



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE  
COMPUTAÇÃO



# **Redução de Taxa de Absorção Específica em *Phantoms* de Tecidos Humanos por meio de Superfícies Seletivas em Frequência com Substratos Feitos de Têxteis Hospitalares**

**Matheus Emanuel Tavares Sousa**

Orientador: Prof. Dr. Antônio Luiz Pereira de Siqueira Campos

Coorientador: Prof. Dr. Humberto Dionísio de Andrade

**Tese de Doutorado** apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN (área de concentração: Telecomunicações) como requerimento parcial para obtenção do título de Doutor.

Número de Ordem do PPgEEC: D360.

Natal, RN, maio de 2024

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

Sousa, Matheus Emanuel Tavares.

Redução de taxa de absorção específica em phantoms de tecidos humanos por meio de superfícies seletivas em frequência com substratos feitos de têxteis hospitalares / Matheus Emanuel Tavares Sousa. - 2024.

85f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Natal, 2024.

Orientação: Antônio Luiz Pereira de Siqueira Campos.

Coorientação: Humberto Dionísio de Andrade.

1. Superfícies Seletivas em Frequência Têxteis - Tese. 2. Caracterização Elétrica - Tese. 3. Phantoms Humanos - Tese. 4. Taxa de Absorção Específica - Tese. 5. Antenas têxteis - Tese. 6. Faixa ISM 2,4 GHz - Tese. I. Campos, Antônio Luiz Pereira de Siqueira. II. Andrade, Humberto Dionísio de. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621.3

---

# Resumo

---

Este trabalho propõe uma antena integrada com superfície seletiva de frequência (FSS) com substrato têxtil para aplicações em sistemas médicos de monitoramento contínuo com taxa de absorção específica (SAR) reduzida. A antena e a FSS foram fabricados em substratos têxteis de algodão e poliéster, utilizados em produtos têxteis para a saúde, baseados na norma técnica ABNT NBR 13734:2016 - Produtos têxteis para saúde, para operação na faixa de frequências ISM 2,4 GHz. O sistema opera na frequência de 2,4 GHz. Três materiais têxteis com proporções variadas de algodão e poliéster foram escolhidos para projetar as antenas e FSS. A caracterização elétrica desses materiais foi realizada. A antena foi projetada para um plano de terra preenchido e um patch retangular alimentado por uma linha de microfitas. A FSS foi projetado usando espiras quadradas. A operação experimental das superfícies seletivas em frequência dentro da faixa de interesse foi observada através do coeficiente de transmissão em função da frequência. Foram fabricados *phantoms* para simular os tecidos humanos pele, gordura, sangue e músculo, sendo realizada uma análise térmica para avaliar o impacto da exposição contínua na transmissão do sinal da antena integrada aos *phantoms* fabricados. Os resultados demonstram uma redução no SAR devido à rejeição efetiva do sinal da banda ISM pela FSS em torno de 77,77% em comparação com o sistema com a antena ativa sem a presença da FSS.

**Palavras-Chave:** Antenas têxteis, Superfícies Seletivas em Frequência Têxteis, Caracterização Elétrica, faixa ISM 2,4 GHz, *Phantoms* Humanos, Taxa de Absorção Específica.

---

# Abstract

---

This work proposes an integrated antenna with frequency selective surface (FSS) with textile substrate for applications in medical continuous monitoring systems with reduced specific absorption rate (SAR). The antenna and FSS were fabricated on cotton and polyester textile substrates, used in textile healthcare products, based on the technical standard ABNT NBR 13734:2016 - Textile healthcare products, for operation in the ISM 2.4 GHz frequency band. The system operates at a frequency of 2.4 GHz. Three textile materials with varying proportions of cotton and polyester were chosen to design the antennas and FSS. The electrical characterization of these materials was carried out. The antenna is designed for a filled ground plane and a rectangular patch fed by a microstrip line. The FSS was designed using square loops. The experimental operation of the frequency selective surfaces within the range of interest was observed through the transmission coefficient as a function of frequency. *Phantoms* were fabricated to emulate human tissues skin, fat, blood and muscle, and a thermal analysis was carried out to evaluate the impact of continuous exposure on signal transmission from the antenna integrated into the fabricated *phantoms*. The results demonstrate a reduction in SAR due to the effective rejection of the ISM band signal by the FSS of around 77.77% compared to the system with the active antenna without the presence of the FSS.

**Keywords:** Textile antennas, Textile Frequency-Selective Surfaces, Electrical Characterization, 2.4 GHz ISM band, Human *Phantoms*, Specific Absorption Rate.

---

# Lista de Tabelas

---

Tabela 2.1. Comparação de desempenho entre configurações de células. ....	23
Tabela 2.2. Relação entre características estruturais e desempenho operacional. ....	23
Tabela 4.1. Informações sobre os materiais têxteis selecionados. ....	44
Tabela 4.2. Equipamentos utilizados para a caracterização elétrica. ....	45
Tabela 4.3. Caracterizações das propriedades elétricas do corpo humano. ....	53
Tabela 4.4. Amostras para verificação do efeito do corante. ....	53
Tabela 4.5. Quantidades de materiais para cada <i>phantom</i> . ....	54
Tabela 4.6. Configurações de medições realizadas. ....	61
Tabela 5.1. Permissividade elétrica relativa e tangente de perdas experimentais (2,4-2,5 GHz). ....	64
Tabela 5.2. Dimensões físicas (em milímetros) das antenas construídas. ....	65
Tabela 5.3. Comportamento experimental das antenas têxteis construídas. ....	66
Tabela 5.4. Estabilidade angular ( <i>EA</i> ) experimental apresentada por cada FSS têxtil... 71	
Tabela 5.5. Parâmetros dielétricos medidos e de referência. ....	73
Tabela 5.6. Medições de temperaturas em cada configuração de medição. ....	74
Tabela 5.7. Valores de SAR a partir da elevação de temperatura observada em cada medição. ....	75
Tabela 5.8. Resultado da elevação de temperatura. ....	76

---

# Lista de Figuras

---

Figura 1.1: Segmentações dos e-têxteis.....	9
Figura 2.1. Ilustração do relato do fenômeno observado por Francis Hopkinson..	15
Figura 2.2. Hopkinson move o lenço para esquerda e depois direita. ....	16
Figura 2.3: Aparato construído por Rittenhouse para experimento sobre o fenômeno observado por Hopkinson. ....	17
Figura 2.4. Exemplos de estruturas seletivas em frequência com arranjo 2D (a e b) e 3D (c e d). ....	18
Figura 2.5 Estruturas típicas de FSS.....	20
Figura 2.6. Configurações clássicas de células Grupo 1. ....	21
Figura 2.7. Configurações clássicas de células Grupo 2.. ....	21
Figura 2.8. Configurações de células Grupo 3.. ....	22
Figura 2.9. Combinação de estrutura Cruz de Jerusalém com adição de dipolos. ....	22
Figura 2.10. Exemplos de métodos de análise de estruturas para aplicações eletromagnéticas. ....	24
Figura 2.11. Volume de produção de pesquisas por país sobre FSS - <i>Web os Science</i> . .	26
Figura 2.12. Volume de produção de pesquisas por país sobre FSS - <i>Scopus</i> . ....	26
Figura 2.13. Evolução anual da quantidade de publicações sobre FSS. <i>Web of Science e Scopus</i> . ....	27
Figura 2.14. Volume de produção de pesquisas por área de aplicação sobre FSS .....	28
Figura 2.15. Exemplos de focos de pesquisa com FSS. ....	29
Figura 3.1. Evolução da quantidade de publicações em antenas e FSS têxteis. ....	31
Figura 3.2. Utilização de antena têxtil em sistema FPV .....	31
Figura 3.3. FSS Têxtil para redução de níveis de SAR.....	32

Figura 3.4. Antena têxtil incorporada em mochila. ....	33
Figura 3.5. Antena vestível para comunicação 5G. ....	33
Figura 3.6. Produção de títulos a respeito de antenas têxteis por países – <i>Scopus</i> . ....	34
Figura 3.7. Áreas de pesquisa com aplicações de antenas têxteis (Brasil) - <i>Scopus</i> . ....	34
Figura 3.8. Áreas de pesquisa com aplicações de antenas têxteis (Índia) - <i>Scopus</i> . ....	35
Figura 3.9. Produção de títulos a respeito de antenas têxteis por países – <i>Web of Science</i> . .....	36
Figura 3.10. Antena têxtil integrada em jaqueta para aplicação em sistema RFID. ....	37
Figura 3.11. Comportamento do ganho para as situações analisadas. ....	37
Figura 3.12. Produção de títulos a respeito de FSS têxteis por países – <i>Scopus</i> . ....	38
Figura 3.13. FSS têxteis projetadas por meio de método iterativo de onda completa. ....	39
Figura 3.14. Áreas de pesquisa com aplicações de FSS têxtil - <i>Scopus</i> . ....	39
Figura 3.15. Produção de títulos a respeito de antenas têxteis por países – <i>Web of Science</i> . .....	40
Figura 3.16. FSS e antena têxteis construídas para análise de níveis de SAR. ....	40
Figura 3.17. Conjunto antena e FSS para aplicação vestível. ....	41
Figura 4.1. Etapas metodológicas adotadas. ....	43
Figura 4.2. Determinação da permissividade elétrica e tangente de perdas dos materiais têxteis. ....	46
Figura 4.3. Utilização dos dados experimentais no ambiente de simulação. ....	46
Figura 4.4. Estrutura geral das antenas propostas (a) Vista frontal (b) Vista posterior. .	47
Figura 4.5. Cobre adesivo utilizado como elemento condutor nas antenas construídas.	48
Figura 4.6. Antenas construídas com substrato dielétrico têxtil. ....	48
Figura 4.7. Verificação da relação experimental entre coeficiente de reflexão e frequência para as antenas construídas. ....	49
Figura 4.8. Célula espira quadrada utilizada para as FSSs têxteis. ....	50
Figura 4.9. FSSs construídas com substrato dielétrico têxtil. ....	50

Figura 4.10. Setup para medição do coeficiente de transmissão das FSSs construídas.	51
Figura 4.11. Dimensão da antena para cálculo da região de campo distante.	51
Figura 4.12. Medição experimental das FSSs construídas.	52
Figura 4.13. Verificação da influência do corante alimentício nas propriedades permissividade elétrica, tangente de perdas e condutividade elétrica.	54
Figura 4.14. Utilização de corante nas amostras de <i>phantoms</i> para facilitar a identificação.	55
Figura 4.15. Processo metodológico para medição de temperatura nos <i>phantoms</i> com e sem a presença da FSS.	57
Figura 4.16. Etapas de medição de temperatura nos <i>phantoms</i> .	57
Figura 4.17. Setup de calibração (a) esquemático (b) experimental.	58
Figura 4.18. Setup para exposição dos <i>phantoms</i> à radiação EM.	59
Figura 4.19. Leitura de temperatura nos <i>phantoms</i> por meio de termovisor.	59
Figura 4.20. Registro de temperatura com utilização do termovisor.	60
Figura 5.1. Dados experimentais para permissividade elétrica relativa e a tangente de perdas em função da frequência de cada material têxtil.	63
Figura 5.2. Representação das dimensões das antenas construídas.	64
Figura 5.3. Relações simuladas e experimentais para o coeficiente de reflexão em função da frequência.	66
Figura 5.4. Carta de Smith para as antenas têxteis construídas.	67
Figura 5.5. Diagramas de radiação das antenas têxteis (a) Alg_63 (b) Alg_89 (c) Alg_100.	67
Figura 5.6. Dimensões em milímetros das células unitárias para cada FSS têxtil.	68
Figura 5.7. Simulações para polarizações TE e TM (a) Alg_63 (b) Alg_89 (c) Alg_100.	69
Figura 5.8. Resultados experimentais para polarizações TE e TM (a) Alg_63 (b) Alg_89 (c) Alg_100.	70
Figura 5.9. Setup de caracterização elétrica dos <i>phantoms</i> .	72
Figura 5.10. Resultado da caracterização elétrica dos <i>phantoms</i> .	73

---

# Sumário

---

Lista de Abreviações e Acrônimos .....	vii
Lista de Símbolos .....	viii
Capítulo 1 - Introdução.....	9
<b>1.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>12</b>
<b>1.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>12</b>
<b>1.3 Justificativa .....</b>	<b>13</b>
<b>1.4 Estrutura do texto .....</b>	<b>13</b>
Capítulo 2 - Referencial Teórico .....	15
<b>2.1 Contexto histórico .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Superfícies/Estruturas seletivas em frequência .....</b>	<b>17</b>
<b>2.3 Estrutura típica de uma FSS .....</b>	<b>18</b>
<b>2.4 Métodos de análise de FSS .....</b>	<b>24</b>
<b>2.5 Estudos atuais com aplicações de FSS .....</b>	<b>25</b>
Capítulo 3 – Trabalhos Relacionados .....	30
<b>3.1 Utilização de têxteis como substratos dielétricos .....</b>	<b>30</b>
<b>3.2 Abordagens atuais sobre antenas têxteis .....</b>	<b>32</b>
<b>3.3 Abordagens atuais sobre superfícies seletivas em frequência têxteis .....</b>	<b>38</b>
Capítulo 4 – Materiais e Métodos.....	43
<b>4.1 Seleção dos materiais têxteis a serem empregados como substrato dielétrico ..</b>	<b>44</b>
<b>4.2 Caracterização elétrica dos materiais têxteis .....</b>	<b>45</b>

<b>4.3 Projeto, simulação e construção das antenas têxteis .....</b>	<b>47</b>
<b>4.4 Projeto, simulação e construção das FSSs têxteis .....</b>	<b>49</b>
<b>4.5 Fabricação dos <i>phantoms</i> .....</b>	<b>53</b>
<b>4.6 Estrutura para verificação do comportamento da temperatura nos <i>phantoms</i> .....</b>	<b>56</b>
Capítulo 5 – Resultados e Discussão .....	62
<b>5.1 Resultados da caracterização elétrica dos materiais têxteis .....</b>	<b>62</b>
<b>5.2 Resultados simulados e experimentais das antenas têxteis .....</b>	<b>64</b>
<b>5.3 Resultados simulados e experimentais das FSSs têxteis.....</b>	<b>68</b>
<b>5.4 Resultados da caracterização elétrica dos <i>phantoms</i> .....</b>	<b>71</b>
<b>5.5 Exposição dos <i>phantoms</i> à radiação EM e aplicação das FSSs têxteis e análise térmica .....</b>	<b>74</b>
Capítulo 6 – Conclusão .....	77
Referências .....	80

---

# Lista de Abreviações e Acrônimos

---

2D – Bidimensional

3D - Tridimensional

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações

ATE – *Artificial Tissue Emulating*

BW – Largura de banda (*Bandwidth*)

EM - Eletromagnética

ISM – Industrial, Científica e Médica (*Industrial, Scientific and Medical*)

FPV – Visão em primeira pessoa (*First Person View*)

FSS – Superfície Seletiva em Frequência (*Frequency Selective Surface*)

HFSS – *High Frequency Structure Simulator*

NBR – Norma Brasileira

SAR – Taxa de Absorção Específica (*Specific Absorption Rate*)

TE – Transversal elétrico

TFSS – Superfície Têxtil Seletiva em Frequência (*Textile Frequency Selective Surface*)

TM – Transversal Magnéticos

WBAN – *Wireless Body Area Network*

RFID – Identificação por radiofrequência (*radiofrequency identification*)

SMA – *SubMiniature Version A*

---

# Lista de Símbolos

---

$\varepsilon$  – Permissividade elétrica

$\varepsilon_r$  – Permissividade elétrica relativa

$\tan\delta$  – Tangente de perdas

$f$  – Frequência elétrica

$S_{11}$  – Coeficiente de reflexão

$S_{21}$  – Coeficiente de transmissão

$c$  – Velocidade da luz no vácuo

$R_{CD}$  – Distância em região de campo distante

$\lambda$  – Comprimento de onda

$D_A$  – maior dimensão da antena para cálculo da região de campo distante

---

# Capítulo 1 - Introdução

---

O campo de aplicação dos tradicionais dispositivos eletrônicos, inclusive de comunicação, foi ampliado a partir da incorporação de elementos têxteis, desenvolvendo-se têxteis com funcionalidades eletrônicas ou e-têxteis. Pode-se destacar, diante desse contexto, a necessidade do desenvolvimento de sistemas personalizados e facilmente adaptáveis em superfícies não planas, abrangendo a aplicação de tecidos, malhas e não-tecidos. Singha, Kumar e Pandit (2019) apresenta algumas segmentações para as aplicações de e-têxteis: vestíveis inteligentes (*smart clothing*), eletrônicos vestíveis (*wearable electronics*) e computadores vestíveis (*wearable computers*), contextualizando a interdisciplinaridade entre têxteis, engenharia elétrica e ciências da informação, conforme ilustrado na Figura 1.1.

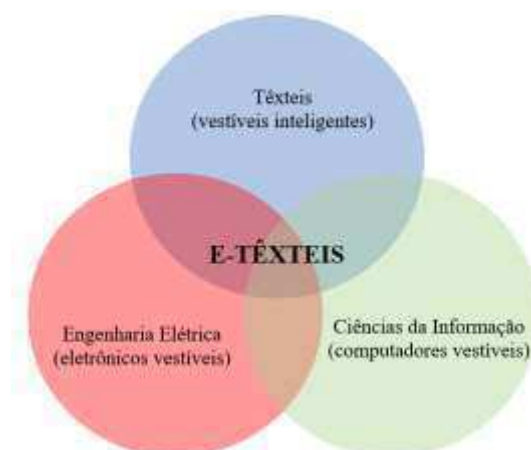


Figura 1.1: Segmentações dos e-têxteis. Adaptado de Singha, Kumar e Pandit (2019).

Uma vez que leveza, adaptabilidade e facilidade de integração são características esperadas nos novos dispositivos de comunicação, os materiais têxteis tornam-se aliados ao desenvolvimento dessas tecnologias. Nos últimos dez anos (2014 a maio de 2024), o repositório acadêmico Web of Science indica a produção de 3.522 trabalhos para a busca “wearable and textile technology”, com 194 resultados já em 2024. Com relação a anos completos (2014 a 2023), a quantidade de publicações a respeito do tema é de 78 em 2014 e 612 em 2023, destacando o aumento no interesse em pesquisas sobre

## CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

materiais têxteis em novas tecnologias. As linhas de pesquisa relacionadas com engenharias e telecomunicações somam 1.283 trabalhos.

Diante desse destaque, aplicações de materiais têxteis no desenvolvimento de estruturas seletivas em frequência são observadas, sendo atraídas por características que a própria tipologia dos materiais têxteis apresenta, conforme Memon *et al.* (2021) e El Gharbi *et al.* (2020): respirabilidade, fácil adaptação em superfícies não planas e leveza, que eram características importantes para a aplicação proposta com sensores têxteis. Sugumaran, Balasubramanian e Palaniswamy (2021) exploraram essas características no desenvolvimento de uma superfície seletiva em frequência (FSS – *Frequency Selective Surface*) têxtil, com a finalidade de melhoria de desempenho de uma antena monopolo com relação a redução dos níveis de taxa de absorção específica (SAR – *Specific Absorption Rate*) e aumento de ganho. Já Naseer, Gokcen e Saka (2021) analisaram o comportamento de um material têxtil condutor para atuação como filtro rejeita-faixa, para frequências na Banda X. Sugumaran, Balasubramanian e Palaniswamy (2022) observaram aumento do ganho por meio da influência da FSS em lóbulos posteriores e consequente diminuição de níveis de SAR, em pacientes que estão sujeitos à proximidade de dispositivos de comunicação sem fio e desenvolvimento de dispositivos multibanda. Logo, percebe-se a atração para o estudo e desenvolvimento de pesquisas com utilização de materiais têxteis para o desenvolvimento de FSS.

O advento das tecnologias embarcadas envolve a utilização de dispositivos de transmissão e recepção de dados em proximidade/contato com o usuário, tornando-os sujeitos a contato com a radiação eletromagnética, e consequentemente maiores níveis de taxa de absorção específica (SAR), proveniente dos dispositivos. Dessa forma, como a implementação de uma superfície seletiva em frequência adaptável aos novos sistemas embarcados poderia favorecer a diminuição dos níveis de SAR aos usuários?

A utilização de têxteis para compor a superfície seletiva em frequência é atrativa para aplicações que requerem sistemas adaptáveis. No contexto de dispositivos para a área médica, torna-se então interessante a verificação do comportamento de têxteis médicos utilizados como substratos dielétricos em superfícies seletivas em frequência, oferecendo inclusive maior conforto ao usuário. Dessa forma, pretende-se desenvolver superfícies têxteis seletivas em frequência para aplicação conjunta com sistemas embarcados em proximidade ao usuário, com objetivo de redução dos níveis de SAR

## CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

aos quais estão expostos quem utiliza o dispositivo por meio da verificação da evolução dos níveis de temperatura no objeto analisado com e sem a influência da superfície têxtil seletiva em frequência.

A validação quantitativa de dispositivos de micro-ondas, que interagem eletromagneticamente com o corpo humano, é um aspecto importante no processo de desenvolvimento tecnológico. Embora um modelo numérico do ambiente do sistema possa ser simulado de forma ideal, ele não pode reproduzir fielmente o ambiente real, suscetível a diversas interferências. Portanto, a presença do corpo humano constitui o ambiente de medição mais fiel para esses sistemas. Contudo, dispositivos e sistemas recém-projetados, que dependem das interações entre o corpo humano e os campos eletromagnéticos, requerem múltiplos testes e medições em um ambiente controlado. Tal ambiente é essencial para validar o desempenho em todos os cenários de operação possíveis e assegurar a segurança desses dispositivos e sistemas (MOBASHSHER; ABBOSH, 2015).

O uso de participantes humanos vivos para testar dispositivos introduz uma série de incertezas no processo, incluindo movimentos respiratórios, variações na vibração cardiovascular e mudanças na umidade da pele, além das preocupações de segurança associadas aos novos dispositivos. Além disso, a aplicação desses dispositivos e sistemas em seres humanos ou em materiais relacionados a eles apresenta sérias questões éticas, exigindo autorização ética das autoridades competentes. Avaliar adequadamente o nível de risco de diferentes estudos científicos, bem como considerar os aspectos físicos e psicológicos com antecedência, pode ser desafiador. Portanto, o uso de simuladores de tecido artificial (ATE – *Artificial Tissue Emulating*) é altamente benéfico para testar dispositivos ou sistemas, fornecendo uma alternativa mais controlada e ética (FOSTER; SCHWAN, 1988). Esses simuladores de tecido artificial são chamados de *phantoms* e, na maioria dos casos, os projetistas dependem de simuladores e substitutos do corpo humano para imitar as características do corpo humano.

Para alcançar maior integração entre dispositivos de comunicação e elementos têxteis, este trabalho propõe a utilização de materiais têxteis, utilizados em vestuários aplicados na área da saúde, como substratos dielétricos em superfícies têxteis seletivas em frequência (FSS – *Frequency Selective Surfaces*), para aplicações na banda de 2,4

## CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

GHz a 2,5 GHz conhecida como banda de aplicações industriais, científicas e médicas (ISM - *Industrial, Scientific and Medical*), conforme a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), por meio da Resolução nº 716, de 31 de outubro de 2019. Os materiais têxteis são compostos por diferentes proporções de algodão e poliéster, com diferentes proporções em cada amostra, baseando-se na norma técnica ABNT NBR 13734:2016 - Produtos têxteis para saúde.

Para análise da absorção de radiação eletromagnética (EM) são propostos *phantoms* fabricados para simulação dos tecidos humanos pele, gordura, músculo e sangue. As FSSs têxteis fabricadas atuarão como refletores da radiação eletromagnética que incide sobre os *phantoms*.

### 1.1 Objetivo Geral

Aplicar sobre *phantoms* que simulam tecidos humanos (pele, gordura, músculo e sangue) uma FSS têxtil e verificar sua influência como refletora de radiação eletromagnética emitida por uma antena com lóbulo principal direcionado aos simuladores de tecido humano. A influência da FSS será observada por meio da análise térmica nos *phantoms*.

### 1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral pretendido deve-se atingir os seguintes objetivos específicos:

- **Caracterização elétrica dos materiais têxteis:** para projeto e desenvolvimento das FSSs será necessário previamente um estudo a respeito das propriedades elétricas que o material têxtil apresenta com relação a permissividade elétrica e tangente de perdas em função da frequência.
- **Simulação das estruturas propostas:** os dados provenientes das caracterizações estruturais e elétricas serão implementados em software para verificação do comportamento das FSSs dentro da faixa de frequências desejada.
- **Construção das FSSs e verificação experimental:** a após verificação da concordância dos resultados simulados, as estruturas construídas serão

## CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

analisadas experimentalmente por meio de técnicas de medição em espaço livre.

- **Desenvolvimento de *phantoms*:** para verificação da atuação das FSSs na redução de níveis de SAR no corpo humano, esta etapa consiste no desenvolvimento de estruturas com características elétricas semelhantes à de camadas do corpo humano, por exemplo, pele, gordura, músculo e sangue, que estão expostas à radiação eletromagnética provenientes de antenas operando em proximidade com o corpo humano.
- **Caracterização elétrica dos *phantoms*:** para comprovar o comportamento dos *phantoms* como tecidos humanos será necessário previamente um estudo a respeito das propriedades elétricas que os mesmos apresentam com relação a permissividade elétrica, tangente de perdas e condutividade elétrica em função da frequência.
- **Análise térmica:** para avaliar o impacto da exposição à radiação de sinal e verificar o comportamento da temperatura nos *phantoms* com e sem a influência da FSS no sistema.

### 1.3 Justificativa

Para limitar os níveis de exposição à radiação eletromagnética proveniente de antenas operando em proximidade com o corpo humano é interessante a utilização de estruturas leves e adaptáveis às curvas provenientes do corpo. Logo, a caracterização estrutural e elétrica de materiais têxteis compostos por materiais normatizados para o regime hospitalar, com objetivo de utilização como substrato dielétrico têxtil em TFSS é proposta com finalidade de redução de níveis de SAR para a faixa ISM 2,4 GHz. Para alcançar o objetivo, será verificada a interação da operação da antena com FSSs têxteis e a avaliação da temperatura em *phantoms*, que simulam as características de tecidos do corpo humano, tais como pele, gordura, músculo e sangue. Pretende-se observar a temperatura nos *phantoms* sujeitos à radiação eletromagnética proveniente da antena num sistema sem a presença das FSSs e depois com a inclusão das FSSs atuando como refletores da radiação eletromagnética proveniente da antena.

### 1.4 Estrutura do texto

Este trabalho está organizado em seis capítulos.

## CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

No Capítulo 1 discute-se a evolução das aplicações dos dispositivos eletrônicos e a incorporação dos materiais têxteis nesse campo, introduzindo-se os chamados e-têxteis ou têxteis eletrônicos. Nesse contexto destaca-se o desenvolvimento de antenas e superfícies seletivas em frequência têxteis para aplicação num ambiente de redução da exposição do corpo humano à radiação eletromagnética. Os objetivos do trabalho também são apresentados.

O Capítulo 2 apresenta o contexto dos primeiros estudos a respeito das superfícies seletivas em frequência, assim como estruturas clássicas e respostas em frequência típicas de alguns tipos de células, métodos de análise e volume de publicações atuais a respeito do tema.

No Capítulo 3 o estado da arte referente à aplicação de têxteis como substratos dielétricos em antenas e superfícies seletivas em frequência é apresentado. Os campos de aplicação envolvendo esses tipos de estruturas e o volume atual de publicações a respeito do tema também é discutido.

No Capítulo 4 apresenta-se a metodologia adotada no desenvolvimento das FSSs e *phantoms*, incluindo o procedimento para seleção e obtenção das características elétricas dos materiais têxteis utilizados; projeto, simulação e análise experimental das antenas e superfícies seletivas em frequência construídas e configuração das estruturas para a realização das medições; fabricação e caracterização elétrica dos *phantoms* para simulação dos tecidos do corpo humano.

No Capítulo 5 apresentam-se os resultados obtidos ao final de cada procedimento indicado no Capítulo 4, apresentando-se também as estruturas construídas e analisadas experimentalmente.

O Capítulo 6 é destinado às considerações finais do trabalho e a possíveis estudos futuros.

---

## Capítulo 2 - Referencial Teórico

---

Nesse capítulo serão abordados os principais referenciais teóricos de interesse para o desenvolvimento do trabalho, incluindo superfícies seletivas em frequência e suas configurações clássicas, bem como o advento de novas configurações e materiais para novas aplicações das FSS.

### 2.1 Contexto histórico

No ano de 1785, na Filadélfia, Estados Unidos da América, o astrônomo David Rittenhouse recebeu uma carta escrita por Francis Hopkinson, que requeria atenção dele, para uma observação feita no que seria “um novo caso em óptica”. Segundo Cope (1932), Francis Hopkinson inicia seu relato para Rittenhouse da seguinte forma (em tradução livre): “Tomo a liberdade de solicitar sua atenção para o seguinte problema de óptica. Acredito que seja inteiramente novo e a solução proporcionará entretenimento para você e instrução para mim”. De acordo com o relato descrito por Hopkinson, ele estava, durante o anoitecer, à porta de sua casa quando esticou entre suas mãos (altura dos olhos) um lenço de seda e através desse podia ver um dos postes de luz da rua, distante aproximadamente 90 metros. Na Figura 2.1 ilustra-se a situação relatada e o fenômeno observado por Hopkinson.

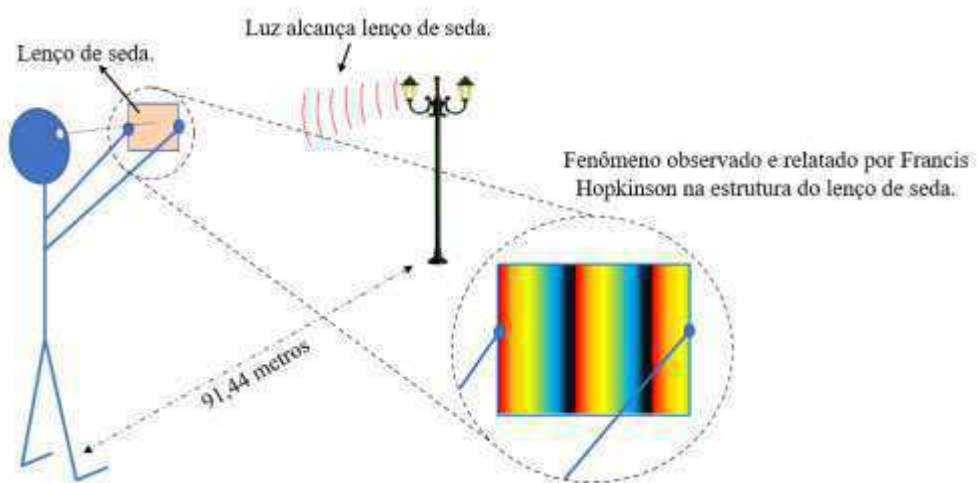


Figura 2.1. Ilustração do relato do fenômeno observado por Francis Hopkinson. Autoria Própria.

## CAPÍTULO 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Durante a descrição da observação, Hopkinson destaca que ao movimentar o lenço para direita e para a esquerda as barras escuras (que acreditou serem fios do lenço) não pareciam ter movimento em relação aos olhos do observador, em conjunto com a estrutura física do lenço, conforme ilustrado na Figura 2.2.

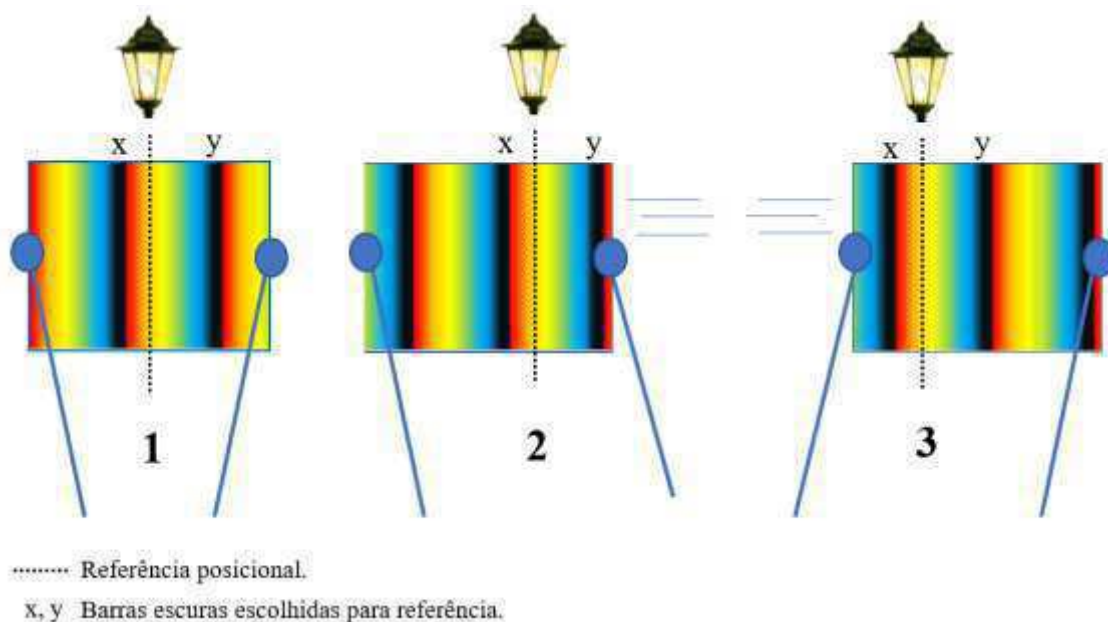


Figura 2.2. Hopkinson move o lenço para esquerda e depois direita. Autoria própria.

Conforme explicado na resposta do Dr. Rittenhouse à carta, o fenômeno observado por Hopkinson não se tratava apenas de uma ampliação da rede de fios que compunham a estrutura do lenço, mas sim da observação de um caso de difração da luz. Ao movimentar o lenço as linhas escuras permaneciam em posição fixa ao invés de acompanhar o movimento da estrutura física do lenço. Para estudo do fenômeno, Rittenhouse construiu um aparato que contava com uma estrutura de fios igualmente espaçados de aproximadamente 0,1 mm, segundo Hopkinson e Rittenhouse (1786). Esse espaçamento veio a ser definido como constante de periodicidade e influenciava diretamente na resposta observada. Na Figura 2.3 ilustra-se a estrutura construída, sendo denominada grade de difração óptica.

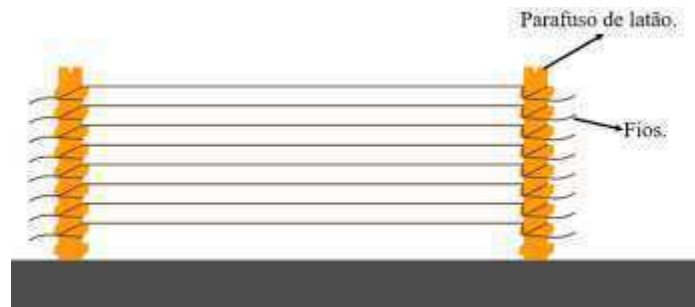


Figura 2.3: Aparato construído por Rittenhouse para experimento sobre o fenômeno observado por Hopkinson. Adaptado de Sillicann Systems GMBH.

Foram investigadas grades de difração óptica por meio da decomposição de um feixe de luz monocromático, em que a estrutura ilustrada na Figura 2.3 foi utilizada como filtro espacial, para o feixe de luz monocromático, ocorrendo a filtragem de algumas frequências do espectro, com dependência da resposta em frequência do espaçamento entre os fios. Dessa forma, esse relato é tido como um marco no estudo e observação de estruturas físicas, com finalidade de filtragem de frequências, ou seja, superfícies seletivas em frequência.

## 2.2 Superfícies/Estruturas seletivas em frequência

A definição típica de uma superfície seletiva em frequência é a de uma estrutura que contém um arranjo periódico de elementos condutores ou de aberturas, para operação como filtros espaciais em micro-ondas e óptica, com objetivo de obter total reflexão (arranjo periódico de *patches* metálicos, por exemplo, Figura 2.4a) ou total transmissão (arranjo periódico de aberturas, por exemplo, Figura 2.4b) em uma determinada frequência de ressonância.

Pode-se observar na discussão de Mittra, Chan e Cwik (1988), Wu (1995) e Munk (2000), que os arranjos de *patches* metálicos ou aberturas eram tratados como tipicamente bidimensionais (2D), sendo então difundida a nomenclatura de superfícies seletivas em frequência; mas, já se observam estudos com estruturas tridimensionais (3D) atuando como filtros espaciais. Por exemplo, Kien e Hong (2020) estudaram o desenvolvimento de um filtro passa-faixa tridimensional por meio de algoritmo de otimização para operação nas bandas de 2,5 a 7,5 GHz e 4 a 13 GHz. No estudo de Vásquez-Peralvo *et al.* (2022), por meio de técnicas de metalização foram construídas superfícies seletivas em frequência tridimensionais para operação na banda de ondas milimétricas. Nas Figura 2.4a e 2.4b são exemplificadas estruturas com elementos em

## CAPÍTULO 2. REFERENCIAL TEÓRICO

arranjo bidimensional. Já nas Figuras 2.4c e 2.4d são mostradas estruturas com arranjo tridimensional.

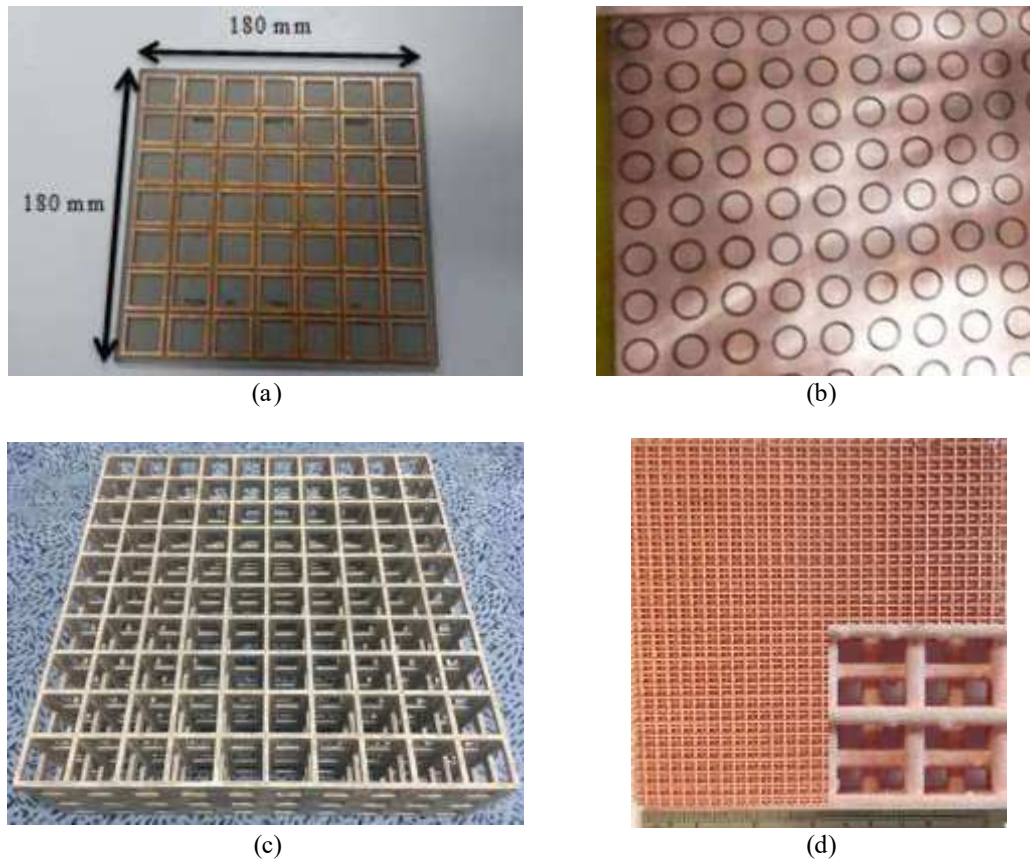


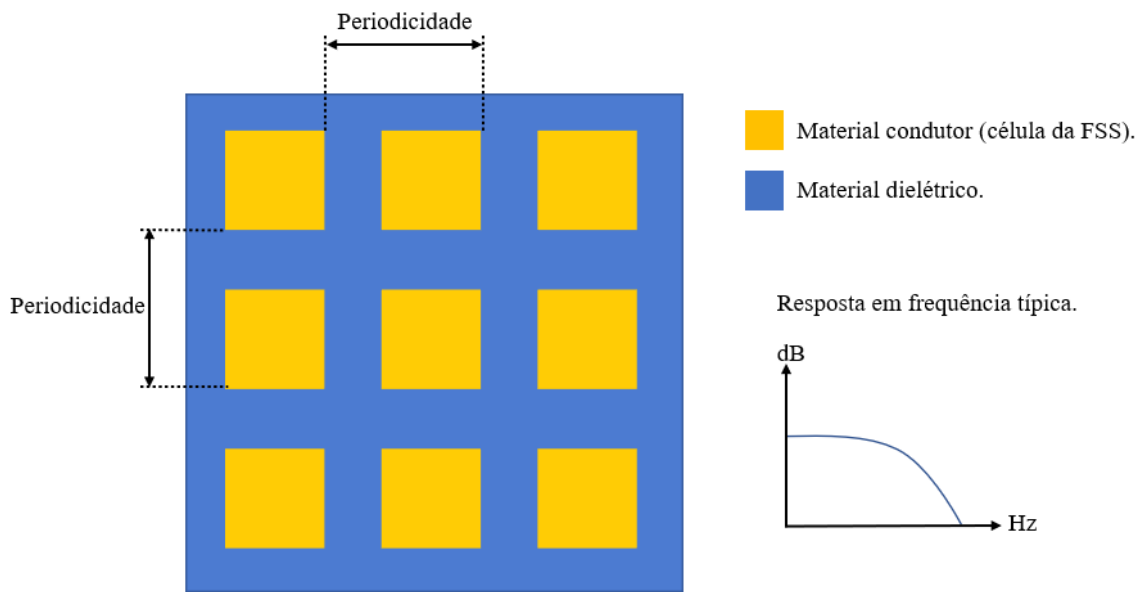
Figura 2.4. Exemplos de estruturas seletivas em frequência com arranjo 2D (a e b) e 3D (c e d). (a) Lima (2021); (b) Silva, Campos e Gomes Neto (2020); (c) Kien e Hong (2020) e (d) Vázquez-Peralvo *et al.* (2022).

Logo, em razão das novas pesquisas envolvendo estruturas 3D, percebe-se também a aplicação nesses novos estudos da nomenclatura estruturas seletivas em frequência, pois engloba tanto arranjos 2D quanto 3D.

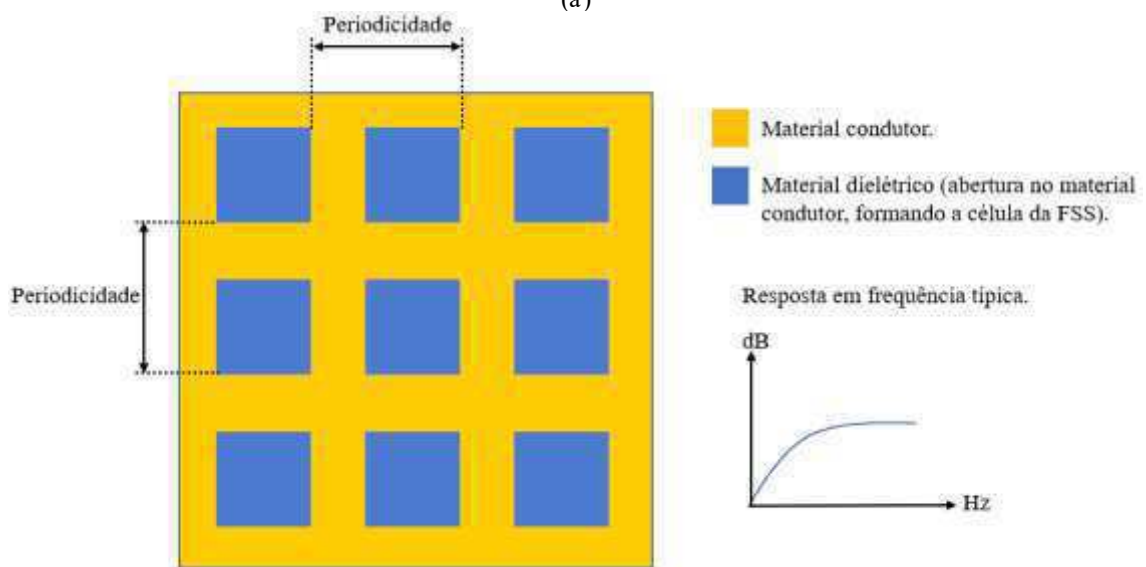
### 2.3 Estrutura típica de uma FSS

Conforme Hopkinson e Rittenhouse (1786) publicaram a partir de suas observações, o espaçamento entre os fios (ver Figura 2.3) influenciava na resposta em frequência apresentada pela estrutura, logo, um fator típico de qualquer FSS é a periodicidade  $p$  entre suas células, assim como suas geometrias, conforme ilustração na Figura 2.5, que inclui a resposta em frequência típica para o tipo de estrutura (destaca-se que a geometria quadrada observada foi utilizada apenas como exemplo clássico ou seja, não é a geometria principal para uma FSS).

## CAPÍTULO 2. REFERENCIAL TEÓRICO



(a)



(b)

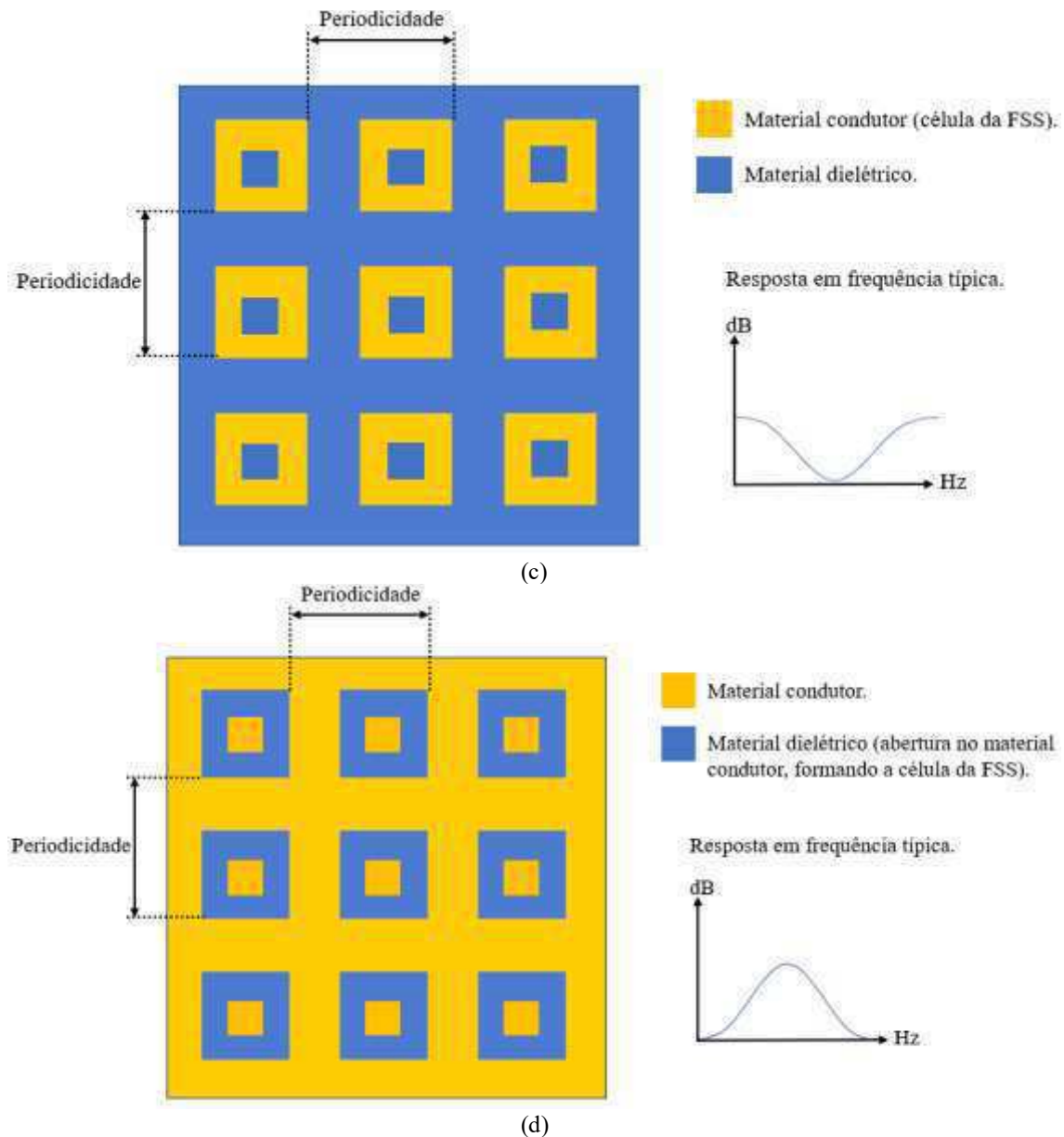


Figura 2.5 Estruturas típicas de FSS (a) Comportamento passa-baixa (b) Comportamento passa-alta. (c) Comportamento rejeita-faixa. (d) Comportamento passa-faixa.

Autoria própria.

Uma vez verificada a dependência da resposta em frequência da estrutura com as dimensões físicas, diversas abordagens são observadas, tanto com relação às diferentes geometrias para as células que compõem a FSS, quanto aos materiais utilizados para compor o substrato dielétrico ou as células da estrutura. Conforme Munk (2000), as tipologias de células para FSS são divididas em quatro grupos principais:

- Grupo 1: Número inteiro  $n$  de pólos conectados pelo centro. Exemplos clássicos de células do Grupo 1 são ilustrados na Figura 2.6.

CAPÍTULO 2. REFERENCIAL TEÓRICO

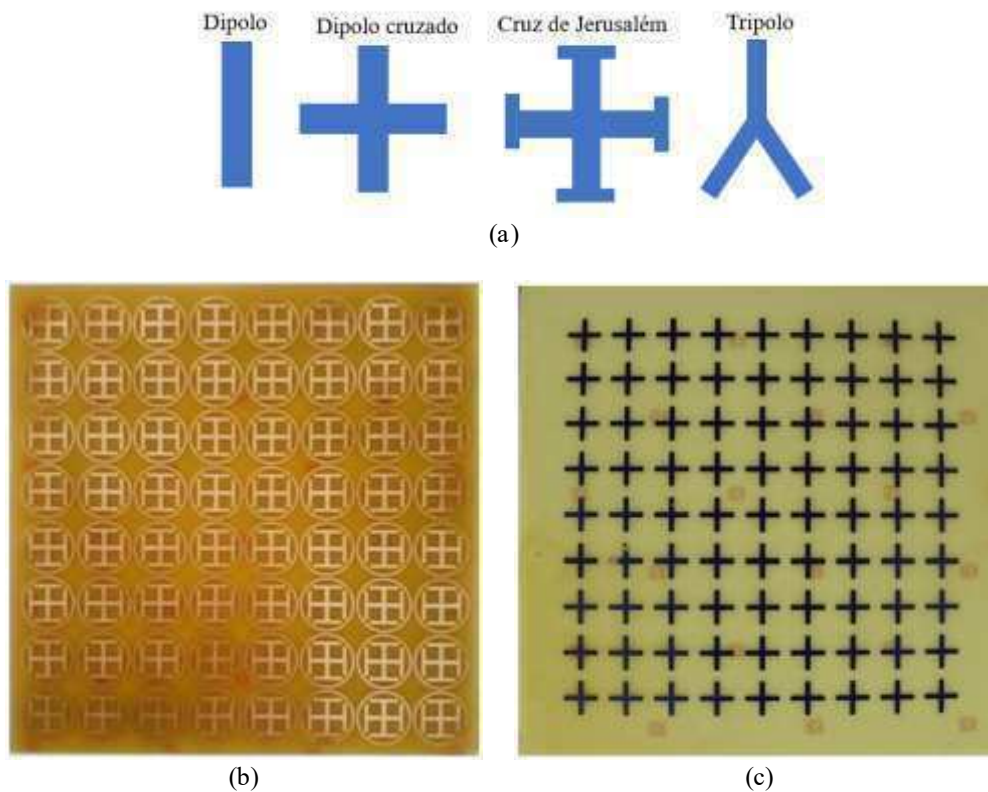


Figura 2.6. Configurações clássicas de células Grupo 1. (a) Adaptado de Munk (2000) (b) Exemplo de estrutura construída com célula Cruz de Jerusalém, Souto (2020) (c) Exemplo de estrutura construída com célula dipolo cruzado, Filgueira (2016).

- Grupo 2: Geometrias do tipo espiras (ou *loop*). Exemplos clássicos de células do Grupo 2 são as espiras quadradas e circulares, conforme ilustradas na Figura 2.7.

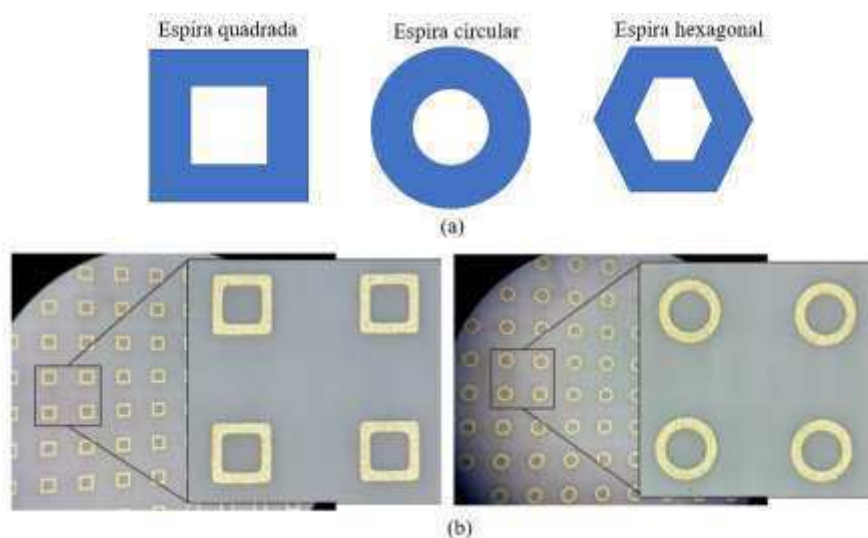


Figura 2.7. Configurações clássicas de células Grupo 2. (a) Adaptado de Munk (2000). (b) Exemplo de espiras tipo quadrada e circular utilizadas em FSS para aplicações em ondas milimétricas. Mohyuddin, Kim, Choi e Kim (2018).

## CAPÍTULO 2. REFERENCIAL TEÓRICO

- Grupo 3: Células com interiores sólidos. Exemplos de células do Grupo 3 são ilustrados na Figura 2.8.

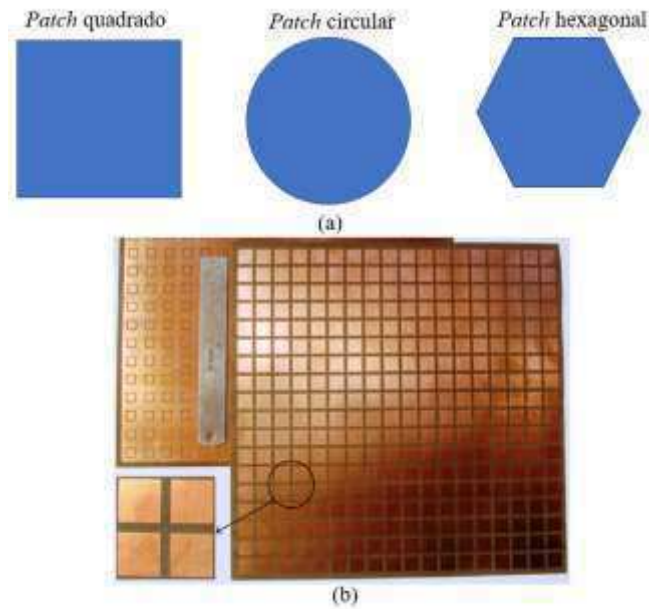


Figura 2.8. Configurações de células Grupo 3. (a) Adaptado de Munk (2000). (b) Exemplo de patch tipo quadrado utilizadas em FSS para aplicação *dualband*. Chatterjee e Parui (2019).

- Grupo 4: Células com combinações de elementos dos grupos 1, 2 e 3. Exemplo de célula do Grupo 4 é ilustrado na Figura 2.9.

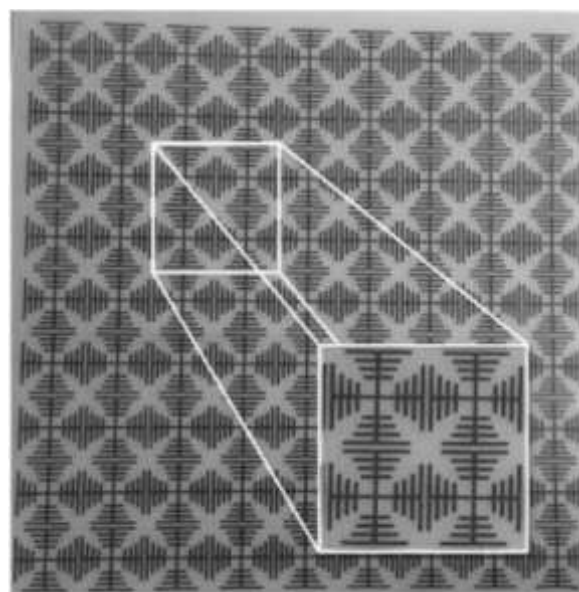


Figura 2.9. Combinação de estrutura Cruz de Jerusalém com adição de dipolos. Silva Filho *et al.* (2017).

## CAPÍTULO 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Uma comparação de desempenho entre configurações de FSS é apresentada por Wu (1995), com relação aos parâmetros de estabilidade angular, nível de polarização cruzada, banda de separação e largura de banda, cuja a classificação foi realizada com atribuição de valores de 1 a 5, com a classificação 1 sendo a melhor. A comparação é apresentada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Comparação de desempenho entre configurações de células. Adaptado de Wu (1995).

Configuração da célula	Parâmetro			
	Estabilidade angular	Nível de polarização cruzada	maior largura de banda	Menor banda de separação
Cruz de Jerusalém	2	3	2	2
Dipolo	4	1	4	1
Tripolo	3	3	3	2
Espira quadrada	1	1	1	1
Espira circular	1	2	1	1
Dipolo cruzado	3	3	3	3

Logo, a partir do parâmetro de operação principal a ser atendido no projeto, pode-se iniciar o estudo a partir da análise comparativa entre configurações. Por exemplo, sugere-se que o dipolo alcançaria um melhor nível de polarização cruzada (amplitude do sinal na polarização perpendicular à polarização de interesse), enquanto a Cruz de Jerusalém proporciona melhor estabilidade angular na estrutura. Anwar, Mao e Ning (2018) também apresentam um comparativo de desempenho de FSS ainda mais abrangente, pois além do comparativo por tipo de célula, também há comparação a partir de características do substrato, arranjo e estrutura, conforme exemplos apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Relação entre características estruturais e desempenho operacional. Adaptado de Anwar, Mao e Ning (2018).

Parâmetro analisado	Configuração analisada	Característica observada
Tipo de célula	Elemento tipo <i>slot</i>	Filtro passa-faixa
	Elemento tipo <i>patch</i>	Filtro rejeita-faixa
	<i>Patch</i> fractal	Redução do comprimento elétrico e consequentemente da frequência ressonante
	Curvadas/convolucionadas	Miniaturização da célula unitária
Arranjo das células	Redução da célula unitária	maior estabilidade angular
	Aumento da periodicidade	Redução na largura de banda e frequência ressonante, além de observação de lóbulos de gradeamento
	Diminuição do espaçamento entre células	Estabilidade da frequência ressonante e retardo do surgimento de lóbulos de gradeamento
	Variação do espaçamento entre células	Variação da largura de banda
Estrutura física	Em cascata	maior taxa de decrescimento ( <i>roll-off</i> )
	Multicamadas	Aumento na largura de banda
	Antena-Filtro-Antena	maior seletividade

<b>Dielétrico</b>	Sem substrato dielétrico	Instabilidade da largura de banda das curvas de transmissão
	Baixa constante dielétrica	Largura de banda constante com o ângulo de incidência
	Alta constante dielétrica	maior estabilidade angular

Dessa forma, percebe-se que a definição inicial do tipo de estrutura a ser aplicado está além da simples definição da célula a ser utilizada, uma vez que os tipos/combinções de diferentes geometrias e materiais dielétricos em uma FSS irá oferecer diferentes características operacionais.

## 2.4 Métodos de análise de FSS

A análise do comportamento eletromagnético de superfícies seletivas em frequência tem evoluído dos métodos baseados em matriz de aproximação, conforme apresentado por Mittra, Chan e Cwik (1988) ou Modelo do Circuito Equivalente proposto por Markuvitz (1951), a técnicas numéricas como o Método dos Momentos ou Método dos Elementos Finitos, por exemplo. Atualmente esses métodos são implementados diretamente em softwares comerciais de análise eletromagnética de estruturas. A matemática computacional é, atualmente, fundamental nas etapas de simulação de desempenho de estruturas eletromagnéticas como as FSS ou antenas, auxiliando, dessa forma, no desenvolvimento de aplicações em engenharia biomédica, radiofrequência e sistemas de comunicação. Na Figura 2.10 são exemplificadas categorias de métodos de análise de estruturas eletromagnéticas.

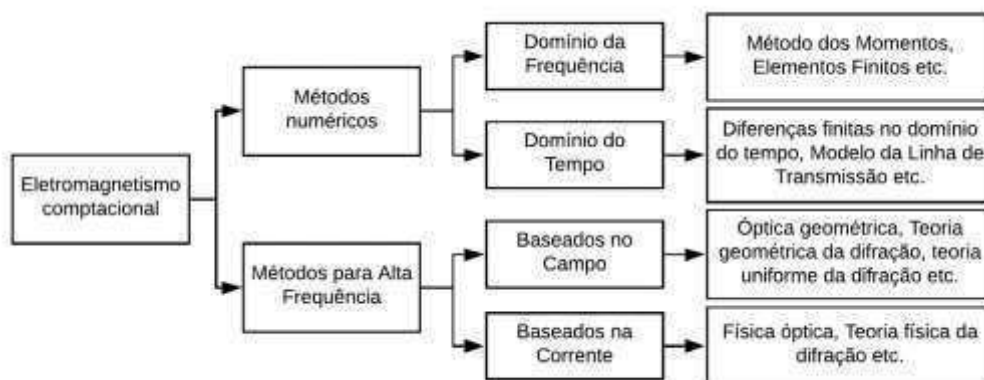


Figura 2.10. Exemplos de métodos de análise de estruturas para aplicações eletromagnéticas. Adaptado de Huang e Boyle (2008).

## CAPÍTULO 2. REFERENCIAL TEÓRICO

De acordo com Huang e Boyle (2008), os métodos classificados como “métodos de alta frequência” são adequados para estruturas muito maiores que o comprimento de onda ( $\lambda$ ). Já os classificados como “métodos numéricos” são adequados para estruturas menores. Uma regra prática é a utilização de  $20\lambda$  como limite máximo para utilização dos métodos numéricos.

Para o tratamento de estruturas mais complexas, por exemplo, aquelas que contam com estruturas embutidas em meios não homogêneos ou formas conformadas (que se adaptam à superfície plana ou não plana onde será empregada), as técnicas computacionais são preferíveis devido à robustez e flexibilidade oferecidas para a simulação da estrutura. Narayan e Jha (2015) destacam que algumas metodologias híbridas têm ganhado destaque na análise de FSS, com múltiplos elementos de forma arbitrária ou elementos em cascata. Por exemplo, o Método de Expansão Modal com Integral-Ressonante de Contorno em combinação com o Método dos Momentos e Método dos Elementos Finitos com Casamento Modal.

### **2.5 Estudos atuais com aplicações de FSS**

Os repositórios acadêmicos *Scopus* e *Web of Science* foram utilizados para levantamento a nível mundial do volume de pesquisas envolvendo superfícies seletivas em frequência, com objetivo de verificação das áreas de aplicação, histórico quantitativo e publicação por países considerando-se trabalhos publicados no período de 2014 até maio de 2024.

O repositório de dados *Web of Science* relata a quantidade de 7422 estudos no período selecionado quando se pesquisa pelo termo “*frequency selective surface*”. Do quantitativo apresentado, 163 trabalhos foram publicados até maio de 2024. Na Figura 2.11 é apresentado um resumo do relatório gerado pelo *Web of Science* com destaque para o volume de produção por país, no período de 2014 à maio de 2024.



## CAPÍTULO 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Destaca-se que os repositórios restringiram as buscas aos filtros selecionados, ou seja, aos trabalhos que possuem exatamente o termo *frequency selective surface* em seu título e no período de 2014 até maio de 2024, ou seja, se algumas pesquisas trabalharam FSS, mas não possuem o termo *frequency selective surface* em seu título, o trabalho não foi incluído nos resultados de nenhum dos repositórios. A escolha de busca por esse termo específico serviu para ter uma ideia do volume de publicações a respeito desse assunto.

Na Figura 2.13 pode-se verificar a evolução anual da quantidade de publicações sobre o tema.

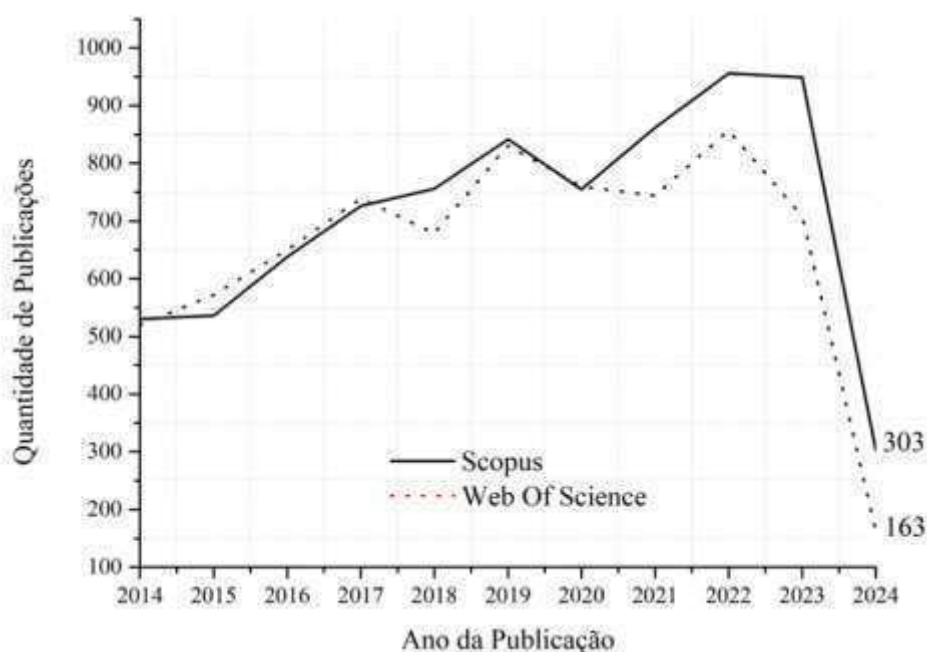


Figura 2.13. Evolução anual da quantidade de publicações sobre FSS. *Web of Science* e *Scopus*.

O comportamento evolutivo resultante de cada repositório é semelhante. A principal diferença está no período de 2017 a 2018. Enquanto o *Web of Science* indica uma queda de aproximadamente 9,92% no volume de produção (de 766 para 690), o *Scopus* registra crescimento de aproximadamente 4,27% (de 703 para 733).

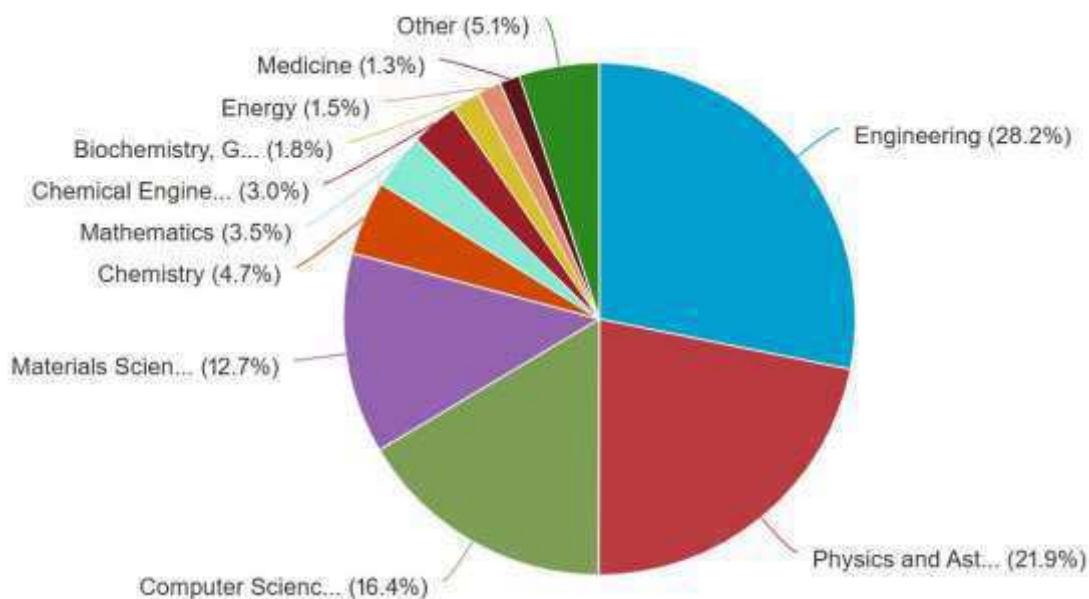
As aplicações de FSS em grupos de áreas de pesquisa também foram verificadas nos repositórios, para os mesmos filtros iniciais. As áreas de engenharia elétrica/eletrônica e telecomunicações recebem maior atenção na aplicação de FSS, de acordo com o *Web of Science*. Já de acordo com o *Scopus*, há destaque para a área geral

## CAPÍTULO 2. REFERENCIAL TEÓRICO

de engenharias, física e astronomia e ciência da computação. Na Figura 2.14 ilustra-se o destaque por área de pesquisa de acordo com cada repositório.



(a)



(b)

Figura 2.14. Volume de produção de pesquisas por área de aplicação sobre FSS (a) *Web of Science* (b) *Scopus*.

Destaca-se que na Figura 2.14 um mesmo trabalho pode estar contido em diferentes áreas de pesquisa, justificando o número de resultados maior que o número de títulos encontrados.

## CAPÍTULO 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Portanto, é notável a variedade e tendência de aplicabilidades de FSS e novos modelos seguem sendo desenvolvidos. Dessa forma, na Figura 2.15 são resumidos alguns exemplos de linhas de pesquisa em FSS.



Figura 2.15. Exemplos de focos de pesquisa com FSS. Adaptado de Anwar, Mao e Ning (2018).

Neste trabalho será verificada a aplicabilidade de geometria tradicional em camada única de material têxtil para a composição de uma FSS têxtil. Portanto, no Capítulo 3 será discutido o estado da arte especificamente sobre superfícies seletivas em frequência têxteis (TFSS – *Textile Frequenc Selective Surface*).

---

## Capítulo 3 – Trabalhos Relacionados

---

Nesse capítulo serão abordados os tópicos relacionados com a utilização de materiais têxteis empregados, principalmente, como substratos dielétricos, para aplicações em superfícies seletivas em frequência e em antenas.

### 3.1 Utilização de têxteis como substratos dielétricos

O desenvolvimento de tecnologias denominadas redes sem fio de área corporal (WBAN – *Wireless Body Area Network*) voltou a atenção dos pesquisadores para o desenvolvimento de dispositivos, para aplicações eletromagnéticas adaptáveis em superfícies planas ou não planas, por exemplo, utilizando materiais têxteis, como substratos dielétricos em antenas ou superfícies seletivas em frequência. Conforme destaca Rahman, Yamada e Nordin (2019), a busca por dispositivos flexíveis, leves e facilmente integráveis em vestuários favorece o destaque de utilização de materiais têxteis na fabricação destes. Salonen *et al.* (2004) destaca as principais categorias de têxteis para utilização como substratos dielétricos, que são as fibras manufaturadas ou naturais, as fibras sintéticas e os tecidos; ressaltando que características como composição química e textura do material possuem influência nas propriedades eletromagnéticas.

Para verificação da tendência de pesquisas em antenas e superfícies seletivas em frequência, com utilização de materiais têxteis, foi analisado o volume de publicações sobre o tema, no período de 2014 a maio de 2024. Na Figura 3.1 podem ser vistas as quantidades de publicações a cada ano.

Percebe-se da Figura 3.1 que as aplicações de têxteis em antenas têm recebido maior atenção quando comparadas com os estudos envolvendo FSS. Porém, vale destacar que diferente das aplicações em antenas, do ano 2021 para 2022 nota-se aumento no número de pesquisas em FSS têxtil.

### CAPÍTULO 3. ESTADO DA ARTE

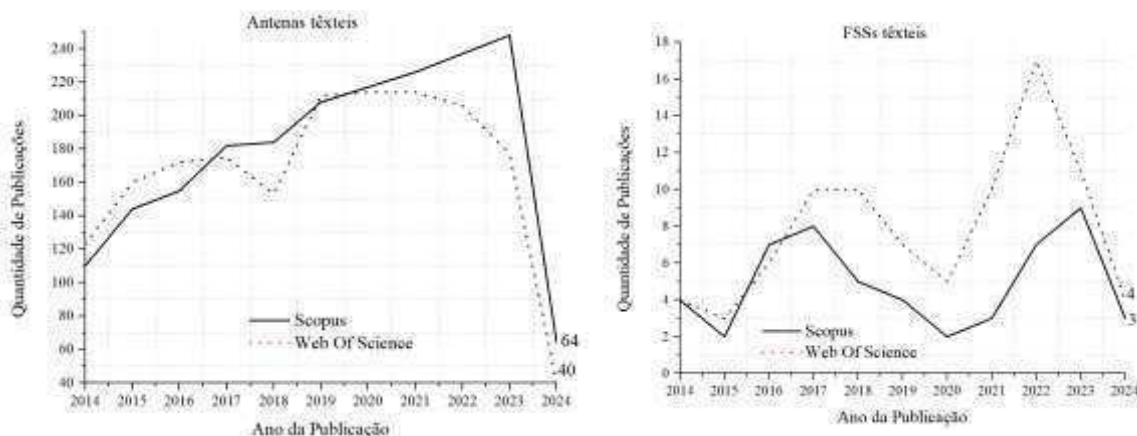


Figura 3.1. Evolução da quantidade de publicações em antenas e FSS têxteis.

Uma vez que os têxteis são capazes de oferecer leveza e fácil adaptação em superfícies planas ou não planas, estes são aliados na integração de dispositivos para transmissão ou reflexão de sinais eletromagnéticos (antenas ou FSS), com outras tecnologias, por exemplo, no trabalho desenvolvido por André, Pinho, Gouveia e Loss (2021), uma antena têxtil foi incorporada num sistema de visão em primeira pessoa (FPV – *First Person View*) com um drone, conforme ilustrado na Figura 3.2.

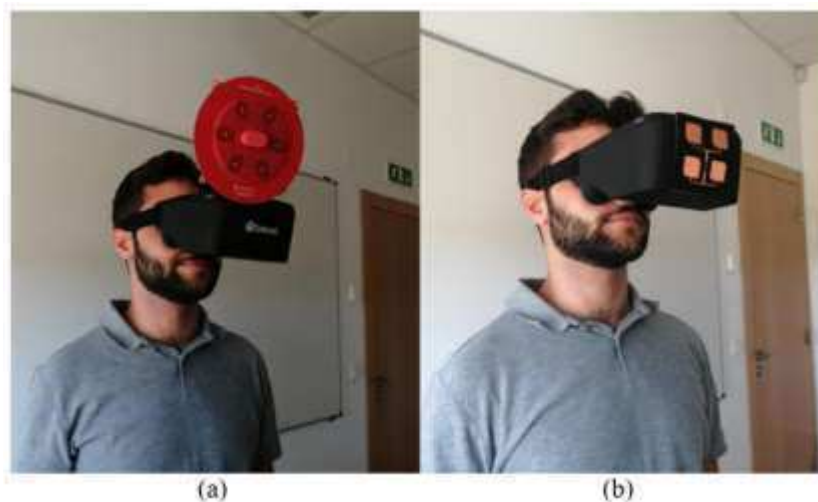


Figura 3.2. Utilização de antena têxtil em sistema FPV (a) Antena comercial (b) Antena têxtil. André, Pinho, Gouveia e Loss (2021).

Pode-se observar na Figura 3.2 que as características estruturais do material têxtil proporcionaram melhor integração, no sentido de adaptabilidade e manutenção das características operacionais da antena com o equipamento.

### CAPÍTULO 3. ESTADO DA ARTE

Também utilizando têxtil no desenvolvimento de uma FSS aliada à análise de SAR, Sugumaran, Balasubramanian e Palaniswamy (2021) implementaram uma FSS têxtil de forma a reduzir o nível de absorção nas regiões do peito e braço em uma pessoa, conforme mostrado na Figura 3.3.

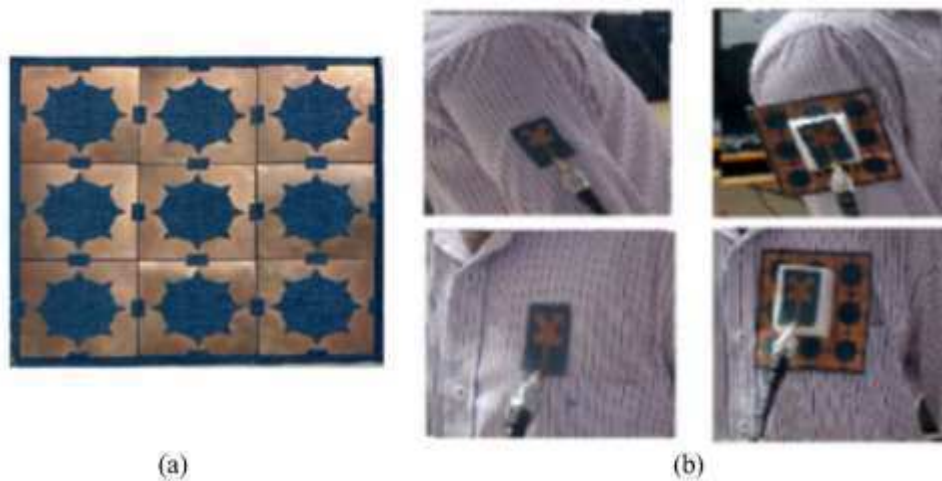


Figura 3.3. FSS Têxtil para redução de níveis de SAR (a) FSS têxtil (b) Verificação experimental. Sugumaran, Balasubramanian e Palaniswamy (2021).

Dessa forma, percebe-se o interesse nas características estruturais dos têxteis aplicados em dispositivos para sistemas de comunicação, por exemplo, antenas ou FSS.

## 3.2 Abordagens atuais sobre antenas têxteis

Alguns trabalhos utilizam o termo *wearable antenna* (antena vestível) ao desenvolver uma antena têxtil. Por exemplo, pode ser visto na pesquisa de Atanasova, Atanasov e Atanasov (2022) a utilização de uma antena têxtil incorporada em uma mochila (Figura 3.4).

### CAPÍTULO 3. ESTADO DA ARTE



Figura 3.4. Antena têxtil incorporada em mochila. Atanasova, Atanasov e Atanasov (2022).

Porém, também se encontra o termo *wearable antenna* em pesquisas que não envolvem material têxtil na construção do dispositivo, como pode ser visto, por exemplo, no estudo de Marasco *et al.* (2022), no qual foi desenvolvida uma antena vestível para comunicação 5G, conforme apresentado na Figura 3.5.



Figura 3.5. Antena vestível para comunicação 5G. Marasco *et al.* (2022).

Portanto, para refinar as buscas nos repositórios de pesquisa *Scopus* e *Web of Science*, foi utilizado o termo específico *textile antenna* (antena têxtil), para que os resultados fossem restritos àqueles que de fato trabalharam com materiais têxteis. Dessa forma, para o período de 2014 a maio de 2024, foi verificado o volume de publicações com o termo de pesquisa presente em seu título a respeito do tema.

O repositório *Scopus* indica 896 trabalhos (desse total, sete brasileiros). Na Figura 3.6 são apresentados os dez primeiros países em quantidade de publicações e foi acrescido o Brasil, que aparece na trigésima segunda posição.

### CAPÍTULO 3. ESTADO DA ARTE

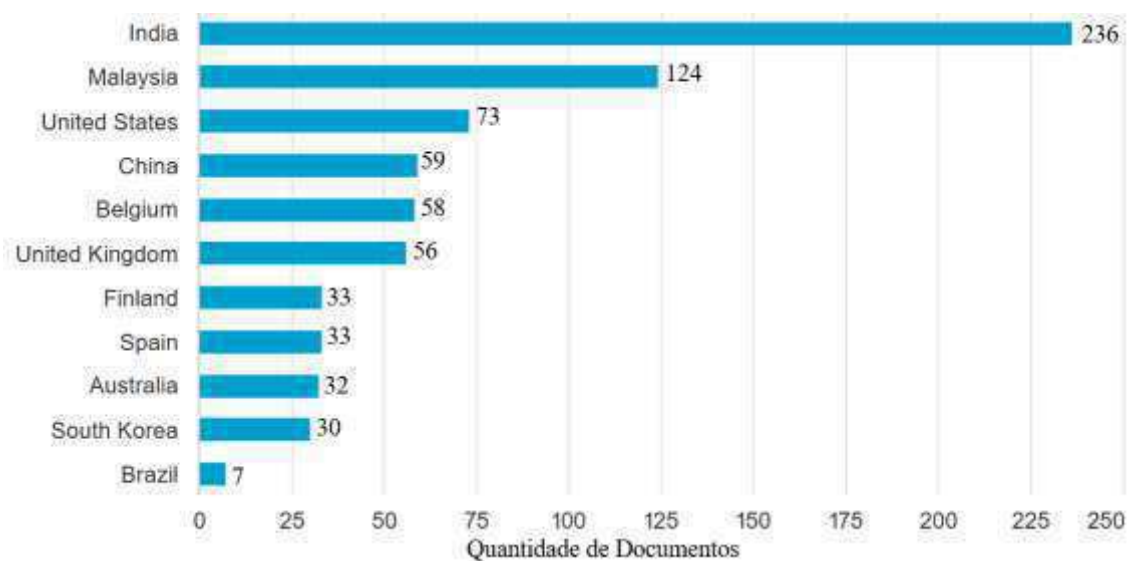


Figura 3.6. Produção de títulos a respeito de antenas têxteis por países – *Scopus*.

No Brasil a maior quantidade de trabalhos está focada na área geral de engenharias e na área de física e astronomia, conforme apresentado na Figura 3.7.

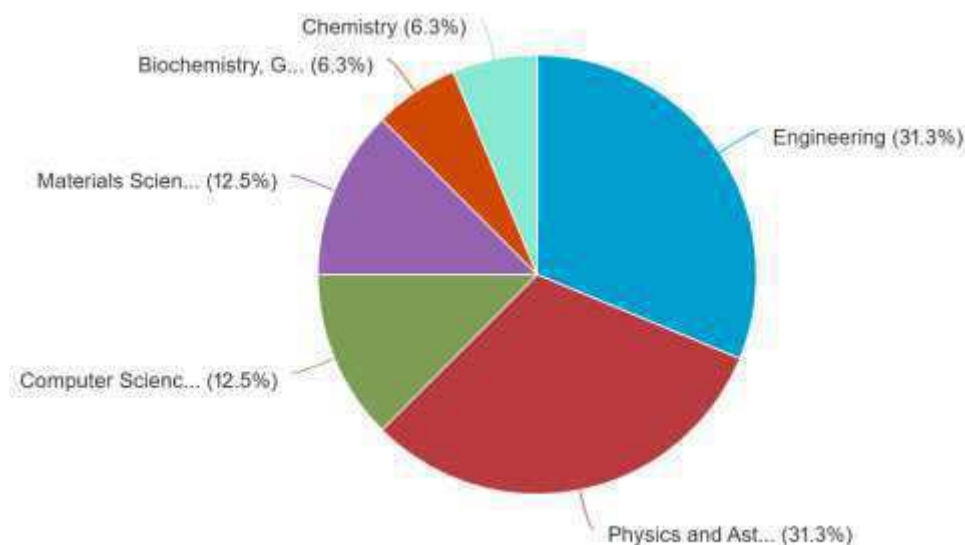


Figura 3.7. Áreas de pesquisa com aplicações de antenas têxteis (Brasil) - *Scopus*.

Quando são comparados os focos de pesquisa do Brasil com o da Índia, que apresentou maior quantidade de publicações, de acordo com os filtros estabelecidos no *Scopus*, pode-se notar semelhanças na área de pesquisa, com maior concentração de trabalhos (engenharias), porém, vale destacar algumas diferenças, conforme apresentado na Figura 3.8.

### CAPÍTULO 3. ESTADO DA ARTE

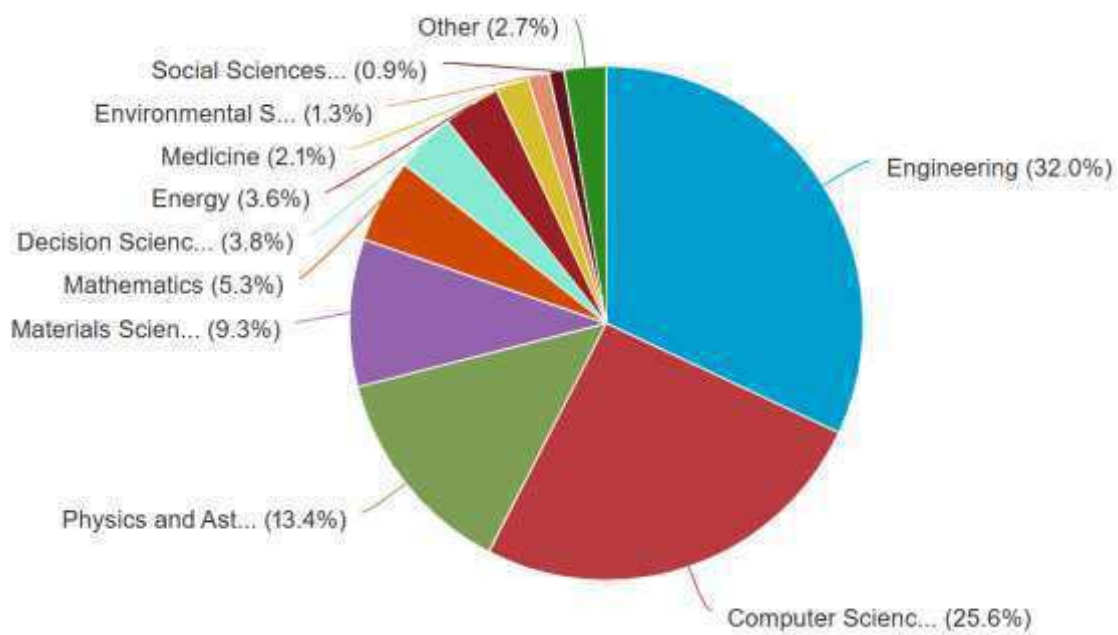


Figura 3.8. Áreas de pesquisa com aplicações de antenas têxteis (Índia) - *Scopus*.

Pode-se observar na Figura 3.8 que em relação ao Brasil, além da diferença no foco em ciência da computação ser maior que em física e astronomia. Percebe-se ainda que há entre os trabalhos indianos um percentual de trabalhos na área de medicina, totalizando onze trabalhos. Christina *et al.* (2016) destaca a utilização de antenas vestíveis em sistemas de telemedicina, uma vez que a implementação nesse tipo de sistema favorece o processo de comunicação entre pacientes e profissionais da saúde no sentido de acompanhamento médico para crianças, atletas e idosos, por exemplo.

Nos registros do *Web of Science* há diferença na ordem dos dez primeiros países com maior quantidade de publicações sobre o tema, quando comparado ao *Scopus* (Austrália e Coréia do Sul alternam as posições), conforme mostrado na Figura 3.9.

### CAPÍTULO 3. ESTADO DA ARTE

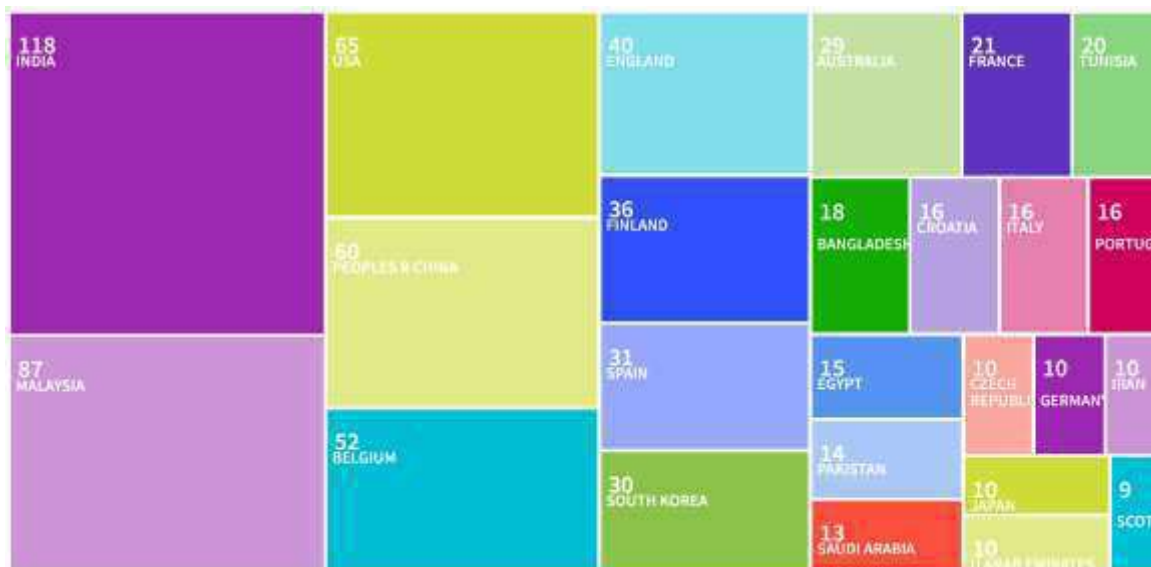


Figura 3.9. Produção de títulos a respeito de antenas têxteis por países – *Web of Science*.

Do total de 654 resultados de publicações sobre o tema, os cinco países com maior quantidade de publicações são: Índia (18,043%), Malásia (13,303%), Estados Unidos da América (9,939%), China (9,714%) e Bélgica (7,951%). O Brasil aparece na vigésima oitava posição, com um total de 7 publicações, que representam 1,07% das publicações totais de títulos *textile antenna* no período de 2014 a maio de 2024. Enquanto o Brasil, de acordo com o repositório, apresenta maior foco nas áreas de telecomunicações e óptica, a Índia (que apareceu em primeiro lugar) apresenta maior foco em engenharia elétrica e eletrônica.

Como exemplo de aplicação, Loss *et al.* (2016) analisaram o comportamento de uma antena têxtil integrada, para operação em sistemas de identificação por radiofrequência (RFID - *radiofrequency identification*), conforme mostrado na Figura 3.10.

### CAPÍTULO 3. ESTADO DA ARTE



Figura 3.10. Antena têxtil integrada em jaqueta para aplicação em sistema RFID. Loss *et al.* (2016).

O comportamento da antena com relação ao coeficiente de reflexão foi analisado para três situações: simulação, espaço livre e embarcada na vestimenta sendo utilizada por um usuário. Na Figura 3.11 apresenta-se o resultado encontrado pelos pesquisadores, para o diagrama de radiação.

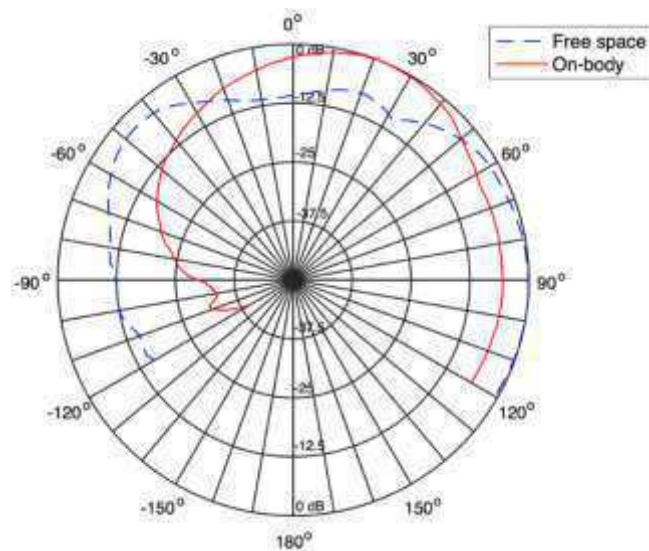


Figura 3.11. Comportamento do ganho para as situações analisadas. Loss *et al.* (2016).

Pode-se observar na Figura 3.11 que, devido à parcela com comportamento condutivo do corpo humano, pode ocorrer absorção e reflexão de ondas eletromagnéticas, para a frequência estudada. Dessa forma, algumas soluções podem ser propostas para que o corpo humano, nesse contexto, não cause/sofra interferência da radiação apresentada pela antena. Uma das possíveis soluções estudadas são as superfícies seletivas em frequência têxteis operando em conjunto com a antena.

### 3.3 Abordagens atuais sobre superfícies seletivas em frequência têxteis

O mesmo critério utilizado para o termo de busca *textile antenna* foi utilizado para as buscas sobre superfícies seletivas em frequência têxteis, ou seja, para que os resultados sejam restritos a pesquisas, que utilizaram materiais têxteis para a construção da FSS, foi utilizado o termo *textile frequency selective surface*, na busca dos repositórios *Web of Science* e *Scopus*, para o período de 2014 até maio de 2024. Destaca-se que também foi utilizado o termo de busca *textile FSS*, uma vez que é comum a utilização do acrônimo FSS, ao invés de superfície seletiva em frequência, mas, observou-se menor quantidade de trabalhos apresentados.

Conforme observado na Figura 3.1, a quantidade de pesquisas relacionadas com antenas têxteis é maior que as publicações focadas em FSS têxteis. Observa-se no *Scopus* o total de 55 trabalhos sobre o tema, distribuídos mundialmente conforme apresentado na Figura 3.12.

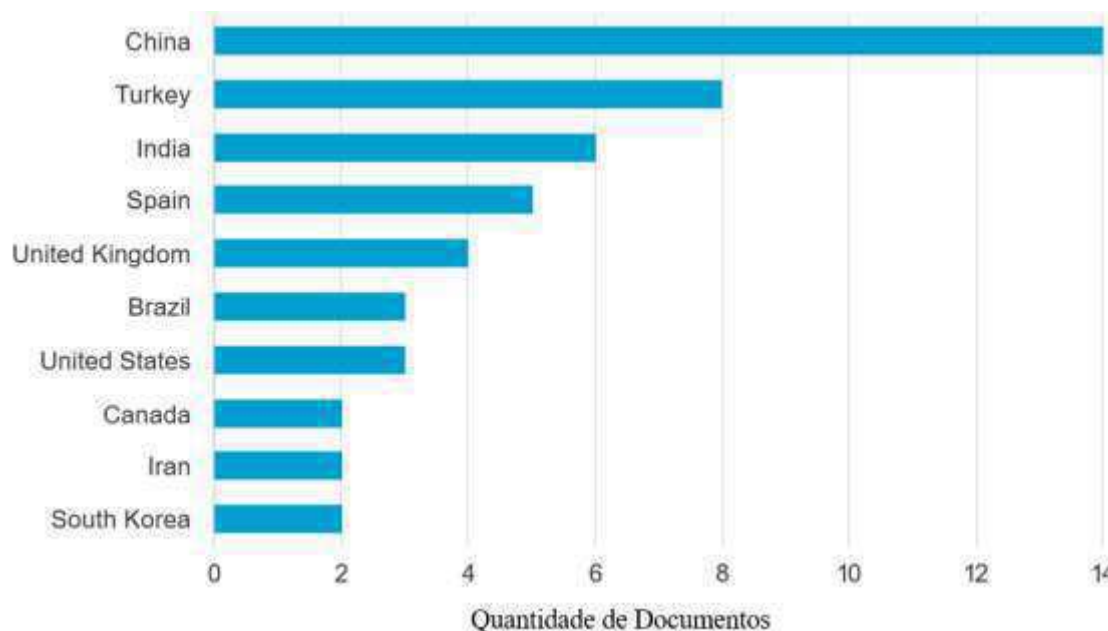


Figura 3.12. Produção de títulos a respeito de FSS têxteis por países – *Scopus*.

Nas pesquisas realizadas no Brasil, alguns focos são a aplicação de métodos de iteração em onda completa e filtros. Por exemplo, Cavalcante, D’assunção e D’assunção

### CAPÍTULO 3. ESTADO DA ARTE

Júnior (2013) investigaram um método iterativo de onda completa para o projeto de FSS têxteis, mostradas na Figura 3.13.

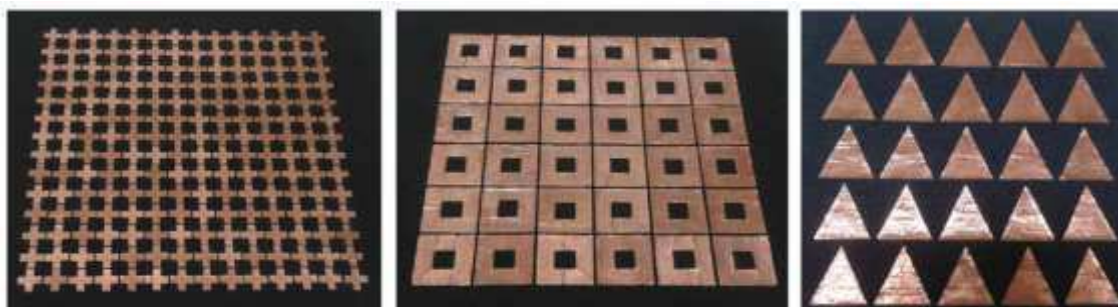


Figura 3.13. FSS têxteis projetadas por meio de método iterativo de onda completa. Cavalcante, D'assunção e D'assunção (2013).

A principal área de pesquisa foco das aplicações continua sendo a área geral de engenharias, porém sendo seguida por ciência dos materiais ao invés de ciência da computação, como ocorreu para as antenas têxteis. A divisão por área de pesquisa é apresentada na Figura 3.14.

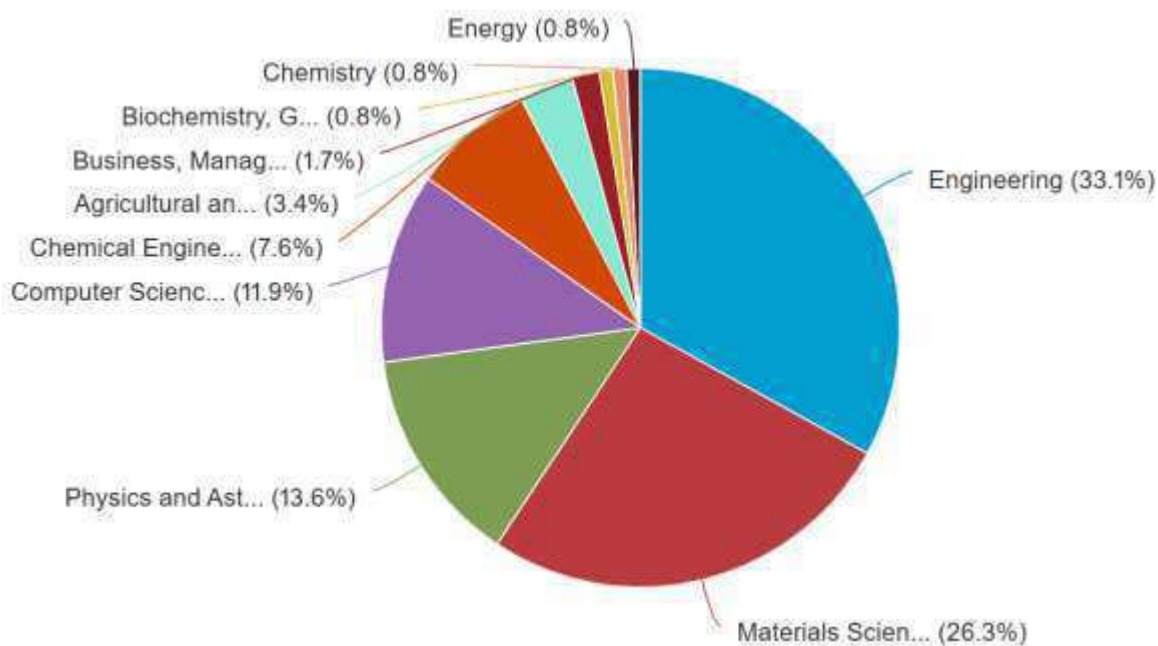


Figura 3.14. Áreas de pesquisa com aplicações de FSS têxtil - *Scopus*.

A lista de países apresentada pelo *Web of Science* com publicações a respeito do tema é semelhante ao reportado pelo *Scopus*, conforme apresentado na Figura 3.15.

### CAPÍTULO 3. ESTADO DA ARTE

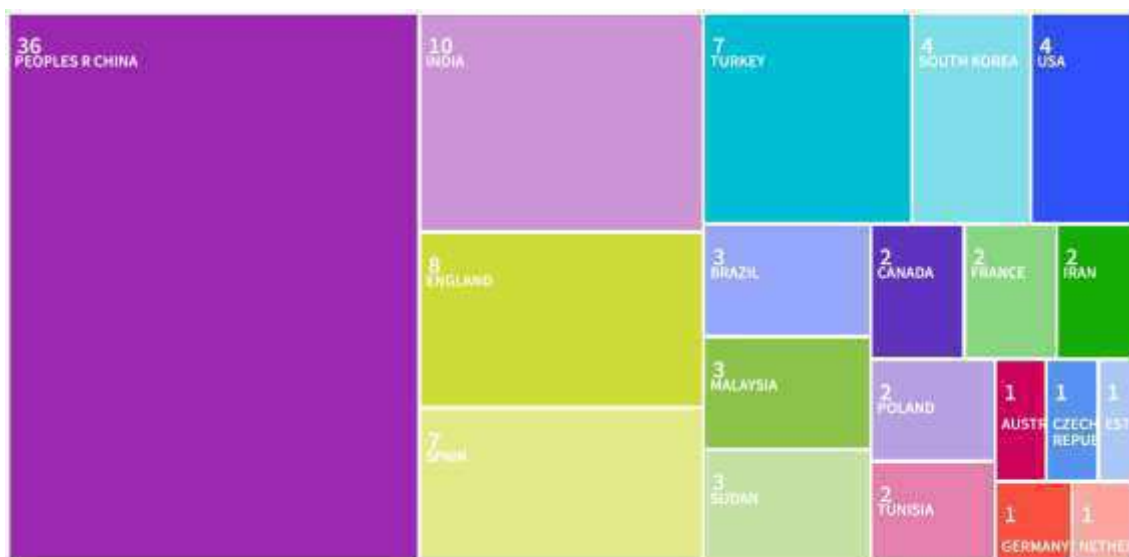


Figura 3.15. Produção de títulos a respeito de antenas têxteis por países – *Web of Science*.

As pesquisas brasileiras, dentre as 90 na lista, são as mesmas também presentes no repositório *Scopus*. As principais áreas foco de pesquisa são engenharias, ciência dos materiais e telecomunicações.

Observa-se que algumas características, por exemplo, leveza e fácil adaptação em superfícies não planas, oferecidas pelos materiais têxteis são exploradas, principalmente, em aplicações próximas ao corpo (*on body*). Por exemplo, no estudo de níveis de SAR realizado por Sugumaran, Balasubramanian e Palaniswamy (2022) foi utilizada uma FSS têxtil para diminuir o nível de absorção de energia eletromagnética nas regiões do braço e peito, por serem regiões do corpo em que vários tipos de dispositivos de medição são conectados. A FSS e antena construídas são mostradas na Figura 3.16.



Figura 3.16. FSS e antena têxteis construídas para análise de níveis de SAR. Sugumaran, Balasubramanian e Palaniswamy (2022).

### CAPÍTULO 3. ESTADO DA ARTE

As características estruturais dos tecidos do corpo humano (músculo, gordura e pele, por exemplo) o tornam um meio com alta permissividade elétrica e muitas perdas, o que afeta, por exemplo, o ganho das antenas embarcadas nos dispositivos, além da absorção pelo corpo de energia proveniente das ondas eletromagnéticas irradiadas pela antena. Portanto, encontram-se pesquisas em que FSS operam em dispositivos *on-body* tanto para evitar diminuição do ganho da antena, quanto para diminuir os níveis de SAR no corpo. Por exemplo, na Figura 3.17 mostra-se um conjunto de FSS e antena vestíveis desenvolvidas por Mandal, Chatterjee e Parui (2015).

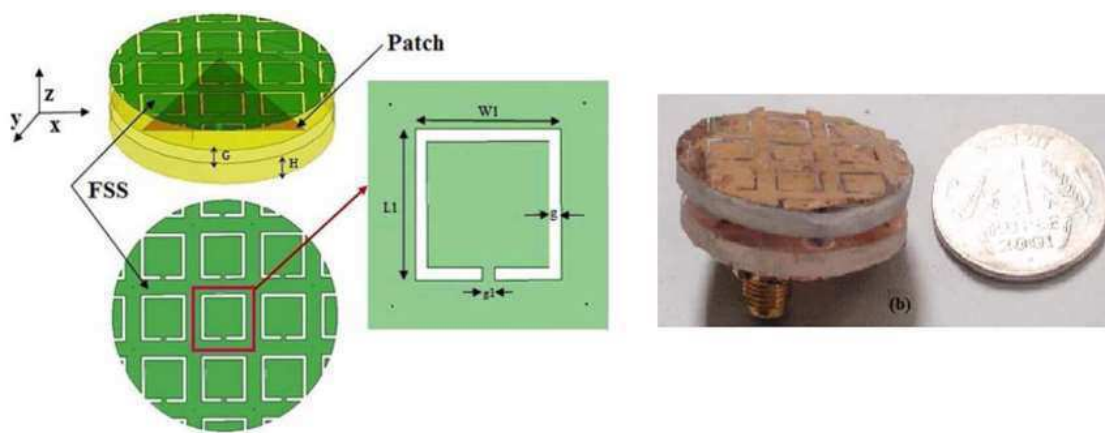


Figura 3.17. Conjunto antena e FSS para aplicação vestível. Mandal, Chatterjee e Parui (2015).

Além das pesquisas com abordagem no próprio material têxtil, que irá atuar como substratos dielétricos, as publicações sobre FSS têxteis passam a abordar também as técnicas de impressão das células condutoras no material têxtil. Whittow *et al.* (2014) apresentou uma técnica de impressão por meio de jato de tinta, buscando precisão. Outros exemplos de impressão são apresentados por Ghebrebrhan *et al.* (2017): litografia, serigrafia, estampa por meio de superfícies lisas, como o polietileno tereftalato e impressão por jato de tinta.

De acordo com Kapoor, Mishra e Kumar (2022), o desenvolvimento de FSS têxteis está sendo foco de pesquisas e a etapa de escolha do material a ser utilizado como substrato dielétrico é um desafio, no sentido do método de implementação da geometria condutora no têxtil. Assim, os métodos de fabricação precisam ser analisados para que se alcance precisão e exatidão na estrutura construída.

Dessa forma, no Capítulo 4 será apresentada a metodologia de projeto, simulação, construção e medição experimental de FSSs têxteis para operação como filtro rejeita-

### *CAPÍTULO 3. ESTADO DA ARTE*

faixa operando na banda ISM em 2,4 GHz. A aplicação das FSSs será como refletoras de ondas eletromagnéticas direcionadas à *phantoms* que simulam os tecidos humanos pele, gordura, músculo e sangue.

Também se apresenta a metodologia de fabricação e caracterização elétrica dos *phantoms* para cada tecido até a aplicação conjunta com as FSSs.

## Capítulo 4 – Materiais e Métodos

Neste capítulo serão descritos os procedimentos para projeto, simulação e construção de FSSs têxteis com substratos feitos de têxteis utilizados na fabricação de vestimentas hospitalares para operação como filtro rejeita-faixa para a faixa de frequências ISM 2,4 GHz, assim como a fabricação e estrutura para verificação da temperatura nos *phantoms* expostos à radiação EM. A primeira etapa da metodologia aborda a obtenção das características elétricas dos têxteis (permissividade elétrica e tangente de perdas) utilizados como substrato dielétrico. A segunda etapa aborda a obtenção da condutividade elétrica do material condutor utilizado para construção das células das FSSs, além de apresentar a geometria de célula utilizada. Para estudo da aplicação proposta, a fabricação de estruturas *phantom* serão discutidas para análise do comportamento da temperatura proveniente das ondas eletromagnéticas nos tecidos com e sem a influência das FSSs têxteis. Na Figura 4.1 é apresentado o procedimento metodológico utilizado.

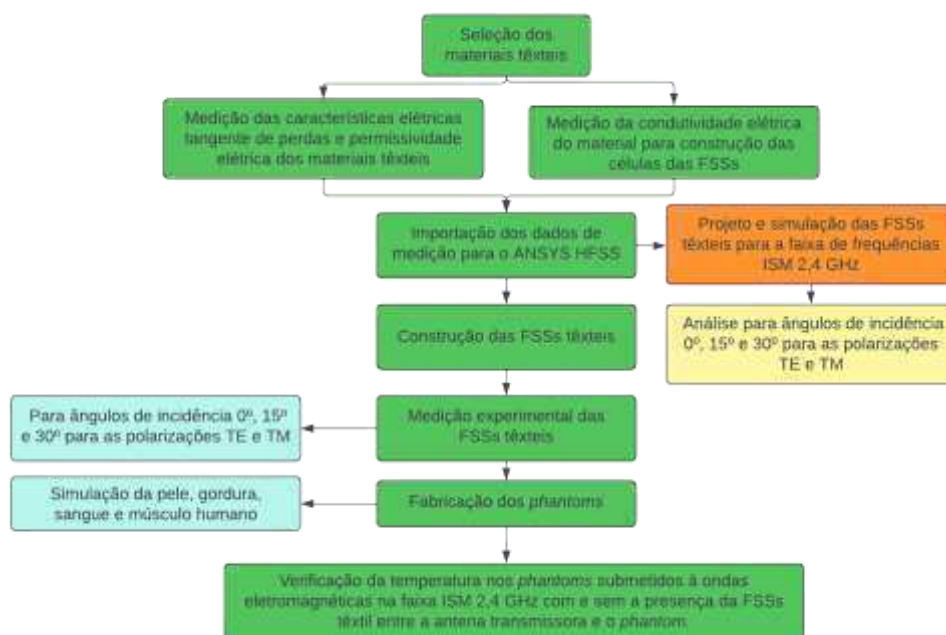


Figura 4.1. Etapas metodológicas adotadas

## CAPÍTULO 4. MATERIAIS E MÉTODOS

O método de pesquisa desse trabalho é classificado da seguinte forma:

- **Natureza:** aplicada;
- **Procedimentos:** levantamento bibliográfico e estudo experimental;
- **Objetivo da pesquisa:** exploratório e explicativo.

### 4.1 Seleção dos materiais têxteis a serem empregados como substrato dielétrico

Com o objetivo de avaliar a utilização das próprias vestimentas hospitalares, nesse caso os pijamas hospitalares, como substratos dielétricos foram selecionadas três amostras de materiais têxteis utilizáveis para a fabricação desse tipo de vestimenta. A seleção dos materiais ocorreu com base nos requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 13734:2016 – Produtos têxteis para saúde: características de lençóis, fronha e pijama hospitalar. Na Tabela 4.1 são apresentadas as características de composição dos materiais têxteis utilizados.

Tabela 4.1. Informações sobre os materiais têxteis selecionados.

<b>Materiais têxteis selecionados</b>		
		
100% Algodão	89% Algodão + 11% Poliéster	63% Algodão + 37% Poliéster
<b>Nomenclaturas adotadas no trabalho</b>		
Alg_100	Alg_89	Alg_63
<b>Espessura de uma camada</b>		
0,45 mm	0,28 mm	0,26 mm



## CAPÍTULO 4. MATERIAIS E MÉTODOS

O primeiro ensaio realizado com os materiais têxteis teve como objetivo da determinação dos parâmetros permissividade elétrica e tangente de perdas.

### 4.2 Caracterização elétrica dos materiais têxteis

Para a caracterização elétrica dos materiais têxteis foi utilizado o método da sonda coaxial e foram utilizados os equipamentos apresentados na Tabela 4.2, pertencentes ao Laboratório de Micro-ondas (LABMICRO), do Centro Integrado de Inovação Tecnológica do Semi-Árido (CITED), localizado na Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA).

Tabela 4.2. Equipamentos utilizados para a caracterização elétrica.

Equipamento	Função nesta pesquisa
<p>VNA Rohde &amp; Schwarz® ZND</p> 	<p>Realizar a medição experimental dos parâmetros eletromagnéticos coeficiente de reflexão e Carta de Smith de antenas com utilização dos materiais têxteis selecionados como substratos dielétricos. A faixa de frequências no equipamento é de 100 kHz até 8,5 GHz.</p>
<p>Dielectric Assessment Kit (DAK Speag®)</p> 	<p>Realizar a caracterização elétrica dos materiais têxteis para posterior utilização como substrato dielétrico. A ponta de prova é utilizável no intervalo de frequências de 200 MHz até 20 GHz.</p>

Após a realização da calibração do *Dielectric Assessment Kit* (DAK) os materiais têxteis foram analisados com objetivo de determinar suas permissividades elétricas e tangentes de perda, conforme apresentado na Tabela 4.2.

## CAPÍTULO 4. MATERIAIS E MÉTODOS

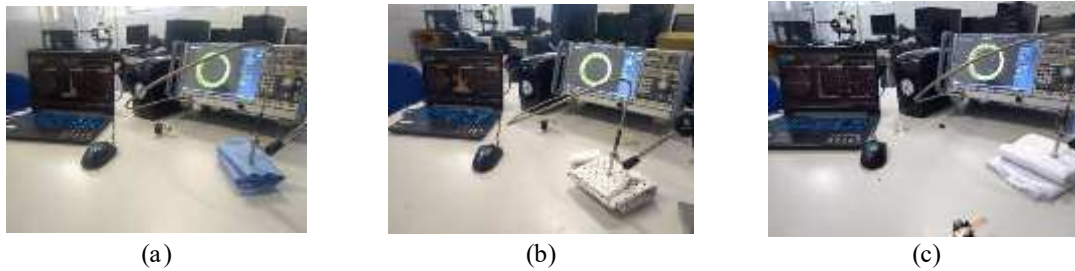


Figura 4.2. Determinação da permissividade elétrica e tangente de perdas dos materiais têxteis (a) Alg\_63 (b) Alg\_89 (c) Alg\_100.

Nessa etapa há o objetivo de obtenção da constante dielétrica  $\epsilon'$ , sendo a parte real da permissividade elétrica, e obtenção do fator de perdas  $\epsilon''$ , que é a parte imaginária da permissividade elétrica do material. Essas grandezas relacionam-se por meio da Equação 4.1.

$$\epsilon = \epsilon_0(\epsilon' - j\epsilon'') \quad (4.1)$$

Em que  $\epsilon_0$  representa a permissividade elétrica no vácuo. Por meio da relação entre  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  (Equação 4.2) pode-se obter a tangente de perdas  $\tan \delta$  do material.

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (4.2)$$

Os valores experimentais de permissividade elétrica e tangente de perdas (ambos em função da frequência) obtidos para cada material foram exportados diretamente para o ambiente de simulação, e esses foram incorporados à informações sobre os materiais utilizados no ambiente de simulação, com objetivo de alcançar aproximação entre resultados simulados e experimentais. Esse procedimento é ilustrado na Figura 4.3.

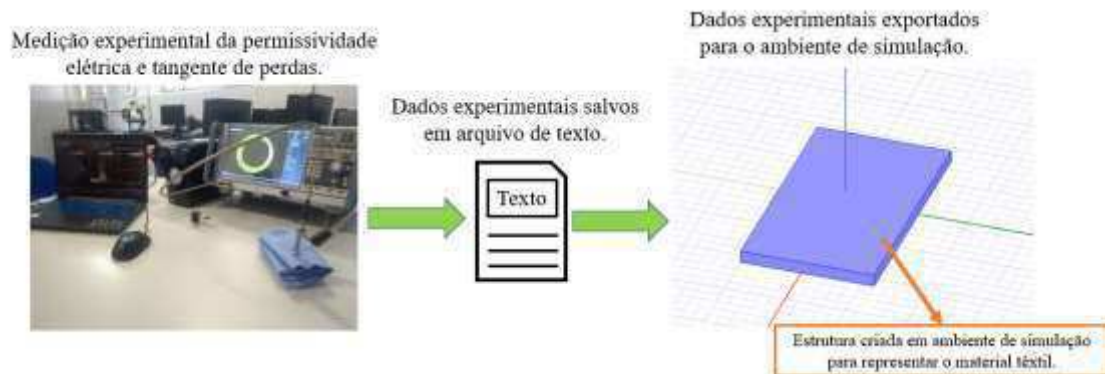


Figura 4.3. Utilização dos dados experimentais no ambiente de simulação.

## CAPÍTULO 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados obtidos nessa etapa foram utilizados para as simulações das antenas e FSSs propostas.

### 4.3 Projeto, simulação e construção das antenas têxteis

Os parâmetros espessura e permissividade relativa obtidos nas medições foram utilizados para o projeto das dimensões físicas das antenas por meio do Modelo da Linha de Transmissão, conforme Balanis (2009). As antenas foram projetadas com plano de terra totalmente preenchido e *patch* retangular. Para melhorar o casamento de impedâncias foi utilizada a técnica de *inset feed*. A estrutura geral para todas as antenas propostas é ilustrada na Figura 4.4.

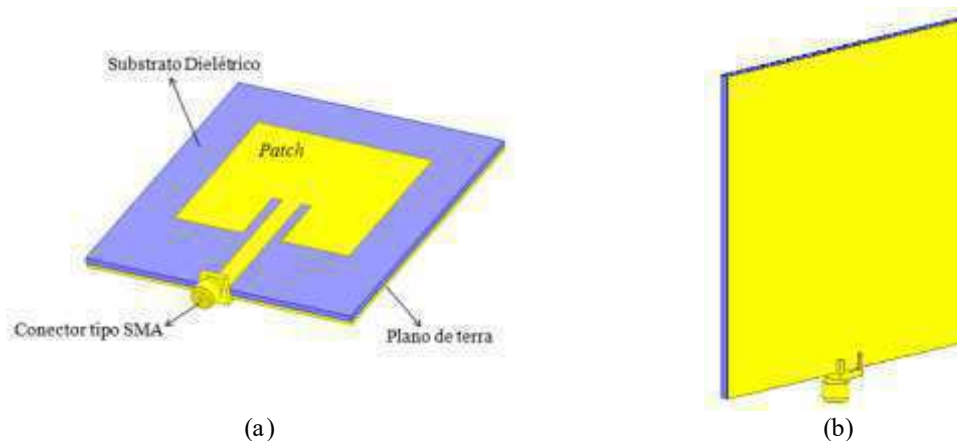


Figura 4.4. Estrutura geral das antenas propostas (a) Vista frontal (b) Vista posterior.

A alimentação das antenas foi realizada por meio de conector SMA (*SubMiniature Version A*) conectado à linha de microfitas, com impedância de entrada  $50 \Omega$ . As simulações computacionais das antenas foram realizadas com o software ANSYS® *High Frequency Structure Simulator* (HFSS) versão 19.2. Além dos materiais têxteis, na estrutura física das antenas foram utilizados como materiais condutores fitas adesivas de cobre, conforme ilustrado na Figura 4.5.

## CAPÍTULO 4. MATERIAIS E MÉTODOS



Figura 4.5. Cobre adesivo utilizado como elemento condutor nas antenas construídas.

O adesivo de cobre utilizado possui espessura 0,05 mm e foi utilizado para compor o *patch* e plano de terra das antenas. Na Figura 4.6 são mostradas as antenas construídas.



Figura 4.6. Antenas construídas com substrato dielétrico têxtil.

Após a construção das antenas estas foram conectadas ao VNA para verificação do coeficiente de reflexão em função da frequência, conforme apresentado na Figura 4.7.

## CAPÍTULO 4. MATERIAIS E MÉTODOS



Figura 4.7. Verificação da relação experimental entre coeficiente de reflexão e frequência para as antenas construídas.

Os mesmos tipos de materiais têxteis utilizados como substratos dielétricos das antenas foram considerados para os projetos das FSSs têxteis, assim como o mesmo material condutor para a simulação e construção das células.

### 4.4 Projeto, simulação e construção das FSSs têxteis

Para geometria da célula unitária da FSS, foi escolhida a espira quadrada, devido a sua boa estabilidade angular e independência de polarização. As dimensões físicas da célula foram determinadas por meio de otimização em *software* a partir dos dados experimentais de permissividade elétrica e tangente de perdas, ambos em função da frequência, exportados do VNA para o ambiente computacional. Logo, ao invés de se determinar uma média de permissividade elétrica e tangente de perdas para utilização como parâmetros de entrada em algoritmo de dimensionamento, por exemplo, conforme aplicado por Langley e Parker (1982), as dimensões físicas e periodicidade das FSSs serão determinadas por otimização no software comercial ANSYS® HFSS a partir dos dados experimentais de permissividade elétrica e tangente de perdas em função da frequência, assim como as simulações das FSSs também foram realizadas no mesmo ambiente computacional. Na Figura 4.8 ilustra-se a geometria da célula utilizada para o projeto das FSSs têxteis.

CAPÍTULO 4. MATERIAIS E MÉTODOS

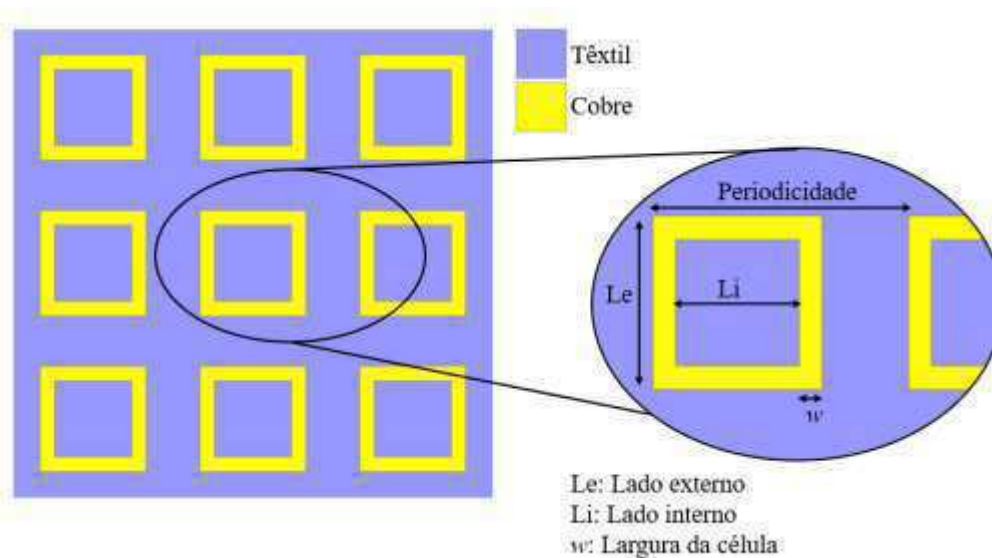


Figura 4.8. Célula espira quadrada utilizada para as FSSs têxteis.

Na Figura 4.9 são mostradas as FSSs construídas. Apesar de serem três materiais têxteis diferentes, a mesma geometria e dimensões da célula foram utilizadas para todas as FSSs.

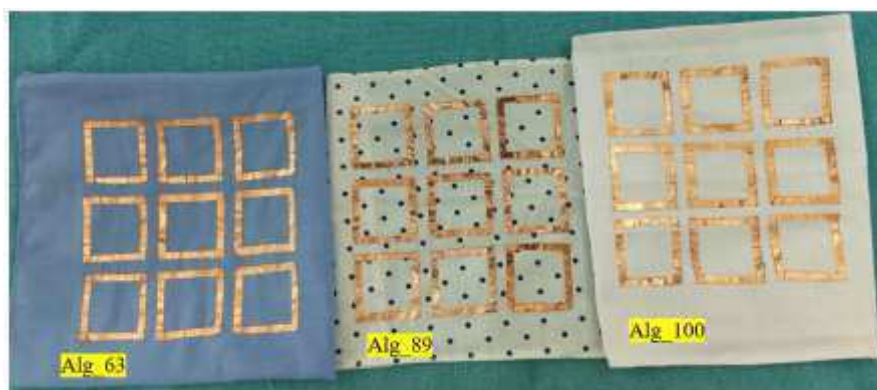


Figura 4.9. FSSs construídas com substrato dielétrico têxtil.

Após a construção das FSSs estas foram inseridas no setup de medição ilustrado na Figura 4.10.

CAPÍTULO 4. MATERIAIS E MÉTODOS

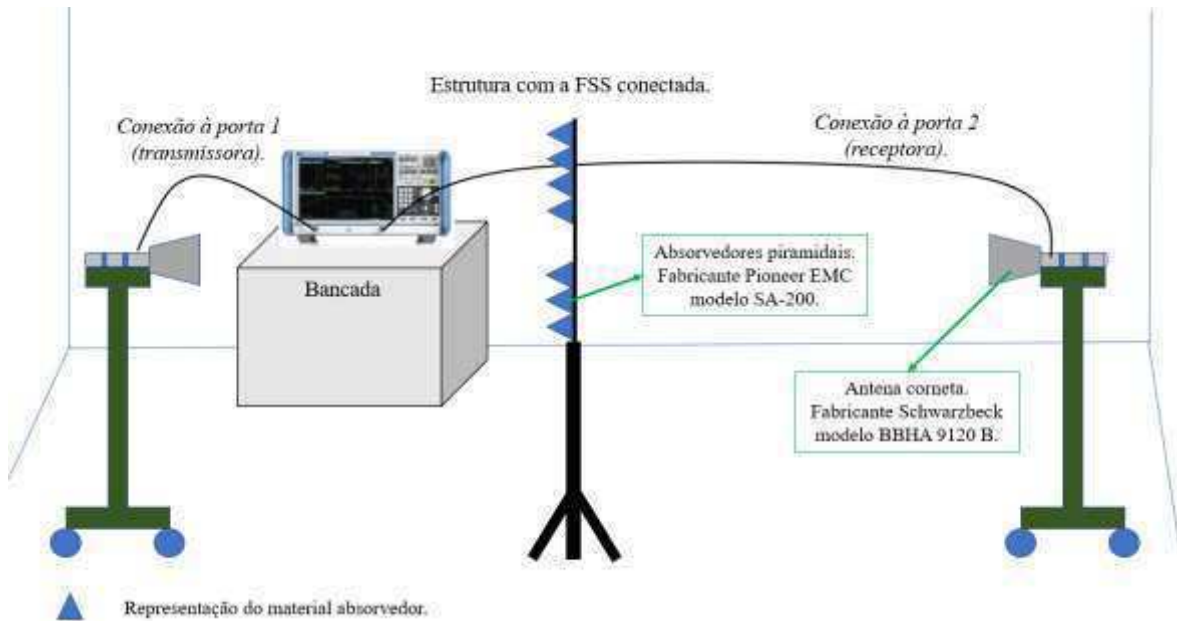


Figura 4.10. Setup para medição do coeficiente de transmissão das FSSs construídas.

Na Figura 4.10 as distâncias das antenas corneta até a estrutura com a FSS foram mantidas de modo a obedecer a distância para que a onda incidente na FSS já esteja em região de campo distante  $R_{CD}$ , conforme a Equação 4.3.

$$R_{CD} = \frac{2D_A^2}{\lambda}, \lambda = \frac{c}{f} \quad (4.3)$$

Na Equação 3 as variáveis envolvidas são:

- $D_A$ : maior dimensão da antena. No caso das antenas corneta utilizadas no setup apresentado na Figura 4.10 a distância considerada na Equação 3 foi a medida de acordo com o ilustrado na Figura 4.11.



Figura 4.11. Dimensão da antena para cálculo da região de campo distante.

#### CAPÍTULO 4. MATERIAIS E MÉTODOS

- $\lambda$ : Comprimento de onda, que depende da razão entre a velocidade da luz no vácuo  $c$  e a frequência  $f$ .

Uma vez que o intervalo de interesse é a banda ISM 2,4 GHz, que contém a faixa de 2,4 até 2,5 GHz, a distância  $R_{CD}$  utilizada no procedimento experimental foi considerada de modo a atender no mínimo a distância  $R_{CD}$  para 2,5 GHz, pois dessa forma a distância  $R_{CD}$  para 2,4 GHz também está obedecida. No *setup* de medição foi mantida, portanto, a distância de 80 cm. Na Figura 4.12 apresenta-se uma FSS construída conectada ao *setup* de medição.

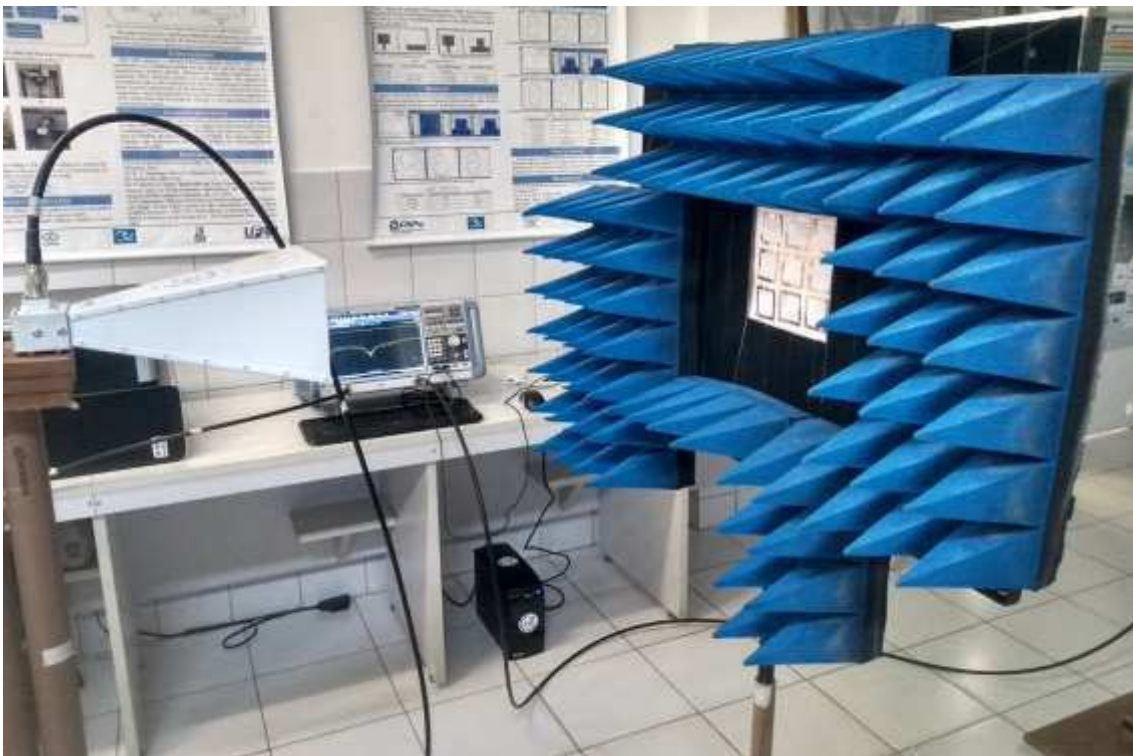


Figura 4.12. Medição experimental das FSSs construídas.

Os resultados experimentais foram analisados para verificação do atendimento à faixa de frequências de interesse para a aplicação proposta tanto com relação a todas as antenas têxteis quanto a todas as FSSs têxteis.

## 4.5 Fabricação dos *phantoms*



No processo de fabricação dos *phantoms* foram adotados ingredientes de baixo custo e facilmente disponíveis, para que o processo de realização seja simples e barato. Especificamente, utiliza-se como base para a estrutura goma de tapioca como agente de solidificação misturada com água. A composição proposta é de 40 g de goma de tapioca e 50 ml de água, sendo esses valores utilizados por ser verificada boa consistência física do produto final (semissólido). Foi usado sal para ajustar a condutividade de cada *phantom*. Utilizou-se corante alimentício para facilitar a identificação de cada amostra de *phantom* de acordo com o tecido que se deseja representar, pele, gordura, sangue e músculo. Os valores medidos são comparados com as caracterizações indicadas na Tabela 4.3, conforme Mobashsher e Abbosh (2015):

Tabela 4.3. Caracterizações das propriedades elétricas do corpo humano.

Tecido	Permissividade elétrica relativa	Condutividade (S/m)
Pele	31,3 – 45	0,73 – 8
Gordura	4,6 – 5,54	0,04 – 0,6
Sangue	42,8 – 56,5	0,8 – 10,6
Músculo	45,1 – 63,3	1,38 – 13,1

Uma vez que se pretende utilizar corante alimentício para facilitar a identificação de cada amostra, inicialmente foram produzidas as amostras 1 e 2 conforme indicado na Tabela 4.4 para observar a influência do corante nas propriedades de interesse a serem medidas: permissividade relativa ( $\epsilon'$ ), tangente de perdas ( $\tan \delta$ ) e condutividade elétrica ( $\sigma$ ).

Tabela 4.4. Amostras para verificação do efeito do corante.

Amostra 1	Amostra 2
	
Goma (40g) + Água (50 ml)	Goma (40g) + Água (50 ml) + corante alimentício

## CAPÍTULO 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Na Figura 4.13 é apresentada a comparação das características elétricas das amostras com e sem a utilização do corante alimentício.

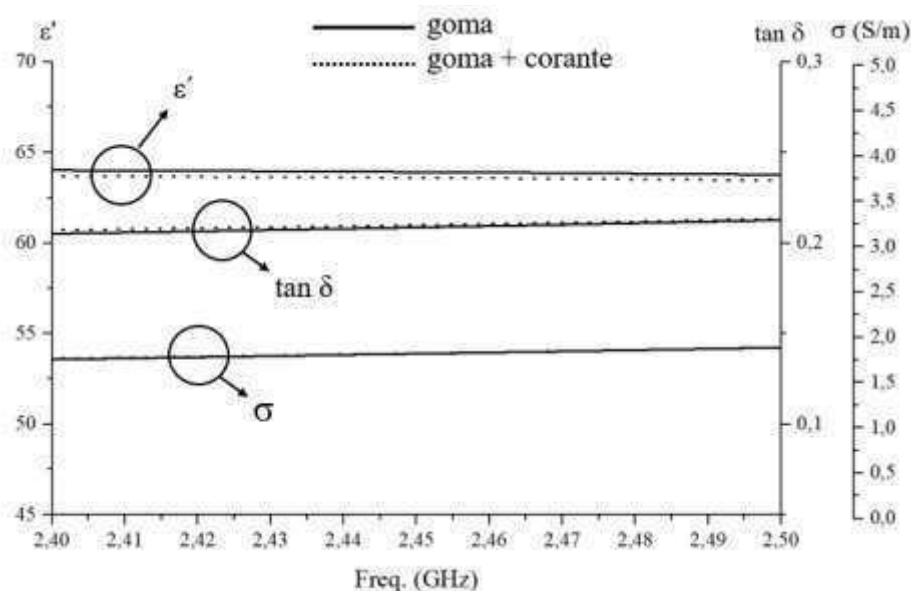


Figura 4.13. Verificação da influência do corante alimentício nas propriedades permissividade elétrica, tangente de perdas e condutividade elétrica.

É possível observar na Figura 4.13 que as características elétricas de cada amostra não sofreram modificações significativas em seus valores. Portanto, foi continuada a etapa de fabricação dos *phantoms*.

Na Tabela 4.5 são indicadas as quantidades de cada material para a composição dos *phantoms* para cada tecido humano.

Tabela 4.5. Quantidades de materiais para cada *phantom*.

Tecido	Goma	Água	Quitosana	Sal	Corante
Pele	40 g	50 ml	-	10 g	Amarelo
Gordura	-	-	60 g	-	-
Sangue	40 g	50 ml	-	5 g	Azul
Músculo	40 g	50 ml	-	-	Vermelho

Percebe-se na Tabela 4.5 que o *phantom* gordura foi o único que não foi fabricado com base nos materiais goma e água. Isso ocorreu porque as características elétricas que a quitosana apresenta são mais próximas do tecido humano do que as características apresentadas pela mistura com goma e água (discussão mais detalhada no

## CAPÍTULO 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Capítulo 5). Na Figura 4.14 são apresentadas algumas amostras com diferentes corantes para facilitação da identificação e o *phantom* com quitosana.

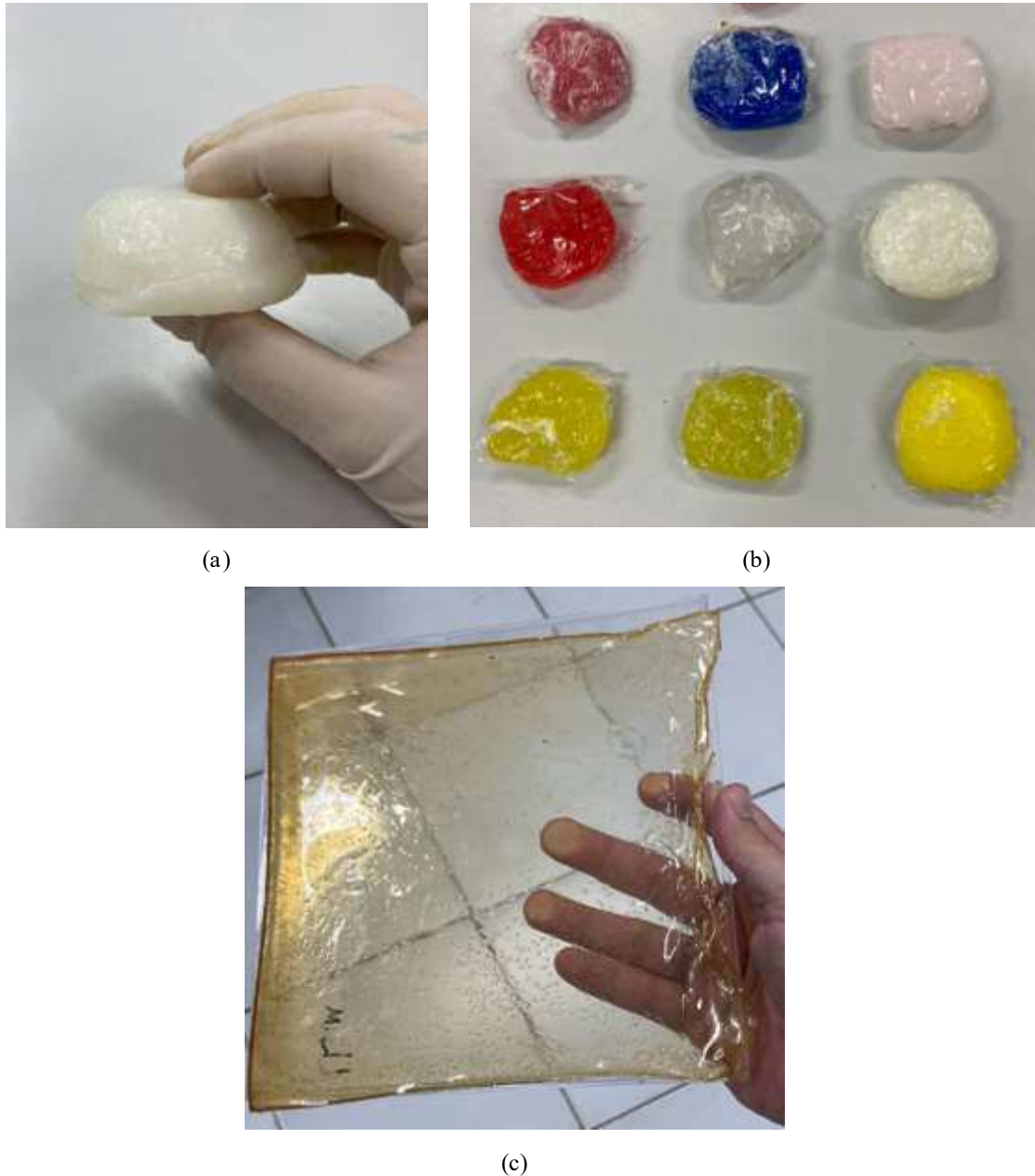


Figura 4.14. Utilização de corante nas amostras de *phantoms* para facilitar a identificação (a) *phantom* sem corante (b) *phantoms* com diferentes corantes (c) quitosana sobre base de acrílico.

Para os *phantoms* fabricados com água e goma, inicialmente foi formada uma mistura homogênea envolvendo a goma, água e corante para todas as amostras. Na mistura para a fabricação do *phantom* de pele foi adicionado 10g de sal e para o *phantom* de músculo foi adicionado 5 g de sal, além da goma, água e corante. As

## CAPÍTULO 4. MATERIAIS E MÉTODOS

misturas foram individualmente aquecidas e mexidas continuamente até atingir 85°C, apresentando consistência semissólida também homogênea. Nesse momento a fonte de calor foi desligada e a mistura foi depositada em recipiente onde esfriou até a temperatura ambiente (30°C). Após atingir temperatura ambiente as amostras foram armazenadas em refrigerador (6°C).

Já a quitosana utilizada na fabricação do *phantom* gordura foi fabricada utilizando a proporção de 1,5% de quisotana em pó, 90% de desacetilização (fabricante Neon), em uma solução de 5% de ácido cítrico, 99,8% de pureza (fabricante Neon). A solução foi mecanicamente agitada por 24 h com objetivo de dissolução da quitosana em pó. Então, a solução foi depositada em molde de acrílico e aquecida em uma estufa em 60°C até alcançar o filme de quitosana seco. Após ser retirado da estufa, o filme de quitosana foi mantido no molde em temperatura ambiente por 24 h com objetivo de absorver umidade do ambiente, pois sua consistência física imediatamente após a retirada da estufa é quebradiça.

### **4.6 Estrutura para verificação do comportamento da temperatura nos *phantoms***

O objetivo do experimento é expor os *phantoms* fabricados à radiação eletromagnética (EM) emitida por uma antena e verificar o comportamento da temperatura após o período de exposição. Os *phantoms* serão expostos diretamente à radiação EM e em seguida será adicionada uma FSS entre os *phantoms* e a antena para análise do comportamento da FSS como superfície refletora das ondas EM que atingiriam diretamente os *phantoms*. Apresenta-se na Figura 4.15 o fluxograma processo metodológico do experimento e na Figura 4.16 ilustra-se a metodologia desta etapa.

CAPÍTULO 4. MATERIAIS E MÉTODOS

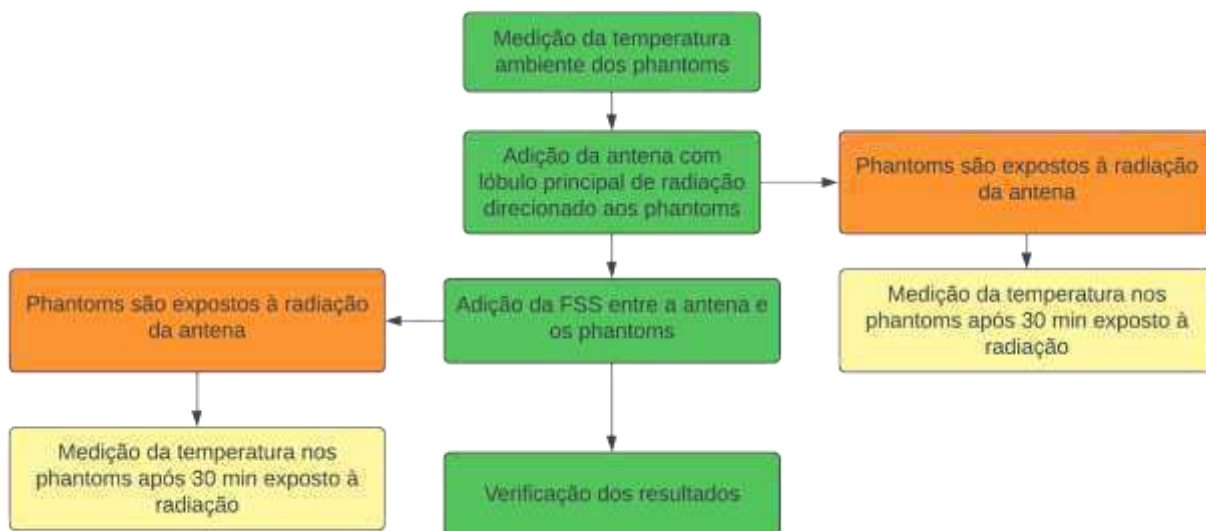


Figura 4.15. Processo metodológico para medição de temperatura nos *phantoms* com e sem a presença da FSS.

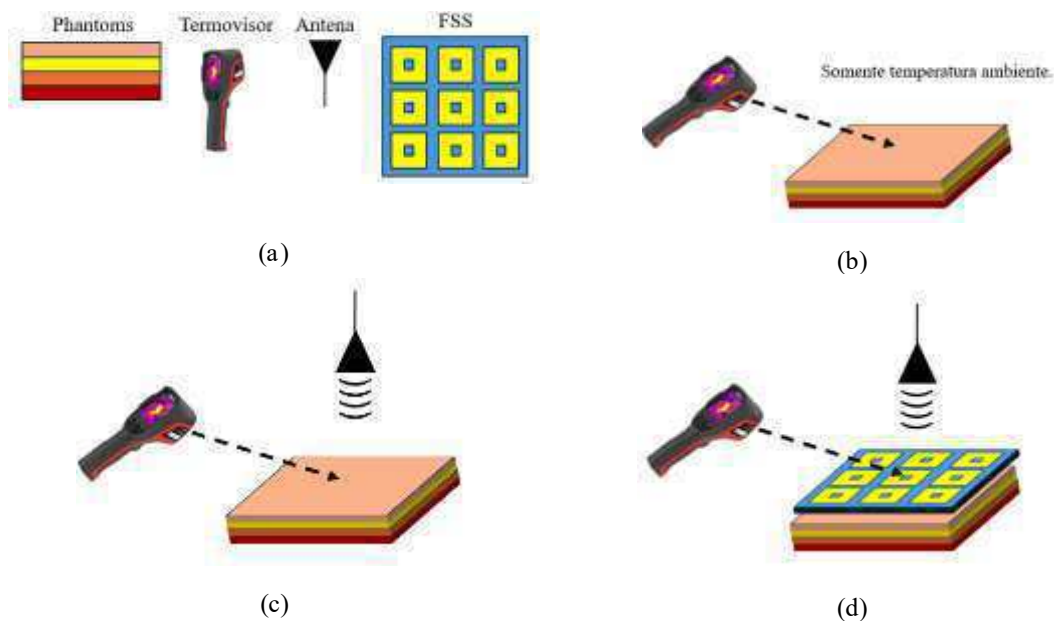
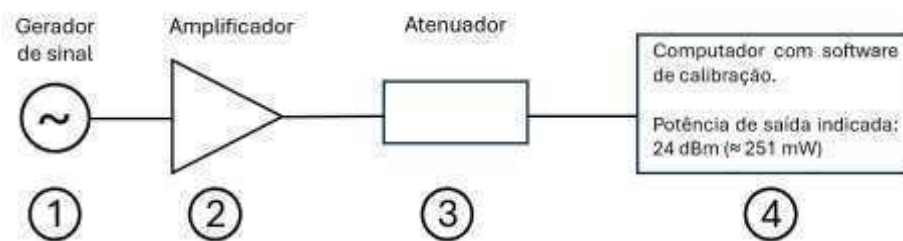


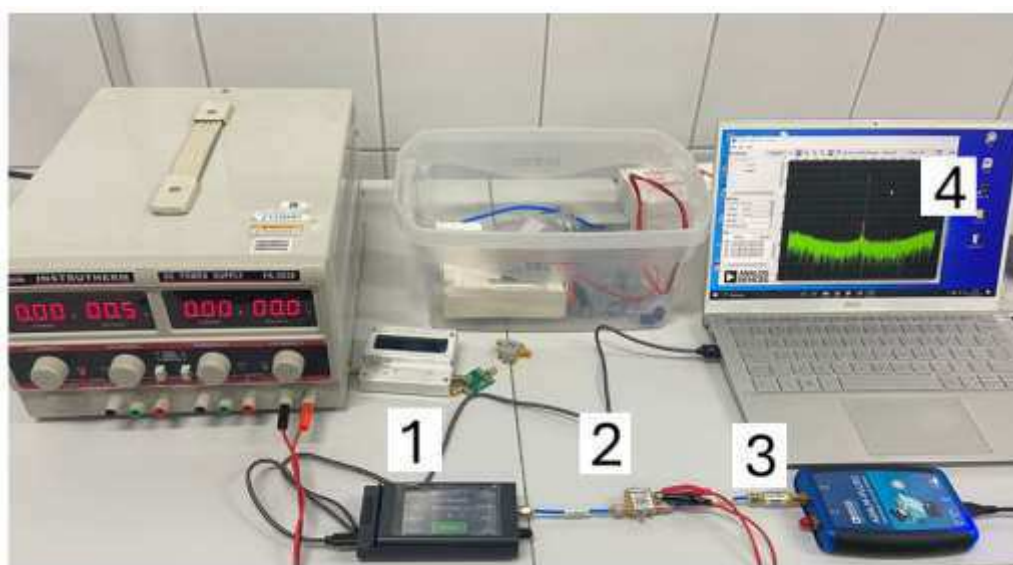
Figura 4.16. Etapas de medição de temperatura nos *phantoms* (a) ilustração dos componentes envolvidos (b) medição em temperatura ambiente sem exposição à radiação da antena (c) medição com exposição à radiação da antena sem a presença da FSS (d) medição com exposição à radiação da antena com a presença da FSS.

O setup de operação da excitação da antena utilizada conta com um gerador de sinal senoidal em 2,45 GHz e um amplificador de potência. O valor amplificado foi verificado por meio de calibração, conforme apresentado na Figura 4.17.

## CAPÍTULO 4. MATERIAIS E MÉTODOS



(a)



(b)

Figura 4.17. Setup de calibração (a) esquemático (b) experimental.

A presença do atenuador na Figura 4.17 serve para proteção da entrada do computador contra o nível de potência amplificado. Após a realização da calibração foi preparado o *setup* de excitação da antena e exposição dos *phantoms* à radiação EM, conforme apresentado na Figura 4.18.

## CAPÍTULO 4. MATERIAIS E MÉTODOS

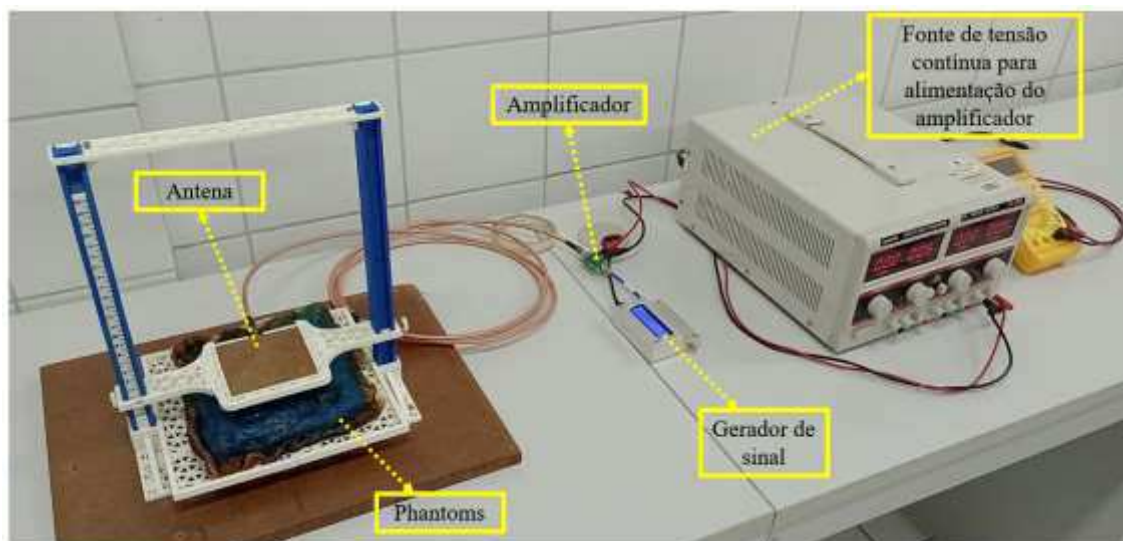
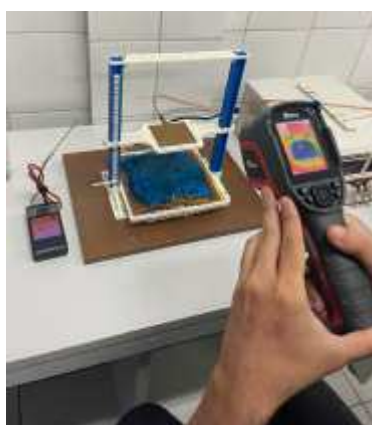


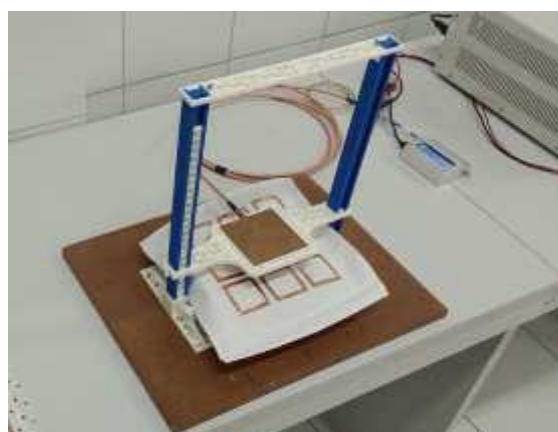
Figura 4.18. Setup para exposição dos *phantoms* à radiação EM.

Após a preparação do setup a antena foi excitada e seu lóbulo principal de radiação foi direcionado aos *phantoms*.

Com o objetivo de avaliar o comportamento térmico nos *phantoms* após a exposição à radiação EM da antena, estes ficaram expostos à radiação por 30 min. A temperatura nos *phantoms* foi medida por meio de termovisor no instante antes da excitação da antena e após 30 min de exposição, conforme apresentado na Figura 4.19.



(a)



(b)

Figura 4.19. Leitura de temperatura nos *phantoms* por meio de termovisor (a) sem FSS (b) com FSS.

## CAPÍTULO 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Na Figura 4.20 é apresentado um exemplo de registro de tela do termovisor durante as medições.

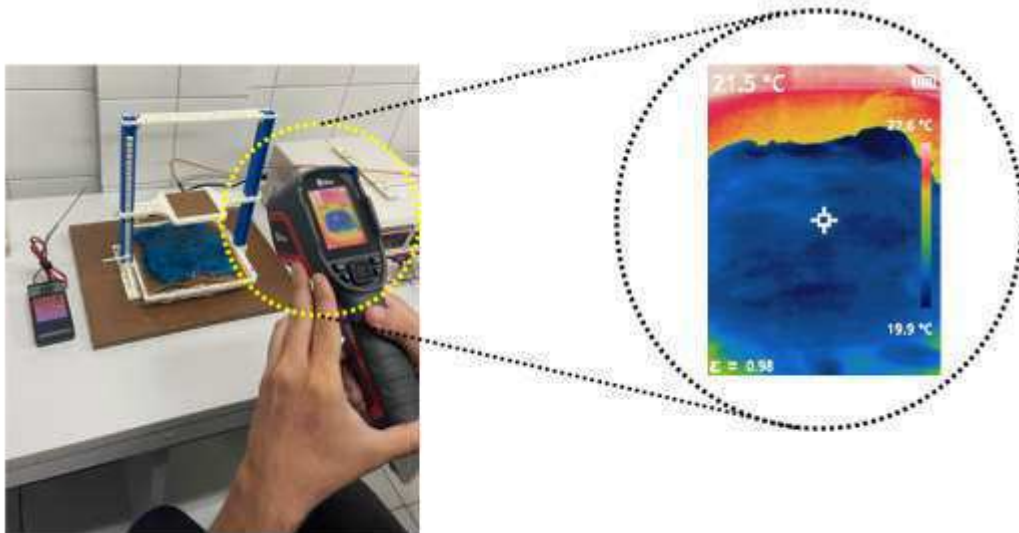
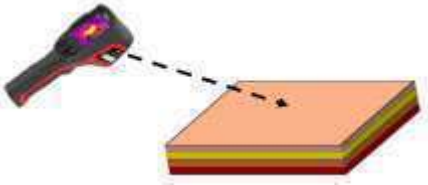
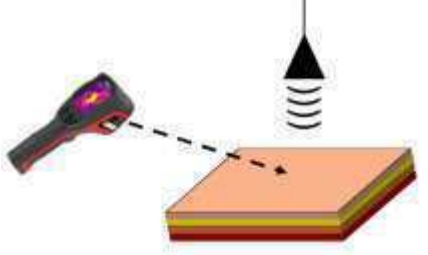

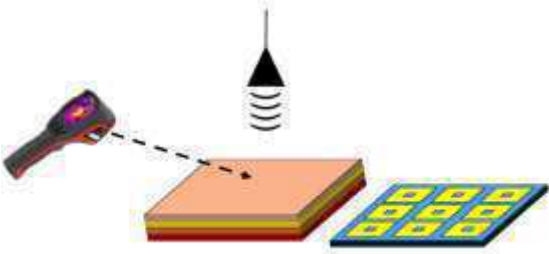
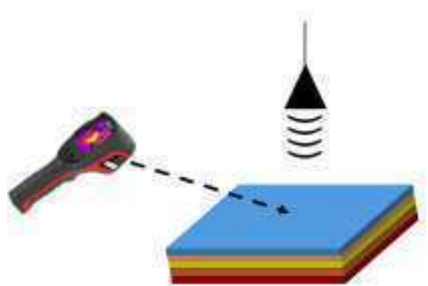


Figura 4.20. Registro de temperatura com utilização do termovisor.

É importante destacar que na Figura 4.20 a indicação  $\varepsilon = 0,98$  na tela do termovisor não é referente à permissividade elétrica (que possui a mesma simbologia), mas sim à emissividade do material em medição. Das configurações disponíveis no equipamento (fabricante Infray modelo C200 Pro) foi selecionada a emissividade para pele humana. Foram realizadas medições conforme as configurações indicadas na Tabela 4.6.

## CAPÍTULO 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Tabela 4.6. Configurações de medições realizadas.

Nº da configuração	Ilustração da configuração	Descrição
1		<p>Medição da temperatura dos <i>phantoms</i> em temperatura ambiente antes da exposição à radiação EM.</p>
2		<p>Medição da temperatura dos <i>phantoms</i> após 30 min. de exposição à radiação EM sem a presença da FSS.</p>
3		<p>Medição da temperatura dos <i>phantoms</i> após 30 min. de exposição à radiação EM com a presença da FSS.</p> <p>Esse processo foi realizado para as FSSs com os têxteis Alg_63, Alg_89 e Alg_100</p>
4		<p>Medição da temperatura dos <i>phantoms</i> após 30 min. de exposição à radiação EM com a presença da FSS. Ao fim dos 30 min. a FSS foi retirada e a temperatura diretamente do <i>phantom</i> foi medida.</p> <p>Esse processo foi realizado para as FSSs com os têxteis Alg_63, Alg_89 e Alg_100.</p>
5		<p>Medição da temperatura dos <i>phantoms</i> após 30 min. de exposição à radiação EM com a presença somente do substrato têxtil sem células condutoras. Ao fim dos 30 min. o têxtil foi retirado e a temperatura diretamente do <i>phantom</i> foi medida. O objetivo é verificar a influência das células condutoras das FSSs.</p>

---

## Capítulo 5 – Resultados e Discussão

---

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos ao final dos métodos aplicados e apresentados no Capítulo 4. Inicialmente serão abordados os resultados referentes à caracterização elétrica dos têxteis e posteriormente a aplicação desses resultados nos projetos das antenas e FSSs têxteis.

### 5.1 Resultados da caracterização elétrica dos materiais têxteis

Conforme o procedimento apresentado na Seção 4.2 - Caracterização elétrica dos materiais têxteis, foram obtidas as permissividades elétricas e tangente de perdas dos materiais têxteis em função da frequência. Na Figura 5.1 são ilustrados os parâmetros permissividade elétrica relativa e tangente de perdas em função da frequência, para o intervalo de 2 a 3 GHz, destacando-se a banda de interesse (ISM 2,4 GHz).

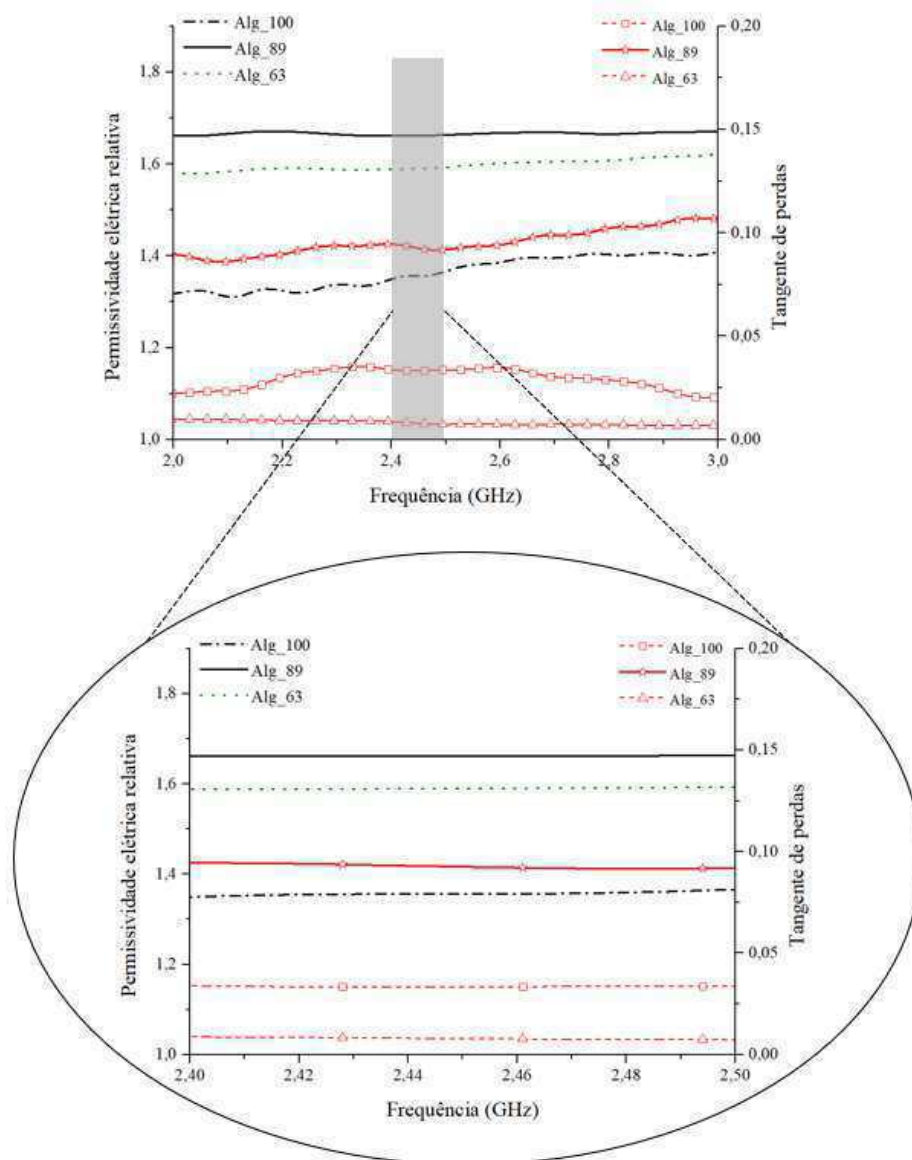


Figura 5.1. Dados experimentais para permissividade elétrica relativa e a tangente de perdas em função da frequência de cada material têxtil.

Pode-se observar que, dentro da faixa de frequências de interesse de 2,4 a 2,5 GHz, os parâmetros medidos permanecem praticamente constantes. Dentre as três amostras, o material Alg\_100 apresentou maior variação percentual de permissividade relativa (1,207%), enquanto o material Alg\_63 apresentou maior variação percentual para a tangente de perdas (14,94%). Já a amostra Alg\_89 apresentou a menor variação percentual a permissividade elétrica relativa (0,096%), enquanto a amostra Alg\_100 apresentou a menor variação percentual para a tangente de perdas (1,479%). Essa uniformidade dos parâmetros experimentais é importante, pois é do interesse da aplicação, uma vez que são fatores que influenciam nas condições de operação da estrutura.

Na Tabela 5.1 são destacados alguns dados da permissividade elétrica relativa e tangente de perdas em função da frequência, para o intervalo de 2,4 a 2,5 GHz.

Tabela 5.1. Permissividade elétrica relativa e tangente de perdas experimentais (2,4-2,5 GHz).

Têxtil	$\epsilon_r$		$\tan\delta$	
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
Alg_63	1,5883	1,5933	0,0074	0,0087
Alg_89	1,6617	1,6633	0,0916	0,0945
Alg_100	1,3503	1,3668	0,0333	0,0338
	Média	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão
Alg_63	1,5903	0,0016	0,0079	0,0005
Alg_89	1,6622	0,0005	0,0928	0,0011
Alg_100	1,3572	0,0042	0,0336	0,0002

Os resultados das caracterizações elétricas dos materiais têxteis foram então exportados para o ambiente computacional ANSYS® HFSS e atribuídos à materiais que irão simular os materiais têxteis no software tanto para verificação do comportamento das antenas quanto das FSSs.

## 5.2 Resultados simulados e experimentais das antenas têxteis

O resultado para as dimensões das antenas têxteis conforme o Modelo da Linha de Transmissão são indicados na

Tabela 5.2, com dimensões ilustradas na Figura 5.2.

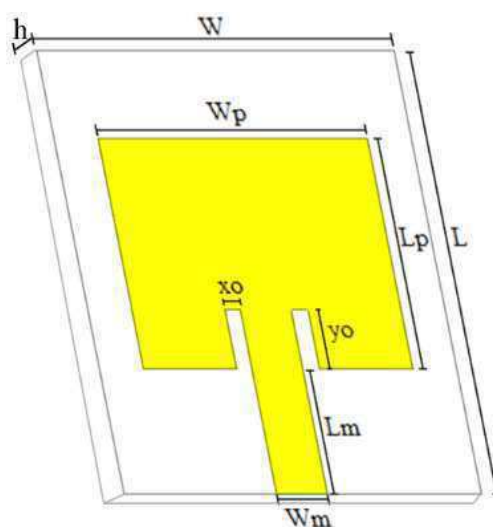


Figura 5.2. Representação das dimensões das antenas construídas.

Tabela 5.2. Dimensões físicas (em milímetros) das antenas construídas.

Substrato Dielétrico	W	L	h	Wp	Lp	yo	xo	Lm	Wm
Alg_100	90	87	1,80	50	51	8,0	3	28,0	6,0
Alg_89	90	85	1,12	50	52	6,0	3	27,5	4,5
Alg_63	90	90	1,04	50	55	14,5	5	20,0	3,0

Para melhor estabilidade mecânica e conexão do conector de alimentação elétrica das antenas foram utilizadas quatro camadas de material têxtil para compor o substrato dielétrico das antenas têxteis, contudo, sem afetar suas flexibilidades. Destaca-se que a dimensão  $W_m$  foi determinada por meio da Equação 5.1 para o caso  $\frac{W_m}{h} > 1$ , conforme Huang e Boyle (2008).

$$Z_o = \begin{cases} \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_r \left( \frac{W_m}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left( \frac{W_m}{h} + 1,44 \right) \right)}}, & \frac{W_m}{h} > 1 \\ \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{ref}}} \ln \left( \frac{8h}{W_m} + \frac{W_m}{4h} \right), & \frac{W_m}{h} \leq 1 \end{cases} \quad (5.1)$$

Em que  $\varepsilon_{ref}$  representa a permissividade elétrica relativa efetiva, calculada de acordo com a Equação 5.2, conforme Balanis (2009), e  $Z_o$  representa a impedância de entrada das antenas. Destaca-se que a Equação 5.1 é de análise, logo, também foi utilizado o auxílio de otimização do software ANSYS HFSS® para a obtenção das dimensões finais. As impedâncias de entrada para todas as antenas foram adotadas com valor 50  $\Omega$ , pois é o valor típico da impedância do conector SMA que será utilizado para a alimentação elétrica das antenas.

$$\varepsilon_{ref} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\sqrt{1 + \frac{12h}{W}}} \quad (5.2)$$

Na Figura 5.3 são apresentados os resultados simulados referentes ao desempenho das antenas têxteis com relação ao coeficiente de reflexão em função da frequência.

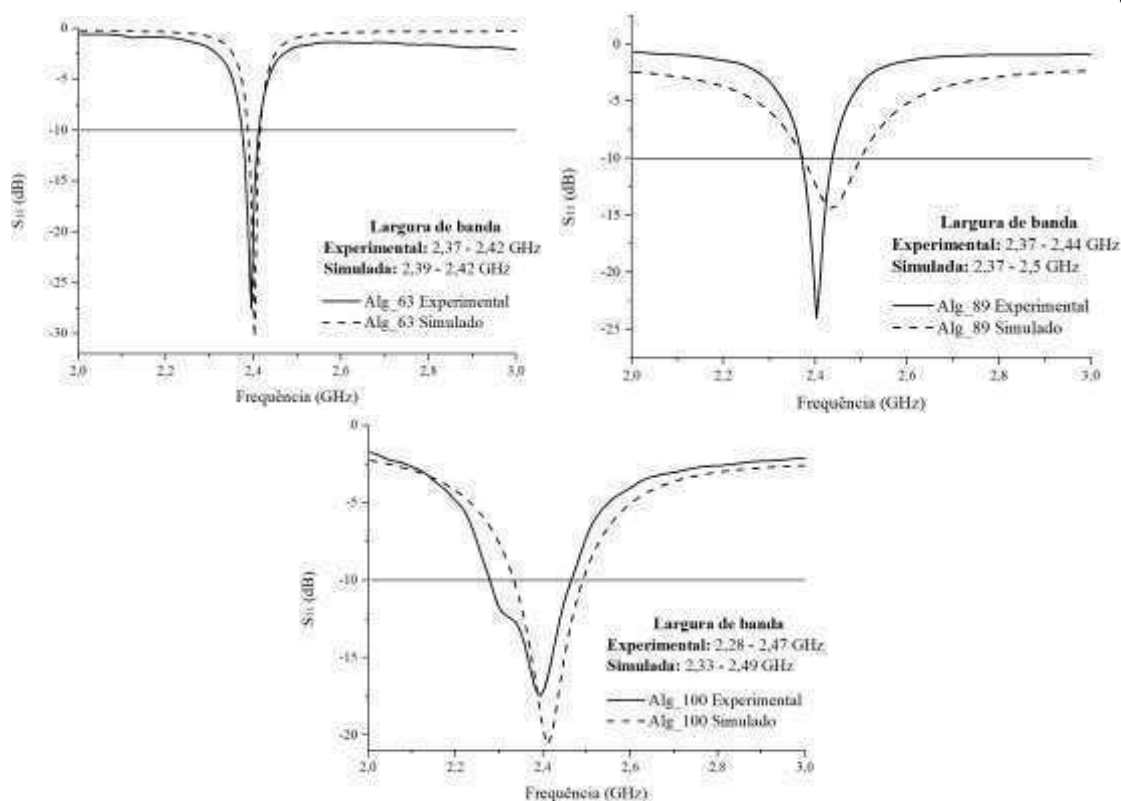


Figura 5.3. Relações simuladas e experimentais para o coeficiente de reflexão em função da frequência.

Observa-se na Figura 5.3 que a largura de banda (BW – *Bandwidth*) operacional foi uma variável visivelmente influenciada pela diferença na composição dos materiais. Os substratos com maiores percentuais de algodão apresentaram maiores larguras de banda. Na Tabela 5.3 são resumidos os resultados experimentais apresentados na Figura 5.3.

Tabela 5.3. Comportamento experimental das antenas têxteis construídas.

Material	Frequência* com menor S11 (GHz)	S11 (dB)	BW (MHz)	
			Total	F.I**
Alg_100	2,4025	-17,0695	180	60
Alg_89	2,4025	-23,9986	60	30
Alg_63	2,4025	-15,7426	30	7,5

\* Dentro do intervalo de interesse (2,4 – 2,5 GHz). \*\* F. I – Largura de banda com limites da faixa de interesse (2,4 – 2,5 GHz).

Para um valor normalizado de impedância 50 Ω apresenta-se na Figura 5.4 a Carta de Smith para as três antenas.

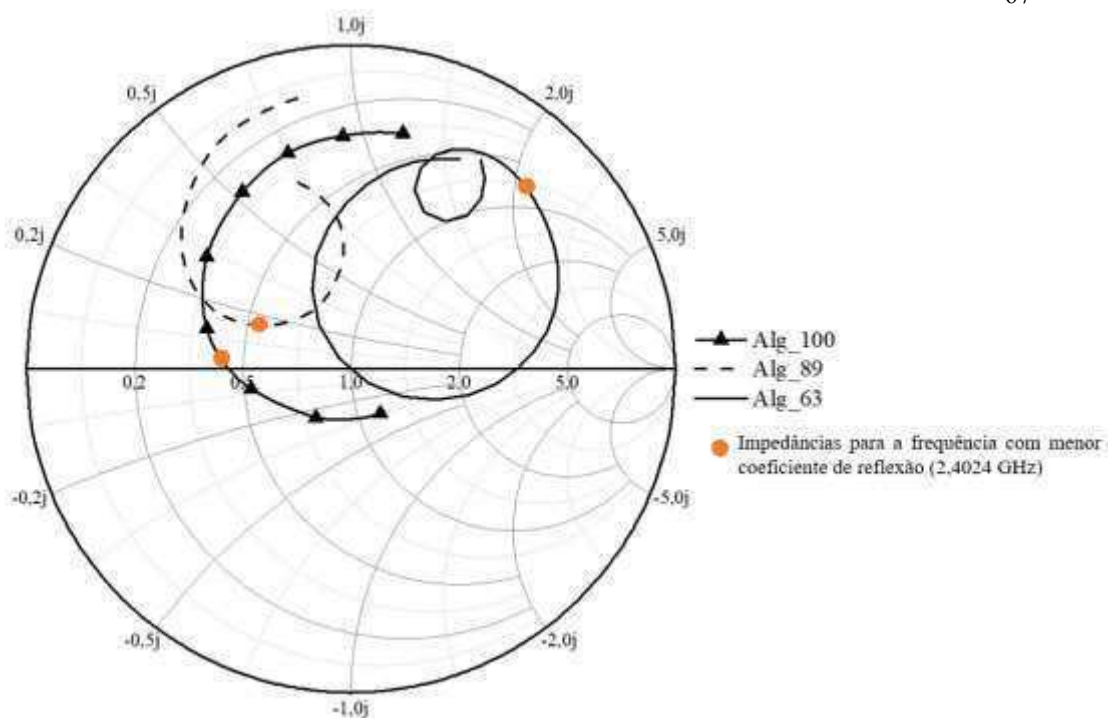


Figura 5.4. Carta de Smith para as antenas têxteis construídas.

Observa-se na Figura 5.4 que para a frequência com menor coeficiente de reflexão ocorreu significativa influência da parcela reativa da impedância complexa das antenas, provocando, portanto, um valor real de impedância complexa deslocado de  $50 \Omega$ . Dentre as três antenas construídas a que apresentou impedância mais próxima de  $50 \Omega$ , para a frequência  $2,4025 \text{ GHz}$  foi a antena com substrato Alg\_89 ( $30,3 + j8,85 \Omega$ ). A frequência com impedância mais próxima do valor ideal  $50 \Omega$  é  $2,52 \text{ GHz}$ , fora do intervalo de frequências de interesse, porém, conforme observado na Figura 5.3 a frequência  $2,4025 \text{ GHz}$  apresentou menor coeficiente de reflexão. Os diagramas tridimensionais de radiação das antenas têxteis (simulados) são apresentados na Figura 5.5.

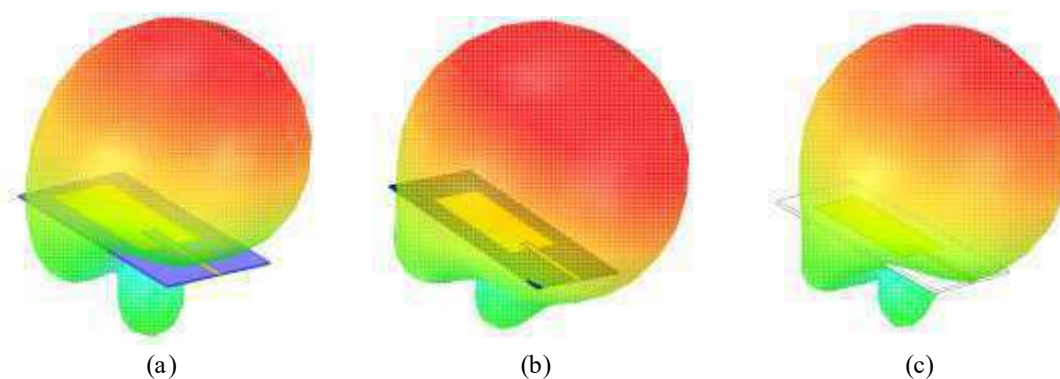


Figura 5.5. Diagramas de radiação das antenas têxteis (a) Alg\_63 (b) Alg\_89 (c) Alg\_100.

Observa-se a característica *broadside* em todos os diagramas de radiação e, além disso, a presença de lóbulos secundários que podem proporcionar aumento dos níveis de SAR em usuários desse tipo de antena em situações de proximidade com o corpo.

### 5.3 Resultados simulados e experimentais das FSSs têxteis

Na Figura 5.6 apresentam-se as dimensões da célula para as FSSs simuladas no software comercial ANSYS® HFSS e que foram construídas.

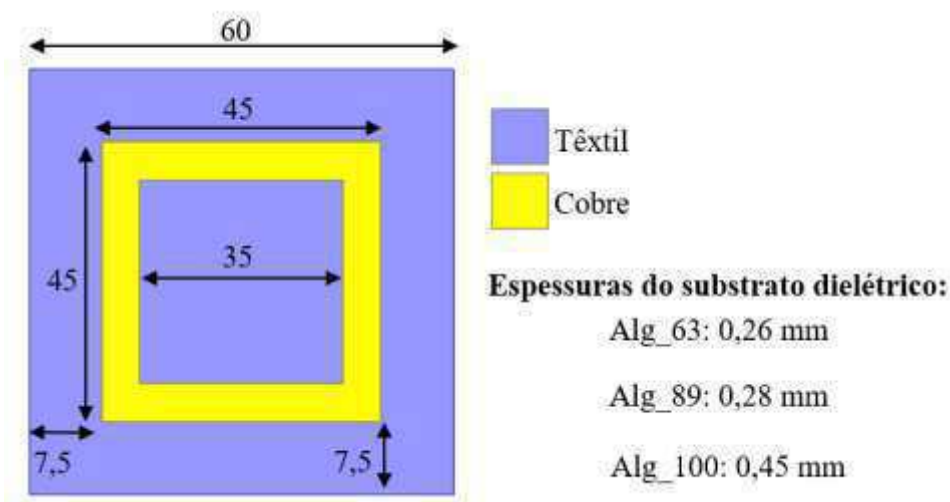
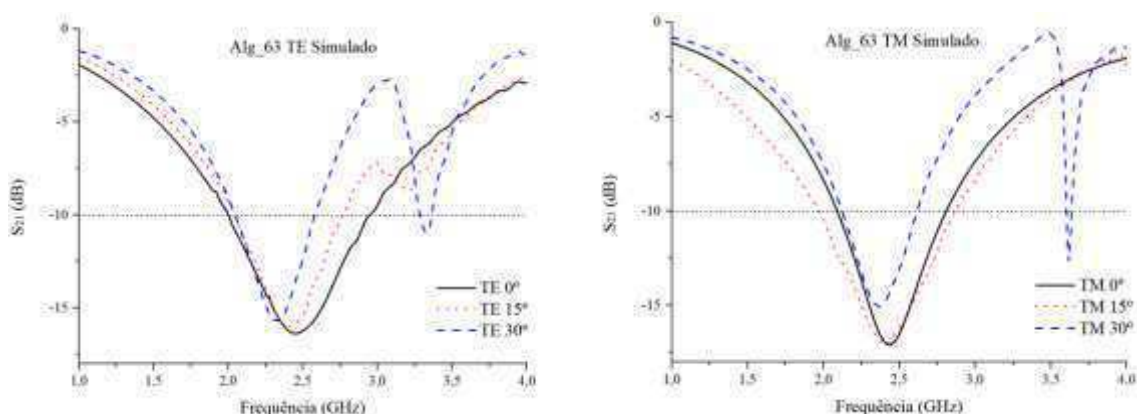


Figura 5.6. Dimensões em milímetros das células unitárias para cada FSS têxtil.

O comportamento do coeficiente de transmissão ( $S_{21}$ ) em função da frequência simulado em polarizações TE e TM para ângulos de incidência 0, 15 e 30 graus são mostrados na Figura 5.7.



(a)

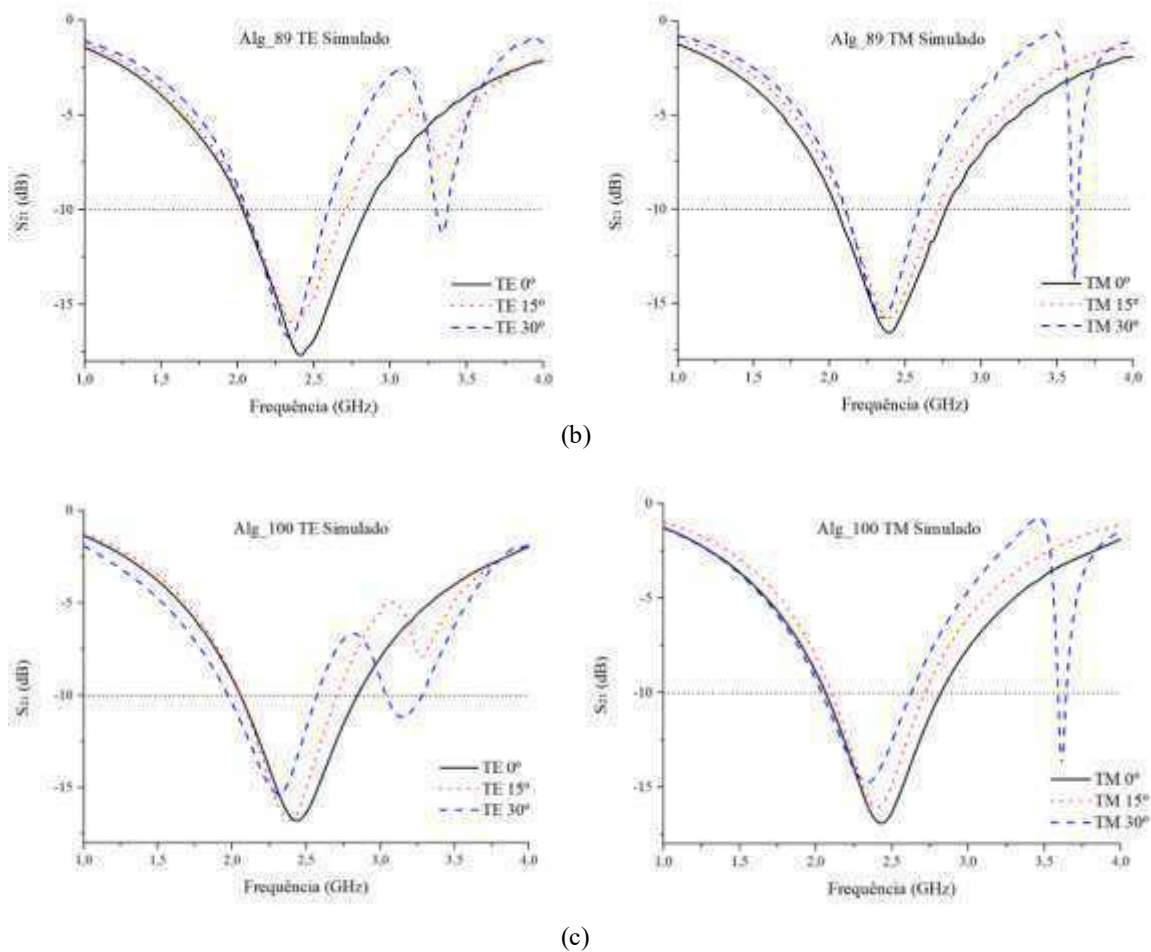


Figura 5.7. Simulações para polarizações TE e TM (a) Alg\_63 (b) Alg\_89 (c) Alg\_100.

Observa-se na Figura 5.7 que todas as estruturas apresentaram operação na faixa de frequências pretendida, ou seja, coeficientes de transmissão menor que -10 dB para o intervalo 2,4 a 2,5 GHz, mesmo com todos os substratos recebendo células condutoras com as mesmas dimensões físicas. É sugerido também que a largura de banda total de cada uma das estruturas sofre redução à medida que o ângulo de incidência aumenta, contudo, nenhuma estrutura deixou de atender a faixa ISM 2,4 GHz. Pode-se perceber que nas simulações foi indicado uma reflexão próxima aos 3,5 GHz em razão de lóbulos de gradeamento. Uma vez que a proposta da pesquisa é a de atuação das FSSs como refletoras, esse modo próximo aos 3,5 GHz indicado na simulação não é um ponto negativo. Dessa forma, foi seguida a construção das FSSs com as dimensões indicadas na Figura 5.6.

Os resultados simulados comparados com os experimentais são apresentados na Figura 5.8 para as polarizações TE e TM assim como para os ângulos de incidência 0, 15 e 30 graus.

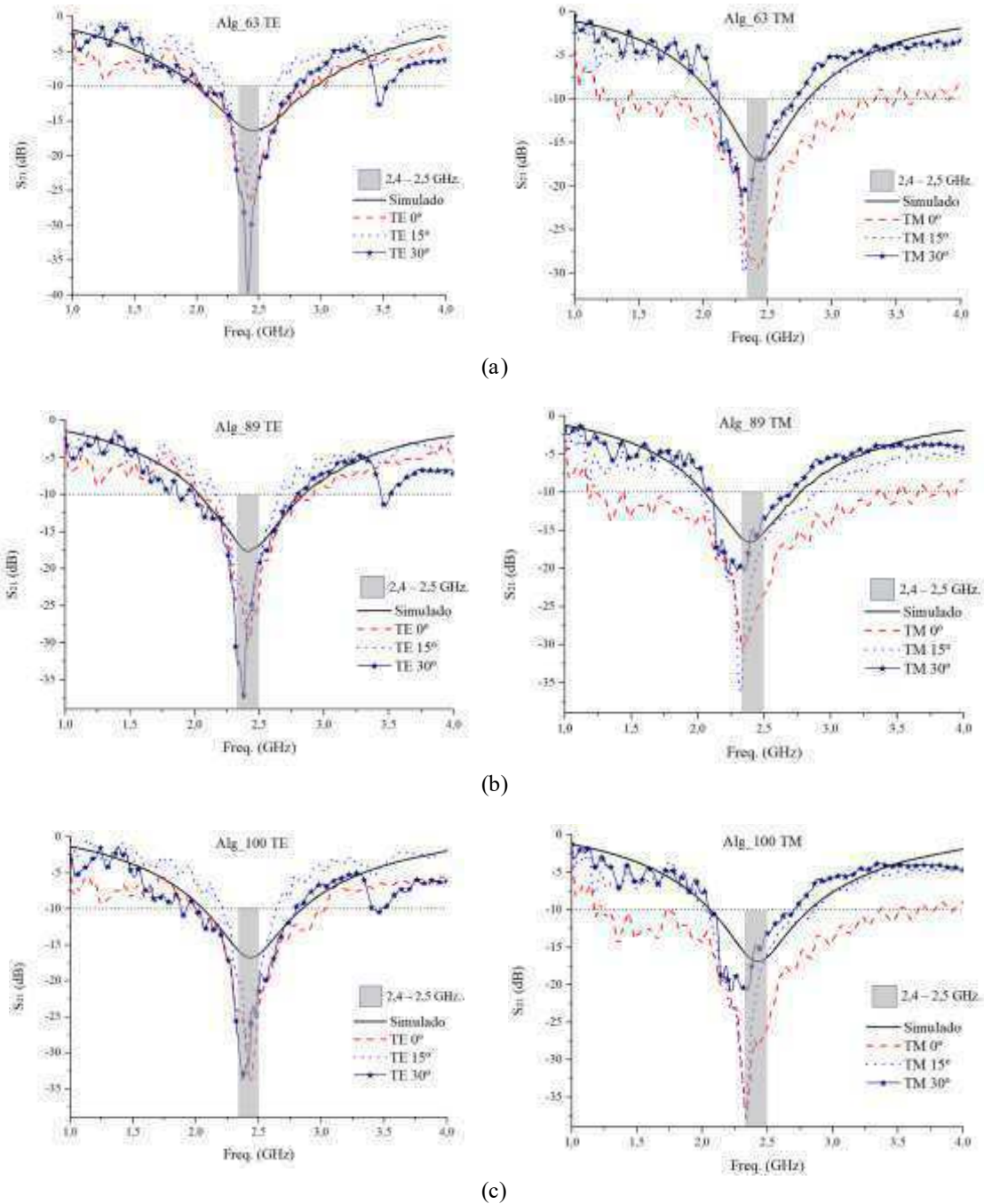


Figura 5.8. Resultados experimentais para polarizações TE e TM (a) Alg\_63 (b) Alg\_89 (c) Alg\_100.

A largura de banda da faixa ISM 2,4 GHz foi atendida tanto em ambiente simulado quanto para as medições experimentais em todos os ângulos de incidência e polarizações TE e TM. Essa característica de resposta com estabilidade angular é típica para as células tipo espira quadrada. A estabilidade angular ( $EA$ ) de cada FSS têxtil foi mensurada por meio da Equação 5.2.

$$EA = \frac{Freq_{Ang.M\acute{a}x}}{Freq_{Ang.Normal}} \quad (5.2)$$

Na qual  $Freq_{Ang.M\acute{a}x}$  representa a frequência ressonante para o maior ângulo de incidência (30° para as medições realizadas nesse trabalho) e  $Freq_{Ang.Normal}$  representa a frequência ressonante para ângulo de incidência normal à FSS. Na Tabela 5.4 são apresentados os valores de  $EA$  para cada FSS.

Tabela 5.4. Estabilidade angular ( $EA$ ) experimental apresentada por cada FSS têxtil.

FSS	$Freq_{Ang.M\acute{a}x}$ (GHz)		$Freq_{Ang.Normal}$ (GHz)		$EA$	
	TE	TM	TE	TM	TE	TM
<b>Alg_63</b>	2,41	2,35	2,43	2,41	0,992	0,975
<b>Alg_89</b>	2,37	2,35	2,42	2,41	0,979	0,975
<b>Alg_100</b>	2,37	2,35	2,43	2,34	0,975	1,01

Portanto, conforme característica típica das células tipo espira quadrada, para as FSSs têxteis construídas foram observadas estabilidades tanto de polarização quanto angular. Dessa forma, as FSSs têxteis apresentam-se como possível solução para a aplicação proposta em conjunto com as antenas têxteis construídas.

## 5.4 Resultados da caracterização elétrica dos *phantoms*

Os resultados das medições relativos à permissividade complexa (tanto constante dielétrica quanto condutividade elétrica) dos *phantoms* realizados são apresentados e comparados com valores citados na literatura.

Uma configuração de medição específica foi utilizada para caracterizar eletricamente cada *phantom*. A configuração experimental, que está no Laboratório de Telecomunicações e Micro-ondas (LabMicro), da Universidade Federal Rural do Semi-árido inclui uma sonda coaxial aberta que é conectada a um analisador vetorial de redes VNA *Rohde & Schwarz*<sup>®</sup> ZND. Essa configuração é capaz de medir a permissividade dielétrica complexa (constante dielétrica e tangente de perdas) na faixa de 1 a 200, dentro de um intervalo de frequência que vai de 200 MHz a 8,5 GHz. Para obter resultados precisos, o *phantom* deve ter uma extensão maior que o diâmetro da abertura do sensor. Além disso, é importante que não exista espaço de ar entre o sensor e a amostra. Devido à natureza da amostra, as condições acima são facilmente garantidas, pois um bom contato pode ser obtido entre a sonda e o *phantom*, aplicando um pouco de

pressão na sonda. Como primeiro passo, os instrumentos acima são calibrados usando uma amostra de água destilada em temperatura ambiente, especificamente igual a 23 °C no momento da medição. Após a fase de calibração, a permissividade complexa dos materiais de referência é medida para avaliar a precisão do instrumento. O setup de medição utilizado na caracterização dos *phantoms* é mostrado na Figura 5.9.

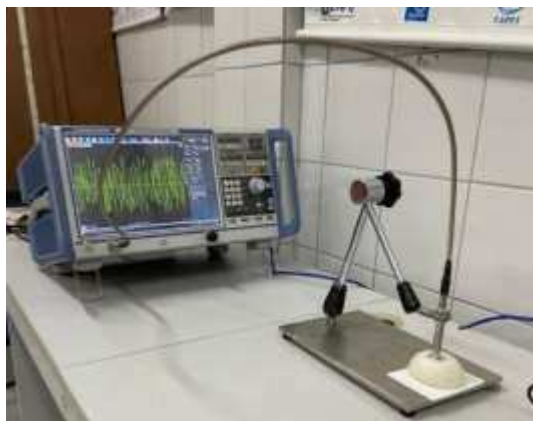
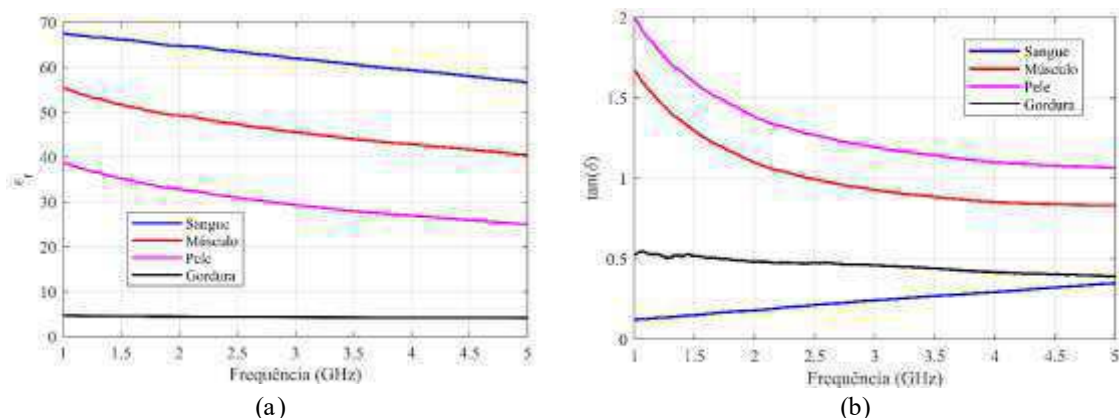


Figura 5.9. Setup de caracterização elétrica dos *phantoms*.

Cada medição foi repetida dez vezes, para garantir a confiabilidade dos dados e a repetibilidade das medições, e o valor médio para cada conjunto de medições foi assumido. Os dados medidos resultantes para permissividade dielétrica relativa, a tangente de perdas e a condutividade elétrica de cada *phantom* são ilustrados na Figura 5.10.



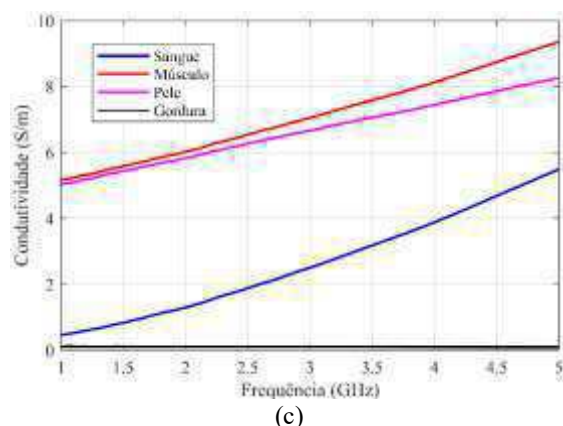


Figura 5.10. Resultado da caracterização elétrica dos *phantoms* (a) permissividade relativa (b) tangente de perdas (c) condutividade elétrica.

Avaliou-se a caracterização dielétrica na faixa de frequências de 1 GHz a 5 GHz, visando estabelecer um extenso conjunto de dados contendo os parâmetros dielétricos dos *phantoms*. Esses dados podem ser aplicados com êxito em uma variedade de áreas, como biossensores, bioimagem e engenharia de tecidos. A faixa de frequência mencionada engloba a maioria das bandas usadas em aplicações biomédicas e diagnósticas convencionais, além de comunicação intra e extracorpórea.

Os valores medidos para os parâmetros dielétricos são validados com sucesso por comparação com dados retirados de modelos de referência na literatura, que realizaram medições englobando as mesmas faixas de frequência. A comparação é listada na Tabela 5.5 para a frequência de 2,45 GHz, operando dentro da banda Industrial, Científica, Médica (ISM).

Tabela 5.5. Parâmetros dielétricos medidos e de referência.

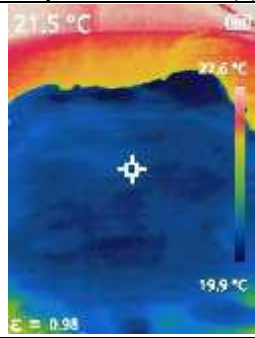

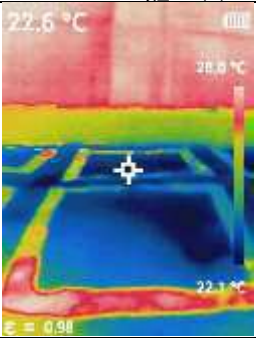
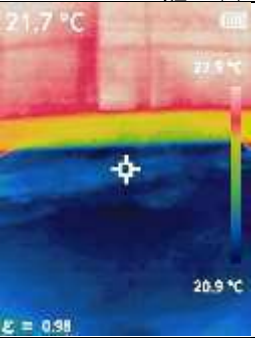

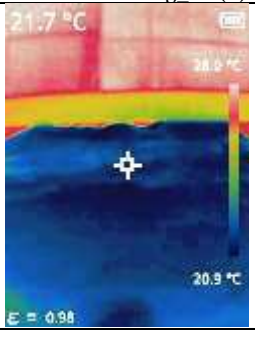

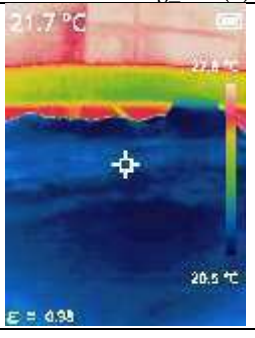
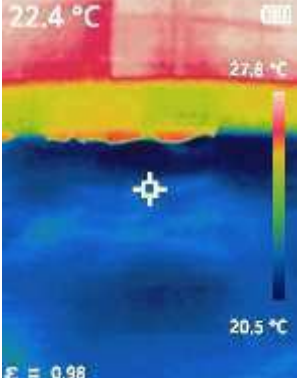
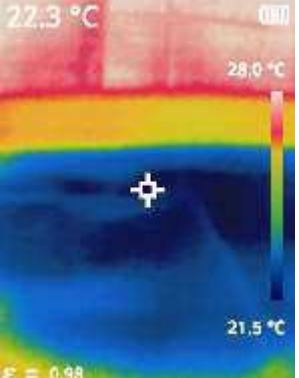
Tecido	Medido – $\epsilon_r$	Referência – $\epsilon_r$	Medido – $\sigma$ (S/m)	Referência – $\sigma$ (S/m)
Pele	31,55	31,3 – 45	6,23	0,73 – 8
Gordura	4,62	4,6 – 5,54	0,11	0,04 – 0,6
Sangue	63,19	45,1 – 63,3	1,83	1,38 – 13,1
Músculo	47,48	42,8 – 56,5	6,49	0,8 – 10,6

Pode-se observar que os valores medidos ficaram dentro das faixas encontradas na literatura, conforme Mobashsher e Abbosh (2015), validando os *phantoms* fabricados. Após a verificação das características elétricas dos *phantoms* foi realizada a exposição à radiação EM e análise do efeito da FSS operando como refletora no sistema em medição.

## 5.5 Exposição dos *phantoms* à radiação EM e aplicação das FSSs têxteis e análise térmica

Na Tabela 5.6 são apresentados os resultados medidos de acordo com as configurações de medição apresentadas na Figura 4.6. Entre parênteses, ao lado de cada descrição, está a numeração referente à configuração na Figura 4.6.

Tabela 5.6. Medições de temperaturas em cada configuração de medição.

Temperatura ambiente (1)	Com antena sem FSS (2)	Com FSS Alg 63 (3)	Retirada FSS Alg 63 (4)
			
Com FSS Alg 89 (3)	Retirada FSS Alg 89 (4)	Com FSS Alg 100 (3)	Retirada FSS Alg 100 (4)
			
Com têxtil sem células (5)	Retirado têxtil sem células (4)		
			

A partir das medições apresentadas na Tabela 5.6 é possível estimar a taxa de absorção específica (SAR – *Specific Absorption Rate*) em cada medição por meio da

Equação 1, conforme Panagopoulos, Johansson e Carlo (2013) e Sugumaran, Balasubramanian e Palaniswamy (2021). A utilização da Equação 1, que relaciona o nível de SAR com a elevação de temperatura, é uma forma mais conveniente de estimar o SAR quando comparada com formas de cálculo que relacionam o SAR com a distribuição de campo elétrico no tecido, pois a variação de calor específico nos tecidos biológicos é geralmente muito menor que as variações de condutividade, ou seja, resulta em maior uniformidade de temperatura em relação à distribuição de campo elétrico (PANAGOPOULOS; JOHANSSON; CARLO, 2013).

$$SAR = \frac{\Delta T \times c_t}{\Delta t} \left[ W/kg \right] \quad (1)$$

Em que

- $\Delta T$ : elevação de temperatura em °C;
- $\Delta t$ : tempo de exposição em segundos (1800 s = 30 min);
- $c_t$ : capacidade calorífica em  $\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$ .

Na Tabela 5.7 são apresentados os valores de SAR para cada medição apresentada na Tabela 5.6.

Tabela 5.7. Valores de SAR a partir da elevação de temperatura observada em cada medição.

Configuração	Elevação de temperatura [°C]	SAR Calculado [W/kg]
Com antena sem FSS	0,9	1,696
Com FSS Alg_63	0,2	0,377
Com FSS Alg_89	0,2	0,377
Com FSS Alg_100	0,2	0,377

A partir do que se apresenta na Tabela 5.7 é possível observar a influência das FSSs na redução da elevação de temperatura nos *phantoms* e consequentemente a diminuição da absorção de radiação EM, tendo em vista a redução dos valores de SAR, que foi de aproximadamente 77,77% quando comparadas as configurações com FSS e apenas com a antena.

Uma vez que a exposição prolongada à transmissão de sinal de uma antena/sistema sem fio pode representar riscos potenciais para os usuários se os aumentos de temperatura excederem 1 °C, conforme Nadh *et al.* (2020), a análise

térmica foi realizada para verificação do impacto à exposição da radiação EM. Os resultados são apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8. Resultado da elevação de temperatura.

Antena	Frequência (GHz)	Temperatura (°C)		Elevação de temperatura (°C)
		Tempo inicial 0 s	Após 30 min.	
Sem FSS	2,45	21,5	22,4	0,9
Com FSS	2,45	21,5	21,7	0,2

A antena foi posicionada sobre os *phantoms* simulando os tecidos da região torácica humana e ativada por trinta minutos. Os efeitos térmicos são avaliados em 2,45 GHz com potência de entrada de 100 mW fornecida por um gerador de RF. Os termogramas são capturados inicialmente (zero minutos) quando a antena está inativa e novamente após 30 minutos de ativação. Conforme apresentado na Tabela 5.8, houve elevação de 0,9 °C para o sistema com antena ativa e sem FSS, estando, portanto, próximo ao limite de risco. Em contrapartida, quando a FSS é adicionada ao sistema de medição a elevação de temperatura é de aproximadamente 0,2 °C, estando em conformidade com o limite de segurança.

---

## Capítulo 6 – Conclusão

---

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de antenas têxteis e superfícies seletivas em frequência também têxteis, sendo ambas partes de um sistema para redução de níveis de SAR no corpo humano resultante de radiação eletromagnética proveniente de antenas próximas ao corpo. A faixa de frequências de interesse é a ISM 2,4 GHz (2,4 GHz – 2,5 GHz).

Três materiais têxteis compostos por algodão e poliéster (diferentes proporções em cada material) utilizados no contexto de vestimentas hospitalares foram caracterizados eletricamente e as características de permissividade elétrica e tangente de perdas em função da frequência foram obtidas experimentalmente. Esses dados foram exportados para o software comercial ANSYS® HFSS e atribuídos a materiais que simularam os têxteis no ambiente computacional.

Após a obtenção da permissividade elétrica e tangente de perdas dos materiais foram projetadas três antenas com os materiais têxteis selecionados sendo utilizados como substratos dielétricos. Para cada antena foi utilizado um dos têxteis como substrato dielétrico. Verificado o atendimento operacional à faixa ISM 2,4 GHz as antenas foram construídas e analisadas experimentalmente em um analisador vetorial de redes.

A partir dos mesmos dados experimentais utilizados nos projetos das antenas têxteis foram projetadas e desenvolvidas três FSSs têxteis com célula do tipo espira quadrada. O objetivo de operação das FSSs têxteis é atuar como refletor dos lóbulos posteriores provenientes das antenas que possam aumentar os níveis de absorção de energia eletromagnética pelo corpo humano.

As antenas e as FSSs apresentaram resposta adequada à continuação da proposta desse trabalho, que é a interação entre antena e FSS têxtil na redução dos níveis de SAR no corpo humano, verificando-se a evolução da temperatura em materiais que simulam camadas do corpo humano.

Foi proposto um procedimento simples e de baixo custo, adotando materiais de fácil acesso para a fabricação de *phantoms* que simulam o comportamento de tecidos humanos reais pele, gordura, sangue e músculo. Os *phantoms* fabricados são soluções semissólidas, que exigem menos tempo de fabricação, preservando ao mesmo tempo uma estabilidade temporal relativamente longa. Além disso, eles podem ser adotados com sucesso para aplicações de imagem e biocompatibilidade.

O procedimento de fabricação foi descrito com precisão e particularizado para os tecidos pele, gordura, sangue e músculo. A caracterização dielétrica dos *phantoms* biológicos fabricados foi realizada, e os parâmetros permissividade, condutividade e tangente de perdas dielétricas foram medidos e comparados com valores encontrados na literatura, confirmando assim o comportamento preciso dos *phantoms* fabricados. Os resultados alcançados apresentam a aplicação confiável dos *phantoms* propostos como materiais que imitam tecidos para estudos *in vitro* e previsão de bioefeitos *in vivo* em frequências de micro-ondas.

A utilização dos *phantoms* para esse tipo de análise se mostra como uma alternativa ao aguardo de permissões por parte dos comitês de ética quando é necessário avaliar o efeito da proximidade dispositivos de radiação eletromagnética no corpo humano. Com a utilização dos materiais de imitação dos tecidos humanos é possível analisar cada região do corpo com maior facilidade de acesso, pois possibilita que outros pesquisadores fabriquem o material, além de facilidade no transporte entre laboratórios (quando necessário).

A análise térmica realizada mostrou que a atuação da FSS no sistema em medição proporcionou redução de aproximadamente 77,77% no nível de SAR em que os *phantoms* foram expostos.

Como trabalhos futuros podem ser listados:

- O projeto de novos tipos de antenas, como antenas *dualband*, por exemplo, além de novas geometrias para células unitárias podem ser abordadas;
- Análises de SAR para níveis de potência mais elevados e a fabricação de *phantoms* para analisar dispositivos em proximidade com a cabeça podem ser fabricados para simular tecidos como ossos, cérebro e olhos;

- Verificar a influência da presença dos *phantoms* nos coeficientes de transmissão e reflexão das FSSs e antenas, respectivamente. Assim como verificar a influência da proximidade dos *phantoms* na distribuição de densidade de corrente elétrica nas células da FSS e *patch* da antena.

---

## Referências

---

Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). **Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Faixas de Frequências no Brasil (PDF)**. Disponível em:

[https://sei.anatel.gov.br/sei/modulos/pesquisa/md\\_pesq\\_documento\\_consulta\\_externa.php?eEP-](https://sei.anatel.gov.br/sei/modulos/pesquisa/md_pesq_documento_consulta_externa.php?eEP-)

[wqk1skrd8hSlk5Z3rN4EVg9uLJqrLYJw\\_9INcO7xT8h5bIHTFJoMntJSQiAQSJFIG919KSQ08WmdOHlwUrYp2e\\_GJegapZEt1C19ygA2Yn6freTFTggpi9bcPHxi](https://sei.anatel.gov.br/sei/modulos/pesquisa/md_pesq_documento_consulta_externa.php?eEP-wqk1skrd8hSlk5Z3rN4EVg9uLJqrLYJw_9INcO7xT8h5bIHTFJoMntJSQiAQSJFIG919KSQ08WmdOHlwUrYp2e_GJegapZEt1C19ygA2Yn6freTFTggpi9bcPHxi).

ANDRE, Luis; PINHO, Pedro; GOUVEIA, Carolina; LOSS, Caroline. Textile Antenna for First-Person View Goggles. **Elektronika Ir Elektrotechnika**, [S.L.], v. 27, n. 2, p. 49-54, 29 abr. 2021. Kaunas University of Technology (KTU). <http://dx.doi.org/10.5755/j02.eie.28841>. Disponível em: <https://eejournal.ktu.lt/index.php/elt/article/view/28841>.

ANWAR, Rana; MAO, Lingfeng; NING, Huansheng. Frequency Selective Surfaces: a review. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 8, n. 9, p. 1689-1735, 18 set. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/app8091689>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/9/1689/htm>.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 13734: Produtos têxteis para saúde**. Rio de Janeiro, 2016.

ATANASOVA, Gabriela Lachezarova; ATANASOV, Blagovest Nikolaev; ATANASOV, Nikolay Todorov. Fully Textile Dual-Band Logo Antenna for IoT Wearable Devices. **Sensors**, [S.L.], v. 22, n. 12, p. 4516, 15 jun. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s22124516>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/12/4516/htm>.

BALANIS, Constantine A. **Teoria de Antenas: Análise e síntese**. 3. ed. vol 2. LTC, Rio de Janeiro, 2009. 317p.

CAVALCANTE, Gustavo A.; D'ASSUNÇÃO, Adaildo G.; D'ASSUNÇÃO, Adaildo G.. An iterative full-wave method for designing bandstop frequency selective surfaces on textile substrates. **Microwave And Optical Technology Letters**, [S.L.], v. 56, n. 2, p. 383-388, 23 dez. 2013. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/mop.28090>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/mop.28090>.

CHATTERJEE, Ayan; PARUI, Susanta K. A triple-layer dual-bandpass frequency selective surface of third order response with equivalent circuit analysis. **International Journal of RF And Microwave Computer-Aided Engineering**, [S.L.], v. 30, n. 2, p.

1-7, 15 nov. 2019. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/mmce.22047>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/mmce.22047>.

CHRISTINA, G.; RAJESWARI, A.; LAVANYA, M.; KEERTHANA, J.; ILAMATHI, K.; MANORANJITHA, V. Design and development of wearable antennas for tele-medicine applications. 2016 **International Conference On Communication And Signal Processing (ICCSP)**, [s.l.], p.2033-2037, abr. 2016. IEEE. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7754532>

COPE, Thomas D. The Rittenhouse diffraction grating. **Journal Of The Franklin Institute**, [S.L.], v. 214, n. 1, p. 99-104, jul. 1932. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0016-0032\(32\)90007-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0016-0032(32)90007-6). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016003232900076>.

EL GHARBI, Mariam; FERNÁNDEZ-GARCÍA, Raúl; AHYOUD, Saida; GIL, Ignacio. A Review of Flexible Wearable Antenna Sensors: design, fabrication methods, and applications. **Materials**, [S.L.], v. 13, n. 17, p. 3781, 27 ago. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma13173781>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/17/3781>.

FILGUEIRA, Jannayna Domingues Barros. **Cálculo de parâmetros otimizados para superfícies seletivas em frequência por meio do método de otimização Taguchi**. 114 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/22046>.

FOSTER, K. R.; SCHWAN, H. P. Dielectric properties of tissues and biological materials: a critical review. **Crit Rev Biomed Eng**, v. 17, n. 1, p. 25-104, 1988. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/2651001/>.

GHEBREBRHAN, Michael; ARANDA, Francisco; WALSH, Gary; ZIEGLER, David; GIARDINI, Stephen; CARLSON, Joel; KIMBALL, Brian; STEEVES, Diane; XIA, Zhiyu; YU, Shiran. Textile Frequency Selective Surface. **IEEE Microwave And Wireless Components Letters**, [S.L.], v. 27, n. 11, p. 989-991, nov. 2017. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/lmwc.2017.2750031>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8060977>.

HOPKINSON, F.; RITTENHOUSE, David. An Optical Problem, Proposed by Mr. Hopkinson, and Solved by Mr. Rittenhouse. **Transactions Of The American Philosophical Society**, [S.L.], v. 2, p. 201, 1786. JSTOR. <http://dx.doi.org/10.2307/1005186>. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/1005186>.

HUANG, Yi; BOYLE, Kevin. **Antennas: From Theory to Practice**. New Delhi: Wiley, 2008.

- KAPOOR, Ankush; MISHRA, Ranjan; KUMAR, Pradeep. Frequency selective surfaces as spatial filters: fundamentals, analysis and applications. **Alexandria Engineering Journal**, [S.L.], v. 61, n. 6, p. 4263-4293, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2021.09.046>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016821006487>.
- KIEN, Nguyen Trung; HONG, Ic-Pyo. Application of Metaheuristic Optimization Algorithm and 3D Printing Technique in 3D Bandpass Frequency Selective Structure. **Journal Of Electrical Engineering & Technology**, [S.L.], v. 15, n. 2, p. 795-801, 10 fev. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s42835-020-00370-4>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42835-020-00370-4>.
- LANGLEY, R.J.; PARKER, E.A.. Equivalent circuit model for arrays of square loops. **Electronics Letters**, [S.L.], v. 18, n. 7, p. 294-296, 1982. Institution of Engineering and Technology (IET). <http://dx.doi.org/10.1049/el:19820201>. Disponível em: [https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/el\\_19820201](https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/el_19820201).
- LIMA, José Filipe de. **Estudo das propriedades eletromagnéticas de materiais vítreos para desenvolvimento de superfície seletiva em frequência com substrato de vidro para aplicação em comunicações indoor**. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2021. Disponível em: <https://ppgee.ufersa.edu.br/dissertacoes/>.
- LOSS, Caroline; GONÇALVES, Ricardo; LOPES, Catarina; PINHO, Pedro; SALVADO, Rita. Smart Coat with a Fully-Embedded Textile Antenna for IoT Applications. **Sensors**, [S.L.], v. 16, n. 6, p. 938-951, 22 jun. 2016. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s16060938>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/6/938/htm>.
- MANDAL, Bappaditya; CHATTERJEE, Ayan; PARUI, Susanta Kumar. Acrylic substrate based low profile wearable button antenna with FSS layer for WLAN and Wi-Fi applications. **Microwave And Optical Technology Letters**, [S.L.], v. 57, n. 5, p. 1033-1038, 25 mar. 2015. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/mop.29012>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/mop.29012>.
- MARASCO, I.; NIRO, G.; MASTRONARDI, V. M.; RIZZI, F.; D'ORAZIO, A.; VITTORIO, M. de; GRANDE, M. A compact evolved antenna for 5G communications. **Scientific Reports**, [S.L.], v. 12, n. 1, p. 1-11, 20 jun. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-022-14447-9>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-14447-9>.
- MARCUVITZ, N. **Waveguide Handbook**. Toronto: McGraw-Hill, 1951.
- MEMON, Abdul Wahab; PAULA, Igor Lima de; MALENGIER, Benny; VASILE, Simona; VAN TORRE, Patrick; VAN LANGENHOVE, Lieva. Breathable Textile Rectangular Ring Microstrip Patch Antenna at 2.45 GHz for Wearable Applications.

*Sensors*, [S.L.], v. 21, n. 5, p. 1635, 26 fev. 2021. MDPI AG.

<http://dx.doi.org/10.3390/s21051635>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/5/1635>.

MITTRA, R.; CHAN, C.H.; CWIK, T. Techniques for analyzing frequency selective surfaces-a review. **Proceedings Of The IEEE**, [S.L.], v. 76, n. 12, p. 1593-1615, dez. 1988. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

<http://dx.doi.org/10.1109/5.16352>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/16352>.

MOBASHSHER, Ahmed T.; ABBOSH, Amin M.. Artificial Human *Phantoms*: human proxy in testing microwave apparatuses that have electromagnetic interaction with the human body. **IEEE Microwave Magazine**, [S.L.], v. 16, n. 6, p. 42-62, jul. 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

<http://dx.doi.org/10.1109/mmm.2015.2419772>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7118329>.

MOHYUDDIN, Wahab; KIM, Dong; CHOI, Hyun; KIM, Kang. Comparative Study of Square and Circular Loop Frequency Selective Surfaces for Millimeter-Wave Imaging Diagnostics Systems. **Sensors**, [S.L.], v. 18, n. 9, p. 3079, 13 set. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s18093079>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/9/3079>.

MUNK, Benedikt Aage. **Frequency Selective Surfaces: Theory and Design**. John Wiley and Sons, Inc., New York, 2000.

NADH, Badugu Prudhvi et al. Windmill-shaped antenna with artificial magnetic conductor-backed structure for wearable medical applications. **International Journal Of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields**, [S.L.], v. 33, n. 6, 6 maio 2020. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/jnm.2757>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jnm.2757>.

NARAYAN, Shiv; JHA, Rakesh Mohan. Electromagnetic Techniques and Design Strategies for FSS Structure Applications. **IEEE Antennas And Propagation Magazine**, [S.L.], v. 57, n. 5, p. 135-158, out. 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/map.2015.2474867>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7327346>.

NASEER, Noaman; GOKCEN, Dincer; SAKA, Birsan. Analysis and Design of Stopband FSS Unit Cell on Textile Substrates. **IEEE Letters On Electromagnetic Compatibility Practice And Applications**, [S.L.], v. 3, n. 1, p. 15-18, mar. 2021. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/lemcpa.2020.3031985>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9229183>.

PANAGOPOULOS, Dimitris J.; JOHANSSON, Olle; CARLO, George L.. Evaluation of Specific Absorption Rate as a Dosimetric Quantity for Electromagnetic Fields Bioeffects. **Plos One**, [S.L.], v. 8, n. 6, e62663, 4 jun. 2013. Public Library of Science (PLoS). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0062663>. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0062663>.

RAHMAN, Nurul Huda Abd; YAMADA, Yoshihide; NORDIN, Muhammad Shakir Amin. **Analysis on the Effects of the Human Body on the Performance of Electro-Textile Antennas for Wearable Monitoring and Tracking Application**. *Materials*, [s.l.], v. 12, n. 10, p.1636-1653, 19 maio 2019. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/ma12101636>.

SALONEN, Pekka; RAHMAT-SAMII, Yahya; SCHAFFRATH, Marijke; KIVIKOSKI, Markku. **Effect of textile materials on wearable antenna performance: a case study of GPS antennas**. *IEEE Antennas And Propagation Society Symposium*, 2004, [s.l.], p.459-462, 2004. IEEE. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1329673>.

SILICANN SYSTEMS GMBH. **Milestones in the History of Spectroscopy**. Disponível em: <https://www.en.silicann.com/blog/post/history-of-spectroscopy/>.

SILVA, Bruno Sátiro; CAMPOS, Antonio Luiz Pereira de Siqueira; GOMES NETO, Alfredo. Equivalent circuit model for analysis of frequency selective surfaces with ring and double concentric ring apertures. **IET Microwaves, Antennas & Propagation**, [S.L.], v. 14, n. 7, p. 600-607, 20 mar. 2020. Institution of Engineering and Technology (IET). <http://dx.doi.org/10.1049/iet-map.2019.0760>. Disponível em: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-map.2019.0760>.

SILVA FILHO, H. V. H.; SILVA, C. P. N.; OLIVEIRA, M. R. T. de; OLIVEIRA, E. M. F. de; MELO, M. T. de; SOUSA, T. R. de; GOMES NETO, A. Multiband FSS with Fractal Characteristic Based on Jerusalem Cross Geometry. **Journal Of Microwaves, Optoelectronics And Electromagnetic Applications**, [S.L.], v. 16, n. 4, p. 932-941, dez. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/2179-10742017v16i4984>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jmoea/a/59kqfKBzGBsyKFhc5VDtdVv/?lang=en>.

SINGHA, Kunal; KUMAR, Jayant; PANDIT, Pintu. Recent Advancements in Wearable & Smart Textiles: an overview. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 16, p. 1518-

1523, 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.334>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785319311903>.

SOUTO, Gabriel Amaral. **Estudo paramétrico sobre superfícies seletivas em frequência reconfiguráveis**. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2021. Disponível em: <https://ppgee.ufersa.edu.br/dissertacoes/>.

SUGUMARAN, Bashyam; BALASUBRAMANIAN, Ramachandran; PALANISWAMY, Sandeep Kumar. Reduced specific absorption rate compact flexible monopole antenna system for smart wearable wireless communications. **Engineering Science And Technology, An International Journal**, [S.L.], v. 24, n. 3, p. 682-693, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jestch.2020.12.012>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098620342737>.

SUGUMARAN, Bashyam; BALASUBRAMANIAN, Ramachandran; PALANISWAMY, Sandeep Kumar. Performance evaluation of compact FSS-integrated flexible monopole antenna for body area communication applications. **International Journal Of Communication Systems**, [S.L.], v. 35, n. 6, p. 1-18, 17 jan. 2022. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/dac.5085>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/dac.5085>.

VÁSQUEZ-PERALVO, Juan Andrés; TAMAYO-DOMÍNGUEZ, Adrián; PÉREZ-PALOMINO, Gerardo; FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, José Manuel; WONG, Thomas. 3D Inductive Frequency Selective Structures Using Additive Manufacturing and Low-Cost Metallization. **Sensors**, [S.L.], v. 22, n. 2, p. 552, 11 jan. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s22020552>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/2/552>.

WHITTOW, W.G.; LI, Y.; TORAH, R.; YANG, K.; BEEBY, S.; TUDOR, J. Printed frequency selective surfaces on textiles. **Electronics Letters**, [S.L.], v. 50, n. 13, p. 916-917, jun. 2014. Institution of Engineering and Technology (IET). <http://dx.doi.org/10.1049/el.2014.0955>. Disponível em: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/el.2014.0955>.

WU, Te-Kao. **Frequency selective surface and grid array**, Jonh Wiley & Sons, Nova York, EUA, 1995.