às compressões em certas sub-bandas.

### 3.4 RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA PARA OS DISCRIMINADORES DE UM SISTEMA IFM SIMPLES

Os sistemas IFM simples dividem sua banda de operação em sub-bandas menores. Cada uma dessas sub-bandas é associada a uma e somente uma palavra de um código binário.

A Figura 20 mostra as respostas em frequência esperadas para os discriminadores de um sistema *IFM* simples de 4 bits de saída e capacidade de identificação de 16 sub-bandas e as saídas esperadas para o conversor A/D.  $V_{NL}$  é o limiar de tensão que diferencia o nível lógico alto do baixo, ou seja, sinais de amplitude maior que  $V_{NL}$  convencionou-se como sendo nível lógico alto (1) e sinais de amplitude menor que  $V_{NL}$ , como sendo nível lógico baixo (0). B1, B2, B3 e B4 são as saídas digitais do conversor A/D referentes às respostas em frequência das curvas das FSSs 1-4, respectivamente. B1 é o bit menos significativo da palavra digital binária, e B4 o mais significativo. Quando um sistema fornece uma palavra digital binária igual a “1110”, por exemplo, significa que a frequência do sinal de entrada está na décima sub-banda do sistema. Assim, de posse de qualquer palavra binária resultante da saída do sistema, consegue-se determinar em qual das 16 sub-bandas de frequência se localiza o sinal de entrada. O código binário resultante está mostrado na Tabela 2.

**Figura 20-** Respostas em frequência teórica para o sistema *IFM* de 4 bits e suas saídas digitais.



Fonte: Acervo do autor.

**Tabela 2-** Código Binário e suas 16 Sub-Bandas / Palavras Digital

|                   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
|-------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|
| <b>B1</b>         | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| <b>B2</b>         | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| <b>B3</b>         | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  |
| <b>B4</b>         | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0  | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  |
| <b>SUB-BANDAS</b> | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |

Fonte: Acervo do autor.

#### 4 PROJETO E FABRICAÇÃO DAS FSSs

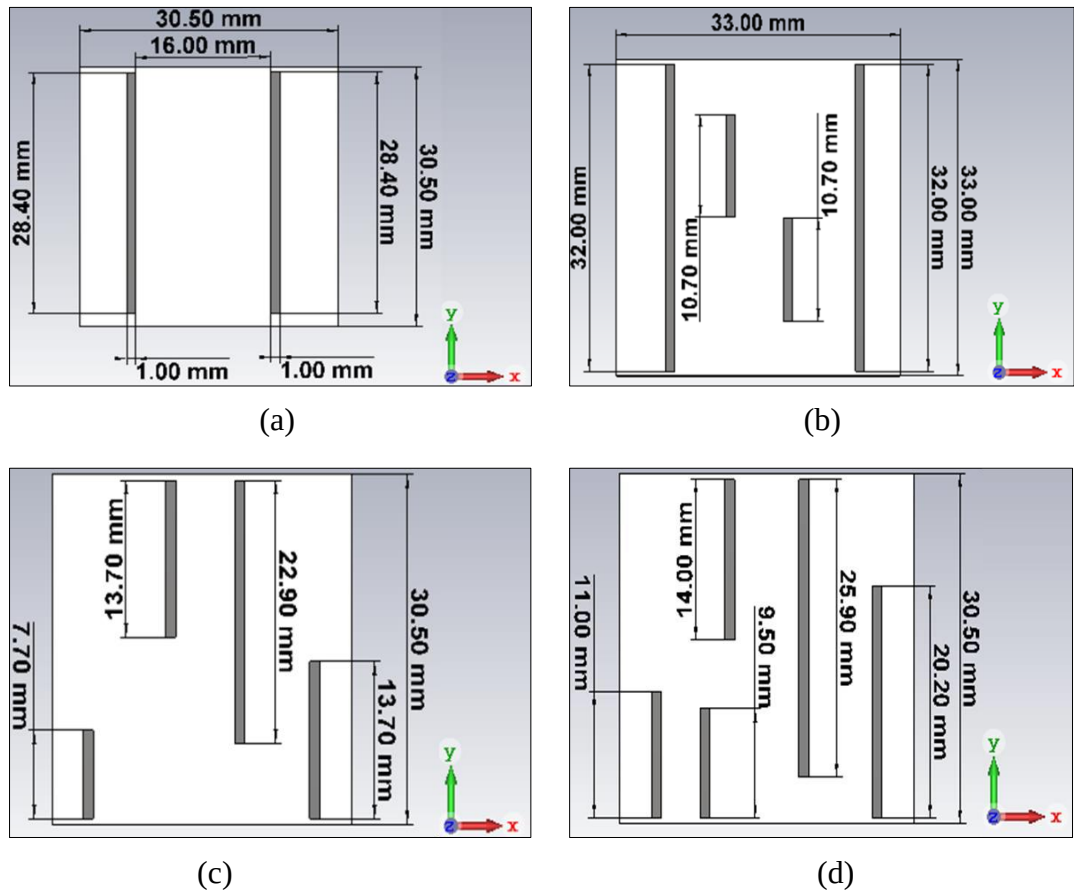
Uma nova geometria para as FSSs baseada em dipolos [7] é proposta. As FSSs diferenciam-se quanto à disposição superficial e comprimento dos dipolos (largura e espessura são iguais para todos os dipolos), nas quais foram, por meio de simulações, projetadas para a formação das palavras binárias de cada uma das 16 sub-bandas. Esses comprimentos são ajustáveis independentes uns dos outros, e, alterando os parâmetros correspondentes, fornecem as frequências de ressonâncias requeridas para o projeto. O sistema foi projetado para operar na faixa entre 3,21 GHz e 8,75 GHz, ou seja, com uma largura de banda de 5,54 GHz.

A Figura 21 apresenta as células unitárias propostas para as quatro FSSs (1-4) com as suas respectivas geometrias (comprimento, largura dos dipolos e distâncias entre si). Conforme visto nos capítulos anteriores, essas características, assim como o dielétrico escolhido irão influenciar no valor da frequência de ressonância do sistema. Dielétrico disponível comercialmente, as FSSs foram impressas no substrato FR-4 por apresentarem boa estabilidade mecânica e elétrica com baixas perdas dielétricas. Apresenta espessura  $h = 1$  mm, permissividade relativa  $\epsilon_r = 4,3$  e tangente de perdas  $\tan\delta = 0,025$ .

Utilizando técnicas de circuito impresso, por meio do procedimento de fixação de adesivos e posteriormente corrosão com percloroeto de ferro, as FSSs foram fabricadas e medidas no Laboratório de Medidas em Micro-Ondas do GTEMA/IFPB (Instituto Federal da Paraíba). As dimensões das FSSs são 21 cm x 21 cm, devida à abertura do painel de medição (20 cm x 20 cm), e os protótipos das FSSs fabricadas mostrados na Figura 22.

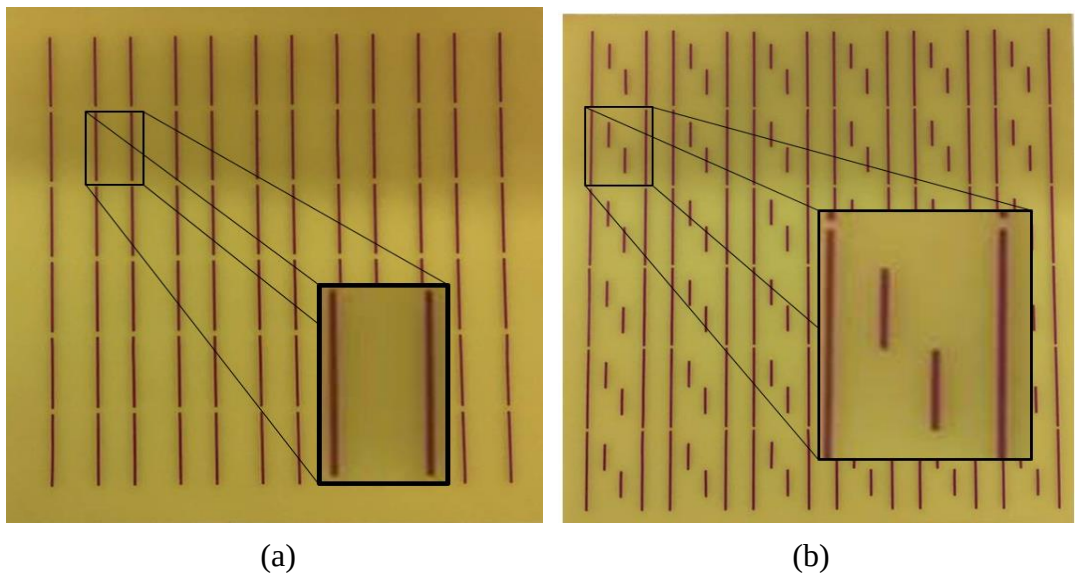


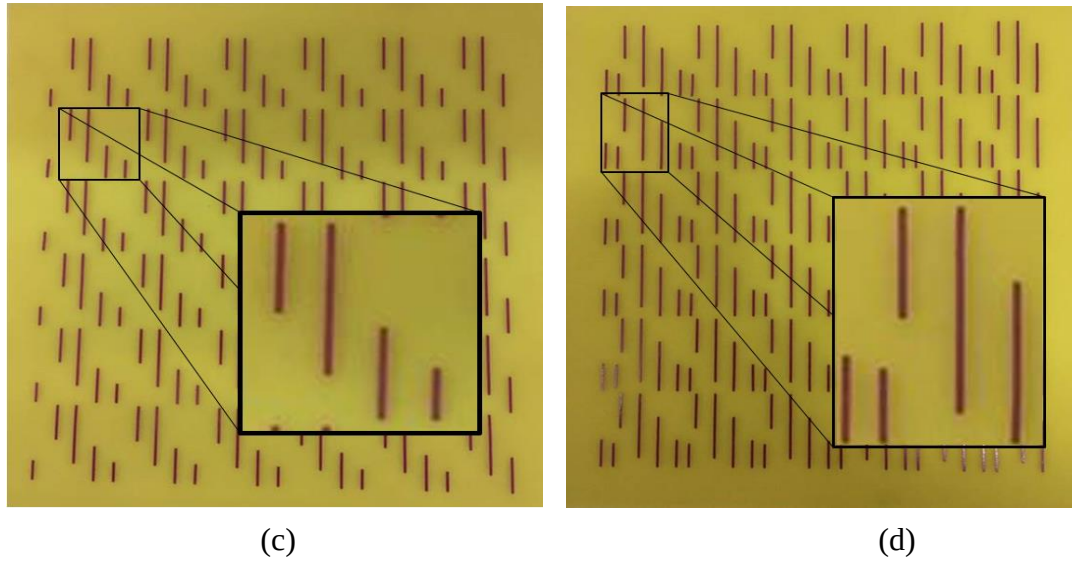
**Figura 21-** Geometria das células unitárias para as FSSs propostas. (a) FSS1. (b) FSS2. (c) FSS3. (d) FSS4.



Fonte: Acervo do autor.

**Figura 22-** Fotografia das FSSs fabricadas. (a) FSS1. (b) FSS2. (c) FSS3. (d) FSS4.





Fonte: Acervo do autor.

Nas Figuras 21 (a) e 22 (a) são mostrados o esboço e a fotografia, respectivamente, da FSS1. Nessas figuras podemos observar a existência de dois dipolos de comprimentos iguais. Respectivamente, na letra b temos a FSS2 que apresenta quatro dipolos, tendo dois pares de comprimentos iguais. Na letra c, a FSS3, que é constituída por quatro dipolos de comprimentos diferentes e por fim na letra d é apresentado a FSS4, que é composta por cinco dipolos de comprimentos diferentes.

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS MEDIDOS E SIMULADOS

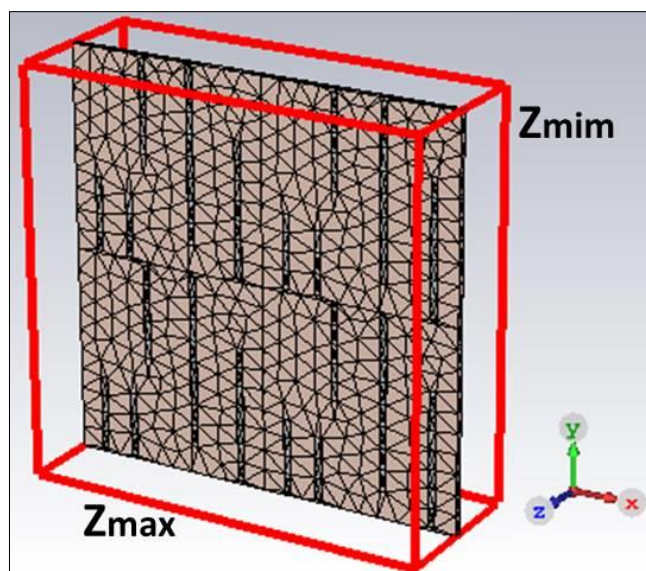
Neste capítulo serão mostrados e discutidos os resultados simulados obtidos com o *software CST Microwave Studio* em comparação com os resultados medidos para o sistema proposto, composto pelas quatro FSSs fabricadas. Discussões acerca das pequenas diferenças entre as curvas simuladas e medidas serão apresentadas.

### 5.1 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

O *software* de simulação eletromagnética, *CST Microwave Studio*, foi utilizado para o projeto de compatibilidade eletromagnética das FSSs propostas. O *software* aplica o Método dos Elementos Finito para respostas no domínio da frequência, aproximando todos os volumes simulados em uma estrutura por tetraedros. Na Figura 23 é mostrada a estrutura da FSS4 com a função “Mesh View” do *software* CST ativada e a representação para o modelo de simulação da porta 1 ( $Z_{max}$ ) e da porta 2 ( $Z_{min}$ ), na qual a célula que será simulada foi multiplicada, por se tratar de uma estrutura periódica, e todas as células foram aproximadas em uma estrutura por tetraedros, conforme supracitado como método.

Em princípio, para obtenção das características requeridas pelo projeto, um nível limiar de tensão ( $V_{NL}$ ) foi escolhido para cada sinal das FSSs que, posteriormente, corresponderão aos bits para a conversão analógico-digital (A/D), ou seja, se o sinal analisado estará acima ou abaixo desse nível.

**Figura 23-** Imagem da função “Mesh View” do software CST ativa.



Fonte: Acervo do autor.

As curvas com os resultados simulados, coeficiente de transmissão  $S_{21}$  versus frequência de operação, serão mostradas a seguir. A Figura 24 apresenta o resultado simulado para a FSS1. O nível limite de tensão foi estabelecido em **-4dB**, assim sinais entre 3,21 GHz e 5,55 GHz terão nível lógico “0” e entre 5,55 GHz e 8,75 GHz, nível lógico “1” na saída do sistema conversor analógico/digital e consequentemente uma mudança de nível de tensão.

A Figura 26 apresenta o resultado simulado para a FSS2. O nível limite de tensão foi estabelecido em **-4dB**, assim sinais entre 3,21 GHz e 4,435 GHz terão nível lógico “0”, entre 4,435 GHz e 7,31 GHz, nível lógico “1” e entre 7,31 GHz e 8,75 GHz nível lógico “0”, consequentemente duas mudanças de níveis de tensão.

A Figura 29 apresenta o resultado para a FSS3 com nível limite de tensão estabelecido em **-3dB**. Na Tabela 3 é mostrada as faixas de frequência e seus respectivos níveis lógicos para a FSS3, assim teremos quatro mudanças de níveis de tensão.

E pôr fim a Figura 32 apresenta o resultado para a FSS4 com nível limite de tensão estabelecido em **-5dB**. Na Tabela 4 é mostrada as faixas de frequência e seus respectivos níveis lógicos para a FSS4, assim oito mudanças de níveis de tensão é observado. Conforme informado por [29], não é necessário que os níveis limite de tensão das FSSs

sejam iguais, haja vista que as FSSs são independentes no processo de recepção do sinal de entrada.

**Tabela 3-** Faixas de frequência e seus respectivos níveis lógicos para a FSS3

| <b>BANDA (GHz)</b> | <b>Nível Lógico</b> |
|--------------------|---------------------|
| <b>3,21 - 3,85</b> | <b>1</b>            |
| <b>3,85 - 4,86</b> | <b>0</b>            |
| <b>4,86 - 6,50</b> | <b>1</b>            |
| <b>6,50 - 7,85</b> | <b>0</b>            |
| <b>7,85 - 8,75</b> | <b>1</b>            |

**Tabela 4-** Faixas de frequência e seus respectivos níveis lógicos para a FSS4

| <b>BANDA (GHz)</b> | <b>Nível Lógico</b> |
|--------------------|---------------------|
| <b>3,21 - 3,55</b> | <b>1</b>            |
| <b>3,55 - 4,12</b> | <b>0</b>            |
| <b>4,12 - 4,73</b> | <b>1</b>            |
| <b>4,73 - 5,14</b> | <b>0</b>            |
| <b>5,14 - 6,15</b> | <b>1</b>            |
| <b>6,15 - 7,10</b> | <b>0</b>            |
| <b>7,10 - 7,55</b> | <b>1</b>            |
| <b>7,55 - 8,51</b> | <b>0</b>            |
| <b>8,51 - 8,75</b> | <b>1</b>            |

A Tabela 5 mostra as sub-bandas identificadas baseadas nas respostas de simulação do sistema formado pelas quatro FSSs propostas. A maior parte das sub-bandas apresenta uma largura de aproximadamente 300 MHz. Devido a pequenos deslocamentos de frequência, algumas sub-bandas foram prejudicadas e/ou superdimensionadas, apresentando valores menores ou maiores que 300 MHz. No entanto, as 16 sub-bandas foram identificadas, apresentando, em geral, bons resultados. Assim, quando um sistema fornece uma palavra digital binária igual a “1111”, por exemplo, significa que a frequência do sinal de entrada está na nona sub-banda do sistema, numa faixa de frequência entre os valores 5,55 GHz e 6,15 GHz, consequentemente com uma largura de banda de 600 MHz.

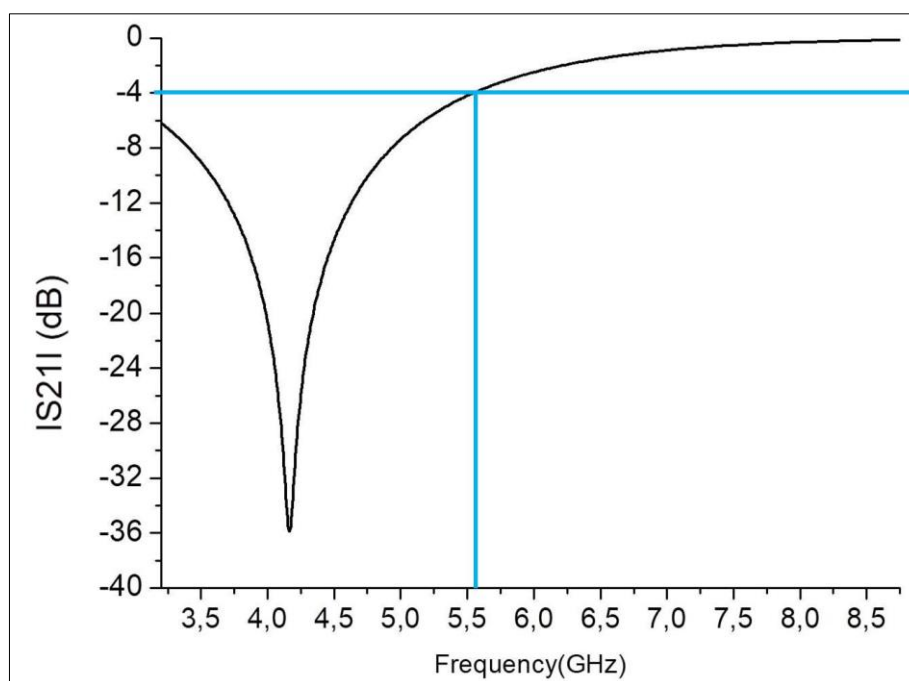
A Figura 25 mostra a densidade de corrente da FSS 1 para a frequência de ressonância 4,164 GHz, conforme podemos observar seu valor no gráfico da Figura 24.

As Figuras 27 e 28 mostram as densidades de corrente da FSS 2 para as frequências de ressonâncias de 3,42 GHz e 8,1 GHz, respectivamente. As Figuras 30 e 31 mostram as densidades de corrente da FSS 3 para as frequências de ressonâncias de 4,516 GHz e 7,3 GHz, respectivamente.

E por fim as Figuras de 33 a 36 mostram as densidades de corrente da FSS 4 para as frequências de ressonâncias de 3,948 GHz, 4,94 GHz, 6,732 GHz e 8,012 GHz, respectivamente.

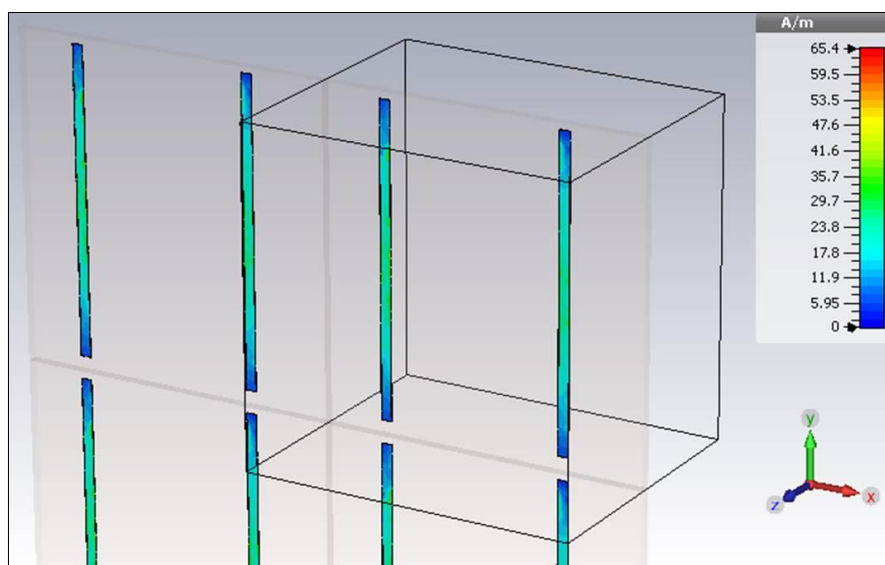
Importante ressaltar que o projeto das FSSs foi baseado nas frequências de ressonância requerida pelo projeto, logo as figuras relacionadas acima confirmam a relação entre a frequência de ressonância do projeto e suas respectivas correntes de superfícies, mostrando que o dipolo analisado está ressoando na frequência requerida.

**Figura 24-** Resultado simulado para a FSS1.



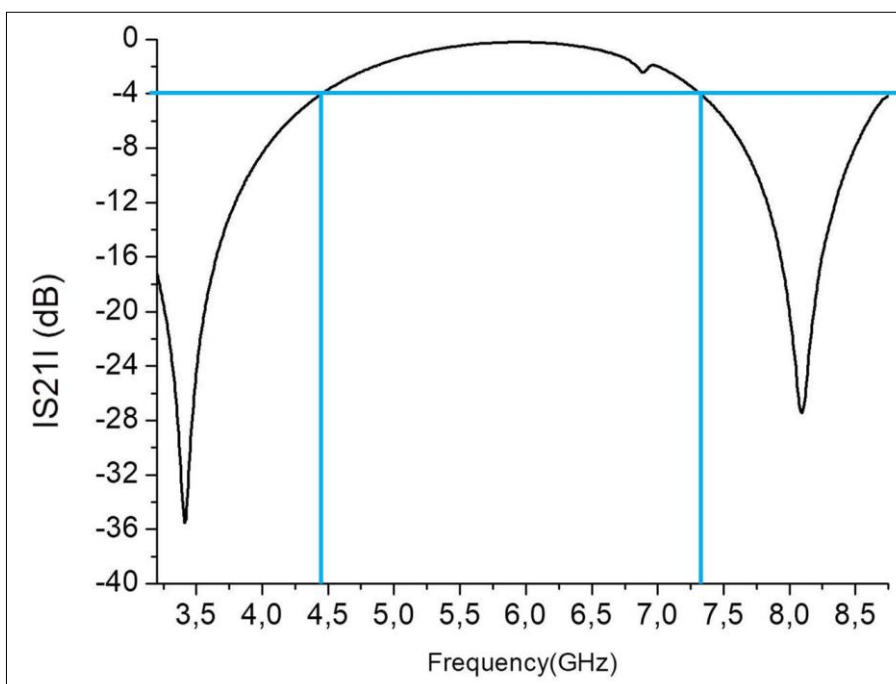
Fonte: Acervo do autor.

**Figura 25-** Distribuição da densidade de corrente na frequência de ressonância  $f_r = 4,164$  GHz da FSS1.



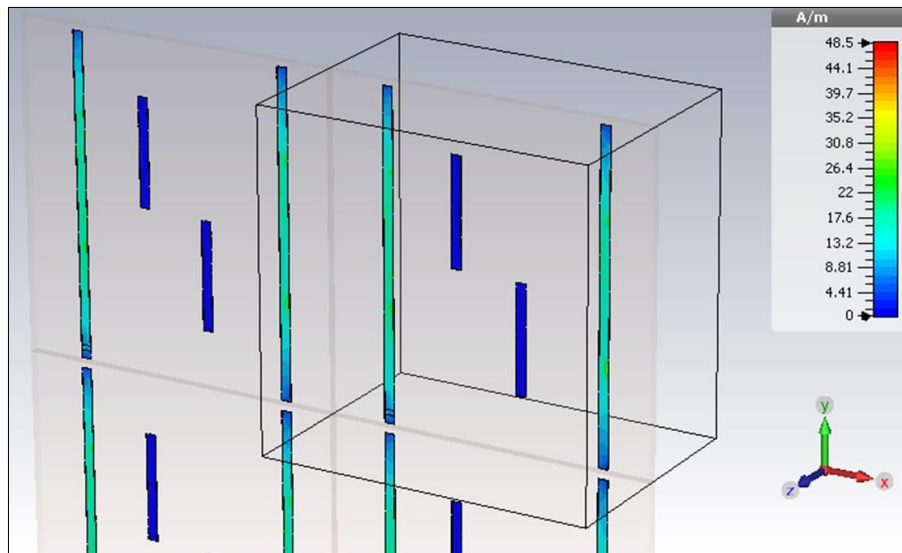
Fonte: Acervo do autor.

**Figura 26-** Resultado simulado para a FSS2.



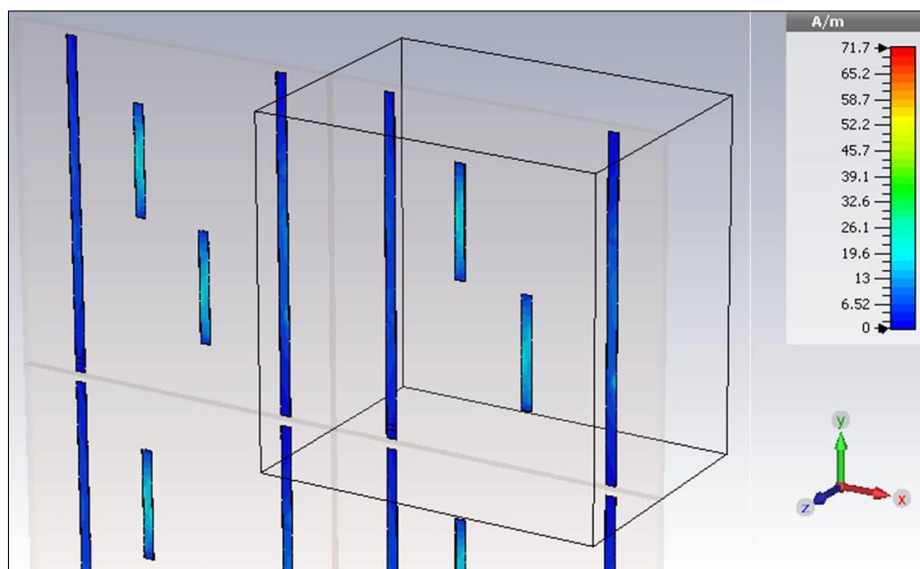
Fonte: Acervo do autor.

**Figura 27-** Distribuição da densidade de corrente na frequência de ressonância  $f_r = 3,42$  GHz da FSS2.



Fonte: Acervo do autor.

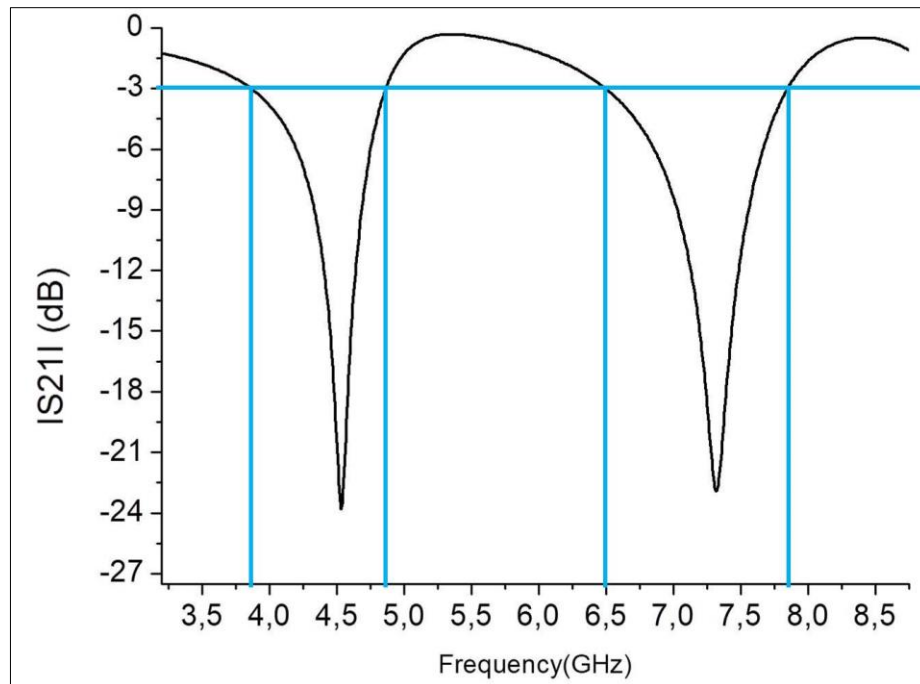
**Figura 28-** Distribuição da densidade de corrente na frequência de ressonância  $f_r = 8,1$  GHz da FSS2.



Fonte: Acervo do autor.

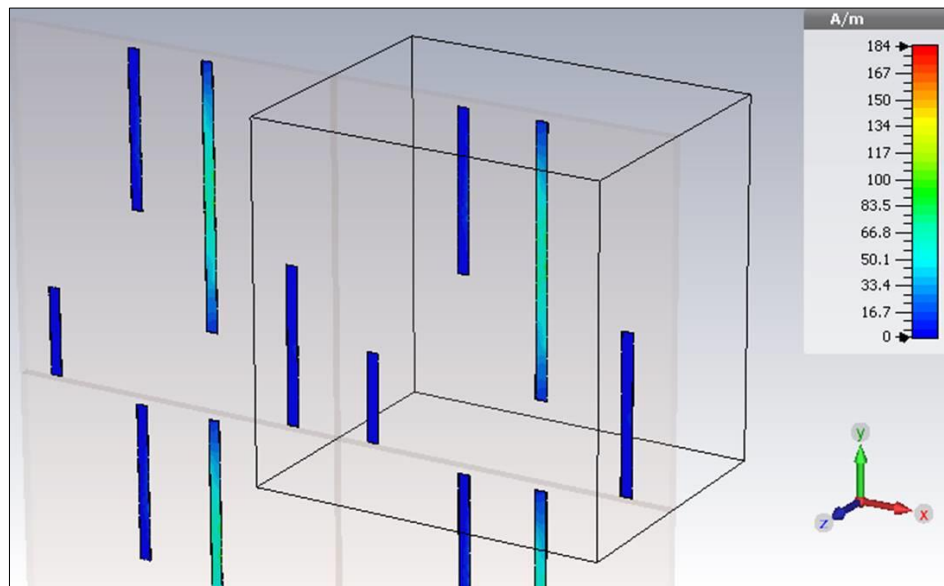


**Figura 29-** Resultado simulado para a FSS3.



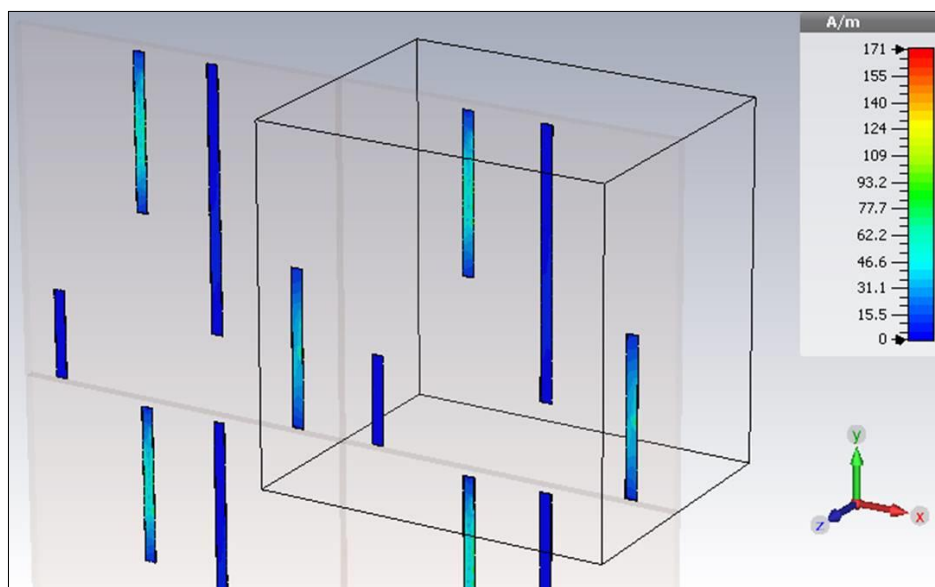
Fonte: Acervo do autor.

**Figura 30-** Distribuição da densidade de corrente na frequência de ressonância  $f_r = 4,516$  GHz da FSS3.



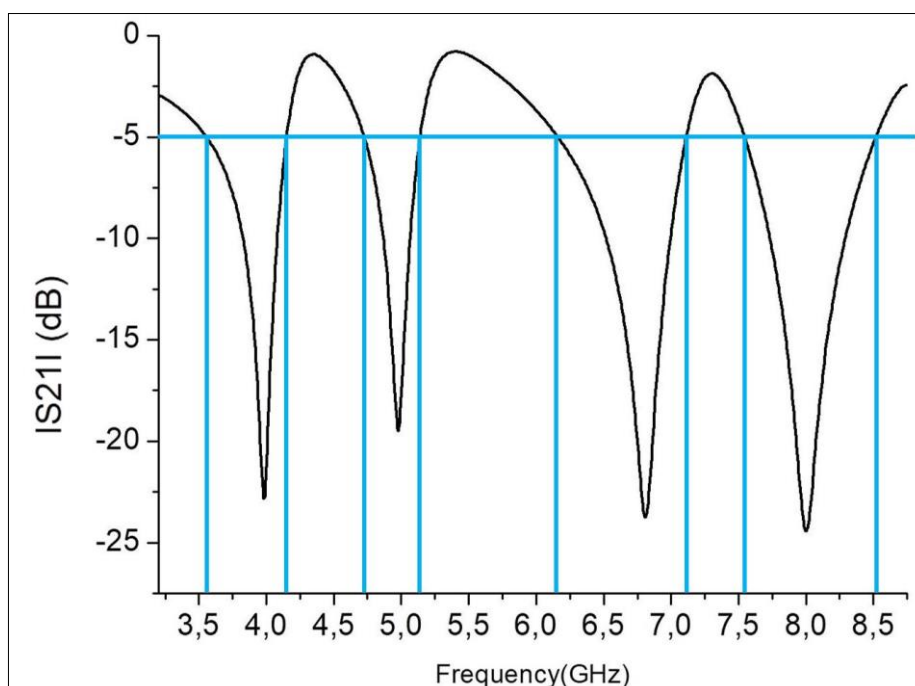
Fonte: Acervo do autor.

**Figura 31-** Distribuição da densidade de corrente na frequência de ressonância  $f_r = 7,3$  GHz da FSS3.



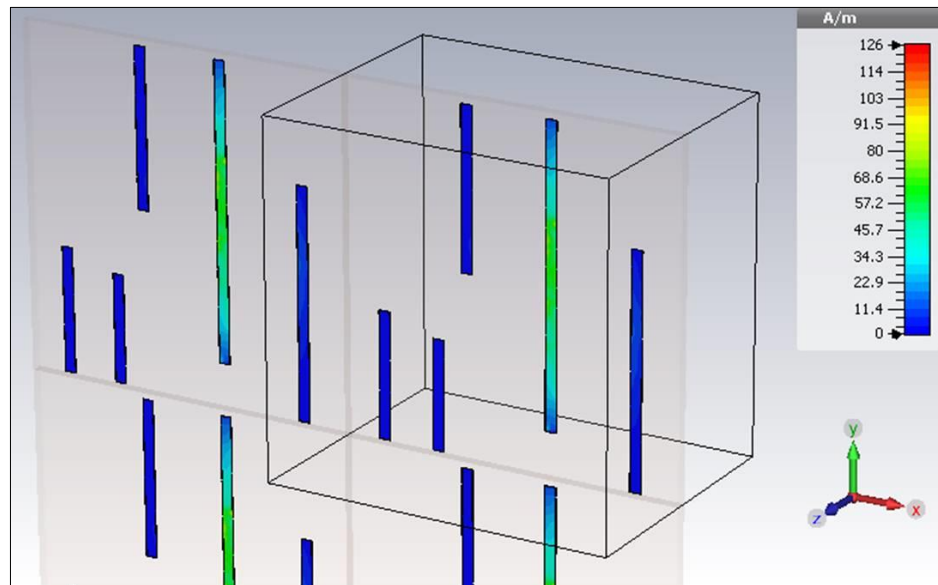
Fonte: Acervo do autor.

**Figura 32-** Resultado simulado para a FSS4.



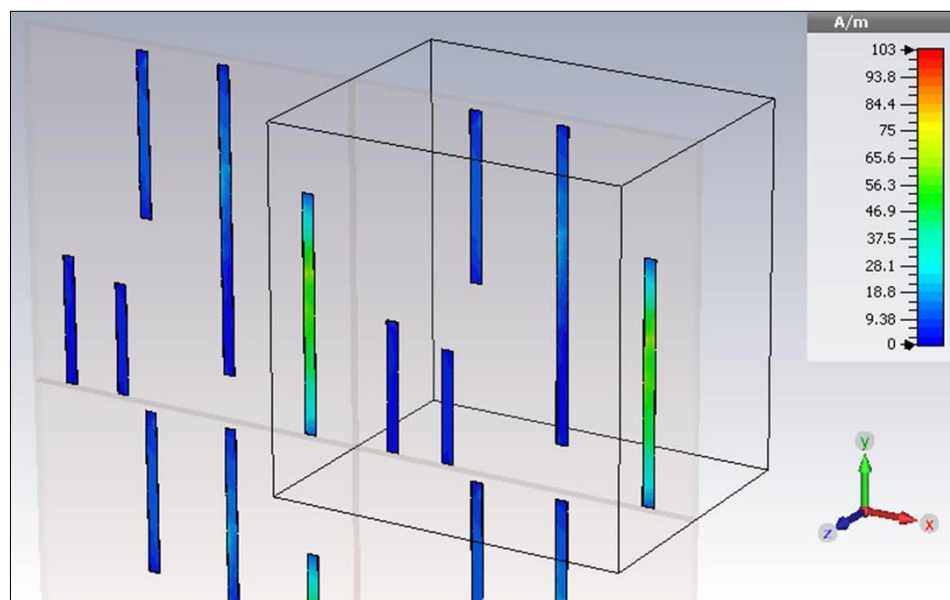
Fonte: Acervo do autor.

**Figura 33-** Distribuição da densidade de corrente na frequência de ressonância  $f_r = 3,948$  GHz da FSS4.



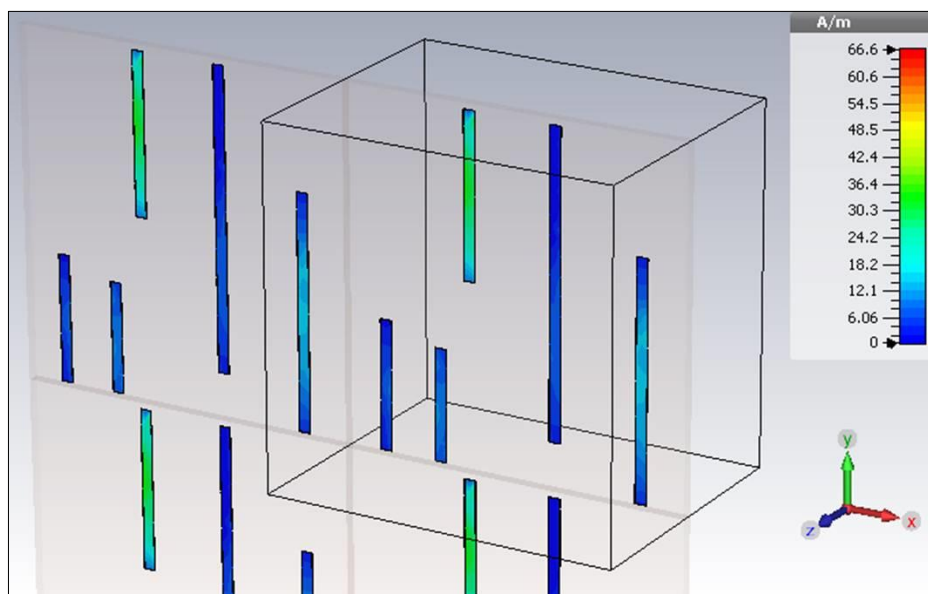
Fonte: Acervo do autor.

**Figura 34-** Distribuição da densidade de corrente na frequência de ressonância  $f_r = 4,94$  GHz da FSS4.



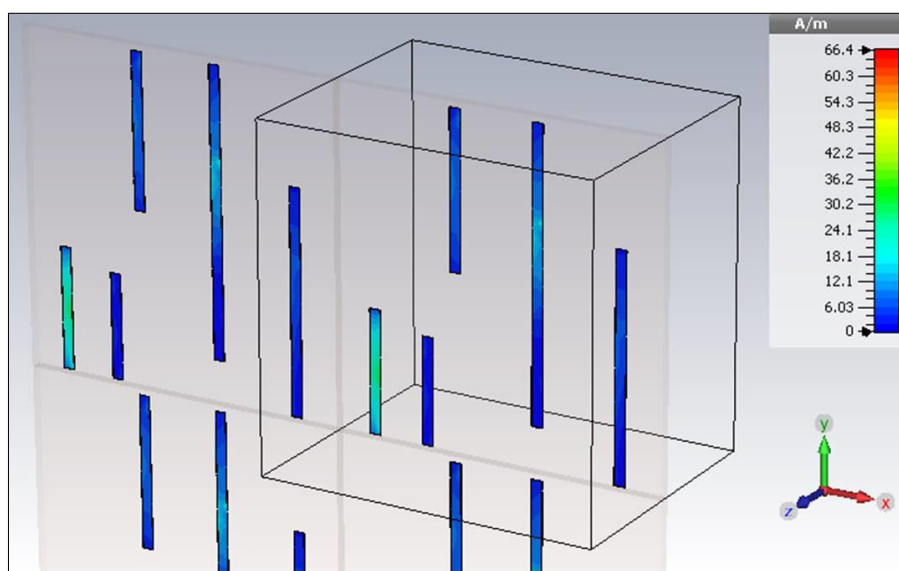
Fonte: Acervo do autor.

**Figura 35-** Distribuição da densidade de corrente na frequência de ressonância  $f_r = 6,732$  GHz da FSS4.



Fonte: Acervo do autor.

**Figura 36-** Distribuição da densidade de corrente na frequência de ressonância  $f_r = 8,012$  GHz da FSS4



Fonte: Acervo do autor.

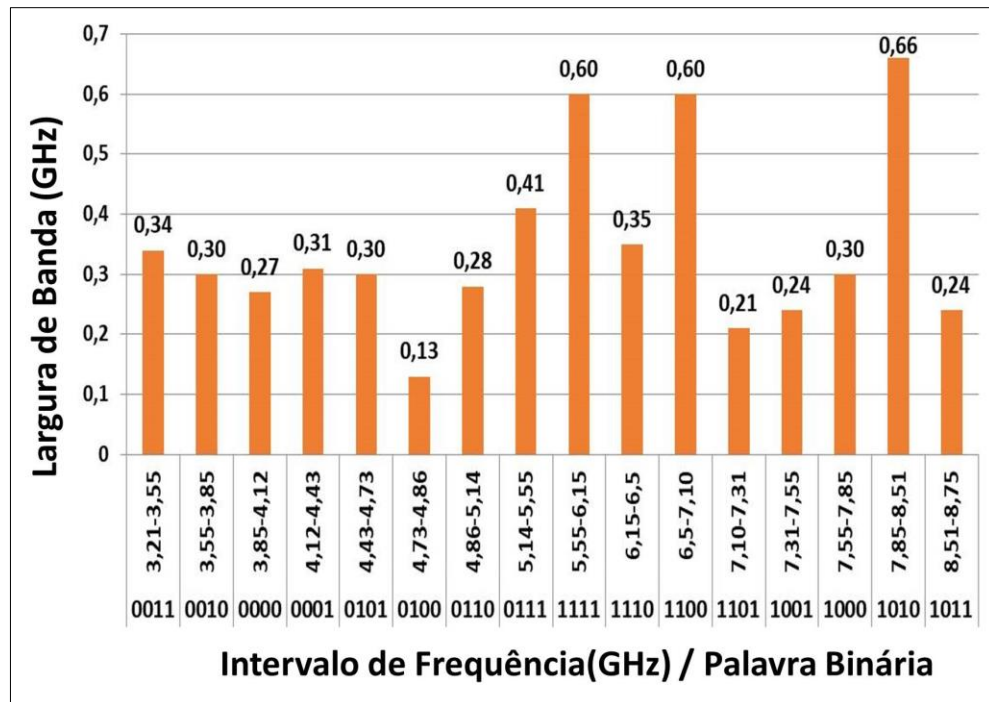
**Tabela 5-** Sub-bandas identificadas e Palavras Digitais das quatro FSSs propostas obtidas a partir dos resultados **simulados**.

| <b>SUB-BANDAS</b> | <b>PALAVRAS DIGITAIS</b> | <b>F<sub>min</sub>-F<sub>max</sub> (GHz)</b> | <b>LARGURA DE BANDA (GHz)</b> |
|-------------------|--------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|
| <b>1</b>          | <b>0011</b>              | <b>3,21-3,55</b>                             | <b>0,34</b>                   |
| <b>2</b>          | <b>0010</b>              | <b>3,55-3,85</b>                             | <b>0,30</b>                   |
| <b>3</b>          | <b>0000</b>              | <b>3,85-4,12</b>                             | <b>0,27</b>                   |
| <b>4</b>          | <b>0001</b>              | <b>4,12-4,43</b>                             | <b>0,31</b>                   |
| <b>5</b>          | <b>0101</b>              | <b>4,43-4,73</b>                             | <b>0,30</b>                   |
| <b>6</b>          | <b>0100</b>              | <b>4,73-4,86</b>                             | <b>0,13</b>                   |
| <b>7</b>          | <b>0110</b>              | <b>4,86-5,14</b>                             | <b>0,28</b>                   |
| <b>8</b>          | <b>0111</b>              | <b>5,14-5,55</b>                             | <b>0,41</b>                   |
| <b>9</b>          | <b>1111</b>              | <b>5,55-6,15</b>                             | <b>0,60</b>                   |
| <b>10</b>         | <b>1110</b>              | <b>6,15-6,50</b>                             | <b>0,35</b>                   |
| <b>11</b>         | <b>1100</b>              | <b>6,50-7,10</b>                             | <b>0,60</b>                   |
| <b>12</b>         | <b>1101</b>              | <b>7,10-7,31</b>                             | <b>0,21</b>                   |
| <b>13</b>         | <b>1001</b>              | <b>7,31-7,55</b>                             | <b>0,24</b>                   |
| <b>14</b>         | <b>1000</b>              | <b>7,55-7,85</b>                             | <b>0,30</b>                   |
| <b>15</b>         | <b>1010</b>              | <b>7,85-8,51</b>                             | <b>0,66</b>                   |
| <b>16</b>         | <b>1011</b>              | <b>8,51-8,75</b>                             | <b>0,24</b>                   |

Fonte: Acervo do autor

No Gráfico 1 podemos identificar com maior clareza a relação entre as sub-bandas e suas respectivas palavras binárias, relacionadas com suas larguras de banda.

**Gráfico 1-** Sub-bandas e palavras binárias associadas para o sistema IFM-FSS **simulado**.

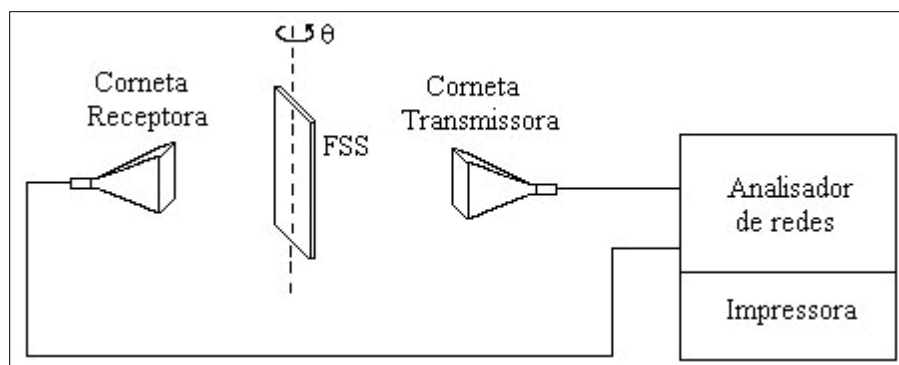


Fonte: Acervo do autor

## 5.2 CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL PARA MEDIÇÃO

Esta seção apresenta a configuração experimental para a medição das FSSs propostas considerando uma incidência normal de uma onda plana polarizada verticalmente conforme pode ser observado no esboço da Figura 37. Os resultados experimentais foram obtidos usando um analisador de rede vetorial, Agilent E5071C, e duas antenas cornetas, modelo (Double Ridge Guide Horn Antenna, 700 MHz – 18 GHz) todos conectados por cabos e adaptadores coaxiais adequados, com a finalidade de medição do módulo do coeficiente de transmissão,  $|S_{21}|$ . A configuração de medição inclui um painel com um slot de 20 cm x 20 cm para afixar as FSSs por meio de fitas durex transparentes, haja vista não interferir nos resultados, conforme pode ser observada nas Figura 38 e Figura 39.

**Figura 37-** Esboço do sistema para medições das FSSs.



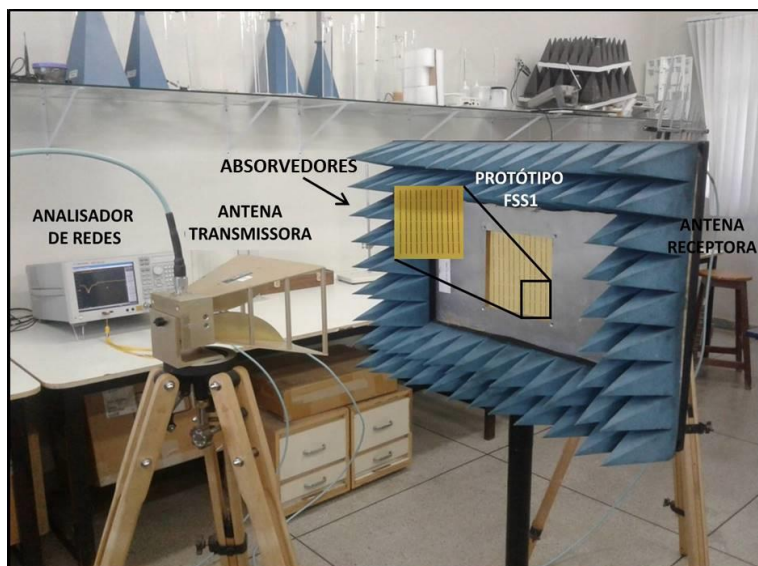
Fonte: [23]

A fim de garantir uma maior precisão do experimento, a medida do sistema foi obtida por meio de duas etapas: primeiro, para calibração do sistema, dentro da faixa de frequência que se deseja medir o dispositivo, é medida a transmissão sem o protótipo das FSSs e logo após, em segundo lugar, o protótipo das FSSs é inserido entre as duas antenas, montada no centro do caminho do feixe e as transmissões são medidas e calibradas usando o primeiro resultado. Os absorvedores foram usados para mitigar as reflexões não desejadas.

Com o propósito de padronizar as medições realizadas e garantir que as FSSs estivessem na região de campo distante, foi estabelecido um espaçamento fixo entre as duas antenas de 1,2 m.

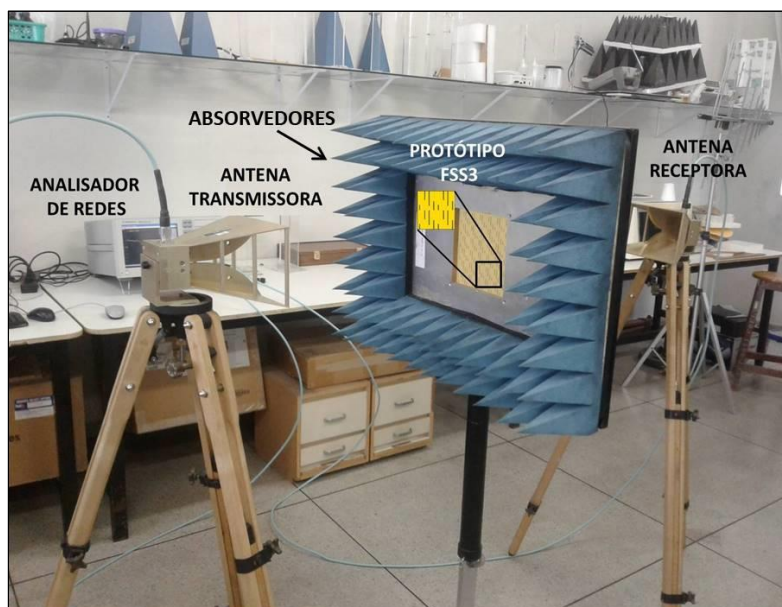
Duas configurações de medição podem ser observadas nas Figura 38 e 39, nas quais a primeira representa o conjunto de medição para a FSS1 e a segunda o conjunto de medição para a FSS3. Como o conjunto de medição é idêntico para todas as FSSs, não será apresentado nesta dissertação o conjunto para as medições das FSSs 2 e 4.

**Figura 38-** Medição experimental da FSS1 utilizando o analisador de redes vetorial.



Fonte: Acervo do autor.

**Figura 39-** Medição experimental da FSS3 utilizando o analisador de redes vetorial.



Fonte: Acervo do autor.



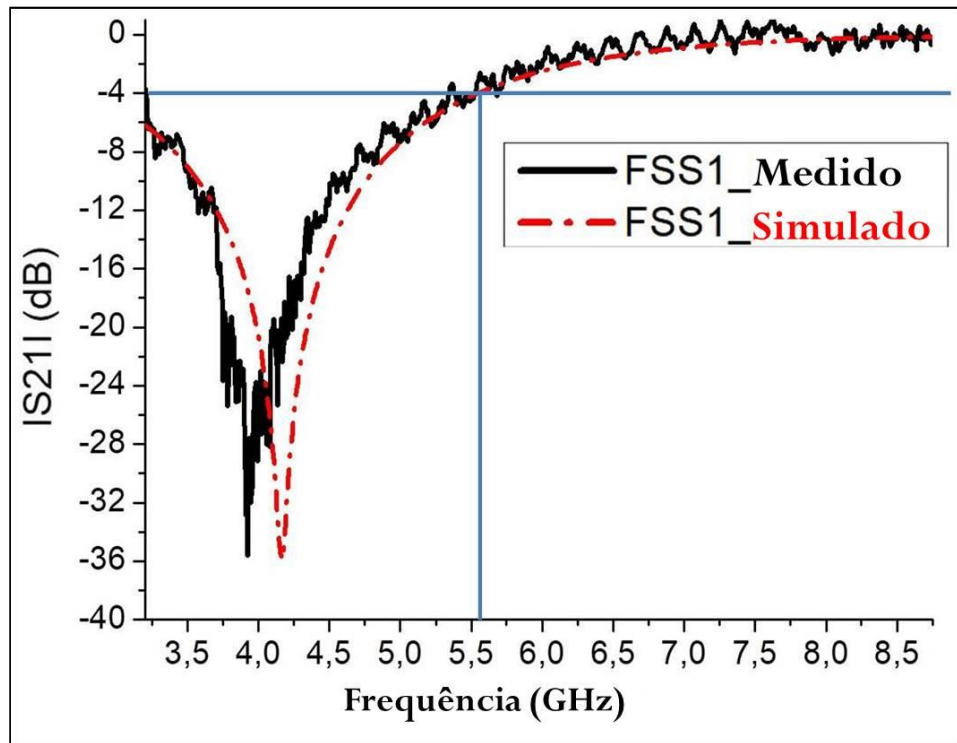
### 5.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As Figuras de 40 a 51 mostram os resultados experimentais das quatro FSSs em comparação com os resultados simulados. Observamos que a FSS1 (Figura 40) e a FSS3 (Figura 44) apresentaram ótima concordância entre os resultados simulado e medido, tendo um pequeno deslocamento, no entanto sem prejuízo para detecção dos bits desejados. Posteriormente, observamos as comparações da FSS2 (Figura 41) e da FSS4 (Figura 45), na qual apresentaram um deslocamento maior.

A Figura 42 apresenta imagem ampliada do primeiro ponto de mudança do nível de tensão da FSS2, do nível lógico “0” para o nível “1”, no qual houve um deslocamento de aproximadamente 145 MHz, da curva medida em relação à curva simulada, assim como na Figura 43, também da FSS2, no último ponto do nível “0”, na frequência de 8,75 GHz, houve um deslocamento de aproximadamente 200 MHz, entre as curvas analisadas, conforme podemos observar.

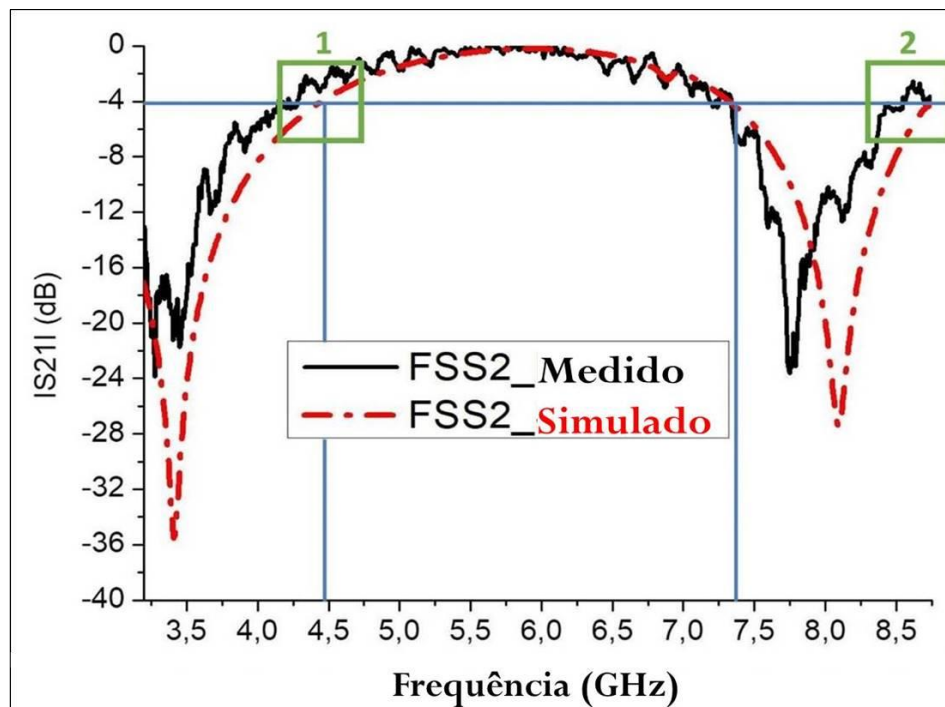
As Figuras de 46 a 51 apresentam respectivamente as ampliações dos pontos de mudança dos níveis de tensão, agora para as curvas simuladas e medidas da FSS4, que apresentaram deslocamentos. Para a Figura 46, primeiro ponto, houve um deslocamento de aproximadamente 70 MHz, para a Figura 47, segundo ponto, houve um deslocamento de aproximadamente 50 MHz, para a Figura 48, terceiro ponto, houve um deslocamento de aproximadamente 90 MHz, para a Figura 49, quarto ponto, houve um deslocamento de aproximadamente 100 MHz, para a Figura 50, quinto ponto, houve um deslocamento de aproximadamente 140 MHz e finalmente para a Figura 51, sexto ponto, houve um deslocamento de aproximadamente 180 MHz, no qual posteriormente serão explanados possíveis motivos para esses deslocamentos, representando os pontos respectivamente da Figura 45. Todos os pontos acima mencionados estão denotados como retângulos verdes nas figuras das FSSs que os representam.

**Figura 40-** Comparação entre o resultado medido e simulado da FSS1.

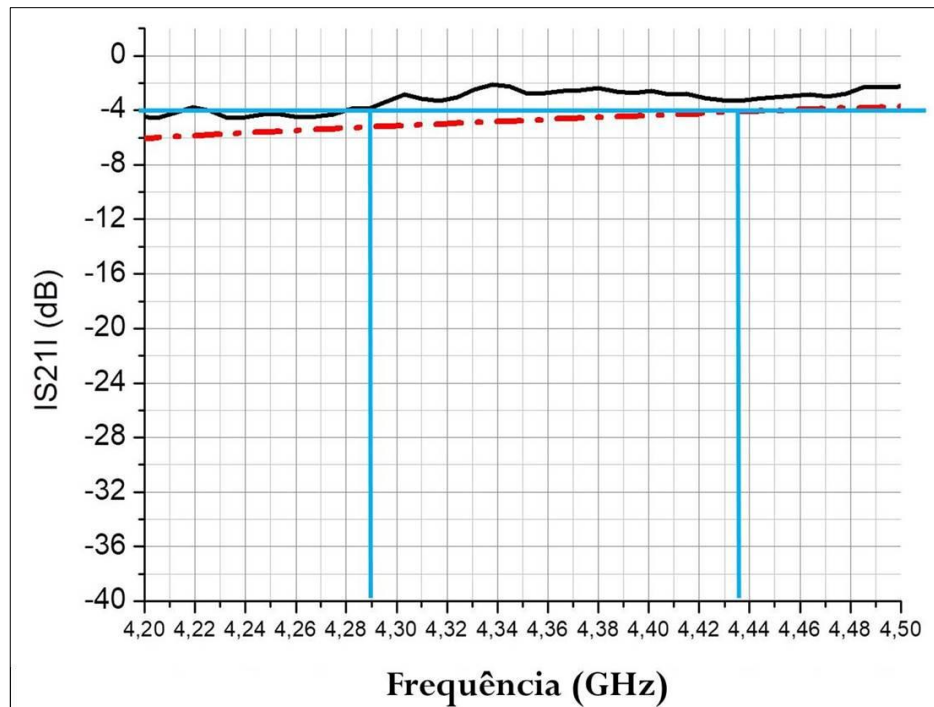


Fonte: Acervo do autor.

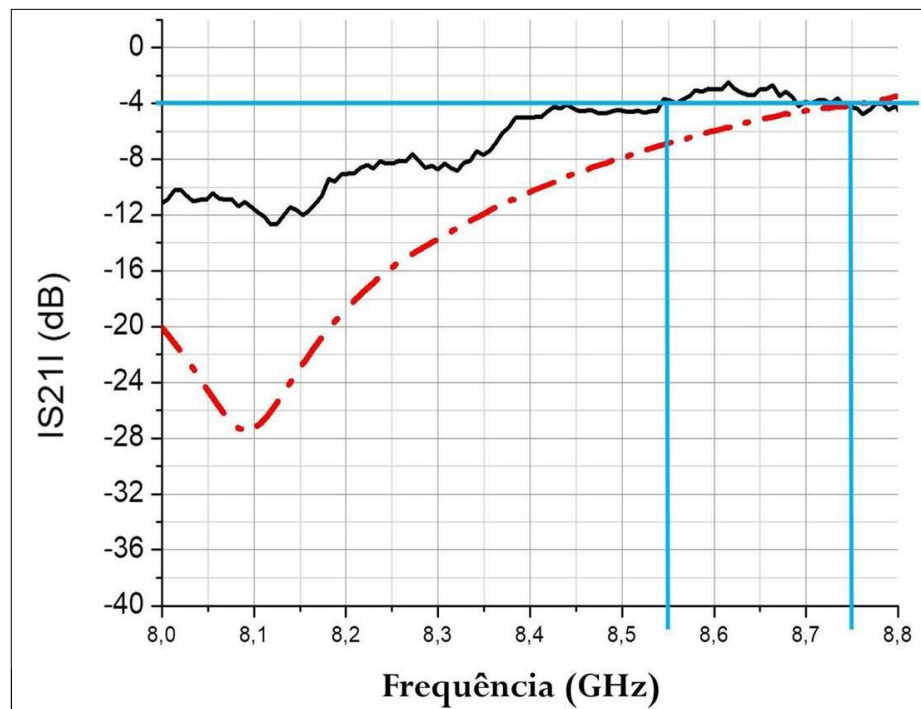
**Figura 41-** Comparação entre o resultado medido e simulado da FSS2 e identificação dos pontos de deslocamento



Fonte: Acervo do autor.

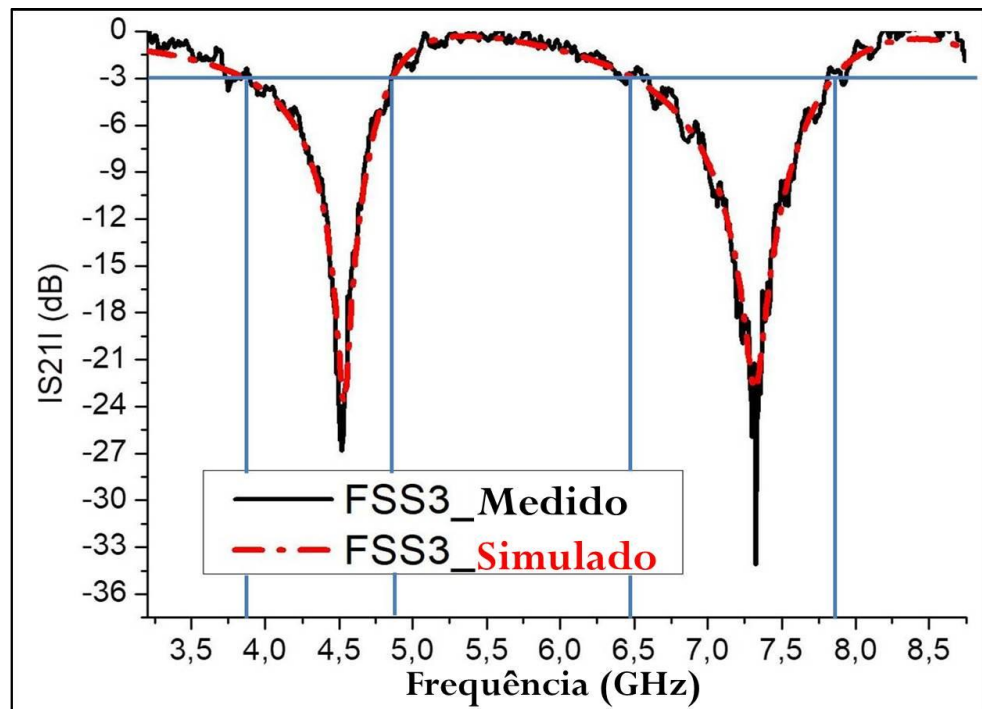
**Figura 42-** Ampliação do ponto 1 da FSS2.

Fonte: Acervo do autor.

**Figura 43-** Ampliação do ponto 2 da FSS2.

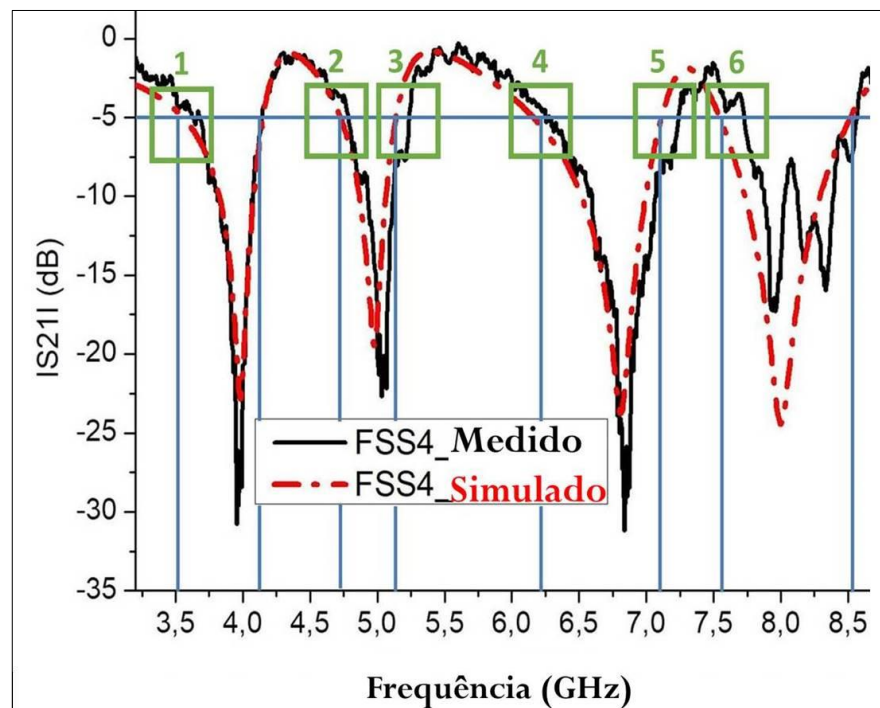
Fonte: Acervo do autor.

**Figura 44-** Comparação entre o resultado medido e simulado da FSS3.



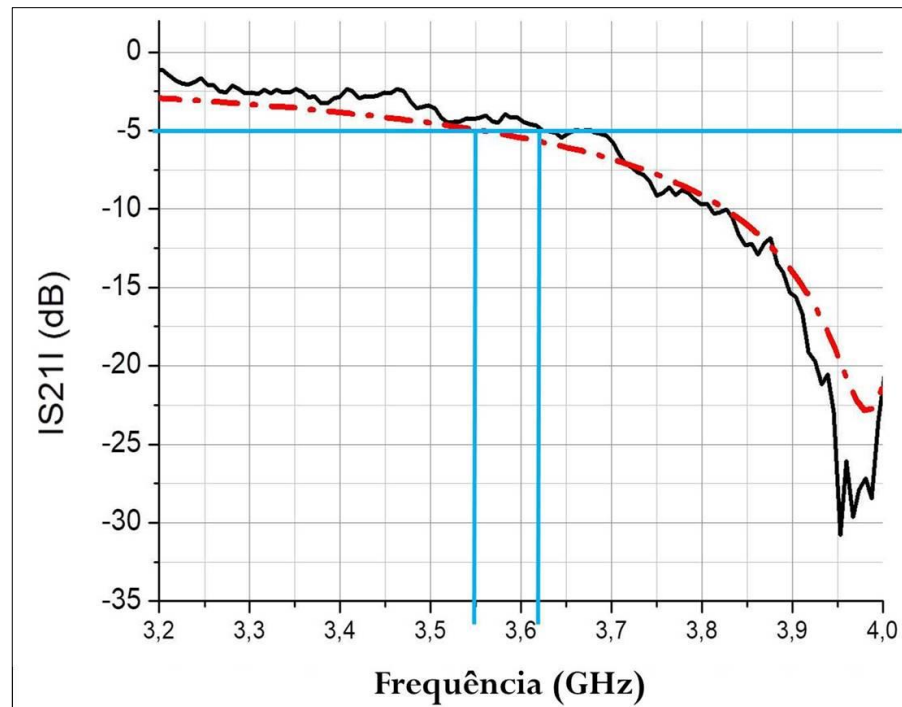
Fonte: Acervo do autor.

**Figura 45-** Comparação entre o resultado medido e simulado da FSS4 e identificação dos pontos de deslocamento



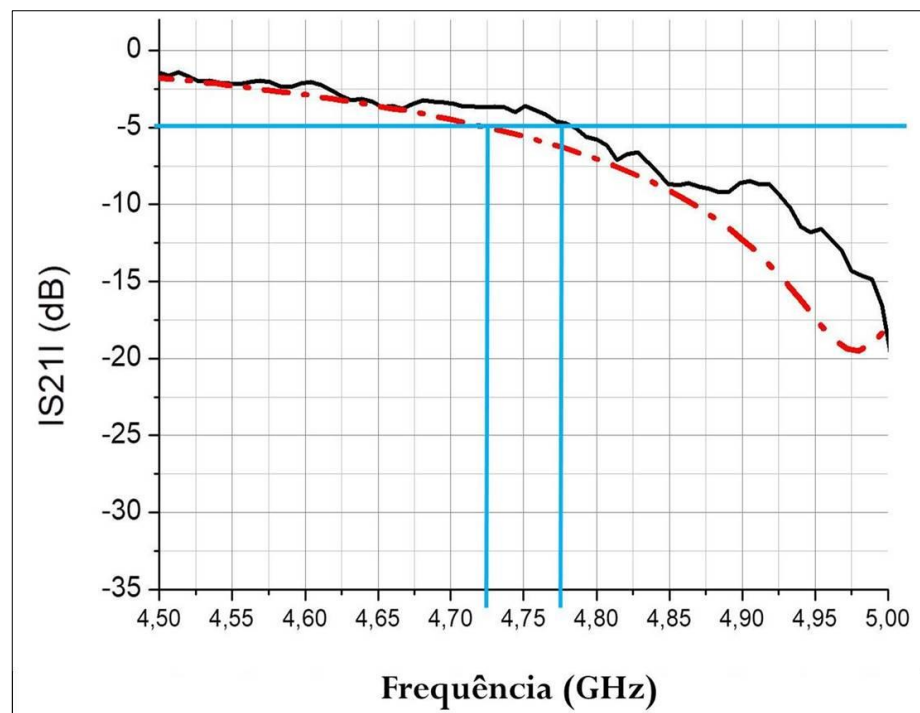
Fonte: Acervo do autor.

**Figura 46-** Ampliação do ponto 1 da FSS4.



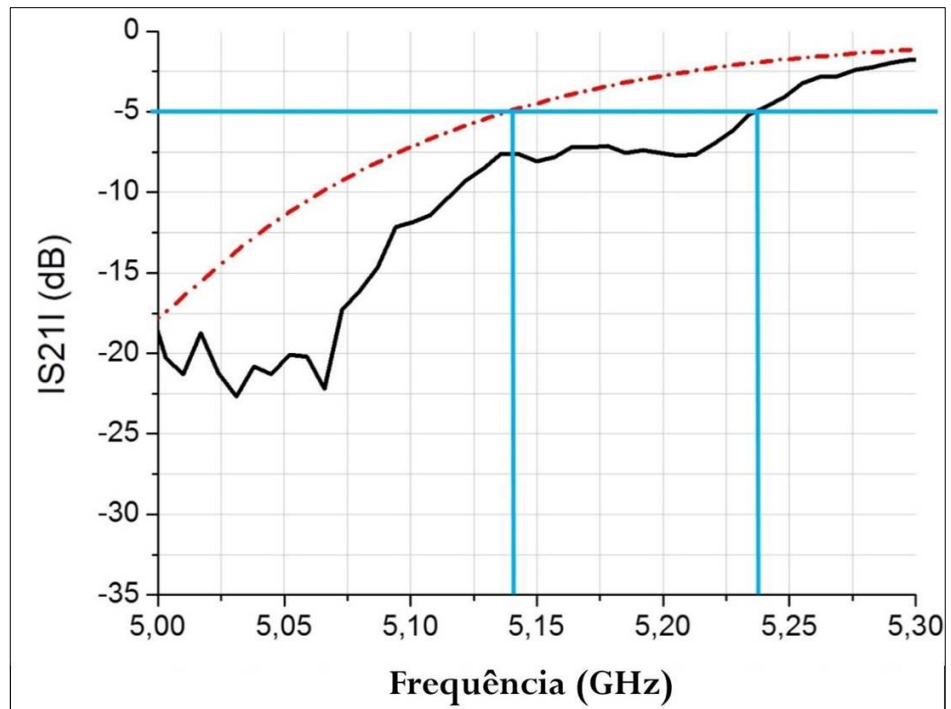
Fonte: Acervo do autor.

**Figura 47-** Ampliação do ponto 2 da FSS4.



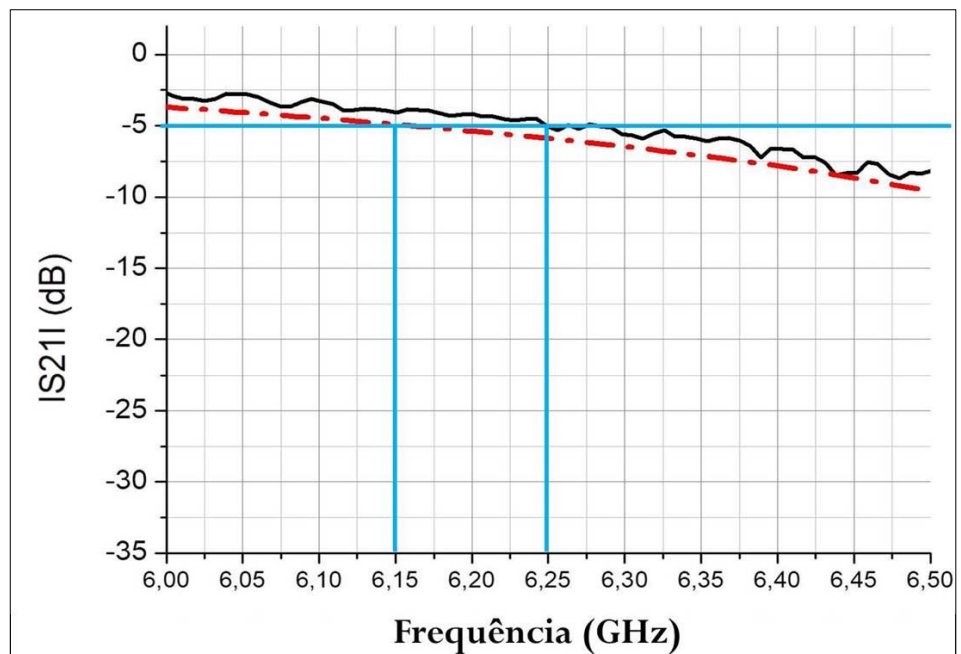
Fonte: Acervo do autor.

**Figura 48-** Ampliação do ponto 3 da FSS4.



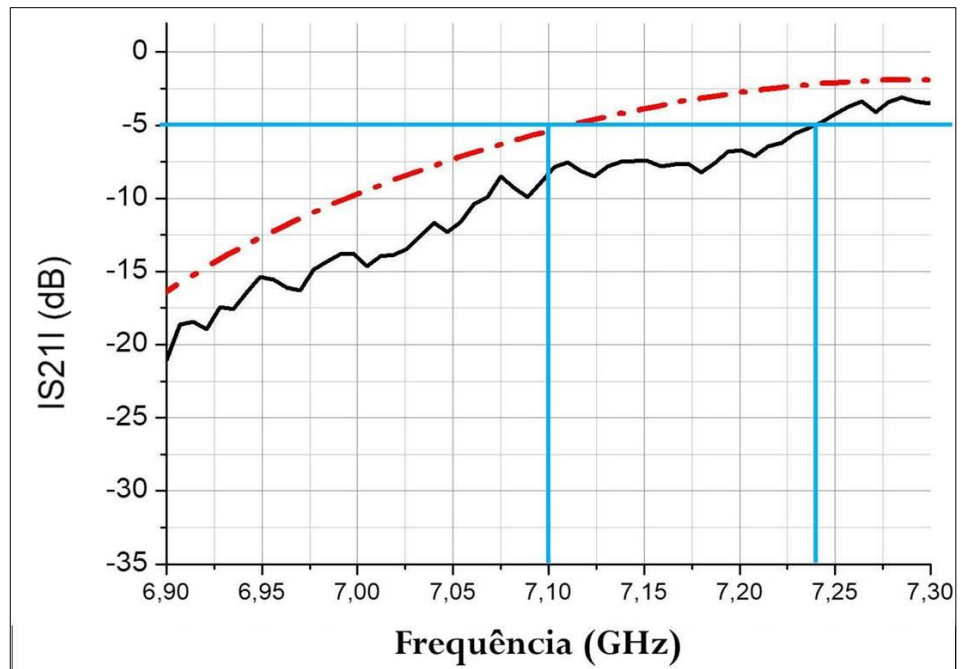
Fonte: Acervo do autor.

**Figura 49-** Ampliação do ponto 4 da FSS4.



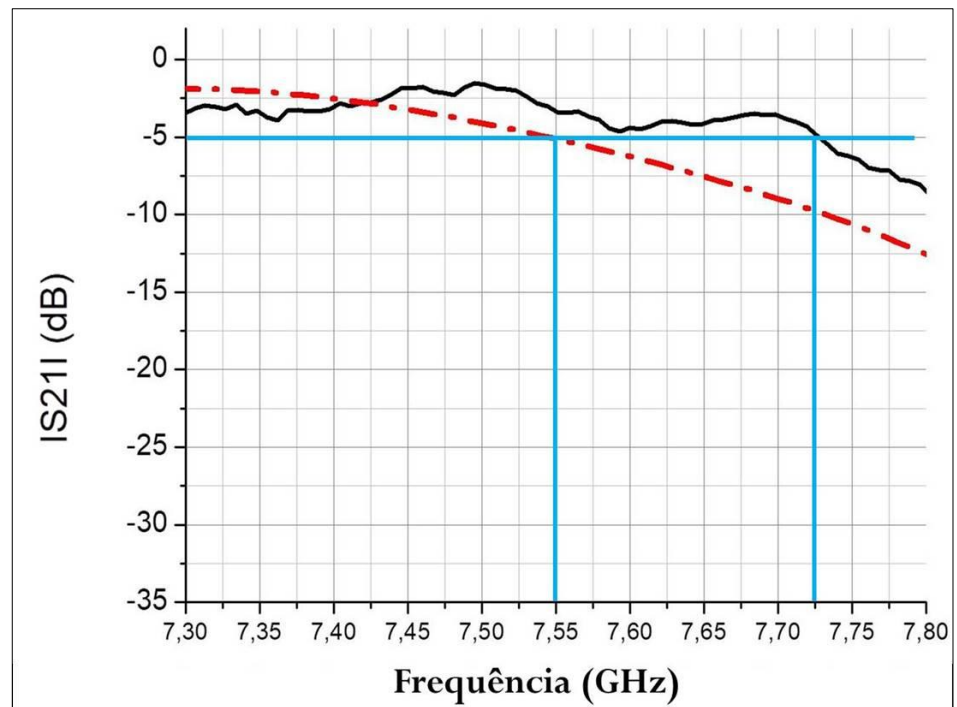
Fonte: Acervo do autor.

**Figura 50-** Ampliação do ponto 5 da FSS4.



Fonte: Acervo do autor.

**Figura 51-** Ampliação do ponto 6 da FSS4.



Fonte: Acervo do autor.

Assim, conseqüentemente uma nova tabela com as novas frequências de transição para a formação das palavras binárias foi criada para os valores obtidos após as medições. A Tabela 5, conforme mencionado anteriormente, representa os valores para a configuração simulada do dispositivo proposto. Por outro lado, a Tabela 6 apresenta as novas frequências obtidas após análise das curvas com a medição do sistema e a seguir, o Gráfico 2 apresenta as comparações dos valores entre as curvas, simuladas e medidas.

Observa-se, porém, que apesar dos deslocamentos nas bandas de operação das FSSs, ou seja, nas diferenças encontradas entre os valores simulados e medidos, os resultados experimentais mostram que esses dispositivos podem ser utilizados como discriminadores de um sistema *IFM* simples de 4 bits na banda de operação de 3,21 GHz a 8,75 GHz.

**Tabela 6-** Sub-bandas identificadas e Palavras Digitais das quatro FSSs propostas obtidas a partir dos resultados **medidos**.

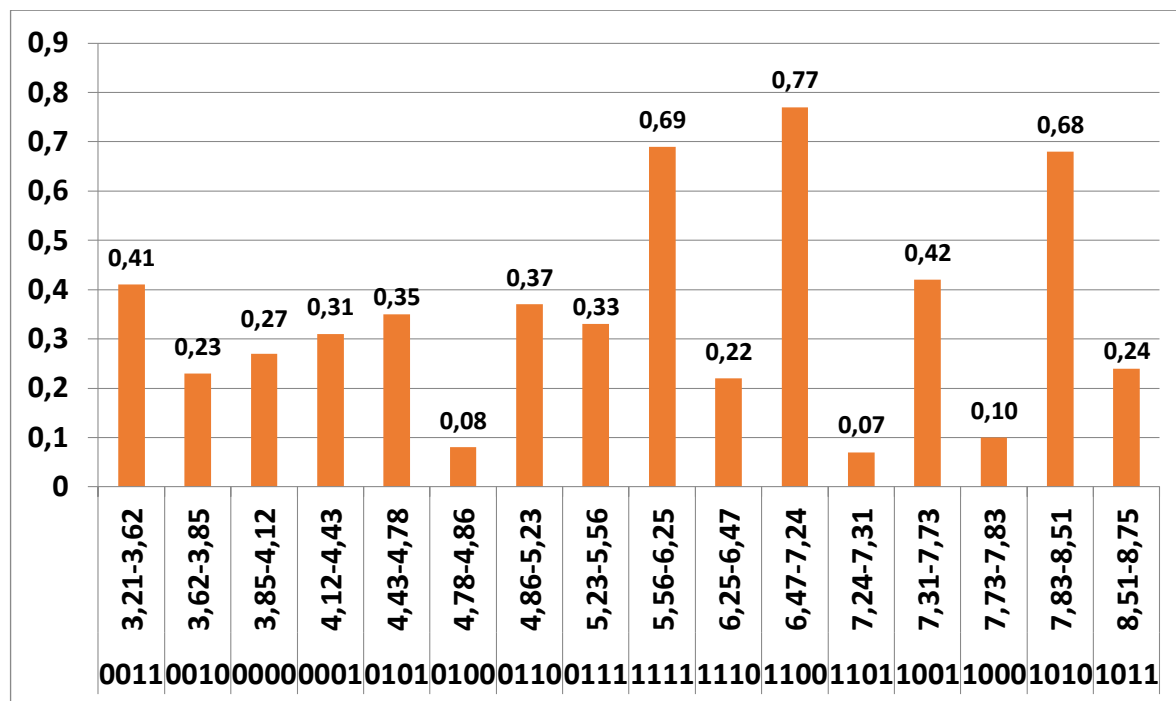
| SUB-BANDAS | PALAVRAS DIGITAIS | F <sub>mim</sub> -F <sub>max</sub> (GHz) | LARGURA DE BANDA (GHz) |
|------------|-------------------|------------------------------------------|------------------------|
| 1          | 0011              | 3,21-3,62                                | 0,41                   |
| 2          | 0010              | 3,62-3,85                                | 0,23                   |
| 3          | 0000              | 3,85-4,12                                | 0,27                   |
| 4          | 0001              | 4,12-4,43                                | 0,31                   |
| 5          | 0101              | 4,43-4,78                                | 0,35                   |
| 6          | 0100              | 4,78-4,86                                | 0,08                   |
| 7          | 0110              | 4,86-5,23                                | 0,37                   |
| 8          | 0111              | 5,23-5,56                                | 0,33                   |
| 9          | 1111              | 5,56-6,25                                | 0,69                   |
| 10         | 1110              | 6,25-6,47                                | 0,22                   |
| 11         | 1100              | 6,47-7,24                                | 0,77                   |
| 12         | 1101              | 7,24-7,31                                | 0,07                   |
| 13         | 1001              | 7,31-7,73                                | 0,42                   |
| 14         | 1000              | 7,73-7,83                                | 0,10                   |
| 15         | 1010              | 7,83-8,51                                | 0,68                   |
| 16         | 1011              | 8,51-8,75                                | 0,24                   |

Fonte: Acervo do autor.



No Gráfico 2 podemos identificar com maior clareza a relação entre as sub-bandas e suas respectivas palavras binárias, relacionadas com suas larguras de banda, assim como observado no Gráfico 1, que representa o sistema simulado.

**Gráfico 2-** Sub-bandas e palavras binárias associadas para o sistema *IFM-FSS medido*.



Fonte: Acervo do autor.

Na Tabela 7 podemos observar que apenas as sub-bandas 3, 4 e 16 e consequentemente suas características na frequência permaneceram inalteradas, ou seja, não houve deslocamentos para essas sub-bandas na comparação entre as curvas simuladas e medidas.

Uma possível causa para esses deslocamentos pode ser explicada devido às tolerâncias de fabricação e limitações do sistema de medição. Os deslocamentos nas frequências poderiam ser minimizados com a utilização de, por exemplo, uma câmara anecóica.

Contudo, observou-se que apesar dos deslocamentos sofridos pelas frequências de transição das FSSs, o sistema é capaz de identificar as 16 sub-bandas distintamente, no entanto com novos valores para as larguras de banda, conforme observado na Tabela 6.

**Tabela 7-** Comparação entre as sub-bandas identificadas e palavras digitais das quatro FSSs propostas obtidas a partir dos resultados **simulado** e **medido**.

| SUB-BANDAS | PALAVRAS DIGITAIS | Fmim-Fmax (GHz) SIMULADO | LARGURA DE BANDA (GHz) SIMULADO | Fmim-Fmax (GHz) MEDIDO | LARGURA DE BANDA (GHz) MEDIDO |
|------------|-------------------|--------------------------|---------------------------------|------------------------|-------------------------------|
| 1          | 0011              | 3,21-3,55                | 0,34                            | 3,21-3,62              | 0,41                          |
| 2          | 0010              | 3,55-3,85                | 0,30                            | 3,62-3,85              | 0,23                          |
| 3          | 0000              | 3,85-4,12                | 0,27                            | 3,85-4,12              | 0,27                          |
| 4          | 0001              | 4,12-4,43                | 0,31                            | 4,12-4,43              | 0,31                          |
| 5          | 0101              | 4,43-4,73                | 0,30                            | 4,43-4,78              | 0,35                          |
| 6          | 0100              | 4,73-4,86                | 0,13                            | 4,78-4,86              | 0,08                          |
| 7          | 0110              | 4,86-5,14                | 0,28                            | 4,86-5,23              | 0,37                          |
| 8          | 0111              | 5,14-5,55                | 0,41                            | 5,23-5,56              | 0,33                          |
| 9          | 1111              | 5,55-6,15                | 0,60                            | 5,56-6,25              | 0,69                          |
| 10         | 1110              | 6,15-6,50                | 0,35                            | 6,25-6,47              | 0,22                          |
| 11         | 1100              | 6,50-7,10                | 0,60                            | 6,47-7,24              | 0,77                          |
| 12         | 1101              | 7,10-7,31                | 0,21                            | 7,24-7,31              | 0,07                          |
| 13         | 1001              | 7,31-7,55                | 0,24                            | 7,31-7,73              | 0,42                          |
| 14         | 1000              | 7,55-7,85                | 0,30                            | 7,73-7,83              | 0,10                          |
| 15         | 1010              | 7,85-8,51                | 0,66                            | 7,83-8,51              | 0,68                          |
| 16         | 1011              | 8,51-8,75                | 0,24                            | 8,51-8,75              | 0,24                          |

Fonte: Acervo do autor.

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a modelagem (simulações), a fabricação e as medições das 4 FSSs propostas, que são parte de um *IFMS* de 4 bits (16 palavras digitais), em substituição aos discriminadores convencionais de *IFMS* digitais, como os interferômetros.

As FSSs foram projetadas para compor um sistema digital de identificação de frequências entre a faixa de 3,21 GHz e 8,75 GHz com resolução média de 300 MHz.

Os resultados experimentais das FSSs 1 e 3 não apresentaram deslocamentos significativos que viessem a se destoar com os resultados simulados, no entanto, as FSSs 2 e 4 apresentaram deslocamentos em relação aos resultados simulados, podendo ser ocasionado pelas pequenas imperfeições na fabricação e ou pelos limites no processo da medição experimental. Apesar dos deslocamentos encontrados, escolhendo apropriadamente os novos valores das frequências de transição entre os níveis, foi possível identificar todas as 16 sub-bandas distintas, que correspondem aos 100% da banda do projeto detectável.

A escolha da geometria nos projetos das FSSs com elementos na forma de dipolos simples trás como principal vantagem flexibilidade, nos quais os comprimentos dos dipolos podem ser adequadamente escolhidos para se obter uma resposta em frequência desejada.

Em comparação com trabalhos atuais nessa área de pesquisa, como em [29], no qual apenas foi possível identificar 10 sub-bandas distintas, que correspondeu a 85% da banda de projeto, banda detectável, este trabalho apresentou a possibilidade de identificação de 100% de suas palavras binárias.

Por fim, atestamos a concordância entre a teoria e a prática, assim como o uso do método descrito nesta dissertação para as análises das FSSs apresentou-se como um método eficiente, rápido e com precisão suficiente para prever a respostas na frequência dessas superfícies.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, com o intuito de se realizar a integração completa do sistema *IFM* simples de 4 bits, sugere-se o projeto e a fabricação de todos os elementos que compõem o sistema proposto, como as antenas *UWB*, atuando na faixa de operação do sistema; O projeto e o desenvolvimento do sistema digital que deve ser conectado à saída do módulo conversor *A/D*, responsável pela leitura e interpretação das saídas binárias e a integração de todos os elementos citados que constituem o sistema *IFM* simples proposto.

Realização das medições em uma câmara anecóica e testes com o sistema implementado e por fim a realização do projeto e o desenvolvimento da interface gráfica com o usuário.

## REFERÊNCIAS

- [1] T. H. Brandão, H. R. D. Filgueiras, S. A. Cerqueira, “FSS-based dual-band cassegrain parabolic antenna for RadarCom applications”, Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2017 SBMO/IEEE MTT-S International, Aug. 2017.
  
- [2] M. Mantash, A. Kesavan, T. A. Denidni, “Beam-Tilting Endfire Antenna Using a Single-Layer FSS for 5G Communication Networks”, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters , Volume: 17, Issue: 1, pp: 29-33, Jan. 2018.
  
- [3] E. M. Fernandes, “Aplicação de Superfície Seletiva em Frequência para melhoria de desempenho de sistemas de antenas tipo banda dupla”, Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, Dissertação (Mestrado), (2016).
  
- [4] P. Mahima, B. Sangeetha, S. Narayan, “EM design of hybrid-element FSS structure for radome application”, India Conference (INDICON), IEEE Annual, Dec. 2016.
  
- [5] D. Ferreira; L. Sismeiro; A. Ferreira; R. F. S. Caldeirinha; T. R. Fernandes; I. Cuiñas, “Hybrid FSS and Rectenna Design for Wireless Power Harvesting”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, pp: 2038 – 2042, Volume: 64, Issue: 5, 2016.
  
- [6] M. W. B. Silva, “Superfícies Seletivas em frequências - FSS: Concepção e Projeto de Absorvedores Planares de Micro-ondas para aplicação em WLAN, Wimax e Radar”, Tese de Doutorado, Unicamp, 2014.
  
- [7] J. Bossard, D. Werner, T. Mayer e R. P. Drupp, “A novel design methodology for reconfigurable frequency selective surfaces using genetic algorithms”. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, pp. vol.53, no.4, pp 1390-1400, April. 2005.

- [8] M. R. T. de Oliveira, “Superfície Seletiva de Frequência Reconfigurável (RFSS) Baseada em Dipolo Cruzado”, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, Dissertação Mestrado, 2016.
- [9] M. Mahmoodi, K. M. Donnell, “Design of a new bi-state active frequency selective surface”, Antennas and Propagation (APSURSI), IEEE International Symposium on, July 2016.
- [10] M. R. T. de Oliveira, H. V. H. Filho Silva, E. M. F. de Oliveira, G. J. Pinheiro, M. T. de MELO, M. O. Alencar, A. G. Neto, I. Llamas-garro, “RFSS based on cross dipole or grid using PIN diode”. Microwave and optical technology letters, v. 59, pp 2122-2126, 2017.
- [11] C. P. N. Silva, H. V. H. Filho Silva, E. M. F. Oliveira, M. R. T. de Oliveira, M. T. Melo, B. G. M. Oliveira, “Superfície seletiva em frequência multibanda baseada em modificações da Cruz de Jerusalém”. Momag, Porto Alegre. v. 1. pp. 1-4. 2016.
- [12] F. A. C. S. Lucena, C. P. N. Silva, T. L. Pedrosa, M. T. de Melo, “Gain enhancement of dual-band antenna using square loop FSS”, IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, pp 2169 – 2170, 2017.
- [13] M. Md. Shukor, M. Z. A. Abd. Aziz, B. H. Ahmad, M. K. Suaidi, M. F. Johar, M. A. Othman, S. N. Salleh, F. A. Azmin, M. F. Abd. Malek, “Characteristic impedance modelling of circular loop and square loop frequency selective surface (FSS) on hybrid material”, International Symposium on Technology Management and Emerging Technologies, pp 486 – 491, 2014.
- [14] K. Sharma, S. Vaid, A. Mittal, “Dual-Polarized Resonant Cavity Antenna using Slotted-Circular Patch FSS”, IEEE International RF and Microwave Conference (RFM), pp 75 – 78, 2013.
- [15] C. Sudhendra, M. AR, A. C. R. Pillai, R. Kark, T. S. Rukmini, “A Novel Ultra Wide Band Radar Absorber Based on Hexagonal Resistive Patch FSS”, IEEE Applied Electromagnetics Conference (AEMC), pp 1-2, 2013.

- [16] R. C. Gough, A. P. Bowman, J. M. Stamm, “Dual Polarized Active Frequency Selective Surface for High Power Applications at X-Band”, IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), pp 372 – 375, 2017.
- [17] J.do N. Cruz, “Caracterização de FSS com Geometria Matrioska Aberta”, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do IFPB, Dissertação Mestrado, 2015.
- [18] K. Ding; C. Gao; T. Yu; D. Qu, “Wideband CP slot antenna with backed FSS reflector”, IET Microwaves, Antennas & Propagation, pp: 1045 – 1050, Volume: 11, Issue: 7, 2017.
- [19] Tian-Wu Li, Da Li, Er-Ping Li, “A novel FSS structure with high selectivity and excellent angular stability for 5G communication radome”, 10th Global Symposium on Millimeter-Waves, pp. 50-52, 2017.
- [20] K. ElMahgoub, T. Navigation, “Frequency selective surfaces for UHF RFID applications”, IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, pp. 987 – 988, 2015.
- [21] Xiang-yu Li, Jian Li, Jia-jun Tang, Xian-liang Wu, Zhong-xiang Zhang, “High gain microstrip antenna design by using FSS superstrate layer”, 4th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT), pp. 1186 – 1189, 2015.
- [22] S. Milici, A. Lazaro, J. Lorenzo, R. Villarino, D. Girbau, “Wearable sensors based on modulated frequency selective surfaces”, 47th European Microwave Conference (EuMC), pp. 942 – 945, 2017.
- [23] Campos, A. L. P. S., Superfícies seletivas em frequência: análise e projeto, Natal: IFRN Editora, 2009.
- [24] K.Yao, S. Lan, L. Xu, “A high gain Fabry-Perot cavity antenna with a double -layered partially reflecting frequency selective surface structure”, International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), pp. 1-2, 2017.

- [25] M. W. B. da Silva, “Superfícies Seletivas em Frequências - FSS: Concepção e Projeto de Absorvedores Planares de Micro-Ondas para Aplicação em WLAN, WIMAX e RADAR”, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas: Tese (Doutorado), 2014.
- [26] H. Emami, N. Sarkhosh and M. Ashourian, “Reduced Cost Amplitude Independent Photonic RF Frequency Measurement System”, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, volume: 23, issue: 11, pp 617 – 619, Sep. 2013.
- [27] B. G. M. de Oliveira, “Interferômetros Coplanares de Micro-ondas para Aplicação em Sistemas de Dectecção Instantânea”, Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica: Dissertação (Mestrado), 2009.
- [28] M. Espinosa-Espinosa, I. Llamas-Garro, B. G. M. de Oliveira, M. T. de Melo, Jung-Mu Kim, “Reconfigurable Frequency Identification Receivers”, IEEE 15th Mediterranean Microwave Symposium (MMS), pp 1-4, 2015.
- [29] C. P. do N. Silva “Iterferômetros Baseados na Geometria Fractal de Hilbert”, Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica: Dissertação (Mestrado), 2016.
- [30] B. G. M. de Oliveira, “Integração de Discriminadores de Frequência para Sistemas IFM”, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica: Tese (Doutorado), 2014.
- [31] H. Zhang, S. Pan, “High Resolution Microwave Frequency Measurement Using a Dual-Parallel Mach–Zehnder Modulator”, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Volume: 23, Issue: 11, pp. 623 – 625, 2013.
- [32] H. Emami, N. Sarkhosh, M. Ashourian, “Reduced Cost Amplitude Independent Photonic RF Frequency Measurement System”, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Volume: 23, Issue: 11, pp. 617 – 619, 2013.



- [33] R. Weigel, F.Lurz, S.Lindner, S. Mann, S. Linz, A. Koelpin, “A fast and precise Six-Port-based FM technique for wireless resonant SAW sensing”, IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), pp. 1 – 4, 2016.
  
- [34] E. M. F. de Oliveira, M. R. T. de Oliveira, M. T. de Melo, T. L. Pedrosa; B. G. M de Oliveira, “Instantaneous Frequency Measurement Subsystem Implementation Using Low-cost Microcontroller”, SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), pp 1– 4, Nov. 2015.
  
- [35] B. G. M. de Oliveira, M. T. de Melo, I. Llamas-Garro, M. Espinosa-Espinosa, M. R. T de Oliveira, E. M. F de Oliveira “Integrad Instantaneous Frequency Measurement Subsystem Based on Multi-Band-Stop Filters”, Asia-Pacific Microwave Conference, pp 910 – 912, Nov. 2014.
  
- [36] Crislane P. N. Silva, E. M. F. de Oliveira, M. R. T. de Oliveira, M. T. de Melo, B. G. M. de Oliveira” New Compact Interferometer based on Fractal Concept”, SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), pp 1– 3, Nov. 2015.
  
- [37] I. Llamas-Garro, M. T. de Melo, Jung Mu Kim, “Frequency Measurement Technology”, 1. ed. London: Artech House, vol. 1, 2017.