

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
DE COMPUTAÇÃO



Sistema Vestível para Reconhecimento de Gestos em Libras com Base em Superfície Seletiva de Frequência

João Guilherme Domingos de Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Valdemir Praxedes da Silva Neto

Coorientador: Prof. Dr. Adaildo Gomes D'Assunção

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN (área de concentração: Teoria Eletromagnética) como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica e de Computação.

Natal, RN, agosto de 2025

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Oliveira, João Guilherme Domingos de.

Sistema vestível para reconhecimento de gestos em libras com base em superfície seletiva de frequência / João Guilherme Domingos de Oliveira. - 2025.

137f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Natal, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Valdemir Praxedes da Silva Neto.

Coorientação: Prof. Dr. Adaildo Gomes D'Assunção.

1. Superfície seletiva em frequência. 2. Reconhecimento de gestos estáticos. 3. Dispositivo têxtil. I. Silva Neto, Valdemir Praxedes da. II. D'Assunção, Adaildo Gomes. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 004

Sistema Vestível para Reconhecimento de Gestos em LIBRAS com Base em Superfície Seletiva de Frequência

João Guilherme Domingos de Oliveira

Tese de Doutorado apresentada em 01 de agosto de 2025 para banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Valdemir Praxedes da Silva Neto (orientador) DCO/UFRN

Prof. Dr. Adaildo Gomes D'Assunção (co-orientador) DCO/UFRN

Prof. Dr. Antonio Luiz Pereira de Siqueira Campos (Interno) DCO/UFRN

Prof. Dr. Gutemberg Soares da Silva (Externo ao Programa) DCO/UFRN

Prof. Dr. Adaildo Gomes D'assunção Júnior (Externo à instituição) IFPB

Prof. Dr. Alfredo Gomes Neto (Externo à instituição) IFPB

Dedico este trabalho à memória do meu sogro, Amadeu Inácio da Costa, in memoriam.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, à minha mãe, por ser meu exemplo de esforço, esperança e resiliência. Seu carinho incondicional e os conselhos oferecidos ao longo dessa caminhada foram fundamentais. Essa conquista é, sem dúvida, nossa.

À minha tia Fátima Domingos, que, mesmo distante fisicamente, esteve sempre presente por meio de palavras de apoio, carinho e incentivo. Sua presença, ainda que à distância, foi essencial para que eu pudesse concluir mais essa etapa.

Ao meu orientador, Valdemir, expresso minha mais sincera gratidão. Seus ensinamentos foram decisivos durante toda a jornada, mas foi o seu lado humano que tornou o processo mais leve e enriquecedor. Levo comigo não apenas a formação de um orientado, mas a construção de uma grande amizade.

Ao meu coorientador, Adaildo Gomes D'Assunção, meu profundo reconhecimento. Seu exemplo como profissional, pesquisador e ser humano sempre me inspirou a buscar excelência em tudo o que faço. Sua influência foi determinante nas escolhas acadêmicas e profissionais que trilhei.

Agradeço ao meu irmão Antônio, às minhas irmãs Amanda e Angélica, ao meu cunhado André Elias e aos meus queridos sobrinhos João André e Joaquim, por todo o apoio, presença e carinho, especialmente nos momentos mais difíceis. A João André, em especial, deixo um agradecimento afetuoso: sua amizade e companheirismo foram preciosos, seu tio se orgulha imensamente do homem que você está se tornando.

Aos amigos da pós-graduação, agradeço pela parceria, apoio e troca constante de aprendizados ao longo dessa jornada. Cada contribuição foi importante para o desenvolvimento deste trabalho.

À minha esposa, companheira de vida, melhor amiga e eterna namorada, Hevelyn Dayana, minha gratidão sem medidas. Sua paciência, compreensão, apoio e amor foram

a base que sustentou cada passo deste percurso. Sem você, nada disso seria possível.

Por fim, registro aqui um agradecimento especial, *in memoriam*, ao meu sogro, Amadeu Inácio da Costa. Durante todo o meu doutorado, seu reconhecimento diante de cada pequena conquista foi uma fonte constante de motivação. Tenho plena certeza de que o trabalho aqui desenvolvido te enche de orgulho. Levar esse sentimento comigo é uma das maiores honras desta caminhada.

Lista de Abreviaturas e Acrônimos

ADS (*Advanced design system*).

AR Realidade aumentada (*Augmented Reality*).

CNN Redes neurais Convolucionais (*Convolutional Neural Network*).

dB Decibel, unidade logarítmica usada para expressar razão de potência ou intensidade.

dtex Unidade de medida utilizada para expressar a finura de fibras têxteis.

ECM Método do circuito equivalente (*Equivalent Circuit Model*).

EM Eletromagnético.

FDTD Método das diferenças finitas no Domínio do Tempo (*finite-difference time domain*).

FEM Método dos elementos finitos (*finite-element method*).

FSS Superfície seletiva de frequência (*Frequency Selective Surface*).

GHz Gigahertz.

HFSS 3D electromagnetic high-frequency simulation software.

Libras Língua Brasileira de Sinais.

MHz Megahertz.

MIMO Sistema de Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas (*Multiple Input, Multiple Output*).

MoM Método dos momentos (*Method of Moments*).

OTDR Reflectômetro Digital no Domínio do Tempo.

RF Radiofrequência.

RSL Revisão Sistemática da Literatura.

S21 Parâmetro de espalhamento que representa a transmissão do sinal.

Tx Método simplificado para descrição de antena/sistema receptor(a).

Tx Método simplificado para descrição de antena/sistema transmissor(a).

UWB Banda ultra-larga (*Ultra Wideband*).

VNA Analisador de Redes Vetorial (Vector Network Analyzer).

WCIP Método Iterativo das Ondas(*Wave Concept Iterative Procedure*).

WLAN Rede local sem fio (*Wireless Local Area Network*).

Lista de Figuras

3.1	Representação de uma FSS do tipo <i>patch</i> retangular.	26
3.2	Representação do comportamento de uma onda EM ao incidir sobre uma FSS com arranjo do tipo <i>patch</i>	27
3.3	Representação da resposta de quatro tipos de FSS.	28
3.4	Classificação das FSS de acordo com o seu tipo.	30
3.5	Grupos de geometrias de elementos: (a) Grupo 1; (b) Grupo 2; (c) Grupo 3; (d) Grupo 4.	31
3.6	Comparação do desempenho de 4 tipos de estruturas de FSS.	32
3.7	Diagrama do método de medição de uma FSS no espaço livre.	36
3.8	Diagrama do método de medição de uma FSS utilizando guia de ondas.	38
3.9	Representação gráfica das ondas incidentes e refletidas utilizadas na formulação do método iterativo das ondas.	40
3.10	Modelagem por circuito equivalente e suas principais considerações: fitas condutoras paralelas de espessura desprezível, ângulo de incidência da onda TEM e circuito equivalente: a) incidência TE; b) incidência TM.	42
3.11	FSS aplicada como sensor de temperatura: a) geometria da célula unitária; b) protótipo contruído da FSS; c) Circuito equivalente; d) resultados medidos do coeficiente de transmissão para diferentes temperaturas.	45
3.12	FSS utilizad como sensor de temperatura: a) geometria da célula unitária; b) protótipo construído da FSS e setup de medição; c) resultados medidos para 5 tipos diferentes de líquidos.	47

3.13	FSS aplicada como sensor de deformação: a) geometria da célula unitária e sua evolução; b) protótipo contruído original e após aplicado 50% de deformação. c) resultados medidos para 5 tipos diferentes de deformação percentual.	48
4.1	Principais técnicas encontradas na literatura aplicadas ao reconhecimento de gestos manuais.	51
4.2	Nuvem de palavras gerada a partir de artigos seminais sobre reconhecimento de gestos manuais (tamanho proporcional à frequência lexical). . .	54
4.3	<i>TreeMap</i> dos artigos retornados na base de dados <i>Web Of Science</i>	56
4.4	Distribuição do número de publicações por ano.	57
4.5	Distribuição do número de publicações por periódico.	58
4.6	Distribuição do número de publicações por tópico baseado no método de aquisição.	59
4.7	FSS aplicada como sensor de gestos: a) diagrama esquemática do <i>setup</i> de medições. b) protótipo construído. c) Variação da atenuação para diferentes gestos manuais.	60
4.8	Método proposto para o reconhecimento de gestos a partir de uma etiqueta de microfita sem chip totalmente têxtil integrada em uma luva.	61
4.9	FSS aplicada como sensor de gestos: a) resposta de resistência normalizada da FSS para 5 diferentes ângulos do dedo indicador. b) resposta de resistência normalizada da FSS c) vista superior das luvas utilizadas para detecção.	63
5.1	Fluxograma da metodologia desenvolvida neste trabalho.	65
5.2	Evolução da geometria proposta, resultados simulados para a polarização TE.	68
5.3	Geometria final e suas principais dimensões.	69
5.4	Estrutura do circuito equivalente simplificado da geometria proposta: a) elementos indutivos e capacitivos; b) circuito equivalente simplificado proposto.	70

5.5	Geometria proposta no ambiente de simulação (HFSS).	72
5.6	Topologia do circuito equivalente no ambiente de simulação (ADS). . . .	73
5.7	Resultados simulados para dois métodos de análise: a) método de onda completa; b) método do circuito equivalente.	74
5.8	Resultados simulados para mudança na polarização da FSS em relação a onda EM incidente.	75
5.9	Resultados simulados para mudança no ângulo da onda EM incidente para a polarização TE.	76
5.10	Materiais empregados na prototipagem da estrutura proposta: a) visão frontal do material dielétrico; b) visão lateral do material dielétrico; c) imagem ampliada do material condutor utilizado; d) zoom do filamento do fio metálico usado na prototipagem.	78
5.11	Protótipo construído: a) representação gráfica da metodologia de preenchimento; b) protótipo da FSS têxtil.	79
5.12	<i>Setup</i> de medição utilizado, método do espaço livre.	80
5.13	Comparação entre os resultados medidos e simulados para mudança na polarização da FSS em relação à onda EM incidente.	81
5.14	Comparação entre os resultados medidos e simulados para mudança no ângulo da onda EM incidente.	82
6.1	Protótipo da luva de dados construída e elementos da FSS acoplados. . . .	85
6.2	Propriedades das camadas de tecido humano consideradas nas simulações.	86
6.3	<i>Setup</i> de simulação, considerando a geometria proposta e os tecidos do corpo humano.	86
6.4	Protótipo da luva de dados construída e elementos da FSS acoplados. . . .	87
6.5	Alfabeto manual com destaque para sinais de letras com movimento. . . .	88
6.6	FSS aplicada ao reconhecimento de gestos manuais estáticos: (a) configuração do <i>setup</i> de medição; (b) símbolos medidos.	89

6.7	FSS aplicada ao reconhecimento de gestos manuais estáticos: (a) variação do módulo do coeficiente de transmissão S21; (b) variação na fase para cada um dos gestos.	90
6.8	Resultados medidos e a demonstração dos diferentes valores médios do módulo S21 e da fase para cada um dos 5 gestos.	91
6.9	Resultados medidos para usuário 2, 3 medições para o gesto 1. Em destaque, a curva que representa a médias das 3 medições.	92
6.10	Resultados medidos para usuário 2, 3 medições para o gesto 2. Em destaque, a curva que representa a médias das 3 medições.	92
6.11	Resultados medidos para usuário 2, 3 medições para o gesto 3. Em destaque, a curva que representa a médias das 3 medições.	93
6.12	Resultados medidos para usuário 2, 3 medições para o gesto 4. Em destaque, a curva que representa a médias das 3 medições.	93
6.13	Resultados medidos para usuário 2, 3 medições para o gesto 5. Em destaque, a curva que representa a médias das 3 medições.	94
6.14	Histogramas das medições do módulo do coeficiente de transmissão (em dB) para os cinco gestos manuais analisados.	96
6.15	Variação do módulo S21 por gesto, demonstrando os valores das medições, média e desvio padrão.	97
7.1	Ilustração dos gestos medidos (letras A e S da Libras) e do setup experimental utilizado nas medições.	104
7.2	Resultados medidos dos gestos (letras A e S da Libras).	105
7.3	Variação do módulo S21 para dois gestos (letras A e S da Libras), demonstrando os valores das medições, média e desvio padrão.	107
7.4	Variação do módulo S21 para dois gestos (letras A e S da Libras), demonstrando os valores das medições, p-valor, média e desvio padrão.	108

Lista de Tabelas

4.1	Tabela de pesquisa bibliográfica	55
4.2	Resultados obtidos nas bases de dados com a entrada da <i>string</i>	55
5.1	Critérios de projeto	66
5.2	Parâmetros do circuito modelado	71
6.1	Análise estatística das diferenças entre gestos	98
6.2	Métricas por gesto e distinguibilidade	99
6.3	Comparação do presente trabalho com a literatura	100

Resumo

Este trabalho apresenta o projeto, a prototipagem, validação experimental e análise de um novo dispositivo vestível baseado no acoplamento de uma superfície seletiva de frequência (FSS) têxtil a uma luva de dados, desenvolvido para aplicações de reconhecimento de gestos manuais estáticos. Inicialmente, é proposta uma nova FSS têxtil, utilizando tecido 100% algodão como material dielétrico e linha condutiva comercial Shieldex 78f20. O desempenho da FSS é avaliado por meio de dois métodos computacionais: um método de onda completa, implementado em ferramentas comerciais, o ANSYS HFSS, com base no método dos elementos finitos (FEM), e o método aproximado do circuito equivalente (ECM), onde é feita a proposição do circuito equivalente simplificado da geometria utilizada. Após validação computacional e experimental, a FSS foi acoplada a uma luva de dados e aplicada ao reconhecimento de diferentes gestos manuais estáticos. Conforme apontado na literatura, diversos métodos podem ser empregados para essa finalidade, onde parâmetros relacionados a mudanças em dados obtidos através de medição de sinais ópticos, radiofrequência (RF) ou visão computacional; neste trabalho, foi proposto o método de obtenção dos dados através de um *setup* de RF. Inicialmente, foram medidos cinco gestos estáticos, onde com os dados obtidos, adotou-se como métrica de classificação a variação do módulo do coeficiente de transmissão S_{21} . Para validar numericamente os resultados, realizou-se uma análise estatística com o teste t-Student. Os resultados indicaram que 70% dos gestos medidos apresentaram diferenças significativas entre si, considerando o p-valor < 0.005 , evidenciando a eficiência do dispositivo proposto para essa aplicação. Além disso, uma análise de robustez foi conduzida: dois gestos da língua brasileira de sinais (Libras) com pequenas diferenças léxicas, as letras a e s. Os resultados experimentais e a posterior análise estatística desses mostraram diferenças significativas quando comparados. Os valores obtidos experimentalmente foram comparados aos re-

sultados simulados, apresentando boa concordância. Assim, os resultados confirmam o potencial da abordagem proposta para aplicações em reconhecimento de gestos, interação homem-máquina, interfaces para jogos virtuais e realidade aumentada.

Palavras-chave: Superfície seletiva em frequência, reconhecimento de gestos estáticos; dispositivo têxtil; luva de dados.

Abstract

This work presents the design, prototyping, experimental validation, and analysis of a new wearable device based on the coupling of a textile frequency selective surface (FSS) to a data glove, developed for static hand gesture recognition applications. Initially, a novel textile FSS is proposed, employing 100% cotton fabric as the dielectric material and a commercial conductive thread, Shieldex 78f20. The performance of the FSS is evaluated using two computational methods: a full-wave method, implemented in commercial tools (ANSYS HFSS) based on the finite element method (FEM), and the approximate equivalent circuit method (ECM), in which a simplified equivalent circuit of the proposed geometry is presented. After computational and experimental validation, the FSS was coupled to a data glove and applied to the recognition of different static hand gestures. As reported in the literature, several methods can be employed for this purpose, involving parameters related to variations in data obtained through optical, radiofrequency (RF), or computer vision signal measurements. In this work, the proposed method obtains data through an RF setup. Initially, five static gestures were measured, and based on the collected data, the variation in the magnitude of the S_{21} transmission coefficient was adopted as the classification metric. To numerically validate the results, a statistical analysis was performed using the t-Student test. The results indicated that 70% of the measured gestures presented significant differences among each other, considering a p-value < 0.005 , highlighting the efficiency of the proposed device for this application. Additionally, a robustness analysis was conducted with two Brazilian Sign Language (Libras) gestures with small lexical differences, the letters “a” and “s.” The experimental results and subsequent statistical analysis showed significant differences when compared. The experimental values were compared to the simulated results, showing good agreement. Therefore, the findings confirm the potential of the proposed approach for applications in gesture re-

cognition, human–machine interaction, virtual gaming interfaces, and augmented reality.

Keywords: Frequency selective surfaces; static gesture recognition; textile devices; dataglove.

Sumário

2	Introdução	18
2.1	Hipótese	22
2.2	Objetivos da pesquisa	22
2.2.1	Objetivo geral	22
2.2.2	Objetivos específicos	22
2.3	Organização do trabalho	23
2	Introdução	18
2.1	Hipótese	22
2.2	Objetivos da pesquisa	22
2.2.1	Objetivo geral	22
2.2.2	Objetivos específicos	22
2.3	Organização do trabalho	23
3	Fundamentação teórica	25
3.1	Introdução	25
3.2	Características principais	26
3.3	Tipos de elementos condutivos de uma FSS	29
3.4	Substratos em FSS: características, tipos e versatilidade	33
3.4.1	Características	33
3.4.2	Tipos de substratos e sua versatilidade	34
3.5	Técnicas de medição	36
3.6	Técnicas de análise	38
3.6.1	Método WCIP	40
3.6.2	Método do circuito equivalente	41

3.7	Aplicações com FSS	43
3.8	Sensores baseados no funcionamento de FSS	44
3.8.1	FSS ultraminiaturizada aplicada em sistema de sensoriamento da semperatura	44
3.8.2	Sensor de líquido baseado em FSS	46
3.8.3	FSS utilizada como sensor para a verificação de deformação . . .	47
3.9	Conclusão do capítulo	49
4	Revisão sistemática e análise de resultados	50
4.1	Revisão sistemática da literatura	51
4.2	Definição do protocolo	52
4.3	Obtenção de estudos similares	53
4.3.1	Definição da <i>string</i> de busca	53
4.3.2	Trabalhos encontrados	54
4.4	Análise bibliométrica dos resultados	56
4.4.1	Publicações por ano	56
4.4.2	Publicações por periódico	57
4.4.3	Principais tópicos por métodos de aquisição de dados	58
4.5	Trabalhos relacionados	59
4.5.1	Sensor óptico para predição de língua de sinais	60
4.5.2	Tag têxtil sem chip para reconhecimento de gestos	61
4.5.3	<i>Flexible and self- adhesive strain sensors</i> (FSS) utilizada como sensor de reconhecimento de gestos	62
4.6	Conclusão do capítulo	63
5	Metodologia e prototipagem	64
5.1	Desenvolvimento de uma FSS têxtil	66
5.1.1	Design e evolução da geometria	67
5.1.2	Modelagem do circuito equivalente	69
5.2	Resultados simulados	71
5.2.1	Simulação utilizando o método dos elementos finitos (FEM) . . .	71

5.2.2	Simulação realizada pelo método do circuito equivalente (ECM) .	72
5.2.3	Resultados obtidos	73
5.3	Prototipagem	76
5.3.1	Materiais dielétricos	77
5.3.2	Materiais condutivos	78
5.3.3	FSS têxtil	78
5.4	Medições do protótipo	80
5.5	Conclusão do capítulo	82
6	Caracterização da hipótese científica	84
6.1	Prototipagem da luva de dados	84
6.2	Simulação e resultados experimentais	85
6.3	Detecção de diferentes gestos	87
6.3.1	Descrição do protocolo experimental para diferentes gestos	87
6.4	Análise do comportamento do dispositivo em resposta a variações gestuais.	89
6.5	Análise estatística dos resultados obtidos	94
6.5.1	Formulação matemática	94
6.6	Posicionamento do trabalho na literatura	99
6.7	Conclusão do capítulo	101
7	Análise de robustez	103
7.1	Contextualização da análise	103
7.2	Resultados experimentais	104
7.2.1	Setup experimental	104
7.2.2	Resultados	105
7.3	Análise estatística dos resultados medidos	106
7.4	Conclusão do capítulo	108
8	Conclusão	110

A	Produções acadêmicas	112
A.1	Trabalhos publicados	112
A.2	Premiações e Menções Honrosas	114
	Referências bibliográficas	116

Capítulo 1

Introdução

As línguas de sinais são sistemas linguísticos completos, cujas unidades de significado, como letras, palavras e números, são expressas e diferenciadas por meio da configuração e orientação das mãos, seja de forma estática ou por meio de movimentos curtos ou longos [1]. Assim como as línguas orais, as línguas de sinais apresentam aspectos linguísticos próprios, baseados em sua modalidade visuoespacial. Além dos gestos manuais, integram esse sistema elementos não manuais, como expressões faciais e corporais, que desempenham papel fundamental na construção do significado [1]. Como toda língua natural, as línguas de sinais também apresentam variações regionais e contextuais, refletindo a diversidade cultural de seus usuários.

No Brasil, as pessoas que utilizam a Língua Brasileira de Sinais Libras têm o direito assegurado de acesso a serviços públicos de forma adequada, conforme previsto na legislação vigente. Logo, cabe aos órgãos e instituições responsáveis pela oferta e distribuição desses serviços garantir que esse acesso ocorra de maneira inclusiva e eficiente. Entre os principais serviços que devem contemplar a acessibilidade em Libras, destacam-se o sistema educacional e o sistema de saúde, fundamentais para o exercício pleno da cidadania e para a promoção da equidade social.

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), estima-se que mais de 5% da população mundial, o que representa mais de 460 milhões de pessoas, apresenta algum grau de surdez ou necessita de reabilitação devido a perdas auditivas severas [2]. No Brasil, a Libras é reconhecida como meio legal de comunicação e expressão da comunidade surda, conforme estabelecido no Art. 1º da Lei nº 10.436, de 24 de abril de 2002 [3].

Em 6 de julho de 2015, foi sancionada a Lei nº 13.146, conhecida como a Lei Brasileira de Inclusão da Pessoa com Deficiência (Estatuto da Pessoa com Deficiência) [4]. De acordo com essa lei, as pessoas surdas têm direito, no âmbito educacional, à oferta de educação bilíngue, à formação e disponibilização de professores especializados, de tradutores e intérpretes de Libras, ao ensino da própria língua de sinais, além da garantia de recursos de acessibilidade e tecnologias assistivas adequadas.

Apesar dos avanços legais e do reconhecimento da inclusão como um direito a ser garantido, a realidade atual ainda impõe diversas barreiras às pessoas surdas e com deficiência auditiva, especialmente no que se refere ao acesso à informação e a serviços básicos. A ausência de intérpretes de Libras em instituições públicas e privadas é uma circunstância recorrente, dificultando significativamente a comunicação e impactando diretamente a qualidade de vida desses indivíduos [5]. Embora a Libras seja o principal meio de comunicação e inclusão da comunidade surda na sociedade, muitas vezes essas pessoas são obrigadas a recorrer a formas alternativas de comunicação ao interagir com ouvintes que não dominam a língua de sinais. Um exemplo comum é a utilização da leitura labial ou da fala articulada, em uma tentativa de comunicação por meio da língua portuguesa. No entanto, por não ser sua língua natural, o nível de proficiência em português pode ser limitado, o que evidencia a desigualdade comunicacional e a urgência de medidas que promovam a acessibilidade plena [6].

Nessa perspectiva, evidencia-se a necessidade de aprimorar o suporte oferecido às pessoas com deficiência auditiva e pessoas surdas que fazem uso ativo da Libras. Uma alternativa consiste no desenvolvimento de ferramentas tecnológicas capazes de mediar e facilitar a comunicação entre pessoas surdas e ouvintes, promovendo uma interação bidirecional e eficaz. Tais soluções têm o potencial de reduzir barreiras comunicacionais, ampliando o acesso à informação, aos serviços e à participação plena dessas pessoas na sociedade.

Com o objetivo de aprimorar a comunicação entre pessoas com deficiência auditiva e ouvintes, diferentes tecnologias emergentes têm sido propostas, aplicadas e demonstrado grande potencial de benefícios aos usuários. Entre essas, destacam-se soluções baseadas em visão computacional [7, 8], inteligência artificial, especialmente por meio de técni-

cas de *deep learning* [9] e redes neurais convolucionais [10], além do uso de sistemas de comunicação como ferramentas de sensoriamento [11]. No contexto da inteligência artificial, a disponibilidade e diversidade de dados têm ampliado significativamente o potencial de aprendizagem dos algoritmos, tornando essa abordagem particularmente atrativa para aplicações de reconhecimento de gestos humanos e interpretação de línguas de sinais.

Quando se trata da aplicação de visão computacional no reconhecimento de sinais provenientes de gestos manuais, geralmente utilizam-se vídeos, imagens ou séries temporais como sinais de entrada para os modelos. Para que esses sistemas sejam capazes de identificar padrões gestuais com precisão, é necessário expô-los a uma grande quantidade de dados, ou seja, um volume significativo de vídeos e amostras visuais [12]. Essa exigência acarreta um aumento considerável da demanda por capacidade computacional, tanto para o treinamento quanto para a inferência dos modelos, o que pode representar um entrave em cenários com recursos limitados.

Em trabalhos que utilizam inteligência artificial, as redes neurais convolucionais (CNN) e técnicas de *deep learning* têm desempenhado um papel fundamental, especialmente no avanço do reconhecimento de gestos manuais. Essas abordagens têm sido amplamente empregadas no desenvolvimento de interfaces de controle mais intuitivas, com o objetivo de facilitar a interação humano-máquina [13]. Em aplicações desse tipo, o sinal de entrada é geralmente capturado por câmeras RGB ou sensores de profundidade, que registram imagens ou vídeos das mãos. Esses dados visuais são então processados por camadas convolucionais, responsáveis por extrair características relevantes, como a posição dos dedos, os contornos das mãos, extremidades e o movimento da palma. A partir dessas informações, os modelos são capazes de reconhecer padrões gestuais em tempo real com alta acurácia [14].

Paralelamente, sistemas que utilizam tecnologias de comunicação sem fio para o reconhecimento de gestos vêm ganhando destaque, especialmente por oferecerem uma alternativa ao uso de câmeras, além de apresentarem vantagens na detecção de pequenas variações no ambiente. Esses métodos analisam as alterações nos sinais de rádio causadas pelo movimento das mãos ou do corpo do usuário, mapeando variações de amplitude e fase para identificar diferentes gestos, movimentos ou distâncias. Estudos como o de [15]

demonstram que sistemas baseados em Wi-Fi são capazes de detectar movimentos mesmo em áreas amplas e na ausência de linha de visada direta, o que amplia significativamente as possibilidades de aplicação em ambientes domésticos, industriais e de assistência. Tais abordagens têm-se mostrado promissoras na criação de interfaces invisíveis e discretas, nas quais a detecção gestual ocorre exclusivamente por meio das perturbações no sinal sem fio, sem comprometer a privacidade do usuário [16].

Além disso, pesquisadores têm direcionado esforços para o desenvolvimento de técnicas de sensoriamento capazes de detectar movimentos com alta precisão, motivados pela ampla gama de aplicações dessas tecnologias. Esses métodos podem ser implementados em diversas áreas, como sistemas de segurança [17], reconhecimento de sinais em línguas de sinais [18, 19], interfaces para jogos digitais com realidade virtual ou aumentada [20–23], e até em pesquisas avançadas em robótica [24]. A versatilidade dessas aplicações reforça a relevância de se explorar novas abordagens para a detecção de gestos, buscando soluções cada vez mais intuitivas, eficientes e integradas ao cotidiano dos usuários.

Nesse cenário, métodos baseados em sensoriamento por radiofrequência (*Radio Frequency Sensing – RF sensing*) têm se destacado como alternativa tecnicamente promissora para aplicações de reconhecimento de gestos em ambientes desafiadores. Por não exigirem contato físico, visada direta ou iluminação ambiente, essas técnicas são menos invasivas e apresentam robustez frente a obstruções visuais e condições variáveis do ambiente. Ademais, sua capacidade de detectar pequenas perturbações nos sinais de rádio, causadas por movimentos corporais ou gestuais, confere ao *RF sensing* um potencial elevado para aplicações em que a discriminação de gestos finos, como aqueles característicos de línguas de sinais, é fundamental [25, 26].

A aplicabilidade do *RF sensing* em contextos de acessibilidade comunicacional, como a tradução automática de Libras, representa uma contribuição relevante tanto para o campo técnico quanto para a promoção da inclusão social. O desenvolvimento de soluções baseadas nessa tecnologia transcende o papel de eliminar barreiras comunicacionais, ao configurar-se como uma estratégia de fortalecimento da autonomia e da participação cidadã das pessoas surdas. Em um cenário marcado por demandas crescentes por aces-

sibilidade digital, tais iniciativas são fundamentais para garantir que os indivíduos com deficiência auditiva tenham acesso a formas de comunicação cada vez mais naturais, eficientes e socialmente integradas.

1.1 Hipótese

Desta forma, tem-se como hipótese desta pesquisa que: técnicas avançadas de radiofrequência (RF) podem ser aplicadas com eficácia na detecção e classificação de gestos manuais. A partir do desenvolvimento e implementação de uma superfície seletiva em frequência (FSS) acoplada a uma luva, espera-se que a variação da resposta em frequência do sistema seja suficiente para diferenciar uma ampla gama de gestos manuais, proporcionando um método eficiente e preciso para o reconhecimento de gestos em *setups* de RF. Essa abordagem poderá servir de base para novas aplicações em interfaces de interação e acessibilidade comunicacional de pessoas surdas, além de contribuir para o avanço das tecnologias de sensoriamento gestual com uso de RF. Para isso, com o intuito de verificar a hipótese proposta, foram traçados os objetivos a seguir.

1.2 Objetivos da pesquisa

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver uma luva equipada com elementos de uma superfície seletiva em frequência (FSS) que possibilite o reconhecimento de diferentes gestos manuais do usuário em um ambiente de radiofrequência (RF), explorando as alterações na resposta em frequência para distinguir gestos com precisão e eficiência.

1.2.2 Objetivos específicos

Para alcançar este objetivo, alguns objetivos específicos foram traçados com o intuito de contribuir para a averiguação da hipótese traçada, sendo eles:

- Fazer um estudo sobre o estado da arte e identificar lacunas que possam ser preenchidas com o presente trabalho.
- Projetar e modelar uma superfície seletiva em frequência (FSS) ajustada para ser acoplada a uma luva e sensível às mudanças de posição das mãos.
- Projetar uma nova estrutura que possa ser aplicada na detecção de gestos manuais, com base na literatura identificada.
- Definir um *setup* de radiofrequência para testar a interação entre a FSS acoplada à luva e o sinal RF, analisando a viabilidade de diferentes configurações de frequência e polarização.
- Identificar e aplicar técnicas de processamento de sinais RF para capturar e interpretar as alterações na resposta em frequência causadas por diferentes gestos manuais.
- Realizar a análise estatística sobre os resultados medidos para que seja possível executar uma conclusão fundamentada em dados sobre o comportamento do dispositivo proposto.
- Documentar os resultados e elaborar recomendações para aprimorar o reconhecimento de gestos com base em superfícies seletivas em frequência, visando futuras aplicações em dispositivos de interação assistiva e realidade aumentada.

Esses objetivos estabelecem uma estrutura para a criação de um sistema de reconhecimento de gestos baseado em RF, priorizando a precisão e a inovação no uso de tecnologias FSS em interação humana.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em 7 capítulos, cuja estrutura e conteúdo são descritos a seguir.

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica que sustenta o desenvolvimento desta pesquisa. São discutidos aspectos relacionados às superfícies seletivas em frequência (FSS), incluindo suas principais características, métodos de análise e técnicas de medição. Ao final do capítulo, são descritas aplicações desses dispositivos, com destaque para sua flexibilidade e eficácia em diferentes contextos de implementação.

O Capítulo 3 é dedicado à revisão sistemática da literatura, acompanhada da análise dos dados obtidos. Diferentes parâmetros são examinados com o intuito de delinear o estado da arte e contextualizar a contribuição deste trabalho. São também apresentados os estudos que forneceram subsídios relevantes à pesquisa, com ênfase nas características que influenciaram diretamente seu desenvolvimento.

No Capítulo 4, descreve-se de forma detalhada a metodologia adotada. São apresentados os procedimentos de simulação computacional e de prototipagem do dispositivo, com o objetivo de assegurar a reprodutibilidade do estudo. A escolha das geometrias e a análise da estrutura por meio do circuito equivalente visam demonstrar o entendimento aprofundado sobre o funcionamento do sistema proposto.

O Capítulo 5 trata da caracterização da hipótese formulada. A estrutura desenvolvida é aplicada ao reconhecimento de gestos e validada por meio de simulações e experimentos laboratoriais. Para corroborar os resultados, realiza-se uma análise estatística com vistas a verificar a eficácia funcional do dispositivo na aplicação proposta.

No Capítulo 6, é conduzida a análise de robustez do dispositivo. Essa etapa é essencial para consolidar a proposta como uma alternativa confiável para a detecção e interpretação de gestos estáticos da Libras, mesmo diante de variações experimentais.

No Capítulo 7, apresentam-se as conclusões do trabalho. São destacados os principais resultados, as contribuições científicas e as perspectivas para trabalhos futuros.

Por fim, no Anexo I, são listados os produtos acadêmicos resultantes do desenvolvimento da pesquisa, como publicações em periódicos e congressos, bem como premiações recebidas.

Capítulo 2

Introdução

As línguas de sinais são sistemas linguísticos completos, cujas unidades de significado, como letras, palavras e números, são expressas e diferenciadas por meio da configuração e orientação das mãos, seja de forma estática ou por meio de movimentos curtos ou longos [1]. Assim como as línguas orais, as línguas de sinais apresentam aspectos linguísticos próprios, baseados em sua modalidade visuoespacial. Além dos gestos manuais, integram esse sistema elementos não manuais, como expressões faciais e corporais, que desempenham papel fundamental na construção do significado [1]. Como toda língua natural, as línguas de sinais também apresentam variações regionais e contextuais, refletindo a diversidade cultural de seus usuários.

No Brasil, as pessoas que utilizam a Língua Brasileira de Sinais Libras têm o direito assegurado de acesso a serviços públicos de forma adequada, conforme previsto na legislação vigente. Logo, cabe aos órgãos e instituições responsáveis pela oferta e distribuição desses serviços garantir que esse acesso ocorra de maneira inclusiva e eficiente. Entre os principais serviços que devem contemplar a acessibilidade em Libras, destacam-se o sistema educacional e o sistema de saúde, fundamentais para o exercício pleno da cidadania e para a promoção da equidade social.

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), estima-se que mais de 5% da população mundial, o que representa mais de 460 milhões de pessoas, apresenta algum grau de surdez ou necessita de reabilitação devido a perdas auditivas severas [2]. No Brasil, a Libras é reconhecida como meio legal de comunicação e expressão da comunidade surda, conforme estabelecido no Art. 1º da Lei nº 10.436, de 24 de abril de 2002 [3].

Em 6 de julho de 2015, foi sancionada a Lei nº 13.146, conhecida como a Lei Brasileira de Inclusão da Pessoa com Deficiência (Estatuto da Pessoa com Deficiência) [4]. De acordo com essa lei, as pessoas surdas têm direito, no âmbito educacional, à oferta de educação bilíngue, à formação e disponibilização de professores especializados, de tradutores e intérpretes de Libras, ao ensino da própria língua de sinais, além da garantia de recursos de acessibilidade e tecnologias assistivas adequadas.

Apesar dos avanços legais e do reconhecimento da inclusão como um direito a ser garantido, a realidade atual ainda impõe diversas barreiras às pessoas surdas e com deficiência auditiva, especialmente no que se refere ao acesso à informação e a serviços básicos. A ausência de intérpretes de Libras em instituições públicas e privadas é uma circunstância recorrente, dificultando significativamente a comunicação e impactando diretamente a qualidade de vida desses indivíduos [5]. Embora a Libras seja o principal meio de comunicação e inclusão da comunidade surda na sociedade, muitas vezes essas pessoas são obrigadas a recorrer a formas alternativas de comunicação ao interagir com ouvintes que não dominam a língua de sinais. Um exemplo comum é a utilização da leitura labial ou da fala articulada, em uma tentativa de comunicação por meio da língua portuguesa. No entanto, por não ser sua língua natural, o nível de proficiência em português pode ser limitado, o que evidencia a desigualdade comunicacional e a urgência de medidas que promovam a acessibilidade plena [6].

Nessa perspectiva, evidencia-se a necessidade de aprimorar o suporte oferecido às pessoas com deficiência auditiva e pessoas surdas que fazem uso ativo da Libras. Uma alternativa consiste no desenvolvimento de ferramentas tecnológicas capazes de mediar e facilitar a comunicação entre pessoas surdas e ouvintes, promovendo uma interação bidirecional e eficaz. Tais soluções têm o potencial de reduzir barreiras comunicacionais, ampliando o acesso à informação, aos serviços e à participação plena dessas pessoas na sociedade.

Com o objetivo de aprimorar a comunicação entre pessoas com deficiência auditiva e ouvintes, diferentes tecnologias emergentes têm sido propostas, aplicadas e demonstrado grande potencial de benefícios aos usuários. Entre essas, destacam-se soluções baseadas em visão computacional [7, 8], inteligência artificial, especialmente por meio de técni-

cas de *deep learning* [9] e redes neurais convolucionais [10], além do uso de sistemas de comunicação como ferramentas de sensoriamento [11]. No contexto da inteligência artificial, a disponibilidade e diversidade de dados têm ampliado significativamente o potencial de aprendizagem dos algoritmos, tornando essa abordagem particularmente atrativa para aplicações de reconhecimento de gestos humanos e interpretação de línguas de sinais.

Quando se trata da aplicação de visão computacional no reconhecimento de sinais provenientes de gestos manuais, geralmente utilizam-se vídeos, imagens ou séries temporais como sinais de entrada para os modelos. Para que esses sistemas sejam capazes de identificar padrões gestuais com precisão, é necessário expô-los a uma grande quantidade de dados, ou seja, um volume significativo de vídeos e amostras visuais [12]. Essa exigência acarreta um aumento considerável da demanda por capacidade computacional, tanto para o treinamento quanto para a inferência dos modelos, o que pode representar um entrave em cenários com recursos limitados.

Em trabalhos que utilizam inteligência artificial, as redes neurais convolucionais (CNN) e técnicas de *deep learning* têm desempenhado um papel fundamental, especialmente no avanço do reconhecimento de gestos manuais. Essas abordagens têm sido amplamente empregadas no desenvolvimento de interfaces de controle mais intuitivas, com o objetivo de facilitar a interação humano-máquina [13]. Em aplicações desse tipo, o sinal de entrada é geralmente capturado por câmeras RGB ou sensores de profundidade, que registram imagens ou vídeos das mãos. Esses dados visuais são então processados por camadas convolucionais, responsáveis por extrair características relevantes, como a posição dos dedos, os contornos das mãos, extremidades e o movimento da palma. A partir dessas informações, os modelos são capazes de reconhecer padrões gestuais em tempo real com alta acurácia [14].

Paralelamente, sistemas que utilizam tecnologias de comunicação sem fio para o reconhecimento de gestos vêm ganhando destaque, especialmente por oferecerem uma alternativa ao uso de câmeras, além de apresentarem vantagens na detecção de pequenas variações no ambiente. Esses métodos analisam as alterações nos sinais de rádio causadas pelo movimento das mãos ou do corpo do usuário, mapeando variações de amplitude e fase para identificar diferentes gestos, movimentos ou distâncias. Estudos como o de [15]

demonstram que sistemas baseados em Wi-Fi são capazes de detectar movimentos mesmo em áreas amplas e na ausência de linha de visada direta, o que amplia significativamente as possibilidades de aplicação em ambientes domésticos, industriais e de assistência. Tais abordagens têm-se mostrado promissoras na criação de interfaces invisíveis e discretas, nas quais a detecção gestual ocorre exclusivamente por meio das perturbações no sinal sem fio, sem comprometer a privacidade do usuário [16].

Além disso, pesquisadores têm direcionado esforços para o desenvolvimento de técnicas de sensoriamento capazes de detectar movimentos com alta precisão, motivados pela ampla gama de aplicações dessas tecnologias. Esses métodos podem ser implementados em diversas áreas, como sistemas de segurança [17], reconhecimento de sinais em línguas de sinais [18, 19], interfaces para jogos digitais com realidade virtual ou aumentada [20–23], e até em pesquisas avançadas em robótica [24]. A versatilidade dessas aplicações reforça a relevância de se explorar novas abordagens para a detecção de gestos, buscando soluções cada vez mais intuitivas, eficientes e integradas ao cotidiano dos usuários.

Nesse cenário, métodos baseados em sensoriamento por radiofrequência (*Radio Frequency Sensing – RF sensing*) têm se destacado como alternativa tecnicamente promissora para aplicações de reconhecimento de gestos em ambientes desafiadores. Por não exigirem contato físico, visada direta ou iluminação ambiente, essas técnicas são menos invasivas e apresentam robustez frente a obstruções visuais e condições variáveis do ambiente. Ademais, sua capacidade de detectar pequenas perturbações nos sinais de rádio, causadas por movimentos corporais ou gestuais, confere ao *RF sensing* um potencial elevado para aplicações em que a discriminação de gestos finos, como aqueles característicos de línguas de sinais, é fundamental [25, 26].

A aplicabilidade do *RF sensing* em contextos de acessibilidade comunicacional, como a tradução automática de Libras, representa uma contribuição relevante tanto para o campo técnico quanto para a promoção da inclusão social. O desenvolvimento de soluções baseadas nessa tecnologia transcende o papel de eliminar barreiras comunicacionais, ao configurar-se como uma estratégia de fortalecimento da autonomia e da participação cidadã das pessoas surdas. Em um cenário marcado por demandas crescentes por aces-

sibilidade digital, tais iniciativas são fundamentais para garantir que os indivíduos com deficiência auditiva tenham acesso a formas de comunicação cada vez mais naturais, eficientes e socialmente integradas.

2.1 Hipótese

Desta forma, tem-se como hipótese desta pesquisa que: técnicas avançadas de radiofrequência (RF) podem ser aplicadas com eficácia na detecção e classificação de gestos manuais. A partir do desenvolvimento e implementação de uma superfície seletiva em frequência (FSS) acoplada a uma luva, espera-se que a variação da resposta em frequência do sistema seja suficiente para diferenciar uma ampla gama de gestos manuais, proporcionando um método eficiente e preciso para o reconhecimento de gestos em *setups* de RF. Essa abordagem poderá servir de base para novas aplicações em interfaces de interação e acessibilidade comunicacional de pessoas surdas, além de contribuir para o avanço das tecnologias de sensoriamento gestual com uso de RF. Para isso, com o intuito de verificar a hipótese proposta, foram traçados os objetivos a seguir.

2.2 Objetivos da pesquisa

2.2.1 Objetivo geral

Desenvolver uma luva equipada com elementos de uma superfície seletiva em frequência (FSS) que possibilite o reconhecimento de diferentes gestos manuais do usuário em um ambiente de radiofrequência (RF), explorando as alterações na resposta em frequência para distinguir gestos com precisão e eficiência.

2.2.2 Objetivos específicos

Para alcançar este objetivo, alguns objetivos específicos foram traçados com o intuito de contribuir para a averiguação da hipótese traçada, sendo eles:

- Fazer um estudo sobre o estado da arte e identificar lacunas que possam ser preenchidas com o presente trabalho.
- Projetar e modelar uma superfície seletiva em frequência (FSS) ajustada para ser acoplada a uma luva e sensível às mudanças de posição das mãos.
- Projetar uma nova estrutura que possa ser aplicada na detecção de gestos manuais, com base na literatura identificada.
- Definir um *setup* de radiofrequência para testar a interação entre a FSS acoplada à luva e o sinal RF, analisando a viabilidade de diferentes configurações de frequência e polarização.
- Identificar e aplicar técnicas de processamento de sinais RF para capturar e interpretar as alterações na resposta em frequência causadas por diferentes gestos manuais.
- Realizar a análise estatística sobre os resultados medidos para que seja possível executar uma conclusão fundamentada em dados sobre o comportamento do dispositivo proposto.
- Documentar os resultados e elaborar recomendações para aprimorar o reconhecimento de gestos com base em superfícies seletivas em frequência, visando futuras aplicações em dispositivos de interação assistiva e realidade aumentada.

Esses objetivos estabelecem uma estrutura para a criação de um sistema de reconhecimento de gestos baseado em RF, priorizando a precisão e a inovação no uso de tecnologias FSS em interação humana.

2.3 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em 7 capítulos, cuja estrutura e conteúdo são descritos a seguir.

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica que sustenta o desenvolvimento desta pesquisa. São discutidos aspectos relacionados às superfícies seletivas em frequência (FSS), incluindo suas principais características, métodos de análise e técnicas de medição. Ao final do capítulo, são descritas aplicações desses dispositivos, com destaque para sua flexibilidade e eficácia em diferentes contextos de implementação.

O Capítulo 3 é dedicado à revisão sistemática da literatura, acompanhada da análise dos dados obtidos. Diferentes parâmetros são examinados com o intuito de delinear o estado da arte e contextualizar a contribuição deste trabalho. São também apresentados os estudos que forneceram subsídios relevantes à pesquisa, com ênfase nas características que influenciaram diretamente seu desenvolvimento.

No Capítulo 4, descreve-se de forma detalhada a metodologia adotada. São apresentados os procedimentos de simulação computacional e de prototipagem do dispositivo, com o objetivo de assegurar a reprodutibilidade do estudo. A escolha das geometrias e a análise da estrutura por meio do circuito equivalente visam demonstrar o entendimento aprofundado sobre o funcionamento do sistema proposto.

O Capítulo 5 trata da caracterização da hipótese formulada. A estrutura desenvolvida é aplicada ao reconhecimento de gestos e validada por meio de simulações e experimentos laboratoriais. Para corroborar os resultados, realiza-se uma análise estatística com vistas a verificar a eficácia funcional do dispositivo na aplicação proposta.

No Capítulo 6, é conduzida a análise de robustez do dispositivo. Essa etapa é essencial para consolidar a proposta como uma alternativa confiável para a detecção e interpretação de gestos estáticos da Libras, mesmo diante de variações experimentais.

No Capítulo 7, apresentam-se as conclusões do trabalho. São destacados os principais resultados, as contribuições científicas e as perspectivas para trabalhos futuros.

Por fim, no Anexo I, são listados os produtos acadêmicos resultantes do desenvolvimento da pesquisa, como publicações em periódicos e congressos, bem como premiações recebidas.

Capítulo 3

Fundamentação teórica

3.1 Introdução

As superfícies seletivas em frequência (FSS) são estruturas compostas, em geral, por arranjos bidimensionais periódicos, cujo funcionamento se assemelha ao de filtros espaciais aplicados a ondas eletromagnéticas em propagação no espaço livre. O comportamento eletromagnético dessas estruturas é determinado pelas características dos elementos que compõem o arranjo, os quais podem ser projetados para operar como filtros do tipo passa-banda ou rejeita-banda, conforme o tipo de elemento ressonante adotado. Nesse contexto, elementos do tipo *patch* são usualmente empregados em configurações rejeita-banda, enquanto aberturas são utilizadas em arranjos passa-banda. A forma geométrica desses elementos pode ser configurada de diferentes maneiras, de modo a atender aos requisitos específicos da aplicação [27].

As FSS apresentam propriedades que as tornam particularmente relevantes no campo das micro-ondas, destacando-se, entre elas, a facilidade de implementação, a diversidade de geometrias e dimensões viáveis e a ampla gama de materiais dielétricos que podem ser empregados na sua fabricação. Tais características conferem a essas estruturas um elevado grau de aplicabilidade, tanto em contextos industriais quanto em ambientes acadêmicos.

A resposta em frequência das FSS é influenciada por uma série de parâmetros, incluindo a geometria dos elementos que compõem o arranjo, as propriedades do substrato dielétrico, as dimensões físicas da estrutura e a periodicidade espacial dos elementos. Essa flexibilidade no projeto permite a adaptação das FSS a diversas exigências funcio-

nais, possibilitando sua utilização em uma variedade significativa de contextos [28,29]

Considerando o caráter multidisciplinar desta pesquisa, este capítulo apresenta as principais características das superfícies seletivas em frequência (FSS), com ênfase nos aspectos que conferem a essas estruturas elevada versatilidade diante de distintas áreas de aplicação. São discutidas as técnicas de medição comumente empregadas, os diferentes tipos de substratos possíveis, os métodos de análise e projeto adotados, bem como algumas das principais aplicações práticas associadas a esse tipo de estrutura.

3.2 Características principais

De forma geral, as FSSs atuam como barreiras seletivas para ondas eletromagnéticas (EM) propagantes em um meio. Esse fenômeno ocorre quando a onda EM entra em ressonância com os elementos condutores da FSS, ocasionando sua reflexão parcial na direção especular de incidência, representada por \vec{E}_r , e sua transmissão simultânea na direção normal de propagação, indicada por \vec{E}_t . Esse comportamento evidencia que tais elementos possuem a capacidade de controlar o fluxo de energia eletromagnética das ondas incidentes; um diagrama simplificado da estrutura tradicional de uma FSS é mostrado na Figura 3.1.

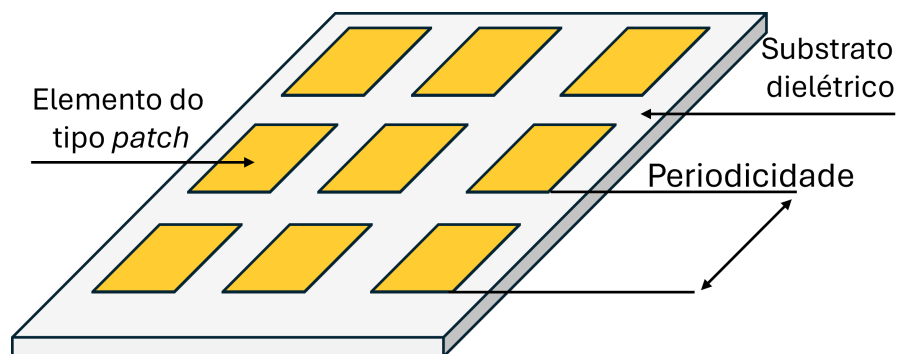


Figura 3.1: Representação de uma FSS do tipo *patch* retangular.

Dessa maneira, é possível definir o coeficiente de reflexão especular sob a condição de ressonância, conforme apresentado em [30].

$$\Gamma = \frac{\vec{E}_r}{\vec{E}_i} \quad (3.1)$$

\vec{E}_i , corresponde ao vetor E da onda incidente. Similarmente, pode-se definir o coeficiente de transmissão como [30].

$$\tau = \frac{\vec{E}_t}{\vec{E}_i} \quad (3.2)$$

A Figura 3.2 exemplifica os principais elementos acima mencionados, facilitando o entendimento do que foi abordado sobre os conceitos de transmissão e reflexão em uma FSS do tipo *patch*.

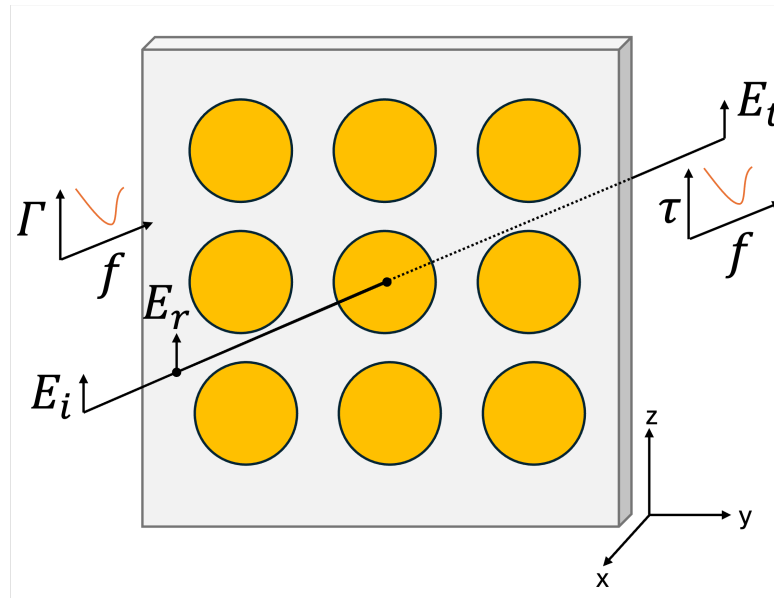


Figura 3.2: Representação do comportamento de uma onda EM ao incidir sobre uma FSS com arranjo do tipo *patch*.

Considerando a definição de filtros espaciais, as FSSs apresentam propriedades de filtragem semelhantes às dos filtros tradicionais de radiofrequência (RF), podendo ser categorizadas de acordo com sua resposta em quatro tipos principais: passa-faixa, rejeita-faixa, passa-altas e passa-baixas. Esses modos de operação são determinados pelas características específicas dos elementos constituintes da FSS. No caso em que o elemento condutor adotado é do tipo *patch*, observa-se que, na condição de ressonância, a interação

da onda eletromagnética com a superfície maciça do condutor resulta na reflexão quase integral do campo incidente. Como consequência, a transmissão é fortemente atenuada, caracterizando uma resposta do tipo rejeita-faixa.

De forma análoga, quando se utiliza um elemento do tipo abertura, estrutura complementar ao elemento do tipo *patch*, a interação direta entre a onda eletromagnética e os condutores é minimizada. Nesse caso, o campo incidente é predominantemente transmitido em torno da frequência de ressonância do arranjo, o que configura uma resposta do tipo passa-faixa.

Com base nessas observações, conclui-se que a combinação de diferentes tipos de elementos condutores permite a obtenção de respostas em frequência ajustadas aos requisitos específicos do projeto em que se deseja empregar estruturas FSS. A Figura 3.3 ilustra os conceitos descritos.

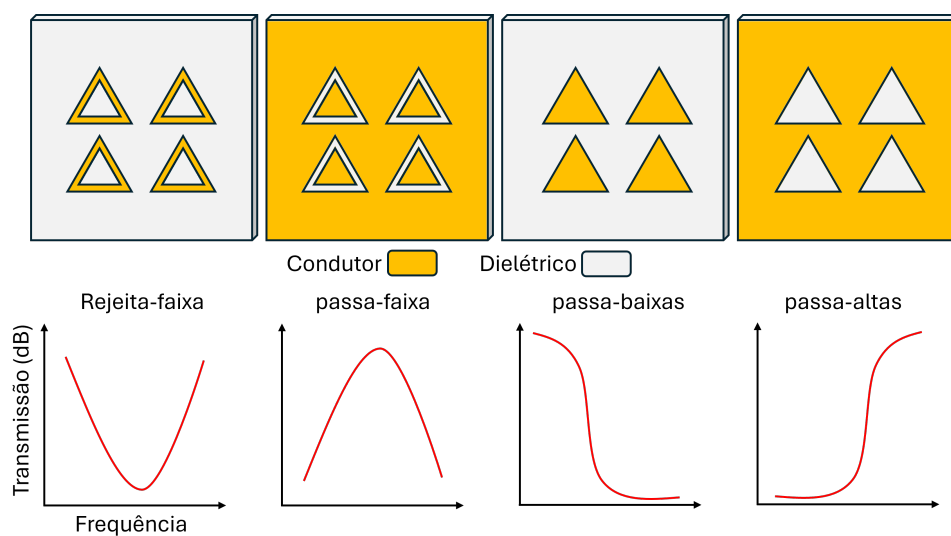


Figura 3.3: Representação da resposta de quatro tipos de FSS.

Com base no que foi exposto nesta seção, pode-se concluir que diversos fatores influenciam de forma significativa a resposta em frequência de uma FSS. Entre os principais, destacam-se: a geometria dos elementos utilizados; a disposição periódica desses elementos sobre o substrato; a espessura e as propriedades elétricas do material dielétrico empregado na construção do dispositivo; e, por fim, o ângulo de incidência da onda eletromagnética sobre a superfície [31].

3.3 Tipos de elementos condutivos de uma FSS

No contexto das superfícies seletivas de frequência (FSS), essas estruturas podem ser classificadas em três categorias principais: baseadas em elementos, baseadas em estruturas e orientadas por aplicação. Essa categorização permite organizar as FSSs conforme a geometria dos elementos que as compõem, o tipo de estrutura física na qual serão implementadas e a finalidade específica para a qual são projetadas [32]. A Figura 3.4 mostra de forma gráfica essa subdivisão dos tipos de FSS.

Pode-se afirmar que cada uma dessas categorias abrange diferentes abordagens de projeto e aplicação. As FSSs baseadas em elementos incluem geometrias como formas básicas, complexas e fractais, sendo que cada subgrupo apresenta características que influenciam diretamente o comportamento eletromagnético da estrutura. Por outro lado, as FSSs baseadas em estrutura não têm a geometria dos elementos como fator principal, mas sim a sua disposição física, podendo ser implementadas em camadas simples, múltiplas, empilhadas ou até mesmo em configurações tridimensionais. Já as FSSs orientadas por aplicação englobam soluções projetadas para atender a demandas específicas, como dispositivos vestíveis, estruturas ópticas, absorvedores e superfícies ativas, evidenciando a versatilidade dessas estruturas diante dos avanços tecnológicos e das exigências de aplicações modernas [33].

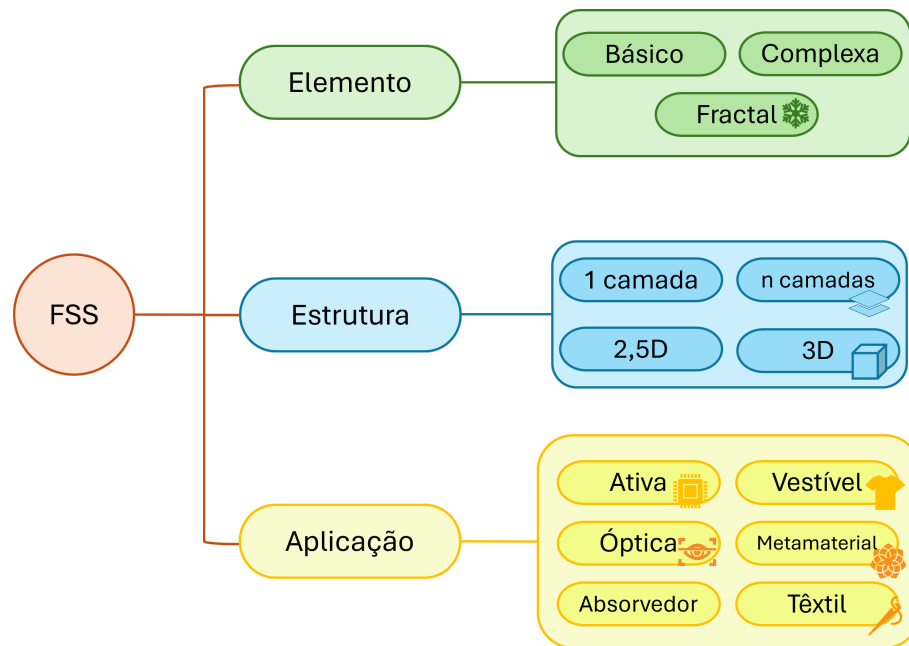


Figura 3.4: Classificação das FSS de acordo com o seu tipo.

A literatura apresenta uma ampla variedade de geometrias utilizadas em FSSs, abrangendo desde elementos geométricos simples até formas baseadas em fractais [34–37] e figuras bioinspiradas [38–41]. A escolha da geometria a ser empregada constitui uma etapa fundamental no processo de projeto de uma FSS, visto que, uma vez definida, todas as demais fases do desenvolvimento ficam condicionadas às propriedades físicas do elemento selecionado. Nesse sentido, é essencial compreender o comportamento eletromagnético associado a cada tipo de geometria antes do início do projeto, assegurando que essa escolha esteja alinhada à resposta em frequência requerida pela aplicação pretendida.

Conforme apresentado em [31], os elementos comumente utilizados em projetos de FSS podem ser classificados em quatro categorias principais.

- **Grupo 1:** N-polos conectados pelo centro.
- **Grupo 2:** espiras.
- **Grupo 3:** elementos com interior preenchidos ou sólidos.
- **Grupo 4:** elementos provenientes da combinação de um ou mais elementos dos grupos anteriores.

A Figura 3.5 ilustra as geometrias correspondentes a essas classificações.

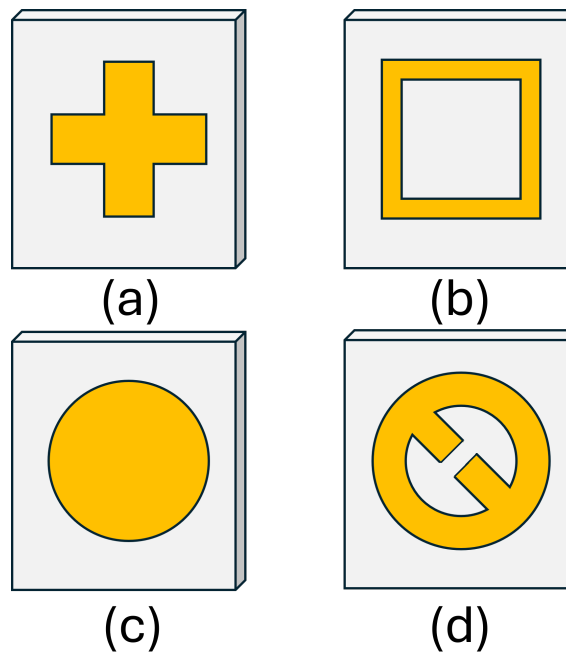


Figura 3.5: Grupos de geometrias de elementos: (a) Grupo 1; (b) Grupo 2; (c) Grupo 3; (d) Grupo 4.

Ao se analisar os diferentes grupos de elementos, observa-se que, no caso do Grupo 1, constituído por dipolos, tripolos ou N-polos, a condição de ressonância é atendida quando o comprimento elétrico de seus polos é equivalente à metade de um comprimento de onda [42].

No Grupo 2, que compreende as espiras, a ressonância ocorre quando o comprimento elétrico do elemento se aproxima de um comprimento de onda correspondente à frequência de interesse. Devido às características geométricas dessas estruturas, as dimensões da célula unitária costumam ser inferiores a um terço do comprimento de onda [43], o que as torna particularmente vantajosas para aplicações em FSSs que requerem soluções miniaturizadas.

Nos Grupos 3 e 4, a ressonância tende a ocorrer quando os elementos possuem dimensões próximas a meio comprimento de onda. No entanto, no caso do Grupo 4, cuja definição envolve a combinação de diferentes elementos estruturais, a relação entre as dimensões e a frequência de ressonância pode variar, não sendo plenamente aplicável em

todos os cenários, dada a complexidade e versatilidade inerentes a esse tipo de configuração.

Destaca-se, por fim, o estudo realizado por Munk [31], cujo foco consistiu na avaliação do desempenho de diferentes geometrias de FSS com base em suas características estruturais. É importante observar que, nesse estudo, os efeitos associados ao substrato dielétrico foram desconsiderados.

A análise comparativa sobre as características dos quatro grupos de geometrias foi conduzida a partir de quatro parâmetros principais: estabilidade angular, polarização cruzada, largura de banda e banda de separação. A Figura 3.6 apresenta os resultados obtidos, com as devidas adaptações, nos quais foram atribuídas notas ao desempenho de cada geometria em relação a cada parâmetro considerado. Valores mais elevados indicam desempenho superior da estrutura frente ao critério avaliado.

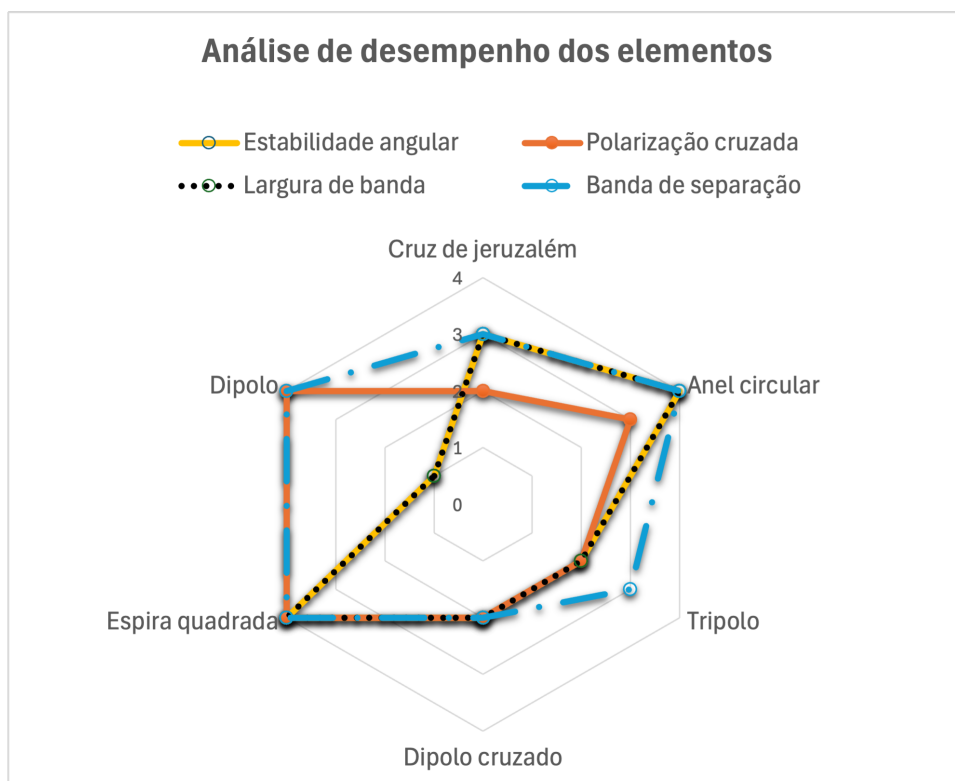


Figura 3.6: Comparação do desempenho de 4 tipos de estruturas de FSS.

Adaptado de [31].

Com base nos resultados apresentados na Figura 3.6, verifica-se que as geometrias do tipo espira quadrada e anéis circulares demonstraram desempenho superior nos parâmetros de largura de banda e banda de separação. Este último parâmetro refere-se à razão entre a frequência transmitida e a frequência central refletida pela estrutura [44].

Em contraste, as estruturas configuradas como dipolo e dipolo cruzado apresentaram melhor desempenho no parâmetro de polarização cruzada, resultado que pode ser atribuído à presença de simetria horizontal, característica também observada na espira quadrada.

Diante dessas observações, conclui-se que as diferentes geometrias empregadas em elementos de FSS apresentam propriedades específicas que as tornam mais adequadas a determinadas aplicações. Portanto, a análise detalhada do comportamento dessas estruturas constitui uma etapa essencial em qualquer projeto envolvendo FSS, considerando que a escolha do elemento ressonante impacta diretamente o desempenho e a funcionalidade da estrutura final.

3.4 Substratos em FSS: características, tipos e versatilidade

3.4.1 Características

Ao se definir a aplicação de uma FSS, o primeiro aspecto a ser considerado no projeto é o substrato a ser utilizado. As propriedades do substrato influenciam de forma significativa o desempenho da estrutura e, quando aplicável, do dispositivo ao qual ela será integrada.

Na literatura, os materiais mais comumente empregados são os dielétricos isotrópicos e anisotrópicos, em razão de suas propriedades elétricas e mecânicas exercerem influência direta sobre o comportamento eletromagnético da FSS.

Segundo [31], os parâmetros elétricos do material, em especial a permissividade elétrica (ϵ) e a permeabilidade magnética (μ), impactam fortemente a resposta em frequência da estrutura. Isso se deve à forma como a onda eletromagnética interage com a FSS,

realizando transições entre diferentes meios acima e abaixo da superfície.

Dessa forma, conclui-se que os parâmetros do substrato influenciam diretamente a resposta em frequência da estrutura final. De acordo com [42], a relação envolvendo a permissividade do substrato pode ser descrita por:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{1}{\lambda\sqrt{\epsilon\mu}} [Hz] \quad (3.3)$$

Isso evidencia que, quanto maior a permissividade do substrato empregado, menor será a frequência de ressonância da FSS. Isso ocorre porque o aumento da permissividade reduz a velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio, o que, por sua vez, diminui a frequência de ressonância da estrutura, dado que o comprimento efetivo da geometria da FSS permanece fixo.

Em materiais dielétricos, parâmetros como a permissividade e a espessura devem ser cuidadosamente analisados, pois impactam diretamente o comprimento de onda efetivo e, conseqüentemente, as frequências de ressonância das FSS. Do ponto de vista estrutural, o substrato dielétrico tem como função fornecer suporte físico e assegurar estabilidade nas respostas da FSS frente a variações angulares de incidência [45]. A influência do material também pode ser analisada em função de sua espessura: para dielétricos com espessura superior a $0,05\lambda$, a permissividade efetiva aproxima-se da permissividade relativa do material; já para espessuras inferiores a $0,05\lambda$, esse valor pode ser estimado por uma função linear da espessura do substrato [31].

Portanto, a escolha do material dielétrico a ser utilizado configura-se como um parâmetro fundamental no projeto de FSS, uma vez que características intrínsecas como permissividade e espessura exercem influência direta sobre a resposta em frequência da estrutura.

3.4.2 Tipos de substratos e sua versatilidade

Ao abordar a escolha do substrato dielétrico em projetos de FSS, é comum a menção a materiais amplamente utilizados na literatura, principalmente devido à sua ampla disponibilidade, às propriedades bem consolidadas e conhecidas, e à facilidade de integração

com outros componentes, decorrente de suas características físico-químicas.

Nesse contexto, observa-se que os substratos dielétricos mais comumente empregados são os materiais rígidos, como o FR-4 (fibra de vidro com epoxy) e os diversos tipos de dielétricos da linha Rogers[®]. No entanto, mesmo entre os dielétricos rígidos, é possível encontrar abordagens que utilizam materiais alternativos, como o vidro, conforme demonstrado em trabalhos como [46–48]. Apesar disso, tais materiais apresentam limitações importantes, especialmente em aplicações que demandam flexibilidade ou maleabilidade, restringindo sua utilização a contextos com requisitos estruturais mais rígidos.

Como alternativa ao *gap* deixado pelos materiais rígidos, destacam-se os materiais flexíveis. O crescimento de sua aplicação está diretamente relacionado aos avanços tecnológicos, tanto na indústria de materiais quanto nas técnicas de manufatura, que vêm possibilitando o desenvolvimento de substratos com características mecânicas adequadas à flexibilidade, sem comprometer o desempenho eletromagnético de estruturas como antenas e FSS.

Dentre as aplicações que utilizam materiais flexíveis, destacam-se as FSSs têxteis e vestíveis [49–52]. Outros materiais também podem ser empregados, embora com menor frequência, devido a características muito específicas. Entre esses, destacam-se os polímeros, como o silicone e o politereftalato de etileno (PET) [50], além de substratos à base de papel [53].

De forma geral, a escolha do substrato a ser utilizado na construção de uma FSS deve estar diretamente alinhada à aplicação pretendida. Em cenários onde a aplicação pode ser implementada em superfícies planas, os materiais rígidos são fortemente recomendados. Esses substratos são amplamente consolidados na literatura por apresentarem propriedades elétricas bem definidas, além de possibilitarem fácil prototipagem, frequentemente por meio de técnicas tradicionais de fabricação, como o processo de circuitos impressos.

Por outro lado, em aplicações que exigem adaptação a superfícies curvas ou não planas, os materiais flexíveis apresentam uma vantagem significativa, devido à sua capacidade de adaptação a diferentes formatos geométricos. Essa característica os torna particularmente adequados para projetos em que a rigidez do substrato possa comprometer a funcionalidade ou a integridade da estrutura.

3.5 Técnicas de medição

Diversos métodos podem ser utilizados para obter as características de transmissão e reflexão de uma FSS. Segundo [54], uma das técnicas mais tradicionais para medir a transmitância consiste em posicionar a estrutura a ser caracterizada entre um par de antenas diretivas com ganhos conhecidos, sendo uma transmissora e a outra receptora. Nessa configuração, como a FSS é o único obstáculo no caminho direto da propagação, ela atuará como um filtro seletivo de frequência sobre a onda eletromagnética irradiada. Assim, com base no sinal captado pela antena receptora, é possível mapear a resposta em frequência da estrutura, identificando sua assinatura espectral a partir da potência recebida. A Figura 3.7 ilustra graficamente essa técnica de medição.

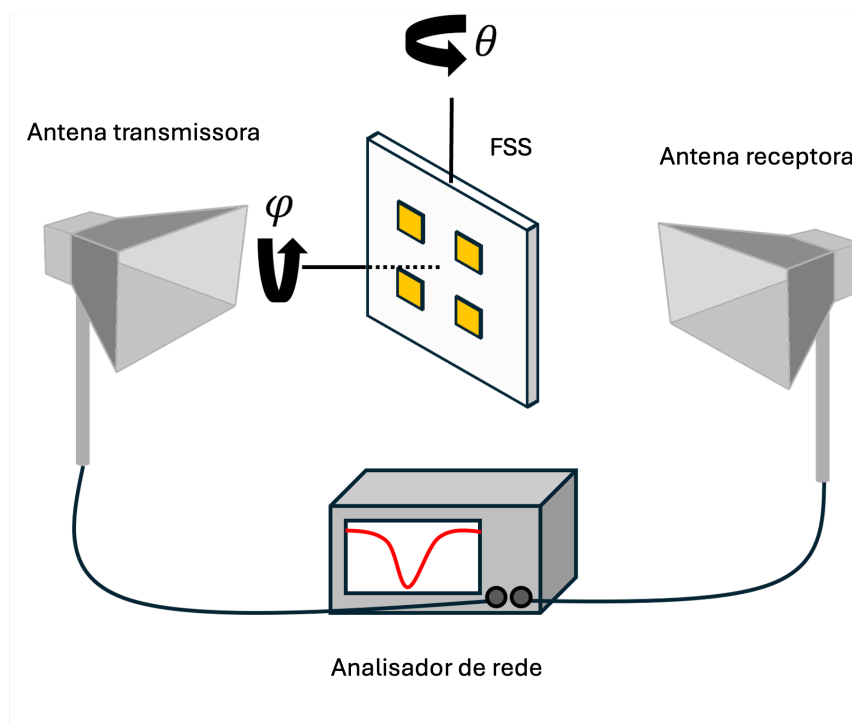


Figura 3.7: Diagrama do método de medição de uma FSS no espaço livre.

Como ilustrado na Figura 3.7, esse mesmo arranjo experimental pode ser facilmente adaptado para caracterizar o comportamento da FSS sob incidência oblíqua, bastando ajustar a angulação da estrutura, indicada pelo ângulo θ na figura. De forma análoga,

a alteração da polarização das antenas de vertical para horizontal permite a obtenção da resposta da FSS para diferentes modos de polarização da onda incidente, possibilitando a análise das características de transmissão para os modos TE (Transversal Elétrico) e TM (Transversal Magnético).

Na literatura, são descritas diversas técnicas para caracterização de FSSs [55–57]. Algumas variações do arranjo experimental ilustrado na Figura 3.7 incluem, por exemplo, a utilização de lentes posicionadas entre as antenas e a FSS. Essa abordagem visa mitigar os efeitos de difração nas bordas da estrutura, desde que a FSS seja iluminada por um feixe Gaussiano estrito, gerado pelas lentes [27]. Outra técnica semelhante consiste na aplicação de absorvedores nas extremidades da FSS, o que também contribui para a atenuação das difrações de borda, melhorando a precisão da medição.

De forma alternativa aos métodos de medição em espaço livre, [43] descreve uma técnica que utiliza guias de onda, com o objetivo de mitigar os efeitos de difração. Nessa abordagem, a célula unitária da FSS a ser caracterizada é inserida diretamente no interior do guia de onda, permitindo a análise da resposta eletromagnética de forma controlada e confinada. A Figura 3.8 apresenta um diagrama representativo do arranjo experimental baseado em guia de ondas.

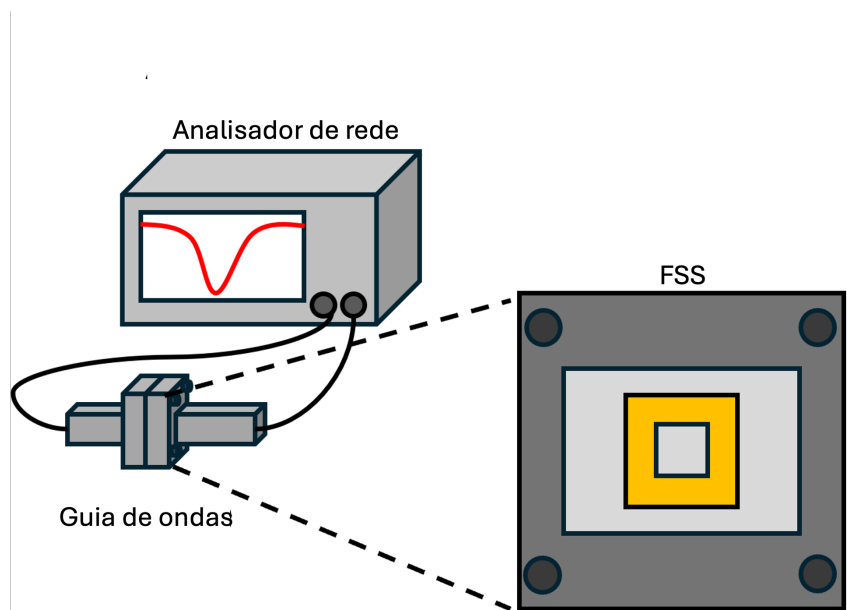


Figura 3.8: Diagrama do método de medição de uma FSS utilizando guia de ondas.

Esse arranjo experimental simula uma FSS infinita em espaço livre, porém apresenta limitações impostas pelas dimensões físicas do guia de onda. A principal restrição refere-se à faixa de frequências analisável, que é reduzida devido ao comportamento do guia como filtro passa-faixa. Além disso, a célula unitária da FSS deve ser projetada de forma a se ajustar com precisão às dimensões do guia utilizado, a fim de garantir a preservação da periodicidade da estrutura e, conseqüentemente, a precisão das medições.

Por fim, conclui-se que, entre as diversas técnicas existentes para a caracterização das propriedades de transmissão de uma FSS, os métodos em espaço livre oferecem maior flexibilidade. Esses arranjos experimentais permitem, em um único setup, a análise de parâmetros adicionais relevantes, como a estabilidade frente a variações angulares e de polarização.

3.6 Técnicas de análise

As equações aproximadas para a análise e projeto de FSS são amplamente abordadas na literatura, sendo comumente empregadas para determinar as características de trans-

missão e reflexão de ambos os tipos de estruturas, as do tipo *patch* e suas complementares, do tipo abertura. Tais modelagens levam em consideração aspectos físicos cruciais da estrutura, como dimensões, geometria do *patch*, tipo de substrato e suas propriedades elétricas. No entanto, esses métodos apresentam limitações significativas, com uma perda de precisão na predição do comportamento das estruturas conforme a frequência analisada aumenta [30].

Com o avanço das tecnologias computacionais, surgiram os Métodos de Onda Completa, caracterizados por formulações matemáticas detalhadas. Embora exijam maior esforço computacional e analítico, esses métodos oferecem a vantagem de fornecer resultados mais precisos, mesmo em frequências elevadas, quando comparados às abordagens aproximadas [31]. Entre os principais métodos empregados, destacam-se:

- **Método dos momentos (method of moments - MoM):** utiliza uma discretização integral das equações de Maxwell para resolver problemas eletromagnéticos. É eficaz para estruturas com geometria bem definida e é amplamente utilizado para análise de FSSs planas.
- **Método dos elementos finitos (finite-element method - FEM):** divide o domínio em elementos menores, permitindo a análise de estruturas complexas e materiais heterogêneos. É particularmente útil para FSSs com substratos dielétricos não uniformes ou geometria tridimensional.
- **Método das diferenças finitas no Domínio do Tempo (finite-difference time domain - FDTD):** simula a evolução temporal dos campos eletromagnéticos, sendo eficaz para estruturas com características transientes ou não lineares.

Os métodos acima mencionados podem facilmente ser implementados, uma vez que atualmente são os métodos empregados nas principais ferramentas computacionais comerciais encontradas. Nas próximas seções, serão abordados dois métodos conhecidos como alternativos, pois são métodos aproximados que demandam menor esforço computacional e possuem boa precisão quando comparados aos métodos de onda completa.

3.6.1 Método WCIP

A análise pelo método iterativo das ondas da sigla em inglês (WCIP) baseia-se na relação entre as ondas incidentes \vec{A}_i e as ondas refletidas \vec{B}_i , conforme ilustrado na Figura 3.9.

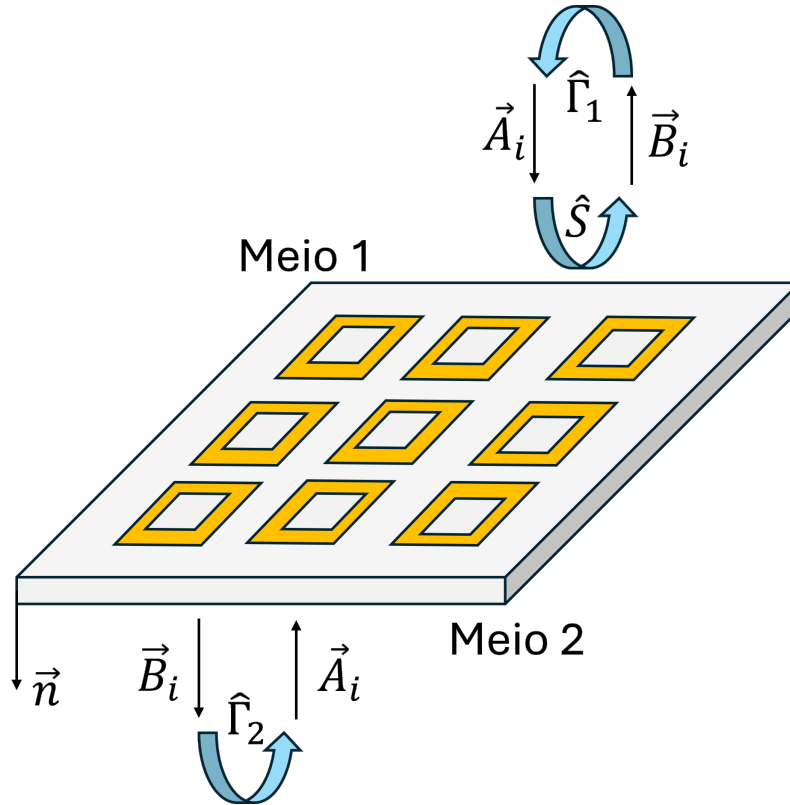


Figura 3.9: Representação gráfica das ondas incidentes e refletidas utilizadas na formulação do método iterativo das ondas. Adaptado de [58].

Essas ondas são descritas pelos componentes tangenciais do campo elétrico \vec{E}_i e pelas densidades de corrente de superfície \vec{J}_i . Além disso, considera-se Z_{0i} , que representa a impedância característica do substrato dielétrico, conforme indicado nas Equações 3.4 e 3.5 [59].

$$\vec{A}_i = \frac{1}{2\sqrt{Z_{01}}}(\vec{E}_i + Z_{0i}\vec{J}_i) \quad (3.4)$$

$$\vec{B}_i = \frac{1}{2\sqrt{Z_{01}}}(\vec{E}_i - Z_{0i}\vec{J}_i) \quad (3.5)$$

A análise pelo método WCIP é realizada em dois domínios: o domínio espacial e o domínio modal. Trata-se de um processo iterativo que se baseia nas relações entre os componentes das ondas incidentes e refletidas. Esses componentes são calculados em cada iteração utilizando as Equações 3.6 e 3.7.

$$\vec{B}_i^{(n)} = \hat{S}\vec{A}_i^{(n)} + \vec{A}_i^{(n)} \quad (3.6)$$

$$\vec{A}_i^{(n)} = \hat{\Gamma}\vec{B}_i^{(n)} \quad (3.7)$$

Na Equação 3.6, \hat{S} descreve o comportamento da onda EM incidente na superfície da estrutura no domínio espacial, $\hat{\Gamma}$ é a relação na interface de dois dielétricos e é considerada no domínio espectral. Em ambas as Equações 3.6 e 3.7 i é o meio dielétrico ou condutor e n é o número da iteração.

Em todas as iterações, a transição entre os domínios espacial e modal é realizada aplicando a transformada modal de Fourier, da sigla em inglês FMT [60].

3.6.2 Método do circuito equivalente

Dentre os métodos alternativos para análise de circuitos, o método do circuito equivalente da sigla em inglês ECM é um dos que exigem o menor esforço computacional necessário. Dessa forma, esse método se mostra muito útil quando o objetivo é verificar o comportamento de uma estrutura de forma rápida, sem abrir mão da eficácia. Um dos pontos mais importantes no ECM está no fato de este método ser baseado em aproximações matemáticas, onde os segmentos condutores que formam a estrutura do circuito em análise são modelados como componentes capacitivos e indutivos.

Seguindo a modelagem matemática apresentada por [61], o ponto inicial é baseado na extrapolação de um arranjo infinito de fitas condutoras de espessura quase nula, distribuídas de forma paralela, como mostra a Figura 3.10.

No caso onde a onda EM incide sobre os elementos condutores, considerando o vetor campo elétrico \vec{E} paralelo à distribuição das fitas, um efeito indutivo acontece, uma vez que o fluxo de elétrons irá percorrer esses elementos. Esse caso está representado na

Figura 3.10(a), onde a equação que descreve a reatância indutiva equivalente é dada por 3.8 [62].

$$\frac{X_L}{Z_0} = F(p, w, \lambda, \phi) = \frac{p \cdot \cos(\phi)}{\lambda} \left\{ \ln \left[\csc \left(\frac{\pi \cdot w}{2p} \right) \right] + G(p, w, \lambda, \phi) \right\} \quad (3.8)$$

Onde G, um fator de correção, é obtido através de 3.9, 3.10 e 3.11, λ é o comprimento de onda no espaço livre:

$$G(p, w, \lambda, \phi) = \frac{0.5 \cdot (1 - \beta^2)^2 \left[\left(1 - \frac{\beta^2}{4}\right) \cdot (A_+ - A_-) + 4\beta^2 \cdot A_+ \cdot A_- \right]}{\left(1 - \frac{\beta^2}{4}\right) \cdot \beta^2 \cdot \left(1 - \frac{\beta^2}{2} - \frac{\beta^2}{8}\right) \cdot (A_+ - A_-) + 2\beta^6 \cdot A_+ \cdot A_-} \quad (3.9)$$

$$A_{\pm} = \frac{1}{\sqrt{1 \pm \frac{2p \cdot \sin(\phi)}{\lambda} - \left(\frac{p \cdot \cos(\phi)}{\lambda}\right)^2}} - 1 \quad (3.10)$$

$$\beta = \sin \left(\frac{\pi \cdot w}{2 \cdot p} \right) \quad (3.11)$$

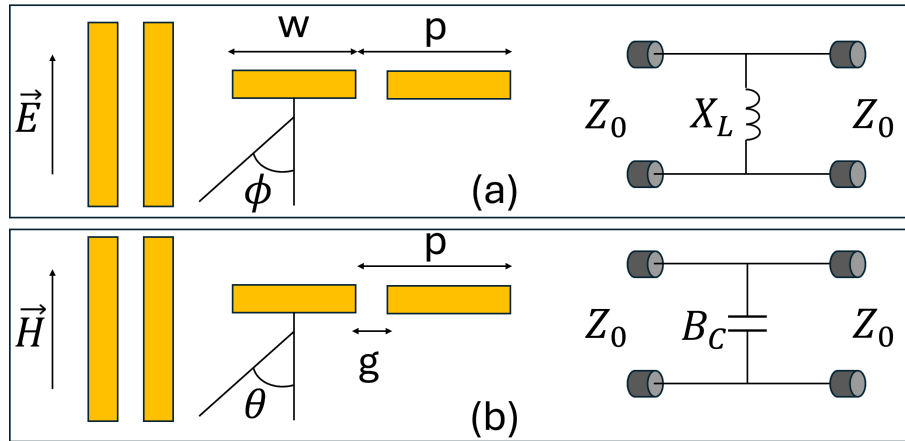


Figura 3.10: Modelagem por circuito equivalente e suas principais considerações: fitas condutoras paralelas de espessura desprezível, ângulo de incidência da onda TEM e circuito equivalente: a) incidência TE; b) incidência TM.

Similar à aproximação feita para o caso da incidência TE, para a incidência TM, é considerado o vetor campo magnético \vec{H} incidindo sobre as fitas condutoras de forma paralela com ângulo θ . Esse caso é demonstrado na Figura 3.10(b), um efeito capacitivo

acontece, uma vez que o campo elétrico \vec{E} está em posição perpendicular ao arranjo periódico. A equação que descreve a susceptância capacitiva equivalente é aproximada por 3.12:

$$\frac{B_C}{Z_0} = 4 \cdot F(p, w, \lambda, \theta) \cdot \left\{ \ln \left[\csc \left(\frac{\pi \cdot w}{2 \cdot p} \right) \right] + G(p, w, \lambda, \theta) \right\} \quad (3.12)$$

É preciso mencionar que as equações descritas entre 3.8 e 3.12 só são válidas para valores do comprimento de onda e ângulo de incidência que se encontram no intervalo de $p \cdot (1 + \sin(\theta)) / \lambda < 1$.

3.7 Aplicações com FSS

Nesta seção, serão apresentadas algumas aplicações que fazem uso de FSS. É preciso destacar que a versatilidade, fácil implementação, técnicas de projeto e análise colaboram para que esse tipo de estrutura seja cada vez mais utilizado, tanto na indústria quanto na academia. Um número expressivo de novas aplicações tem surgido e demonstrado como esses dispositivos podem ser eficazes em vários âmbitos.

Muitas aplicações modernas das FSS estão relacionadas à grande área das telecomunicações. Dentre as principais aplicações na área de telecomunicações, é possível destacar o desenvolvimento de FSS para aprimorar o ganho de antenas [63–66]. Outra aplicação que essas estruturas possuem grande eficácia e, dessa forma, são amplamente empregadas na área de Interferência Eletromagnética, da sigla em inglês (EMI) [67–69]. Pode-se mencionar também, no universo de antenas MIMO, onde as FSS têm sido aplicadas para reduzir o acoplamento entre os elementos [70–73].

As FSS também encontram grande serventia em aplicações estratégicas em áreas críticas como a militar. Alguns exemplos podem ser mencionados sobre essas aplicações, por exemplo, na área de segurança de aeronaves, com a implementação de FSS que ajudam a reduzir a seção transversal de radar ou do inglês *Radar Cross-Section* (RCS) [74–76]. Esse tipo de estrutura tem sido cada vez mais relevante nas aplicações militares, principalmente em aviões do tipo *stealth*, uma vez que, com os avanços das tecnologias de co-

municação, desenvolver técnicas eficientes de redução do RCS tem se tornado um grande desafio e o uso de estruturas como FSS mostra-se promissor nessa área.

Entre as implementações práticas, destacam-se por exemplo coberturas para antenas (radomes) [77], refletores [78], componentes satelitais [79], dispositivos absorvedores [80], entre outras aplicações [81]. Um exemplo comum no cotidiano é o visor metálico perfurado presente em fornos micro-ondas, que funciona como um filtro rejeita-faixa; essa configuração periódica de aberturas permite a passagem da luz visível, ao mesmo tempo em que atenua significativamente ondas eletromagnéticas na faixa de 2,45 GHz [27].

Em ambientes internos (*indoor*), essas superfícies seletivas oferecem soluções inovadoras para o controle da propagação de ondas em edificações. Sua utilização pode reduzir interferências entre sinais, aumentando a eficiência e a segurança de redes sem fio. Além disso, podem atuar como barreiras seletivas, bloqueando a penetração de sinais externos em determinadas faixas de frequência, ao mesmo tempo em que confinam a radiação interna, favorecendo o controle eletromagnético do ambiente [27].

No caso de aplicações voltadas à absorção de micro-ondas, a integração de estruturas periódicas permite otimizar o desempenho dos dispositivos ao modificar suas características de reflexão. Esses elementos possuem importância estratégica em contextos tanto militares quanto civis, atuando como dissipadores de energia eletromagnética. Quando aplicados em superfícies de veículos, aeronaves ou embarcações, contribuem para a redução da assinatura radar, dificultando a detecção por sistemas de vigilância ao minimizar a reflexão de ondas [80].

3.8 Sensores baseados no funcionamento de FSS

3.8.1 FSS ultraminiaturizada aplicada em sistema de sensoriamento da temperatura

O principal objetivo do trabalho apresentado em [82] foi desenvolver uma superfície seletiva em frequência para aplicação em sensores, de modo que o dispositivo proposto tivesse alta sensibilidade e dimensões reduzidas, a nível de ser categorizada como ultra-

miniaturizada, para que esse dispositivo fosse aplicado na determinação de temperatura. Como método, foi proposto um dispositivo passivo, planar e sem fios, que atuará como um sensor para detecção de temperatura. Este sensor utiliza uma abordagem que combina a técnica de inserção de trajetória (2,5D) com uma geometria convoluta melhorada.

A estratégia adotada contribuiu para potencializar os efeitos capacitivos e indutivos na estrutura, o que foi crucial para conseguir uma redução significativa das dimensões da célula unitária do dispositivo e aumentar e também de forma a melhorar a sua sensibilidade às variações físicas. O processo de detecção foi efetuado através da medição do coeficiente de transmissão do circuito com a temperatura do substrato, onde a faixa de variação teve valores entre 20° a 120°C , validando que o sensor proposto com temperaturas medidas com um termômetro infravermelho e modelado através de uma equação que forneça a relação entre a temperatura e a frequência de ressonância medida. A Figura 3.11 mostra um *overview* do trabalho apresentado em [82] e adaptado nesta tese.

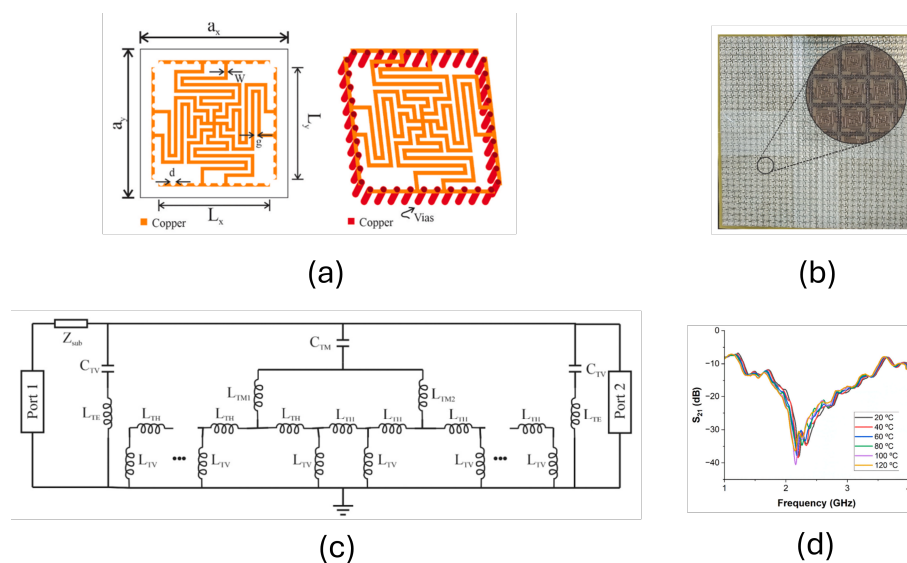


Figura 3.11: FSS aplicada como sensor de temperatura: a) geometria da célula unitária; b) protótipo construído da FSS; c) circuito equivalente; d) resultados medidos do coeficiente de transmissão para diferentes temperaturas. Adaptado de [82].

Além disso, foi desenvolvida uma caracterização numérica da estrutura da FSS, utilizando o software comercial ANSYS HFSS, onde foi feita a análise de circuito equivalente

e validações experimentais, onde foram analisadas estruturas de *patches* condutivos 2,5D. O protótipo final proposto foi construído e medido, e seus resultados mostraram boa concordância com os simulados.

3.8.2 Sensor de líquido baseado em FSS

No trabalho apresentado em [83], os autores desenvolveram um sensor capaz de mensurar as características elétricas de diferentes amostras de líquidos, baseando suas análises na resposta em frequência de uma FSS. A estrutura escolhida foi uma FSS do tipo espira quadrada, devido às suas características de estabilidade angular e largura de banda. As dimensões do dispositivo projetado foram otimizadas para que fosse possível utilizar as aberturas entre os elementos como canais para que o líquido pudesse ser inserido.

A técnica adotada para a realização das medições consistiu em analisar a variação da resposta em frequência da estrutura a partir da inserção de diferentes tipos de líquidos em canais projetados sobre o material dielétrico. Como ferramenta de análise e projeto, foram realizadas simulações no software comercial CST, considerando distintos valores de permissividade relativa nas regiões destinadas à inserção dos líquidos. A partir dessa análise, foi possível desenvolver dois modelos matemáticos capazes de correlacionar a permissividade relativa e a tangente de perdas dos líquidos com o deslocamento observado na resposta em frequência da FSS. A Figura 3.12 apresenta uma visão geral do trabalho desenvolvido em [83], adaptado e incorporado neste estudo.

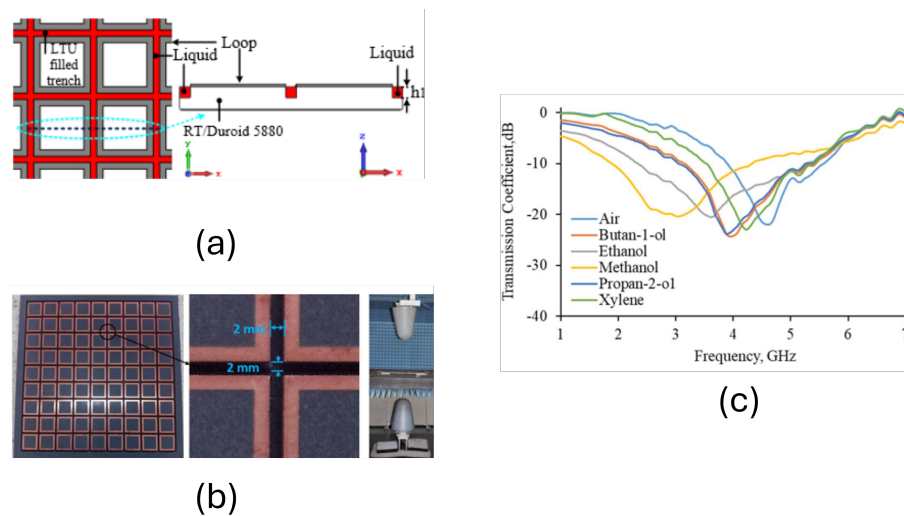


Figura 3.12: FSS utilizada como sensor de temperatura: a) geometria da célula unitária; b) protótipo construído da FSS e setup de medição; c) resultados medidos para 5 tipos diferentes de líquidos. Adaptado de [83].

O protótipo foi construído e validado experimentalmente, sendo testado com cinco tipos distintos de líquidos: etanol, butanol, metanol, álcool isopropílico e xilenol. Além da verificação da resposta em frequência para cada substância, foi conduzido um estudo detalhado sobre a sensibilidade do dispositivo. Os resultados demonstraram um desempenho promissor. Um estudo sobre o comportamento do dispositivo apresentou valores de sensibilidade máxima de 8.65%, o que reforça sua aplicabilidade em cenários onde é necessária a detecção precisa de variações nas propriedades dielétricas dos líquidos analisados.

3.8.3 FSS utilizada como sensor para a verificação de deformação

No trabalho apresentado em [84], os autores desenvolveram um sensor capaz de mensurar as características de deformação de uma estrutura externa através da mudança na frequência de ressonância da FSS. A estrutura escolhida foi uma FSS do tipo dipolo cruzado, devido às suas características de estabilidade angular e largura de banda. As dimensões do dispositivo projetado foram otimizadas para que fosse possível utilizar a deformação para atingir uma frequência máxima de 3,1 GHz. A estrutura foi construída

com um material flexível como dielétrico, nesse caso, uma borracha feita de silicone, e para o material condutivo, foi empregado um papel feito de cobre.

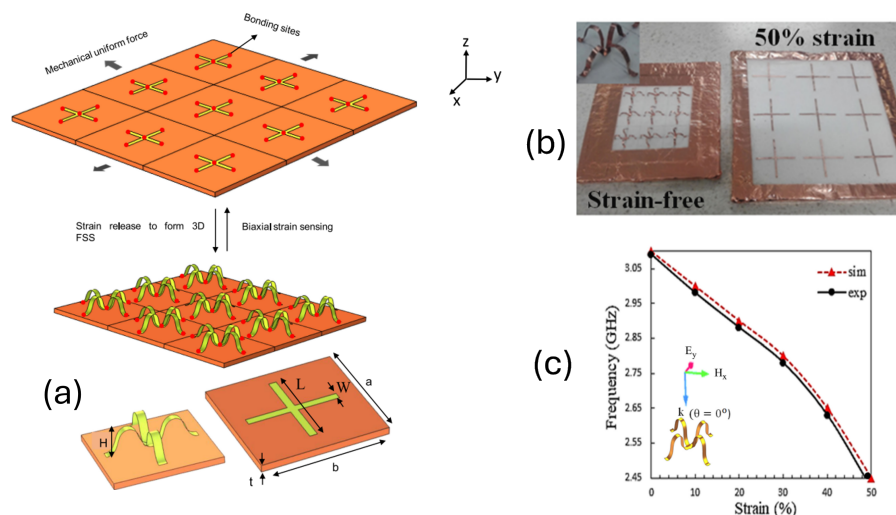


Figura 3.13: FSS aplicada como sensor de deformação: a) geometria da célula unitária e sua evolução; b) protótipo construído original e após aplicado 50% de deformação. c) resultados medidos para 5 tipos diferentes de deformação percentual. Adaptado de [84].

A técnica adotada para a execução das medições consistiu em analisar a variação da resposta em frequência da estrutura ao submeter a FSS a diferentes deformações simétricas nos sentidos horizontal e vertical. Como método de análise e projeto, foram realizadas simulações utilizando o software comercial COMSOL v.5.4 [85], organizadas em três etapas principais: (1) simulação eletromagnética completa do elemento original, por meio do Método dos Momentos, cuja resposta apresentou ressonância em 2,4 GHz; (2) simulação mecânica, na qual a estrutura foi submetida a deformações variando de 0 a 50% do substrato; e (3) nova simulação eletromagnética da estrutura deformada, correspondente a 50% de deformação. A partir dessa análise, foi possível modelar a relação entre a deformação percentual e a variação da frequência ressonante, observando um comportamento linear. A Figura 3.13 apresenta uma visão geral (*overview*) do trabalho desenvolvido em [84] e adaptado neste estudo.

O protótipo foi construído e validado experimentalmente, sendo submetido a cinco níveis distintos de deformação percentual, variando de 0% a 50%. Os testes confirmaram

a resposta prevista em simulação, demonstrando a relação linear entre o grau de deformação aplicado e a variação da frequência ressonante da FSS, validando a sensibilidade e a reprodutibilidade do dispositivo proposto.

3.9 Conclusão do capítulo

Neste capítulo, foram discutidas as principais características das FSS, incluindo os diferentes tipos de geometrias empregadas e sua influência direta na resposta em frequência do dispositivo. Também foram abordados os substratos comumente utilizados, destacando-se as propriedades que os tornam particularmente atrativas na construção dessas estruturas.

Além disso, foram apresentadas as principais técnicas de medição utilizadas para a caracterização das FSSs, bem como exemplos de aplicações práticas, evidenciando como esses dispositivos têm sido explorados tanto para otimizar técnicas já consolidadas quanto para viabilizar novas abordagens em diversas áreas do conhecimento.

Dessa forma, com base nos tópicos discutidos, conclui-se que o uso de FSSs em aplicações multidisciplinares se mostra uma escolha lógica e estratégica, dada a elevada flexibilidade desses dispositivos em termos de projeto, aplicação e modelagem eletromagnética.

Capítulo 4

Revisão sistemática e análise de resultados

Neste capítulo, será apresentada uma revisão sistemática da literatura (RSL) sobre o estado da arte atual no que se refere ao desenvolvimento de sensores para o reconhecimento de gestos ou movimentos manuais. É importante destacar que, na literatura correlata à temática da pesquisa, diversos métodos têm sido propostos para a captação desses movimentos, com ênfase nas tecnologias de captura por meio de câmeras, que fazem uso do processamento das imagens obtidas e métodos que fazem a captação a partir de uma luva de dados (*Data glove*). Dessa forma, os dispositivos podem ser classificados em dois grupos principais: aqueles que utilizam, e aqueles que não utilizam, *Data gloves* para a aquisição dos dados. A Figura 4.1 apresenta de forma resumida os principais métodos encontrados na literatura aplicados ao reconhecimento de gestos manuais.

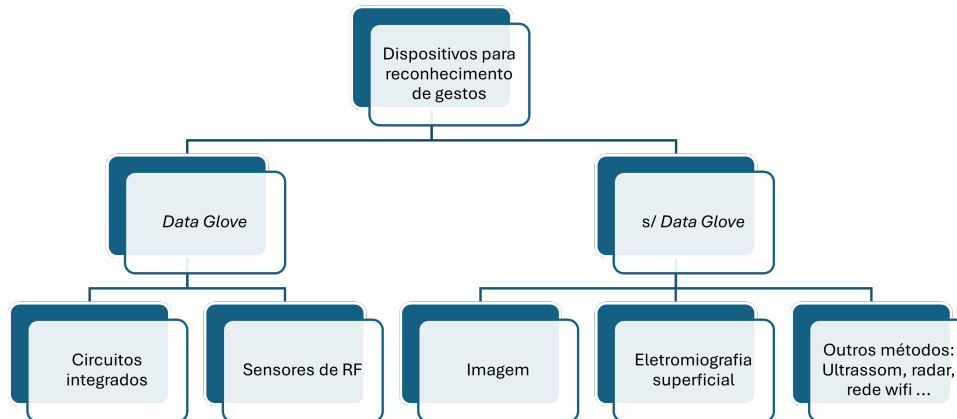


Figura 4.1: Principais técnicas encontradas na literatura aplicadas ao reconhecimento de gestos manuais.

4.1 Revisão sistemática da literatura

Um dos aspectos cruciais na definição de uma hipótese de pesquisa é a obtenção de uma visão abrangente sobre os principais pontos focais da literatura atual. Esse entendimento permite que os pesquisadores possam concentrar os seus esforços na complementação da área, na resolução de problemas atuais ou na proposição de novas perspectivas.

A forma mais eficaz de obter essa visão é por meio da revisão sistemática da literatura (RSL), pois seu objetivo é entender o que foi desenvolvido até o momento em um campo específico de pesquisa.

De acordo com [86], o primeiro passo na execução de uma RSL consiste na especificação de um protocolo de pesquisa, que seja amplo, porém focado na questão do estudo. Esse protocolo consiste em executar a busca e a seleção dos estudos relacionados à temática do trabalho atual; da mesma forma, devem ser formulados quais são os critérios e ferramentas que serão utilizados para que seja executada a avaliação da qualidade e quais as estratégias utilizadas na extração dos dados para posterior síntese e análise dos dados

obtidos.

Após a definição do protocolo, é feita a busca e coleta dos resultados nas bases de dados consideradas relevantes na área da pesquisa. Com os artigos extraídos na busca, é necessário aplicar a filtragem dos mesmos, baseada em critérios de inclusão e de exclusão (I/E).

Feita a filtragem dos trabalhos encontrados, é necessária a análise e avaliação da qualidade das pesquisas que não foram excluídas. Posteriormente, extrair os dados desses trabalhos de forma que seja possível responder às questões da RSL.

Por último, com os dados extraídos dos trabalhos que estão validados e relacionados à temática da pesquisa, é possível realizar a síntese dos dados de forma a analisar os resultados e quais conclusões foram tomadas com base nessas informações. Esses passos são detalhados nas próximas seções.

4.2 Definição do protocolo

Um ponto muito importante na execução de uma RSL consiste em definir qual o objetivo que se deseja alcançar com esse levantamento, de forma a obter trabalhos com temáticas que agreguem à pesquisa atual. Da mesma forma, nessa definição, é englobado também quais as bases que serão utilizadas como ferramentas de obtenção dos trabalhos relacionados à pesquisa.

Neste trabalho, foram definidos como partes do protocolo de busca e obtenção de pesquisas relacionadas os seguintes pontos:

- **Objetivo:** entender e categorizar quais são as principais técnicas de RF que fazem uso de FSS para o reconhecimento de gestos manuais.
- **Bases de dados:** Web Of Science.
- **Critérios de exclusão:**
 - Artigos publicados a partir de 2019.
 - Artigos do tipo *review*.
 - Artigos secundários.

- Artigos que não sejam escritos em língua português ou inglês.
- Artigos duplicados.

Com a definição do protocolo, é então possível iniciar as buscas pelos trabalhos relacionados ao tema da pesquisa atual. Os dados são detalhados nas seções a seguir.

4.3 Obtenção de estudos similares

4.3.1 Definição da *string* de busca

Para identificar trabalhos relacionados ao estudo em questão, foi realizado um levantamento sistemático na base de dados mencionada na Seção 4.2. A construção da estratégia de busca seguiu três etapas principais:

1. **Identificação de termos-chave** através de análise de artigos seminais e nuvem de palavras (Figura 4.2).
2. **Refinamento léxico** com operadores booleanos e sinônimos.
3. **Filtragem por critérios metodológicos.**

A Figura 4.2 sintetiza os principais conceitos identificados, destacando termos como *wearable*, FSS (*Frequency-Selective Surface*) e *gesture recognition* como centrais para a pesquisa.

Tabela 4.1: Tabela de pesquisa bibliográfica

Palavra chave	Eixo 1	<i>Frequency selective surface; Frequency-selective surface; FSS.</i>
	Eixo 2	<i>Wearable; Textile; Flexible; Gesture recognition; Hand gesture recognition; Sign language recognition; Gesture monitoring.</i>
Operador	Booleano	<i>AND</i> Aplicado entre os Eixos
		<i>OR</i> Aplicado entre palavras chaves do mesmo eixo.
	Truncamento	Idioma do artigo: português e inglês
		Tipos de publicação: artigos de periódicos.
		Período da publicação: 2019 - 2025.

Tabela 4.2: Resultados obtidos nas bases de dados com a entrada da *string*

Base	Web of science
Total de artigos	801

em outras bases como o **IEEEExplore** e **Scopus**, sendo o primeiro já englobado por essa base. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.2.

Como primeiro critério definido no protocolo para iniciar a análise dos resultados, foi verificado o tipo de artigo. Conforme estabelecido anteriormente, na meta-análise dos resultados, seriam considerados apenas artigos publicados em periódicos e nos idiomas português ou inglês. A Figura 4.3 apresenta o gráfico do tipo *treemap*, que ilustra os tipos de artigos publicados e encontrados na base de dados *Web of Science*.



Figura 4.3: *TreeMap* dos artigos retornados na base de dados *Web Of Science*.

Como pode ser visto na Figura 4.3, entre os 801 artigos totais, 183 publicados em anais de eventos e 26 do tipo *review*, isso determina a exclusão dos trabalhos seguindo os critérios de I/E determinados no protocolo. Portanto, foram analisados ao todo, um total de 592 artigos.

4.4 Análise bibliométrica dos resultados

Nessa seção serão apresentados as análises do levantamento bibliométrico dos resultados retornados da busca na base de dados *Web Of Science*. Entre os dados que foram categorizados para melhor entender como o atual trabalho se encaixa dentro do estado da arte, foram feitas análises sobre o número de publicações por ano, os tipos de técnicas utilizadas para a determinação dos dados e quais os métodos de reconhecimento dos gestos.

4.4.1 Publicações por ano

A Figura 4.4 apresenta a distribuição das publicações de artigos encontradas no período de 2010 a 2024. Vale destacar que esse intervalo foi estendido como critério para analisar a evolução do interesse dos pesquisadores no desenvolvimento de trabalhos rela-

cionados ao reconhecimento de gestos.



Figura 4.4: Distribuição do número de publicações por ano.

Como pode ser observado na Figura 4.4, o número de trabalhos publicados tem aumentado ao longo dos anos. O estudo mais antigo encontrado, conforme a metodologia adotada nesta RSL, foi publicado em 2004. O ano com o maior número de publicações até o momento foi 2024, com 195 trabalhos registrados. O ano de 2025, por sua vez, conta com um total de 9 trabalhos publicados, até o momento.

4.4.2 Publicações por periódico

A Figura 4.5 mostra como está a distribuição da publicação de artigos encontrados por periódico. Essa informação é importante pois, de forma gráfica, é possível visualizar quais as principais revistas acadêmicas estão sendo publicados esses trabalhos, de forma a ajudar os pesquisadores interessados aonde será possível encontrar com maior facilidade trabalhos relacionados ao desenvolvimento de metodologias para o reconhecimento de gestos manuais.

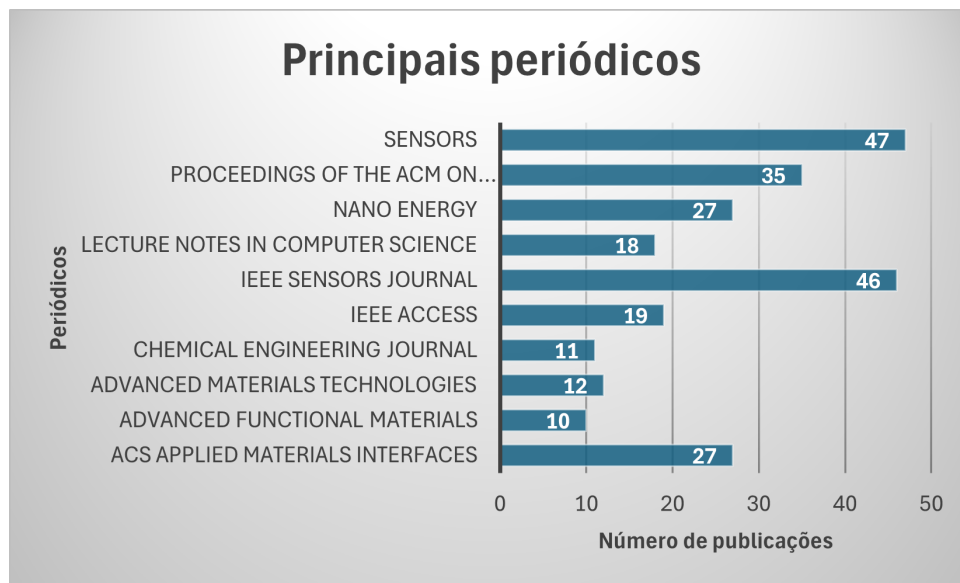


Figura 4.5: Distribuição do número de publicações por periódico.

Com base nas informações presentes na Figura 4.5, podemos destacar os 5 principais periódicos, sendo eles: Sensors, IEEE Sensors Journal, Proceedings of the ACM on Interactive Mobile Wearable and Ubiquitous Technologies (IMWUT), ACS Applied Interfaces e Nano Energy. Em comum entre as revistas destacadas, está o foco na divulgação de trabalhos relacionados a sensores e tecnologias que utilizam novos materiais.

4.4.3 Principais tópicos por métodos de aquisição de dados

A Figura 4.6 mostra os principais tópicos abordados nos artigos encontrados. Essa informação nos mostra qual o cenário atual, com base na literatura, onde os pesquisadores estão focando a aplicação de seus métodos. A Figura separa essa distribuição pelos métodos de obtenção dos dados, que são, principalmente, dois: o uso de imagem ou por meio da resposta de uma luva.

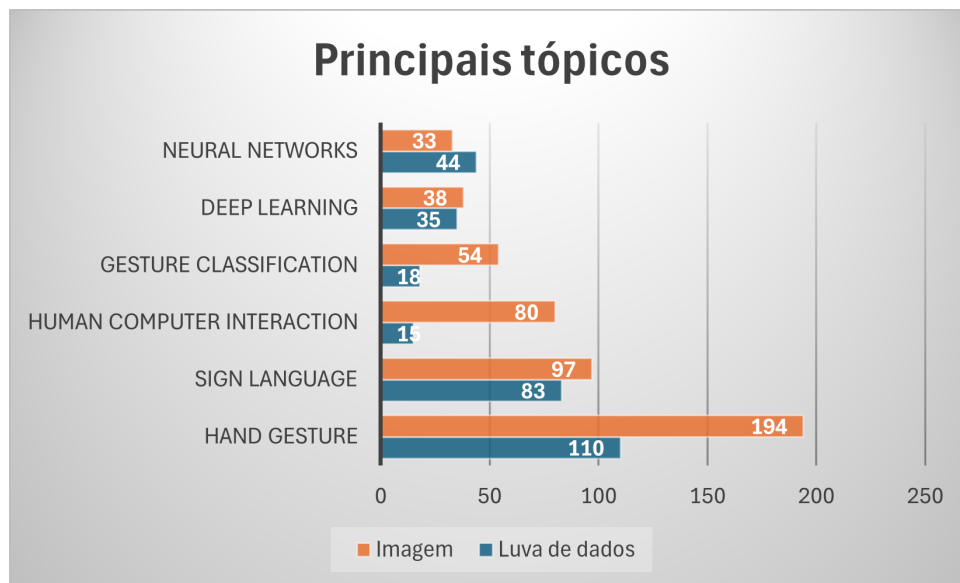


Figura 4.6: Distribuição do número de publicações por tópico baseado no método de aquisição.

Com base nas informações mostradas na Figura 4.6, é possível destacar que: Atualmente, na literatura, o principal método utilizado na aquisição de dados faz uso de dispositivos de captura de imagens, como, por exemplo, câmeras. Isso demonstra a importância de explorar o método de obtenção de dados através de protótipos de luvas. Outro ponto que pode ser mencionado é o fato de a grande maioria dos trabalhos, em ambos os métodos de aquisição, estar aplicada na detecção de gestos manuais ou na classificação desses gestos no uso da língua de sinais, o que demonstra a relevância desse tipo de estudo.

4.5 Trabalhos relacionados

Com base nos trabalhos encontrados nas buscas realizadas nas seções anteriores, ao todo, foram selecionados 3 trabalhos que mais se relacionam com o presente trabalho. Serão analisadas nesta seção as principais motivações para o desenvolvimento desses dispositivos, quais são suas vantagens e o que eles influenciaram na pesquisa que foi desenvolvida.

4.5.1 Sensor óptico para predição de língua de sinais

No trabalho desenvolvido em [87], foi proposto um dispositivo vestível baseado em medições da transmissão de sinais ópticos aplicado na detecção de diferentes gestos manuais. O processo de prototipagem consistiu no acoplamento de fibras ópticas do tipo monomodo em uma luva de borracha. O princípio de funcionamento de classificação de diferentes gestos foi baseado em dois parâmetros: 1) Na mudança do raio dos dedos ao mudar a sua posição; 2) Na atenuação do sinal para cada uma das posições e gestos diferentes. A Figura 4.7 mostra um resumo gráfico sobre o trabalho desenvolvido.

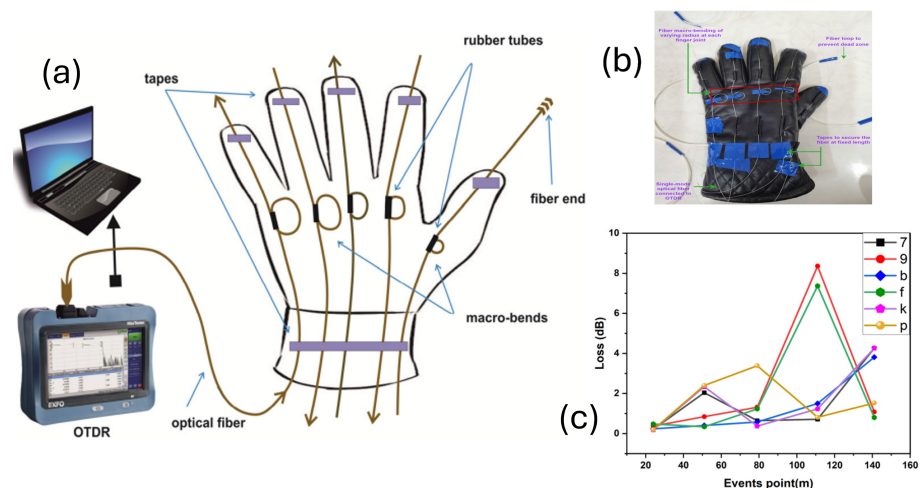


Figura 4.7: FSS aplicada como sensor de gestos: a) diagrama esquemática do *setup* de medições. b) protótipo construído. c) variação da atenuação para diferentes gestos manuais. Adaptado de [87].

Como pontos principais no trabalho desenvolvido em [87], é possível destacar a sensibilidade do método proposto, apresentando grandes mudanças para pequenas alterações na formação das posições manuais, possibilitando classificá-las em dois parâmetros. O uso do Reflectômetro Digital no Domínio do Tempo (OTDR, na sigla em inglês), possibilita também a obtenção de dados em tempo real, o que permitiria aos pesquisadores realizarem também gestos dinâmicos.

Como limitações do dispositivo, está a fragilidade das fibras ópticas, parte primordial no método apresentado. Outro ponto que pode ser destacado como negativo é a neces-

tidade de manter conexão com o OTDR utilizando fibras ópticas, o que torna a *setup* de medições pouco flexível.

4.5.2 Tag têxtil sem chip para reconhecimento de gestos

No trabalho realizado por [19] é apresentada uma proposta de etiqueta sem chip totalmente têxtil feita para ser integrada em uma luva. Em termos de materiais, foram empregados o NWCF da ADFORS Saint-Gobain para a fabricação de um protótipo da etiqueta proposta e um tecido de espessura de $0,11\text{mm}$, com $2,27 \cdot 10^5\text{S/m}$ de condutividade.

A etiqueta proposta por [19] é constituída de uma linha de microfita que pode ser carregada seletivamente com *stubs* de extremidade aberta. Essa linha de microfita é separada de cada stub com uma lacuna; a etiqueta é colocada em uma luva de forma que cada uma das lacunas que separam a linha de microfita dos stubs abertos fecha ou abre conforme é feito um movimento que altera a posição dos dedos.

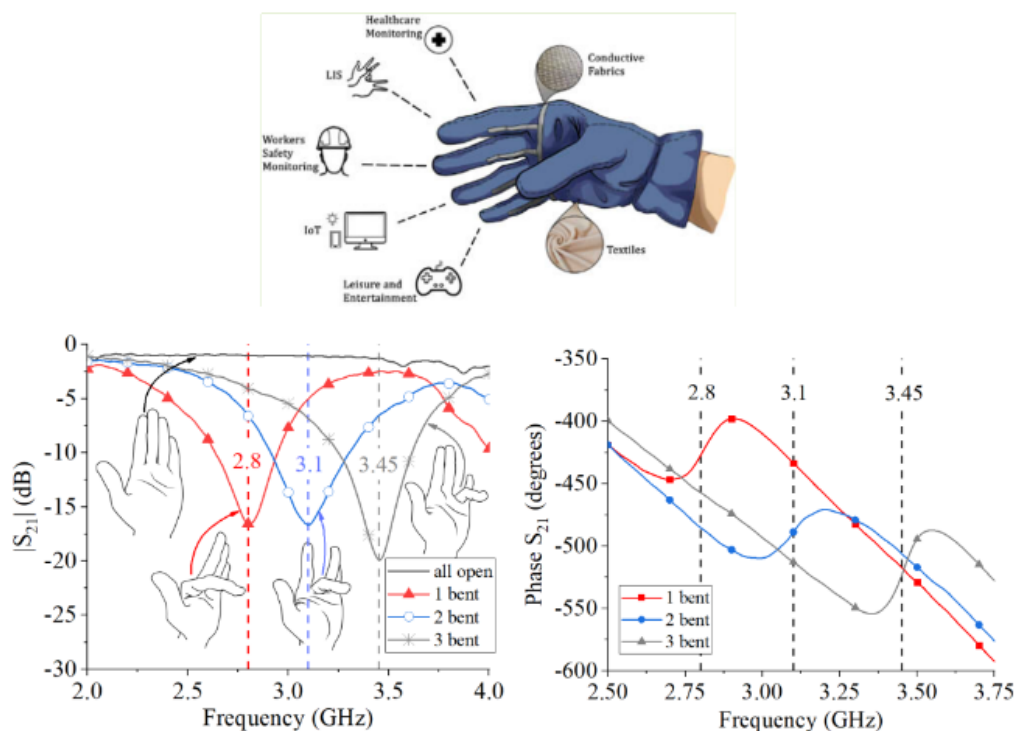


Figura 4.8: Método proposto para o reconhecimento de gestos a partir de uma etiqueta de microfita sem chip totalmente têxtil integrada em uma luva. Fonte: adaptado de [19]

No que diz respeito à parte dielétrica, foi utilizada uma camada com 1mm de espessura de tecido de pelúcia como substrato da estrutura da microfita, sendo este material comumente adotado em luvas. Os parâmetros do tecido são: $\epsilon_r = 1,18$ e $\tan(\delta) = 0,009$. Com a estrutura proposta, [19] conclui que é possível identificar a posição dos dedos a partir da inspeção do coeficiente de transmissão de uma linha de transmissão composta por uma linha de microfita carregada por um *stub*.

É possível pontuar como pontos fortes do trabalho a ausência de chip para processamento das informações, sendo elas obtidas e transmitidas via antenas acopladas ao dispositivo proposto. Como ponto negativo, fica a limitação da captação de gestos que mudem a posição da mão, uma vez que as mudanças na resposta do filtro são ocasionadas unicamente pela alteração da posição dos dedos.

4.5.3 Flexible and self- adhesive strain sensors (FSS) utilizada como sensor de reconhecimento de gestos

No trabalho desenvolvido em [88], os autores propõem a construção de um dispositivo do tipo *fabric-based strain sensors* baseado na geometria de um elemento condutivo do tipo anel com abertura. A prototipagem da FSS foi feita pelo método de transferência de tinta que era composta pela mistura de nanofolhas de grafeno (GNSs)/nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNTs). Essa mistura era transferida para uma fita adesiva, que funciona como tecido extensível através do método de impressão serigráfica.

A técnica utilizada para determinar a variação dos gestos foi acoplá-la a uma luva de tecido de algodão e medir a variação do fator de medida, que consiste no cálculo da resistência normalizada sobre o valor da tensão mecânica, como descrito na Equação 4.1.

$$GF = \frac{R - R_0}{R_0 \cdot \epsilon} = \frac{\Delta R}{R_0 \cdot \epsilon} \quad (4.1)$$

R_0 corresponde à resistência inicial da FSS, R descreve a resistência da FSS a uma tensão que varia de 0% a 30% e ϵ é o valor da tensão mecânica aplicada. Dessa forma, para diferentes gestos ocasionados pelo posicionamento dos dedos, foi possível mapear esses movimentos e classificá-los fazendo uso de um algoritmo de rede neural. A Figura

4.9 mostra um *overview* gráfico do trabalho apresentado em [88].

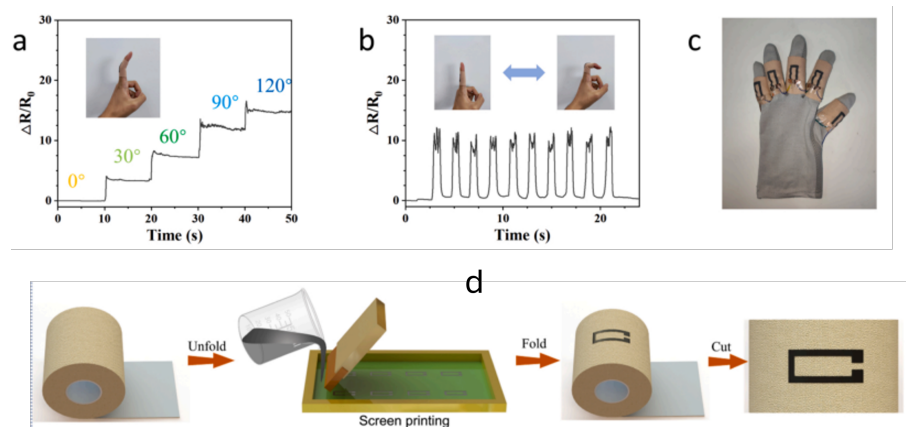


Figura 4.9: FSS aplicada como sensor de gestos: a) resposta de resistência normalizada da FSS. b) resposta de resistência normalizada da FSS. c) vista superior das luvas utilizadas para detecção. Adaptado de [88].

4.6 Conclusão do capítulo

Neste capítulo, foi apresentada a RSL desenvolvida durante toda a pesquisa. Foi feita a análise bibliométrica dos resultados encontrados na literatura, onde foi possível avaliar o desenvolvimento de trabalhos no que diz respeito a novos métodos para obtenção e classificação de gestos manuais e suas aplicações, como tradução de línguas de sinais e auxílio na interação homem-máquina.

Foram apresentados resultados referentes ao aumento de pesquisa no decorrer dos últimos anos, quais os principais periódicos que esses trabalhos estão sendo publicados, além de quais as principais técnicas utilizadas para classificar os dados obtidos.

Por fim, foram apresentados alguns dos trabalhos relacionados que mais se aproximam do objetivo final do trabalho proposto, ainda que utilizem abordagens ou técnicas distintas para alcançá-lo, apresentando suas características, pontos mais fortes que ensejaram o direcionamento para formular a hipótese atual e quais os pontos fracos, que ajudaram na orientação do que não deveria ser aplicado na pesquisa atual.

Capítulo 5

Metodologia e prototipagem

A pesquisa apresentada nesta tese é fundamentada na aplicação prática e no desenvolvimento de um dispositivo para o reconhecimento de gestos manuais utilizando FSS flexível e vestível. Com foco na contribuição do avanço da tecnologia de interfaces humano-máquina, a investigação engloba o levantamento do estado da arte para iniciar, então, com base nas lacunas atuais, o projeto, a prototipagem e a validação experimental do dispositivo, integrando abordagens teóricas e práticas.

Essa combinação permite estabelecer uma base sólida de conhecimento, alinhando a pesquisa aos desafios atuais, permitindo que a contribuição para futuras aplicações na área de tecnologias vestíveis e dispositivos interativos seja de maior impacto.

Além disso, o presente estudo é caracterizado por uma integração metodológica de fundamentação teórica, desenvolvimento do dispositivo e experimentação laboratorial. O embasamento teórico foi construído a partir de uma análise detalhada da literatura, enquanto as metodologias experimentais viabilizaram a avaliação de desempenho do dispositivo em condições reais de uso. Essa abordagem permite compreender, justificar e otimizar as soluções propostas, fortalecendo a relevância do trabalho no contexto acadêmico e tecnológico.

Até o momento, o que foi demonstrado durante a pesquisa é de caráter teórico. Porém, como descrito anteriormente, como objeto da pesquisa, é necessário implementar uma solução prática que possa ser utilizada no cenário atual do reconhecimento de gestos manuais e linguagem de sinais. A Figura 5.1 apresenta um fluxograma que ilustra os principais estágios do desenvolvimento da pesquisa.

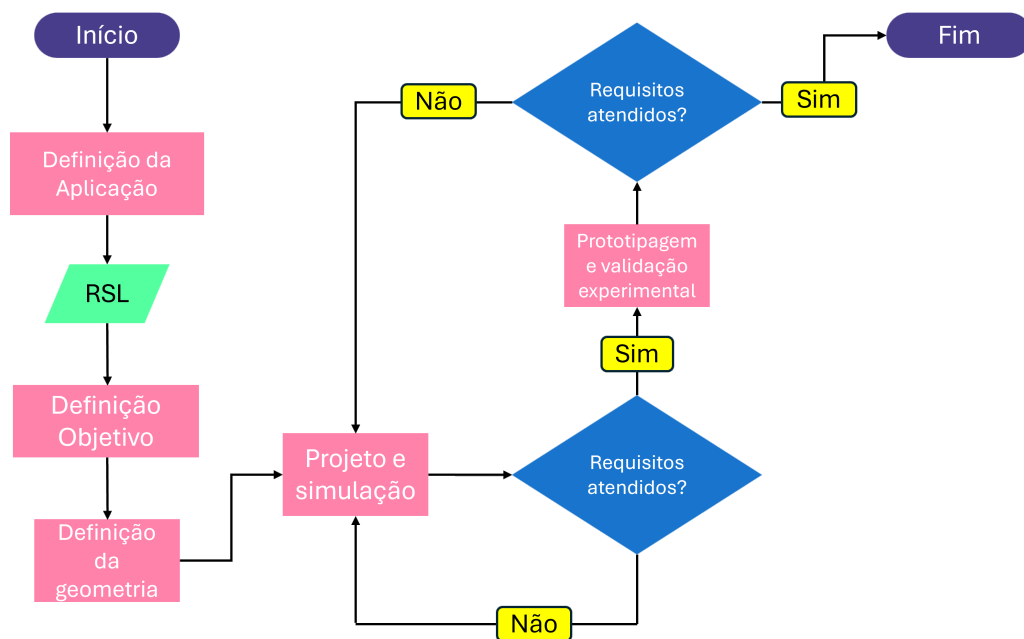


Figura 5.1: Fluxograma da metodologia desenvolvida neste trabalho.

Neste capítulo sobre a metodologia do trabalho, serão abordados dois aspectos principais:

- **Projeto e análise:** nessa etapa, o objeto da pesquisa, um dispositivo flexível e vestível aplicado no reconhecimento de diferentes gestos manuais é projetado, analisados por meio de diferentes métodos e simulados. Para isso, foram utilizados um software para simulação da geometria proposta e foi feita a modelagem matemática utilizando o método do circuito equivalente. Essa etapa tem como objetivo principal, entender de forma detalhada qual o comportamento da geometria e do dispositivo final ao interagir com ondas EM e com a mão humana.
- **Prototipagem e validação:** essa etapa engloba a prototipagem do dispositivo desenvolvido e a validação experimental do objeto proposto, de forma a confirmar os resultados em ambiente de laboratório. Essa etapa se mostra essencial para verificar a viabilidade e eficácia do dispositivo proposto, para sua posterior aplicação.

5.1 Desenvolvimento de uma FSS têxtil

Como um dos objetivos desta pesquisa era o desenvolvimento de um protótipo flexível e vestível, pensado especificamente para ser acoplado em uma luva de dados, o primeiro aspecto abordado na etapa de prototipagem consistiu no desenvolvimento de uma FSS que apresentasse propriedades de flexibilidade e compatibilidade com materiais têxteis. Essa característica era fundamental para garantir a integração adequada do dispositivo ao tecido da luva, preservando tanto a funcionalidade quanto o conforto no uso. Como critérios para a prototipagem da , que, após sua validação experimental e análise dos resultados obtidos, seria posteriormente acoplada à luva de dados, foram estabelecidos os seguintes parâmetros:

Tabela 5.1: Critérios de projeto

Critério	Descrição
Complexidade	Baixa
Comportamento	Dependente da polarização
Faixa de operação	5G sub-6GHz
Característica	banda estreita

Como justificativa aos pontos descritos na Tabela 5.1, é possível descrever.

- **Complexidade:** um dos pontos mais limitantes encontrados na etapa de prototipagem é a complexidade da geometria, uma vez que o dispositivo é do tipo têxtil. Portanto, após essa definição, foi estabelecido que a geometria teria o formato mais simples, ou próximo disso. Logo, foi escolhido o tipo circular.
- **Comportamento:** como a aplicação escolhida faz necessário a capacidade de identificar pequenas mudanças na posição original, uma estrutura simétrica e estável iria dificultar esse tipo de aplicação. Portanto, o emprego de uma estrutura dependente da polarização foi a que melhor se encaixa na aplicação proposta.
- **Faixa de operação:** nesse critério, o intuito foi dar maior flexibilidade aos *setups* de medição utilizados. Com o amplo desenvolvimento de novas pesquisas, e de-

envolvimento de novas tecnologias dentro do 5G, uma nova estrutura que opere dentro da faixa estabelecida pode facilitar a sua implementação em novas frentes.

- **Característica:** a definição da faixa estreita, diz respeito a facilidade de identificação das mudanças, pois, em uma estrutura com o comportamento de banda-larga, seria necessário investigar uma maior faixa do espectro, o que tornaria a análise mais complexa.

5.1.1 Design e evolução da geometria

Com o objetivo de conceber uma FSS adequada para dispositivos vestíveis no âmbito da tecnologia sem fio, ampliando o espectro de aplicações, o dispositivo foi projetado para operar na faixa de redes móveis, especificamente utilizando a banda operacional 5G sub-6 GHz, centrada na banda n78, que cobre o intervalo de 3,4 a 3,8 GHz. Foi desenvolvida uma célula unitária em forma de anel circular. O desenvolvimento e a evolução da geometria da célula unitária da FSS proposta são apresentados detalhadamente na Figura 5.2.

O elemento apresenta um comportamento de rejeita faixa, como ilustrado na Figura 5.2. O projeto inicial da célula unitária (v1), constituída por dois semicírculos, apresentava uma frequência de operação superior a 10 GHz devido ao seu pequeno tamanho, resultando em um comprimento elétrico reduzido. Para deslocar essa frequência, braços paralelos foram adicionados na versão v2, mas sem conexão. Essa modificação manteve a faixa de operação acima do intervalo desejado. Por fim, um elemento perpendicular foi introduzido na versão v3, conectando os braços e aumentando o comprimento elétrico, o que resultou em uma frequência de ressonância de 3,6 GHz, com uma largura de banda de 300 MHz.

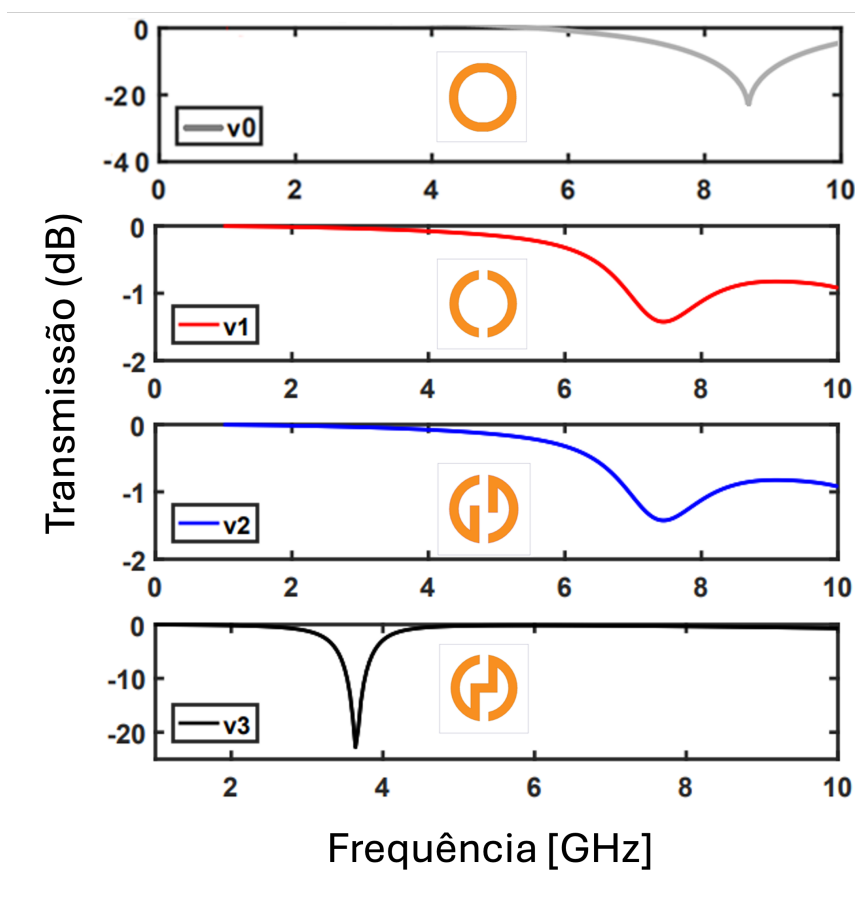


Figura 5.2: Evolução da geometria proposta, resultados simulados para a polarização TE.

A geometria assimétrica foi escolhida para se alinhar com requisitos específicos da aplicação. Todas as dimensões da célula unitária final estão detalhadas na Figura 5.7.

Neste trabalho, foram efetuadas simulações utilizando dois métodos para validar o projeto: o método de onda completa implementado através do software comercial Ansys HFSS e o modelo de circuito equivalente (ECM) utilizando o *Agilent advanced design system*. Uma aproximação de matriz infinita e elementos concentrados foram utilizados, com base nas características de modelagem da célula unitária, que têm as seguintes dimensões: $g = 2$ mm, $s = 2,02$ mm, $d = 4,4$ mm, $r = 7,5$ mm, e $W = 20$ mm. Note que a espessura do dielétrico foi obtida através do equipamento de medição paquímetro, onde foi considerado 0,2 mm, por se tratar de um tecido de filamento único.

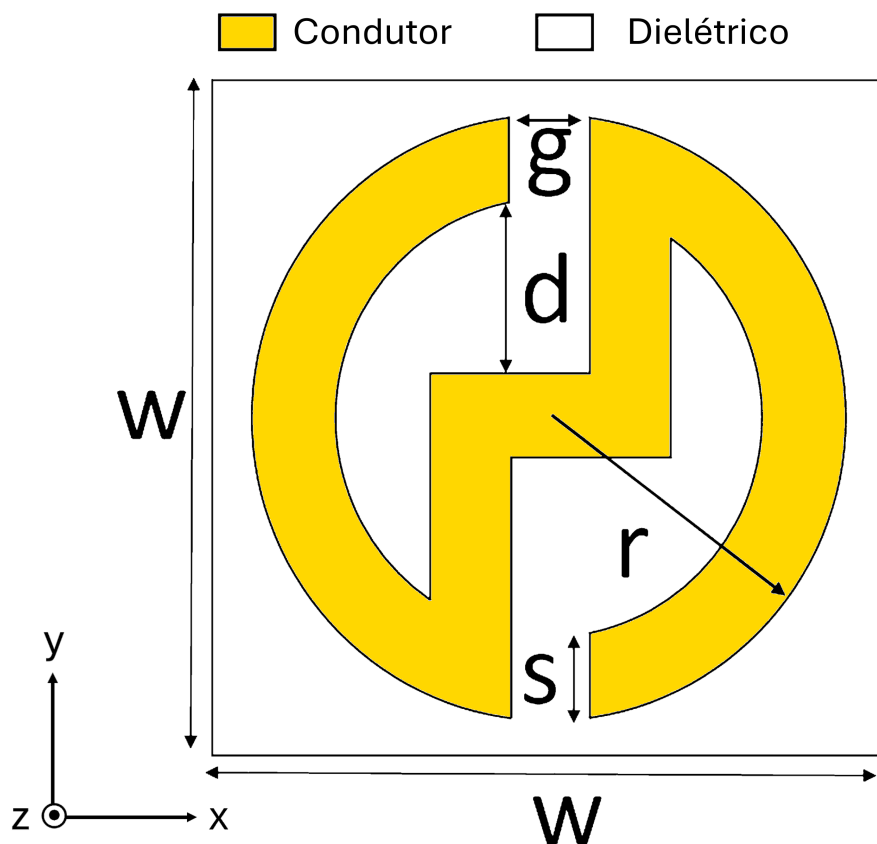


Figura 5.3: Geometria final e suas principais dimensões.

5.1.2 Modelagem do circuito equivalente

A concepção do modelo de circuito equivalente (ECM) para a célula unitária proposta neste trabalho foi realizada utilizando o software Agilent *Advanced design system* (ADS). O ECM do elemento, representado na Figura 5.7, é ilustrado na Figura 5.4. Os dois semicírculos do projeto podem ser modelados como um ressonador LC paralelo, no qual ambos os componentes contribuem para o valor da indutância. O elemento adicional que conecta os dois semicírculos introduz um elemento LC em série, exercendo forte influência sobre a frequência de ressonância do projeto final. O substrato dielétrico utilizado, composto inteiramente por tecido de algodão, é representado como uma linha de transmissão. Contudo, devido à sua espessura extremamente reduzida, o efeito dessa linha de transmissão pode ser considerado desprezível nesta modelagem [89].

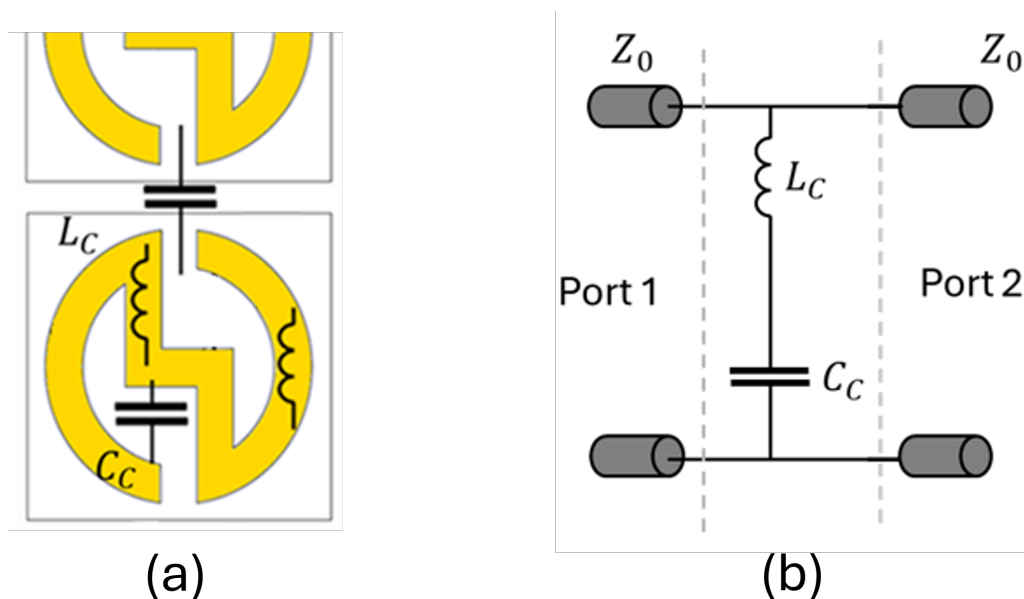


Figura 5.4: Estrutura do circuito equivalente simplificado da geometria proposta: a) elementos indutivos e capacitivos; b) circuito equivalente simplificado proposto.

A Tabela 5.2 apresenta os valores dos parâmetros ECM do elemento proposto, é preciso destacar que os valores apresentados são válidos apenas para a polarização TE. Esses valores foram determinados utilizando a ferramenta de otimização do software Ansys HFSS, com base na equação de ressonância descrita na Equação 5.1 [46].

Os dois elementos semicirculares da estrutura, mostrados na Figura 5.4, podem ser representados como um ressonador LC em configuração série, no qual ambos os componentes afetam diretamente o valor da indutância e atuam principalmente nas transições da resposta do sistema. O componente adicional responsável pela conexão entre os semicírculos adiciona um elemento LC em série ao circuito final, desempenhando um papel significativo na resposta em frequência, definindo a frequência de ressonância final. O substrato dielétrico, como já mencionado, é confeccionado exclusivamente em tecido de algodão; no método do ECM, poderia ser aproximada a sua influência no resultado final, porém, neste trabalho, ele é modelado como uma linha de transmissão sem nenhuma perda, pois, devido à sua reduzida espessura, seu impacto na modelagem pode ser considerado desprezível.

Tabela 5.2: Parâmetros do circuito modelado

L_C	C_C
12.5nH	0.15pF

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L_n C_n}}, n = R, C. \quad (5.1)$$

5.2 Resultados simulados

Como critério de validação do projeto foram executadas duas simulações distintas e comparadas entre si: a primeira simulação tinha o intuito de validar a modelagem do elemento central através do seu circuito equivalente; já a segunda foi realizada utilizando o software comercial Ansys HFSS que utiliza o método de onda completa conhecido como método dos elementos finitos (FEM). Como pode ser visto na Figura 5.7, os valores obtidos através das simulações mostraram grande coerência, o que nos leva a concluir que o projeto da geometria nos trouxe resultados satisfatórios, permitindo que o fluxo planejado seja seguido, o que leva ao processo de prototipagem.

5.2.1 Simulação utilizando o método dos elementos finitos (FEM)

É preciso destacar que para a obtenção de resultados satisfatórios, a simulação através do software Ansys HFSS necessita do emprego de condições de contorno adequadas para uma precisa modelagem do arranjo periódico. Neste trabalho, as paredes da caixa de simulação foram definidas como *boundary*, o que permite a replicação do elemento unitário e garante a representação de um arranjo infinito. Outro ponto importante é o método de excitação, que neste trabalho foi realizado por meio de portas do tipo Floquet, cuja principal característica é a capacidade de modelar corretamente a propagação de ondas EM em estruturas infinitamente periódicas; nesse tipo de alimentação, é feita a correta consideração dos modos difratados no domínio periódico. Dessa forma, a abordagem adotada consistiu na simulação de um único elemento da FSS, cujos resultados foram extrapolados

para um arranjo infinito por meio das condições periódicas impostas. Essa metodologia possibilita uma precisa análise da resposta em frequência do sistema, e, como resultado, reduz o esforço computacional necessário. A Figura 5.5 mostra o ambiente de simulação de onda completa, onde foi utilizado para validação inicial do projeto.

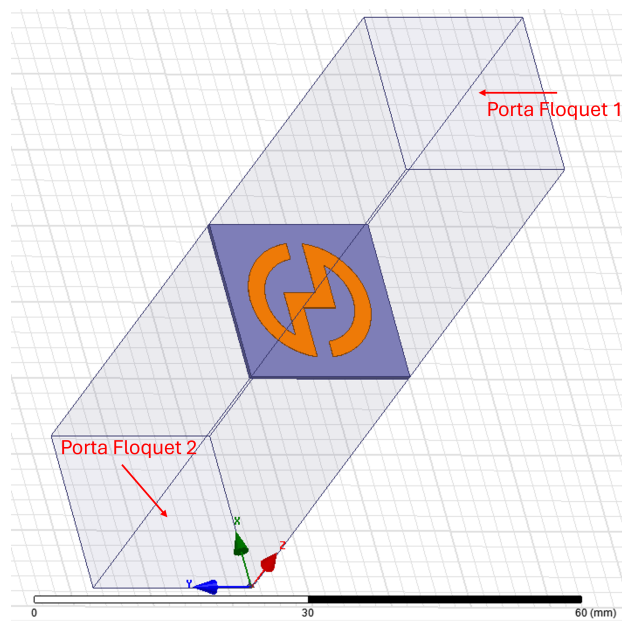


Figura 5.5: Geometria proposta no ambiente de simulação (HFSS).

5.2.2 Simulação realizada pelo método do circuito equivalente (ECM)

Na modelagem do circuito equivalente, as simulações foram realizadas no software *advanced design system* (ADS). Uma vez que esse método exclui a necessidade de imposição de condições de contorno, sua execução se mostra muito facilitada ao comparar com outros métodos. O modelo empregado baseia-se na representação da FSS como um circuito elétrico composto por elementos concentrados, onde indutores (L) e capacitores (C) são distribuídos conforme a topologia da estrutura mostrada na Figura 5.6.

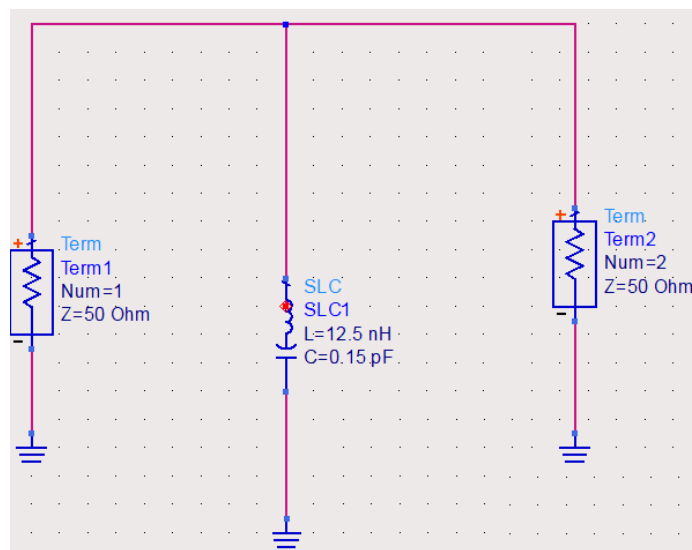


Figura 5.6: Topologia do circuito equivalente no ambiente de simulação (ADS).

A frequência de ressonância inicial foi determinada utilizando a relação $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, e posteriormente foi utilizada a teoria de elementos distribuídos em circuitos em materiais dielétricos, permitindo a extração dos valores apropriados de L e C para atingir a resposta mais próxima da real. As linhas de transmissão foram modeladas idealmente, por dois motivos: o primeiro visou garantir a propagação do sinal sem perdas e viabilizando a análise do comportamento do circuito; o segundo levou em consideração o pequeno valor da espessura do material dielétrico utilizado, o que nos permitiu fazer essa aproximação. Essa abordagem proporciona uma representação simplificada da FSS, o que facilita o ajuste dos parâmetros do sistema e possibilita a previsão da resposta em frequência de forma mais eficiente.

5.2.3 Resultados obtidos

Com os dois modelos definidos e parametrizados nos respectivos softwares de análise, foram então executadas as simulações de forma a validar o projeto e qual o comportamento da estrutura. A Figura 5.7 mostra o resultado obtido através das simulações do circuito equivalente e do método de onda completa conhecido como método dos elementos finitos.

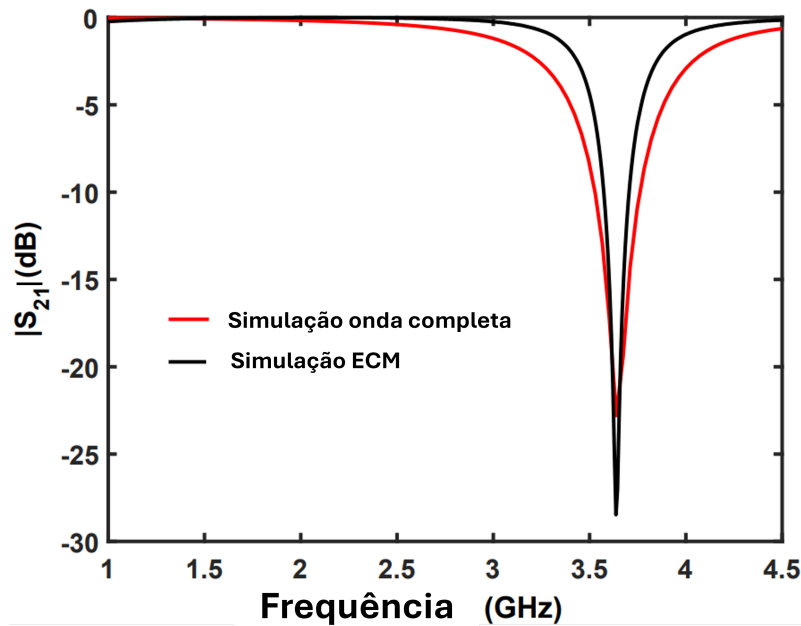


Figura 5.7: Resultados simulados para dois métodos de análise: a) método de onda completa; b) método do circuito equivalente.

Como pode ser visto na Figura 5.7, os resultados do circuito equivalente e do método dos momentos convergiram para uma resposta em frequência centrada em 3,6 GHz. Podemos notar algumas diferenças, como por exemplo na largura de banda, que neste trabalho foi considerado o valor apresentado em -10 dB. Essa diferença entre os resultados simulados pode ser justificada devido ao uso do circuito equivalente simplificado. Nesse caso, a resposta obtida através do software Ansys HFSS apresentou uma faixa de rejeição 17 % maior do que o resultado obtido através do ADS. Esse comportamento é esperado, uma vez que a simulação no Ansys leva em consideração características que inserem perdas na modelagem, como características dielétricas e condutivas de todos os materiais envolvidos; já no ADS, esses valores são negligenciados, uma vez que se trabalha com aproximações através dos parâmetros concentrados. As perdas do dielétrico não são consideradas nesse cenário.

Para validar o funcionamento da geometria proposta, foram realizadas outras simulações. Entre as simulações correspondentes à estrutura, foram feitas duas: a primeira, considerando a mudança na polarização da geometria em relação à onda incidente; já a

segunda, visou analisar o comportamento da estrutura ao mudar o ângulo de incidência. O que esperar dessas simulações? Um comportamento dependente da polarização em ambas as simulações, seja referente ao deslocamento da frequência ou ao módulo do coeficiente de transmissão.

Com essas modificações na resposta da FSS, é possível empregá-la como dispositivo de detecção de mudanças de posicionamento, intuito deste trabalho. Os resultados simulados para a mudança de polarização e do ângulo de incidência da onda, nas Figuras 5.8 e 5.9, respectivamente.

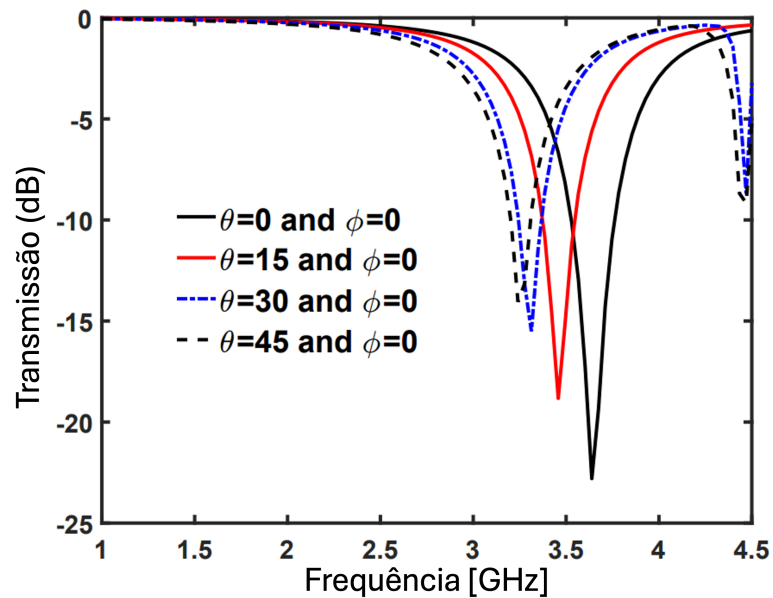


Figura 5.8: Resultados simulados para mudança na polarização da FSS em relação a onda EM incidente.

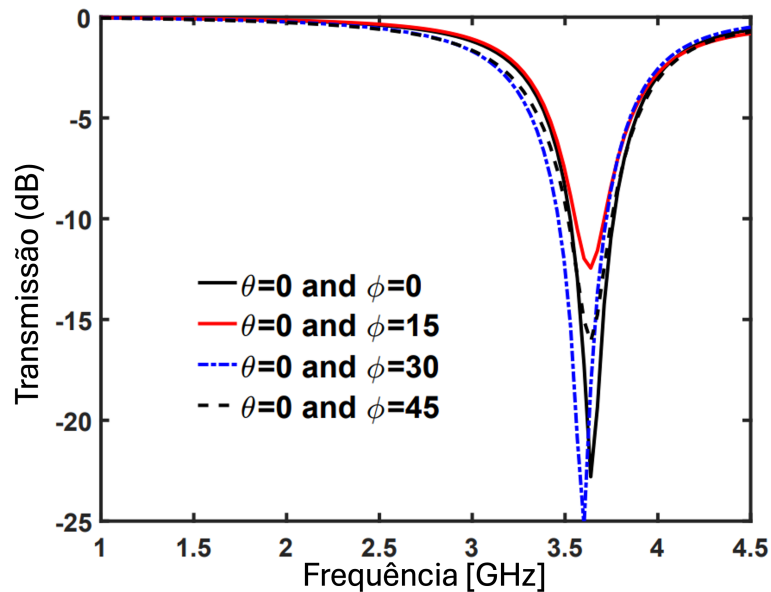


Figura 5.9: Resultados simulados para mudança no ângulo da onda EM incidente para a polarização TE.

Como pode ser visto nas Figuras 5.8 e 5.9, em ambos os casos, a resposta em frequência da estrutura proposta sofre alterações. No primeiro caso, percebe-se uma mudança na frequência; considerando a mudança da polarização entre $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 45^\circ$, o deslocamento da frequência foi de 300 MHz. Já considerando a mudança no ângulo de incidência, podemos notar uma mudança no módulo do coeficiente de transmissão, com valores que variam entre -25 dB e 12,5 dB.

5.3 Prototipagem

Nesse estudo, baseado na aplicação que foi determinada, foram utilizados na prototipagem, como materiais dielétricos e condutores, materiais com características flexíveis e vestíveis, de forma a alinhar com as expectativas inseridas no processo de determinação da aplicação. Nas próximas subseções, serão detalhadas as características dos materiais empregados.

5.3.1 Materiais dielétricos

Neste estudo, foi utilizado um tecido comercial composto inteiramente por fios de algodão 100% como material dielétrico para a FSS, considerando tanto a direção da trama quanto a do urdume¹. O fio de algodão possui uma espessura de 0,2 mm e corresponde ao tipo 72f20, indicando uma composição de 72 filamentos com 20 dtex². As Figuras 5.10(a) e 5.10(b) apresentam visualizações ampliadas do material dielétrico sob duas perspectivas diferentes. Como mostrado na Figura 5.10(a), a estrutura do tecido contém lacunas que influenciam a permissividade efetiva (ϵ_{eff}). Essas lacunas reduzem o impacto das propriedades dielétricas do tecido sobre o material condutor. Neste trabalho, o material dielétrico foi considerado com valores de permissividade efetiva de $\epsilon_{eff} = 1,5$ e tangente de perda ($\tan \delta$) de 0,0032 [91], esses valores são utilizados na literatura para o tipo de tecido utilizado.

¹De acordo com [90], urdume e trama são termos que descrevem a disposição dos fios em um tecido. O urdume corresponde aos fios longitudinais, dispostos no sentido do comprimento, com menor elasticidade e utilizados na confecção de peças com menor volume. Já a trama refere-se aos fios perpendiculares ao urdume, mais elásticos, sendo comumente empregados na fabricação de tecidos de malha.

²"dtex" é uma unidade de medida utilizada para expressar a finura de fibras têxteis. O termo "dtex" é uma abreviação para "decitex", que representa a massa em gramas de 10.000 metros de fio ou fibra. Portanto, um fio com 1 dtex pesa 1 grama por 10.000 metros.

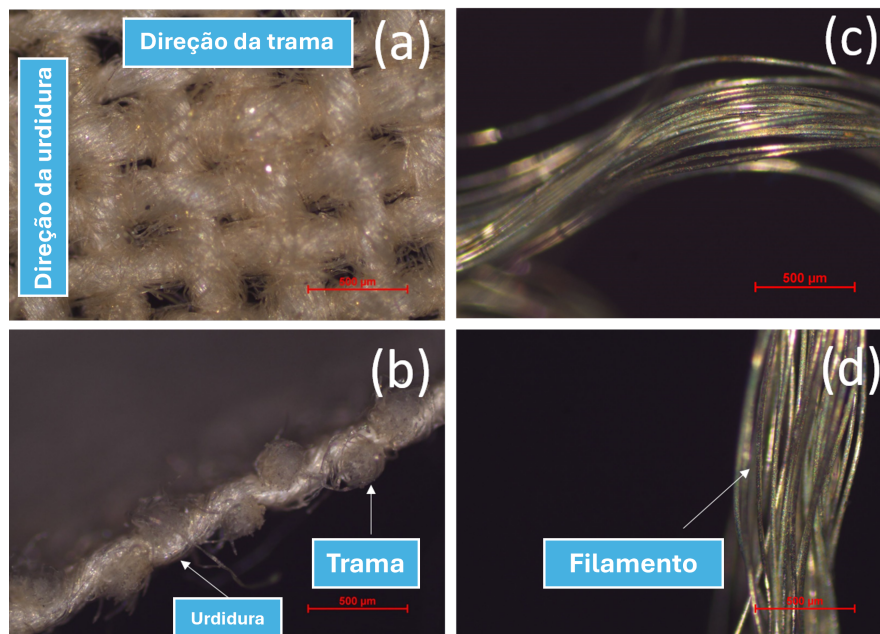


Figura 5.10: Materiais empregados na prototipagem da estrutura proposta: a) visão frontal do material dielétrico; b) visão lateral do material dielétrico; c) imagem ampliada do material condutor utilizado; d) zoom do filamento do fio metálico usado na prototipagem.

5.3.2 Materiais condutivos

A linha escolhida para ser utilizada neste trabalho foi a Shieldex 78f20 com filamento de 78 dtex e seção transversal circular, composta por fibras e fios condutivos. Essa linha é formada por poliamida/nylon. Sua resistividade elétrica é de aproximadamente $3,5 \text{ k}\Omega/\text{m}$ [92]. As Figuras 5.10(c) e 5.10(d) apresentam uma visão ampliada do material condutor empregado neste estudo. Como ilustrado nessas imagens, o filamento não é formado por um único fio, criando lacunas no preenchimento da célula unitária, o que pode resultar em diferenças significativas nos resultados experimentais durante as medições.

5.3.3 FSS têxtil

No processo de prototipagem, foram testadas duas técnicas de manufatura para a deposição do material condutor sobre as células unitárias. O primeiro método empregou

máquinas de bordar, porém mostrou-se inviável devido à baixa resistência mecânica dos fios condutivos, que não eram adequados para esse tipo de equipamento. Além disso, por não se tratarem de fios tradicionais, suas dimensões eram superiores aos limites suportados por máquinas de costura convencionais, inviabilizando essa abordagem. O segundo método, embora mais rudimentar, consistiu na costura manual do material condutor, garantindo o preenchimento completo das células unitárias.

Para reduzir erros durante esse processo, foi estabelecido um método padronizado de preenchimento para todos os elementos da FSS proposta. Inicialmente, um adesivo contendo os elementos organizados em um arranjo 9×9 foi aplicado sobre a estrutura para demarcar as áreas das células unitárias. Em seguida, cada elemento foi marcado com caneta esferográfica e, posteriormente, a linha condutora foi costurada manualmente, seguindo precisamente os contornos definidos.

Em todos os elementos unitários, foram demarcados quadrados de lado $L = 2$ mm, e determinado um número de vezes que a linha seria inserida, que nesse trabalho, foram 3 vezes a cada 2 mm. A representação gráfica da metodologia aplicada e o protótipo construído são apresentados na Figura 5.11

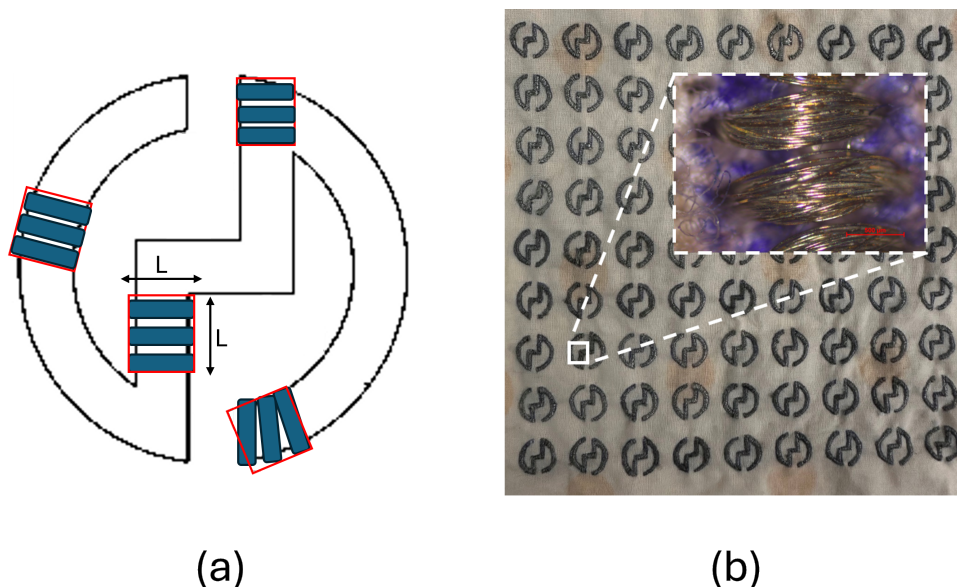


Figura 5.11: Protótipo construído: a) representação gráfica da metodologia de preenchimento; b) protótipo da FSS têxtil.

5.4 Medições do protótipo

Com base no método de medição em espaço livre, foram realizados testes experimentais no protótipo construído. Os ensaios avaliaram a variação da resposta em frequência do elemento proposto em função do ângulo de incidência da onda eletromagnética, bem como a influência da polarização da onda incidente sobre o comportamento do dispositivo. Os resultados são mostrados na Figura 5.12.

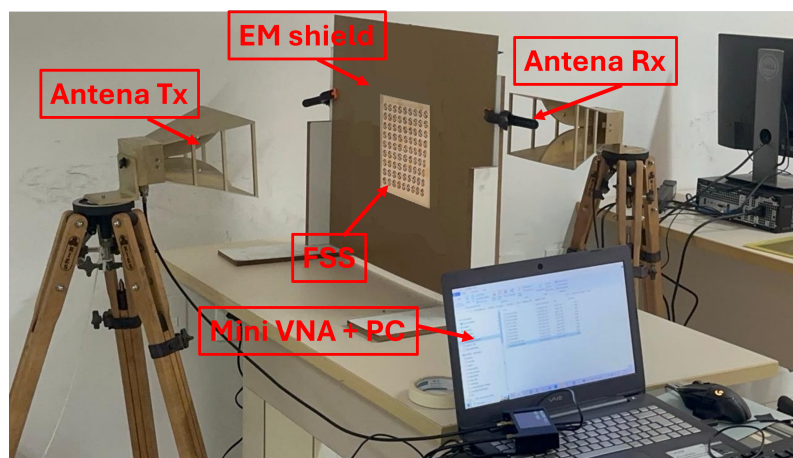


Figura 5.12: *Setup* de medição utilizado, método do espaço livre.

Foram medidos experimentalmente os mesmos parâmetros avaliados nas simulações, com o objetivo de verificar a variação da resposta em frequência da estrutura em função do ângulo de polarização e do ângulo de incidência da onda eletromagnética. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 5.13 e 5.14.

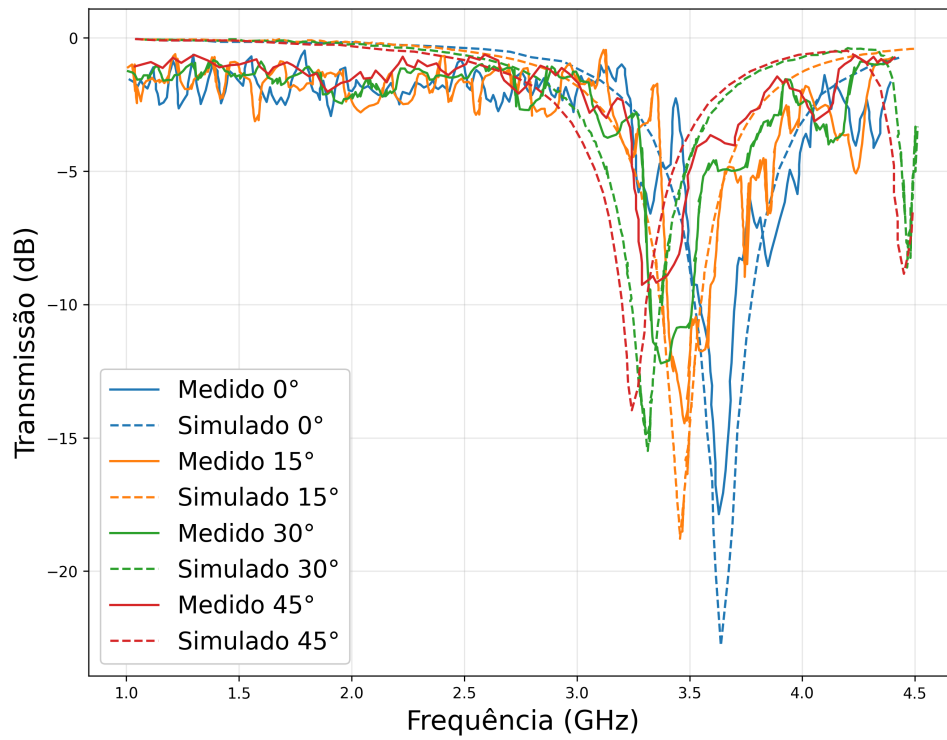


Figura 5.13: Comparação entre os resultados medidos e simulados para mudança na polarização da FSS em relação à onda EM incidente.

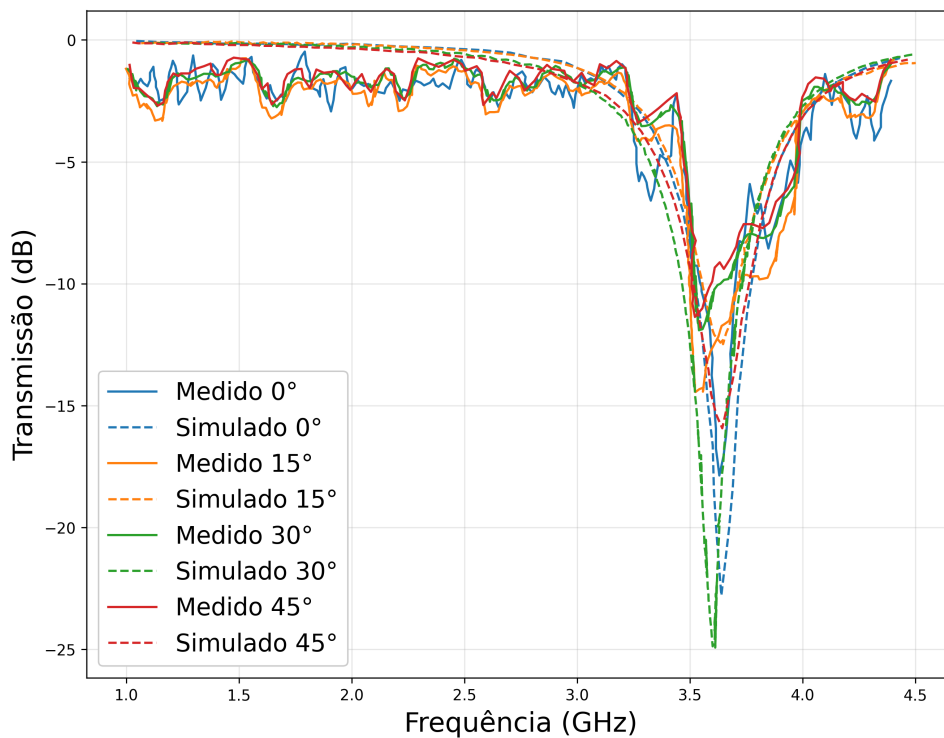


Figura 5.14: Comparação entre os resultados medidos e simulados para mudança no ângulo da onda EM incidente.

Conforme ilustrado nas Figuras 5.13 e 5.14, os resultados experimentais da estrutura proposta apresentaram boa concordância com os dados simulados. Observa-se que, para a variação da polarização da FSS, ocorre um deslocamento na frequência de ressonância, com uma redução progressiva à medida que o ângulo aumenta. Por outro lado, para a variação do ângulo de incidência, a frequência de ressonância permanece inalterada, sendo a principal mudança observada no módulo do coeficiente de transmissão.

5.5 Conclusão do capítulo

Neste capítulo, foram apresentados os critérios que fundamentaram a metodologia adotada no desenvolvimento do processo de modelagem da geometria proposta. O planejamento foi estruturado com base em diversos parâmetros, visando tornar o projeto mais robusto e eficiente, de acordo com a aplicação determinada.

Foram expostos os resultados das simulações e descrito o processo de prototipagem da estrutura, destacando os principais desafios enfrentados e as abordagens empregadas para superá-los. Além disso, foram detalhados os aspectos do projeto que influenciaram a sua implementação e os ajustes necessários para a obtenção de um desempenho adequado.

Por fim, foram apresentados os resultados da prototipagem, evidenciando o planejamento adotado para minimizar os erros inerentes a essa etapa, de modo a reduzir sua influência no resultado final, assim como os resultados medidos iniciais, indicando que o processo de prototipagem demonstrou grande fidelidade quando comparado aos resultados simulados.

Capítulo 6

Caracterização da hipótese científica

Neste capítulo, é retomado o entendimento e validação da hipótese deste trabalho. Baseado nas premissas estipuladas no Capítulo 2, Seção 2.1, foi feita a implementação do protótipo através da adaptação da estrutura apresentada no Capítulo 5, Seção 5.1.1.

6.1 Prototipagem da luva de dados

O principal objetivo deste trabalho foi desenvolver um dispositivo capaz de detectar variações gestuais a partir da interação com gestos estáticos de um usuário. Com base na anatomia da mão humana, os elementos da FSS foram organizados em grupos de três, alinhando-se às falanges dos dedos. Essa configuração permitiu a movimentação dos dedos sem causar dobras internas na geometria, restringindo a deformação apenas aos contornos das células unitárias.

Para fixação dos elementos da FSS na luva plástica, foi utilizada uma fita adesiva de dupla face, garantindo uma instalação segura e minimizando interferências no desempenho do dispositivo final. A Figura 6.1 ilustra o protótipo desenvolvido para a identificação de gestos manuais. Conforme ilustrado na Figura 6.1, os elementos foram posicionados de acordo com as falanges dos dedos. Entre o dedo mínimo e o indicador, foram adicionados três elementos em cada dedo, enquanto no polegar, devido à sua anatomia diferenciada, apenas dois elementos foram inseridos.

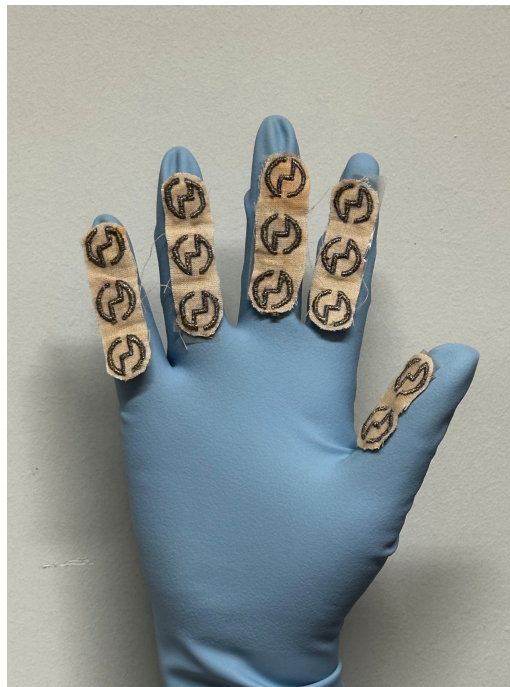


Figura 6.1: Protótipo da luva de dados construída e elementos da FSS acoplados.

6.2 Simulação e resultados experimentais

Durante a fase de projeto, as características dos materiais utilizados, como constante dielétrica e tangente de perdas, foram devidamente consideradas para estimar, por meio de simulações, o comportamento da estrutura ao interagir tanto com esses materiais quanto com as características da mão do usuário.

É importante destacar que a inclusão dos componentes na simulação aumenta significativamente a demanda computacional, uma vez que cada camada simulada apresenta parâmetros específicos, além de espessuras distintas. As camadas consideradas possuem seus parâmetros descritos na Figura 6.2, incluindo a constante dielétrica (ϵ_r), a condutividade elétrica (σ) em S/m, a densidade de massa (D) em kg/m³ e a espessura em mm, valores encontrados em [93].






				
Borracha de látex	Pele	Gordura	Músculo	Osso
$\epsilon_r = 3$	$\epsilon_r = 41.32$	$\epsilon_r = 5.2$	$\epsilon_r = 52.67$	$\epsilon_r = 18.49$
$\sigma = 1 \cdot 10^{-15}$	$\sigma = 1.49$	$\sigma = 0.11$	$\sigma = 1.77$	$\sigma = 0.82$
D = 1190	D = 1001	D = 900	D = 1006	D = 1008
t = 2	t = 2	t = 5	t = 20	t = 13

Figura 6.2: Propriedades das camadas de tecido humano consideradas nas simulações.

O *setup* utilizado na simulação é apresentado na Figura 6.3, na qual todos os tecidos descritos na Figura 6.2 foram inseridos, levando em consideração suas respectivas características. A Figura 6.4 apresenta a comparação entre os resultados simulados e medidos, analisando a interação da FSS com a mão do usuário e com os materiais empregados na prototipagem.

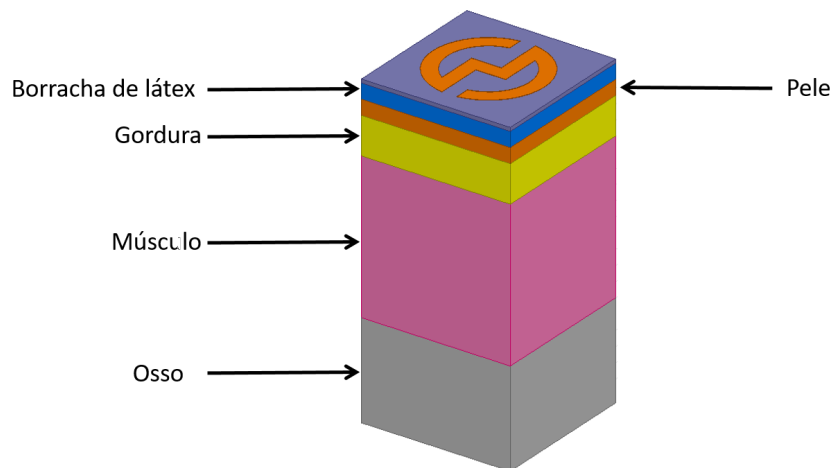


Figura 6.3: *Setup* de simulação, considerando a geometria proposta e os tecidos do corpo humano.

Observa-se que, no procedimento computacional de simulação, todas as camadas foram consideradas, e os respectivos valores de densidade, condutividade e permissividade elétrica foram devidamente inseridos. A inclusão desses parâmetros aumenta a fidelidade da simulação em relação a cenários reais, uma vez que todas as perdas inerentes aos materiais utilizados na prototipagem devem ser consideradas para tornar o comportamento da estrutura mais previsível e controlado.

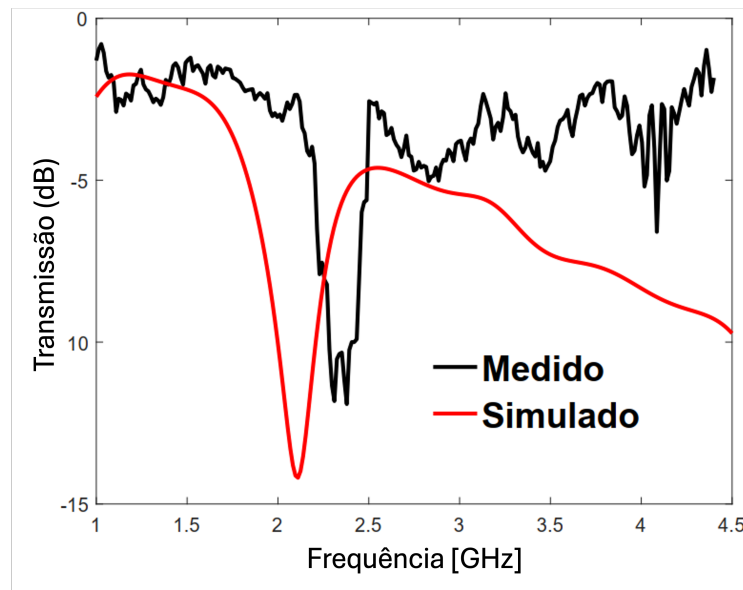


Figura 6.4: Protótipo da luva de dados construída e elementos da FSS acoplados.

Conforme ilustrado na Figura 6.4, a inclusão das camadas de tecido humano na simulação aumentou a precisão dos resultados, tornando-os mais alinhados com os dados experimentais. Observa-se que a frequência de operação obtida na simulação foi de 2,09 GHz, enquanto a medição experimental indicou um valor de 2,31 GHz, resultando em um erro relativo de aproximadamente 9%. Considerando a complexidade do cenário simulado, esse resultado pode ser considerado satisfatório.

6.3 Detecção de diferentes gestos

6.3.1 Descrição do protocolo experimental para diferentes gestos

Para avaliar o desempenho do dispositivo desenvolvido, foi estabelecido um protocolo experimental baseado na detecção de gestos estáticos comuns da Língua Brasileira de Sinais (Libras). Foram selecionados gestos correspondentes a pequenas variações, seguindo uma evolução natural do posicionamento dos dedos, os quais envolvem diferentes configurações das mãos. A Figura 6.5 [94] mostra os gestos estáticos e dinâmicos que descrevem as 26 letras do alfabeto manual utilizados na LIBRAS.



Figura 6.5: Alfabeto manual com destaque para sinais de letras com movimento.

Durante a realização dos experimentos, a luva contendo a FSS foi vestida por um participante, que manteve cada gesto por um período determinado, garantindo a estabilidade da medição. Para cada posição da mão, foram coletados os parâmetros de transmissão em um intervalo de frequência previamente definido de acordo com a leitura do equipamento utilizado, Mini-VNA 1-4.4 GHz, com o objetivo de identificar variações no comportamento eletromagnético da estrutura em função das diferentes configurações gestuais. A Figura 6.6 mostra a configuração utilizada no setup experimental.

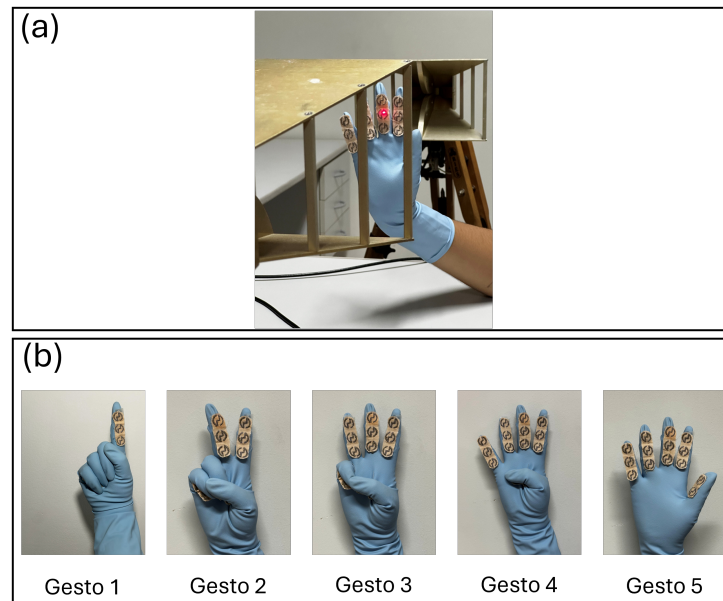


Figura 6.6: FSS aplicada ao reconhecimento de gestos manuais estáticos: (a) configuração do *setup* de medição; (b) símbolos medidos.

As medições foram realizadas em ambiente controlado, a fim de minimizar interferências externas que pudessem comprometer a precisão dos resultados. Além disso, cada gesto foi repetido três vezes, por dois utilizadores diferentes, para verificar a consistência dos dados e garantir a reprodutibilidade das medições. Os resultados obtidos permitiram a análise da influência da posição dos dedos na resposta da FSS, contribuindo para a validação do sistema proposto.

6.4 Análise do comportamento do dispositivo em resposta a variações gestuais.

Foram realizadas medições para os cinco gestos seleccionados, e os resultados demonstraram que, apesar das variações sutis entre eles, a FSS apresentou respostas distintas para cada configuração gestual. A mudança de padrões nos parâmetros de transmissão e na frequência de operação evidencia a característica de robustez da estrutura, enquanto as diferenças observadas ressaltam sua sensibilidade a modificações sutis na posição dos

dedos. Esse comportamento indica a capacidade do dispositivo de detectar variações gestuais, mesmo em gestos extremamente similares, reforçando sua eficácia para o reconhecimento de padrões manuais. A Figura 6.7 mostra os resultados obtidos para módulo e fase dos 5 gestos medidos.

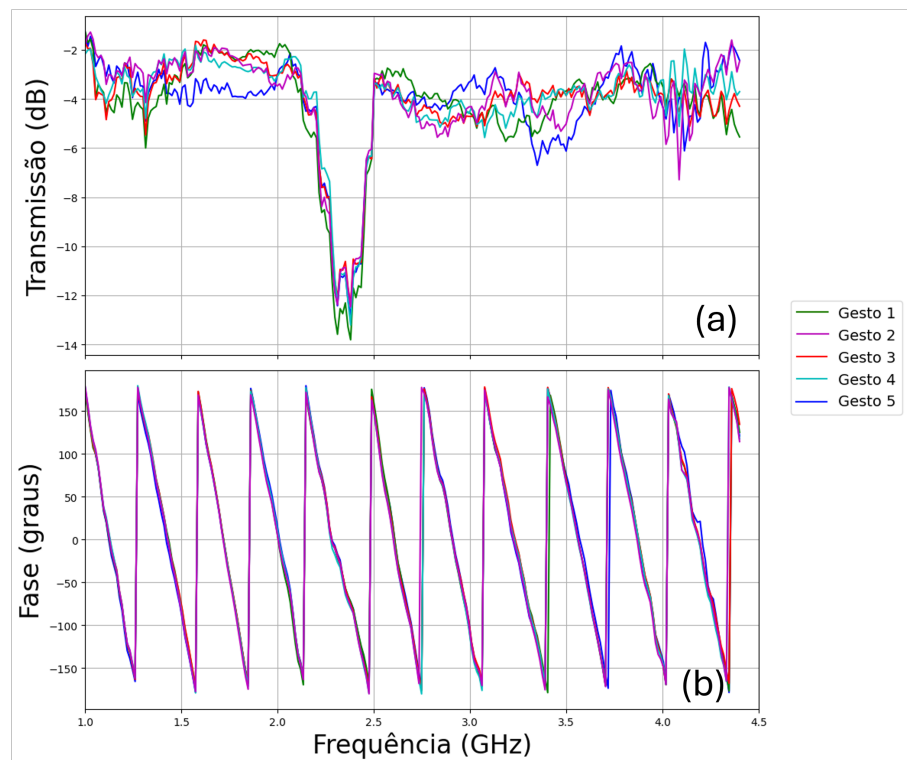


Figura 6.7: FSS aplicada ao reconhecimento de gestos manuais estáticos: (a) variação do módulo do coeficiente de transmissão ; (b) variação na fase para cada um dos gestos.

Para assegurar a reprodutibilidade e a confiabilidade dos resultados, os gestos ilustrados na Figura 6.6 foram executados por dois usuários distintos, cada um repetindo a sequência três vezes, totalizando seis execuções por gesto. Essa metodologia foi adotada para capturar possíveis variações individuais na execução dos gestos, garantindo que as medições reflitam uma média representativa das respostas do sistema. No entanto, devido a limitações técnicas ocorridas durante o procedimento experimental, as análises subsequentes serão baseadas exclusivamente nas medições realizadas com o usuário 2, sendo, portanto, realizadas três medições por gesto. A consideração de múltiplos participantes e repetições é fundamental em estudos envolvendo a língua brasileira de sinais (Libras),

pois, como encontrado na literatura, trabalhos indicam que, mesmo entre sinalizadores proficientes, podem ocorrer variações sutis nos parâmetros dos sinais, como configuração de mão, movimento e expressões não manuais [95]. Portanto, a inclusão de diferentes usuários e múltiplas repetições contribui para a robustez dos dados coletados, minimizando o impacto de variações individuais e assegurando que os resultados obtidos sejam representativos e passíveis de generalização. Os resultados das medições para cada gesto estão apresentados nas Figuras 6.9 a 6.13, evidenciando a consistência e a confiabilidade dos dados coletados.

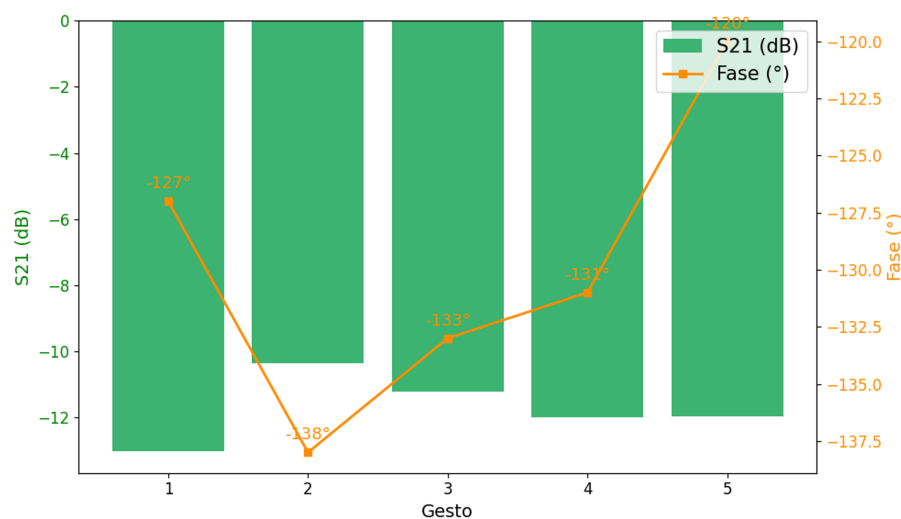


Figura 6.8: Resultados medidos e a demonstração dos diferentes valores médios do módulo S_{21} e da fase para cada um dos 5 gestos.

Conforme ilustrado na Figura 6.8, foi possível observar, para cada gesto analisado, variações distintas em dois parâmetros: o módulo do coeficiente de transmissão S_{21} , que corresponde ao valor observado pela porta 2 vindo da porta 1 do circuito [96] e a fase correspondente. Esses parâmetros foram selecionados como exemplos representativos de indicadores capazes de refletir alterações no comportamento do protótipo proposto para diferentes posições das mãos.

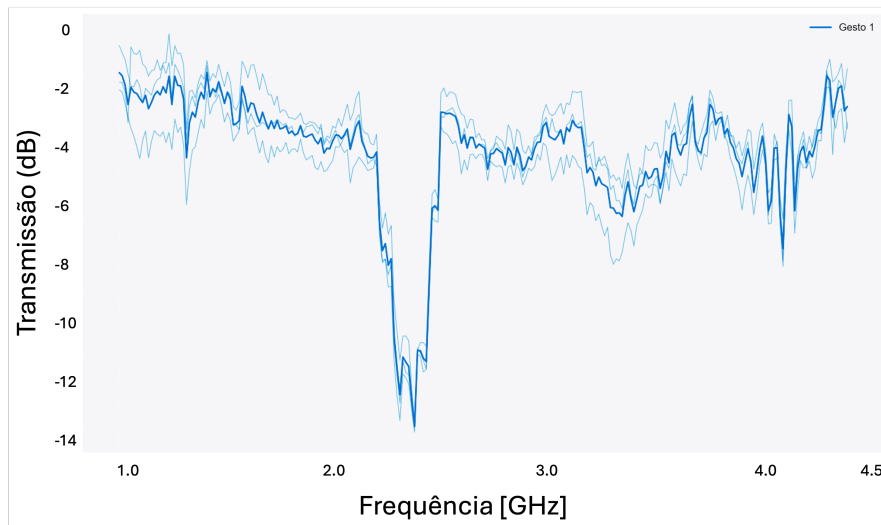


Figura 6.9: Resultados medidos para usuário 2, 3 medições para o gesto 1. Em destaque, a curva que representa a médias das 3 medições.

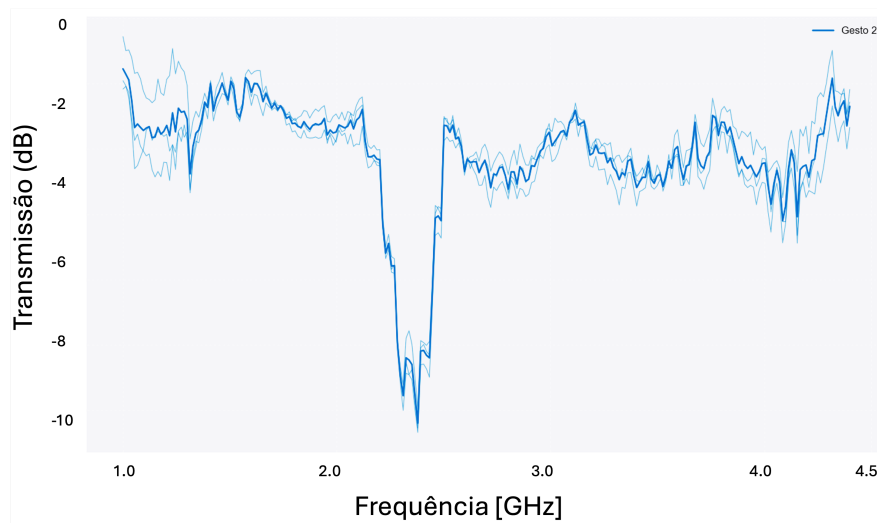


Figura 6.10: Resultados medidos para usuário 2, 3 medições para o gesto 2. Em destaque, a curva que representa a médias das 3 medições.

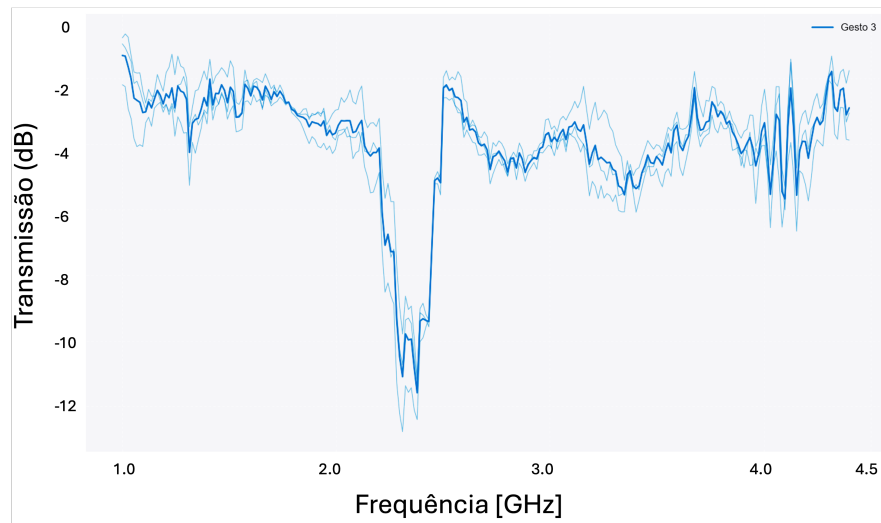


Figura 6.11: Resultados medidos para usuário 2, 3 medições para o gesto 3. Em destaque, a curva que representa a médias das 3 medições.

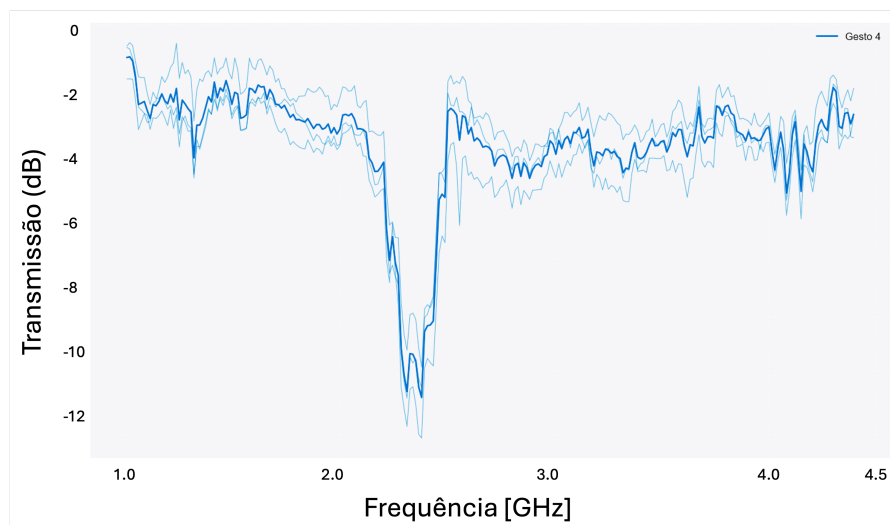


Figura 6.12: Resultados medidos para usuário 2, 3 medições para o gesto 4. Em destaque, a curva que representa a médias das 3 medições.

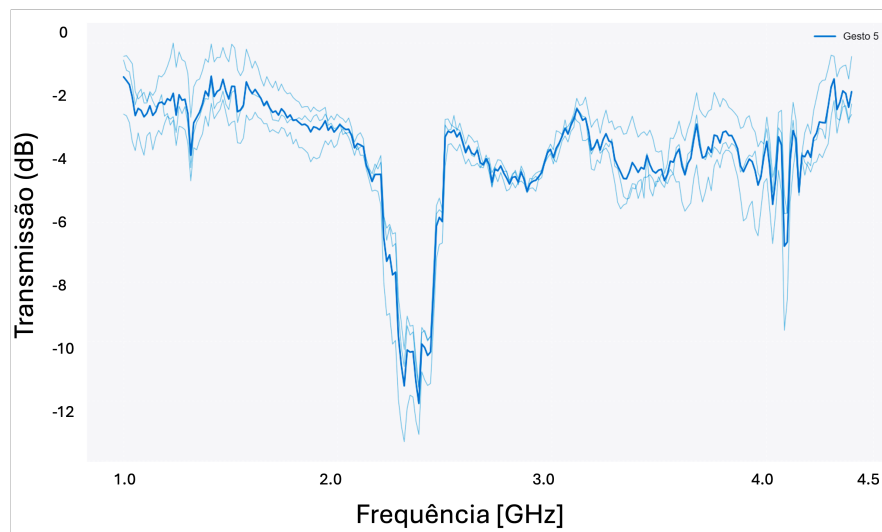


Figura 6.13: Resultados medidos para usuário 2, 3 medições para o gesto 5. Em destaque, a curva que representa a médias das 3 medições.

6.5 Análise estatística dos resultados obtidos

O teste t de *Student* é um método estatístico paramétrico utilizado para comparar as médias de dois grupos, determinando se as diferenças observadas são estatisticamente significativas [97]. Este teste assume que os dados seguem uma distribuição normal e que as amostras são independentes.

6.5.1 Formulação matemática

Para a comparação entre médias amostrais de dois grupos independentes com variâncias homogêneas, aplica-se o teste t -*Student*, cuja estatística é definida por:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (6.1)$$

Nessa equação, \bar{x}_1 e \bar{x}_2 correspondem às médias amostrais, enquanto n_1 e n_2 representam os tamanhos das respectivas amostras. O denominador envolve o desvio padrão combinado s_p , calculado por:

$$s_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (6.2)$$

em que s_1^2 e s_2^2 são as variâncias amostrais dos dois grupos.

O valor obtido para t é então comparado com a distribuição t -Student com $n_1 + n_2 - 2$ graus de liberdade, a fim de determinar a significância estatística da diferença observada entre as médias. O p -valor associado à estatística t orienta a interpretação dos resultados: valores inferiores a 0,05 indicam diferença estatisticamente significativa entre os grupos, enquanto valores iguais ou superiores a esse limiar sugerem que a diferença observada pode ter ocorrido ao acaso.

O teste t admite diferentes variações, dependendo das propriedades do conjunto de dados. O teste pareado é utilizado em situações nas quais as amostras são dependentes, como em medições repetidas sobre os mesmos indivíduos. O teste de Welch, por sua vez, é aplicável quando se verifica heterogeneidade nas variâncias amostrais. Em casos nos quais há uma hipótese direcional sobre a diferença entre os grupos, adota-se a versão unilateral do teste.

Para que os resultados obtidos por meio do teste t sejam válidos, algumas premissas devem ser atendidas: os dados devem seguir distribuição normal, as observações devem ser independentes, as variâncias devem ser homogêneas (exceto no caso do teste de Welch) e a escala de medição deve ser intervalar ou racional.

No presente estudo, a aplicação do teste t -Student exigiu a verificação prévia dessas condições. Para isso, foi realizada uma análise exploratória dos dados, com a plotagem de histogramas relativos aos valores medidos para cada um dos cinco gestos manuais analisados. Essa abordagem permitiu avaliar a aderência dos dados à distribuição normal, justificando o uso de métodos estatísticos paramétricos para a comparação entre os gestos. O parâmetro considerado foram os valores obtidos nas medições para a variação do módulo S21.

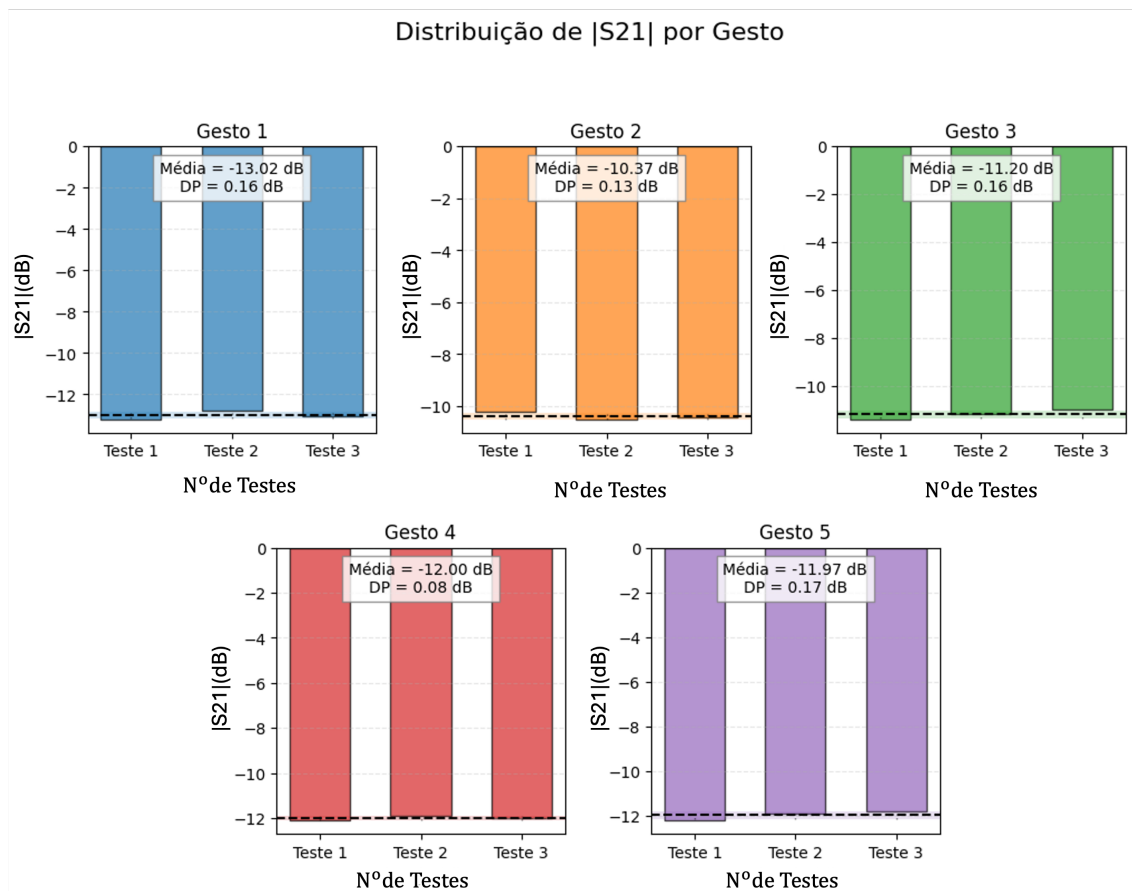


Figura 6.14: Histogramas das medições do módulo do coeficiente de transmissão (em dB) para os cinco gestos manuais analisados.

O gráfico 6.15 apresenta os histogramas das medições do módulo do coeficiente de transmissão $|S_{21}|$, em dB, para os cinco gestos manuais analisados. Cada subplot corresponde a um gesto específico e ilustra a distribuição dos três valores medidos, bem como a média e a faixa de desvio padrão. É preciso mencionar que o valor de S_{21} considerado corresponde ao pico dentro da faixa analisada.

A análise visual dos histogramas sugere que os dados para cada gesto apresentam uma distribuição próxima à normal, com os valores concentrando-se em torno da média e com dispersão simétrica. Essa característica é um indicativo importante para validar o uso de testes estatísticos paramétricos, como o teste *t-Student*, demonstrados anteriormente. Além disso, observa-se que a média das medições para cada gesto se posiciona de forma

diferenciada, o que reforça a sensibilidade do sistema proposto para identificar variações sutis entre diferentes posições da mão, mesmo quando essas diferenças são pequenas, como nos gestos 4 e 5.

Com base nos resultados experimentais apresentados anteriormente para os cinco gestos analisados, torna-se essencial avaliar quantitativamente a sensibilidade do dispositivo proposto à variação entre diferentes configurações manuais. Para isso, foi realizada uma análise estatística considerando as curvas de transmissão associadas a cada gesto. Foram calculadas a média e o desvio padrão dos dados obtidos, com o objetivo de identificar o grau de separabilidade entre os gestos e a consistência nas medições. Os resultados dessa análise estatística são apresentados na Figura 6.15, permitindo uma visualização da variabilidade entre os gestos e fornecendo evidências adicionais sobre a capacidade de sensibilidade da FSS proposta.

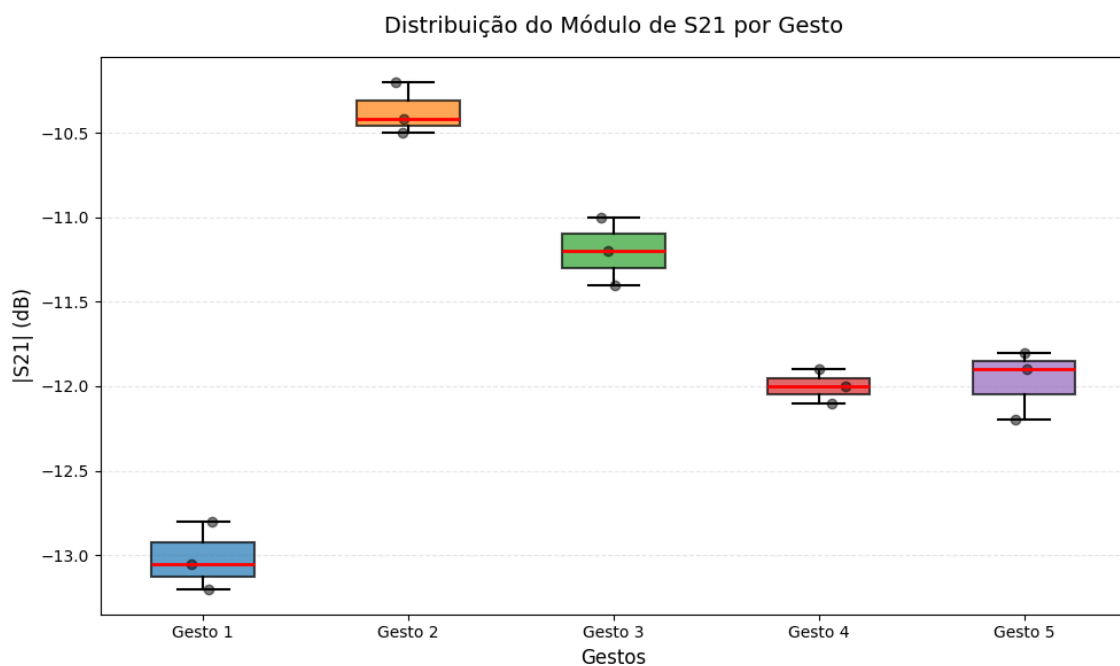


Figura 6.15: Variação do módulo S21 por gesto, demonstrando os valores das medições, média e desvio padrão.

A Figura 6.15 apresenta a análise estatística das medições realizadas para os cinco

gestos, onde são exibidas as três repetições por gesto, bem como a média e o desvio padrão correspondentes. Observa-se que, mesmo com pequenas variações entre as repetições de um mesmo gesto, os valores médios obtidos para cada posição apresentam diferenças significativas entre si. Essa distinção entre os gestos, mesmo em um cenário com configurações manuais muito similares, evidencia a sensibilidade do dispositivo proposto na detecção de alterações sutis na configuração estática da mão. Além disso, o padrão de variação dos dados sugere que o comportamento da estrutura é consistente frente às mudanças impostas por cada gesto, reforçando sua viabilidade como ferramenta para reconhecimento de gestos manuais.

No contexto de análise de gestos, por exemplo, o teste pode ser aplicado para comparar os valores médios de resposta do dispositivo para dois gestos diferentes, verificando se a diferença entre eles é estatisticamente significativa ou se pode ter ocorrido por acaso. As Tabelas 6.1 e 6.2 trazem o detalhamento dos resultados mostrados na Figura 6.15.

Tabela 6.1: Análise estatística das diferenças entre gestos

Comparação	Dif. Média (dB)	p-valor	Significativo?
Gesto 1 vs Gesto 2	2,60	0,0016	Sim
Gesto 1 vs Gesto 3	1,80	0,0143	Sim
Gesto 1 vs Gesto 4	1,03	0,0481	Sim
Gesto 1 vs Gesto 5	1,10	0,0414	Sim
Gesto 2 vs Gesto 3	0,80	0,0508	Sim
Gesto 2 vs Gesto 4	1,57	0,0201	Sim
Gesto 2 vs Gesto 5	1,50	0,0215	Sim
Gesto 3 vs Gesto 4	0,77	0,1268	Não
Gesto 3 vs Gesto 5	0,69	0,229	Não
Gesto 4 vs Gesto 5	0,07	0,8674	Não

Legenda: p-valor < 0.05 indica diferença estatisticamente significativa. Teste utilizado: Teste t de Student para amostras independentes. α (nível de significância) = 0.05.

Tabela 6.2: Métricas por gesto e distinguibilidade

Gesto	Média (dB)	Desvio padrão (dB)	Distinguível de outros gestos?
Gesto 1	-13,03	0,16	Gesto 2, Gesto 3, Gesto 4, Gesto 5
Gesto 2	-10,37	0,13	Gesto 1, Gesto 4, Gesto 5
Gesto 3	-11,23	0,16	Gesto 1, Gesto 2
Gesto 4	-12,00	0,08	Gesto 1, Gesto 2
Gesto 5	-11,97	0,17	Gesto 1, Gesto 2

Como pode ser observado nos resultados apresentados nas Tabelas 6.1 e 6.2, a maioria dos gestos analisados apresentou diferenças significativas entre si. Esses achados indicam que, em cenários nos quais tais dados são empregados como fatores de identificação por sistemas de reconhecimento de gestos, como na tradução de línguas de sinais ou na interação homem-máquina, é possível alcançar uma boa distinção entre os gestos realizados. Os únicos gestos que não apresentaram diferenças significativas entre si foram os pares 2-3 e 4-5, o que é um resultado relativamente lógico, quando olhamos, por exemplo, para a similaridade morfológica entre eles.

6.6 Posicionamento do trabalho na literatura

Com base nos resultados apresentados, o presente trabalho demonstrou sua capacidade em identificar e categorizar diferentes gestos estáticos manuais com o uso de superfícies seletivas de frequência (FSS) acopladas a uma luva de dados. Diante disso, é pertinente analisar como esta proposta se posiciona frente às abordagens previamente documentadas na literatura. A Tabela 6.3 apresenta um resumo comparativo entre os principais trabalhos relacionados, considerando aspectos como o tipo de sensor ou tecnologia utilizada, o tipo de gesto reconhecido, a abrangência dos dados gestuais e o número de mãos envolvidas na detecção.

Tabela 6.3: Comparação do presente trabalho com a literatura

Ref.	Sensor usado para		Técnica/Tecnologia	Tipo de Gestos		Dados		No. de Mãos		Baixo custo
	Dobra	Movimento		Estático	Dinâmico	Alfabeto	Gestos	Uma	Duas	
[7]		×	Kinect	×	×		×		×	
[9]		×	Câmera		×		×		×	
[19]	×		RF/Antena	×			×	×		×
[24]	×	×	Raspberry	×	×		×	×		×
[49]	×		RF/FSS	×			×	×		×
[87]	×		OTDR	×			×	×		
[88]	×		Resistência	×			×	×		×
[98]	×		EMG	×			×	×		×
[99]		×	FBG	×			×	×		
[100]		×	Câmera	×			×		×	
Este trabalho	×		RF/FSS	×		×	×	×		×

Ao observar a tabela, nota-se que a maioria das soluções atuais baseia-se em tecnologias visuais, como câmeras ou sensores como o Kinect, que, embora apresentem reconhecida qualidade técnica por possuírem maior capacidade de detecção de movimentos dinâmicos, podem envolver altos custos e maior necessidade de processamento computacional. Por outro lado, abordagens baseadas em radiofrequência (RF), como antenas ou estruturas FSS, vêm ganhando espaço por proporcionarem baixo custo, robustez e integração mais simples a sistemas embarcados. Dentre os trabalhos que utilizam FSSs [49], nota-se que poucos exploram seu uso na detecção de gestos manuais estáticos com foco em aplicações gestuais específicas, e menos ainda com a inclusão de reconhecimento de gestos alfabéticos.

Neste cenário, o presente trabalho se destaca ao reunir características que não são simultaneamente encontradas nos estudos relacionados: a utilização de uma estrutura FSS de baixo custo, a capacidade de reconhecer gestos estáticos, incluindo gestos do alfabeto manual, e a viabilidade de operação com apenas uma das mãos. Além disso, ao empregar uma técnica de detecção passiva com sensoriamento baseado em variações da resposta eletromagnética, a proposta se mostra promissora para aplicações vestíveis, interativas e de baixo consumo energético. Tais características evidenciam a contribuição original deste estudo frente ao estado da arte atual.

6.7 Conclusão do capítulo

A análise conjunta das Tabelas 6.1 e 6.2 evidencia a sensibilidade do dispositivo proposto na distinção de gestos manuais estáticos, mesmo quando esses gestos apresentam similaridades morfológicas. O Teste *t-Student* revelou que 7 entre os 10 pares de gestos comparados (70%) apresentaram diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$), reforçando a capacidade do sistema em discriminar entre posições distintas da mão, mas, demonstrou também uma limitação quando os gestos possuem grande similaridade, nesse caso, os gestos 4 e 5. Em particular, o Gesto 2 destacou-se como um *outlier* claro, sendo estatisticamente distinguível de todos os demais gestos medidos, tanto em média quanto em amplitude da resposta, o que o torna um excelente ponto de referência para algoritmos

de reconhecimento.

Um caso interessante se apresenta na análise dos Gestos 3, 4 e 5. Embora os resultados para a combinação 3-5 não apresentem diferenças significativas, a comparação entre os Gestos 3-4 e 4-5 não indicou significância estatística ($p = 0,126$ e $p = 0,229$, respectivamente), sugerindo uma relação não linear entre esses padrões. Ainda, o Gesto 5 apresentou a maior variabilidade (desvio padrão de 0,17 dB), o que sugere uma sensibilidade aumentada a variações na execução do gesto, apontando para a possível necessidade de coletas adicionais de amostras ou mesmo o uso de métricas complementares, como a fase do coeficiente de transmissão ou uma possível análise temporal, para reforçar a robustez do reconhecimento.

Dessa forma, os resultados obtidos validam a premissa de que o sistema baseado em uma FSS acoplada a uma luva de dados é sensível o suficiente para detectar variações entre gestos estáticos da mão, mesmo sob condições muito similares. A combinação de variações médias discretas com análise estatística rigorosa evidencia os desafios comuns enfrentados em sistemas de reconhecimento por RF, mas também aponta soluções viáveis e promissoras para aprimorar a acurácia e confiabilidade desses dispositivos em aplicações reais.

Capítulo 7

Análise de robustez

7.1 Contextualização da análise

Um dos principais desafios no desenvolvimento de sistemas de reconhecimento de gestos está na capacidade de distinguir sinais que apresentam configurações manuais visualmente semelhantes. Na língua brasileira de sinais (LIBRAS), por exemplo, as letras A e S compartilham uma estrutura muito próxima: ambas representam uma mão fechada, e a principal diferença entre elas reside na posição do dedo polegar, encostado nos dedos na letra S e posicionado lateralmente na letra A. Essa sutileza impõe um alto grau de exigência ao sistema de reconhecimento, que deve ser sensível o suficiente para identificar variações mínimas na conformação dos dedos. Neste trabalho, essa distinção é tratada como um estudo de caso fundamental para avaliar a robustez do método proposto, demonstrando sua capacidade de reconhecer sinais altamente similares com precisão.

Mesmo quando os gestos apresentam diferenças mínimas como no caso das letras A e S, o posicionamento do polegar e pequenas variações na geometria da mão alteram levemente o comportamento da propagação do sinal de rádio, o que, baseado no *setup* de medição, é refletido nas medições. Conforme demonstrado nos experimentos de validação da hipótese, variações sutis foram suficientes para provocar mudanças estatisticamente significativas nos dados coletados, permitindo a identificação de gestos visualmente semelhantes. Essa sensibilidade é fundamental para garantir a robustez do sistema em contextos reais de uso, especialmente em línguas de sinais, onde muitos símbolos compartilham configurações manuais parecidas, mas representam significados distintos.

garantindo que o par transmissor/receptor (Tx/Rx) permanecesse devidamente alinhado em todas as capturas. Dessa maneira, foi possível assegurar que os resultados obtidos experimentalmente refletissem predominantemente a influência dos gestos em análise, minimizando distorções decorrentes de variações inerentes ao procedimento laboratorial.

7.2.2 Resultados

Os resultados apresentados a seguir correspondem às medições dos gestos estáticos que representam as letras A e S na LIBRAS. Conforme descrito anteriormente, com o objetivo de garantir a confiabilidade das medições, cada gesto foi capturado três vezes. Todos os resultados obtidos estão reunidos na Figura 7.2.

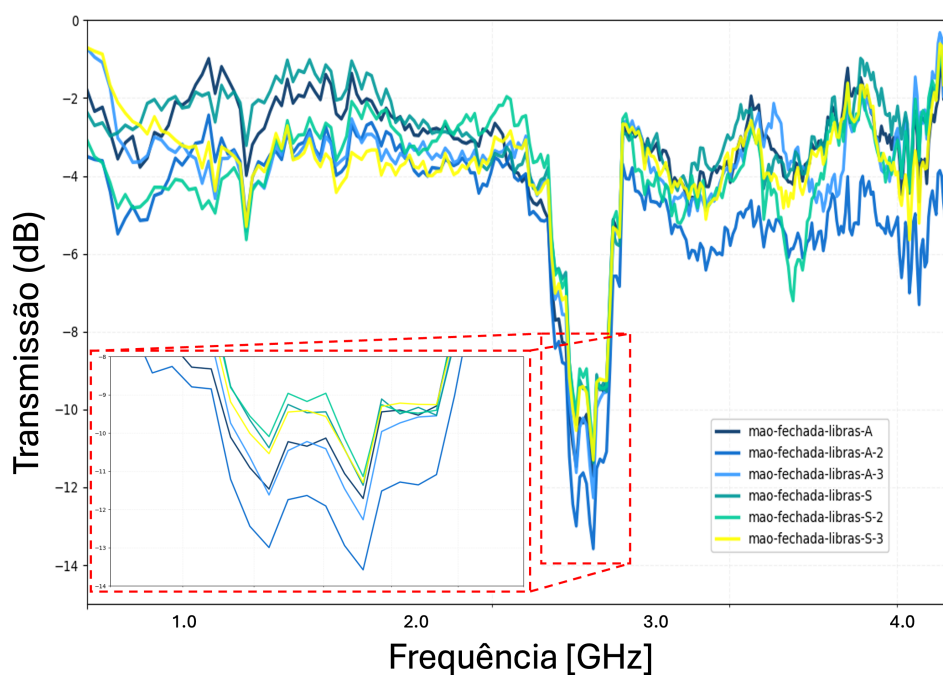


Figura 7.2: Resultados medidos dos gestos (letras A e S da Libras).

É possível observar que os resultados medidos para o gesto correspondente à letra S apresentam valores do módulo S_{21} inferiores quando comparados àqueles obtidos para o gesto referente à letra A. No entanto, destaca-se que, com base nas características do procedimento experimental adotado, que envolvem tanto o arranjo do sistema (*setup*) quanto

o dispositivo utilizado para as capturas, mesmo gestos visualmente similares resultaram em respostas significativamente distintas. Tal comportamento evidencia dois pontos:

- 1 - A sensibilidade do sistema para a identificação de gestos manuais que possuem características distintas.
- 2 - Para cenários onde os gestos possuem grande similaridade lexical o *setup* e dispositivo propostos demonstraram limitações, não sendo possível distinguir os gestos entre si.

7.3 Análise estatística dos resultados medidos

Com o objetivo de verificar se os resultados obtidos para os gestos correspondentes às letras A e S em LIBRAS podem ser considerados estatisticamente distintos e, portanto, distinguíveis pelo dispositivo proposto, faz-se necessária a aplicação de uma análise estatística sobre os dados coletados. As Figuras 7.3 e 7.4 apresentam os resultados dessa análise, evidenciando a variação do módulo S21 ao longo das três medições realizadas para cada gesto.

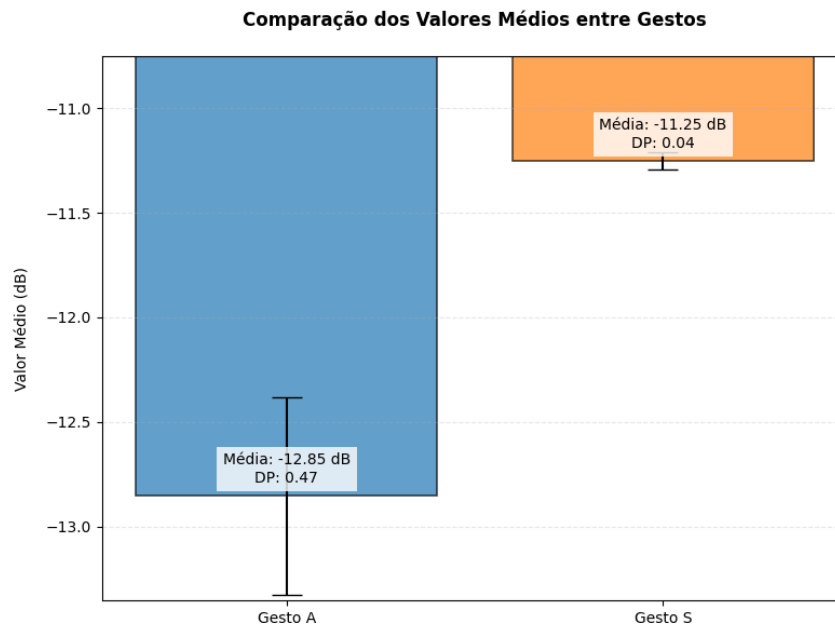


Figura 7.3: Variação do módulo S21 para dois gestos (letras A e S da LIBRAS), demonstrando os valores das medições, média e desvio padrão.

O gráfico de barras mostrado na Figura 7.3 evidencia uma diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$) entre os gestos, com o Gestor A apresentando o valor do módulo S21 médio (1,6 dB maior) do que o Gestor S. O pequeno desvio padrão do Gestor S (0,04 dB) indica alta consistência nas medições, enquanto o Gestor A mostra maior variabilidade (0,47 dB), possivelmente devido a fatores como posicionamento ou interferências.

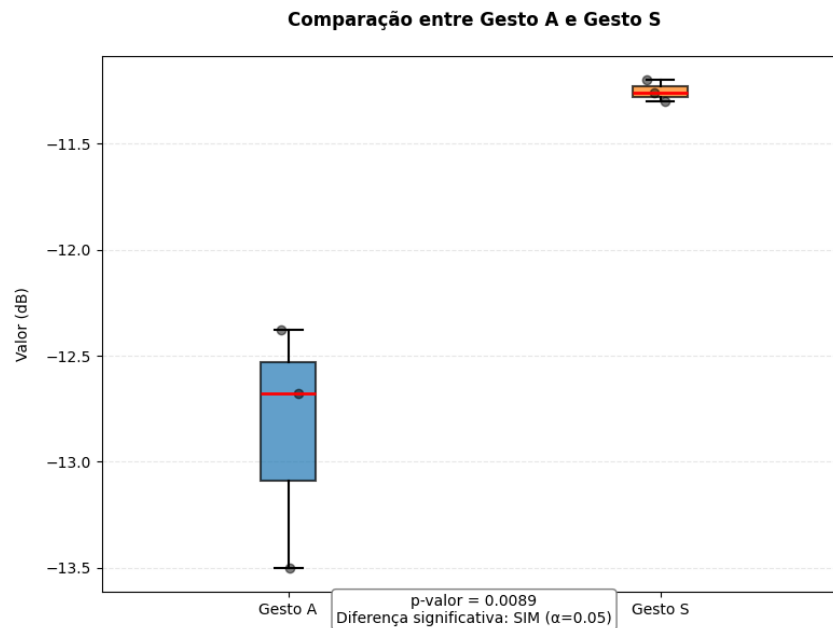


Figura 7.4: Variação do módulo S21 para dois gestos (letras A e S da Libras), demonstrando os valores das medições, p-valor, média e desvio padrão.

A imagem apresenta os resultados das medições do parâmetro S21 (em dB) para dois gestos estáticos, A e S, destacando a análise estatística realizada por meio do teste t de *Student*, cujo p-valor é 0,0089. Esse valor, por ser inferior ao limiar de 0,05, indica que a diferença entre os gestos é estatisticamente significativa, mesmo com suas semelhanças físicas. Observa-se que os valores de S21 para o Gesto A variam entre -12,3 dB e -13,5 dB, evidenciando uma distribuição distinta em relação ao Gesto S. Esses resultados sugerem que o dispositivo utilizado foi eficaz na distinção entre gestos similares, reforçando a validade do procedimento experimental proposto.

7.4 Conclusão do capítulo

A análise de robustez realizada neste capítulo teve como objetivo avaliar a capacidade do dispositivo proposto em distinguir gestos estáticos com características físicas semelhantes, a partir das medições do parâmetro S21. Os resultados obtidos demonstraram variações consistentes entre os gestos analisados, mesmo sob condições experimentais

controladas e replicadas. A aplicação de métodos estatísticos, como o teste t de *Student*, evidenciou que as diferenças observadas entre os gestos correspondentes às letras A e S em LIBRAS são estatisticamente significativas, reforçando a confiabilidade e a sensibilidade do sistema desenvolvido. Dessa forma, os resultados apresentados neste capítulo indicam que o procedimento experimental adotado é eficaz para a caracterização e distinção de gestos estáticos, contribuindo positivamente para a validação da abordagem proposta.

Capítulo 8

Conclusão

Considerando a relevância do uso de tecnologias assistivas na promoção da inclusão de pessoas surdas ou com deficiência auditiva, esta tese propôs o desenvolvimento de um novo dispositivo para reconhecimento de gestos manuais estáticos, com base em técnicas de radiofrequência (RF). A partir de um estudo do estado da arte e da identificação de lacunas existentes na literatura, foi concebido um *setup* experimental fundamentado na análise do parâmetro S21, conhecido por sua sensibilidade a pequenas variações no ambiente.

O processo de desenvolvimento do dispositivo foi apresentado de forma detalhada, contemplando desde a análise e validação da estrutura unitária de uma superfície seletiva de frequência (FSS) através de dois métodos computacionais. Após a análise computacional, foi realizada a integração a uma luva de dados, possibilitando a realização de gestos da Língua Brasileira de Sinais (LIBRAS) por um usuário. Os resultados obtidos por meio de medições experimentais, seguidos de análise estatística, evidenciaram a eficácia do dispositivo na distinção entre gestos similares, demonstrando seu potencial como ferramenta de apoio à comunicação eficiente e bidirecional.

Com o intuito de validar a consistência do método, foi conduzida uma análise de robustez, onde, dois símbolos da língua brasileira de sinais similares, cujos resultados confirmaram a sensibilidade e a reprodutibilidade do sistema proposto, mesmo diante de gestos com características morfológicas similares. Tais resultados indicam que o método desenvolvido apresenta atributos promissores para aplicações em reconhecimento de gestos manuais estáticos, podendo ser explorado em contextos diversos, como interfaces de

interação humano-máquina, sistemas de entrada para dispositivos em ambientes de jogos (*gaming*) ou ainda em soluções de realidade aumentada (AR). Os resultados apresentados evidenciaram as limitações do dispositivo proposto. Para gestos de formação muito semelhante, a análise estatística indicou que não havia diferenças significativas entre eles, o que poderia levar a interpretações equivocadas dos dados.

Como perspectiva de trabalhos futuros, propõe-se a expansão da abordagem para que o sistema proposto possa abranger também o reconhecimento de gestos dinâmicos, ampliando o escopo de aplicação do sistema. Além disso, demonstrou-se fundamental a implementação de técnicas de aprendizado de máquina ou inteligência artificial, com o objetivo de tornar mais robusta a acurácia do reconhecimento e classificação dos gestos, para que seja possível incorporar novos graus de liberdade aos parâmetros de identificação, potencializando ainda mais a aplicabilidade da solução proposta em cenários reais. Outro aspecto a ser mencionado refere-se à inserção de elementos diretamente acoplados à mão do usuário, com o objetivo de eliminar a influência e/ou a limitação imposta pela luva de borracha. Por fim, outras abordagens no *setup* de medição podem proporcionar resultados mais satisfatórios, como, por exemplo, utilizar os dados obtidos a partir da reflexão do sinal, em vez de analisar o sinal transmitido.

Apêndice A

Produções acadêmicas

A.1 Trabalhos publicados

Como parte da pesquisa que resultou neste trabalho, o proponente escreveu os artigos para jornais e congressos listados abaixo:

- "*Development of a Textile Device Applied to Hand Gesture Recognition*", aceito e publicado nos anais do (IMOC), 2023, Castelldefels. Este artigo apresenta o desenvolvimento de um dispositivo têxtil, prototipado usando tinta condutiva a base de prata, utilizado no reconhecimento de gestos estáticos manuais.
- "*Análise de Dispositivos Planares Para Aplicações Vestíveis*", aceito e publicado nos anais do SETEL, 2023, Natal. Neste trabalho, foi feita a proposta de um novo método de reconhecimento de gestos manuais através de um dispositivo vestível. Este trabalho foi premiado como *melhor artigo* do evento, sendo esse reconhecimento dentre todos os trabalhos.
- "*Aplicação de Rede Neural Convolutacional No Reconhecimento de Gestos Humanos a Partir Da Resposta Em Frequência de Uma FSS*", aceito e publicado nos anais do SBMO 2024, Bento Gonçalves. Como o título do trabalho sugere, foi realizada a implementação de uma rede neural convolutacional de forma a classificar diferentes gestos manuais a partir de dados coletados da prototipagem de uma FSS têxtil.
- "*Fully Textile Inked FSS for Wearable Applications*", artigo aceito para publicação na revista JMOe, 2025. Nesse trabalho, foi feito o estudo do comportamento de uma FSS têxtil e quais as possibilidades de aplicações dentro do universo de dispositivos

vestíveis.

- Um artigo com os resultados finais apresentados nesta tese está sendo escrito. Este trabalho será submetido em um periódico especializado na área de dispositivos de RF.
- Um pedido de patente está em fase de finalização, baseado nos resultados apresentados na tese e em sua originalidade.

Durante os estudos desenvolvidos no doutorado, alguns trabalhos paralelos foram escritos e publicados em congressos e revistas especializadas, todos eles listados abaixo:

- "*New compact MIMO antenna for 5G, WiMAX and WLAN technologies with dual polarisation and element diversity* artigo aceito e publicado na renomada revista IET MICROWAVES, ANTENNAS & PROPAGATION (ONLINE), 2021. Aqui, os autores trazem como proposta o desenvolvimento de uma nova estrutura, uma antena mimo, com pequenas dimensões e alto isolamento entre os elementos.
- "*Divisor de Potência de Wilkinson Miniaturizado Para Aplicações No 5G*, aceito e publicado nos anais do (SBMO), 2022, Natal. Uma técnica de miniaturização é proposta, transformando o divisor de potência de Wilkinson integrável em novos sistemas que requerem pequeno perfil em seus componentes.
- "*Ensaio Sobre Superfície Seletiva de Frequência (FSS) Reconfigurável Em Formato de Origami Wobbling Wall de Nove Cubos*, artigo aceito e publicado nos anais do (SBMO), 2022, Natal. Neste trabalho, foi realizado um estudo sobre um dispositivo reconfigurável do tipo Wobbling Wall. Essa estrutura possui a característica de reconfiguração mecânica, onde foram apresentadas suas vantagens e desafios na implementação desse tipo de estrutura.
- "*Desenvolvimento de Um Algoritmo de Decisão Aplicado a Antena Multibanda Reconfigurável*, artigo aceito e publicado nos Anais do 20º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica, 2022.
- "*A High-selectivity Bandpass Filter Using Dual-mode Coupling Resonator*, artigo publicado na revista JOURNAL OF MICROWAVES AND OPTOELECTRONICS, 2022. Neste trabalho é proposto um novo filtro baseado em ressoadores acoplados.

- "*A Compact CSRR-Based Sensor for Characterization of the Complex Permittivity of Dielectric Materials*, artigo publicado no jornal ELECTRONICS/MDPI, 2022. O artigo citado propõe o desenvolvimento de um novo dispositivo planar de duas portas como ferramenta para a extração dos valores de permissividade complexa de materiais dielétricos.
- "*A Miniaturized MIMO Antenna with Band-Notched Characteristic for UWB Applications*, artigo aceito e publicado nos anais do (IMOC), 2023, Castelldefels. Esse artigo traz a proposta de uma nova antena mimo UWB, com características de rejeição de banda nas frequências LAN.
- "*Licenciamento de Espectro para uso Científico: Legislação e Estudo de Caso de Sistema 5G Aberto*, artigo aceito e publicado nos anais do ENCOM 2024. Este trabalho, como o título sugere, traz o detalhamento do procedimento de solicitação de licenciamento junto ao órgão responsável.
- "*Virtualized 5G Testbed using OpenAirInterface: Tutorial and Benchmarking Tests*", trabalho aceito e publicado na revista JISA, 2024. O trabalho em questão traz a implementação e testes de desempenho em um testbed 5G utilizando frameworks abertos.

A.2 Premiações e Menções Honrosas

Dentre os trabalhos desenvolvidos e publicados durante o período do doutorado, alguns artigos obtiveram reconhecimento por sua qualidade e contribuição na área de pesquisa. Todos eles estão listados abaixo:

- "*Análise de Dispositivos Planares Para Aplicações Vestíveis*", este trabalho foi premiado como **melhor artigo** do evento, sendo esse reconhecimento dentre todos os trabalhos.
- "*Aplicação de Rede Neural Convolutacional No Reconhecimento de Gestos Humanos a Partir Da Resposta Em Frequência de Uma FSS*", este trabalho foi premiado como **melhor artigo** dentre os trabalhos na área de Eletromagnetismo do evento.

- "*Licenciamento de Espectro para uso Científico: Legislação e Estudo de Caso de Sistema 5G Aberto*, este trabalho recebeu **menção honrosa** no evento, como parte integrante dos melhores trabalhos apresentados.

Referências Bibliográficas

- [1] R. M. QUADROS and C. R. Cruz, *Língua de sinais*. Artmed Editora, 2009.
- [2] WHO, “Deafness and hearing loss,” in *World Health Organization*, <https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/deafness-and-hearing-loss>, 2021.
- [3] BRASIL, “Decreto 5626/05 que regulamenta a lei nº 10436 de 24 de abril de 2002,” *Brasília: Ministério da Saúde*, 2005.
- [4] C. Civil, “Lei nº 13.146, de 6 de julho 2015,” *Institui a lei brasileira de inclusão da pessoa com deficiência (estatuto da pessoa com deficiência)*. Brasília, 2015.
- [5] M. Souza *et al.*, “Principais dificuldades e obstáculos enfrentados pela comunidade surda no acesso à saúde: uma revisão integrativa de literatura,” *Revista CEFAC*, vol. 19, no. 3, pp. 395–405, 2017.
- [6] L. R. M. D. ROCHA and M. S. PASIAN, “A educação das pessoas surdas no brasil: Uma análise ao longo de 20 anos (2002-2022) após o reconhecimento da lei de libras,” *Educação em Revista*, vol. 39, p. e40565, 2023.
- [7] J. Xu, H. Wang, J. Zhang, and L. Cai, “Robust hand gesture recognition based on rgb-d data for natural human–computer interaction,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 54549–54562, 2022.
- [8] G. Fronteddu, S. Porcu, A. Floris, and L. Atzori, “A dynamic hand gesture recognition dataset for human-computer interfaces,” *Computer Networks*, vol. 205, p. 108781, 2022.

- [9] S. D. Chua, K. R. Chin, S. Lim, and P. Jain, “Hand gesture control for human–computer interaction with deep learning,” *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 17, no. 3, pp. 1961–1970, 2022.
- [10] J. P. Sahoo, A. J. Prakash, P. Pławiak, and S. Samantray, “Real-time hand gesture recognition using fine-tuned convolutional neural network,” *Sensors*, vol. 22, no. 3, p. 706, 2022.
- [11] S. Chen, W. Yang, Y. Xu, Y. Geng, B. Xin, and L. Huang, “Afall: Wi-fi-based device-free fall detection system using spatial angle of arrival,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 22, no. 8, pp. 4471–4484, 2022.
- [12] M. Oudah, A. Al-Naji, and J. Chahl, “Hand gesture recognition based on computer vision: a review of techniques,” *journal of Imaging*, vol. 6, no. 8, p. 73, 2020.
- [13] L. Guo, Z. Lu, and L. Yao, “Human-machine interaction sensing technology based on hand gesture recognition: A review,” *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, vol. 51, no. 4, pp. 300–309, 2021.
- [14] A. Mujahid, M. J. Awan, A. Yasin, M. A. Mohammed, R. Damaševičius, R. Maskeliūnas, and K. H. Abdulkareem, “Real-time hand gesture recognition based on deep learning yolov3 model,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 9, p. 4164, 2021.
- [15] P. Hu, C. Tang, K. Yin, and X. Zhang, “Wigr: a practical wi-fi-based gesture recognition system with a lightweight few-shot network,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 8, p. 3329, 2021.
- [16] Y. Gu, X. Zhang, Y. Wang, M. Wang, H. Yan, Y. Ji, Z. Liu, J. Li, and M. Dong, “Wigrunt: Wifi-enabled gesture recognition using dual-attention network,” *IEEE transactions on human-machine systems*, vol. 52, no. 4, pp. 736–746, 2022.
- [17] N. Dhruva, S. R. Rupanagudi, and H. Neelkant Kashyap, “Novel algorithm for image processing based hand gesture recognition and its application in security,” in *International Conference on Advances in Computing, Communication and Control*, pp. 537–547, Springer, 2013.

- [18] A. Silva, A. Moreira Engroff, and S. Ghissoni, “Protótipo de sensoriamento de detecção de gestos,” *Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão*, vol. 8, fev. 2020.
- [19] G. Monti, G. Porcino, and L. Tarricone, “Textile chipless tag for gesture recognition,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 16, pp. 18279–18286, 2021.
- [20] F. Liu, B. Du, Q. Wang, Y. Wang, and W. Zeng, “Hand gesture recognition using kinect via deterministic learning,” in *2017 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, pp. 2127–2132, IEEE, 2017.
- [21] F. Liu, W. Zeng, C. Yuan, Q. Wang, and Y. Wang, “Kinect-based hand gesture recognition using trajectory information, hand motion dynamics and neural networks,” *Artificial Intelligence Review*, vol. 52, no. 1, pp. 563–583, 2019.
- [22] B. Hisham and A. Hamouda, “Supervised learning classifiers for arabic gestures recognition using kinect v2,” *SN Applied Sciences*, vol. 1, no. 7, pp. 1–21, 2019.
- [23] G. García-Bautista, F. Trujillo-Romero, and S. O. Caballero-Morales, “Mexican sign language recognition using kinect and data time warping algorithm,” in *2017 International conference on electronics, communications and computers (CONIELECOMP)*, pp. 1–5, IEEE, 2017.
- [24] J. Pan, Y. Li, Y. Luo, X. Zhang, X. Wang, D. L. T. Wong, C.-H. Heng, C.-K. Tham, and A. V.-Y. Thean, “Hybrid-flexible bimodal sensing wearable glove system for complex hand gesture recognition,” *ACS sensors*, vol. 6, pp. 4156–4166, 2021.
- [25] F. Adib, Z. Kabelac, D. Katabi, and R. C. Miller, “3d tracking via body radio reflections,” in *11th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 14)*, pp. 317–329, 2014.
- [26] Y. Wang, K. Wu, and L. M. Ni, “Wifall: Device-free fall detection by wireless networks,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 16, no. 2, pp. 581–594, 2016.

- [27] M. J. Duarte, “Análise e projeto de estruturas ultraminiaturizadas de fss para aplicações em sistemas de sensoriamento de temperatura,” 2023.
- [28] H. B. Wang, Y. J. Cheng, and Z. N. Chen, “Wideband and wide-angle fss using loop slotted hybrid quarter-mode substrate integrated cavity with two independently controllable poles,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 12, pp. 8221–8226, 2020.
- [29] S. George, V. Nandalal, P. Jeyakumar, S. V. Babu, *et al.*, “Implementation of fss substrate on microstrip patch antenna for terahertz communication,” *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, vol. 24, no. July-August 2022, pp. 338–346, 2022.
- [30] S. B. d. Paiva, “Análise e síntese de superfícies seletivas de frequência bioinspiradas usando redes neurais para aplicações em sistemas de comunicação sem fio,” Master’s thesis, Brasil, 2019.
- [31] B. A. Munk, *Frequency selective surfaces: theory and design*. John Wiley & Sons, 2005.
- [32] A. Kapoor, R. Mishra, and P. Kumar, “Frequency selective surfaces as spatial filters: Fundamentals, analysis and applications,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 6, pp. 4263–4293, 2022.
- [33] W. Afzal, M. Z. Baig, A. Ebrahimi, M. R. Robel, M. T. A. Rana, and W. Rowe, “Frequency selective surfaces: Design, analysis, and applications,” in *Telecom*, vol. 5, pp. 1102–1128, MDPI, 2024.
- [34] Y. Pan and J. Dong, “Design and optimization of an ultrathin and broadband polarization-insensitive fractal fss using the improved bacteria foraging optimization algorithm and curve fitting,” *Nanomaterials*, vol. 13, no. 1, p. 191, 2023.
- [35] Y. Solunke and A. Kothari, “An ultra-thin, low-rscs, dual-bandpass novel fractal-fss for planar/conformal c&x bands applications,” *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 175, p. 155073, 2024.

- [36] L. Murugasamy and R. Sivasamy, “A novel fractal inspired iterated four-legged loaded loop elements based 2.5-d miniaturized frequency selective surface,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 63, no. 6, pp. 2164–2167, 2021.
- [37] V. Chaudhary and R. Panwar, “Neural network topology-based terahertz absorber using fractal frequency selective surface,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 21, pp. 24028–24037, 2021.
- [38] T. H. Pham and B. Raahemi, “Bio-inspired feature selection algorithms with their applications: a systematic literature review,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 43733–43758, 2023.
- [39] F. Azam, S. I. H. Shah, S. Bashir, and S. Koziel, “Review of recent advancement on nature/bio-inspired antenna designs,” *IEEE Access*, 2024.
- [40] V. Marrocco, V. Basile, I. Marasco, G. Niro, L. Melchiorre, A. D’Orazio, M. Grande, and I. Fassi, “Rapid prototyping of bio-inspired dielectric resonator antennas for sub-6 ghz applications,” *Micromachines*, vol. 12, no. 9, p. 1046, 2021.
- [41] L. C. Fontoura, H. W. D. C. Lins, A. S. Bertuleza, A. G. D’assunção, and A. G. Neto, “Synthesis of multiband frequency selective surfaces using machine learning with the decision tree algorithm,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 85785–85794, 2021.
- [42] C. A. Balanis, *Balanis’ Advanced Engineering Electromagnetics*. John Wiley & Sons, 2024.
- [43] T.-K. Wu, “Frequency selective surfaces,” *Encyclopedia RF Microwave Engineering*, 1995.
- [44] A. L. P. S. Campos, *SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA Análise e Projeto*. Editora IFRN, 2008.
- [45] A. S. Maia, “Projeto de absorvedores de micro-ondas do tipo banda dupla usando superfícies seletivas em frequência,” 2022.

- [46] H. Chen, H. Chen, X. Xiu, Q. Xue, and W. Che, “Transparent fss on glass window for signal selection of 5g millimeter-wave communication,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 12, pp. 2319–2323, 2021.
- [47] U. Farooq, M. F. Shafique, A. Iftikhar, and M. J. Mughal, “Polarization-insensitive triband fss for rf shielding at normal and higher temperatures by retrofitting on ordinary glass windows,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, no. 4, pp. 3164–3171, 2023.
- [48] Z. Chen, Y. Li, Z. Wang, J. Hu, and X. Yao, “Energy-saving glass loading dual-band miniaturized fss for rf shielding with high oblique stability and optical transparency,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2024.
- [49] J. G. De Oliveira, A. M. Oliveira, M. D. Mesquita, V. P. Neto, and A. G. D’assunção, “Development of a textile device applied to hand gesture recognition,” in *2023 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, pp. 214–216, IEEE, 2023.
- [50] O. Rac-Rumijowska, P. Pokryszka, T. Rybicki, P. Suchorska-Woźniak, M. Woźniak, K. Kaczkowska, and I. Karbownik, “Influence of flexible and textile substrates on frequency-selective surfaces (fss),” *Sensors*, vol. 24, no. 5, p. 1704, 2024.
- [51] S. Amit, V. Talasila, T. Ramya, and R. Shashidhar, “Frequency selective surface textile antenna for wearable applications,” *Wireless Personal Communications*, vol. 132, no. 2, pp. 965–978, 2023.
- [52] B. Sugumaran, R. Balasubramanian, and S. K. Palaniswamy, “Performance evaluation of compact fss-integrated flexible monopole antenna for body area communication applications,” *International Journal of Communication Systems*, vol. 35, no. 6, p. e5085, 2022.
- [53] H. Wang, L. Zheng, M. Yan, J. Wang, S. Qu, and R. Luo, “Design and analysis of miniaturized low profile and second-order multi-band polarization selective surface

- for multipath communication application,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 13455–13467, 2019.
- [54] R. Mittra, C. Chan, and T. Cwik, “Techniques for analyzing frequency selective surfaces—a review,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 76, no. 12, pp. 1593–1615, 1988.
- [55] C. T. Howard, K. W. Allen, and W. D. Hunt, “A loss tangent measurement surface for free space focused beam characterization of low-loss dielectrics,” in *2022 Antenna Measurement Techniques Association Symposium (AMTA)*, pp. 1–6, IEEE, 2022.
- [56] C. T. Howard, K. W. Allen, and W. D. Hunt, “Design of a tunable frequency-selective surface for microwave material measurement applications,” in *2023 Antenna Measurement Techniques Association Symposium (AMTA)*, pp. 1–6, IEEE, 2023.
- [57] S. Bhattacharya, K. Chaudhary, K. V. Srivastava, *et al.*, “Measurement considerations of fss absorber in free space,” in *2024 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and INC/USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/INC-USNC-URSI)*, pp. 1313–1314, IEEE, 2024.
- [58] V. P. d. Silva Neto, “Análise e desenvolvimento de novas configurações de antenas, filtros e superfícies seletivas de frequência não-uniformes e reconfiguráveis pelo método wcip generalizado,” 2016.
- [59] J. G. D. Oliveira, A. G. D’Assunção Junior, V. P. Silva Neto, and A. G. D’Assunção, “New compact mimo antenna for 5g, wimax and wlan technologies with dual polarisation and element diversity,” *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 15, no. 4, pp. 415–426, 2021.
- [60] V. P. S. Neto, A. G. D’Assunção, and H. Baudrand, “Analysis of finite size nonuniform stable and multiband fss using a generalization of the wcip method,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 60, no. 6, pp. 1802–1810, 2018.

- [61] N. Marcuvitz, *Waveguide handbook*. No. 21, Iet, 1951.
- [62] R. J. Langley and E. A. Parker, “Equivalent circuit model for arrays of square loops,” *Electronics Letters*, vol. 18, no. 7, pp. 294–296, 1982.
- [63] R. A. Pandhare, M. P. Abegaonkar, and C. Dhote, “High gain wideband and multi-band on-demand reconfigurable antenna for modern wireless application,” *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 15, no. 4, pp. 649–664, 2023.
- [64] S. Kundu and A. Chatterjee, “A new compact ultra-wideband frequency selective surface with angular stability and polarization independence for antenna radiation enhancement in microwave imaging application,” *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 155, p. 154351, 2022.
- [65] C. Shi, J. Zou, J. Gao, and C. Liu, “Gain enhancement of a dual-band antenna with the fss,” *Electronics*, vol. 11, no. 18, p. 2882, 2022.
- [66] M. L. Hakim, M. T. Islam, and T. Alam, “Incident angle stable broadband conformal mmwave fss for 5g (n257, n258, n260, and n261) band emi shielding application,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023.
- [67] K. Sangeethalakshmi, S. R. Devi, N. Gangatharan, and P. Sivalakshmi, “Challenges & opportunities in frequency selective surfaces for emi shielding application: A theoretical survey,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 43, pp. 3947–3950, 2021.
- [68] D. Kanchana, S. Radha, B. Sreeja, and E. Manikandan, “Convolute fss structure for shielding application in x-band frequency response,” *IETE Journal of Research*, vol. 68, no. 3, pp. 2157–2163, 2022.
- [69] U. Farooq, M. F. Shafique, A. Iftikhar, and M. J. Mughal, “Polarization-insensitive triband fss for rf shielding at normal and higher temperatures by retrofitting on ordinary glass windows,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, no. 4, pp. 3164–3171, 2023.

- [70] I. Khan, K. Zhang, L. Ali, and Q. Wu, “A compact fss based four-port mimo antenna for low mutual coupling,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023.
- [71] A. A. Ibrahim, W. A. Ali, M. Alathbah, and A. R. Sabek, “Four-port 38 ghz mimo antenna with high gain and isolation for 5g wireless networks,” *Sensors*, vol. 23, no. 7, p. 3557, 2023.
- [72] B. Anudeep, K. Krishnamoorthy, and P. Rao, “Low-profile, wideband dual-polarized 1×2 mimo antenna with fss decoupling technique,” *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 14, no. 5, pp. 634–640, 2022.
- [73] A. Singh, A. Kumar, and B. K. Kanaujia, “High gain and enhanced isolation mimo antenna with fss and metasurface,” *Optik*, vol. 286, p. 170982, 2023.
- [74] L. Gong, G. Zhang, H. Wang, P. Zhou, L. Wang, and Z. Yang, “A low rcs and array-insensitive fss wideband radome,” *Electronics*, vol. 12, no. 18, p. 3859, 2023.
- [75] J.-X. Chen, X.-F. Wang, L.-L. Yang, X.-R. Wang, X.-F. Gu, and W.-W. Yang, “Asymmetrical low-rs fss-based antenna for tri-band shared-aperture array,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2024.
- [76] Z. Huang, Y. Liu, Q. Cao, Y. Zhao, Z. Cao, S. Guo, L. Miao, and J. Jiang, “Partition layout loading of frequency selective surface absorbers on the curved surfaces for the significant rcs reduction,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 70, no. 6, pp. 2948–2954, 2022.
- [77] K. Duan, K. Chen, T. Jiang, J. Zhao, and Y. Feng, “Ultrawideband frequency selective radome utilizing 2.5-d lossy layers,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 22, no. 10, pp. 2427–2431, 2023.
- [78] S. Tariq, Q. Hussain, M. S. Alzaidi, R. M. Ghoniem, M. Alibakhshikenari, A. A. Althuwayb, B. S. Virdee, and M. Aslam, “Frequency selective surfaces-based

- miniaturized wideband high-gain monopole antenna for uwb systems,” *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 170, p. 154841, 2023.
- [79] J. Dong, Y. Ma, and M. Wang, “An ultrawideband miniaturized ultrathin flexible metamaterial absorber using lightweight ito film,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 22, no. 12, pp. 2970–2974, 2023.
- [80] A. Kumar, G. S. Reddy, *et al.*, “Highly angular-stable optically transparent microwave absorber with wide absorption bandwidth,” *IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications*, vol. 4, no. 4, pp. 114–119, 2022.
- [81] R. S. Anwar, L. Mao, and H. Ning, “Frequency selective surfaces: A review,” *Applied Sciences*, vol. 8, no. 9, p. 1689, 2018.
- [82] M. J. Duarte, J. G. D. Júnior, and V. P. da Silva Neto, “A novel ultra-miniaturized 2.5-d frequency selective surface temperature sensor with linear frequency–temperature behavior,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 378, p. 115763, 2024.
- [83] P. M. Njogu, B. Sanz-Izquierdo, and E. A. Parker, “A liquid sensor based on frequency selective surfaces,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, no. 1, pp. 631–638, 2022.
- [84] S. Soltani, P. S. Taylor, E. A. Parker, and J. C. Batchelor, “Popup tunable frequency selective surfaces for strain sensing,” *IEEE Sensors Letters*, vol. 4, no. 4, pp. 1–4, 2020.
- [85] COMSOL AB, “Comsol multiphysics® v.5.4.” <https://www.comsol.com/>, 2023. Accessed: 2025-01-21.
- [86] D. Dermeval, J. A. d. M. Coelho, and I. I. Bittencourt, “Mapeamento sistemático e revisão sistemática da literatura em informática na educação,” *JAQUES, Patrícia Augustin; SIQUEIRA; Sean; BITTENCOURT, Ig; PIMENTEL, Mariano.(Org.)*

Metodologia de Pesquisa Científica em Informática na Educação: Abordagem Quantitativa. Porto Alegre: SBC, 2020.

- [87] D. Pal, A. Kumar, V. Kumar, S. Basangar, and P. Tomar, “Development of an otdr-based hand glove optical sensor for sign language prediction,” *IEEE Sensors Journal*, 2023.
- [88] Z. Zhou, W. Zhang, J. Zhang, Y. Zhang, X. Yin, and B. He, “Flexible and self-adhesive strain sensor based on gnss/mwcnts coated stretchable fabric for gesture monitoring and recognition,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 349, p. 114004, 2023.
- [89] M. Nauman, R. Saleem, A. K. Rashid, and M. F. Shafique, “A miniaturized flexible frequency selective surface for x-band applications,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 58, no. 2, pp. 419–428, 2016.
- [90] M. Dorgham, “Warping parameters influence on warp yarns properties: Part 1: Warping speed and warp yarn tension,” *J. Text. Sci. Eng.*, vol. 3, pp. 1–6, 2013.
- [91] D. Rano, M. A. Chaudhary, and M. S. Hashmi, “A new model to determine effective permittivity and resonant frequency of patch antenna covered with multiple dielectric layers,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 34418–34430, 2020.
- [92] “Shieldex® 78/20 — shieldex.de.” <https://www.shieldex.de/en/products/shieldex-78-20/>. [Accessed 30-04-2024].
- [93] S. Sharma, M. R. Tripathy, and A. K. Sharma, “Low sar dual-band circularly polarized wearable rfid antenna using fss reector with reduced emi.,” *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 129, 2023.
- [94] A. M. D. Oliveira, J. G. D. Oliveira, M. D. Mesquita, V. P. S. Neto, and A. G. D’Assunção, “Aplicação de rede neural convolucional no reconhecimento de gestos humanos a partir da resposta em frequência de uma fss,” in *21º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (SBMO 2024)*, (Bento Gonçalves, RS), 2024.

- [95] D. Z. Vargas, C. L. Mezzomo, and T. M. Kessler, “A elaboração de um instrumento para investigar o domínio da percepção dos contrastes mínimos na língua brasileira de sinais,” in *CoDAS*, vol. 29, p. e20160234, SciELO Brasil, 2017.
- [96] J. Choma, “Scattering parameters: concept, theory, and applications,” *Univ. Southern California, Los Angeles, CA, USA, Tech. Rep. EE*, vol. 541, no. 2, 2006.
- [97] E. A. C. Barros and J. Mazucheli, “Um estudo sobre o tamanho e poder dos testes t-student e wilcoxon,” *Acta Scientiarum. Technology*, vol. 27, no. 1, pp. 23–32, 2005.
- [98] W.-T. Shi, Z.-J. Lyu, S.-T. Tang, T.-L. Chia, and C.-Y. Yang, “A bionic hand controlled by hand gesture recognition based on surface emg signals: A preliminary study,” *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, vol. 38, no. 1, pp. 126–135, 2018.
- [99] C. K. Jha, K. Gajapure, and A. L. Chakraborty, “Design and evaluation of an fbg sensor-based glove to simultaneously monitor flexure of ten finger joints,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 6, pp. 7620–7630, 2020.
- [100] M. Kowdiki and A. Khaparde, “Automatic hand gesture recognition using hybrid meta-heuristic-based feature selection and classification with dynamic time warping,” *Computer Science Review*, vol. 39, p. 100320, 2021.