

DESENVOLVIMENTO, SIMULAÇÃO, FABRICAÇÃO E MEDIDAÇÃO DE SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA PARA FILTRAGEM DE SINAIS 5G

Bianca Galvão Siqueira

bgs@discente.ifpe.edu.br

Sabrina Gonzaga Aleixo

sga@discente.ifpe.edu.br

Bruno Gomes Moura de Oliveira

bruno@pesqueira.pesqueira.edu.br

Lauro Rodrigo Gomes da Silva Lourenço Novo

lauro.no@ufpe.br

RESUMO

A tecnologia 5G representa um passo significativo na evolução das comunicações sem fio, ao possibilitar taxas de transmissão elevadas. Operando em faixas de frequência mais altas, conhecidas como ondas milimétricas, o 5G enfrenta desafios adicionais relacionados à propagação do sinal, uma vez que essas ondas são suscetíveis a interferências, perdas por reflexão e absorção em diferentes meios. Nesse contexto, o uso de filtros torna-se essencial para garantir a integridade dos sinais e o desempenho eficiente dos sistemas de comunicação, atuando na rejeição ou passagem seletiva de determinadas faixas de frequência e contribuindo para a melhoria da qualidade do sinal. O presente Trabalho de Conclusão de Curso teve como objetivo desenvolver, simular, fabricar e medir duas Superfícies Seletivas de Frequência (FSSs), projetadas para atuar como filtros rejeita-faixa e passa-faixa na frequência de 3,5 GHz, uma das bandas destinadas à operação do sinal 5G. A metodologia empregada baseou-se em pesquisa bibliográfica e modelagem eletromagnética por meio de simulações no software Ansys HFSS. Os resultados obtidos evidenciaram que a FSS rejeita-faixa apresentou capacidade satisfatória de rejeição para o sinal na frequência de 3,5 GHz, sendo promissora para aplicações em blindagem eletromagnética, enquanto a FSS passa-faixa demonstrou excelente transmissão para a mesma frequência, indicando potencial para o aprimoramento do ganho em antenas inteligentes. De modo geral, as simulações e medições, mostraram concordância entre si, comprovando a viabilidade das FSSs, reforçando a sua aplicabilidade no contexto das comunicações 5G e oferecendo contribuições relevantes para futuras pesquisas e desenvolvimentos tecnológicos.

Palavras-chave: FSSs. Tecnologia 5G. Dispositivos de micro-ondas. Ansys FSSs. Rejeita-faixa. Passa-faixa

ABSTRACT

5G technology represents a significant step in the evolution of wireless communications by enabling high transmission rates. Operating in higher frequency bands, known as millimeter waves, 5G faces additional challenges related to signal propagation, since these waves are susceptible to interference, reflection losses, and absorption in different media. In this context, the use of filters becomes essential to ensure signal integrity and the efficient performance of communication systems, acting in the selective rejection or transmission of specific frequency bands and contributing to the improvement of signal quality. The present Undergraduate Thesis aimed to develop, simulate, fabricate, and measure two Frequency Selective Surfaces (FSSs), designed to operate as band-stop and band-pass filters at 3.5 GHz, one of the frequency bands allocated for 5G signal operation. The methodology employed was based on bibliographic research and electromagnetic modeling through simulations using the Ansys HFSS software. The obtained results showed that the band-stop FSS exhibited satisfactory rejection capability at the 3.5 GHz frequency, proving to be promising for applications in electromagnetic shielding, while the band-pass FSS demonstrated excellent transmission at the same frequency, indicating potential for enhancing the gain of smart antennas. Overall, the simulations and measurements showed agreement with each other, confirming the feasibility of the FSSs, reinforcing their applicability in the context of 5G communications, and offering relevant contributions for future research and technological developments.

Keywords: FSSs. 5G technology. Microwave devices. Ansys FSSs. Band-stop . Band-pass

1 INTRODUÇÃO

Após a invenção do rádio a comunicação pelo espaço aberto se intensificou. Ao longo do tempo, a crescente demanda por comunicação sem fio e de alta velocidade impulsionou o desenvolvimento de tecnologias de radiofrequência (RF, do inglês *Radio Frequency*) e micro-ondas (do inglês *microwave*), tornando essencial o uso de dispositivos capazes de controlar e manipular sinais eletromagnéticos. Dentre essas tecnologias destacam-se as Superfícies Seletivas de Frequência (FSSs, do inglês *Frequency Selective Surfaces*), estruturas que permitem a filtragem de sinais eletromagnéticos, são capazes de responder a inúmeras frequências, destacam-se pelo baixo custo e facilidade de fabricação, e são amplamente utilizadas em diversas aplicações. (SILVA, C. P. d. N., 2016)

Os filtros são elementos fundamentais em dispositivos de micro-ondas, pois permitem a passagem ou rejeição seletiva de determinadas faixas de frequência. Um filtro ideal teria um comportamento perfeito, permitindo ganho constante para as frequências desejadas ou rejeição total de frequências. No entanto, na prática, a obtenção de um filtro ideal é improvável devido a limitações físicas e de projeto.

Sabendo disso, as FSSs surgem como uma alternativa viável para essa necessidade, permitindo o desenvolvimento de filtros eficientes e com características bem definidas. Elas podem ser projetadas para atuar como filtros espaciais para ondas

eletromagnéticas, podendo ser do tipo passa-baixa, passa-alta, passa-faixa ou rejeita-faixa, dependendo de sua estrutura e princípio de funcionamento. Isso possibilita uma gama de aplicações, como controle de interferências, sistemas de antenas, radomes, foguetes, mísseis, aviões, blindagem eletromagnética, sensoriamento remoto, papel de parede bloqueador de sinais de redes sem fio e aplicações em tecnologia *stealth* (ou furtiva), capaz de se camuflar eletromagneticamente tornando-se virtualmente invisível a radares e sensores. (FERREIRA, 2016)

Somente após a Segunda Guerra Mundial os avanços tecnológicos relacionados às comunicações móveis foram impulsionados. Em paralelo a essas evoluções tecnológicas, outra tecnologia móvel padronizada internacionalmente vem crescendo, a tecnologia 5G, que atualmente é voltada às categorias de Banda Larga Móvel Aprimorada (eMBB, do inglês *Enhanced Mobile Broadband*), Comunicações Massivas do Tipo Máquina (mMTC, do inglês *Massive Machine-type Communications*) e Comunicações Ultra-Confiáveis e de Baixa Latência (URLLC, do inglês *Ultra-reliable and Low Latency Communications*) que são necessárias para desenvolver um conjunto completo de serviços em setores como segurança pública, telemedicina, educação à distância, cidades inteligentes e automação industrial e agrícola relacionadas a Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*).

Apesar da amplificação acelerada do 5G, existem algumas divergências relacionadas a essa expansão, como a possível interferência do 5G em radares altimétricos usados na aviação, isso acontece devido o espectro de frequências utilizadas nessa comunicação sem fio ser próximo do espectro de frequência dos radares altimétricos, o que acarretaria em possíveis interferências e vem causando preocupações em países da América do Norte e Ásia. As frequências mais utilizadas pela tecnologia 5G variam de país para país, geralmente estão inclusas na faixa sub-6 GHz. No Brasil o espectro de funcionamento do 5G geralmente é de 700 MHz, 2,3 GHz, 3,5 GHz e 26 GHz. Apesar da faixa de frequência próxima a 3,5 GHz (entre 3,3 GHz e 3,7 GHz) e a faixa de frequência dos radares altimétricos serem próximas, há uma banda de proteção (chamada de banda de guarda) de 500 MHz. (PERIQUITO, 2025)

Tendo em vista a relevância dessas tecnologias, as FSSs operando nas principais frequências do sinal 5G garantem o desempenho, otimização e eficiência relacionados à filtragem e direcionamento de sinais.

1.1 Objetivo Geral

Desenvolver, simular, fabricar e medir duas FSSs com características distintas operando na faixa de frequências sub-6 GHz do sinal 5G, com o intuito de criar filtros de micro-ondas eficientes para a rejeição ou absorção seletiva dessa frequência.

1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver e simular duas FSSs utilizando o *software Ansys HFSS* (do inglês *High Frequency Structure Simulator*) para avaliar sua eficiência como filtro rejeita-faixa (FSS1) e filtro passa-faixa (FSS2).

- Fabricar FSSs do tipo FSS1 e FSS2 utilizando materiais e técnicas adequadas de prototipação, visando o testes das FSSs e validação.
- Medir e avaliar a eficiência da FSS1 e da FSS2.

1.3 Principais Aplicações

Filtro rejeita-faixa - blindagem de sinais eletromagnéticos em instituições prisionais e hospitais. Em instituições prisionais visando impedir a comunicação ilegal, e em hospitais tendo em vista a proteção de equipamentos eletrônicos sensíveis. Filtro passa-faixa - aumento da diretividade de antenas inteligentes (do inglês *smart antennas*).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste tópico serão abordados os principais conceitos utilizados para elaboração, funcionamento e experimento do dispositivo analisado nesse Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). A literatura acerca da teoria eletromagnética é bem vasta, Sadiku (2003) afirma que a existência de ondas eletromagnéticas prevista pelas equações de Maxwell, foi investigada previamente por Heinrich Hertz onde após inúmeros cálculos e experimentos, Hertz obteve sucesso na detecção e geração de ondas de rádio, e depois disso, Guglielmo Marconi aplica os conceitos de Hertz e desenvolve o rádio.

A engenharia de micro-ondas é fundamentada principalmente nas equações de Maxwell, as quais descrevem os fenômenos e ondas eletromagnéticas. Essas equações relacionam campos elétricos, campos magnéticos, densidade de carga, correntes e são capazes de descrever como campos elétricos e magnéticos são formados e suas interações. Sem esse estudo não seria possível compreender as leis de circuitos como as leis de Ohm, as leis de Kirchhoff e o funcionamento de muitos dispositivos importantes para a Engenharia Elétrica e para a humanidade (KRAUS; CARVER, 1973).

De forma simplificada serão abordados os seguintes conceitos: Filtros Passivos, Caracterização e Dispositivos de Micro-ondas, Superfícies Seletivas de Frequência, Linhas de Transmissão (LTs), Linhas de Transmissão de Microfita, e Parâmetros de Espalhamento que comumente são representados pela Matriz S (do inglês *Scattering*).

2.1 Filtros Passivos

Filtros eletrônicos são essenciais para diversos sistemas e aplicações, desde sistemas de áudio até equipamentos médicos. A escolha de um bom filtro depende muito de sua aplicação. São conjuntos de componentes, cujo intuito é reduzir ou ampliar uma determinada faixa de frequência de um sistema. Pela ótica de Boylestad (2014), circuitos ressonantes são um arranjo de elementos passivos, tais quais: resistor (R), indutor (L) e capacitor (C) que possuem uma resposta em uma frequência característica.

Os filtros passivos, como o próprio nome informa, utilizam componentes passivos R , L e C que manipulam sinais elétricos de acordo com suas características. Não utilizam alimentação externa, e não produzem ganho de potência. Isso porque R é responsável pela dissipação de energia transformando energia em calor; L conserva

energia em forma de campo magnético, e C armazena energia em forma de campo elétrico. Esses componentes não produzem energia extra, apenas manipulam a energia recebida.

Todavia, filtros quando constituídos com componentes eletrônicos necessitam de conectores ou cabos, e são totalmente dependentes de seus componentes. Para seu bom funcionamento, todos os elementos precisam estar em perfeito estado. Geralmente são suscetíveis a problemas de resposta em circuitos extensos, e costumam ser robustos ou volumosos.

2.2 Caracterização e Dispositivos de Micro-ondas

Em consonância com Ribeiro (2008) e Pozar (2021), o termo micro-ondas é geralmente usado para distinguir frequências entre 3 e 300 GHz, com um comprimento de onda elétrico correspondente entre $\lambda = 100$ mm e $\lambda = 1$ mm, respectivamente. Sinais com comprimentos de onda na ordem de milímetros são frequentemente chamados de ondas milimétricas. O comprimento de onda é a distância que uma onda eletromagnética percorre em um ciclo (360°).

A Figura 1 mostra o espectro eletromagnético que engloba as micro-ondas. Designações populares como *ondas longas*, *ondas médias*, *ondas curtas*, são embasadas de acordo com o comprimento de onda.

Na maioria dos casos, os comprimentos de onda são calculados considerando a onda propagando-se apenas no vácuo ou no ar. A Equação 1, equação fundamental das ondas eletromagnéticas, é habitualmente utilizada para calcular o comprimento de onda (λ).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

c: Velocidade da luz no vácuo (aproximadamente $3 * 10^8$ m/s)

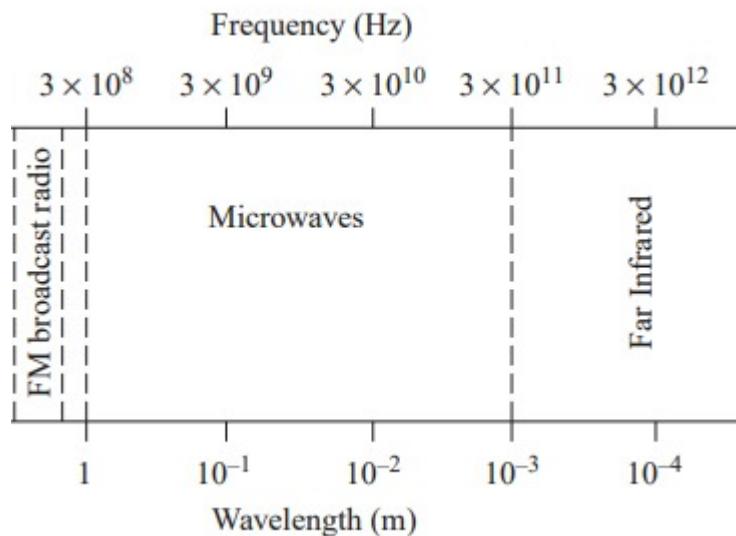
f: Frequência de onda em hertz

λ : Comprimento de onda em metros

No Brasil, segundo a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) a faixa de frequências atribuídas à banda S (do inglês *Super High Frequency* SHF) abrange de 3 GHz a 30 GHz e está inserida na faixa de frequências de micro-ondas.

Dentro da banda podemos identificar as frequências sub-6 GHz, que são as frequências comumente utilizadas pela tecnologia 5G. A faixa de frequência mais utilizada e considerada ideal para o sinal 5G, usada por operadoras em todo o mundo é a frequência de 3,5 GHz.

Figura 1 – Espectro eletromagnético



Fonte: Adaptado de Pozar (2021).

Vale salientar que:

O 5G, por sua vez, é uma tecnologia móvel padronizada internacionalmente, cujo serviço no Brasil é regulamentado pela Resolução ANATEL nº 477/2007, que disciplina o Serviço Móvel Pessoal (SMP). Trata-se de um sistema operado em espectro licenciado, com estações radiobase (ERBs), reuso de frequência, obrigações de cobertura, qualidade e continuidade de serviço.(LIMA, 2025)

A tecnologia de micro-ondas é empregada em múltiplas áreas, desde a comunicação sem fio, indústria até à medicina. Dispositivos de micro-ondas são sistemas que operam dentro da faixa de frequências de micro-ondas e fazem uso dessa tecnologia. Devido à sua capacidade de transportar altas quantidades de dados com pouquíssima interferência, são fundamentais.

Existem aplicações industriais e médicas que fazem uso do aquecimento mediante micro-ondas. Um dispositivo comumente utilizado em numerosos lares para aquecer alimentos é o forno de micro-ondas, que utiliza uma fonte de alta potência, o vazamento de radiação deve ser mínimo para evitar exposição dessa radiação nociva ao usuário. O magnetron, o guia de onda de alimentação e a cavidade do forno devem ser cuidadosamente blindados, bem como, a porta do forno demanda atenção especial, visando a segurança. Outro sistema conhecido mundialmente e muito importante que utiliza tecnologia micro-ondas é o Sistema de Posicionamento Global (GPS) (do inglês *Global Positioning System*), ferramenta fundamental em diversas áreas.

Uma das maneiras de verificar o comportamento dos circuitos de micro-ondas é relacionar as variáveis de entrada e de saída dos componentes, por possuir elevadas

frequências, na maioria dos casos são utilizadas como parâmetros de verificação os parâmetros S, que serão elucidados posteriormente.

2.3 Superfícies Seletivas em Frequência (FSS)

2.3.1 Atributos

Em contrapartida aos filtros eletrônicos, o uso das FSSs como filtro é promissor, pois, não requer o uso de conectores que possuem altas perdas (com o aumento da frequência), não necessitam ser conectadas fisicamente a outros dispositivos para operar e podem, fazendo uso de superfícies mais maleáveis, ser fabricadas para estruturas que apresentem curvatura ou outras geometrias.

São filtros espaciais, dado que interagem diretamente com ondas eletromagnéticas no espaço, seu desempenho não depende somente da frequência, depende também do ângulo e da polarização da onda incidente. Geralmente são constituídas por uma camada metálica composta de arranjos periódicos impressos sobre um substrato dieletrico de uma única camada ou múltiplas camadas (LUCENA et al., 2017).

2.3.2 Princípio de Funcionamento

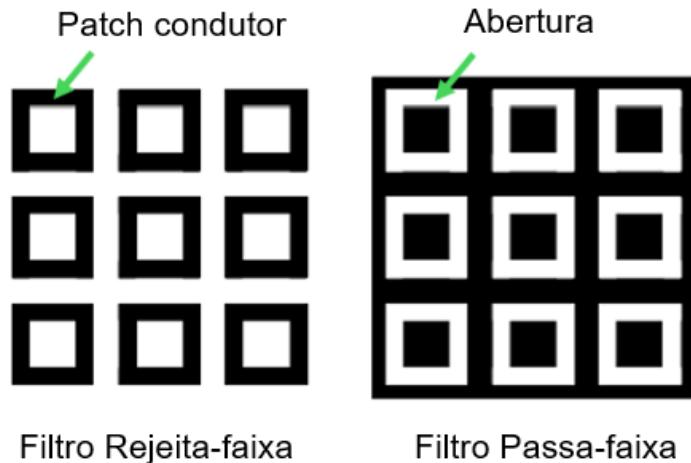
Em conformidade com Maurício Weber Benjo da Silva (2014), Oliveira (2018) e Lucena (2018) as FSSs podem ser projetadas para atuar como filtros do tipo rejeita-faixa ou passa-faixa, dependendo de sua estrutura e do princípio de funcionamento. Comumente nos sistemas de comunicações, os filtros são usados para permitir a passagem de frequências que contêm as informações desejadas e rejeitar as frequências remanescentes. Um filtro rejeita-faixa: É definido como um circuito projetado para bloquear sinais em uma determinada faixa de frequência. Enquanto o filtro passa-faixa é definido como um circuito projetado para permitir a passagem de sinais de uma determinada faixa de frequência. Os dois filtros compõem um par complementar (NETO, 2022).

As FSSs podem ser estruturadas em elementos capacitivos ou indutivos. Se a superfície for disposta por arranjos de elementos condutores, conhecida como *patch* condutor é considerada capacitiva e atua como um filtro rejeita-faixa como mostra a Figura 2, seu comportamento será de reflexão total para a faixa de frequência definida.

Por outro lado, se a superfície for disposta por elementos em abertura ou fenda (do inglês *slot*), ou seja, arranjos não condutores em superfície metálica, são indutivas e seu comportamento é de um filtro passa-faixa como mostra a Figura 2, e exibirão transmissão total. Assim dizendo, a frequência escolhida atravessa a estrutura com perdas mínimas e as frequências que se encontram fora da faixa escolhida são ignoradas.

A aplicação mais conhecida das FSSs talvez seja o anteparo da porta do forno de micro-ondas. Este anteparo funciona como um filtro passa-faixa que deixa passar a faixa de frequência da luz visível e rejeita a faixa de micro-ondas. (CAMPOS, 2009)

Figura 2 – Estruturas



Fonte: Adaptado de Munk (2005) apud Maurício Weber Benjo da Silva (2014).

2.3.3 Geometria

A geometria e design da FSSs devem ser escolhidos de acordo com o objetivo das aplicações de projeto, na literatura há uma variedade de pesquisas com abundantes formas de elementos. Para o autor Munk (2000), apud Campos (2009) a divisão de elementos pode ser realizada em quatro grupos como mostra a Figura 3:

- Grupo 1: Polos conectados pelo centro;
- Grupo 2: Espiras;
- Grupo 3: Elementos de interior sólido;
- Grupo 4: Combinações diversas.

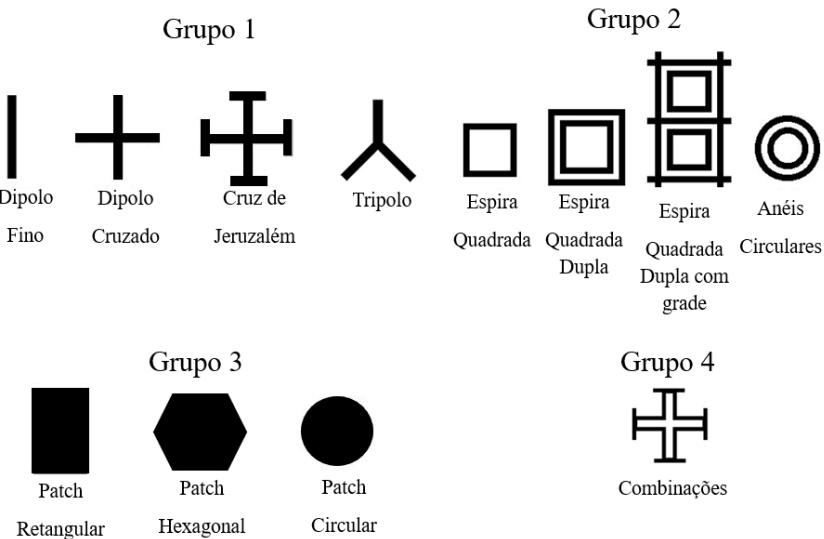
Para escolha da geometria mais adequada deve ser analisado o nível de estabilidade angular, nível de polarização cruzada, nível de separação da banda (maior largura de banda e menor largura de banda), condutividade dos elementos, substrato que sustenta a estrutura, ângulo de incidência da onda e dimensões da FSS.(FERREIRA, 2016)

As características de reflexão e transmissão são dependentes da geometria, da dimensão dos elementos condutores, do espaçamento e do substrato utilizado, com os parâmetros definidos corretamente o comportamento da FSS pode ser obtido.

A Tabela 1 apresenta a comparação de desempenho entre as diferentes geometrias analisadas. Os parâmetros avaliados foram estabilidade angular, polarização cruzada, maior banda e menor banda. A escala de classificação varia de A a D, sendo: A – Ótimo, B – Muito bom, C – Bom e D – Regular.

A comparação de desempenho de formas geométricas mostrou que a espira quadrada, pertencente ao grupo 2 das geometrias, apresentou um desempenho considerável e promissor, a onda não necessita estar polarizada linearmente e alinhada com os eixos das fitas para seu bom funcionamento.

Figura 3 – Geometrias



Fonte: Adaptado de Munk (2000), apud Campos (2009).

Tabela 1 – Comparação de desempenho

Geometria	Estab. Angular	Polarização Cruzada	Maior Banda	Menor Banda
Espira Quadrada	A	A	A	A
Anéis Circulares	A	B	A	A
Cruz de Jerusalém	B	C	B	B
Tripolo	C	C	C	B
Dipolo Cruzado	C	C	C	C
Dipolo	D	A	D	A

Nota: Escala de desempenho: A – Ótimo; B – Muito bom; C – Bom; D – Regular.

Fonte: Adaptado de Wu (1995), apud Silva Souza (2025).

E isso é bastante proveitoso, pois, é esperado que a FSS opere de forma adequada sob múltiplos ângulos incidentes. Dessa forma é possível a construção de filtros constituídos por grade metálica, que não sofrem do problema de dependência de polarização da fonte.

Há geometrias mais complexas como as geometrias fractais devido a sua característica de redução das dimensões de projeto, contudo, todos os detalhes gerados pela geometria fractal vêm sendo questionados.

Sabendo disso, a geometria escolhida para estudo e simulação das estruturas FSSs, foi a geometria de espira quadrada simples. Com a geometria definida o passo seguinte foi realizar o estudo das dimensões de cada uma das estruturas.

2.4 Linhas de Transmissão

Segundo Sadiku (2003) uma Linha de Transmissão (LT) em aspectos gerais resume-se a dois ou mais condutores paralelos cuja finalidade é conectar uma fonte à uma carga.

Em baixas frequências, tensão e corrente são praticamente uniformes ao longo do cabo, ou seja, as pequenas variações ao longo do fio podem ser desconsideradas. Contudo, em altas frequências, tensão e corrente não são uniformes ao longo do condutor e variações significativas precisam ser consideradas.

O condutor precisa ser tratado como linha de transmissão distribuída, utilizando impedância característica, coeficiente de reflexão e ondas estacionárias.

Para aplicações em circuitos de micro-ondas, as LTs são sistemas capazes de transmitir energia eletromagnética de uma forma dirigida de um ponto a outro em um circuito. Analisando um trecho longitudinal de uma linha de transmissão de comprimento infinitesimal Δz mostrado na Figura 4 a). Os elementos são modelados pelos parâmetros de linha C, G, L e R como indica a Figura 4 b), em que:

- C: Capacitância em paralelo por unidade de comprimento (F/m);
- G: Condutância em paralelo por unidade de comprimento (S/m);
- L: Indutância série por unidade de comprimento (H/m);
- R: Resistência série por unidade de comprimento (Ω/m).

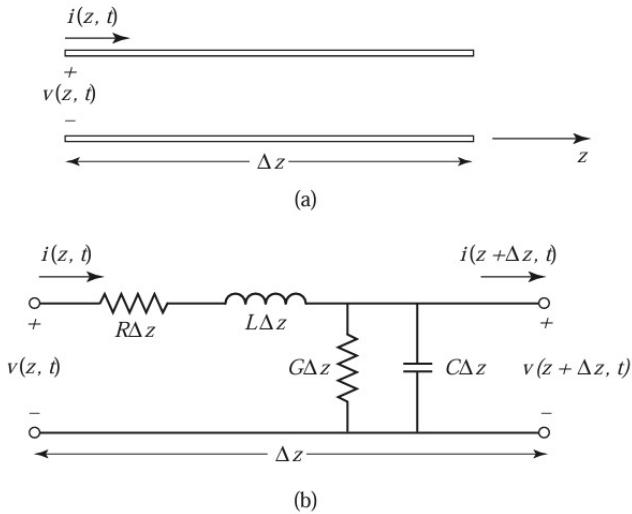
A condutância em paralelo G ocorre devido as perdas do material dielétrico entre os condutores, a indutância em série L representa a auto-indutância entre os dois condutores, a capacidade paralela C sucede devido a proximidade de dois condutores, e a resistência série R significa a resistência devido a condutividade finita dos condutores. Comumente as linhas de transmissão são consideradas linhas com perdas, devido os condutores não serem perfeitos, assim como seu dielétrico. Entretanto, em casos particulares a linha de transmissão pode ser considerada sem perdas (condutores e dielétrico ideais).

Hayt-Jr e Buck (2013) reiteram que uma linha sem perdas é aquela em que toda potência injetada na extremidade inicial da linha chega em sua extremidade final no seu devido tempo. Em linhas sem perdas ocorre que $R = 0 = G$, logo, isso é válido quando a análise é realizada em um comprimento infinitesimal Δz de linha.

O meio de propagação, ou seja, o espaço livre pode ser modelado como uma seção de linha de transmissão de impedância característica Z_0 (equivalente a 377Ω). As FSSs inseridas no meio de propagação dielétrico (nesse caso o ar) se comportam como um circuito equivalente agregado a essa linha. Fazendo manipulações algébricas de acordo com as leis de Kirchhoff de tensão e corrente, as expressões para impedância característica, tensão e corrente podem ser determinadas e são amplamente conhecidas.

À vista disso, a etapa posterior do estudo foi analisar os conceitos de linhas de transmissão de microfita e parâmetros de espalhamento conhecido também como matriz S.

Figura 4 – Linha de transmissão



Fonte: Adaptado de Pozar (2021).

2.5 Linhas de Transmissão de Microfita

Linhas de transmissão de microfita ou simplesmente microfitas (do inglês *microstrip lines* e *microstrips*) são estruturas planares de linhas de transmissão comumente utilizadas na faixa de frequência micro-ondas. De acordo com Ribeiro (2008) São estruturas compactas construídas com laminados semelhantes aos de circuito impresso, expostas a partir do início da década de 1950. Praticamente toda estrutura de transmissão para ser utilizada em circuitos de micro-ondas exige uma configuração planar, isto é, as características dos dispositivos são definidas por suas dimensões no plano, este é o caso de uma linha de transmissão de microfita sobre um determinado substrato, como mostra a Figura 5.

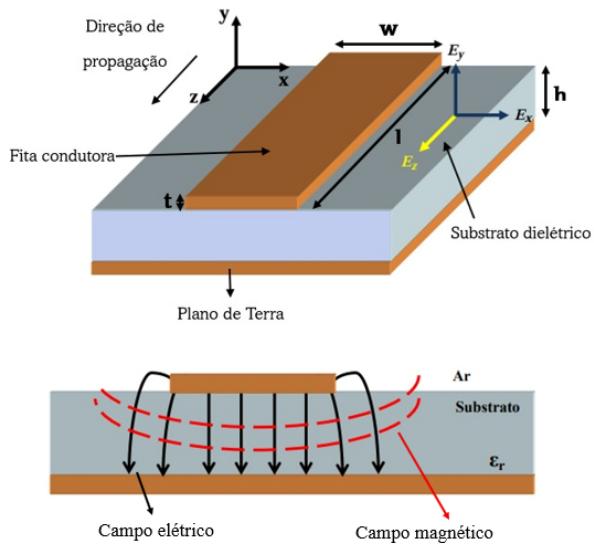
A largura da fita é expressa por "w" (determina a impedância característica da linha), a espessura do substrato é indicada por "h", a espessura do condutor é definida por "t" (normalmente esse condutor é constituído de cobre), e o comprimento da fita é expresso por "l" ou "L". Devido a estrutura da linha de microfita, o campo eletromagnético não está contido apenas no dielétrico mas também está parcialmente presente no ar que circunda a linha.

Em concordância com Oliveira (2014) a facilidade de compreensão e fabricação, bem como o conjunto de valores de impedância característica que podem ser obtidos, são favoráveis para a realização de diversos projetos de circuitos de micro-ondas, do inglês *Microwave Integrated Circuits (MICs)*.

Além disso, podem ser facilmente integradas a outros circuitos, dispositivos e elementos passivos e ativos, por serem compactas e possuírem baixo custo de fabricação. As estruturas em microfitas da Figura 5 são constituídas de dois condutores (fita e plano de terra) separados por um material dielétrico (substrato).

Somando-se a isso Pozar (2021), afirma que as linhas de transmissão que consistem em dois ou mais condutores podem suportar ondas eletromagnéticas transversais

Figura 5 – Linha de microfita



Fonte: Adaptado de Souza (2011).

(TEM) tais linhas possuem uma definição única de tensão, corrente e impedância característica e são caracterizadas pela ausência de componentes de campo longitudinais.

No entanto, nas estruturas de microfitas as componentes longitudinais dos campos elétrico e magnético apesar de serem muito menores que as componentes transversais, não são totalmente nulas. Devido a isso o modo de propagação não é puramente TEM.

Contudo, quando a amplitude da componente longitudinal dos campos elétrico e magnético é muito menor que a amplitude da componente transversal, ela pode ser desprezada. Dessa forma a teoria de análise em modo TEM pode ser aplicada. Essa aplicação é chamada de aproximação quase-TEM, e é válida para microfitas na qual os parâmetros de largura da trilha condutora (w) e a espessura do substrato (h) possuem medidas muito menores que o comprimento de onda.

Esses conceitos são importantes, pois, além de poder ser constituídas do mesmo material, FSS e microfita são muito utilizadas em diversas aplicações, uma delas é que a microfita pode ser uma via de propagação de ondas em antenas, constituindo assim uma dupla interessante para melhoria e performance de dispositivos.

2.6 Parâmetros de Espalhamento - Matriz S

Os parâmetros de espalhamento ou parâmetros S (do inglês *Scattering parameters*) são essenciais para análise de circuitos de altas frequências, servem para descrever o comportamento dos sinais eletromagnéticos ou mensurar o sinal que se propaga em dispositivos com duas ou mais portas. São determinados em termos e variáveis ondulatórias medidas nas bandas de micro-ondas, tornando assim a medição mais comprehensível quando comparada à medição de tensão e corrente que geralmente são complexas para frequências de micro-ondas. Esses parâmetros de espalhamento

relacionam as ondas incidentes com as ondas refletidas nas portas de uma rede. Para uma estrutura de micro-ondas com duas portas as ondas incidente e refletida estão relacionadas aos parâmetros S na forma matricial abaixo:

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \end{bmatrix}$$

Onde:

V_1^- e V_2^- - São respectivamente as ondas de tensão refletidas nas portas 1 e 2.

V_1^+ e V_2^+ - São respectivamente as ondas de tensão incidentes nas portas 1 e 2.

S_{11} - Reflexão na porta 1 (Entrada) Sinal entra e volta.

S_{22} - Reflexão na porta 2 (Saída) Sinal volta da saída.

S_{21} - Transmissão da porta 1 para 2 (Quando o sinal passa da entrada para a saída).

S_{12} - Transmissão da porta 2 para 1 (Quando o sinal passa da saída para a entrada).

Ou seja:

$$V_1^- = S_{11}V_1^+ + S_{12}V_2^+$$

$$V_2^- = S_{21}V_1^+ + S_{22}V_2^+$$

$$S_{11} = \left. \frac{V_1^-}{V_1^+} \right|_{V_2^+ = 0}$$

$$S_{22} = \left. \frac{V_2^-}{V_2^+} \right|_{V_1^+ = 0}$$

$$S_{12} = \left. \frac{V_1^-}{V_2^+} \right|_{V_1^+ = 0}$$

$$S_{21} = \left. \frac{V_2^-}{V_1^+} \right|_{V_2^+ = 0}$$

Os parâmetros de espalhamento revelam como a energia eletromagnética é transmitida ou refletida por uma estrutura quando uma onda incide sobre ela.

3 METODOLOGIA

O plano de ação desse estudo iniciou-se com a pesquisa bibliográfica exploratória, que teve como objetivo agregar literatura bibliográfica e estudos anteriores sobre filtros, FSSs e a tecnologia 5G. Nessa fase, foram levantados artigos científicos, livros e trabalhos relacionados aos temas centrais do estudo, etapa essencial para fundamentar teoricamente o desenvolvimento do projeto. Essa etapa contribuiu para definir lacunas de pesquisa e direcionar o desenvolvimento um modelo que atenda aos requisitos de frequência, largura de banda e eficiência de transmissão e rejeição desejados.

A partir disso, foram definidos os filtros de interesse (rejeita-faixa e passa-faixa), considerando suas aplicações e possíveis implementações no âmbito das comunicações 5G. A relação entre 5G, filtros e FSSs permitiu estabelecer os parâmetros de projeto que foram a base para as simulações realizadas.

Em seguida, na etapa de simulação, os modelos propostos foram analisados através do software Ansys HFSS. Essa etapa foi muito importante para validar o comportamento dos filtros e avaliar os parâmetros de reflexão (S_{11}) e transmissão (S_{21}). O processo de simulação foi repetido e ajustado até atingir uma resposta válida, isto é, conforme os requisitos de desempenho esperados.

Uma vez validado, o dispositivo seguiu para as etapas de fabricação e testes experimentais, onde o protótipo foi construído e avaliado fisicamente. O presente trabalho adotou uma abordagem aplicada, articulando levantamento bibliográfico, simulações computacionais e validação.

A Figura 6 mostra as macroetapas que compuseram o processo metodológico desse trabalho.

A metodologia foi dividida nas seguintes etapas:

- Levantamento e análise de trabalhos anteriores relacionados ao tema, busca em bases de dados específicas, seleção de artigos relevantes e análise crítica dos resultados permitindo identificar lacunas existentes e fundamentar as escolhas de projeto.
- Validação das simulações no software Ansys HFSS, onde foram realizadas várias simulações no computador do laboratório Maker do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE - Campus Pesqueira) com *patches* unitários de medidas e dimensões já fixadas em trabalhos anteriores, isso foi primordial para a construção de simulações concretas de forma correta.
- Fabricação do modelo proposto.
- Medições e análises do modelo.

De acordo com a literatura, o comprimento de onda (λ) e a frequência (f) são inversamente proporcionais, isto é, a medida que a frequência aumenta, o comprimento de onda diminui e vice-versa. Isso foi comprovado também através das simulações.

Figura 6 – Fluxograma 1



Fonte: Próprio dos autores.

Após as simulações de trabalhos já consolidados serem realizados e seus resultados comprovados, as análises de dimensões para os *patchs* e *slots* desse estudo foram realizadas.

Iniciou-se simulando os *patchs* rejeita-faixa, observou-se que quanto maiores o comprimento do substrato e da espira quadrada, menor era a frequência de rejeição, e o oposto também foi identificado.

Após essa análise foram encontradas as melhores dimensões para o protótipo, foram aplicadas então as análises para os *slots* passa-faixa. Por fim, os resultados simulados e experimentais foram comparados para confirmar a eficiência e a viabilidade da proposta desenvolvida.

Com os dados encontrados nas simulações foram realizadas comparações com alguns cálculos já consolidados na literatura.

Cálculos:

O comprimento de onda λ é calculado utilizando-se a Equação 1 exibida na seção anterior. Aplicando-se a frequência $f = 3,5$ GHz obtém-se:

$$\lambda = \frac{3 * 10^8}{3,5 * 10^9}$$

$$\lambda = 0,085714m = 85,714mm$$

Porém, o cálculo acima considera a onda propagando-se somente no ar (ou no vácuo). Apesar do cálculo acima estar correto, para análise do protótipo o substrato dielétrico também deve ser considerado, com isso a permissividade elétrica relativa (ou constante dielétrica relativa) do substrato ϵ_r e a permissividade relativa do ar devem ser utilizadas nos cálculos, pois, o campo não está confinado somente dentro do substrato, está em ambos os meios.

Abaixo estão alguns símbolos e seus respectivos significados para melhor compreensão do trabalho:

- Permissividade elétrica relativa do substrato: ϵ_r
- Permissividade relativa do ar : 1
- Tangente de perdas do dielétrico (ou do substrato): $\tan \delta$
Em uma microfita mede a quantidade de energia que o material dielétrico (isolante) absorve e dissipa do sinal. Isso indica que, quanto maior a tangente de perdas, maior a dissipação de energia e a perda de sinal, em frequências mais altas como as de micro-ondas, isso é extremamente relevante
- Espessura do substrato: h
- Espessura da camada de cobre sobre o substrato: t
- Gap ou espaçamento externo: g
- Trilha (*patch* ou abertura/*slot*): w
- Decibéis: dB

O espaçamento ou *gap* (g) entre *patches* e aberturas/*slots* é importante para a evitar erros de fabricação, e permite boa estabilidade angular.

O substrato considerado neste trabalho foi o substrato FR4 (do inglês *Fiberglass*) devido suas propriedades de resistência térmica, baixa absorção de umidade, resistência mecânica e estabilidade, mostrando excelentes propriedades físicas e bom custo benefício permitindo testes reais; Com espessura h de 1 mm e de 1,53 mm, $\tan \delta = 0,002$ e $\epsilon_r = 4,4$

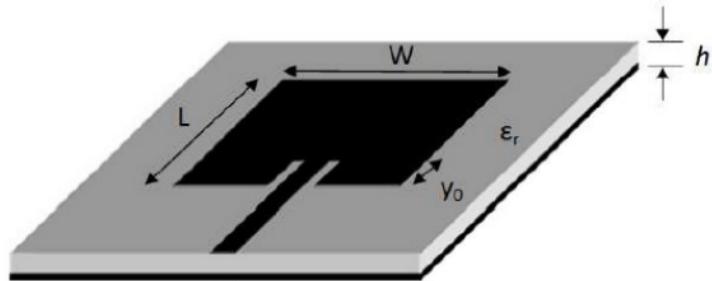
Antenas e FSSs são estruturas diferentes, no entanto possuem algumas características semelhantes. Em harmonia com Balanis (2016) aberturas ou *slots* retangulares são comumente empregadas em antenas, inclusive é uma das mais aplicadas à antenas de micro-ondas.

Chatterjee e Parui (2015) afirmam que, o comprimento de abertura em uma antena (de abertura ou fenda) determina sua primeira frequência de ressonância, e essas fendas irradiam como um dipolo de meia onda, onde seu comprimento equivale à metade do comprimento de onda correspondente à frequência de ressonância.

De acordo com Costa et al. (s.d.) o ajuste de frequências de ressonância é possível pela técnica de inserção de fendas em antenas do tipo *patch* retangular. Esse tipo de antena pode ser visto na Figura 7.

Sabe-se que o comprimento da abertura em uma antena pode determinar sua primeira frequência de operação e essa análise foi empregada às dimensões das FSSs.

Figura 7 – Antena *patch* quadrado



Fonte: Adaptado de Costa et al. (s.d.).

Após serem encontradas as simulações que demonstraram melhor comportamento, fizeram-se necessárias as devidas apurações técnicas.

Neste estudo a frequência de operação em análise foi a frequência de 3,5 GHz, mas as dimensões e comprimento exato da espira quadrada não eram conhecidos matematicamente. Logo, algumas equações foram utilizadas para realização de comparações, entre as simulações realizadas em software com os devidos cálculos.

Investigar e comparar o comportamento e dimensões das espiras quadradas simuladas, com os resultados obtidos através dos cálculos, fez com que as dimensões das FSSs pudessem ser refinadas e otimizadas. Com a obtenção de protótipos bem elaborados e sólidos, futuras fabricações, medições e testes são possivelmente realizáveis.

Análise I:

- Equação do Comprimento de Onda (C) por Chatterjee e Parui (2015):

$$C = \frac{c}{2f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} = \frac{3 * 10^8}{2(3,5 * 10^9) \sqrt{\frac{4,4 + 1}{2}}} = 26,08 \text{ mm} \quad (2)$$

- Equação da Permissividade Elétrica Efetiva Simples (ϵ_{eff}):

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} = \frac{4,4 + 1}{2} = 2,7 \quad (3)$$

O parâmetro ϵ_{eff} é utilizado em eletromagnetismo, microfita, antenas e FSSs. Indica o valor intermediário entre a permissividade elétrica relativa do substrato e a permissividade relativa do ar.

De acordo com os estudos das literaturas bibliográficas observa-se esse valor também na equação abaixo:

- Equação do Comprimento de Onda Guiado em Linha de Microfita (λ_g):

$$\lambda_g = \frac{\lambda(mm)}{\sqrt{\varepsilon_{eff1}}} = \frac{85,714}{\sqrt{2,7}} = 52,164\text{mm} \quad (4)$$

Ao dividir o valor de λ_g por 2 encontra-se o mesmo valor de C por Chatterjee e Parui (2015).

$$C = \frac{\lambda_g}{2} = \frac{52,164}{2} = 26,082\text{mm} \quad (5)$$

De acordo com a literatura o valor do comprimento de onda C pode ser considerado a melhor medida para as dimensões da espira quadrada.

Visando a otimização do protótipo e com a finalidade de alcançar dimensões exatas, o comprimento (C) considerado para as comparações foi de 26 mm, esse valor corresponde apenas aos lados da espira quadrada.

Utilizando a permissividade efetiva simples, a análise de Chatterjee e Parui (2015) e equação de Bragg ocorreu a confirmação do valor da frequência desejada.

- Equação da Frequência de Ressonância de Bragg (fr):

$$C=L_1=26 \text{ mm ou seja } 0,026\text{m}$$

$$fr = \frac{c}{2L_1\sqrt{\varepsilon_{eff1}}} = \frac{3 * 10^8}{2(0,026)\sqrt{2,7}} = 3,5 * 10^9 = 3,5GHz \quad (6)$$

Análise II:

- Permissividade Efetiva de Um Linha de Microfita - Hammerstad e Jensen (1975):

$$\varepsilon_{eff2} = \frac{\varepsilon_r + \varepsilon_0}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W}\right)^{-1/2} + 0,004 \left(1 - \frac{W}{h}\right)^2 \quad (7)$$

Devido a espira ser do tipo quadrada $W = 26 \text{ mm}$ foi considerado.

$$\varepsilon_{eff2} = \frac{4,4 + 1}{2} + \frac{4,4 - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{0,001}{0,026}\right)^{-1/2} + 0,004 \left(1 - \frac{0,026}{0,001}\right)^2 = 6,606$$

Comprimento da espira quadrada em metros: $W = 0,026 \text{ m}$

Espessura do substrato em metros: $h = 0,001 \text{ m}$

- Equação de Correção do Comprimento Efetivo (ΔL)

$$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(\varepsilon_{eff2}) + 0,3)(\frac{W}{h} + 0,264)}{(\varepsilon_{eff2}) - 0,258)(\frac{W}{h} + 0,8)} \quad (8)$$

$$\frac{\Delta L}{0,001} = 0,412 \frac{(6,606) + 0,3)(\frac{0,026}{0,001} + 0,264)}{(6,606) - 0,258)(\frac{0,026}{0,001} + 0,8)}$$

$$\frac{\Delta L}{0,001} = 0,4393 \Rightarrow \Delta L = 0,0004393m$$

Essa equação representa o prolongamento elétrico devido as bordas irradiantes do *patch* segundo as definições de antenas presentes na literatura.

As bordas irradiantes são definidas como duas extremidades opostas ao *patch* onde ocorre a emissão real de ondas eletromagnéticas, a radiação tende a "fugir" para o espaço.

- Equação do Comprimento Físico (L)

$$L = \frac{c}{2fr\sqrt{\varepsilon_{eff2}}} - \Delta L \Rightarrow \frac{3 * 10^8}{2(3,5 * 10^9)\sqrt{6,606}} - 0,0004393 = 0,01624m \quad (9)$$

Frequência de ressonância $fr = 3,5$ GHz

- Equação do Comprimento Efetivo (L_{eff})

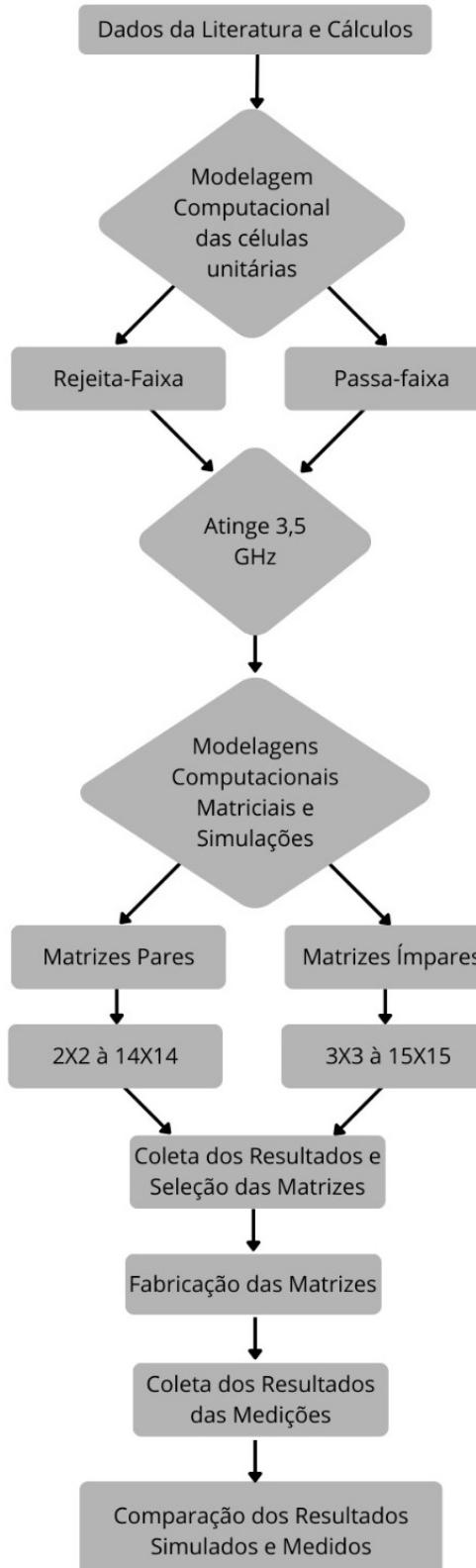
$$L_{eff} = L + 2\Delta L \Rightarrow 0,01624 + 2(0,0004393) = 0,01712m \quad (10)$$

A **Análise II** mostra que para as espiras quadradas (*patch* e *slot*) os valores de comprimento e largura seriam de 26 mm e 17,12 mm respectivamente, porém, o objetivo desse trabalho foi a obtenção de uma espira quadrada de comprimento e largura idênticos, considerou-se então apenas os valores da **Análise I** com alguns ajustes.

Nas simulações foi imprescindível considerar os parâmetros de trilha (w), gap (g) e substrato (h), uma vez que eles influenciam grandemente no comportamento da simulação e do dispositivo como um todo. Feito isso, através das comparações verificou-se que o comprimento calculado da espira quadrada foi de 26 mm e o melhor comprimento para obtenção da frequência de 3,5 GHz na simulação foi de 22 mm, valor muito próximo do comprimento calculado.

A Figura 8 simplifica a metodologia realizada.

Figura 8 – Fluxograma 2



Fonte: Próprio dos autores.

3.1 Validação do modelo proposto

Com base nos dados apresentados em estudos anteriores, foram realizadas simulações com o objetivo de validar o modelo proposto. A modelagem e simulação das FSSs realizou-se através do software Ansys HFSS na versão estudantil, uma ferramenta amplamente utilizada para análise eletromagnética 3D.

A máquina utilizada atendeu aos requisitos mínimos e recomendações feitas pelo software, com memória RAM maior que 16GB, processador mínimo de Intel Core i7 de 6^a geração e múltiplos núcleos (8 ou mais).

Esse software permite a resolução ideal para a simulação de dispositivos eletricamente menores e com geometrias complexas. Através do Método de Elementos Finitos (FEM) o software divide a estrutura em elementos finitos menores (tetraedros) e aplica as equações de Maxwell a cada elemento, para assim obter uma solução detalhada e precisa do comportamento das ondas eletromagnéticas.

Foram realizados vários testes com a geometria do tipo espira quadrada, as frequências obtidas foram comparadas com as referências utilizadas em artigos, dissertações de mestrado e teses de doutorado já consolidados. Os *patches* e *slots* unitários simulados atingiram a frequência exata de seus respectivos trabalhos analisados. Deste modo, após a análise comparativa dos resultados, constatou-se que o software apresentou valores compatíveis com o esperado. Portanto, o modelo foi então considerado válido, permitindo avanços para as demais etapas deste estudo.

3.2 Simulação computacional

Com base nos dados obtidos na revisão da literatura, o dispositivo foi modelado e submetido a simulações, a inserção das dimensões, materiais e parâmetros do dispositivo foram incluídos no software, em seguida a execução das simulações foi realizada para observação do comportamento. Para atingir a frequência de ressonância desejada de 3,5 GHz nas simulações, foram necessárias múltiplas simulações alterando os valores de trilha (*w*), gap (*g*) e substrato (*h*) de cada *patch* e *slot*.

Após alguns testes executados para o *patch* rejeita-faixa e o *slot* passa-faixa unitários, fixou-se o valor do comprimento do substrato como 26 mm no software e os demais parâmetros citados anteriormente foram alterados, e em cada alteração seu comportamento foi observado.

De início, as primeiras simulações foram realizadas de forma unitária, somente quando as melhores dimensões de espiras unitárias ressoando na frequência mais próxima a 3,5 GHz foram encontradas, montou-se então as configurações de forma matricial, composta por matrizes ímpares e matrizes pares, vistas na Tabela 2.

Tabela 2 – Estrutura Matricial

Matrizes ímpares	3x3	5x5	7x7	9x9	11x11	13x13	15x15
Matrizes Pares	2x2	4x4	6x6	8x8	10x10	12x12	14x14

Fonte: Próprio dos autores.

Para rejeita-faixa e passa-faixa, a montagem de forma matricial foi efetuada com a finalidade de refinar a frequência de ressonância e obter estruturas maiores e viáveis para as fabricações. Os resultados das simulações foram gerados através do software em formato de gráficos que serão apresentados na seção de resultados e análises.

3.2.1 Tempo de simulação

Ao simular os *patch* e *slot* unitários o tempo de duração da simulação observado foi de aproximadamente 10 minutos para cada simulação rejeita-faixa e em torno de 14 minutos para cada simulação passa-faixa, no entanto, quando a configuração unitária foi alterada para matricial as durações de tempo das simulação aumentaram, em termos comparativos isso pode ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3 – Duração de tempo das simulações das matrizes rejeita-faixa

Matrizes ímpares	3x3	5x5	7x7	9x9	11x11	13x13	15x15
Tempo	30 min	45 min	1h e 35 min	2h	-	-	-
Matrizes pares	2x2	4x4	6x6	8x8	10x10	12x12	14x14
Tempo	25 min	35 min	1h e 20 min	1h e 50 min	-	-	-

Fonte: Próprio dos autores.

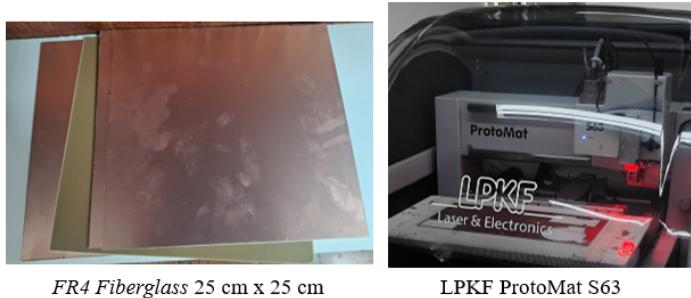
O mesmo ocorreu com as matrizes passa-faixa. Nas simulações realizadas através do software verificou-se que, nas matrizes do tipo rejeita-faixa a simulação ocorreu normalmente até a matriz 9x9.

Todavia, nas matrizes do tipo passa-faixa a simulação ocorreu normalmente apenas até a matriz 5x5, não sendo possível simular as demais matrizes devido a limitações do software e grande demanda de dados, vale ressaltar que a faixa de frequência utilizada no software para simulações foi de 1GHz até 10GHz. Para apurar os resultados das matrizes que faltaram, as simulações foram realizadas em parceria com o Laboratório de Inovação em Micro-ondas (LIM), do Departamento de Eletrônica e Sistemas (DES), da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), em Recife.

3.3 Fabricação dos dispositivos

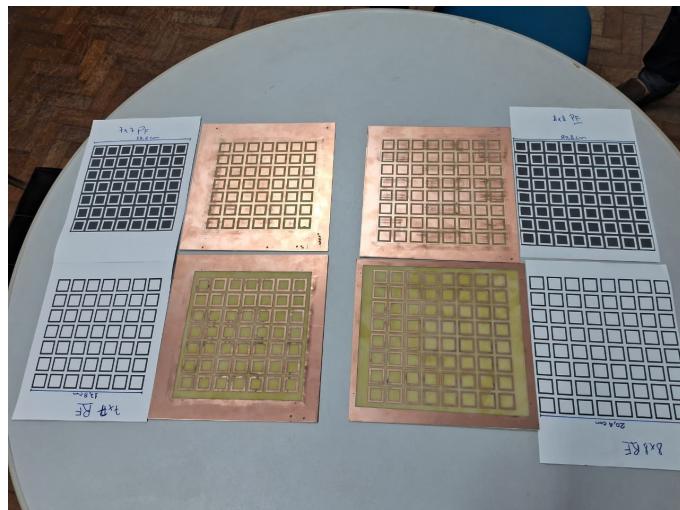
Verificou-se que as simulações com as matrizes 7x7 e 8x8 obtiveram excelentes valores de rejeição e passagem de frequência em 3,5 GHz. Visando o não desperdício de substrato e também devido seus bons resultados, ambas estruturas matriciais apresentaram-se promissoras para fabricação. Após a validação, a escolha de técnicas de fabricação adequadas foram analisadas. Para a construção dos protótipos foi utilizado o método de prototipagem mecânica por subtração metálica, através do equipamento LPKF ProtoMat Circuit Board Plotter S63. Esse método remove material metálico de uma superfície com uma ferramenta de corte rotativa chamada fresa, criando formas, superfícies planas, contornos complexos ou furos.

Figura 9 – Fotografias da etapa de fabricação das FSSs



Fonte: Próprio dos autores.

Figura 10 – Fotografia das FSSs fabricadas (matrizes 7x7 e 8x8)



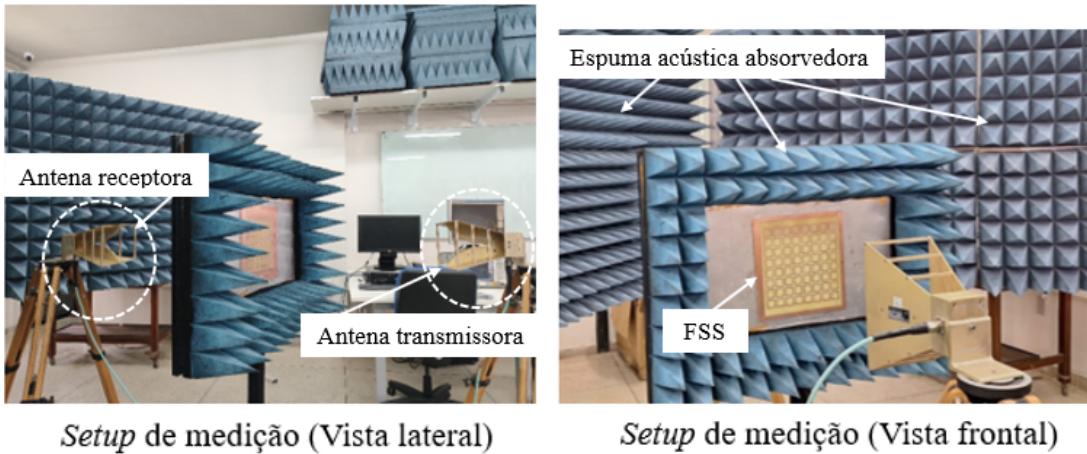
Fonte: Próprio dos autores.

O substrato escolhido foi o substrato *Fiberglass FR4* de camada única com revestimento de cobre como mostra a Figura 9. Os protótipos Figura 10 foram construídos em parceria com o LIM da UFPE onde as FSSs foram confeccionadas e com o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB - Campus João Pessoa) que foi responsável pela disponibilização das placas *Fiberglass FR4*. Após a verificação da integridade estrutural as FSSs foram submetidas a testes e medições.

3.4 Testes e medições experimentais

Por fim, os protótipos foram submetidos a testes experimentais e coleta de dados para verificação de desempenho. Os dispositivos foram submetidos a testes de verificação no laboratório do Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado (GTEMA) situado no IFPB - Campus João Pessoa.

Figura 11 – Fotografias da configuração experimental para as medições



Fonte: Próprio dos autores.

O espaço laboratorial observado na Figura 11 possui revestimento parcial 3D aneacóico acústico, projetado para absorver ondas eletromagnéticas e ondas sonoras, proteger o ambiente interno de sinais eletromagnéticos intrusivos e impedir a emissão de ondas exteriores, simulando um espaço aberto de dimensão infinita eliminando reflexões e ruídos externos.

O revestimento é composto por uma espuma acústica específica caracterizada por sua geometria piramidal. A antena utilizada na medição foi a antena do tipo corneta (*Double Ridge Guide Horn Antenna*), modelo SAS-571 de 700 MHz a 18GHz. O Analisador de Rede Vetorial (VNA) utilizado foi o modelo E5071C, que mede parâmetros de rede (como parâmetros S) para caracterizar o desempenho de componentes eletrônicos, e também analisa e testa componentes de RF (Rádio Frequência) e circuitos.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Apresentação dos resultados

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos a partir das simulações, cálculos e medições efetuados.

Os dados das Tabela 4 e Tabela 5 mostram os melhores dados atingidos para a faixa frequência de 3,5 GHz, para o passa-faixa unitário e para o rejeita-faixa unitário simulados, como visto na Figura 12.

Os modelos virtuais das matrizes 7x7 e 8x8 escolhidas podem ser vistos nas Figura 13 e Figura 14. As simulações realizadas expuseram que os protótipos apresentaram frequência de ressonância 3,5 GHz.

Tabela 4 – Dados utilizados para espira *slot* passa-faixa

<i>h</i> (mm)	<i>g</i> (mm)	<i>w</i> (mm)	<i>L</i> (mm)
1	2	3	22

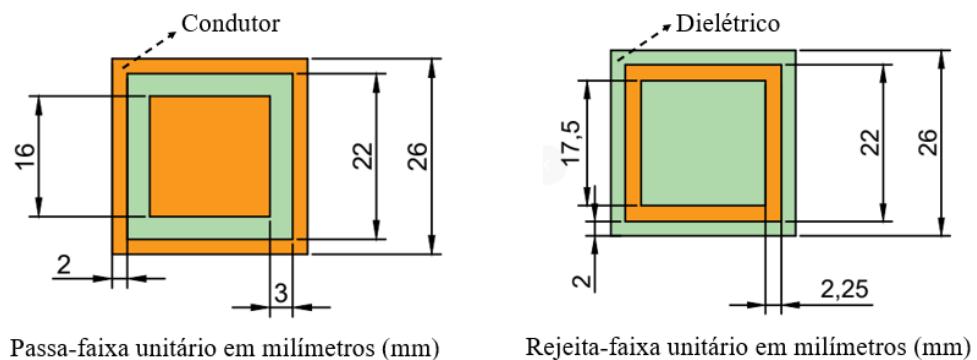
Fonte: Próprios dos autores.

Tabela 5 – Dados utilizados para espira *patch* rejeita-faixa

<i>h</i> (mm)	<i>g</i> (mm)	<i>w</i> (mm)	<i>L</i> (mm)
1	2	2,25	22

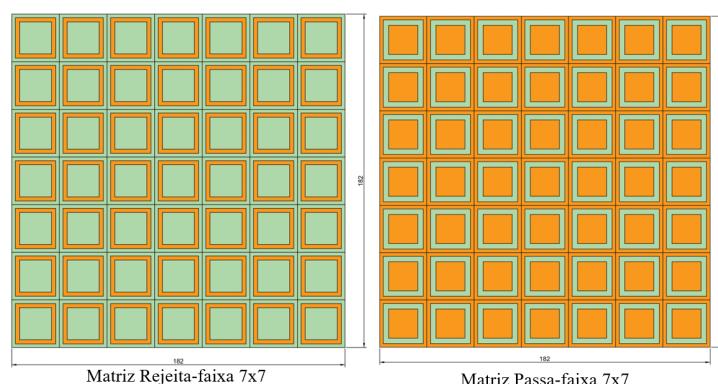
Fonte: Próprios dos autores.

Figura 12 – Estruturas unitárias



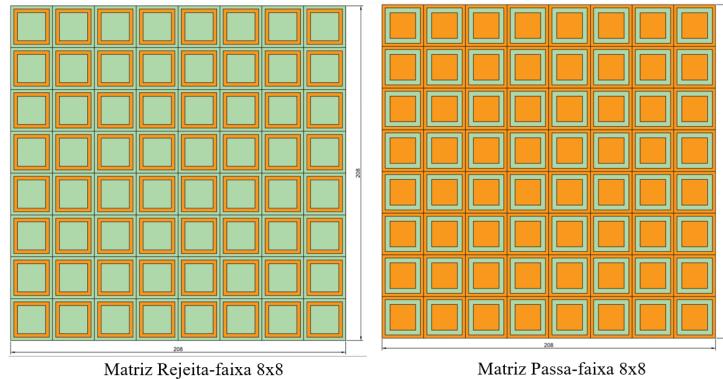
Fonte: Próprio dos autores.

Figura 13 – Estrutura matricial 7x7



Fonte: Próprio dos autores.

Figura 14 – Estrutura matricial 8x8



Fonte: Próprio dos autores.

Utilizando os dados principais do *patch* e *slot* unitários, as estruturas matriciais foram montadas com a finalidade de observar seu comportamento e verificar parâmetros gráficos. Todas as estruturas matriciais simuladas atingiram a frequência desejada de 3,5 GHz.

Os resultados das simulações, cálculos e medições foram confrontados com as referências da literatura, padrões e resultados, com isso foi possível assegurar que o modelo proposto mostrou-se confiável e representa corretamente o dispositivo e possui boa resposta em cenário real.

Demonstrando assim consistência, confiabilidade e aplicabilidade dos modelos.

4.2 Análise e discussão dos resultados

Através dos resultados das simulações foi possível gerar os gráficos em parâmetros S, verificar suas interações eletromagnéticas e obter os resultados numéricos vistos nas Tabela 6 e Tabela 7.

Com isso os gráficos de reflexão e transmissão das estruturas foram verificados, essa análise foi essencial para validar as FSSs. O *software* mostra os parâmetros S em decibéis (dB), essa escala logarítmica facilita a verificação das grandes variações de potência.

A Tabela 8 apresenta os dados utilizados para a interpretação das figuras mostradas posteriormente, as quais exibem os gráficos gerados por meio da simulação no *software* e medição.

Através da simulação foi possível verificar o comportamento das *Floquet Ports* expostas no gráfico, que mostram como uma onda incidente é refletida S_{11} e transmitida S_{21} na estrutura. Na medição foi possível verificar apenas o comportamento de S_{21} . Percebeu-se que os parâmetros (S_{21}) simulados das estruturas mantiveram-se dentro dos comportamentos esperados e muito próximos dos parâmetros (S_{21}) medidos. As análises realizadas evidenciaram a consistência entre os dados simulados e medições, demonstrando a eficácia da metodologia adotada.

Os gráficos de medição e simulação do filtro passa-faixa, apresentados nas Figura 15 e Figura 16 indicam bons resultados. E também os gráficos de medição e simulação dos filtros rejeita-faixa, observados nas Figura 17 e Figura 18, mostram resultados satisfatórios.

Tabela 6 – Resultados de simulação das FSSs rejeita-faixa. Bandas de frequências e frequência central @-20 dB.

Matrizes ímpares	ΔF	f_0
3x3	3.47 a 3.6430	3.5650
5x5	3.4414 a 3.6159	3.5333
7x7	3.5017 a 3.7114	3.5967
9x9	3.4383 a 3.6315	3.5333
11x11	3.2483 a 3.85	3.5333
13x13	3.2483 a 3.8817	3.5650
15x15	3.2483 a 3.8817	3.5650
Matrizes pares	ΔF	f_0
2x2	3.4832 a 3.6803	3.5967
4x4	3.4935 a 3.7778	3.6283
6x6	3.2483 a 3.8817	3.5650
8x8	3.4383 a 3.6851	3.5333
10x10	3.2800 a 3.831c5	3.5333
12x12	3.2336 a 3.8567	3.5650
14x14	3.2602 a 3.8817	3.5650

Fonte: Próprios dos autores.

Tabela 7 – Resultados de simulação das FSSs passa-faixa. Bandas de frequências e frequência central @-20 dB.

Matrizes ímpares	ΔF	f_0
3x3	3.4096 a 3.5220	3.4687
5x5	3.3250 a 3.5350	3.4300
7x7	3.4300 a 3.6550	3.5350
9x9	3.3100 a 3.5350	3.4150
11x11	3.2950 a 3.5050	3.4000
13x13	3.3250 a 3.5350	3.4300
15x15	3.3100 a 3.5200	3.4150
Matrizes pares	ΔF	f_0
2x2	3.4300 a 3.5500	3.4900
4x4	3.3550 a 3.5350	3.4600
6x6	3.3219 a 3.5050	3.4150
8x8	3.2800 a 3.5500	3.3850
10x10	3.5250 a 3.5200	3.4150
12x12	3.3100 a 3.5255	3.4000
14x14	3.3046 a 3.5050	3.4150

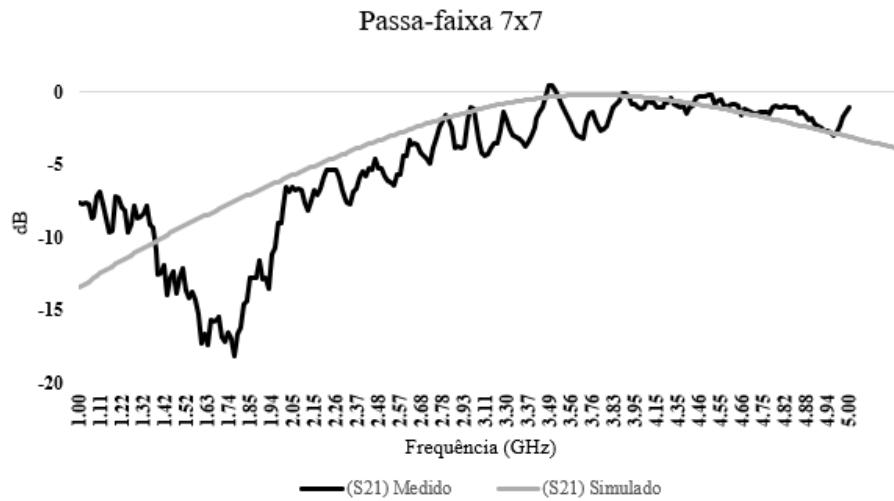
Fonte: Próprios dos autores.

Tabela 8 – Dados para interpretação gráfica

dB	Potência refletida/transmitida	Reflexão (S_{11})	Transmissão (S_{21})
0	100%	Reflexão total	Transmissão total
-3	50%	Reflexão de metade	Transmissão de metade
-10	10%	Reflexão de 1/10	Transmissão de 1/10
-20	1%	Transmissão parcial	Bloqueio parcial
-30	0,1%	Transmissão Plena	Bloqueio Pleno

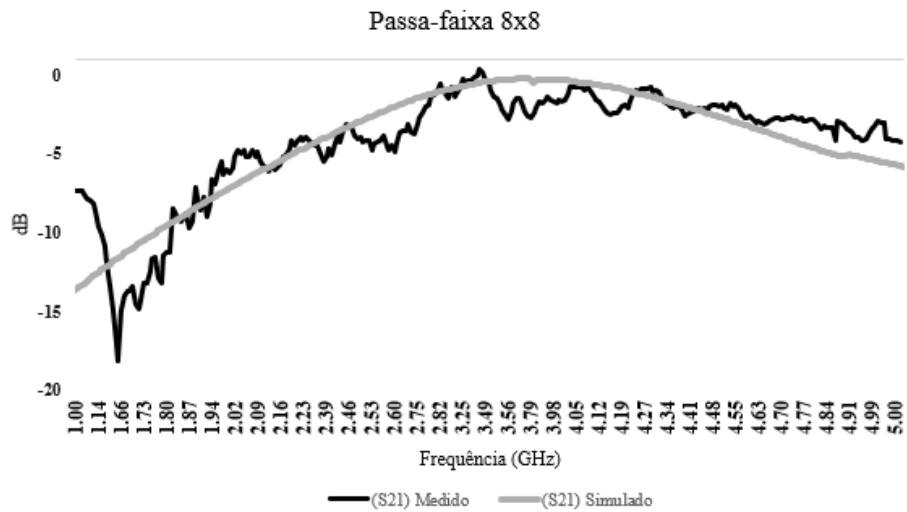
Fonte: Próprios dos autores.

Figura 15 – Gráfico comparativo entre simulação e medição das estruturas matriciais 7x7 passa-faixa



Fonte: Próprio dos autores.

Figura 16 – Gráfico comparativo entre simulação e medição das estruturas matriciais 8x8 passa-faixa

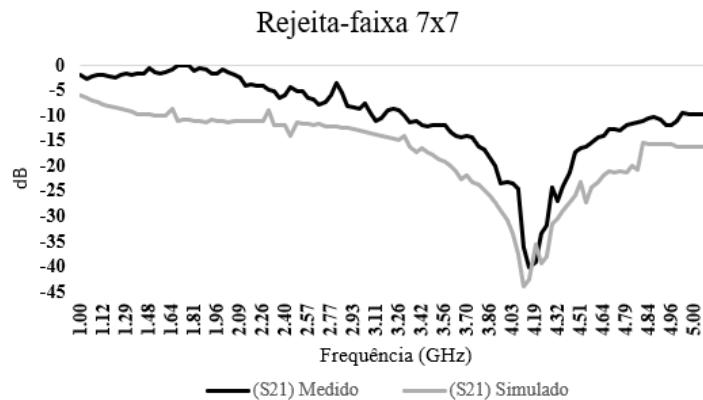


Fonte: Próprio dos autores.

É possível verificar um deslocamento de frequência no gráfico da Figura 17. A frequência de ressonância indicada foi de aproximadamente 4 GHz, esse deslocamento foi ocasionado pelas imperfeições inerentes ao processo de fabricação das estruturas.

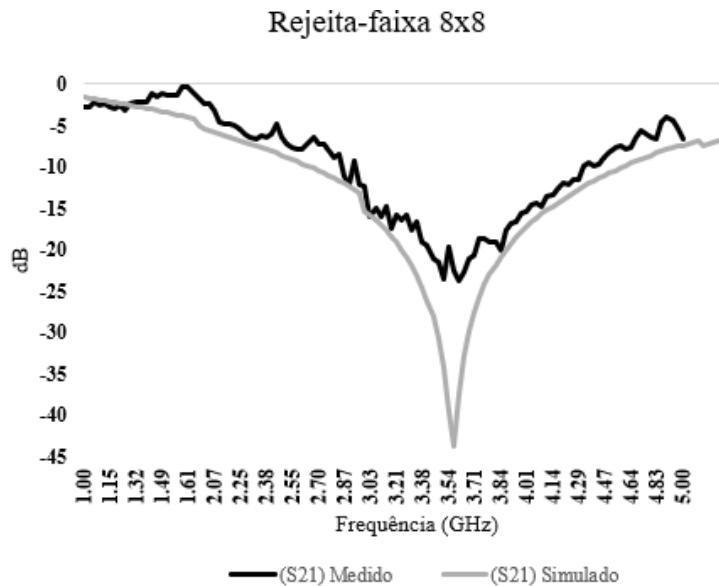
A geometria dessa FSS, em particular, não apresentou precisão milimétrica absoluta, resultando em pequenos desvios dimensionais. Tais variações, embora de baixa magnitude, já haviam sido previstas previamente nas simulações realizadas no software.

Figura 17 – Gráfico comparativo entre simulação e medição das estruturas matriciais 7x7 rejeita-faixa



Fonte: Próprio dos autores.

Figura 18 – Gráfico comparativo entre simulação e medição das estruturas matriciais 8x8 rejeita-faixa



Fonte: Próprio dos autores.

Diante dos resultados obtidos, comprovou-se que os objetivos propostos neste estudo foram plenamente alcançados, observou-se que os dispositivos apresentam bom desempenho, a eficiência dos filtros garante que as especificações desejadas sejam atendidas.

Desse modo, os resultados alcançados confirmam a viabilidade da proposta apresentada, além de fornecer subsídios relevantes para investigações futuras e possíveis aprimoramentos do estudo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propôs a simulação, medição e viabilidade de dois filtros de micro-ondas, o estudo demonstrou desempenho estável e comportamento compatível com o esperado, atendendo aos requisitos de projeto.

Constatou-se que a metodologia aplicada permitiu obter dispositivos funcionais e confiáveis, contribuindo para o avanço de estudos na área.

Como trabalhos futuros, propõe-se a otimização do projeto, investigação de novos materiais, aprimoramento do desempenho e análise do circuito equivalente das estruturas. Bem como, a submissão deste estudo ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da UFPE na área de Fotônica e Eletrônica e ao Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica que ocorrerá no ano de 2026. Este trabalho gerou a submissão de artigo científico intitulado *Band-pass and Band-stop Filters by Frequency Selective Surfaces for 3.5 GHz-5G* à IEEE Latin American Conference on Antennas and Propagation (LACAP 2026) que será realizada nos dias 25 a 28 de fevereiro de 2026 na cidade de Natal-RN com o intuito de divulgar os resultados e promover o avanço do conhecimento com a comunidade científica. (LABORATÓRIO DE MICRO-ONDAS, UFPE, 2025)

6 AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE - Campus Pesqueira) pelo apoio institucional e pela infraestrutura disponibilizada ao longo do curso, que foram fundamentais para o desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso.

Outrossim, agradecemos a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) pelo apoio através do acesso a laboratórios, software e recursos tecnológicos, isso foi essencial para o desenvolvimento das atividades de pesquisa e para o aprofundamento dos conhecimentos adquiridos ao longo desse estudo.

Além disso, agradecemos ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB - Campus João Pessoa) por viabilizar o acesso ao instituto e registramos também nossos agradecimentos ao Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado (GTEMA), pela disponibilização dos recursos tecnológicos, estrutura laboratorial e pelo ambiente de pesquisa que contribuíram de forma essencial para a realização das medições e análises deste trabalho.

Reconhecemos a importância do ambiente acadêmico, que favoreceu o aprendizado, a pesquisa e o aprimoramento profissional, contribuindo de forma significativa para nossa formação.

REFERÊNCIAS

BALANIS, Constantine A. **Antenna theory: analysis and design**. [S.I.]: John wiley & sons, 2016.

BOYLESTAD, Robert L. **Introdução à Análise de Circuitos**. 12. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014. ISBN 978-85-7605-942-3.

- CAMPOS, Antonio Luiz Pereira de Siqueira. **Superfícies Seletivas em Frequência: Análise e Projeto**. 1. ed. Natal, RN, Brasil: IFRN Editora, 2009. P. 199. Inclui rotinas em MATLAB. ISBN 978-85-89571-47-0.
- CHATTERJEE, Ayan; PARUI, Susanta Kumar. Gain enhancement of a wide slot antenna using a second-order bandpass frequency selective surface. **Radioengineering**, v. 24, n. 2, p. 455–461, 2015.
- COSTA, Jefferson et al. Ajuste das Frequências de Ressonâncias de Antenas Patch Retangular pela Técnica de Inserção de Fendas. **Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais**.
- FERREIRA, Hillner. **Matrioska: uma proposta de geometria para FSS multibandas**. 2016. Diss. (Mestrado).
- HAYT-JR, William H.; BUCK, John A. **Eletromagnetismo**. 8. ed. São Paulo: McGraw-Hill Brasil, 2013. ISBN 978-85-8055-153-2.
- KRAUS, John D.; CARVER, Keith R. **Electromagnetics**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1973. ISBN 978-0070353961.
- LABORATÓRIO DE MICRO-ONDAS, UFPE. **Superfícies Seletivas em Frequência**. [S.I.: s.n.], 2025. <https://sites.ufpe.br/laboratoriomicroondas/pesquisa-e-desevolvimento/superficies-seletivas-em-frequencia/>. Acesso em 15 jul. 2025.
- LIMA, Rogério Moreira. **5G não é 5 GHz**. [S.I.: s.n.], maio 2025. Artigo no site da ABTelecom. Acessado em 2025-06-09. Disponível em: <<https://abtelecom.org.br/site/5g-nao-e-5ghz/>>.
- LUCENA, Francisco Ariaildo CS et al. Gain enhancement of dual-band antenna using square loop FSS. In: IEEE. 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. [S.I.: s.n.], 2017. P. 2169–2170.
- LUCENA, Francisco Ariaildo da Costa Sá. **Superfícies seletivas em frequência como superstrato para aumento de ganhos em antenas**. Jul. 2018. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil. Tese (Doutorado) – Programa de Pós – Graduação em Engenharia Elétrica.
- MUNK, Ben A. **Frequency selective surfaces: theory and design**. [S.I.]: John Wiley & Sons, 2005.
- NETO, José Jaime Guimarães Peixoto. **Superfícies Seletivas em Frequência do tipo Absorve/Transmite Banda Larga**. Set. 2022. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN, Brasil. Defesa: 18 de setembro de 2022. Orientador: Prof. Dr. Antonio Luiz Pereira de Siqueira Campos.
- OLIVEIRA, Bruno Gomes Moura de. **Integração de descriminadores de frequência para sistemas IFM**. 2014. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco.
- OLIVEIRA, Manuelle Regina Tavares de. **Filtro reconfigurável baseado em RFSS tipo dipolo cruzado e grade**. 2018. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.
- PERIQUITO, Mauro. **É possível o 5G interferir nos radares altimétricos dos aviões?** [S.I.: s.n.], 2025. LinkedIn (post). Acessado em: 21 de agosto de 2025.

- POZAR, David M. **Microwave engineering: theory and techniques**. [S.I.]: John wiley & sons, 2021.
- RIBEIRO, José Antônio Justino. **Engenharia de Microondas: Fundamentos e Aplicações**. 1. ed. São Paulo: Editora Érica, 2008. ISBN 978-85-365-0209-0.
- SADIKU, Matthew N. O. **Elementos de Eletromagnetismo**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2003. ISBN 978-8536302751.
- SILVA, Crislane Priscila do Nascimento. Interferômetros baseados na geometria fractal de Hilbert, 2016.
- SILVA, Maurício Weber Benjo da. **Superfícies Seletivas em Frequências – FSS: Concepção e Projeto de Absorvedores Planares de Micro-ondas para Aplicação em WLAN, WiMax e Radar**. 2014. Tese de Doutorado – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, SP, Brasil.
- SILVA SOUZA, Juliete da. **Desenvolvimento de um Absorvedor Inspirado na Forma de *Oxalis tetraphylla* Utilizando Metassuperfície e Superfície Seletiva em Frequência**. 2025. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, PB, Brasil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
- SOUZA, Sérgio Romero Oliveira de. **Modelamento de dispositivos de micro-ondas utilizando algoritmos genéticos**. 2011. Diss. (Mestrado) – UFPE.