



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE  
COMUNICAÇÃO E AUTOMAÇÃO

JUAN RAFAEL FILGUIERA GUERRA

**PROJETO DE ANTENA DE MICROFITA FLEXÍVEL UTILIZANDO DE TECIDO  
MALHA A BASE DE FIBRAS NATURAIS E SINTÉTICAS**

MOSSORÓ

2016

JUAN RAFAEL FILGUEIRA GUERRA

**PROJETO DE ANTENA DE MICROFITA FLEXÍVEL UTILIZANDO DE TECIDO  
MALHA A BASE DE FIBRAS NATURAIS E SINTÉTICAS**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, como requisito para a obtenção do título Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Humberto Dionísio de Andrade.

Co-orientador: Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior.

MOSSORÓ

2016

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)

Setor de Informação e Referência (SIR)

G934p	Guerra, Juan Rafael Filgueira. Projeto de antena de microfita flexível utilizando de tecido malha a base de fibras naturais e sintéticas / Juan Rafael Filgueira Guerra. - 2016. 121 f. : il.  Orientador: Humberto Dionísio de Andrade. Coorientador: Idalmir de Souza Queiroz Júnior. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, 2016., 2016.  1. Antena de Microfita. 2. Materiais Têxteis. 3. Caracterização Elétrica. 4. Fibras Sintéticas e Orgânicas. I. Andrade, Humberto Dionísio de, orient. II. Queiroz Júnior, Idalmir de Souza, co-orient. III. Título.
-------	---

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo(USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

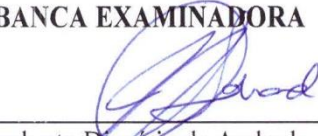
JUAN RAFAEL FILGUEIRA GUERRA

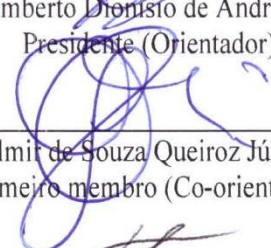
**PROJETO DE ANTENA MICROFITA FLEXÍVEL UTILIZANDO DE TECIDO  
MALHA A BASE DE FIBRAS NATURAIS E SINTÉTICAS**

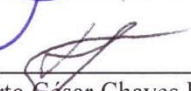
Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, como requisito para a obtenção do título Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

Defendida em: 20 / 05 / 2016.

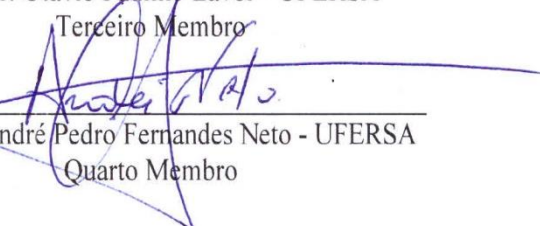
**BANCA EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Humberto Dionísio de Andrade - UFERSA  
Presidente (Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior - UFERSA  
Primeiro membro (Co-orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Humberto César Chaves Fernandes - UFRN  
Segundo membro

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Otávio Paulino Lavor - UFERSA  
Terceiro Membro

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. André Pedro Fernandes Neto - UFERSA  
Quarto Membro

*À toda minha família, base da minha vida e da minha felicidade*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pela oportunidade de está aqui encarnado, enfrentando todas as provações que me são impostas, pois a partir delas eu me torno cada vez mais resignado e atento. Que ele me dê forças para contribuir ao desenvolvimento da humanidade por meio da ciência.

Agradeço a minha família, minha mãe Carmem Ariane Filgueira de Medeiros Guerra, meu pai Geraldo de Brito Guerra Filho e meu irmão Pedro Samuel de Medeiros Guerra. Estas pessoas me permitiram ser feliz de forma completa e irrevogável.

Agradeço a Jessica Micaele dos Santos Silva, companheira, confidente e uma amiga que aprendi a amar durante os nossos anos de convivência.

Agradeço ao meu orientador Professor Doutor Humberto Dionísio de Andrade por ter me apoiado, auxiliado e ensinado durante toda a execução dessa pesquisa.

Agradeço ao meu coorientador Professor Doutor Idalmir de Souza Queiroz Júnior pelas orientações extremamente assertivas do trabalho desenvolvido.

Agradeço aos professores Marcos Silva de Aquino e Moises Vieira de Melo pelo fundamental suporte quanto ao desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço aos meus amigos: Barbara Karine de Albuquerque, Advanir Reis, Thalles Amony, Samanta Mesquita de Holanda, Arimateia Magno, Isaac Barros, Allyson Arilson, Daniel Carlos, Diego Pires, Alexandre Henrique. Pessoas essas que me deram forças nos momentos de cansaço e tristeza.

Às instituições UFERSA e UFRN pelas estruturas disponibilizadas para realização do trabalho, assim como a CAPES pelo auxílio financeiro.

“A mão queimada ensina melhor. Depois disso o  
conselho sobre o fogo chega ao coração”

Gandalf - J.R.R Tolkien

## RESUMO

As antenas de microfita flexíveis são dispositivos que garantem o desenvolvimento de sistemas de comunicações com maior adaptabilidade aos diversos tipos de aplicações em microondas. A possibilidade de uma antena ser projetada utilizando materiais têxteis facilita seu condicionamento em sistemas que necessitem estar em contato ou muito próximo ao corpo humano. O tecido de malha oferece maior adaptabilidade à aplicação devido a sua flexibilidade. Com o objetivo de construir a antena, é necessário verificar a compatibilidade entre os tecidos de malha disponíveis e as necessidades do projeto. Assim, é indispensável estudar o comportamento das características elétricas e físicas de cada estrutura. Analisando também, a influência das fibras sintéticas e orgânicas no desempenho. A partir da caracterização e escolha dos tecidos que compõem a antena, é projetada e construída uma antena de microfita com geometria retangular clássica utilizando o tecido com melhor desempenho. Os tecidos que contém fibras sintéticas apresentam características físicas que aumentam a adaptabilidade do tecido como substrato. As características elétricas dos tecidos apresentam comportamento semelhante quanto à variação da frequência. Na frequência de 2,45 GHz o tecido de malha composto por Poliéster e Elastano apresenta os melhores valores de permissividade relativa real e tangente de perdas, assim, é utilizado no projeto da antena construída. Os resultados demonstram que a frequência de ressonância é aproximadamente 2,68 GHz, representando uma variação próxima de 230 MHz, isso ocorre devido a aspectos ligados a fase de construção da antena teste.

**Palavras-chave:** Antena de Microfita, Materiais Têxteis, Caracterização Elétrica, Fibras Sintéticas e Orgânicas.



## ABSTRACT

The flexible microstrip antennas are devices that guarantee the development of communications systems with greater adaptability to the different types of microwaves applications. The possibility of an antenna be designed using textile materials facilitates their conditioning on systems that need is in contact or very close to the human body. The mesh fabric offers greater adaptability to the application due its flexibility. To build the antenna, is necessary check the compatibility between the knitted fabrics available and project needs. Therefore, is essential study the behavior of the electrical and physical features of each structure, analyzing also the influence of synthetic and organic fibers in performance. The characterization allows choice which fabrics is better to manufacture the antenna, is designed and built one microstrip antenna with classic rectangular geometry using the knitted fabric with better performance. The synthetic fibers have better physical characteristics that improve the adaptability of the tissue as a substrate. The electrical characteristics of the mesh fabrics they presented similar behavior as the frequency variation. In the frequency 2.45 GHz knitted fabric composed of polyester and spandex has the best actual values of relative permittivity and loss tangent thus constructed is used in the antenna design. The results show that the resonance frequency is approximately 2.68 GHz, a variation near 230 MHz, this is due to aspects of the test antenna construction.

**Keywords:** Microstrip Antenna, Textile Materials, Electrical Characterization, Synthetic and Organic Fibers.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Divisão das fibras utilizadas para fabricação de linhas quanto à origem. ....	47
Tabela 2 - Exemplos de fibras de origens natural e não natural.....	49
Tabela 3 - Composição da fibra de algodão seca. ....	49
Tabela 4 – Apresentação das composições e dos arranjos dos tecidos utilizados. ....	72
Tabela 5 – Ensaio desenvolvidos e suas respectivas normas.....	73
Tabela 6 – Titulação das amostras.....	84
Tabela 7 – Gramatura dos tecidos selecionados.....	85
Tabela 8 – Valores máximos obtidos no ensaio de resistência a tração.....	88
Tabela 9 – Resultados da análise das amostras quanto a estabilidade dimensional.....	90
Tabela 10 – Características elétricas dos tecidos selecionados e sua estrutura. ....	92
Tabela 11 - Valores das espessuras dos fios e tecidos analisados. ....	94
Tabela 12 – Características da antena com substrato composto por PES Coolmax.....	95
Tabela 13 -- Características da antena com substrato composto por PES e PLA.....	97
Tabela 14 – Características da antena com substrato composto por PES e PUE. ....	100
Tabela 15 – Características da antena com substrato composto por CO e PA.....	102
Tabela 16 – Características da antena com substrato composto por CO e PES. ....	104
Tabela 17 – Características da antena com substrato composto por CO e PUE. ....	107
Tabela 18 –Comparação entre os resultados máximos das antenas simuladas .....	109

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Partes construtivas de uma antena de microfita de com geometria retangular clássica.....	24
Figura 2 - Formatos mais convencionais dos ressoadores.....	25
Figura 3 - Linha de microfita utilizada como alimentação.....	26
Figura 4 – Alimentação por cabo coaxial aplicada a antena circular. ....	27
Figura 5 – Alimentação por acoplamento.....	28
Figura 6 – Alimentação por proximidade.....	29
Figura 7 – Representação da aplicação do método da linha de transmissão. ....	30
Figura 8 - (a) Demonstração do efeito franjamento sobre o substrato da antena, (b) representação do comprimento elétrico $\Delta L$ .da antena.....	30
Figura 9 - Formato da antena considerando as paredes do substrato como condutores magnéticos perfeitos e ressoador e plano de terra como condutores elétricos perfeitos. ....	32
Figura 10 – Antena de microfita acrescida do <i>inset feed</i> .....	36
Figura 11 – Diagramas de radiação de uma antena de microfita. (a) diagrama de radiação 2D e (b) diagrama de radiação 3D .....	39
Figura 12 – Circuito equivalente a chegada do sinal a uma carga com impedância $Z_c$ .....	39
Figura 13 – Diretividade de uma antena isotrópica.....	44
Figura 14 - (a) Composição química da molécula de celulose, (b) fibra orgânica do algodão e (c) modelo de flores de algodão. ....	46
Figura 15 - (a) Composição de uma molécula de éster, (b) composição do PET e (c) Imagem aproximada da fibra de poliéster. ....	51
Figura 16 - (a) Imagem do tecido formado por PUE e (b) composição do poliuretano segmentado. ....	51
Figura 17 – (a) Imagem da fibra composta por PA e (b) composição da molécula de amida..	52
Figura 18 – (a) milho comum, (b) composição do ácido láctico, (c) composição da dextrose e (d) fibra de PLA.....	53
Figura 19 – Resumo da cadeia de produção de tecidos.....	54
Figura 20 – Tecido plano genérico. ....	55
Figura 21 – Estrutura de um TNT. ....	56
Figura 22 – Estrutura do tecido de malha por urdume. ....	58
Figura 23 – Estrutura do tecido de malha por trama. ....	58

Figura 24 – (a) Tecido de malha por trama com fio de trama e (b) tecido de malha por urdume com fio de trama. ....	59
Figura 25 – Partes de uma laçada ou malha unitária. ....	60
Figura 26 (a) Averso técnico do tecido e (b) lado direito técnico do tecido. ....	61
Figura 27 – (a) Disposição regular da laçada e (b) disposição de retenção.....	61
Figura 28 – Diagramas avesso e direito do tecido de malha com estrutura Jersey. ....	62
Figura 29 – Diagrama do lado avesso de um tecido de malha com estrutura piquet. ....	63
Figura 30 – Meias medicinais de tecido de malha feitas em multicamadas.....	64
Figura 31 – Bobina de fio condutivo de aço inoxidável.....	68
Figura 32 – Camada condutora aplicada no tecido confeccionado. ....	68
Figura 33 – Antena têxtil aplicada no ombro do vestuário.....	69
Figura 34 – (a) Posição convexa no mesmo sentido do ombro, (b) posição côncava no mesmo sentido do ombro, (c) convexa paralela ao ombro e (d) côncava no sentido paralelo ao ombro. ....	70
Figura 35 – Fluxograma dos principais passos da metodologia.....	71
Figura 36 – Tecidos analisados (a) PES Drirelease. (b) PES Coolmax. (c) PES + PLA. ....	73
Figura 37 – Balança analítica Uni Bloc modelo AUW 320. ....	75
Figura 38 – Cortador circular MESDAN 1 dm <sup>2</sup> . ....	75
Figura 39 – TENSOLAB 3000 Mesdan. ....	77
Figura 40 – <i>wash tester</i> Mathis. ....	77
Figura 41 – Recipientes metálicos específicos para o ensaio.....	78
Figura 42 – Estufa de bancada utilizada para simular a secagem ambiente.....	78
Figura 43 – Medidor de impedância Agilent 85070E. ....	79
Figura 44 – Geometria (a) vista superior e (b) vista lateral e (c) vista do plano de terra. ....	80
Figura 45 – Resultados fundamentais da simulação de uma antena genérica quanto: (a) padrão de radiação dos campos elétrico e magnético, (b) padrão de radiação 3D da antena e (c) comportamento da densidade de corrente distribuída sobre o ressoador da antena de microfita. ....	81
Figura 46 – Distribuições físicas das partes construtivas da antena proposta. (a) vista lateral e (b) vista em perspectiva 3D.....	82
Figura 47 – Analisador de espectro Rohde & Schwarz FSH6. ....	82
Figura 48 – Gráfico referente à titulação das amostras. ....	84
Figura 49 – Gramatura dos tecidos.....	85
Figura 50 – Resistência à tração no sentido do curso dos tecidos selecionados. ....	87

Figura 51 – Resistência à tração no sentido da coluna dos tecidos selecionados.....	87
Figura 52 – Resultado do ensaio de estabilidade dimensional no sentido da coluna. ....	89
Figura 53 – Resultado do ensaio de estabilidade dimensional no sentido do curso.....	89
Figura 54 – Comportamento da permissividade real dos tecidos de malha em função da variação da frequência.....	91
Figura 55 – Variação da tangente de perdas dos tecidos de malha em função da variação da frequência. ....	91
Figura 56 – Paquímetro analógico comum.....	94
Figura 57 – Perda de retorno da antena simulada com PES Coolmax. ....	95
Figura 58 – (a) padrão de radiação, (b) diagrama de radiação 3D da antena com substrato composto pelo tecido de malha PES Coolmax e (c) densidade linear de corrente no ressoador da antena de microfita.....	96
Figura 59 – Perda de retorno da antena simulada com PES e PLA.....	98
Figura 60 – (a) padrão de radiação, (b) diagrama de radiação 3D da antena com substrato composto pelo tecido de malha PES e PLA e (c) densidade linear de corrente no ressoador da antena de microfita. ....	99
Figura 61 – Perda de retorno da antena simulada com PES e PUE. ....	100
Figura 62 - (a) padrão de radiação, (b) diagrama de radiação 3D da antena com substrato composto pelo tecido de malha PES e PUE e (c) densidade linear de corrente no ressoador da antena de microfita. ....	101
Figura 63 – Perda de retorno da antena simulada com CO e PA. ....	103
Figura 64 – (a) padrão de radiação, (b) diagrama de radiação 3D da antena com substrato composto pelo tecido de malha CO e PA e (c) densidade linear de corrente no ressoador da antena de microfita. ....	104
Figura 65 – Perda de retorno da antena simulada com CO e PES.....	105
Figura 66 – (a) padrão de radiação, (b) diagrama de radiação 3D da antena com substrato composto pelo tecido de malha CO e PES e (c) densidade linear de corrente no ressoador da antena de microfita. ....	106
Figura 67- Perda de retorno da antena simulada com CO e PUE.....	108
Figura 68 – (a) padrão de radiação, (b) diagrama de radiação 3D da antena com substrato composto pelo tecido de malha CO e PUE e (c) densidade linear de corrente no ressoador da antena de microfita. ....	109
Figura 69 – Perdas de retorno dos tecidos de malha estudados.....	111
Figura 70 - Folha metálica composta por cobre. ....	113

Figura 71 – Antena flexível construída. ....	113
Figura 72 – Imagens do conector SMA fêmea de 4 pinos. ....	114
Figura 73 – Comparação entre a perda de retorno simulada e medida.....	115
Figura 74 – Carta de Smith com variação de frequência de 1 a 6 GHz com passo de 16,67 MHz. ....	116

## NOMENCLATURA

### *Letras Latinas*

$t$  – Espessura do condutor irradiante

$L$  – Comprimento do ressoador

$h$  – Espessura do substrato

$W$  – Largura do ressoador

$f_r$  – Frequência de ressonância

$c$  – Velocidade da luz no espaço livre

$W_l$  – Largura da linha de microfita

$y_0$  – Comprimento do *inset feed*

$y_l$  – Largura do *inset feed*

$I_d$  – Corrente de deslocamento

$I_c$  – Corrente de condução

$A_x$  – Vetor potencial

$U$  – Intensidade de radiação da antena

$D$  – Defectividade da antena

$m, n$  e  $p$  – Número de índices que definem os modos de frequência de ressonância

$G$  – Condutância da antena

$R_{entrada}$  – Resistência de equivalente da antena

$Z_0$  – Impedância de entrada equivalente da antena

$\vec{E}$  – Campo elétrico

$\vec{H}$  – Intensidade de campo magnético

$V$  – Tensão de alimentação

$Z_c$  – Impedância da carga

$I$  – Corrente de alimentação

$\vec{D}$  – Deslocamento de fluxo elétrico

$J_0$  – Função de Bessel do tipo um e primeira ordem

$\vec{J}$  – Densidade de corrente

$L_c$  – Indutância do condutor

$C_c$  – Capacitância do condutor

$L_l$  – Comprimento da linha de microfita

### ***Letras Gregas***

$\epsilon_r$  – Permissividade elétrica relativa

$\epsilon_0$  – Permissividade elétrica do vácuo

$\epsilon_{\text{eff}}$  – Permissividade elétrica efetiva

$\delta$  – Tangente de perdas efetiva

$\Gamma$  – Coeficiente de reflexão

$\sigma$  – Condutividade do material

$\omega$  – Frequência angular

$\eta$  – Eficiência

$\eta$  – Eficiência total

$\eta_{\text{re}}$  – Eficiência de reflexão

$\eta_c$  – Eficiência de condução

$\eta_d$  – Eficiência dielétrica

$\Delta L$  – Variação do comprimento devido ao franjamento

$\beta$  – Número de onda

### ***Siglas***

CO – Algodão

PES – Poliéster

PUE – Elastano

PA – Poliamida

PLA – Ácido polilático

HFSS – High Frequency Structural Simulator (Simulador de Estruturas de Alta Frequência)

PPGSCA – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação

UFERSA – Universidade Federal Rural do Semi-Árido

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

SA – *Spectrum Analyser* (Analisador de Espectro)

Tex – Sistema de medição direta desenvolvido pelo *The Textile Institute*



Ne – Sistema de medição indireta Inglês com unidade de comprimento em jardas

## SUMÁRIO\_Toc451952338

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
1.1	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	22
1.2	OBJETIVOS .....	23
1.2.1	Gerais.....	23
1.2.2	Específicos .....	23
<b>2</b>	<b>ANTENAS DE MICROFITA .....</b>	<b>24</b>
2.1	INTRODUÇÃO .....	24
2.2	MÉTODOS DE ALIMENTAÇÃO .....	26
2.2.1	Método da Linha de Microfita .....	26
2.2.2	Método do Cabo Coaxial.....	27
2.2.3	Método do Acoplamento .....	27
2.2.4	Método da Proximidade.....	28
2.3	MÉTODOS DE ANÁLISE .....	29
2.3.1	Método da Linha de Transmissão aplicado à antena retangular.....	30
2.3.2	Método da Cavidade aplicado a antena retangular .....	32
2.3.3	Casamento de impedância para alimentação por linha de microfita .....	35
2.3.4	<i>Inset feed</i> .....	36
2.3.5	Permissividade elétrica e frequência de ressonância .....	37
2.4	CARACTERÍSTICAS DAS ANTENAS .....	37
2.4.1	Diagrama de radiação .....	38
2.4.2	Perda de retorno .....	39
2.4.3	Densidade de corrente.....	41
2.4.4	Diretividade.....	42
2.4.5	Eficiência .....	44
2.4.6	Ganho.....	45
<b>3</b>	<b>FIBRAS TÊXTEIS .....</b>	<b>46</b>
3.1	FIBRAS NATURAIS .....	48
3.2	FIBRAS NÃO NATURAIS .....	48
3.3	FIBRAS TÊXTEIS UTILIZADAS NA PESQUISA .....	49
3.3.1	Algodão (CO) .....	49
3.3.2	Poliéster (PES) .....	50
3.3.3	Elastano (PUE).....	51
3.3.4	Poliamida (PA).....	52
3.3.5	Ácido polilático (PLA).....	52
<b>4</b>	<b>TECIDOS TÊXTEIS E ANTENAS FLEXÍVEIS .....</b>	<b>54</b>
4.1	FIAÇÃO, TECELAGEM, TECIDOS NÃO TECIDO, BENEFICIAMENTO E CONFECÇÃO .....	54
4.1.1	Fiação.....	54
4.1.2	Tecelagem .....	55
4.1.3	TNT .....	56

4.1.4	Beneficiamento e confecção .....	56
4.2	MALHARIA .....	57
4.2.1	Malha por urdume .....	57
4.2.2	Malha por trama.....	58
4.2.3	Mistas.....	59
4.2.4	Estruturas básicas dos tecidos de malha .....	60
4.2.5	Estrutura Multifuncional ou multicamadas .....	63
4.3	PARÂMETROS DOS TECIDOS DE MALHA.....	64
4.3.1	Comprimento da laçada.....	64
4.3.2	Título.....	65
4.3.3	Gramatura.....	66
4.3.4	Estabilidade dimensional .....	66
4.3.5	Resistência ao rasgo.....	66
4.4	ANTENAS FLEXÍVEIS .....	67
4.4.1	Superfície condutora .....	68
4.4.2	Influência da deformação física e dos agentes químicos nas antenas de microfita flexíveis .....	69
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	71
5.1	DESCRIÇÃO OS ENSAIOS FÍSICOS E QUÍMICOS .....	74
5.1.1	Titulação .....	74
5.1.2	Gramatura.....	75
5.1.3	Ensaio de resistência à tração.....	76
5.1.4	Estabilidade dimensional .....	77
5.1.5	Caracterização elétrica.....	79
5.2	MODELAGEM, PROJETO E SIMULAÇÃO DAS ANTENAS.....	79
6	ANÁLISES DOS RESULTADOS FÍSICOS, ELÉTRICOS E SIMULADOS. ....	83
6.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	83
6.1.1	Titulação .....	83
6.1.2	Gramatura.....	85
6.1.3	Resistência à tração .....	86
6.1.4	Estabilidade dimensional .....	88
6.1.5	Caracterização elétrica.....	90
6.2	RESULTADOS COMPUTACIONAIS .....	93
6.2.1	PES Coolmax .....	94
6.2.2	PES e PLA .....	97
6.2.3	PES e PUE .....	99
6.2.4	CO e PA .....	102
6.2.5	CO e PES .....	104
6.2.6	CO e PUE .....	107
6.3	COMPARAÇÃO ENTRE AS PERDAS DE RETORNO DAS ANTENAS SIMULADAS. ....	110
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	112

7.1	PROJETO DO DISPOSITIVO PROPOSTO .....	112
7.1.1	Escolha dos componentes da antena .....	112
7.1.2	Construção da antena proposta .....	113
7.2	RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA ANTENA CONSTRUÍDA .....	114
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>117</b>
8.1	CONSIDERAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	118
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>119</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A antena de microfita flexível pode garantir aos sistemas embarcados que necessitem de comunicação uma maior adaptabilidade aos diversos tipos de aplicações. As estruturas têxteis encontradas no mercado podem ser utilizadas na construção da antena, pois essas são facilmente manipuláveis quanto a sua disposição e as porções que compõem o material final, assim, o projeto pode ser adaptado facilmente à aplicação (HAAGENSON, 2015).

Para que esse tipo de tecnologia seja aplicado se faz necessário um estudo aprofundado de todos os aspectos ligados ao projeto da antena frente ao uso de estruturas têxteis: composição e caracterização do substrato e materiais condutores, modelagem matemática para definição da geometria da antena, simulação, construção da antena e testes (LES NIKOWSKI, 2012).

O uso de tecido malha garante uma facilidade quanto à produção do tecido, pois o processo de fabricação é mais simples quando comparado às outras estruturas. De posse das linhas de várias composições é possível obter tecidos de variadas gramaturas, titulações, dimensões, formas e variados entrelaçamentos. As linhas que formam as camadas condutoras são impregnadas com material condutor, elas podem formar tecidos malha e serem fixadas por meio de bordado (ARAÚJO, 1987).

As fibras sintéticas são utilizadas para garantir características específicas ao tecido, tais como durabilidade, flexibilidade, elasticidade e estabilidade. Isso aumenta a aplicabilidade da antena flexível (KUASNE, 2008). Os métodos aproximados da cavidade e linha de transmissão são suficientes para garantir as dimensões da antena (BALANIS, 2005). Havendo o ajuste fino com o uso do software HFSS que utiliza o método matemático dos elementos finitos para analisar a geometria desenhada pelo projetista.

## 1.1 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho é dividido em 10 capítulos. Tais são descritos a seguir:

O capítulo 1 apresenta a introdução, organização e os principais objetivos do trabalho.

O capítulo 2 apresenta os principais conceitos relacionados às antenas de microfitas, tais definições são necessárias para a caracterização dos tecidos de malha utilizados e para o projeto e modelagem do dispositivo proposto.

No capítulo 3 é realizado um estudo teórico sobre fibras têxteis. Aplicando os conceitos aos tipos de fibras utilizados neste trabalho: Poliéster (PES), Elastano (PUE), Algodão (CO), Ácido Polilático (PLA) e Poliamida (PA).

O capítulo 4 apresenta definições acerca dos tecidos têxteis e antenas flexíveis. Portanto, é neste capítulo que o processo de malharia assim como as estruturas de malha são estudadas. Por conseguinte, resume o estudo sobre as antenas flexíveis propriamente ditas, explicando características especiais e situações já desenvolvidas na literatura desse tipo de dispositivo.

No capítulo 5 são abordados os passos desenvolvidos no trabalho para se alcançar os objetivos propostos. Todos os ensaios são descritos, assim como a metodologia da construção da antena proposta.

O capítulo 6 aborda a análise realizada dos resultados das caracterizações físicas e elétricas as quais os tecidos de malha foram submetidos e então é definido qual o melhor tecido a ser utilizado para formar o substrato da antena proposta.

O capítulo 7 trata sobre os resultados e discussões acerca de todos os aspectos desenvolvidos durante todo o trabalho. Assim como as etapas relacionadas somente a antena proposta: tipos de materiais utilizados, imagens referentes ao dispositivo construído, observações sobre a construção da antena e resultados das medições realizadas em laboratório.

O capítulo 8 trata sobre as conclusões acerca de todo o trabalho bem como sugestões para futuras pesquisas que envolvam o uso de materiais têxteis como substrato de dispositivos de micro-ondas, envolvendo as etapas de caracterização e construção do dispositivo.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Gerais

- i. Desenvolver uma antena de microfita flexível com substrato composto por tecido de malha composto por fibras naturais e sintéticas.

### 1.2.2 Específicos

- i. Estudar os conceitos teóricos das antenas de microfita;
- ii. Pesquisar os conceitos teóricos das fibras e tecidos têxteis;
- iii. Aprender as várias formas de classificação das estruturas têxteis;
- iv. Estudar o comportamento das características elétricas de tecido de malha quanto a sua variação de composição e arranjo;
- v. Analisar a influência das porções que compõe a estrutura têxtil quanto à permissividade e tangente de perdas;
- vi. Modelar e simular uma antena microfita composta por materiais têxteis;
- vii. Construir a antena a partir da geometria simulada que atenda ao projeto;
- viii. Obter os parâmetros reais da antena em laboratório;
- ix. Comparar os valores medidos com os simulados e obter conclusões sobre o uso de estruturas têxteis para compor uma antena microfita.

## 2 ANTENAS DE MICROFITA

Este capítulo disserta sobre os conceitos teóricos fundamentais que subsidiam o desenvolvimento do trabalho. Contendo os aspectos mais relevantes quanto à antena de microfita, estruturas têxteis e antenas têxteis.

### 2.1 INTRODUÇÃO

A busca por novos dispositivos de telecomunicações que atendam a miniaturização dos sistemas embarcados provocou a necessidade da redução das dimensões das antenas que são utilizadas nesses sistemas (POZAR, 2012). A antena de microfita ou *microstrip antenna* foi uma estrutura apresentada por Deschamps (1953) e se tornou um tipo de antena extremamente difundida e estudada nos anos seguintes. A geometria dessa estrutura, apresentada na Figura 1 - Partes construtivas de uma antena de microfita de com geometria retangular clássica. permite que mesmo com tamanho reduzido ela consiga obter uma largura de banda suficiente para transmitir quantidade de dados no modo banda larga (BALANIS, 2005).

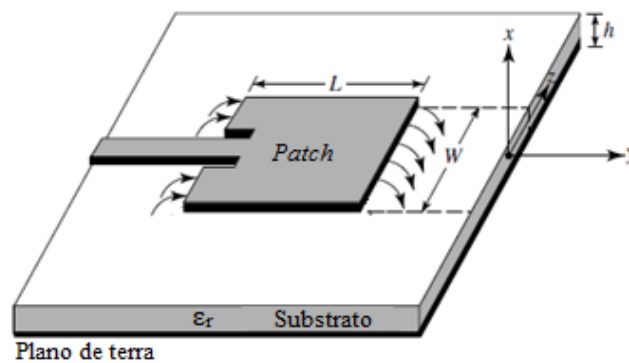


Figura 1 - Partes construtivas de uma antena de microfita de com geometria retangular clássica.

Fonte: BALANIS, 2005

Há três componentes básicos: o *patch* ou ressonador, que é responsável pela transmissão e recepção da onda eletromagnética tendo uma espessura muito menor que o comprimento da onda irradiada no espaço livre, condição que implica o nome microfita; o plano de terra, que é responsável pela blindagem de radiação do lóbulo secundário da antena; o substrato, que isola eletricamente as duas partes condutoras e garante alta permissividade a



passagem do campo elétrico  $\epsilon_r$  maior que a do vácuo  $\epsilon_0 = 8,85418782 \times 10^{-12} \frac{F}{m}$  o que resulta em uma permissividade relativa  $\epsilon_r$  que geralmente se encontra no intervalo  $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$ .

A construção dessa antena tem como principal característica a propagação da onda eletromagnética na direção  $x$  normal ao plano do ressonador, portanto o plano de terra geralmente tem as mesmas dimensões superficiais do substrato. A largura  $W$  e comprimento  $L$  são definidos a partir de modelagem matemática em função da frequência de operação, permissividade e altura do substrato (DESCHAMPS, 1953).

Existem diversas geometrias que podem ser adotadas para o ressonador, as mais comuns devido à simplicidade são apresentadas na Figura 2.

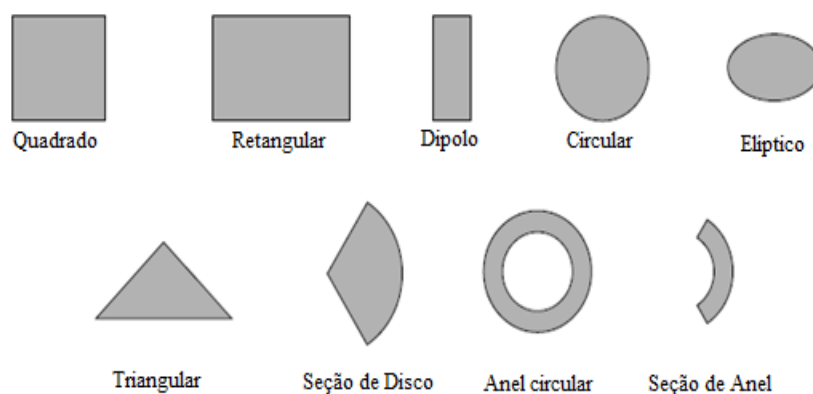


Figura 2 - Formatos mais convencionais dos ressoadores.

Fonte: BALANIS, 2005

A escolha da geometria é determinada pelas necessidades da aplicação da antena assim como pela facilidade ou não de modelar o comportamento dos campos elétrico e magnético que são transmitidos pela antena ao espaço livre, pois quanto mais complexa a geometria, mais difícil se torna a compreensão do comportamento dos campos eletromagnéticos produzidos (MILLIGAN, 2005).

Fisicamente, a antena necessita de uma região onde ocorra a conexão entre a fonte e as partes condutivas: ressonador e plano de terra. Esse trecho representa a alimentação e pode ser construída de diversas formas. Definido assim, os métodos de alimentação (BALANIS, 2005).

## 2.2 MÉTODOS DE ALIMENTAÇÃO

A alimentação da antena de microfita é escolhida de acordo com a necessidade do projeto, permitindo a transmissão do sinal provindo da fonte e promovendo assim a transmissão na frequência projetada. Existem quatro métodos clássicos de realizar essa alimentação: linha de microfita, cabo coaxial, acoplamento por abertura e acoplamento por proximidade (JAMES, 1989).

### 2.2.1 Método da Linha de Microfita

A linha de microfita é um tipo de alimentação muito utilizada devido apresentar simplicidade nas etapas de dimensionamento, montagem e no momento da fixação do conector de alimentação por meio de solda.

A Figura 3 apresenta uma linha de microfita. Esse método é baseado no uso dessa geometria como guia de onda para transmitir o sinal que será aplicado ao ressoador, de maneira que a largura da linha  $W_0$  tem comprimento bem menor do que  $W$  da antena, e seu comprimento deve ser menor que o comprimento de onda a ser ressoada, pois evita o desprendimento da onda na linha, o que elimina ondas ressoadas por ela (DESCHAMPS, 1953). Mesmo com o comprimento da linha menor, dependendo da largura de banda da antena, haverá frequências onde a linha de microfita ressoará, produzindo radiações indesejadas ou espúrias. Portanto, a aplicação desse tipo de alimentação é indicada para situações onde a largura de banda está entre 2% a 5% (BALANIS, 2005).

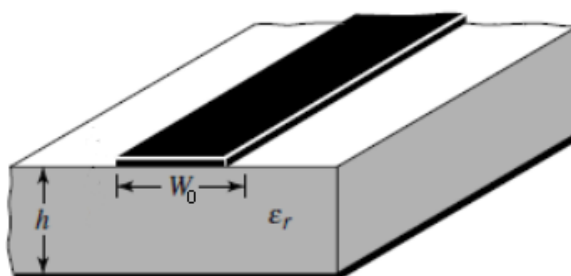


Figura 3 - Linha de microfita utilizada como alimentação.

Fonte: Adaptado de BALANIS, 2005

### 2.2.2 Método do Cabo Coaxial

O método do cabo coaxial apresenta uma conexão direta entre o conector e a superfície do ressoador da antena, necessitando o cálculo do ponto exato onde ocorrerá a conexão.

A Figura 4 apresenta a alimentação por cabo coaxial aplicada a uma geometria circular, basicamente é realizado um furo transversal à superfície da antena de tal maneira que o cabo é conectado e o seu terminal positivo (ponta interna do cabo) é conectado ao ressoador enquanto a carcaça do cabo que representa o terminal comum é ligado ao plano de terra (POZAR, 2012). A produção de radiação espúria é menor, mas ocorre devido ao comprimento do conector interno, apesar de permitir uma maior largura de banda (MILLIGAN, 2005).

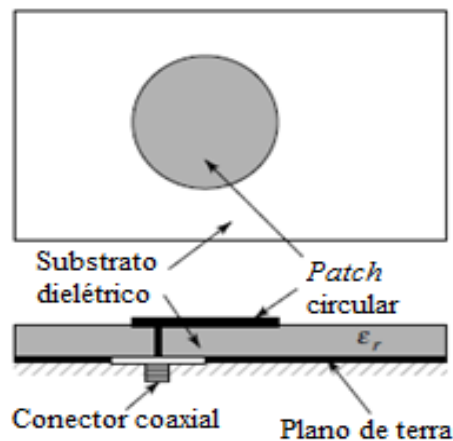


Figura 4 – Alimentação por cabo coaxial aplicada a antena circular.

Fonte: BALANIS, 2005

### 2.2.3 Método do Acoplamento

O método de alimentação por acoplamento consiste no uso de sobreposição de estruturas condutoras e dielétricas isoladas eletricamente e por meio de tensão induzida o ressoador é alimentado, ocorrendo então a irradiação de ondas eletromagnéticas da antena.

A Figura 5 apresenta o método de alimentação por acoplamento, uma linha de microfita é fixada na parte inferior da camada de substrato superior (Sub1), o plano de terra é adicionado entre os dois substratos, na superfície do plano de terra há uma região truncada que permite a passagem do sinal da linha de microfita até o ressoador que está fixada na parte

superior da camada do substrato inferior (Sub2), portanto a linha de microfita envia o sinal para ser transmitido. Esse tipo de alimentação permite maior largura de banda devido a desconexão física entre a alimentação e o ressoador, permitindo que o sinal ressoe primeiramente na linha de microfita e então o ressoador da antena receba e retransmita. Mas ainda não garante a eliminação das radiações espúrias (POZAR, 2005).

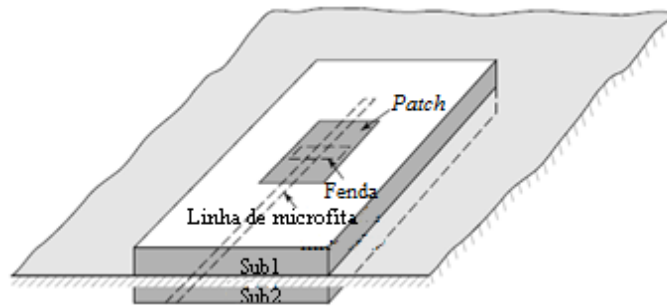


Figura 5 – Alimentação por acoplamento.

Fonte: Adaptado BALANIS, 2005

#### 2.2.4 Método da Proximidade

O método da proximidade é semelhante ao método de alimentação por acoplamento quanto à falta de conexão direta entre a alimentação e o ressoador, ocorrendo à transmissão do condutor para o ressoador por meio de tensão induzida. A diferença ocorre na mudança das disposições das partes construtivas.

A Figura 6 apresenta a alimentação por proximidade, não há a presença de uma fenda no plano de terra localizado entre os dois substratos. Portanto, as dimensões dos substratos são desiguais e permitem que a densidade de linhas conduzidas da linha de microfita para o plano de terra seja maior de tal forma que o ressoador seja alimentado e possa retransmitir o sinal (BALANIS, 2005).

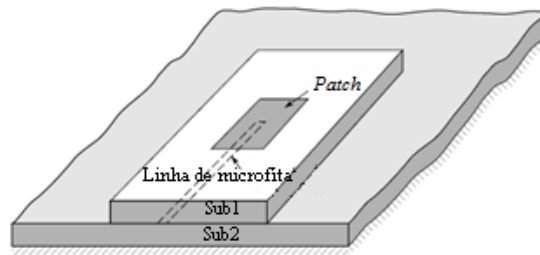


Figura 6 – Alimentação por proximidade

Fonte: Adaptado BALANIS, 2005

Para cada tipo de geometria há uma mudança nas condições de contorno, o que produz um conjunto de equações específicas para definir as dimensões da antena. Portanto, é necessária uma análise satisfatória para que o projeto da antena alcance as condições reais de operação e para isso existem diversos métodos de análise (JAMES, 1989).

### 2.3 MÉTODOS DE ANÁLISE

Há diversos métodos para obter modelos matemáticos utilizados no projeto da antena de microfita, a definição de qual modelo é suficiente para a análise parte da complexidade da geometria necessária para a aplicação. Portanto, geometrias mais complexas exigem uma modelagem matemática mais complicada por reduzir o número de aproximações. Geometrias mais simples como a retangular apresentam modelos obtidos com maior facilidade, mas que garantem um dimensionamento satisfatório da antena.

Os métodos mais utilizados são divididos em três grupos: métodos matemáticos de onda completa, modelagem por métodos numéricos e métodos aproximados quase estáticos.

Em resumo, os métodos de onda completa garantem uma análise profunda das características de propagação da geometria estudada, porém exige um tratamento matemático complexo; os métodos matemáticos também garantem uma análise completa das características da antena, mas exige um grande esforço computacional devido às operações envolverem matrizes com grandes quantidades de valores; os métodos aproximados ou quase estáticos consideram aproximações físicas da estrutura com geometrias clássicas, isso proporciona o uso de equações simples e diretas, porém os resultados reais apresentam diferenças devido às aproximações (BALANIS, 2005).

### 2.3.1 Método da Linha de Transmissão aplicado à antena retangular

O Método da Linha de Transmissão foi utilizado para o desenvolvimento deste trabalho. Ele consiste na consideração do ressoador retangular como uma linha de transmissão finita (Figura 7). Esse método utiliza as equações clássicas aplicadas à linha de microfita para transmissão objetivando dimensionar a antena de microfita. Assim, como a largura  $W_0$  da linha é menor do que a largura  $W$  da antena e o comprimento  $L_l$  da linha é bem maior do que o comprimento  $L$  da antena, o uso desse método gera erros devido as aproximações (POZAR, 2012).

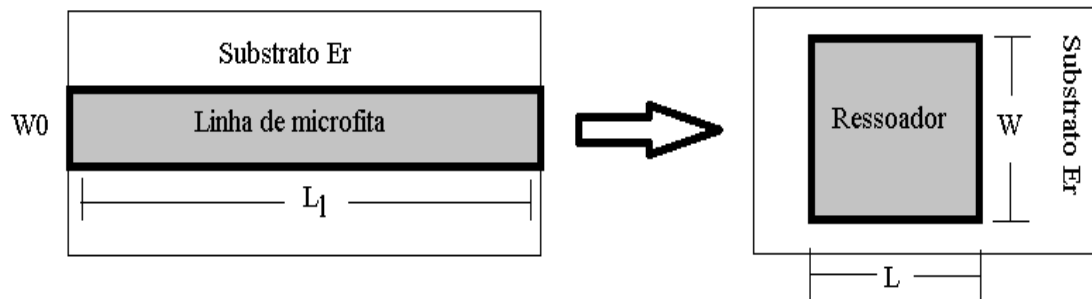


Figura 7 – Representação da aplicação do método da linha de transmissão.

Fonte: Autoria própria.

Considerando as linhas de campo elétrico que devido à permissividade do dielétrico são curvadas em sentido ao substrato. Portanto, é formada uma região além da borda do ressoador com alta densidade de linhas de campo resultando assim em uma curvatura das linhas de campo elétricos que são irradiados pelo ressoador (Figura 8.a).

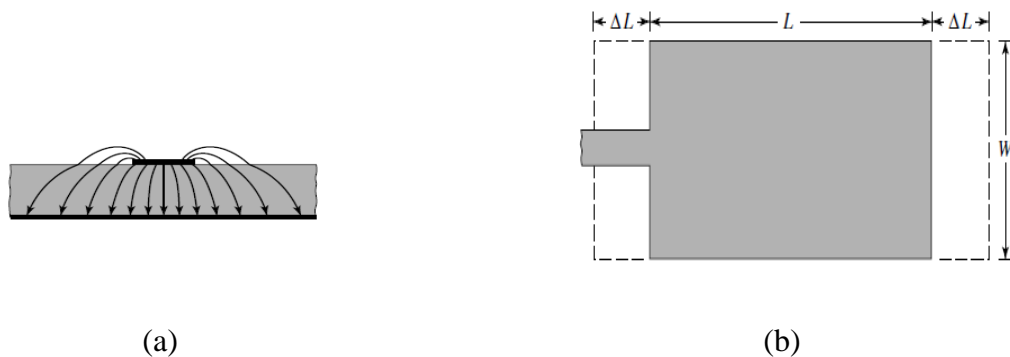


Figura 8 - (a) Demonstração do efeito franjamento sobre o substrato da antena, (b) representação do comprimento elétrico  $\Delta L$  da antena.

Fonte: BALANIS, 2005

A largura da antena  $W$  é definida em função da velocidade da onda no espaço livre, a frequência de ressonância e a permissividade relativa do material. A Equação 1 apresenta essa dimensão.

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

Essa curvatura das linhas de campo causa uma distorção na propagação das ondas eletromagnéticas e uma redução na permissividade efetiva percebida pela antena, definida como permissividade eficaz  $\epsilon_{\text{eff}}$  (Equação 2). Existe a relação direta da permissividade eficaz em função da altura do substrato  $h$ , permissividade relativa  $\epsilon_r$  e da largura do ressoador  $W$  (JAMES, 1989).

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{(\epsilon_r + 1)}{2} + \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} \times \left[ 1 + 12 \times \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (2)$$

Essa alta densidade de linhas produz um aumento no comprimento elétrico do ressoador, representado por  $\Delta L$  (Figura 8.b), apresentado na Equação 3. Esse aumento ocorre devido a alta quantidade de linhas que refletem a presença de correntes de deslocamento que representam uma carga que produz radiação de campos eletromagnéticos. Por fim, essa variação deve ser considerada no projeto devido a alterações que esse efeito pode causar (BALANIS, 2005).

$$\Delta L = 0,412 \times h \times \frac{(\epsilon_{\text{eff}} + 0,3) \times \left( \frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{\text{eff}} - 0,258) \times \left( \frac{W}{h} + 0,8 \right)} \quad (3)$$

A Equação 4 representa o cálculo do comprimento  $L$ , o franjamento causa consequência direta na equação, sendo considerado o  $\Delta L$  no equacionamento.

$$L = \frac{c}{2f_r \times \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} - 2\Delta L \quad (4)$$

Onde  $f_r$  representa a frequência de ressonância da antena e  $c$  a velocidade da onda eletromagnética no espaço livre (POZAR, 2012).

### 2.3.2 Método da Cavidade aplicado a antena retangular

O Método da Cavidade foi utilizado para a modelagem e projeto do dispositivo desenvolvido neste trabalho. Esse método assume que o substrato está contido entre duas placas condutoras formadas pelos condutores considerados perfeitos do ressoador e plano de terra, como demonstrado na Figura 9. Também é considerado que as paredes do substrato são condutores magnéticos perfeitos. Portanto, a distribuição dos campos elétrico e magnético ocorre mediante as considerações, assim, as componentes tangenciais nas paredes do substrato são nulas, assim como os campos elétricos tangenciais são nulos (MILLIGAN, 2005).

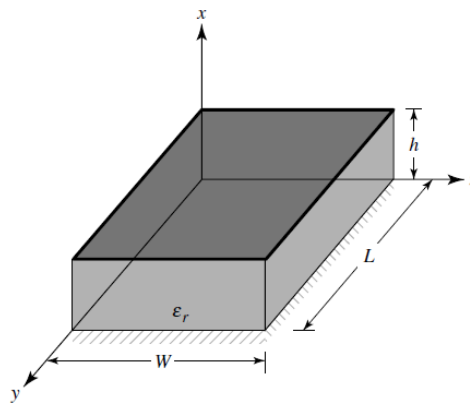


Figura 9 - Formato da antena considerando as paredes do substrato como condutores magnéticos perfeitos e ressoador e plano de terra como condutores elétricos perfeitos.

Fonte: BALANIS, 2005

Considerando a Equação 5, que relaciona a equação do campo eletromagnético utilizando o vetor potencial  $A_x$ .

$$\nabla^2 A_x + K^2 A_x = 0 \quad (5)$$

Onde K representa o número de ondas e o operador Nabla ao quadrado que equivale ao Laplaciano. Esse vetor potencial pode ser escrito de acordo com a Equação 6.

$$A_{x(x,y,z)} = [A_1 \cos(K_x x) + B_1 \text{sen}(K_x x)] + [A_2 \cos(K_y y) + B_2 \text{sen}(K_y y)] \quad (6)$$

$$+ [A_3 \cos(K_z z) + B_3 \text{sen}(K_z z)]$$

Onde de acordo com o método dos coeficientes a determinar, os termos  $A_n$  e  $B_n$  representam escalares que compõe a equação solução da equação parcial. Os números de



ondas  $K_x, K_y$  e  $K_z$  tem componentes nas direções  $x, y$  e  $z$  e definem as porções dos campos propagados na região. Considerando as condições quanto aos campos tangenciais, são definidas as condições de contorno para a definição do conjunto de equações soluções apresentadas na Equação 7.

$$\begin{aligned}
 E_x &= -\frac{j}{\omega\mu\epsilon} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + K^2 \right) A_x & H_x &= 0 \\
 E_y &= -\frac{j}{\omega\mu\epsilon} \frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial y} & H_y &= \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial z} \\
 E_z &= -\frac{j}{\omega\mu\epsilon} \frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial z} & H_z &= -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial y}
 \end{aligned} \tag{7}$$

Os limites da variação da posição ( $x, y$  e  $z$ ) na qual os campos elétrico e magnético são calculados são definidos pelas dimensões do substrato. O conjunto de equações que calculam os números de onda nas três dimensões é apresentado na Equação 8, essas equações definem a frequência de ressonância em função das dimensões da antena (Equação 9). A correlação entre os índices  $m, n$  e  $p$  estão ligados aos modos de operação da cavidade (BALANIS, 2005).

$$\begin{aligned}
 K_x &= \frac{m\pi}{h}, & m &= 0, 1, 2, \dots \\
 K_y &= \frac{n\pi}{L}, & n &= 0, 1, 2, \dots \\
 K_z &= \frac{p\pi}{W}, & p &= 0, 1, 2, \dots
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$(f_r)_{mnp} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W}\right)^2} \tag{9}$$

As equações de propagação dos campos apresentadas no conjunto de Equações 7 aplicadas ao vetor de Poynting definem a potência irradiada pela antena, possibilitando o cálculo da impedância de entrada, demonstrada na Equação 10. Portanto, o valor dessa impedância contém um erro associado devido à aproximação realizada pelo método. Todavia, o valor é utilizado para reajuste mediante o método de casamento de impedância (JAMES, 1989).

$$R_{\text{entrada}} = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \quad (10)$$

Onde,  $G_1$  e  $G_{12}$  são as condutâncias devido à antena fisicamente e em função da relação dos campos eletromagnéticos irradiados pelo ressoador respectivamente. As Equações 11 e 12 permitem o cálculo das duas condutâncias.

$$G_1 = \int_0^\pi \frac{\left[ \frac{\text{sen}\left(\frac{K_0 W}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2}{120\pi^2} \text{sen}^3 \theta \, d\theta \quad (11)$$

Onde  $K_0$  é o número de onda no espaço livre, e  $W$  a largura da antena.

$$G_{12} = \int_0^\pi \frac{\left[ \frac{\text{sen}\left(\frac{K_0 W}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 J_0(K_0 l \text{sen}\theta) \text{sen}^3 \theta \, d\theta}{120\pi^2} \quad (12)$$

Sendo  $J_0$  a função de Bessel de primeira espécie de argumento  $x$ . As soluções das Equações 11 e 12 são obtidas computacionalmente com o uso do método numérico de integração por retângulos. Os valores obtidos permitem o cálculo de  $R_{\text{entrada}}$ , que conseqüentemente permite a escolha da alimentação da antena de forma correta, pois é necessário que a impedância característica da antena seja igual a da alimentação. Como normalmente o valor de  $R_{\text{entrada}}$  não resulta em um valor padrão como  $50 \, \Omega$ , é necessário que a alimentação da antena ajuste esse valor, para que ao final ocorra um casamento de impedâncias entre a antena e o conector que permite a conexão com o sistema de comunicação (JAMES, 1989).

A escolha do método de casamento está associada ao tipo de alimentação escolhida. Assim, é importante definir os principais meios utilizados para obter um casamento de impedância satisfatório.

### 2.3.3 Casamento de impedância para alimentação por linha de microfita

O casamento de impedância é um importante aspecto quanto ao bom funcionamento da antena. Ele representa o quão próximo o valor da impedância de entrada da antena está do valor da linha de transmissão.

Para que a potência da antena seja transmitida da fonte à antena sem perdas devido à transmissão é necessário que as impedâncias da transmissão e da entrada da antena sejam as mesmas, resultando em um coeficiente de reflexão baixo ou nulo. Para alcançar essa condição as dimensões da largura ( $W_0$ ) e do comprimento ( $L_l$ ) da microfita que servirá como linha de transmissão são calculadas (POZAR, 2012). A Equação 13 apresenta o conjunto de equações que considera a impedância da linha em função das suas dimensões e da frequência de ressonância do projeto.

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left( \frac{8h}{W_0} + \frac{W_0}{4h} \right) & \frac{W_0}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_r \left[ \frac{W_0}{h} + 1,393 + 0,677 \ln \left( \frac{W_0}{h} + 1,44 \right) \right]}} & \frac{W_0}{h} > 1 \end{cases} \quad (13)$$

A impedância  $Z_0$  é determinada no projeto mediante a impedância do conector, que geralmente é de  $50 \Omega$ . Assim, utilizando o método numérico de localização de raízes da bissecção é possível encontrar o valor de  $W_0$  tal que a impedância de entrada da antena seja ajustada ao valor desejado.

O comprimento da linha de microfita  $L_l$  é calculado de acordo com a Equação 14, tal que é definido pelo comprimento de onda no espaço livre dividido por quatro vezes a raiz de  $\epsilon_{\text{eff}}$ . Esse valor permite que não haja desprendimento dos campos eletromagnéticos durante a transmissão e assim a linha não funcione como um ressonador (MILLIGAN, 2005).

$$L_l = \frac{c}{4f_r \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (14)$$

### 2.3.4 *Inset feed*

O *inset feed* é um método de casamento de impedância aplicado às antenas de microfita que considera a aplicação de um par de fendas retangulares paralelas à linha de alimentação, as fendas são dimensionadas com espessuras iguais a da camada condutora do ressoador e com comprimentos e larguras definidas segundo a modelagem aplicada. Este método é amplamente utilizado e permite um último ajuste da impedância de entrada da antena (POZAR, 2014). A Figura 10 demonstra uma antena de microfita retangular alimentada por meio de linha de transmissão e com a inserção do *inset feed* (BALANIS, 2005).

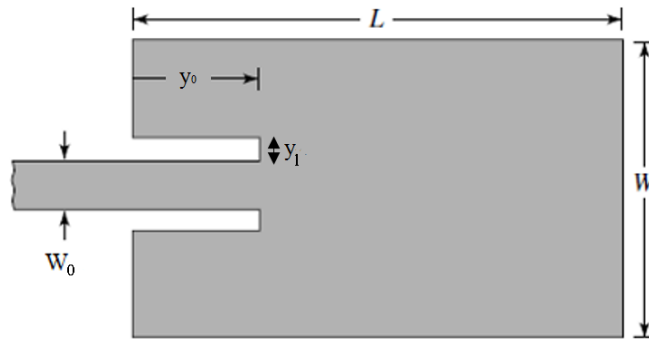


Figura 10 – Antena de microfita acrescida do *inset feed*.

Figura 10 Fonte: BALANIS, 2005

A distância da fenda do *inset feed*  $y_0$  é determinada pela Equação 15. Onde a  $R_{\text{entrada}}$  está escrita em função do valor antes calculado pela Equação 10 e a porção que determina essa variação em função de  $y_0$ .

$$R_{\text{entrada}}(y_0) = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \cos^2\left(\frac{\pi}{L} y_0\right) \quad (15)$$

A largura do *inset feed*  $y_1$  é determinada geralmente em função da largura da linha de microfita  $W_0$ , que normalmente assume o valor de 50% desse valor. De forma ideal, esse último ajuste só deve ser utilizado caso a antena não corresponda aos resultados esperados.

### 2.3.5 Permissividade elétrica e frequência de ressonância

A permissividade elétrica  $\epsilon$  reflete o quão um meio permite ou atrai as linhas de campo elétrico para que transpassem a região delimitada pela estrutura. Esse atributo é complexo, tal que a parte real  $\epsilon'$  corresponde à parcela que transmite a energia contida no campo enquanto a parcela imaginária  $\epsilon''$  representa a energia absorvida pelo meio e está ligada diretamente a condutividade do material (SADIKU, 2014). A Equação 16 apresenta a permissividade em função de suas componentes.

$$\epsilon = (\epsilon'_r \pm j\epsilon''_r) \times \epsilon_0 \quad (16)$$

Onde,  $\epsilon_0$  é a permissividade do vácuo  $8,85418782 \times 10^{-12}$  F/m e as permissividades relativas representam o quão o meio é mais permissivo ou não em relação ao vácuo.

A frequência de ressonância é definida como o valor da frequência do sinal que alimenta o circuito na qual as quantidades das reatâncias indutivas e capacitivas apresentam módulos iguais, resultando assim em um circuito puramente resistivo. Esse fenômeno resulta em um aproveitamento útil do sinal, o que permite a antena ressoar e irradiar a onda eletromagnética ao espaço livre de maneira eficaz. A Equação 17 apresenta o cálculo dessa frequência em função da indutância  $L_c$  e capacitância do circuito  $C_c$  (JAMES, 1989).

$$f_r = \frac{1}{\sqrt{L_c \times C_c}} \quad (17)$$

Uma antena apresenta um conjunto de frequências de ressonância, proporcionando assim o projeto de antenas que tenham mais de uma frequência de ressonância, de tal forma que elas possam suportar diversos serviços (BALANIS, 2005).

## 2.4 CARACTERÍSTICAS DAS ANTENAS

As antenas são componentes fundamentais para a ocorrência de transmissão e recepção de informações via ondas eletromagnéticas. De forma geral, existem atributos mensuráveis que permitem a caracterização desses dispositivos. Os principais são listados a seguir:

- Diagrama de irradiação;

- Perda de retorno;
- Densidade de corrente;
- Diretividade;
- Eficiência;
- Ganho.

#### 2.4.1 Diagrama de radiação

Para representar o comportamento dos campos eletromagnéticos que se desprendem das superfícies condutoras das antenas, é utilizado o cálculo das intensidades dos campos elétrico e magnético nos pontos localizados ao redor da antena. Essa prática proporciona a produção de um diagrama que demonstra como ocorre essa propagação (BALANIS, 2005).

Os diagramas são construídos considerando os planos correspondentes ao campo elétrico  $E$  e o campo magnético  $H$ , dependendo de como está definido o corte que o plano está contido é possível produzir tanto um diagrama em duas dimensões 2D, ou em três dimensões 3D. Tais diagramas são apresentados na Figura 11 – **Diagramas de radiação de uma antena de microfita. (a) diagrama de radiação 2D e (b) diagrama de radiação 3D**, o que difere o diagrama de radiação dos campos em duas e três dimensões é devido a consideração de somente um corte no caso do tipo 2D e a consideração de todos os possíveis planos, proporcionando o um diagrama em 3D.

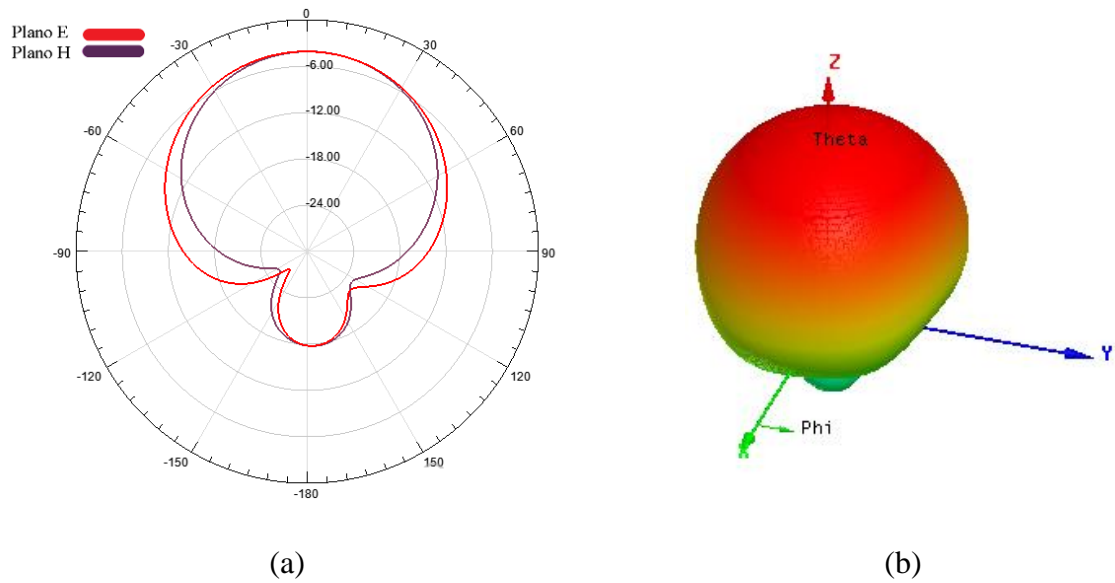


Figura 11 – Diagramas de radiação de uma antena de microfita. (a) diagrama de radiação 2D e (b) diagrama de radiação 3D

Fonte: Autoria própria

A antena de microfita retangular é projetada para que seu diagrama de radiação tenha máxima intensidade na direção normal ao ressonador, como exemplifica o diagrama da Figura 11.b, esse comportamento é resultado das linhas de campo que saem das laterais do ressonador e são propagadas no espaço ao qual a antena está contida (MILLIGAN, 2005).

#### 2.4.2 Perda de retorno

A perda de retorno corresponde à reflexão que ocorre na transmissão de um sinal elétrico enviado de uma fonte a uma carga por meio de uma linha de transmissão (SADIKU, 2014). Este esquema é apresentado na Figura 12.

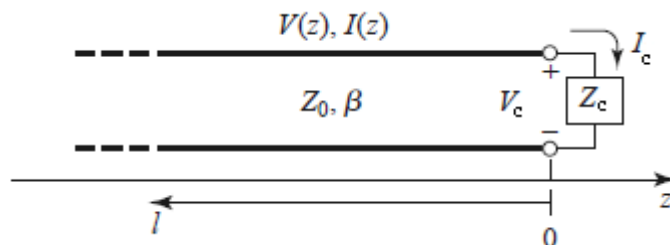


Figura 12 – Circuito equivalente a chegada do sinal a uma carga com impedância  $Z_c$ .

Fonte: Adaptado SADIKU, 2014.

O circuito apresentado pode ser obtido a partir do Teorema de Thévenin caso o sistema tenha comportamento linear (BOYLESTAD, 2010). O circuito resultante permite a análise da relação entre a potência emitida ao circuito pela fonte e a parcela que a carga consome.

Considerando a forma da tensão transmitida  $V_{(z)} = V_{fonte} e^{-j\beta z}$ , a onda percorre a distância da linha de transmissão até alcançar a carga  $Z_c$  (JAMES, 1989). Considerando que a onda tenha parte do seu valor refletido, a equação da tensão aplicada pela fonte é de acordo com a Equação 18.

$$V_{(z)} = V_{fonte}^+ e^{-j\beta z} + V_{fonte}^- e^{+j\beta z} \quad (18)$$

Onde,  $e^{-j\beta z}$  corresponde a atenuação que a onda sofre ao percorrer a linha na direção z.

Portanto, a corrente que circula no circuito  $I_{(z)}$  é definida pela Equação 19. Ela é calculada em função da tensão aplicada à linha, que por sua vez corresponde a diferença de tensão entre a onda enviada e refletida para a fonte (BALANIS, 2005).

$$I_{(z)} = \frac{(V_{fonte}^+ e^{-j\beta z} - V_{fonte}^- e^{+j\beta z})}{Z_0} \quad (19)$$

A impedância  $Z_0$  é definida como a impedância característica da linha. A corrente que circula no circuito pode ser definida em função também da impedância somente da carga  $Z_c$ , como apresentada na Equação 20.

$$I_{(z)} = \frac{(V_{fonte}^+ e^{-j\beta z} + V_{fonte}^- e^{+j\beta z})}{Z_c} \quad (20)$$

Onde as duas parcelas são somadas, pois o sinal chega até a carga e pode ou não ser refletido. Por fim, relacionando as Equações 19 e 20, é obtida a relação direta apresentada pela Equação 21 entre as impedâncias da linha e da carga em função da relação de das tensões enviadas e recebidas.

$$\frac{(V_{fonte}^+ e^{-j\beta z} + V_{fonte}^- e^{+j\beta z})}{Z_c} = \frac{(V_{fonte}^+ e^{-j\beta z} - V_{fonte}^- e^{+j\beta z})}{Z_0} \quad (21)$$

Assim,



$$Z_c = Z_0 \times \frac{V_{\text{fonte}}^+ + V_{\text{fonte}}^-}{V_{\text{fonte}}^+ - V_{\text{fonte}}^-} \quad (21.1)$$

Reescrevendo a Equação 21.1, é possível obter a proporção da parcela refletida  $V_{\text{fonte}}^-$  em função da enviada  $V_{\text{fonte}}^+$  à carga. Demonstrada pela Equação 22.

$$\frac{V_{\text{fonte}}^-}{V_{\text{fonte}}^+} = \frac{Z_c - Z_0}{Z_c + Z_0} \quad (22)$$

Assim, se as impedâncias características são iguais, não haverá tensão retornando para a fonte. Por fim, esse parâmetro é de grande importância para a análise do desempenho da antena, refletindo diretamente na capacidade dela de irradiar quando houver a condição de ressonância (POZAR, 2014).

### 2.4.3 Densidade de corrente

A Lei de Ampère acrescida da corrente de deslocamento é demonstrada na Equação 23, escrita na forma diferencial e no domínio da frequência.

$$\nabla \times \vec{H} = -j\omega \vec{D} + \vec{J} \quad (23)$$

Onde,  $\vec{H}$  é o vetor campo magnético,  $\vec{D}$  densidade de fluxo elétrico e  $\vec{J}$  a densidade de corrente.

A característica capacitiva da antena, que surge devido à diferença de potencial entre o ressoador e o plano de terra permite assumir que a maior parcela da corrente elétrica que transpassa a antena é corrente de deslocamento (MILLIGAN, 2005). A Equação 24 apresenta a parcela da Lei de Ampère que compreende a densidade dessa corrente  $J_d$ .

$$J_d = -j\omega \vec{D} \quad (24)$$

A densidade de fluxo elétrico que transpassa o dielétrico é expressa pela Equação 25.

$$\vec{D} = (\epsilon' - j\epsilon'') \vec{E} \quad (25)$$

Onde  $\vec{E}$  é o vetor campo elétrico.

Além da corrente de deslocamento, há a presença de corrente de condução que flui principalmente nas extremidades das superfícies condutoras e surge devido ao comprimento físico dessas estruturas. Comportamento previsto pela segunda Lei de Ohm (SADIKU, 2014). Essa corrente é definida em função do vetor densidade de corrente  $\vec{J}$  apresentada na Equação 26, sendo essa densidade dependente da condutividade do meio  $\sigma$  e campo elétrico que transpassa o meio  $\vec{E}$ . A densidade de corrente de condução  $J_c$  representa também parte da solução da Lei de Ampère.

$$J_c = \vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (26)$$

Ao relacionar as Equações 23, 24, 25 e 26, é obtida a Lei de Ampère reescrita na Equação 27.

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega \epsilon' \vec{E} + (\omega \epsilon'' + \sigma) \vec{E} \quad (27)$$

Assim, é obtida da relação de tangente de perdas  $\tan \delta$  da onda eletromagnética que transpassa a região e será irradiada em seguida. Como mostra a Equação 28.

$$\tan \delta = \frac{\omega \epsilon'' + \sigma}{\omega \epsilon'} \quad (28)$$

A presença da condutividade muitas vezes é omitida nos substratos devido ao seu baixo valor, o que proporcionalmente causa uma modificação na Equação 28 que passa a ser expressa pela Equação 29.

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (29)$$

O nível de densidade da corrente de condução corresponde ao bom funcionamento da antena, pois esta causa deformações na radiação e provoca aquecimento, o que resulta na redução da diretividade, eficiência e ganho da antena (MILLIGAN, 2005)..

#### 2.4.4 Diretividade

Quando os campos eletromagnéticos se desprendem da superfície da antena e são propagados no espaço livre ocorre uma relação direta entre a geometria da antena e a direção do campo. Portanto, dependendo do projeto a radiação pode ser orientada a uma direção

específica. A diretividade reflete essa característica e é determinada pela relação entre a intensidade de radiação da antena em uma direção predefinida e a intensidade da radiação média da antena para todas as direções (POZAR, 2014).

Portanto, a Equação 30 considera a energia irradiada de uma antena isotrópica  $U_0$ .

$$U_0 = \frac{P_{\text{radiada}}}{4\pi} \quad (30)$$

Onde a potência dissipada é dividida pelo ângulo sólido da esfera considerando toda a região. Assim, a diretividade  $D_{(x,y,z)}$  é definida pela equação 31.

$$D_{(x,y,z)} = \frac{4\pi U_{(x,y,z)}}{P_{\text{radiada}}} \quad (31)$$

Portanto,  $U_{(x,y,z)}$  representa a intensidade de radiação em função de coordenadas retangulares apontando a uma direção específica tal que as Equações 30 e 31 resultam na Equação 30.

$$D_{(x,y,z)} = \frac{U_{(x,y,z)}}{U_0} \quad (32)$$

Por fim, a intensidade radiada  $U_{(x,y,z)}$  em uma direção é escrita explicitamente em função da radiação isotrópica  $U_0$ . A diretividade pode ser apresentada em função das suas componentes como exemplifica a Equação 33.

$$D = (U_x + U_y + U_z) \frac{1}{U_0} = D_x + D_y + D_z \quad (33)$$

Assim, a antena que tem diretividade não isotrópica apresenta maior potência de radiação em uma direção específica e, portanto apresenta menor radiação nas outras direções. A Figura 13 – **Diretividade de uma antena isotrópica** apresenta o gráfico em três dimensões de uma antena isotrópica, tal qual apresenta igual diretividade em todas as direções.

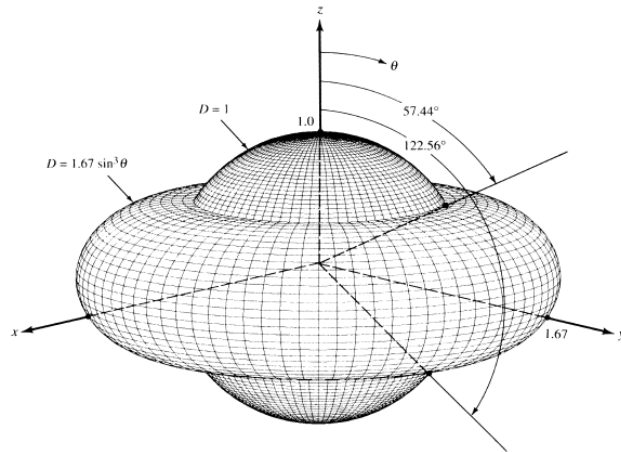


Figura 13 – Diretividade de uma antena isotrópica

Fonte: BALANIS. 2005

#### 2.4.5 Eficiência

A eficiência reflete qual a parcela da potência enviada à antena é transmitida realmente, a Equação 34 representa o cálculo desse parâmetro em função das resistências representadas pelas potências dissipadas devido a radiação  $R_r$  e as perdas  $R_p$ . (MILLIGAN, 2005).

$$\eta = \frac{R_r}{R_r + R_p} \quad (34)$$

A eficiência total  $\eta$  da antena também pode ser obtida a partir da relação entre as eficiências da condução  $\eta_c$ , que corresponde às partes condutoras da antena; da reflexão  $\eta_{re}$ , que depende o coeficiente de reflexão da antena; do dielétrico  $\eta_d$ , referente à quantidade de linhas de campo que conseguem transpassar o dielétrico sem sofrer influência do meio externo e assim dissipar energia fora da antena (BALANIS, 2005). A Equação 35 apresenta a eficiência total.

$$\eta = \eta_c \times \eta_{re} \times \eta_d \quad (35)$$

As eficiências de condução e dielétrica são geralmente medidas experimentalmente, evitando o uso de modelagem matemática. A Equação 36 apresenta o cálculo da eficiência de reflexão.

$$\eta_{re} = 1 - |\Gamma|^2 \quad (36)$$

O coeficiente de reflexão ou perda de retorno  $\Gamma$ , representa a proporção do campo elétrico enviado à antena e refletido à fonte. Portanto, quanto maior a reflexão, menor será a eficiência. Para evitar o aumento do coeficiente de reflexão é necessário que o casamento de impedâncias esteja correto (JAMES, 1989).

#### 2.4.6 Ganho

O ganho da antena resume os parâmetros de perda de retorno, diretividade e eficiência. Esse atributo traduz a parcela da potência irradiada em uma direção definida em função da potência enviada pela fonte. A Equação 37 apresenta o ganho de uma antena genérica.

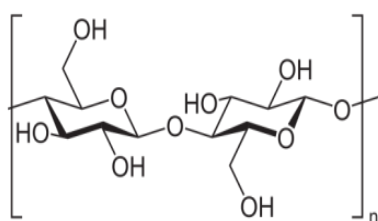
$$G_{(x,y,z)} = \frac{4\pi U}{P_{fonte}} \quad (37)$$

Em uma antena não ideal, a potência irradiada não é igual a da fonte devido às perdas. Assim, é definida a Equação 39, onde a potência irradiada depende das eficiências da antena e da diretividade  $D_{(x,y,z)}$  da antena. Portanto, sendo  $P_{irradiada(x,y,z)} = \eta_{re} \eta_c \eta_d \times P_{fonte}$ .

$$G_{(x,y,z)} = \eta_{re} \eta_c \eta_d \times \frac{4\pi U_{(x,y,z)}}{P_{irradiada}} \quad (39)$$

### 3 FIBRAS TÊXTEIS

Segundo Araújo (1987), as fibras têxteis são definidas como uma estrutura constituída de macromoléculas lineares que apresentam alta proporção entre seu comprimento e diâmetro. Esses elementos podem ter origem natural ou não natural. A fibra têxtil apresenta de forma geral: flexibilidade, suavidade e conforto ao uso. A Figura 14.a apresenta a constituição da molécula de celulose que compõe a maior parte da fibra de algodão, como apresentada na Figura 14.b que por sua vez, constitui e forma a estrutura macroscópica do algodão, exemplificada na Figura 14.c.



(a)



(b)



(c)

Figura 14 - (a) Composição química da molécula de celulose, (b) fibra orgânica do algodão e (c) modelo de flores de algodão.

Fonte: Autoria própria

O exemplo do algodão representa a relação entre a composição química básica das moléculas, a estrutura fibrosa e o material final, essa relação ocorre em todas as estruturas, havendo assim diversos materiais têxteis disponíveis que variam em sua formação. A Tabela 1 apresenta a classificação de algumas fibras têxteis em função das origens.

Tabela 1 – Divisão das fibras utilizadas para fabricação de linhas quanto à origem.

<b>TECIDOS</b>				
<b>Fibra</b>	<b>Sigla</b>	<b>Composição</b>		
<b>Natural</b>	Origem Vegetal	CB	Abacá	
		CO	Algodão	
		CJ	Juta	
		CL	Linho	
		CR	Rami	
	Origem Animal	WO	Lã	
		SK ou S	Seda	
	Origem Mineral	-	Crisotila	
		-	Crocidolita	
		-	Fibra de basalto	
		A	Fibra de amianto	
	<b>Não-Natural</b>	Artificial	CA	Acetato
			CLY	Lyocel ou Liocel
CMO			Modal	
CV			Viscose	
Sintético		PAC	Acrílico	
		PUE	Elastano (poliuretano ou spandex)	
		PES	Poliéster	
		PLA	Ácido poli-láctico, poliéster alifático termoplástico	
		PA	Poliamida	
		PP	Polipropileno	
		PUR	Poliuretano Elastomérico	
		-	Aramidás	
		PET	Polietileno (Polietilenotereftalato)	
SPF	Fibra de Soja			

Fonte: Adaptado de KUASNE, (1987)

As origens das fibras definem diretamente sua composição e estrutura. Portanto, a análise correta das características físicas permite indicar quais aplicações são satisfatórias de acordo com o tipo de fibra.

### 3.1 FIBRAS NATURAIS

As fibras de origem natural são todas as fibras encontradas na natureza prontas para uso na formação dos fios, havendo alguns casos que é necessário um tratamento físico prévio. Os primeiros tecidos manufaturados foram fabricados utilizando fibras naturais e dependendo da fibra, os tecidos são aplicados no cotidiano de maneiras diferentes. Essas estruturas apresentam maior facilidade na obtenção, pois depende de processos simples, são sustentáveis e podem ser obtidas como produto secundário como na produção de lã (PITA, 1996).

### 3.2 FIBRAS NÃO NATURAIS

As fibras não naturais são formadas por macromoléculas obtidas através de processos manufaturados, estas são divididas ainda em: fibras sintéticas e artificiais. Elas foram desenvolvidas com o objetivo de copiar e melhorar as características e propriedades das fibras naturais, permitindo que o processo de fabricação dos tecidos ocorresse mais rápido e com menor custo. Um aspecto importante é a redução da dependência da indústria têxtil ao mercado agrícola que produz a maior parte do insumo de fibras naturais (ARAÚJO, 1987).

- Fibras artificiais: essas fibras são formadas por macromoléculas que apresentam origem natural, mas são submetidas a processos químicos para permitir o uso na formação da fibra, pois na forma natural não apresenta uma macromolécula linear que forme a fibra.
- Fibras sintéticas: essas fibras não existem na natureza, são obtidas a partir de sínteses químicas que unem moléculas específicas e formam macromoléculas lineares. O uso do insumo petroquímico tornou essa fibra muito utilizada para a obtenção de tecidos devido ao acesso do petróleo e a possibilidade de desenvolver fibras de acordo com a necessidade da aplicação.



### 3.3 FIBRAS TÊXTEIS UTILIZADAS NA PESQUISA

As fibras têxteis escolhidas para o desenvolvimento dos estudos desse trabalho representam o conjunto dos principais tipos utilizados comercialmente. Divididas em sintéticas, naturais e artificiais. As fibras são apresentadas na Tabela 2, divididas de acordo com sua origem.

Tabela 2 - Exemplos de fibras de origens natural e não natural.

<b>Origem</b>	<b>Subgrupo</b>	<b>Fibra</b>
<b>Natural</b>	Vegetal	CO
<b>Não natural</b>	Sintética	PES
		PUE
		PA
	Artificial	PLA

Fonte: Autoria própria.

#### 3.3.1 Algodão (CO)

O algodão é utilizado para confecção de artigos têxteis desde as primeiras civilizações. A fibra de algodão surge ao redor das sementes de algumas plantas da família *Malvaceae*. Esse tipo de planta é subtropical, o que define as regiões propícias para o seu plantio. Ao extrair a semente da planta, as fibras são removidas e processadas para formar o fio, a semente é aproveitada para produção de óleo comestível (PITA, 1996). A fibra de algodão seca tem a composição apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição da fibra de algodão seca.

<b>Composto</b>	<b>Porcentagem (%)</b>
<b>Celulose</b>	94,0
<b>Proteínas</b>	1,3
<b>Cinzas</b>	1,2
<b>Substâncias pécticas</b>	0,9
<b>Ácidos málicos, cítrico, etc</b>	0,8
<b>Cera</b>	0,6
<b>Açúcares totais</b>	0,3

<b>Não dosados</b>	0,9
<b>Total</b>	100

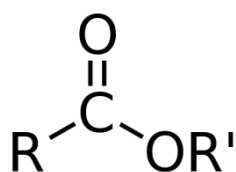
Fonte: Adaptado de KUASNE, 2008.

A celulose compõe a maior parte da fibra (94%), portanto o comportamento da estrutura quanto às características físicas e químicas são atribuídos a esse composto. Assim, a fibra de algodão apresenta boa solidez, conforto e suavidez, pode ser misturado com qualquer outro tipo de fibra, é hidrofílico e hipoalérgico (ROMERO, 1987).

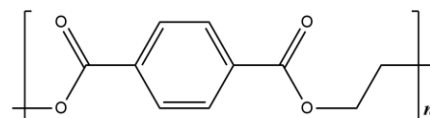
O conforto que o algodão oferece, custo baixo de produção da fibra e o fato dele poder ser misturado com outras fibras torna essa estrutura muito atraente para ser utilizada em escala comercial. Portanto, muitos tecidos utilizam o algodão em altas proporções, tornando o produto final confortável.

### 3.3.2 Poliéster (PES)

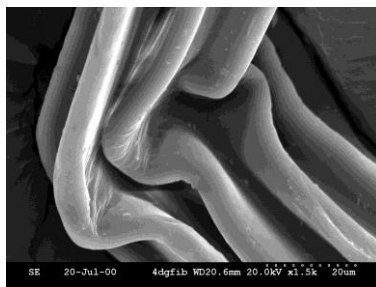
A fibra de poliéster foi desenvolvida pelos ingleses Whinfield e Dickson em 1941. O poliéster representa uma categoria de polímeros que contém o grupo funcional éster, apresentado na Figura 15.a na sua cadeia principal. O arranjo de ésteres utilizado para a fabricação dessa fibra é o Polietileno Tereftalato ou PET, como demonstrado na Figura 15.b. O éster pode ser obtido naturalmente a partir de plantas que contenham cutina ou por processo de síntese utilizando policondensação. Devido à quantidade exigida de produção os sintéticos são massivamente utilizados, por isso essa fibra é comumente dita como sintética. Os poliéster podem ser termoplásticos ou termoendurecidos e apresentam menor conforto que algumas fibras naturais, mas apresenta maior resistência ao enrugamento, durabilidade, retenção da cor, resistência à tração, estabilidade dimensional e rápida secagem. Assim, comumente essa fibra é misturada a fibras naturais para prover ao tecido um maior conforto e assim ser agradável o uso (PITA, 1996).



(a)



(b)



(c)

Figura 15 - (a) Composição de uma molécula de éster, (b) composição do PET e (c) Imagem aproximada da fibra de poliéster.

Fonte: Autoria própria.

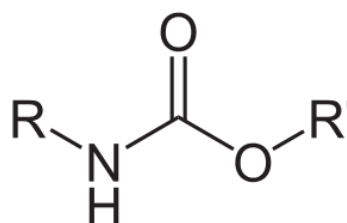
O processo de obtenção da fibra de poliéster irá definir suas características físicas, tais como tenacidade e elasticidade. Assim, os poliésteres podem ser divididos em três categorias: fibras cortadas, filamentos de média tenacidade e filamentos de alta tenacidade.

### 3.3.3 Elastano (PUE)

A fibra sintética do elastano, como apresentado pela Figura 16.a ou *spandex* é composta por poliuretano segmentado, a Figura 16.b demonstra a composição de um uretano. Essa fibra foi desenvolvida por Joseph Shivers em 1959, apresenta alta elasticidade (cerca de 500 %), resistência à abrasão e resistência a agentes químicos. Por isso é utilizada nos vestuários para adicionar elasticidade e durabilidade ao tecido final (ROMERO, 1995).



(a)



(b)

Figura 16 - (a) Imagem do tecido formado por PUE e (b) composição do poliuretano segmentado.

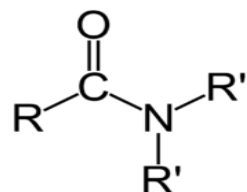
Fonte: Autoria própria.

### 3.3.4 Poliamida (PA)

A poliamida ou nylon apresentada na Figura 17.a é uma fibra sintética formada por polímeros compostos por monômeros de amida, como exemplificado na Figura 15.b, foi desenvolvida pelo químico norte americano Wallace Hume Carothers em 1935 apresenta alta resistência à tração, abrasão, alta estabilidade dimensional, resistência a reagentes externos químicos. Por isso é empregado na confecção de tecidos esportivos e fardamentos (ROMERO, 1995).



(a)



(b)

Figura 17 – (a) Imagem da fibra composta por PA e (b) composição da molécula de amida.

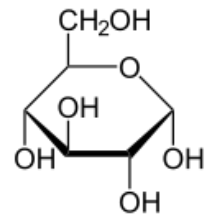
Fonte: Autoria própria.

### 3.3.5 Ácido polilático (PLA)

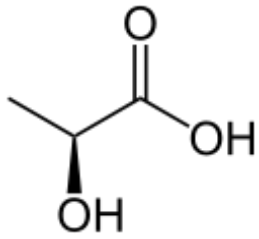
Esse tipo de fibra foi patenteada primeiramente pela *du Pont de Nemours and Company* (DuPont) na década de 1950, empresa norte americana que atua no setor químico, enquanto a produção em grande escala ocorreu somente a partir de 1997. Essa fibra artificial é fabricada com o uso da dextrose, monossacarídeo quimicamente considerado como um carboidrato simples, apresentado na Figura 18.c. Essa substância é extraída de produtos fontes de açúcares como o milho, apresentado na Figura 18.a. Após a extração dos grãos, o açúcar é retirado e fermentado, obtendo assim o ácido lático, apresentado na Figura 18.b, que em seguida é polimerizado resultando em uma quantidade de dextrose que em seguida é utilizado para produzir o poliéster alifático. Por fim, a fibra apresentada na Figura 18.d é produzida e aplicada para a produção do fio. Os principais atributos são: boa estabilidade dimensional, hidrofília e tem comportamento hipoalérgico. Um aspecto muito relevante é a capacidade de biodegradação no meio ambiente, o que torna esse tipo de fibra muito atraente para a redução de impactos ambientais (AQUINO, 2012).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 18 – (a) milho comum, (b) composição do ácido láctico, (c) composição da dextrose e (d) fibra de PLA

Fonte: Autoria própria.

## 4 TECIDOS TÊXTEIS E ANTENAS FLEXÍVEIS

Os tecidos têxteis são superfícies formadas por uma ou mais camadas de entrelaçamentos de fios têxteis, tanto as fibras como a organização dos fios são escolhidas de acordo com a aplicação desejada. A união de fibras mediante processos de fiação produz o fio, material base para o processo de fabricação do tecido, o fluxograma da Figura 19 apresenta o resumo da cadeia de produção do tecido, desde a escolha da fibra até a aplicação.

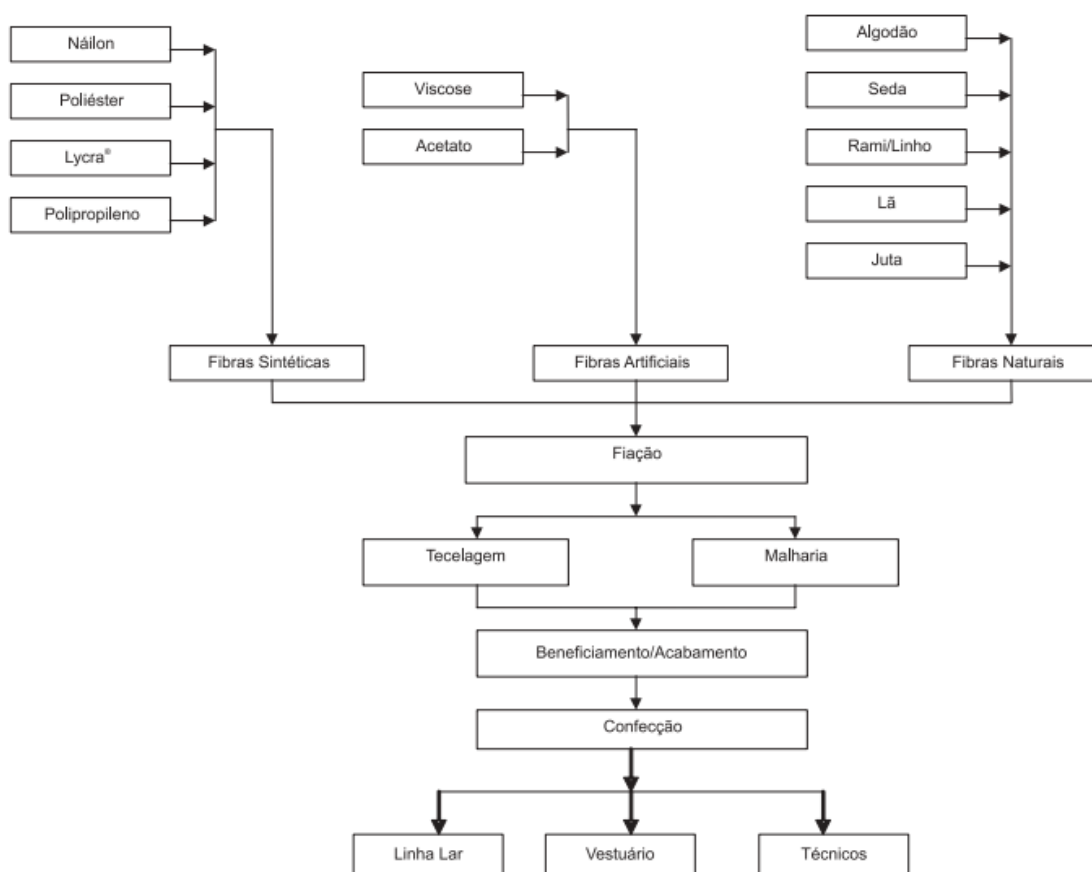


Figura 19 — Resumo da cadeia de produção de tecidos.

Fonte: Adaptado ARAÚJO, 1987.

### 4.1 FIAÇÃO, TECELAGEM, TECIDOS NÃO TECIDO, BENEFICIAMENTO E CONFECÇÃO

#### 4.1.1 Fiação

O processo de fiação pode ser resumido nas seguintes etapas: abertura das fibras, limpeza, orientação a uma mesma direção, paralelização e torção. Ao final destas, o fio é

embalado e enviado para a seguinte fase da fabricação do tecido ou é comercializado como fio para outros fins. Portanto, existem empresas especializadas na fiação que comercializam o material tanto em atacado como varejo (ARAÚJO, 1987).

Após o fio ser obtido, existem dois processos para a produção do tecido, tecelagem ou malharia. Os fios aplicados à tecelagem necessitam de maior resistência devido à forma que se dá o processo, exigindo que o fio utilizado tenha maior número de torções. Já os fios aplicados à malharia tem menor número de torções, também devido à natureza do processo (PITA, 1996).

#### 4.1.2 Tecelagem

O processo de tecelagem produz um tecido plano, apresentado na Figura 20, onde as linhas são tramadas de forma periódica, sendo que os fios são interligados de forma perpendicular, os fios verticais são chamados de urdume e os da horizontal são chamados de trama (AQUINO, 2012).

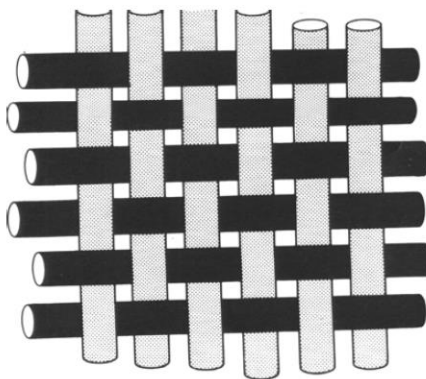


Figura 20 – Tecido plano genérico.

Fonte: Adaptado de KUASNE, 2008.

Os tecidos planos são divididos em:

- Tecidos simples, formados por um conjunto de fios de urdume e um de trama;
- Tecidos compostos, formados por mais de um conjunto de fios de urdume e um ou mais conjunto de fios de trama;
- Felpudos, tecidos planos que apresentam felpas salientes, inteiras ou cortadas;

- Lenos, tecidos onde os fios de urdume são entrelaçados com as tramas, produzindo um formato não paralelo na superfície;
- Jacquards, tecidos simples ou compostos que utilizam a mecânica Jacquard para controlar separadamente os fios de trama e urdume, permitindo assim desenhos mais complexos da superfície.

### 4.1.3 TNT

Os Tecidos Não Tecidos (TNT), são estruturas que não passam pela tecelagem ou malharia, são compostos basicamente por estruturas fibrosas flexíveis, porosas orientadas direccionalmente ou ao acaso. A Figura 21 apresenta uma representação da estrutura de um não tecido (KUASANE, 2008).

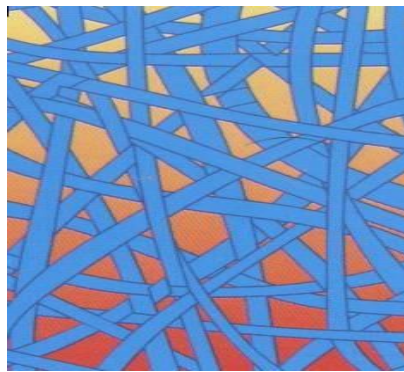


Figura 21 – Estrutura de um TNT.

Fonte: KUASANE, 2008.

### 4.1.4 Beneficiamento e confecção

Nesta etapa do processo o tecido sem beneficiamento é submetido a procedimentos que permitem o melhoramento de características físicas e químicas. Procedimentos estes que permitem a adição de características específicas ao tecido, tais como: coloração, maior ou menor absorção, proteção contra corrosão ou agentes químicos que degradem o tecido (KUASNE, 2008).



A confecção compreende a última etapa oferecida pela cadeia descrita do processo de fabricação. Os tecidos são montados, costurados de acordo com modelos de padrões de ergonomia, tamanho e beleza (KUASNE, 2008).

## 4.2 MALHARIA

O processo de malharia é oriundo do processo manual de tricotagem, historicamente os primeiros registros são retratados entre os árabes e tribos nômades que retiravam a lã dos rebanhos de ovelhas e com uso de agulhas reviradas teciam a malha. No século XVI, a técnica foi regionalmente passada pela região da península ibérica para a Espanha sendo difundida para todo o mundo moderno. Em 1589, foi desenvolvida por William Lee a primeira máquina para tecer tecidos de malha (ROMERO *et al.*, 1995).

Nos dias atuais, o tecido de malha pode ser obtido a partir de diversos métodos, produzindo malhas com formatos diferentes quanto ao entrelaçamento dos fios, dentre elas: malha por urdume, trama, mista e multifuncional, sendo esta última apresentada por Aquino (2012).

### 4.2.1 Malha por urdume

A malha por urdume representa os tecidos de malha que são confeccionados mediante o uso do sentido do urdume que equivale à coluna para o tecido de malha como o sentido principal, ou seja, confeccionando o tecido com uma orientação vertical. A Figura 22 apresenta a malha por urdume, são obtidas com uso de um ou mais conjuntos de fios posicionados lado a lado que então, são transformados em laçadas no sentido vertical, apresentando uma estrutura semelhante ao tecido plano.



Figura 22 – Estrutura do tecido de malha por urdume.

Fonte: KUASNE, 2008.

Esse tipo de malha é indesmalhável e apresenta maior estabilidade dimensional do que o tecido de malha por trama devido à forma que as ligações são realizadas. Para a obtenção desse formato são utilizadas as máquinas do tipo Kettenstuh ou Raschel.

#### 4.2.2 Malha por trama

A malha por trama utiliza o sentido da trama que equivale ao curso para o tecido de malha como sentido principal de confecção do tecido. Neste arranjo os fios são curvados produzindo as laçadas ou malhas unitárias no sentido horizontal. A Figura 23 apresenta a malha por trama simples, quando esse conjunto é interligado ao de outro ou do mesmo fio é formado uma estrutura de malha. (ARAÚJO, 1987).

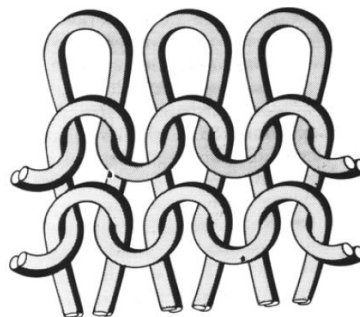


Figura 23 – Estrutura do tecido de malha por trama.

Fonte: Adaptado de ARAÚJO (1987)

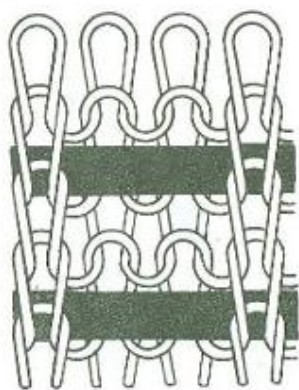
Na obtenção da malha por trama todas as agulhas são alimentadas por um mesmo fio ou grupos de fios. Os tecidos formados são desmalháveis, possuem menor estabilidade

dimensional e deformam com facilidade. As máquinas utilizadas para tecer esse arranjo são dos tipos: retilíneas ou circulares (AQUINO, 2012).

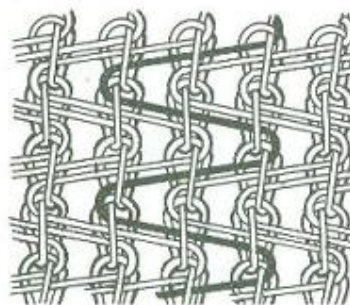
O curso representa uma série de laçadas sucessivas do mesmo fio, que cruzam o tecido transversalmente. Todas as laçadas (malhas) de uma carreira são formadas pelo mesmo fio. A coluna representa uma série de laçadas de fios diferentes, que se situam na direção do comprimento do tecido. Todas as malhas de uma mesma coluna são formadas numa mesma agulha e o número de colunas influencia na determinação da largura do tecido (ARAÚJO, 1987)

### 4.2.3 Mistas

As malhas consideradas mistas apresentam uma inserção de um fio de trama (*lay-in*) à estrutura do tecido de malha por trama ou urdume, proporcionando maior estabilidade dimensional ao tecido. A Figura 24 apresenta como se comporta a malha mista formada pela inserção do fio de trama a um tecido de malha por trama, como apresentado na Figura 24.a e um tecido de malha por urdume, apresentado na Figura 24.b



(a)



(b)

Figura 24 – (a) Tecido de malha por trama com fio de trama e (b) tecido de malha por urdume com fio de trama.

Fonte: Adaptado de ARAÚJO, 1987.

#### 4.2.4 Estruturas básicas dos tecidos de malha

Todos os tecidos de malha são construídos a partir da distribuição das linhas que os constituem. Essa organização é definida de acordo com a necessidade da aplicação, gerando assim vários tipos de estruturas mínimas que unidas resultam em características específicas para o tecido de malha. Essas estruturas mínimas são definidas como laçadas ou malhas unitárias, a Figura 25 apresenta o exemplo genérico desse tipo de estrutura. Ela é dividida em: cabeça, parte contínua que é conectada a unidade superior por meio dos seus pés; duas pernas, trecho que define a altura da malha unitária; dois pés, parte que enlaça a cabeça da unidade inferior formando os pontos de ligação (KUASNE, 2008).

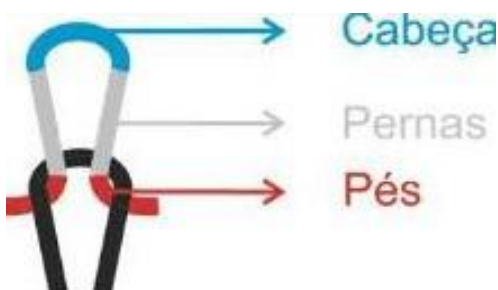
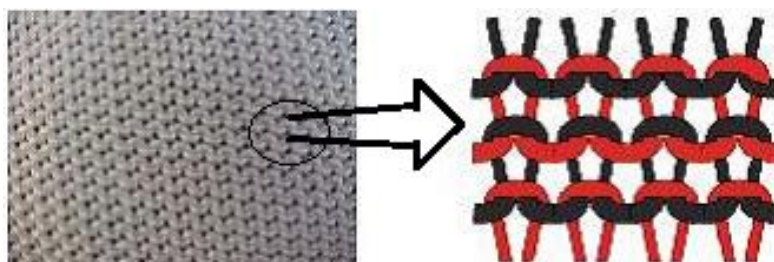


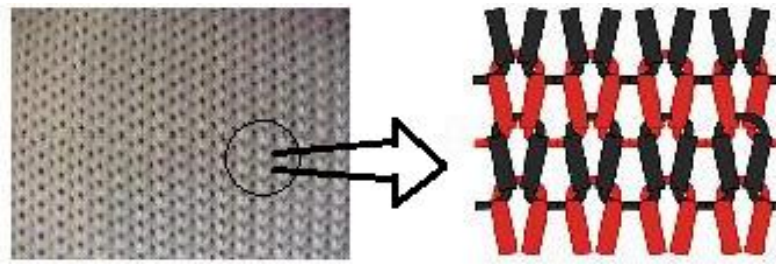
Figura 25 – Partes de uma laçada ou malha unitária.

Fonte: KUASNE, 2008.

Em perspectiva, caso os pés das unidades estejam atrás das cabeças das unidades, o lado é definido tecnicamente como o avesso do tecido, como demonstrado na Figura 26.a. Assim, se os pés estiverem afrente das cabeças, o lado é definido tecnicamente como direito, como exemplificado na Figura 26.b.



(a)



(b)

Figura 26 (a) Avesso técnico do tecido e (b) lado direito técnico do tecido.

Fonte: Adaptado de KUASNE, 2008

As disposições demonstradas na Figura 27 apresentam a laçada tipo regular exemplificada na Figura 25.a e laçada de retenção ou fang, demonstrada na Figura 27.b.



(a)



(b)

Figura 27 – (a) Disposição regular da laçada e (b) disposição de retenção.

Fonte: KUASNE, 2008.

A escolha dos tipos de laçadas é definida pelo tipo de arranjo desejado do tecido de malha. Para isso, existem diversas formas de distribuir os fios, produzindo diversos tipos de estruturas, tais como: meia malha (Jersey) e Piquet.

#### 4.2.4.1 Estrutura tipo Jersey

A meia malha apresenta laçadas regulares desenhadas em apenas um lado do tecido, produzindo assim uma face direita e um avesso como mostra a Figura 28. Essa estrutura apresenta simplicidade quanto à fabricação, pois utiliza a contextura mais básica das máquinas utilizadas, proporcionando redução de custos operacionais quando comparados aos das outras estruturas. O nome é devido o lugar onde foi inicialmente produzido, Ilha de Jersey, Inglaterra (ARAÚJO, 1987).

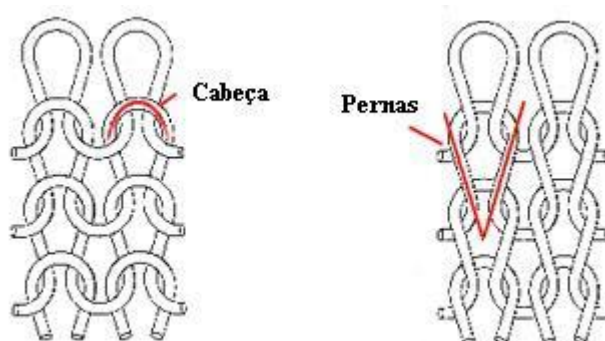


Figura 28 – Diagramas avesso e direito do tecido de malha com estrutura Jersey.

Fonte: KUASNE, 2008.

Devido à estrutura, a meia malha é um tecido desbalanceado fisicamente nas estruturas, tendendo assim a enrolar nas bordas. Outro aspecto relevante é a elasticidade em ambos os sentidos coluna e curso ter valores próximos.

#### 4.2.4.2 Estrutura tipo Piquet

O tecido construído com uma estrutura Piquet apresenta textura que favorece a ocorrência espaços vazios, proporcionando um tecido mais poroso. O nome do tecido tem origem Francesa A estrutura em piquet é formada com a combinação das malhas regular e fang, como mostra a Figura 29. No lado direito do tecido estão localizadas as pernas da malha com deslocamento de carreira, já no lado avesso, o aspecto formado é de pequenos losangos formando pequenas colmeias (AQUINO, 2012).



Figura 29 – Diagrama do lado avesso de um tecido de malha com estrutura piquet.

Fonte: [www.clubnoir.com.br](http://www.clubnoir.com.br).

A estrutura Piquet apresenta maior estabilidade dimensional o que evita a formação de dobras nas extremidades do tecido devido às tensões físicas distribuídas ao longo da superfície.

#### **4.2.5 Estrutura Multifuncional ou multicamadas**

As estruturas multicamadas ou multifuncionais são desenvolvidas para atender aspectos estéticos dos tecidos e aplicações medicinais. Esse tipo de estrutura apresenta regiões com diferentes tipos de laçadas, titulações e gramaturas proporcionando tensões diferentes distribuídas ao longo do tecido. Esse efeito pode ser utilizado para aplicar pontos de pressão em regiões específicas no corpo do usuário (AQUINO, 2012).

As meias medicinais apresentadas na Figura 30 representam a malha tipo multicamadas, ela contém duas ou mais estruturas interligadas por meio das próprias ligações ou com o auxílio de um fio de conexão. Esses arranjos são utilizados para produzir malhas com propriedades termofisiológicas, pois além de misturas a propriedades das estruturas, há também a correlação entre os atributos das fibras, tais como: resistência a agentes externos, esforços físicos, absorção de água e elasticidade (AQUINO, 2012).



Figura 30 – Meias medicinais de tecido de malha feitas em multicamadas.

Fonte: [www.viaorta.com.br](http://www.viaorta.com.br).

A figura apresenta uma estrutura multicamadas na estrutura *patchwork*, onde na superfície do tecido existem vários tipos de estruturas em regiões diferentes.

### 4.3 PARÂMETROS DOS TECIDOS DE MALHA

Os tecidos de malha são estudados mediante parâmetros que relacionam as suas características físicas, químicas e o comportamento da estrutura têxtil quando submetido a situações específicas. Os parâmetros estudados são:

- Comprimento da laçada;
- Título;
- Gramatura;
- Estabilidade dimensional;
- Resistência ao rasgo.

#### 4.3.1 Comprimento da laçada

A malha unitária apresenta um comprimento total, esse é definido como comprimento da laçada e representa basicamente o quão próximo estão os pés e cabeças das unidades que compõe o tecido. Portanto, está ligada diretamente a quantidade de espaços vazios que a



malha apresenta, além de também definir a rigidez física da estrutura confeccionada (KUASNE, 2008).

Esse comprimento é definido na confecção da malha, sendo seu limite ligado ao quão esforço o fio pode suportar no momento da fabricação da malha, ou seja, quanto menor a laçada, maior a tensão aplicada ao fio. Por fim, para tecidos de malha com maior densidade de fios, é necessário que estes suportem o esforço no momento da confecção (KUASNE, 2008).

#### 4.3.2 Título

O título é um parâmetro atribuído ao fio que compõe o tecido e representa a relação entre seu comprimento e massa, equivalente a densidade linear  $\left(\frac{g}{m}\right)$ . Esse atributo auxilia na escolha de qual fio utilizar no momento da confecção. São abordadas duas formas de calcular o título de um fio, forma direta Tex, desenvolvida e divulgada pelo *The Textile Institute* (Manchester, Inglaterra) em 1945 e forma indireta Ne, abreviação para Título Inglês em jardas, desenvolvido com referência a medição direta Tex para proporcionar comparação entre os atributos ligados a densidade linear do tecido.

A titulação direta caracteriza-se por comprimento constante e peso variável, é apresentada na Equação 40. Neste sistema o título é diretamente proporcional ao diâmetro, portanto, quanto mais espesso o fio, maior o título. O sistema Tex utiliza unidades do Sistema Internacional de Medidas (SI). O comprimento fixo é de 1000 metros para 1 grama de tecido (ASTM, 2002 ).

$$\text{Tex} = \frac{K \times P}{C} \quad (40)$$

Onde:

K – Constante de proporcionalidade, 1000 [g/m];

P – Massa [g];

C – Comprimento [m].

A titulação indireta caracteriza-se pela massa constante e comprimento variável. Neste sistema o título é inversamente proporcional ao diâmetro, portanto, quanto mais espesso o fio,

menor o título. O sistema Ne utiliza medidas inglesas, a massa é definida em uma libra (454 gramas) e o comprimento é medido em hank (768 metros). Utilizando equivalências entre as unidades, define-se a Equação 41, considerando a massa em gramas e o comprimento em metros (ASTM, 2008 ).

$$Ne = \frac{590}{\text{Tex}} \quad (41)$$

### 4.3.3 Gramatura

A gramatura é definida como a quantidade de gramas do tecido contida em um metro quadrado ( $g/m^2$ ). Assim, quanto maior a gramatura de um tecido mais o tecido é denso e apresenta menos espaços vazios, portanto uma laçada curta, ou o tecido pode apresentar um fio com um título direto elevado. Esse parâmetro depende diretamente do título de cada fio que compõe o tecido, do tipo de malha: urdume ou trama, da estrutura da laçada e seu comprimento. (ASTM, 2002 ).

### 4.3.4 Estabilidade dimensional

Esse parâmetro reflete a capacidade que o tecido tem de manter suas dimensões após o processo de lavagem ao qual apresenta agentes químicos e físicos que agredem o tecido e, portanto pode ou não causar o encolhimento ou alongamento do tecido. O parâmetro é qualitativo levando em consideração somente limites mínimos de redução ou alongamento dos tecidos de 5%, pois acima desse valor o tecido é considerado com baixa estabilidade dimensional (ASTM, 2015).

### 4.3.5 Resistência ao rasgo

A resistência ao rasgo é determinada pelo comportamento do tecido quando este é submetido ao esforço físico aplicado nas extremidades do tecido. Quando é realizado esse tipo de esforço o tecido estica naturalmente, o nível de deformação depende do quão elástico o tecido pode ser, já esse fator está ligado principalmente ao tipo de estrutura e qual fibra compõe os fios (ASTM, 2013).

#### 4.4 ANTENAS FLEXÍVEIS

A antena flexível corresponde a um dispositivo que contém em suas partes construtivas materiais que permitem a ela flexibilidade, tais como tecidos. Portanto, a aplicação do material flexível pode ocorrer tanto nas partes condutivas: ressoador, plano de terra, ou substrato do dispositivo. Em ambos os casos o uso destes materiais produz efeitos relevantes quanto ao projeto do dispositivo que diferem dos aplicados a projetos com antenas rígidas convencionais. Este capítulo aborda as principais características das antenas de microfita que utilizam esses materiais têxteis, seja nas partes condutivas ou no substrato da antena. Esse tipo de antena é utilizada em situações que necessitem de flexibilidade, elasticidade e compressibilidade, tais como aplicações em fardas ou roupas comuns. A integração do vestuário garante menor incômodo na execução de movimentos, além de reduzir o número de equipamentos que devem ser adicionados por meio de presilhas ou calços (VIRILI *et al.*, 2014).

O projeto da antena têxtil pode seguir o mesmo padrão convencional, havendo diferenças quanto ao erro associado, pois naturalmente os tecidos apresentam espaços vazios distribuídos uniformemente mediante a confecção (BOYS *et al.*, 2013). Além da necessidade dos fios condutores conterem porções não condutoras como fibras de Poliéster ou Poliamida, isso reduz a condutividade da superfície condutora e conseqüentemente a eficiência da antena (YAN; SOH; VANDENBOSCH, 2015).

Os substratos têxteis normalmente apresentam baixa permissividade efetiva devido à presença de espaços vazios entre os fios que formam o tecido, isso resulta em um valor da permissividade eficaz próxima ao do espaço livre  $\epsilon_0$  (DHUPKARIYA; SINGH; SHUKLA, 2014).

Esse tipo de dispositivo atende a todas as faixas de frequências já utilizadas por antenas de microfita convencionais. Para o desenvolvimento dessa pesquisa é adotada a frequência de 2,45 GHz com largura de banda mínima para atender a banda *Industrial Scientific and Medical* – ISM de 83,5 MHz. Esses parâmetros são escolhidos por atenderem uma faixa livre do espectro de frequência. Esta situação é prevista pelo padrão IEEE 802.15.6 *Wireless Body Area Networks*. Essa faixa de frequência permite o uso de diversas tecnologias como *wireless*, *bluetooth*, *Radio Frequency Identification* - RFID (IEE, 2012).

#### 4.4.1 Superfície condutora

A superfície condutora das antenas têxteis pode ser obtida a partir do uso de diversas formas, tais como: linhas condutivas, camadas condutivas adesivas, tintas condutivas e ligas metálicas semiflexíveis (TSOLIS et al., 2014).

Quanto às linhas condutivas, são obtidas por meio de deposição do material condutor na superfície das fibras têxteis que formam o fio. A Figura 31 apresenta uma bobina do fio condutivo composto por aço inox



Figura 31 – Bobina de fio condutivo de aço inoxidável.

Fonte: [www.sparkfun.com](http://www.sparkfun.com)

O fio apresenta maior dificuldade para ser utilizado nas máquinas que operam com linhas comuns, pois o metal torna o fio áspero e abrasivo. Esse aspecto torna o uso do fio condutivo mais complexo e assim torna seu uso menos acessível (TSOLIS et al, 2014).

Outra maneira de obter o tecido condutor é aplicar uma camada condutora ao tecido já confeccionado, como exemplificado na Figura 32.



Figura 32 – Camada condutora aplicada no tecido confeccionado.

Fonte: Adaptado de LOSS, 2012

O tipo de material condutor e a espessura da camada interferem na flexibilidade do tecido, pois naturalmente o material condutor apresenta baixa elasticidade. Portanto, é importante garantir que o tecido tenha a concordância entre o a boa condutividade e permaneça com flexibilidade (LOSS, 2012).

A camada pode ser afetada caso o tecido seja esticado e assim, romper a estrutura condutora e produzir fissuras que alterem a frequência de ressonância bem como no diagrama de radiação. Portanto, uma camada têxtil que tenha alta estabilidade dimensional e baixa elasticidade permite maior resistência a esse tipo de situação (VIRKKI et al., 2015).

#### **4.4.2 Influência da deformação física e dos agentes químicos nas antenas de microfita flexíveis**

Qualquer mudança na geometria de uma antena causa alterações nos seus atributos elétricos e magnéticos. Portanto, é importante que o projeto atente para situações onde essa alteração seja inevitável (YOO, 2013). A antena têxtil naturalmente sofre alterações constantes nas camadas tanto condutoras como dielétrica e isso ocorre devido aos movimentos realizados quando, por exemplo, a antena é aplicada ao fardamento de um bombeiro. Diversas atitudes podem ser tomadas para reduzir o esforço aplicado à antena (TAK; HONG; CHOI, 2015). A Figura 33 apresenta como solução aplicar a antena no ombro do vestuário, pois essa região sofre menos atrito e deformação.



Figura 33 – Antena têxtil aplicada no ombro do vestuário.

Fonte: [www.inovacaotecnologica.com.br](http://www.inovacaotecnologica.com.br)

Além das alterações comuns devido ao movimento do usuário, existem situações de extremo estresse físico que causam danos irreversíveis ao tecido, o que altera permanentemente as características do dispositivo. Além dessa situação, o tecido sofre ação de agente químicos seja nos ambientes que o usuário utilize ou na lavagem da vestimenta. Neste último caso, o material condutor contido no tecido pode ser danificado facilmente, obrigando que haja um processo especial de lavagem (VIRKKI et al., 2015).

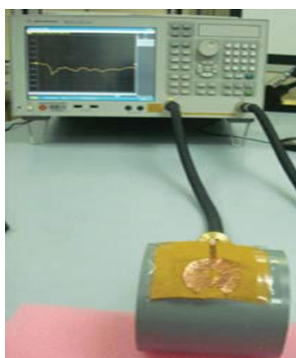
Por fim, a própria geometria da antena deve ser adaptável ao formato da região aonde a antena será aplicada, que geralmente assume uma condição cilíndrica (OSMAN et al, 2012). A Figura 34 apresenta exemplos de várias curvaturas nas quais a antena foi submetida para testar o comportamento desta nessas situações.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 34 – (a) Posição convexa no mesmo sentido do ombro, (b) posição côncava no mesmo sentido do ombro, (c) convexa paralela ao ombro e (d) côncava no sentido paralelo ao ombro.

Fonte: OSMAN et al, 2012

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo trata sobre a metodologia aplicada ao trabalho desenvolvido para alcançar os objetivos propostos neste trabalho. O fluxograma da Figura 35 resume os passos adotados. As etapas foram escolhidas para contemplar os objetivos do trabalho, desenvolvendo assim os conceitos teóricos aplicados a caracterização dos tecidos de malha e na construção do dispositivo proposto no trabalho. Primeiramente os tecidos são escolhidos de acordo com a acessibilidade comercial e de acordo com a inovação têxtil relacionada. Em segundo lugar, são definidos os procedimentos de caracterização física e elétrica: os atributos físicos são obtidos a partir do uso das normas correspondentes a cada ensaio, para a caracterização elétrica é utilizado um medidor de impedância conectado aos corpos de prova por meio de *probe* 020. Os terceiro e quarto passos correspondem ao uso dos métodos da Linha de Transmissão e Método da Cavidade além do uso de *software* para simulação. O penúltimo passo corresponde aos procedimentos aplicados na construção do dispositivo proposto, Por fim, o último passo é organizar os resultados e, portanto realizar observações assertivas embasadas nos resultados.

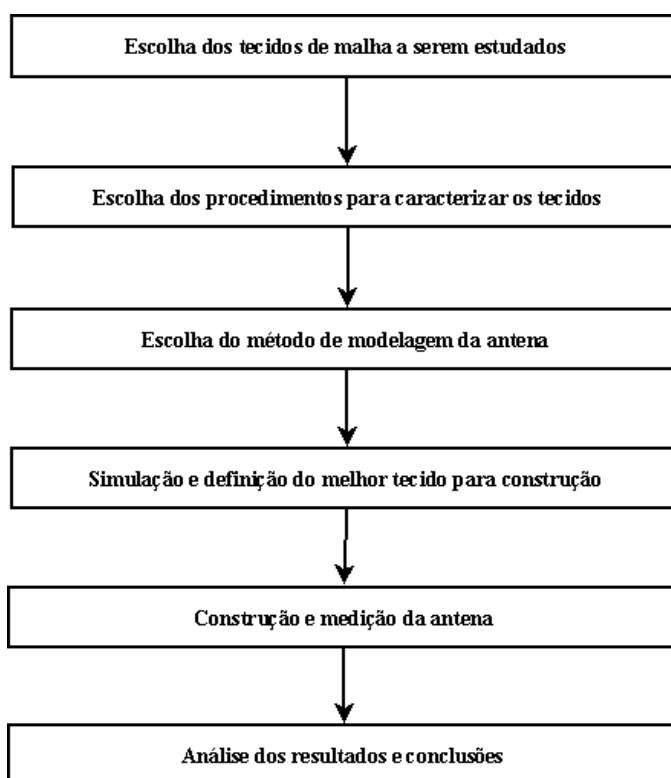


Figura 35 – Fluxograma dos principais passos da metodologia.

Fonte: Autoria própria.

Para subsidiar o projeto da antena flexível composta por estruturas têxteis é necessário primeiramente um estudo teórico de todos os aspectos relevantes ao projeto de uma antena microfita e associar ao estudo teórico dos aspectos que envolvem a composição e disposição das estruturas têxteis. (CALVACANTE, 2014). Após o estudo teórico das fibras e estruturas têxteis, é feita a escolha dos corpos de provas para o projeto da antena flexível à base de tecido malha. Os tecidos são compostos por porções de fibras sintéticas e naturais.

Para embasar os resultados são utilizadas oito (8) estruturas têxteis, sendo quatro (4) delas tecido malha utilizando fibra natural (CO) misturada com diversas fibras não naturais e quatro (4) tecidos malha utilizando fibras puramente não naturais, assim, as fibras são arranjadas em grupos divididos de acordo com sua composição, o arranjo é apresentado na tabela 4.

Tabela 4 – Apresentação das composições e dos arranjos dos tecidos utilizados.

<b>Grupo</b>	<b>Tecidos</b>	<b>Estrutura</b>
<b>CO</b>	CO + PUE	Jersey
	CO + PA	Piquet Simples
	CO + PA	Jersey
	CO + PES	Jersey
<b>PES</b>	PES Coolmax	Multifuncional
	PES Drirealise	Multifuncional
	PES + PUE	Jersey
	PES + PLA	Jersey

Fonte: Autoria própria.

As imagens dos tecidos classificados são apresentadas no conjunto de imagens da Figura 36.



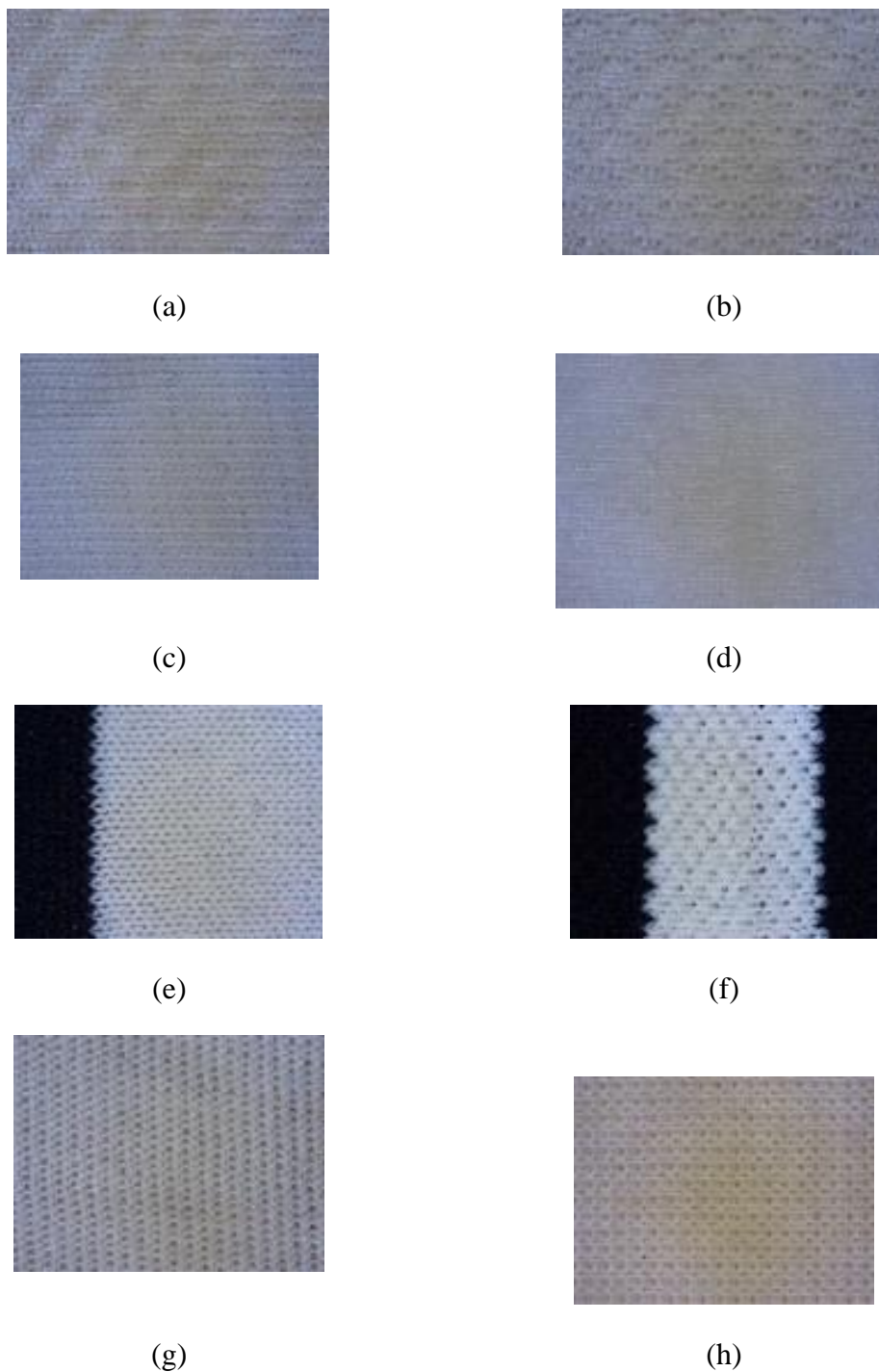


Figura 36 – Tecidos analisados (a) PES Drirelease. (b) PES Coolmax. (c) PES + PLA. (d) PES + PUE. (e) CO + PA. (f) CO + PA (Piquet). (g) CO + PES. (h) CO + PUE

Fonte: Autoria própria

Após a classificação dos tecidos estudados, são realizados ensaios laboratoriais que determinam características físicas relevantes ao objetivo do trabalho, a Tabela 5 apresenta os ensaios e as normas que os embasam.

Tabela 5 – Ensaio desenvolvidos e suas respectivas normas.

ENSAIO	NORMA
TITULAÇÃO	ASTM D 3776
GRAMATURA	ASTM 3887
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	ASTM D 5034
ESTABILIDADE DIMENSIONAL	ASTM 6207

Fonte: Autoria própria.

## 5.1 DESCRIÇÃO OS ENSAIOS FÍSICOS E QUÍMICOS

Os ensaios físicos e químicos são fundamentais para subsidiar as considerações sobre as correlações entre aspectos físicos e elétricos do tecido, para que os valores obtidos nos ensaios de caracterização sejam satisfatórios são utilizados os procedimentos adotados nas normas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM).

### 5.1.1 Titulação

A titulação é utilizada como parâmetro direto para a correlação entre os atributos físicos e elétricos dos tecidos de malha, pois esse aspecto reflete a densidade linear do fio que influencia diretamente na gramatura do tecido e na permissividade efetiva da antena.

O teste é realizado de acordo com a norma ASTM 3776. Primeiramente são desfiados um trecho de cada tecido de malha estudado, em seguida são retiradas três amostras de fio de cada trecho com comprimento de 1 metro cada, somando assim, 3 metros de fio de cada tecido de malha. Assim, cada amostra de fio retirada é pesada em uma balança analítica de precisão como demonstrada na Figura 37, e de posse dos pesos individuais é realizada uma média aritmética e por fim, definido o peso que representa o fio oriundo do seu respectivo tecido. Utilizando as Equações 40 e 41 são calculados os títulos dos fios que compõem as extruturas têxteis estudadas tanto de maneira direta Tex e indireta Ne.

### 5.1.2 Gramatura.

O ensaio de gramatura relaciona a quantidade de massa por unidade de área, o que está diretamente relacionado a quantidade de espaços vazios do tecido. O ensaio da gramatura segue os passos apresentados na norma ASTM 3776. Utilizando uma balança analítica Uni Bloc, apresentada na Figura 37 para pesar as amostras e um cortador circular, como demonstra a Figura 36 para cortar as amostras em uma área de 1 dm<sup>2</sup>, são cortadas uma amostra de cada tecido e depois pesadas. De posse do valor em gramas de cada amostra e sabendo o valor fixo da superfície circular (1 dm<sup>2</sup>), são finalmente calculadas a gramatura de cada tecido.



Figura 37 – Balança analítica Uni Bloc modelo AUW 320.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 38 apresenta o cortador circular Mesdan apropriado para o ensaio de gramatura, a área da amostra cortada é de 1 dm<sup>2</sup>, que em metros é 0,01 m<sup>2</sup>.



Figura 38 – Cortador circular MESDAN 1 dm<sup>2</sup>.

Fonte: Autoria Própria.

Após pesar o tecido, o peso é dividido pela área e assim, é obtido o valor da gramatura. Esse processo é realizado em cada amostra de cada tecido A Equação 34 descreve

de forma analítica o cálculo da gramatura sendo considerado a área do cortador Mesdan de 0,01 m<sup>2</sup>.

$$\text{Gramatura} = \frac{m}{0,01} \left[ \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \right] \quad (42)$$

Onde:

m – massa do tecido obtido na pesagem (g).

### 5.1.3 Ensaio de resistência à tração.

O ensaio de resistência à tração apresenta o comportamento do tecido quando suas fibras são submetidas à tensão física, o que reflete diretamente na capacidade do tecido resistir à deformação das suas dimensões, ou seja, o quão de esforço é necessário exercer para que o tecido seja esticado e, além disso, qual o esforço que as fibras suportam até que haja o rompimento.

O ensaio segue os procedimentos descritos no padrão ASTM 5034. As amostras são submetidas à tração com o objetivo de obter a curva da tensão (N) em função do alongamento (%). É utilizado o TENSOLAB 3000 Mesdan, demonstrado na Figura 39, equipamento específico para este tipo de teste. São retiradas cinco amostras no sentido do curso e cinco no sentido da coluna para cada tecido de malha utilizado, totalizando dez amostras de cada tecido, cada corpo de prova tem as dimensões 5x7 cm como previsto em norma. Todas as amostras são presas nas estruturas do TENSOLAB 3000 e então a estrutura superior sobe exercendo assim a tração no tecido, conseqüentemente o a malha é esticada até o ponto em que ocorre a ruptura. Um computador conectado ao equipamento registra os pontos da curva alongamento em função do esforço de cada amostra. Após o cálculo da média entre os valores obtidos, são plotados os gráficos e obtido as tabelas que resumem os resultados (ASTM, 2013).



Figura 39 – TENSOLAB 3000 Mesdan.

Fonte: Autoria própria.

#### 5.1.4 Estabilidade dimensional

Esse ensaio trata diretamente com o comportamento do tecido de malha quando submetido ao procedimento de lavagem, característica comum a todos os tecidos utilizados comercialmente, estando à antena têxtil sujeita a essa situação. Portanto, a estabilidade dimensional reflete a capacidade de a antena flexível manter as suas dimensões quando submetidas ao processo de lavagem.

Os procedimentos adotados seguem o padrão ASTM 6207. Utilizando a máquina *wash tester* Mathis apresentado na Figura 40, são depositadas as amostras quadradas de 10x10 cm dos tecidos nos depósitos específicos, demonstrado na Figura 39 contendo uma solução de sabão diluído em água (ASTM, 2015).



Figura 40 – *wash tester* Mathis.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 41 demonstra os recipientes metálicos utilizados para depositar os tecidos cortados, além dos tecidos, é adicionada uma solução com água e sabão com concentração de

4 g/L, como o recipiente deve receber um volume máximo de 150 mL, é depositado 0,64 g de sabão comercial comum (ASTM, 2015).



Figura 41 – Recipientes metálicos específicos para o ensaio.

Fonte: Autoria própria.

Os tecidos são lavados durante 30 minutos a uma temperatura de 60° C. Após a lavagem, as amostras são submetidas à estufa, apresentada na Figura 40 para secar a uma temperatura de 37° C durante 4 horas. Após a secagem os corpos de prova são medidos novamente para verificar a variação das dimensões e então analisar a estabilidade dimensional de cada malha (ASTM, 2015).



Figura 42 – Estufa de bancada utilizada para simular a secagem ambiente.

Fonte: Autoria própria.

Após os ensaios físicos, são determinadas as características elétricas dos tecidos utilizando um analisador de redes vetorial, resultando nas medições da permissividade e tangente de perdas dos tecidos. De posse dos dados, é possível definir qual combinação entre composição e arranjo será a melhor escolha para utilizar como substrato da antena microfita flexível.

### 5.1.5 Caracterização elétrica.

A caracterização elétrica é realizada com o intuito de embasar associações entre os aspectos físicos e elétricos dos tecidos de malha, para isso são medidas as permissividades elétricas relativas real e imaginária, possibilitando assim o cálculo da tangente de perdas de acordo com a Equação 21. A medição é realizada com o uso do medidor de impedância ou *Dielectric Probe Kit* Agilent 85070E apresentado na Figura 43, são obtidas as permissividades elétricas e tangentes de perdas de cada tecido.



Figura 43 – Medidor de impedância Agilent 85070E.

Fonte: Autoria própria.

Para a realização dos testes os tecidos são pressionados com o *probe* 020 do medidor de impedância contra uma superfície plana, as camadas são sobrepostas até uma altura de 2 cm para reduzir os possíveis erros. Assim, o tecido é comprimido com o objetivo de reduzir a quantidade de ar que interfere na medição do equipamento.

O teste realizado obtém as permissividades relativas real  $\epsilon'_r$  e imaginária  $\epsilon''_r$  de acordo com a variação de 0,2 a 4,5 GHz a um passo de 0,2 Ghz. Os resultados dos pontos das permissividades em função da frequência são salvos e permitem que o comportamento seja analisado. A tangente de perdas  $\tan\delta$  é calculada considerando que a condutividade  $\sigma$  dos tecidos é zero (Equação 21).

## 5.2 MODELAGEM, PROJETO E SIMULAÇÃO DAS ANTENAS.

A geometria escolhida para a antena de microfita é retangular, exemplificada por meio da Figura 44. devido à simplicidade quanto à análise do comportamento dos campos eletromagnéticos propagados pelo ressoador. A alimentação escolhida é linha de microfita

devido à facilidade quanto a modelagem matemática. A frequência de projeto escolhida é 2,45 GHz, com largura de banda ISM de 83,5 MHz para atender a classificação do padrão IEEE 802.15.6 *Wireless Body Area Networks*.

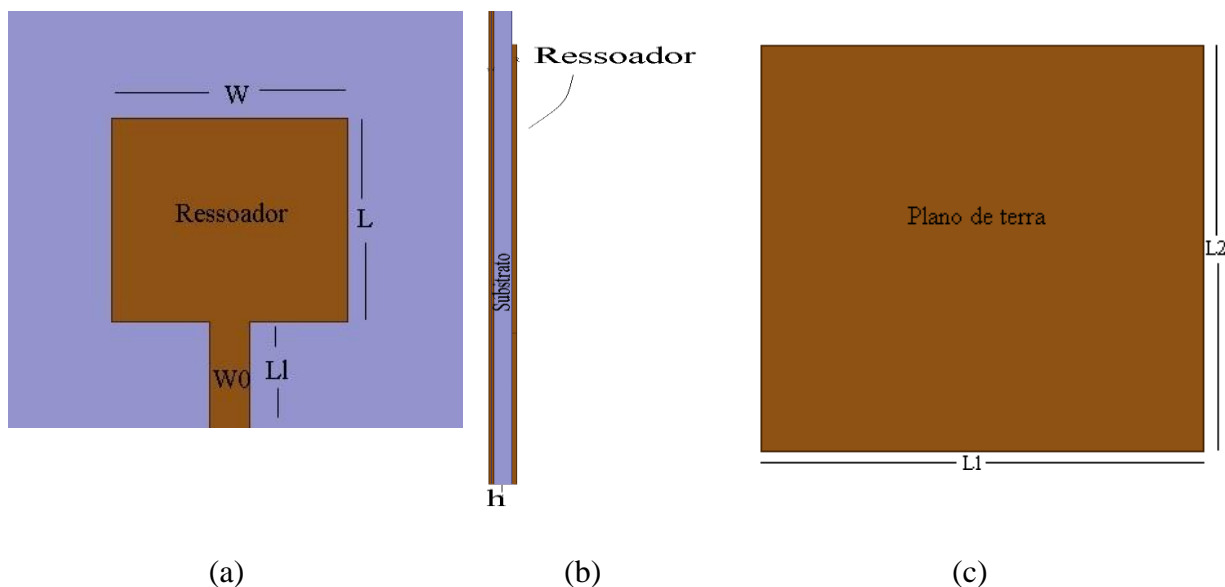


Figura 44 – Geometria (a) vista superior e (b) vista lateral e (c) vista do plano de terra.

Fonte: Autoria própria.

Após as definições do substrato, condutor, frequência e geometria da antena, é realizado com o uso dos métodos da Linha de Transmissão e Método da Cavidade o cálculo das dimensões da geometria da antena. Esses métodos são utilizados devido à facilidade do cálculo das dimensões da antena mesmo com erros devidos as aproximações, esses possíveis erros são corrigidos na etapa de modelagem via *software*. Assim, com as dimensões da antena definida, são realizadas simulações utilizando o *software Ansoft HFSS*® versão 16. Na etapa da simulação, algumas modificações são realizadas aos projetos das antenas via *software* para corresponder às condições reais, tais como a adição dos materiais que compõe os substratos à biblioteca da plataforma de simulação, uso do material condutor e uso do ar para estudo da propagação dos campos ao redor da antena simulada.

São extraídos das simulações o comportamento da perda de retorno, diagrama de radiação 2D, apresentado na Figura 45.a, diagrama 3D de acordo com a Figura 45.b e densidade de corrente, que está representado na Figura 45.c. Todos correspondendo a antena projetada e simulada em questão.



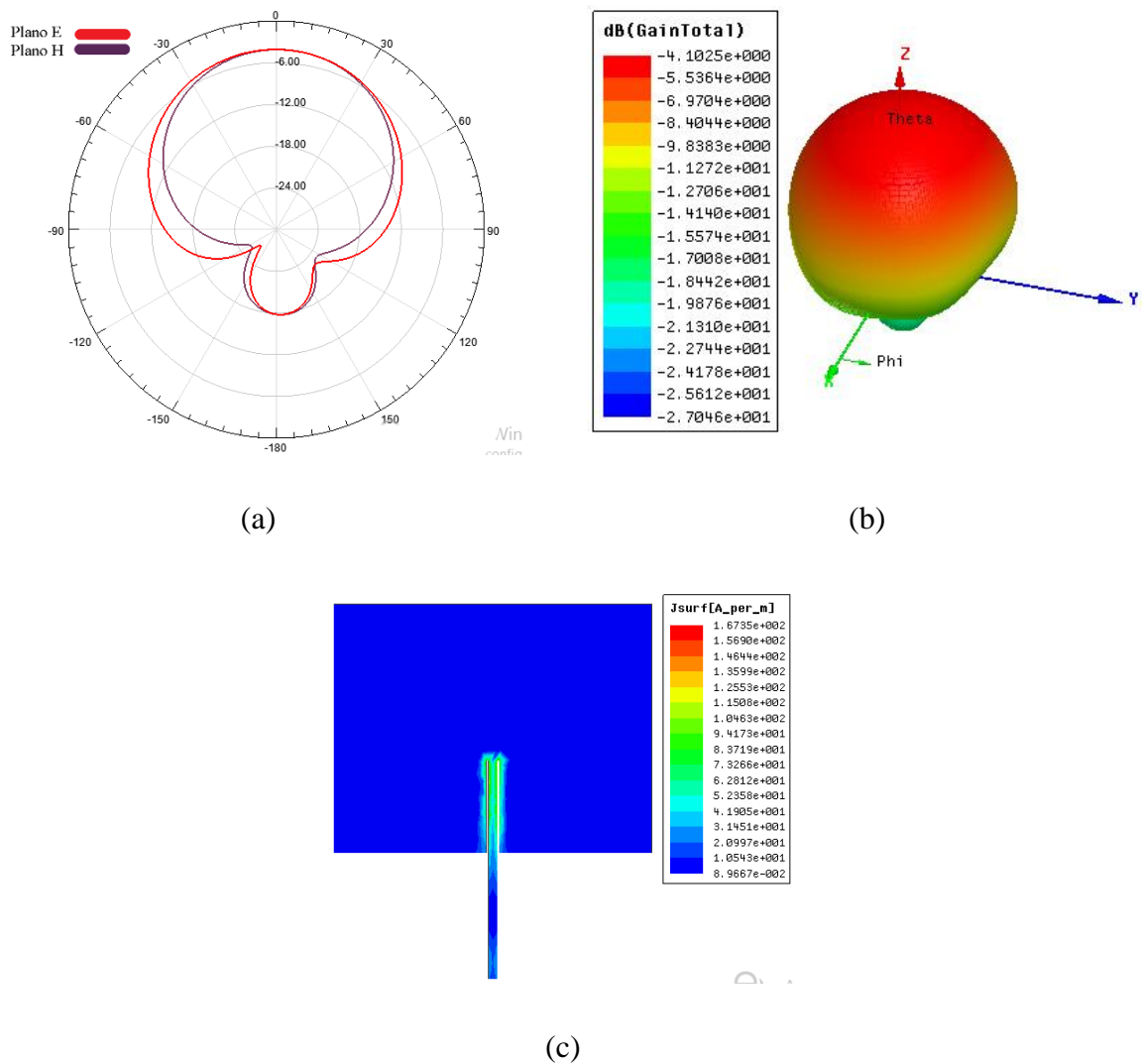
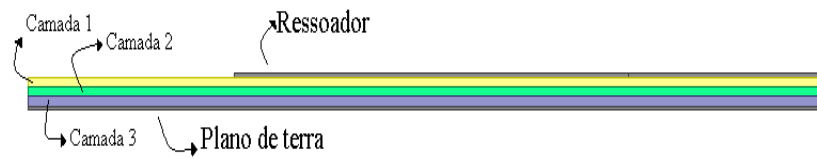


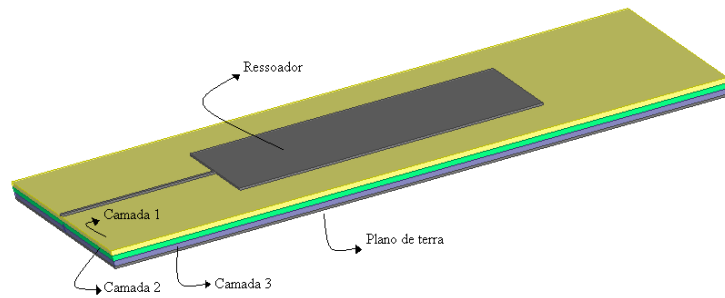
Figura 45 – Resultados fundamentais da simulação de uma antena genérica quanto: (a) padrão de radiação dos campos elétrico e magnético, (b) padrão de radiação 3D da antena e (c) comportamento da densidade de corrente distribuída sobre o ressonador da antena de microfita.

Fonte: Autoria própria.

As escalas de cores contidas no diagrama de radiação 3D e na distribuição das densidades de corrente na superfície do ressonador representam as variadas intensidades do ganho em dB. Os menores valores apresentam coloração azul enquanto os maiores valores coloração vermelha. Concluídas as simulações, é escolhido o material têxtil com o melhor desempenho a fim de ser utilizado na construção da antena de microfita. A antena de microfita têxtil proposta é construída com o uso da sobreposição de três camadas do tecido substrato escolhido com os objetivos de garantir a isolamento elétrica entre as partes condutoras do tecido e de reduzir as dimensões da antena de microfita projetada. As Figuras 46.a e 46.b apresentam a distribuição das partes construtivas do dispositivo proposto.



(a)



(b)

Figura 46 – Distribuições físicas das partes construtivas da antena proposta. (a) vista lateral e (b) vista em perspectiva 3D.

Fonte: Autoria própria.

Após a construção da antena, serão obtidas às características mediante o uso do analisador de espectro ou *Spectrum Analyzer* (SA) Rohde & Schwarz FSH6 apresentado na Figura 47. Os valores simulados e medidos serão comparados a fim de subsidiar as conclusões do trabalho desenvolvido. A variação da frequência do aparelho é de 1 a 6 GHz com o passo de 16,67 MHz.



Figura 47 – Analisador de espectro Rohde & Schwarz FSH6.

Fonte: Autoria própria.

## **6 ANÁLISES DOS RESULTADOS FÍSICOS, ELÉTRICOS E SIMULADOS.**

Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios descritos no capítulo de materiais e métodos quanto às caracterizações físicas e elétricas dos tecidos estudados, esses valores são discutidos quanto a questões que envolvem as etapas de caracterização dos substratos, simulação das antenas via *software*, confecção e medição das características da antena criada. Os resultados das caracterizações físicas são correlacionados com os resultados da caracterização elétrica para subsidiar a escolha do melhor tecido para ser utilizado como substrato.

### **6.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA**

Os resultados dos ensaios físicos são apresentados de acordo com a sequência exposta no capítulo de materiais e métodos. Os resultados permitem mensurar os principais atributos físicos dos tecidos de malha estudados. Os dados obtidos são apresentados nas formas de gráficos e tabelas com o objetivo de facilitar as conclusões acerca dos parâmetros estudados.

#### **6.1.1 Titulação**

O resultado do ensaio de titulação é apresentado no gráfico comparativo da Figura 48, os resultados são reunidos na forma de gráfico de colunas para propiciar uma melhor visão sobre as diferenças entre os valores. Os valores geradores do gráfico também estão apresentados na Tabela 6. De acordo com os resultados, os compostos CO e PUE e PES Direlease contêm os fios mais densos, com Tex de 69,41. O fio com menor título direto Tex está contido no tecido composto pela mistura de PES e PUE, com valor de 39,33.

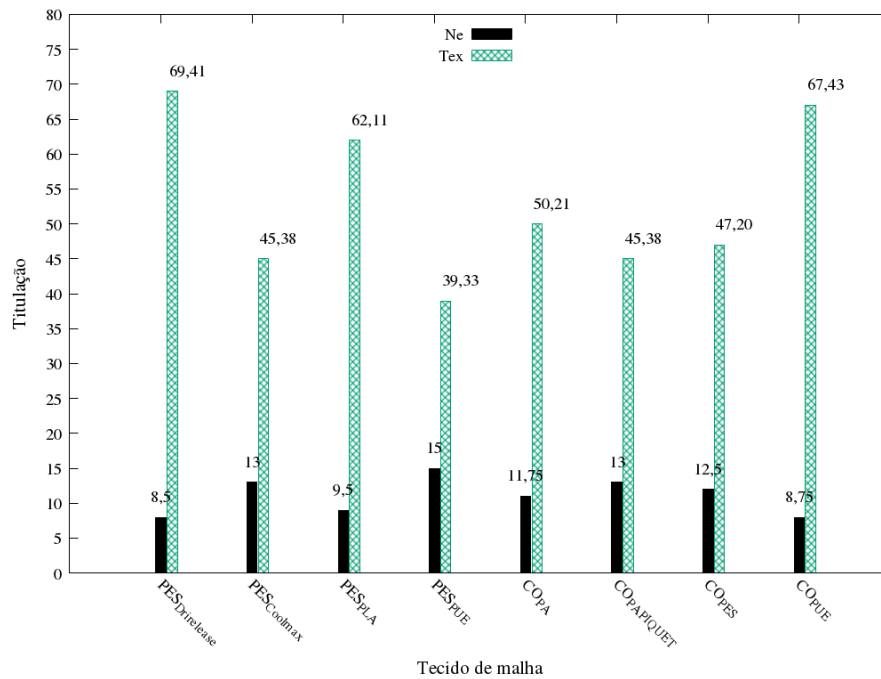


Figura 48 – Gráfico referente à titulação das amostras.  
Fonte: Autoria própria.

Os valores dos títulos diretos Tex e indiretos Ne de todos os tecidos estudados são apresentados na Tabela 6. Esses dados quando analisados junto ao resultado da caracterização elétrica permite uma correlação entre os resultados.

Tabela 6 – Titulação das amostras.

TECIDO	Ne	Tex
CO e PUE	8,75	67,43
CO e PA (piquet)	13,00	45,38
CO e PA	11,75	50,21
CO e PES	12,50	47,20
PES coolmax	13,00	45,38
PES Dirirelease	8,50	69,41
PES e PUE	15,00	39,33
PES e PLA	9,50	62,11

Fonte: Autoria própria.

Os títulos dos fios de cada amostra contribuem para o cálculo da gramatura, pois essa densidade linear pode assumir valores tais que o tecido com mesmo comprimento de laçada e com títulos diferentes resultam em tecidos com gramaturas diferentes.

## 6.1.2 Gramatura

O resultado do ensaio de gramatura é apresentado no gráfico da Figura 49. Assim como o ensaio de titulação, o gráfico adotado é em forma de colunas para facilitar a visualização dos resultados.

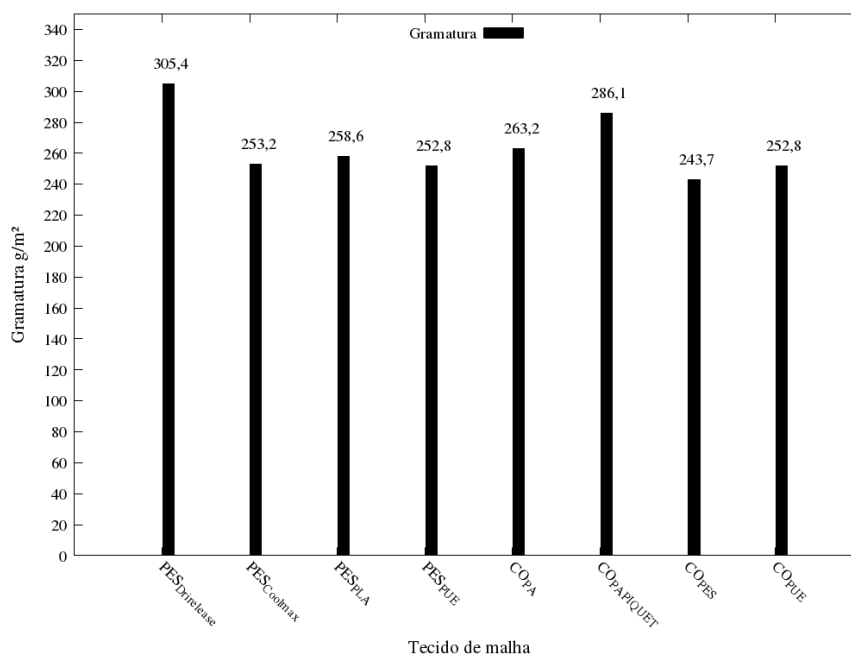


Figura 49 – Gramatura dos tecidos.

Fonte: Autoria própria.

Além do gráfico apresentado, os dados estão exibidos na Tabela 7. Esses valores possibilitam assertivamente distinguir qual dos tecidos apresenta naturalmente uma maior quantidade de espaços vazios.

Tabela 7 – Gramatura dos tecidos selecionados.

TECIDO	GRAMATURA (g/m²)
CO + PUE	126,7333
CO + PA (piquet)	286,1000
CO + PA	263,1667
CO + PES	243,6667
PES coolmax	253,2000
PES Drirelease	305,3667
PES + PUE	252,7667
PES + PLA	258,5667

Fonte: Autoria própria.

Portanto, a gramatura está associada ao título do fio e ao comprimento da laçada. Por conseguinte, de acordo com os resultados do ensaio, o tecido com maior gramatura é PES Drirelease (305,37 g/m<sup>2</sup>). Uma maior gramatura proporciona uma sensação de toque suave e aumento da absorção. Além desses aspectos, não é possível assumir que a permissividade será aproximadamente a do ar, pois a gramatura pode resultar em valores altos tão somente pelo valor alto do título, produzindo a possibilidade de o tecido é ser mais pesado que outro, mas apresentar mais espaços vazios devido ao comprimento da laçada. O tecido de menor gramatura é o CO e PUE (126,7 g/m<sup>2</sup>) mesmo o fio contendo a segunda maior densidade linear devido ao longo comprimento da laçada, o que proporciona uma densidade de fios reduzida, que finalmente torna o tecido com uma baixa gramatura. Esses dados quando analisados junto ao resultado da caracterização elétrica permite uma correlação mais assertiva.

### **6.1.3 Resistência à tração**

O resultado do ensaio a tração é apresentado de acordo com as direções da coluna e carreira das amostras. A resistência à atração é uma característica primordial a aplicação da antena, pois em situações extremas ou ambientes hostis como incêndios, ambientes classificados e mesmo em confrontos de forças armadas, essas situações exigem um tecido que suporte os esforços mecânicos e que garantam a manutenção das características de operação da antena.

O gráfico da Figura 50 apresenta a força aplicada no sentido do curso em função do alongamento do tecido

No sentido da coluna há um alongamento mais expressivo para todos os tecidos de malha, enquanto os picos de esforço entre os dois sentidos são próximos. Essa relação entre o lado que suporta mais esforço e alonga mais é definido por diversos fatores, sendo os principais a estrutura e a composição das fibras que formam o os fios da coluna e do curso.

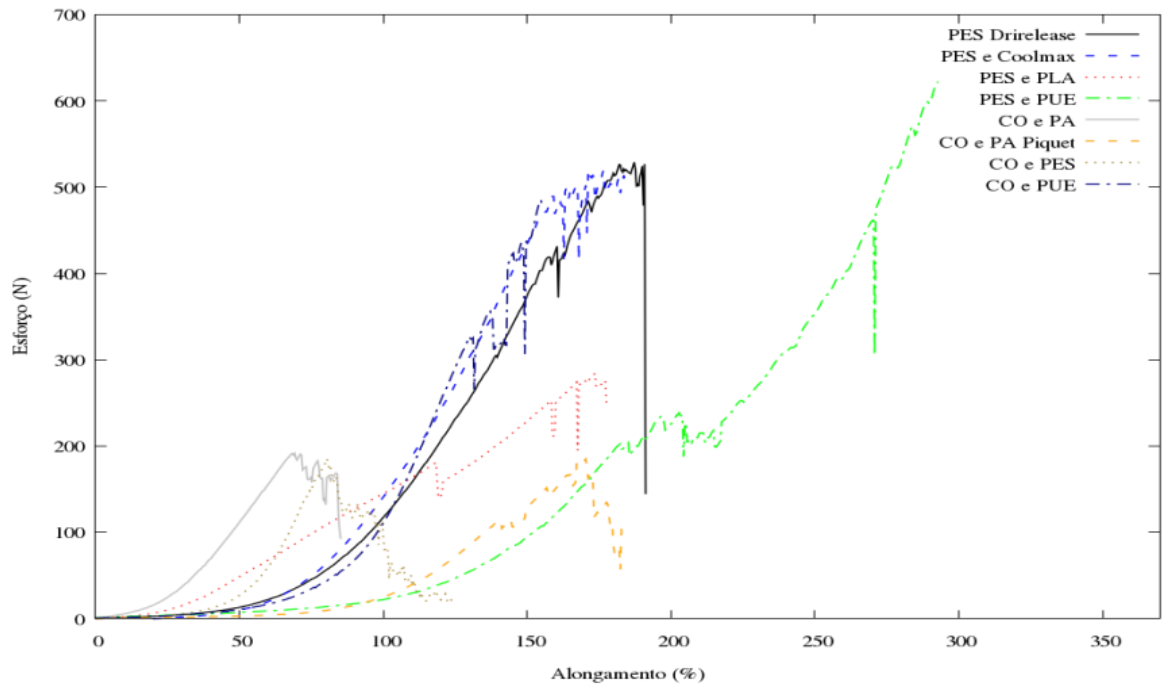


Figura 50 – Resistência à tração no sentido do curso dos tecidos selecionados.

Fonte: Autoria própria.

O gráfico da Figura 51 apresenta a força aplicada no sentido da coluna em função do alongamento do tecido.

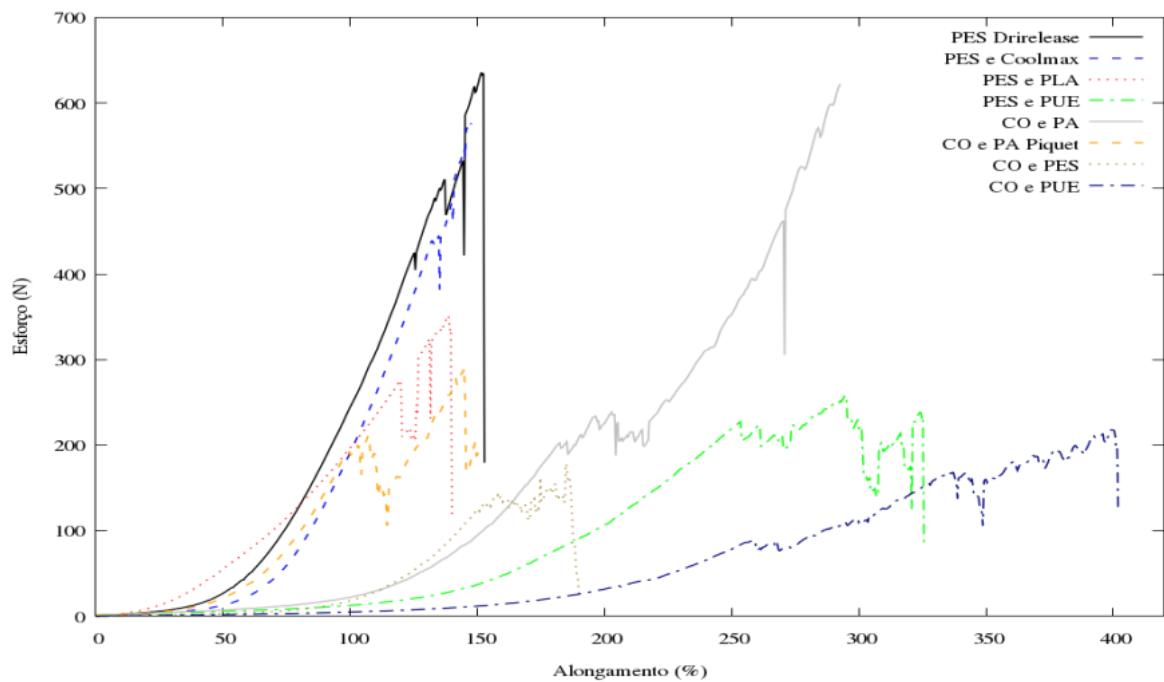


Figura 51 – Resistência à tração no sentido da coluna dos tecidos selecionados.

Fonte: Autoria própria.

Consonante com os dados obtidos a partir dos ensaios é possível definir os picos de esforços suportados pelos corpos e o máximo alongamento. Tudo isso é apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores máximos obtidos no ensaio de resistência a tração.

TECIDO	COLUNA		CURSO	
	FORÇA (N)	ALONGAMENTO (%)	FORÇA (N)	ALONGAMENTO (%)
CO e PUE	218	402	485,1	155,2
CO e PA (Piquet)	287,6	158,6	185,07	183,2
CO e PA	622,3	292,8	191,62	85,2
CO e PES	178,45	190	185,58	124,8
PES Coolmax	576,5	147,6	520,3	185,2
PES Drirelease	635,8	152,8	528,93	191,2
PES e PUE	258,45	325,6	622,3	292,8
PES e PLA	351,6	140	284,4	177,6

Fonte: Autoria própria.

Os resultados do ensaio de resistência à tração demonstra que o maior pico de força é aplicado ao sentido da coluna no tecido PES Drirelease e o maior pico de força no sentido da coluna é do tecido PES e PUE. Em relação ao alongamento os tecidos que contém o PUE apresentam alto valor de alongamento, isso se deve a característica elástica que este tipo de fibra oferece. O tecido menos resistente em ambos os sentidos é o CO e PES, que também apresenta um dos menores alongamentos. Portanto, em termos de resistência a tração o tecido mais indicado é PES Drirelease. No tocante a capacidade de alongamento, o mais indicado é PES e PUE.

#### 6.1.4 Estabilidade dimensional

O ensaio de estabilidade dimensional resulta na análise da capacidade do tecido de, após a lavagem, conseguir manter as suas dimensões. O resultado desse ensaio é demonstrado no gráfico da Figura 52 no sentido da coluna e Figura 53 no sentido do curso.



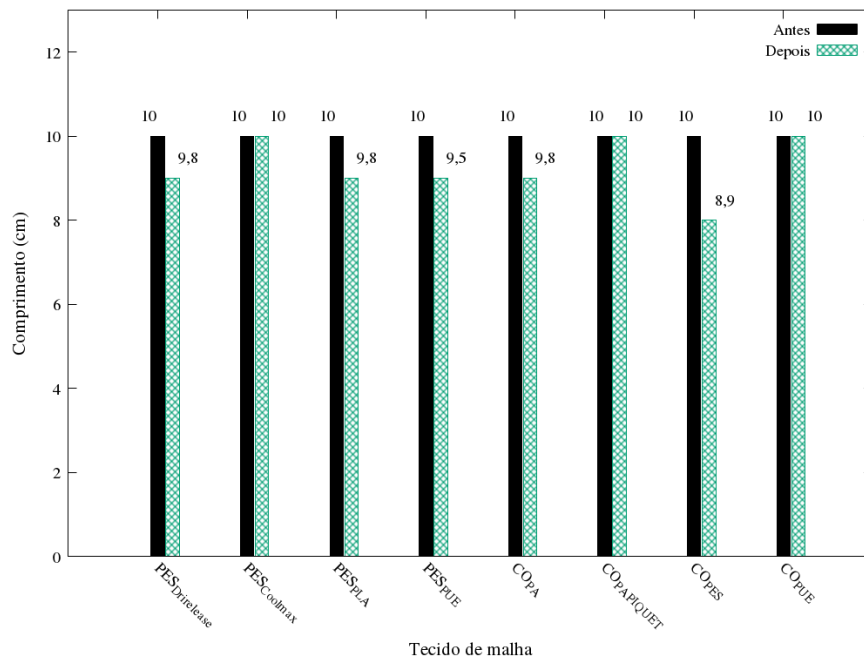


Figura 52 – Resultado do ensaio de estabilidade dimensional no sentido da coluna.

Fonte: Autoria própria.

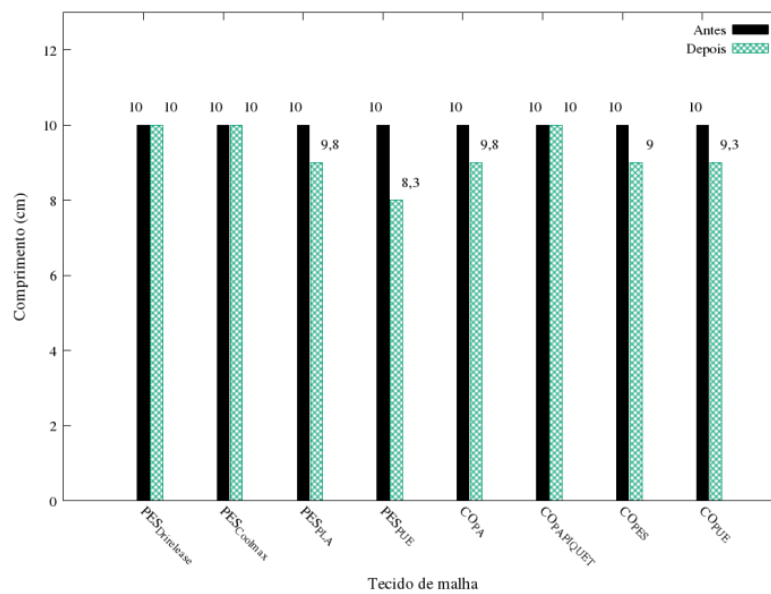


Figura 53 – Resultado do ensaio de estabilidade dimensional no sentido do curso.

Fonte: Autoria própria.

Os dados apresentados nas Figuras 52 e 53 são baseados nos dados contidos na tabela 9. A estabilidade de seis (6) dos oitos (8) tecidos é satisfatória, pois não variam acima de 10% do valor anterior a lavagem segundo a norma ASTM 6207 (ASTM, 2015).

Tabela 9 – Resultados da análise das amostras quanto a estabilidade dimensional.

TECIDO	MEDIDAS								
	Pré-lavagem			Pos-lavagem			Variação (%)		
	coluna (cm)	curso (cm)	área (cm <sup>2</sup> )	coluna (cm)	curso (cm)	área (cm <sup>2</sup> )	coluna	Curso	área
CO e PUE	10	10	100	10	9,3	93	0,00%	-7,00%	-7,00%
CO e PA	10	10	100	9,8	9,8	96,04	-2,00%	-2,00%	-3,96%
CO e PES	10	10	100	8,9	9	80,1	-	-	-
CO e PA (Piquet)	10	10	100	10	10	100	11,00%	10,00%	19,90%
PES Coolmax	10	10	100	10	10	100	0,00%	0,00%	0,00%
PES Drirelease	10	10	100	9,8	10	98	-2,00%	0,00%	-2,00%
PES e PUE	10	10	100	9,5	8,3	78,85	-5,00%	-	-
PES e PLA	10	10	100	9,8	9,8	96,04	17,00%	21,15%	-3,96%

Fonte: Autoria própria.

Baseado nos resultados é observado que o CO e PA (Piquet) e o PES Coolmax apresentam melhor estabilidade, pois não houve variação tanto na coluna como na carreira. A estabilidade é importante fator quanto à manutenção das características da antena, pois o traje seja qual for à aplicação deverá ser lavado e assim, o tecido mudará quanto suas dimensões e causará variações nas características da antena.

### 6.1.5 Caracterização elétrica

Os comportamentos da permissividade real e da tangente de perdas dos tecidos de malha são apresentados nos gráficos das Figuras 54 e 55, respectivamente. Todos os valores são obtidos numa variação da frequência de 0,2 a 4,5 GHz.

Esses comportamentos semelhantes são devidos a presença em todos os casos de espaços vazios, pois todos os tecidos apresentam regiões não preenchidas, o que produz uma resposta a variação da frequência muito semelhante entre os tecidos. Os valores alcançados diferentes são devidos a composição das fibras e a densidade de fios de cada tecido.

De acordo com os resultados, os picos de permissividade relativa real estão dentro do intervalo de 0,2 a 1,23 GHz, em contrapartida a tangente de perda está ascendendo de acordo com o aumento da frequência, e na faixa de 0,97 a 2,26 GHz estão localizados os picos de tangente de perda.

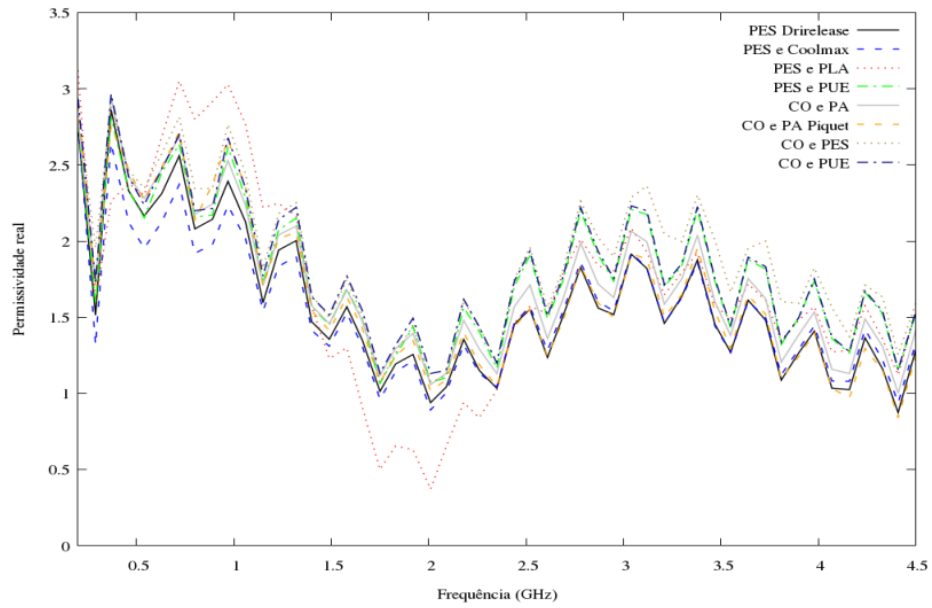


Figura 54 – Comportamento da permissividade real dos tecidos de malha em função da variação da frequência.

Fonte: Autoria própria.

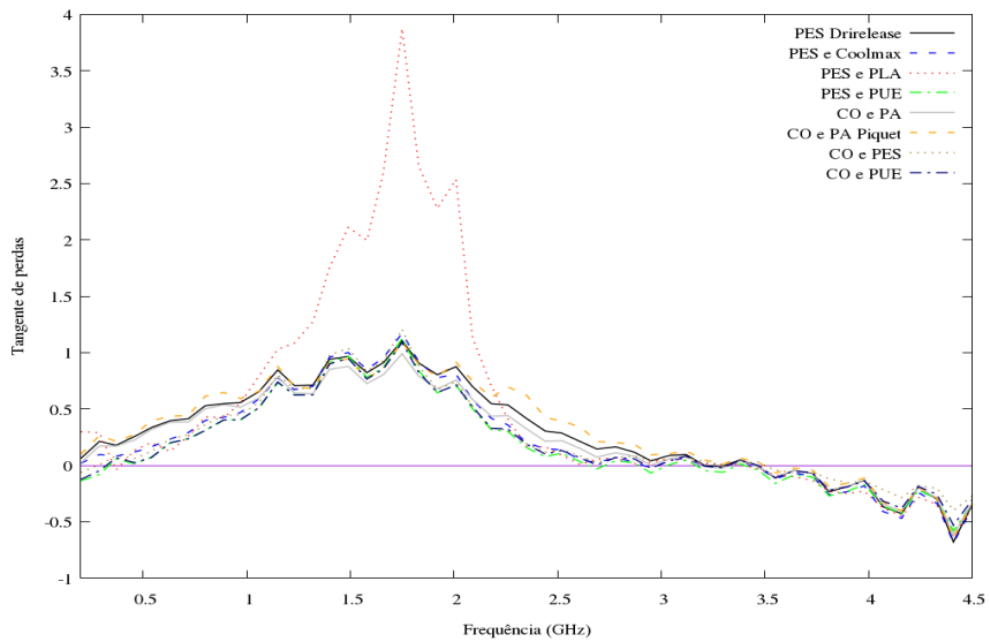


Figura 55 – Variação da tangente de perdas dos tecidos de malha em função da variação da frequência.

Fonte: Autoria própria

A tabela 10 contabiliza os valores exatos das características elétricas medidas dos oito tecidos estudados na frequência escolhida como base de 2,45 GHz.

Tabela 10 – Características elétricas dos tecidos selecionados e sua estrutura.

TECIDOS	ESTRUTURA	$\epsilon'$	$\epsilon''$	tang $\delta$
CO e PUE	Jersey	1,737	0,178	0,102
CO e PA	Jersey	1,571	0,339	0,216
CO e PES	Jersey	1,754	0,206	0,118
CO e PA (Piquet)	Piquet simples	1,437	0,613	0,427
PES Coolmax	Multifuncional	1,463	0,219	0,150
PES Drirelease	Multifuncional	1,453	0,444	0,306
PES e PUE	Jersey	1,705	0,132	0,077
PES e PLA	Jersey	1,464	0,243	0,166

Fonte: Autoria própria.

Os resultados demonstram que o melhor tecido quanto às características elétricas é o PES e PUE, pois tem uma das maiores permissividades reais (1,7046) e menor tangente de perdas (0,0773). Quanto à estabilidade dimensional apresentou o segundo pior resultado, variando -5% na carreira e -17% na coluna. Quanto ao ensaio de tração, a coluna teve um pico de esforço de 258,45 N e alongamento de 325,6 %, enquanto na carreira o pico foi de 622,3 N e alongamento de 292,8 %. Apesar do valor baixo do pico de esforço no sentido do alongamento, o PES e PUE apresenta um valor mediano entre os tecidos analisados.

Os tecidos com maior estabilidade dimensional são PES Coolmax e CO e PA (Piquet). Este último tem a maior tangente de perdas, 0,4267, o que significa que aproximadamente 43% da permissividade é imaginária, isso significa que grande parte da energia da onda eletromagnética é perdida no substrato e isso reduz consideravelmente a eficiência da antena.

O PES Coolmax tem tangente de perdas de aproximadamente de 15%, e permissividade relativa real de aproximadamente 1,46. Quanto à resistência a tração, a coluna teve pico de 576,5 N e alongamento de 147,6 %, já para a carreira, um pico de 520,3 N e alongamento de 185,2, portanto o PES Coolmax se configura como um dos melhores substratos.

O tecido com estabilidade alta, permissividade relativa real alta, baixa tangente de perdas e resistência à tração mediana, é o CO e PUE. O mesmo Apresenta 0% de variação no sentido da coluna e -7% no sentido da carreira,  $\epsilon' = 1,7367$ ,  $\tan\delta_{\text{dielétrico}} = 0,1023$ , pico de

esforço 218 N e alongamento de 402 % no sentido da coluna e por fim, pico de 485,1 N e 155,2 % de alongamento no sentido da carreira.

Um dielétrico ideal teria tangente de perdas igual à zero, ou seja, nenhuma energia seria dissipada. De acordo com o gráfico da Figura 51, existem raízes que representam este estado ideal, em torno de 0,2, 2,69, 2,95 GHz e de 3,20 a 3,47 GHz. A tangente de perdas negativa ocorre quando a parte imaginária da permissividade é negativa (0,2 e 3,3 a 4,5 GHz). Entende-se que isso ocorre quando o substrato passa ter um comportamento semelhante ao de condutores, atenuando o campo de forma intensa e gerando ondas evanescentes que são rapidamente dissipadas ao longo do substrato. O pico das tangentes ocorre simultaneamente para todas as malhas na faixa 0,37 a 2,3 GHz, tal comportamento ocorre com a maioria dos materiais encontrados na natureza. Ambas as condições: picos e valores negativos da tangente de perdas inviabilizam o uso dos tecidos nessa faixa de frequência quando se deseja aplicações em antenas. A alta tangente de perda pode ser aplicada a situações aonde se deseje uma alta absorção da onda eletromagnética, tais como aplicações militares.

## 6.2 RESULTADOS COMPUTACIONAIS

São dimensionadas e simuladas 6 antenas, cada uma atribuída a um dos 6 tecidos de malha estudados no trabalho. As antenas correspondentes aos tecidos PES Drirelease e CO e PA Piquet não apresentaram comportamento como antena em nenhuma das frequências analisadas e, portanto não são apresentadas nos resultados computacionais. Para a altura do substrato, são utilizadas as medidas da espessura do fio e do tecido de cada malha, sendo considerada a sobreposição de três camadas a fim de garantir a isolação entre as partes condutivas do circuito e reduzir o tamanho do ressoador e a largura da linha de microfita  $W_0$ . A tabela 11 apresenta os valores das espessuras dos fios e tecidos analisados.

Tabela 11 - Valores das espessuras dos fios e tecidos analisados.

Tecidos de malha	Linhas (mm)	Tecidos (mm)
PES Drirelease	0,12	0,64
PES Coolmax	0,18	0,6
PES e PLA	0,14	0,62
PES e PUE	0,26	0,8
CO e PA	0,2	0,74
CO e PA Piquet	0,18	0,76
CO e PES	0,26	0,68
CO e PUE	0,16	0,48

Fonte: Autoria própria

A relação entre a espessura do fio e do tecido não é linear devido aos aspectos construtivos dos tecidos, tais como: estrutura da malha e sobreposições entre as linhas. Os valores foram obtidos com o uso de um paquímetro analógico como mostrado na Figura 56.



Figura 56 – Paquímetro analógico comum.

Fonte: Autoria própria.

### 6.2.1 PES Coolmax

O tecido PES Coolmax é construído com uma estrutura multifuncional, de tal forma que há uma quantidade maior de poros no tecido, proporcionando maior ventilação ao usuário. A tabela 12 apresenta as características de projeto e as dimensões da antena calculadas mediante o uso dos métodos da Cavidade e linha de Transmissão com o uso do substrato flexível formado pelo tecido de malha PES Coolmax.

Tabela 12 – Características da antena com substrato composto por PES Coolmax.

Características do projeto	Valores
$f_r$ (GHz)	2,45
$\epsilon_r$	1,4795
$\tan\delta_{\text{dielétrico}}$	0,1499
$\sigma_{\text{condutor}}$ (S.m <sup>-1</sup> )	$5,8 \times 10^7$
W (mm)	54,94
L (mm)	48,78
$W_0$ (mm)	7,12
$L_l$ (mm)	25,46
H (mm)	1,8

Fonte: Autoria própria.

A antena apresenta dimensões elevadas quando comparadas a outras antenas de microfita comerciais. Essas diferenças ocorrem devido à baixa permissividade relativa do material, que ocorre devido à presença de espaços vazios na estrutura dos tecidos. A baixa permissividade efetiva  $E_{\text{eff}}$  do substrato resulta na necessidade de que as partes construtivas da antena tenham maiores dimensões. A Figura 57 apresenta a perda de retorno da antena simulada na faixa de frequência de 1 a 4,5 GHz.

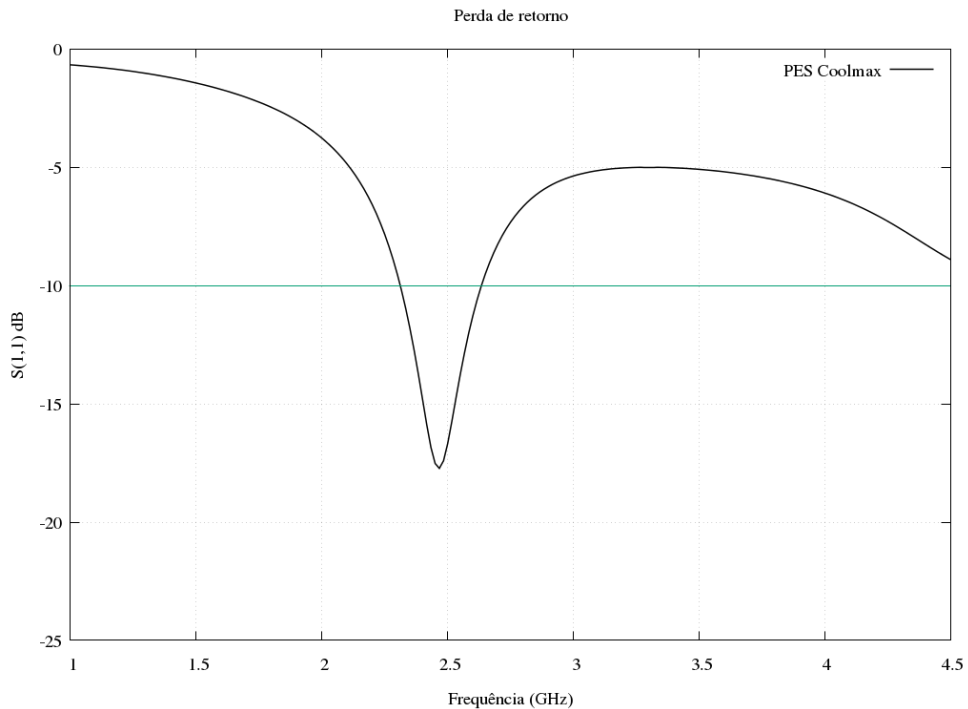


Figura 57 – Perda de retorno da antena simulada com PES Coolmax.

Fonte: Autoria própria.

A frequência de ressonância no primeiro ocorre em torno de 2,45 GHz (-17,5218 dB), com largura de banda de 316 MHz, 2,3166 (-10.22 dB) a 2.6333 (-10.02 dB). Portanto, a antena corresponde ao projeto para os valores mínimos da banda ISM (2.45 a 2,53 GHz), 83,5 MHz. A Figura 58 apresenta o padrão de radiação (Figura 58.a) e o diagrama de radiação em três dimensões (Figura 58.b).

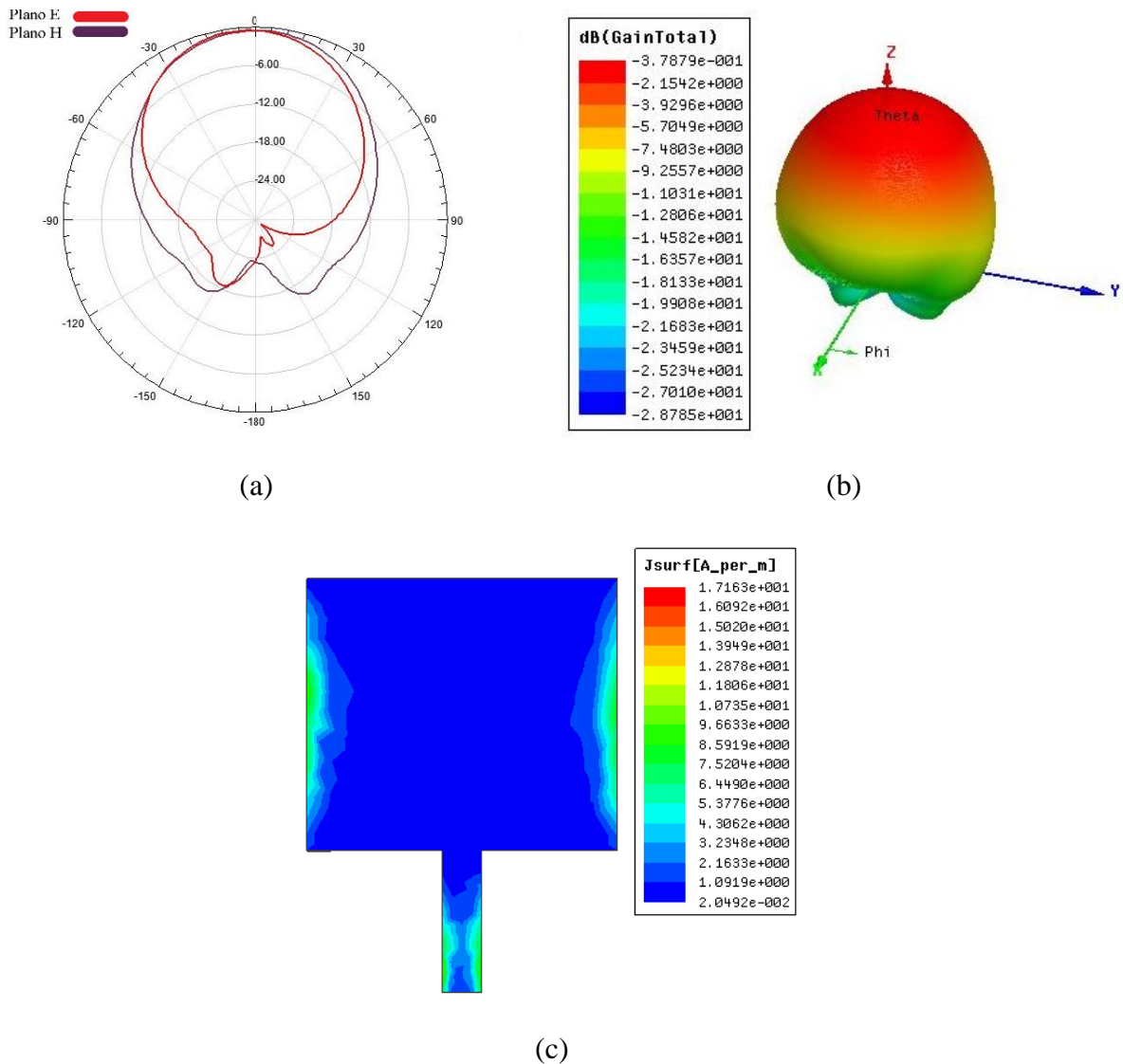


Figura 58 – (a) padrão de radiação, (b) diagrama de radiação 3D da antena com substrato composto pelo tecido de malha PES Coolmax e (c) densidade linear de corrente no ressoador da antena de microfita.

Fonte: Autoria própria

As Figuras 58.a e 58.b apresentam a distorção quanto aos lobos secundários devido a tangente de perdas da antena. Apesar disto, a antena se mostra diretiva e com radiação semelhante a antenas de microfita convencionais. A Figura 58.c representa a distribuição da densidade linear de corrente na frequência de 2,45 GHz, a presença de densidade de corrente



no ressonador indica o valor reduzido da perda de retorno. Apesar de obter boas características físicas, o tecido de malha PES Coolmax não é indicado para a fabricação da antena devido ao alto valor da tangente de perdas (0,1499) quando comparado a valores comerciais.

### 6.2.2 PES e PLA

O tecido composto por PES e PLA apresenta uma estrutura Jersey, que corresponde ao tipo mais simples de malha. A tabela 13 apresenta as características de projeto e as dimensões da antena calculadas mediante o uso dos métodos da cavidade e linha de transmissão com o uso do substrato flexível formado pelo tecido de malha PES e PLA.

Tabela 13 -- Características da antena com substrato composto por PES e PLA.

Características do projeto	Valores
$f_r$ (GHz)	2,45
$\epsilon_r$	1,4839
$\tan\delta_{\text{dielétrico}}$	0,1661
$\sigma_{\text{condutor}}$ (S.m <sup>-1</sup> )	$5,8 \times 10^7$
W (mm)	54,90
L (mm)	48,66
$W_0$ (mm)	7,33
$L_l$ (mm)	25,44
H (mm)	1,86

Fonte: Autoria própria.

A Figura 59 apresenta a perda de retorno da antena simulada na faixa de frequência de 1 a 10 GHz.

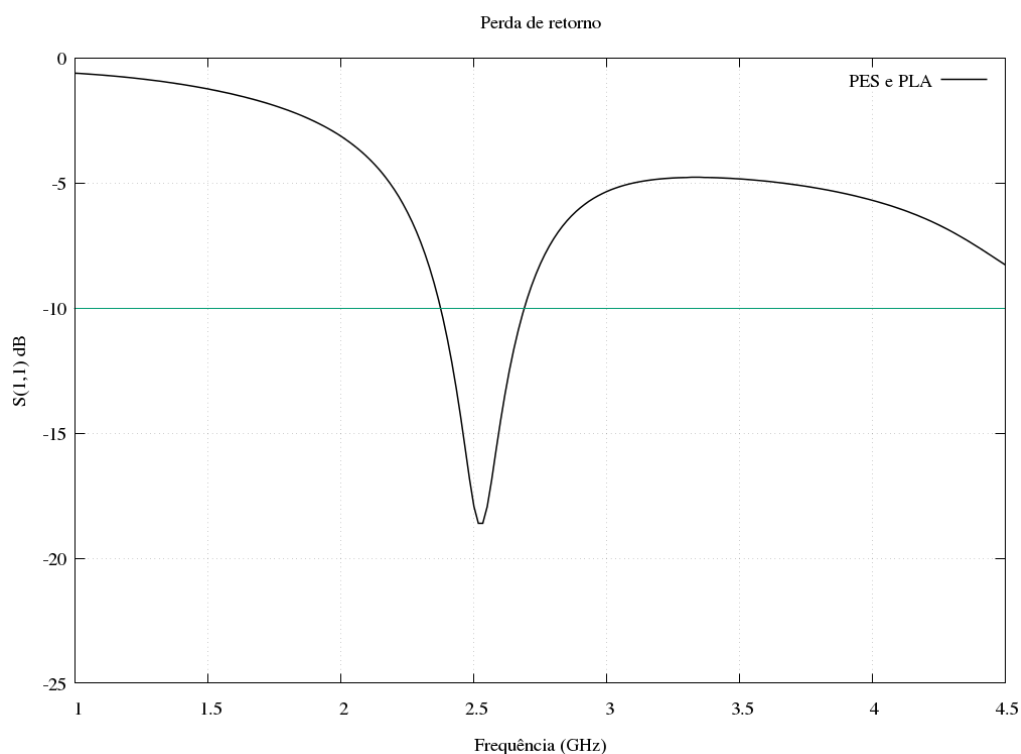
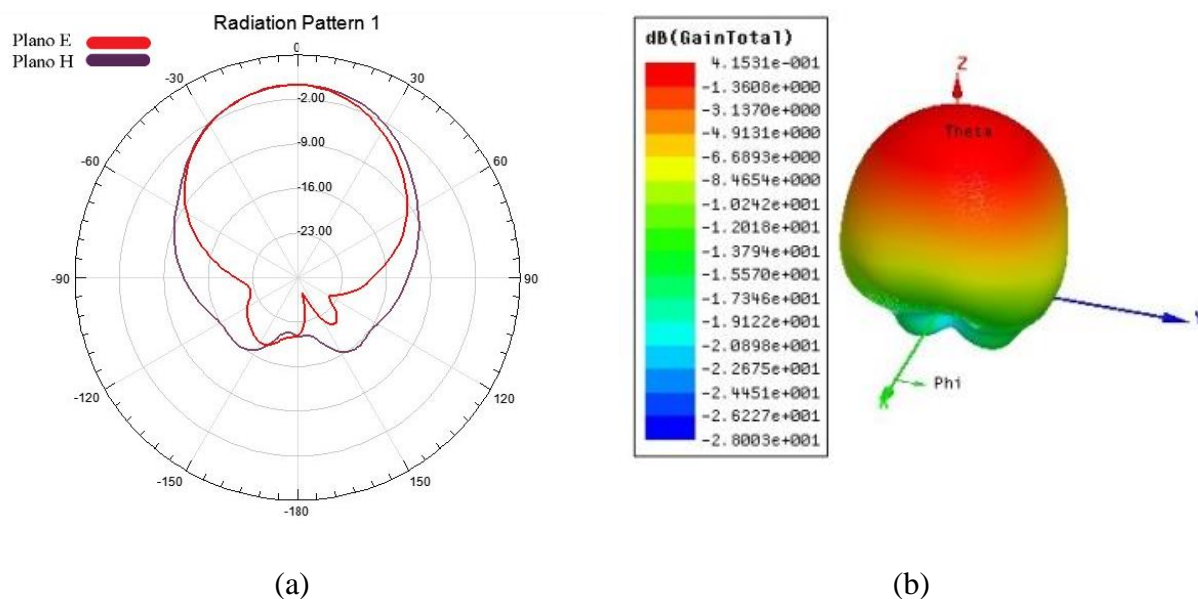
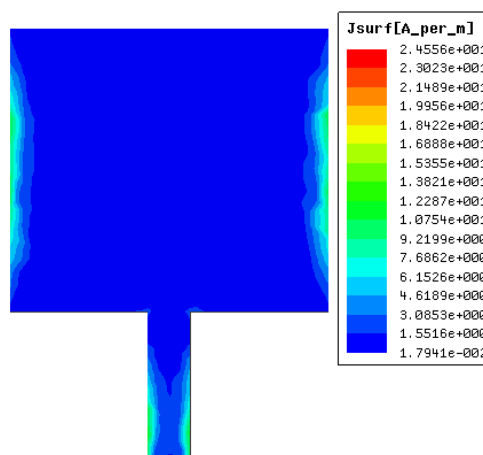


Figura 59 – Perda de retorno da antena simulada com PES e PLA.

Fonte: Autoria própria.

A frequência de ressonância no primeiro modo ocorre em torno da frequência de 2,52 GHz (-18,6076 dB), com largura de banda de 300 MHz, 2,3833 (-10,4049 dB) a 2.6833 (-10,22 dB). Portanto, a antena corresponde ao projeto para os valores mínimos da banda ISM (2.45 a 2,53 GHz), 83,5 MHz. A Figura 60 apresenta o padrão de radiação (Figura 60.a) e o diagrama de radiação em três dimensões (Figura 60.b).





(c)

Figura 60 – (a) padrão de radiação, (b) diagrama de radiação 3D da antena com substrato composto pelo tecido de malha PES e PLA e (c) densidade linear de corrente no ressoador da antena de microfita.

Fonte: Autoria própria

As Figuras 60.a e 60.b demonstram a distorção quanto aos lobos secundários devido a tangente de perdas da antena. Apesar disto, a antena se mostra diretiva e com radiação semelhante a antenas de microfita convencionais. A Figura 60.c apresenta a densidade linear da corrente distribuída no ressoador na frequência de 2,45 GHz, devido ao baixo coeficiente de reflexão, há a presença de correntes elétricas nas extremidades do ressoador. O tecido de malha PES e PLA não é indicado para a fabricação da antena devido ao alto valor da tangente de perdas (0,1661) quando comparado a valores comerciais.

### 6.2.3 PES e PUE

O tecido de malha composto pela mistura de PES e PUE é construído com a estrutura Jersey e, portanto apresenta baixa estabilidade física devido a estrutura e a presença de PUE. A tabela 14 apresenta as características de projeto e as dimensões da antena calculadas mediante o uso dos métodos da cavidade e linha de transmissão com o uso do substrato flexível formado pelo tecido de malha PES e PUE.

Tabela 14 – Características da antena com substrato composto por PES e PUE.

Características do projeto	Valores
$f_r$ (GHz)	2,45
$\epsilon_r$	1,7096
$\tan\delta_{\text{dielétrico}}$	0,0773
$\sigma_{\text{condutor}}$ ( $\text{S.m}^{-1}$ )	$5,8 \times 10^7$
W (mm)	52,56
L (mm)	45,06
$W_0$ (mm)	8,70
$L_l$ (mm)	23,88
H (mm)	2,4

Fonte: Autoria própria.

A Figura 61 apresenta a perda de retorno da antena simulada na faixa de frequência de 1 a 4,5 GHz.

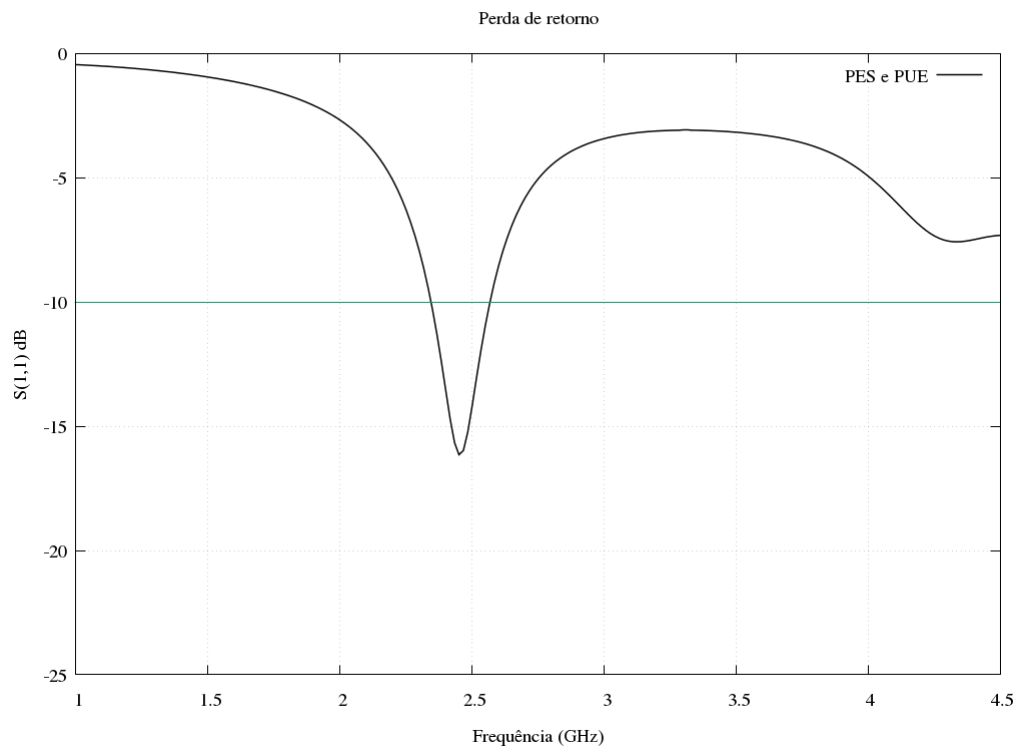


Figura 61 — Perda de retorno da antena simulada com PES e PUE.

Fonte: Autoria própria.

A frequência de ressonância no primeiro modo ocorre em torno da frequência de 2,45 GHz (-16,1470 dB), com largura de banda de 216 MHz, 2,35 (-10,3169 dB) a 2,56 (-10,0344

dB). Portanto, a antena corresponde ao projeto para os valores mínimos da banda ISM (2.45 a 2,53 GHz), 83,5 MHz. A Figura 62 apresenta o padrão de radiação (Figura 62.a) e o diagrama de radiação em três dimensões (Figura 62.b).

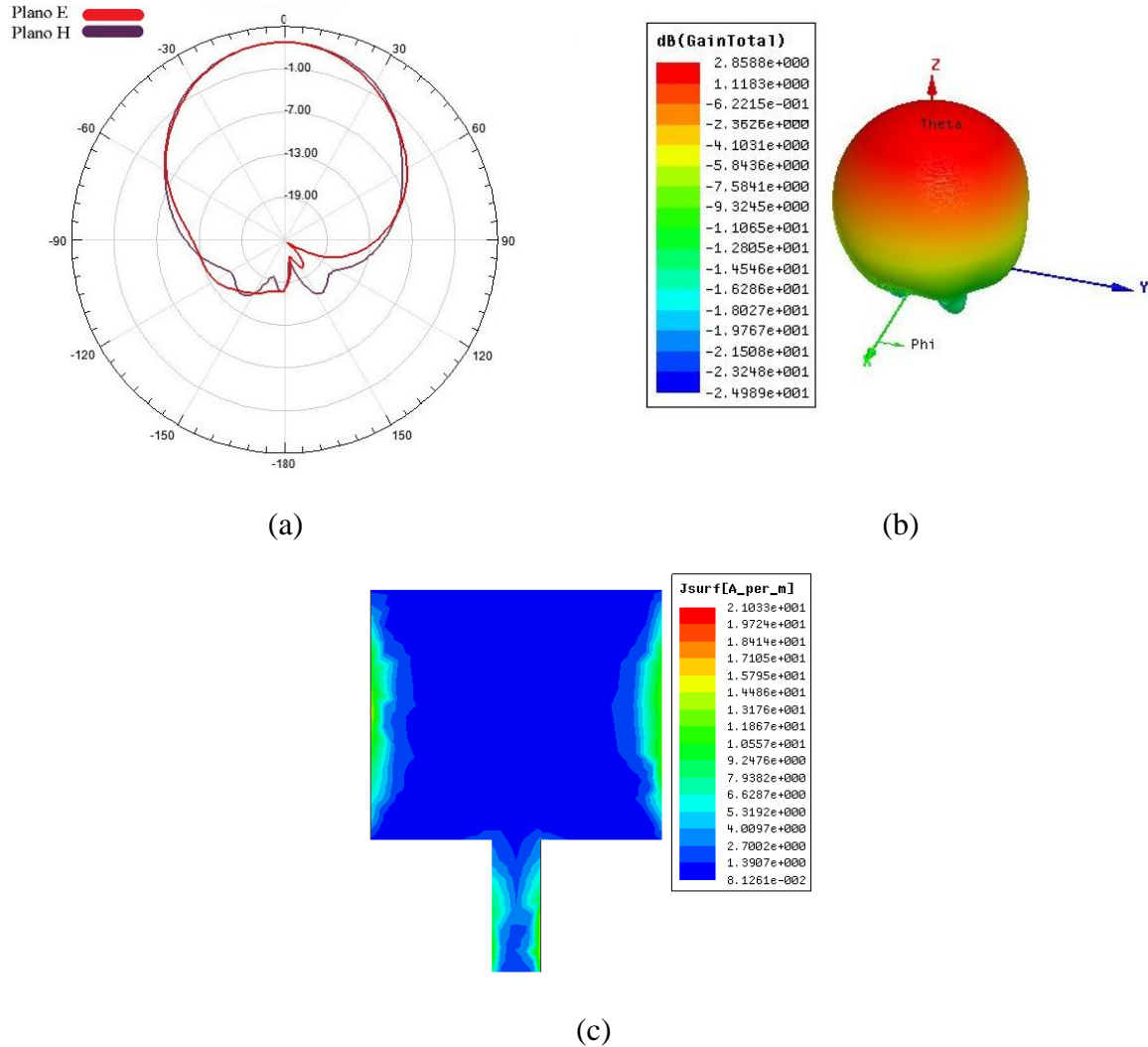


Figura 62 - (a) padrão de radiação, (b) diagrama de radiação 3D da antena com substrato composto pelo tecido de malha PES e PUE e (c) densidade linear de corrente no ressoador da antena de microfita.

Fonte: Autoria própria

As Figuras 62.a e 62.b apresentam a distorção quanto aos lobos secundários devido a tangente de perdas da antena. Apesar disto, a antena se mostra diretiva e com radiação semelhante a antenas de microfita convencionais. A Figura 62.c apresenta a distribuição da densidade de corrente linear na frequência de 2,45 GHz. A presença de fluxo de cargas elétricas no ressoador é devida a baixa perda de retorno na frequência de operação. O tecido

de malha PES e PUE é o indicado para a fabricação da antena devido ao baixo valor da tangente de perdas (0,0773) quando comparado aos valores obtidos dos outros tecidos.

#### 6.2.4 CO e PA

O tecido composto pela mistura de CO e PA é construído com uso da estrutura Jersey. Apesar de a estrutura Jersey proporcionar baixa estabilidade física, a fibra de PA proporciona baixa flexibilidade e, portanto proporciona ao tecido a manutenção das dimensões quando este não está submetido a tensões físicas. A tabela 16 apresenta as características de projeto e as dimensões da antena calculadas mediante o uso dos métodos da cavidade e linha de transmissão com o uso do substrato flexível formado pelo tecido de malha CO e PA.

Tabela 15 – Características da antena com substrato composto por CO e PA.

Características do projeto	Valores
$f_r$ (GHz)	2,45
$\epsilon_r$	1.6071
$\tan\delta_{\text{dielétrico}}$	0,2161
$\sigma_{\text{condutor}}$ (S.m <sup>-1</sup> )	$5,8 \times 10^7$
W (mm)	53,58
L (mm)	46,50
$W_0$ (mm)	8,58
$L_l$ (mm)	24,56
H (mm)	2,28

Fonte: Autoria própria.

A Figura 63 apresenta a perda de retorno da antena simulada na faixa de frequência de 1 a 4,5 GHz.

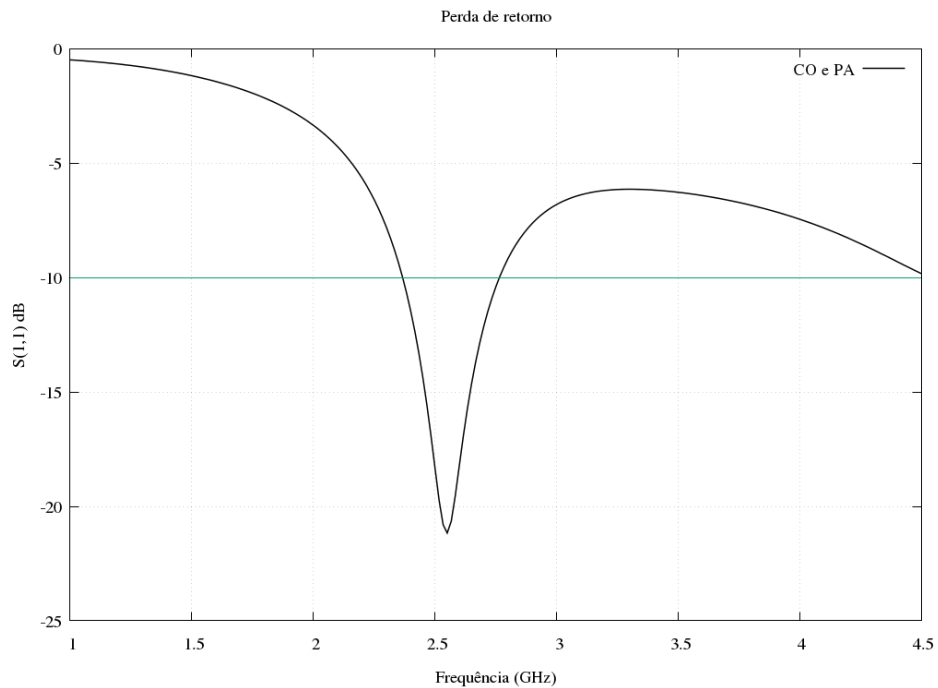
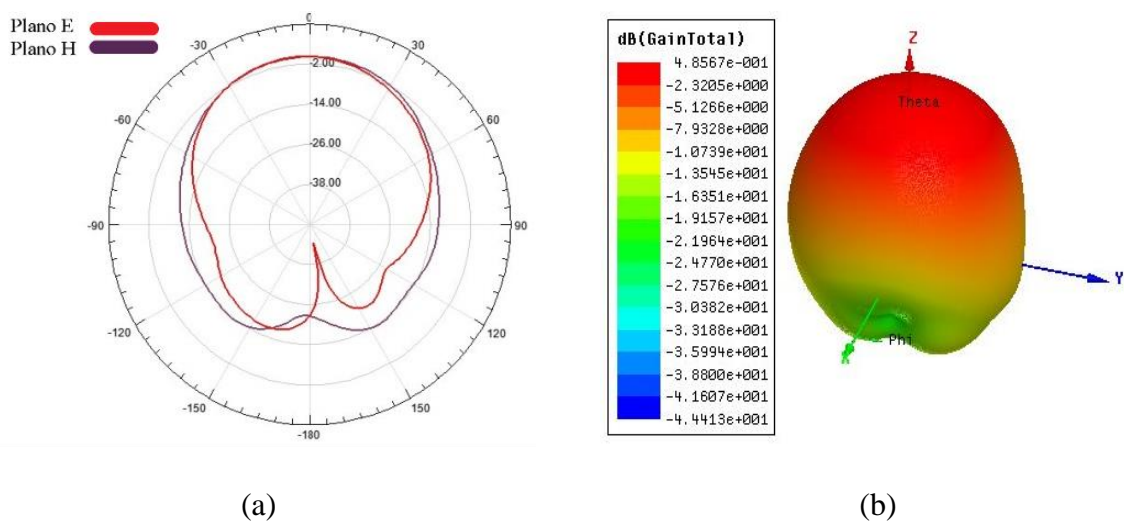
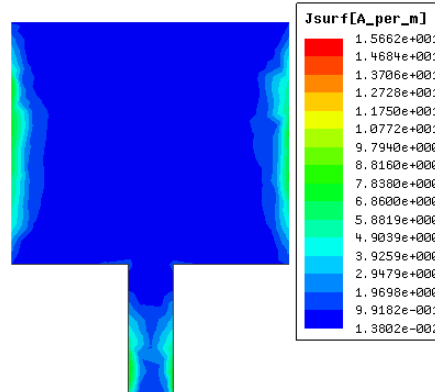


Figura 63 – Perda de retorno da antena simulada com CO e PA.

Fonte: Autoria própria.

A frequência de ressonância no primeiro modo ocorre em torno da frequência de 2,55 GHz (-21,1654 dB), com largura de banda de 367 MHz, 2,38 (-10,6896 dB) a 2,75 (-10,4040 dB). Portanto, a antena corresponde ao projeto para os valores mínimos da banda ISM (2.45 a 2,53 GHz), 83,5 MHz. A Figura 64 apresenta o padrão de radiação (Figura 64.a) e o diagrama de radiação em três dimensões (Figura 64.b).





(c)

Figura 64 – (a) padrão de radiação, (b) diagrama de radiação 3D da antena com substrato composto pelo tecido de malha CO e PA e (c) densidade linear de corrente no ressoador da antena de microfita.

Figura Fonte: Autoria própria

As Figuras 64.a e 64.b apresentam a distorção quanto aos lobos secundários devido a tangente de perdas da antena. Apesar disto, a antena se mostra diretiva e com radiação semelhante a antenas de microfita convencionais. O tecido de malha CO e PA não é o indicado para a fabricação da antena devido ao alto valor da tangente de perdas (0,2161) quando comparado aos valores obtidos dos outros tecidos.

### 6.2.5 CO e PES

O tecido composto pela mistura de CO e PES é composto pela estrutura Jersey, apresenta uma baixa estabilidade física, pois as fibras tanto de CO como de PES não apresentam boa manutenção das dimensões quando os fios não estão submetidos a tensões físicas. A tabela 18 apresenta as características de projeto e as dimensões da antena calculadas mediante o uso dos métodos da cavidade e linha de transmissão com o uso do substrato flexível formado pelo tecido de malha CO e PES.

Tabela 16 – Características da antena com substrato composto por CO e PES.

Características do projeto	Valores
$f_r$ (GHz)	2,45
$\epsilon_r$	1.7663



$\tan\delta_{\text{dielétrico}}$	0,1177
$\sigma_{\text{condutor}} (\text{S.m}^{-1})$	$5,8 \times 10^7$
W (mm)	52,02
L (mm)	44,51
$W_0$ (mm)	7,89
$L_l$ (mm)	23,49
H (mm)	2,22

Fonte: Autoria própria.

A antena apresenta dimensões elevadas quando comparadas a outras antenas de microfita comerciais. Essas diferenças ocorrem devido à baixa permissividade do material.

A Figura 65 apresenta a perda de retorno da antena simulada na faixa de frequência de 1 a 4,5 GHz.

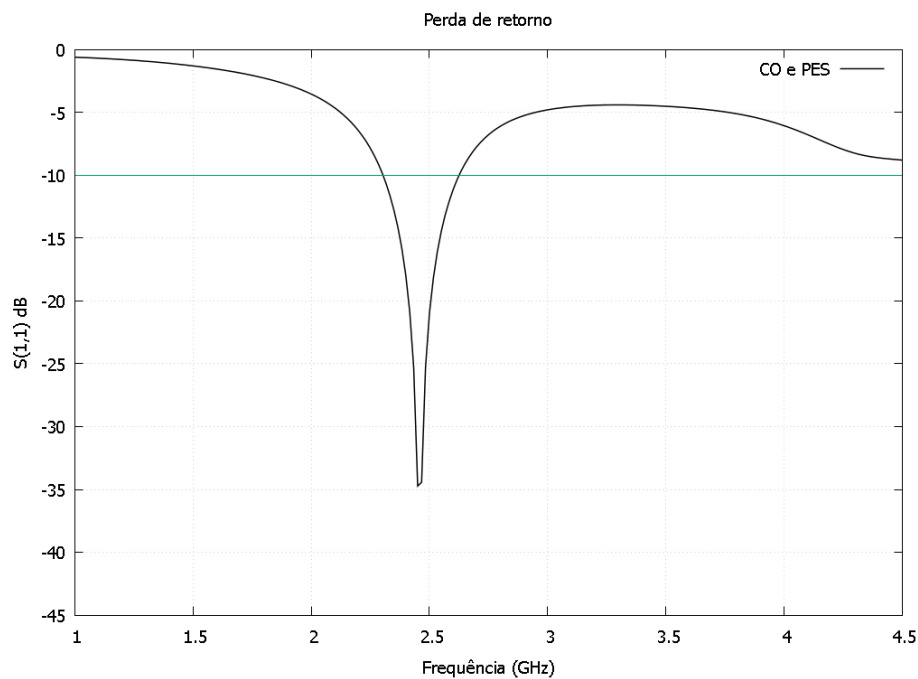


Figura 65 – Perda de retorno da antena simulada com CO e PES.

Fonte: Autoria própria.

A frequência de ressonância no primeiro modo ocorre em torno da frequência de 2,45 GHz (-34,7280 dB), com largura de banda de 300 MHz, 2,32 GHz (-10,6674 dB) a 2,62 GHz (-10,3524 dB). Portanto, a antena corresponde ao projeto para os valores mínimos da banda ISM no (2.45 a 2,53 GHz), 83,5 MHz. A Figura 66 apresenta o padrão de radiação (Figura 66.a) e o diagrama de radiação em três dimensões (Figura 66.b).

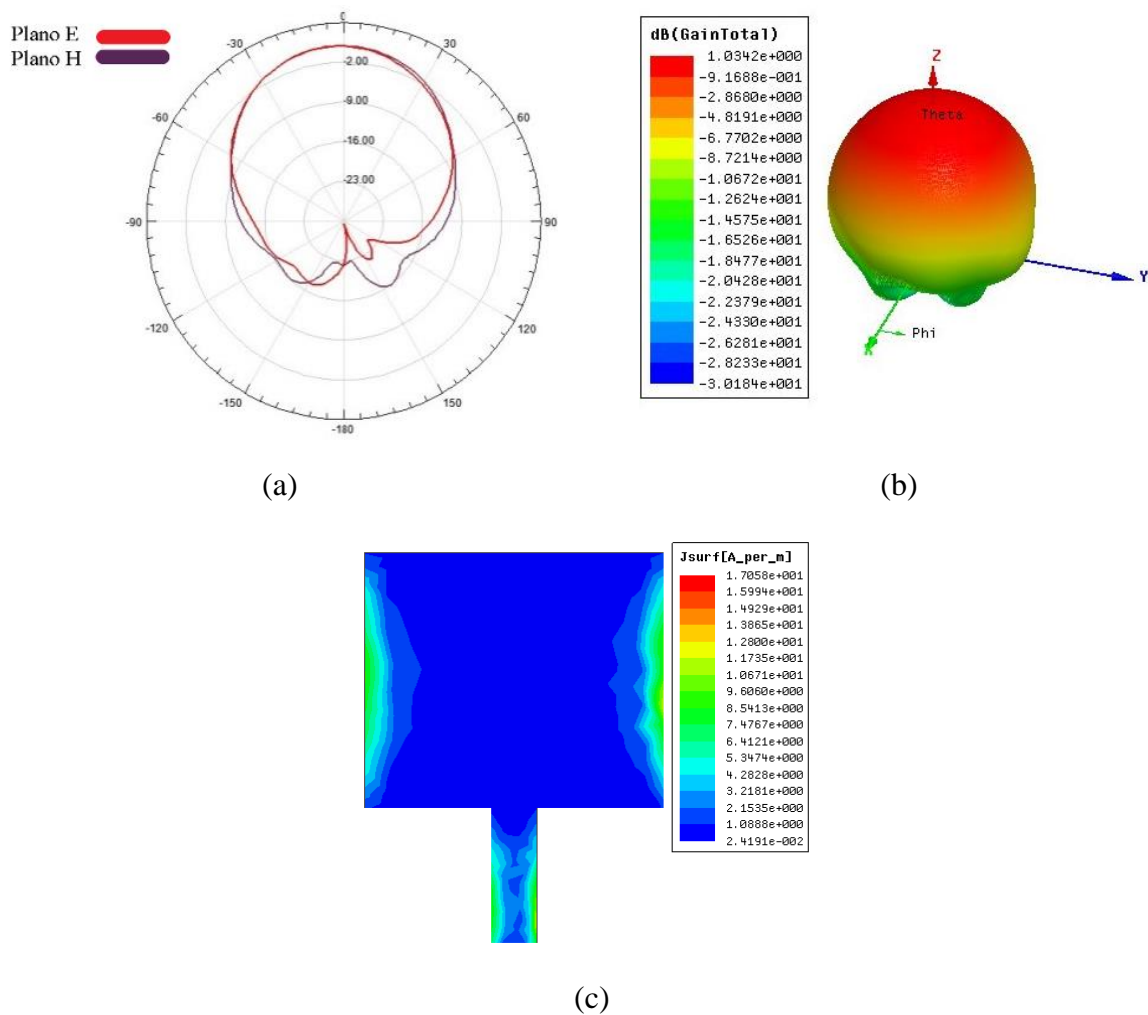


Figura 66 – (a) padrão de radiação, (b) diagrama de radiação 3D da antena com substrato composto pelo tecido de malha CO e PES e (c) densidade linear de corrente no ressoador da antena de microfita.

Fonte: Autoria própria

As Figuras 66.a e 66.b refletem a distorção quanto aos lobos secundários devido a tangente de perdas da antena. Apesar disto, a antena se mostra diretiva e com radiação semelhante a antenas de microfita convencionais. A Figura 66.c apresenta a distribuição da densidade de corrente linear no ressoador. O tecido de malha CO e PES não é o indicado para a fabricação da antena devido ao alto valor da tangente de perdas (0,1177) quando comparado aos valores obtidos dos outros tecidos.

### 6.2.6 CO e PUE

A estrutura têxtil composta por CO e PUE é constituída pela união de laçadas com estrutura Jersey, além da baixa estabilidade física devido à estrutura o tecido é composto por PUE que tem alta flexibilidade e promove maior redução da estabilidade física. A tabela 19 apresenta as características de projeto e as dimensões da antena calculadas mediante o uso dos métodos da cavidade e linha de transmissão com o uso do substrato flexível formado pelo tecido de malha CO e PUE.

Tabela 17 – Características da antena com substrato composto por CO e PUE.

Características do projeto	Valores
$f_r$ (GHz)	2,45
$\epsilon_r$	1.7457
$\tan\delta_{\text{dielétrico}}$	0,2161
$\sigma_{\text{condutor}}$ (S.m <sup>-1</sup> )	$5,8 \times 10^7$
W (mm)	52,21
L (mm)	45,35
$W_0$ (mm)	5,16
$L_l$ (mm)	23,48
H (mm)	1,44

Fonte: Autoria própria.

. A Figura 67 apresenta a perda de retorno da antena simulada na faixa de frequência de 1 a 4,5 GHz.

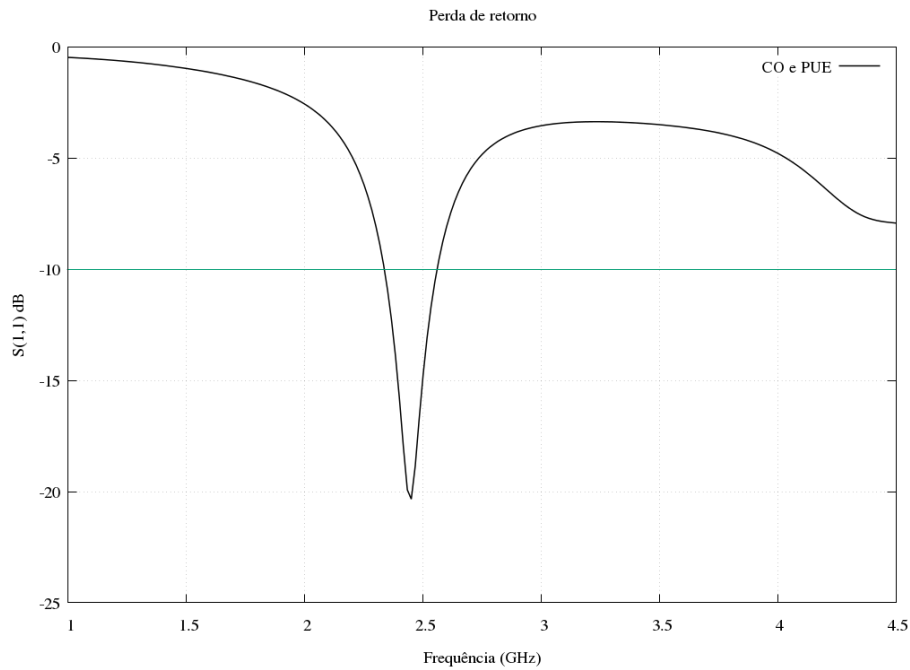
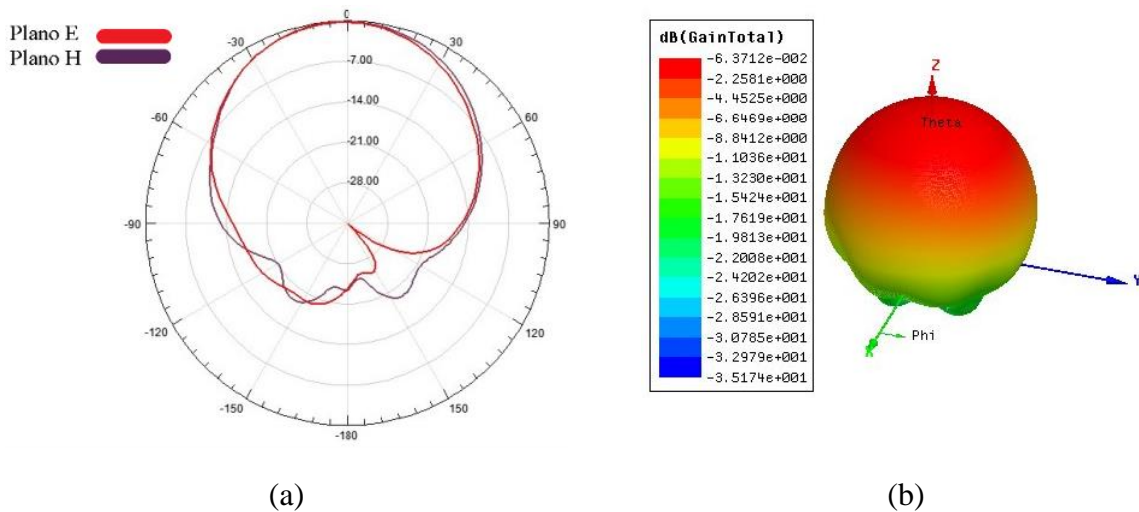
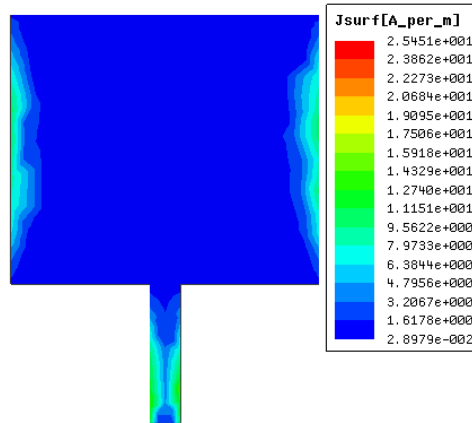


Figura 67- Perda de retorno da antenna simulada com CO e PUE.

Fonte: Autoria própria.

A frequência de ressonância no primeiro modo ocorre em torno da frequência de 2,45 GHz (-20,3397 dB), com largura de banda de 200 MHz, 2,35 GHz (-10,9574 dB) a 2,55 GHz (-10,5428 dB). Portanto, a antenna corresponde ao projeto para os valores mínimos da banda ISM no (2.45 a 2,53 GHz), 83,5 MHz. A Figura 68 apresenta o padrão de radiação (Figura 68.a) e o diagrama de radiação em três dimensões (Figura 68.b).





(c)

Figura 68 – (a) padrão de radiação, (b) diagrama de radiação 3D da antena com substrato composto pelo tecido de malha CO e PUE e (c) densidade linear de corrente no ressonador da antena de microfita.

Fonte: Autoria própria

As Figuras 68.a e 68.b correspondem a distorção quanto aos lobos secundários devido a tangente de perdas da antena. Apesar disto, a antena se mostra diretiva e com radiação semelhante a antenas de microfita convencionais. A Figura 68.c apresenta o comportamento da densidade de corrente linear no ressonador da antena. O tecido de malha CO e PUE não é indicado para a fabricação da antena devido ao alto valor da tangente de perdas (0,1023) quando comparado aos valores obtidos dos outros tecidos.

A fim de comparar os resultados obtidos, a Tabela 18 apresenta o resumo dos principais valores obtidos quanto a simulação das antenas.

Tabela 18 –Comparação entre os resultados máximos das antenas simuladas

Tecido	Frequência de ressonância no primeiro modo (GHz)	Perda de retorno (dB)	Largura de banda (MHz)	Tan $\delta$	Ganho máximo (dB)	Densidade linear máxima de corrente (A/m)
PES Coolmax	2,45	-17,5218	316	0,1499	-0,3788	17,163
PES e PLA	2,52	-18,6076	300	0,1661	0,4153	24,556
PES e PUE	2,45	-16,1470	216	0,0773	2,8588	21,033
CO e PA	2,55	-21,1654	367	0,2161	0,48567	15,662
CO e PES	2,45	-34,7280	300	0,1177	1,0342	17,058
CO e PUE	2,45	-20,3397	200	0,1023	-0,063712	25,451

Fonte: Autoria própria

Os resultados apontam o tecido de malha composto por PES e PUE com o melhor ganho na frequência de 2,45 GHz, e isso é atribuído a sua baixa tangente de perdas quando

comparado aos outros tecidos de malha. Essa consequência é devida a baixa eficiência dielétrica das estruturas têxteis analisadas.

### 6.3 COMPARAÇÃO ENTRE AS PERDAS DE RETORNO DAS ANTENAS SIMULADAS.

Os resultados computacionais são reunidos para subsidiar a análise assertiva sobre a relação entre os comportamentos das perdas de retorno de todas as antenas simuladas, proporcionando o uso das dimensões para a construção do dispositivo proposto. A Figura 69 apresenta os comportamentos das perdas de retorno de todos os 6 tecidos de malha simulados na faixa de 1 a 4,5 GHz. As perdas de retorno representam a capacidade da antena irradiar ondas eletromagnéticas a depender da frequência a qual o sinal é enviado. Portanto, como a eficiência de radiação está ligada ao coeficiente de reflexão, e este depende do dimensionamento correto da antena, o fato da perda de retorno apresentar baixos valores não é utilizado como critério fundamental para a escolha do material.

Em termos da tangente de perdas, a eficiência do condutor e substrato depende somente das características elétricas do substrato naquela frequência, portanto, a tangente de perdas é utilizada como fator primordial para a escolha do tecido de malha como substrato.

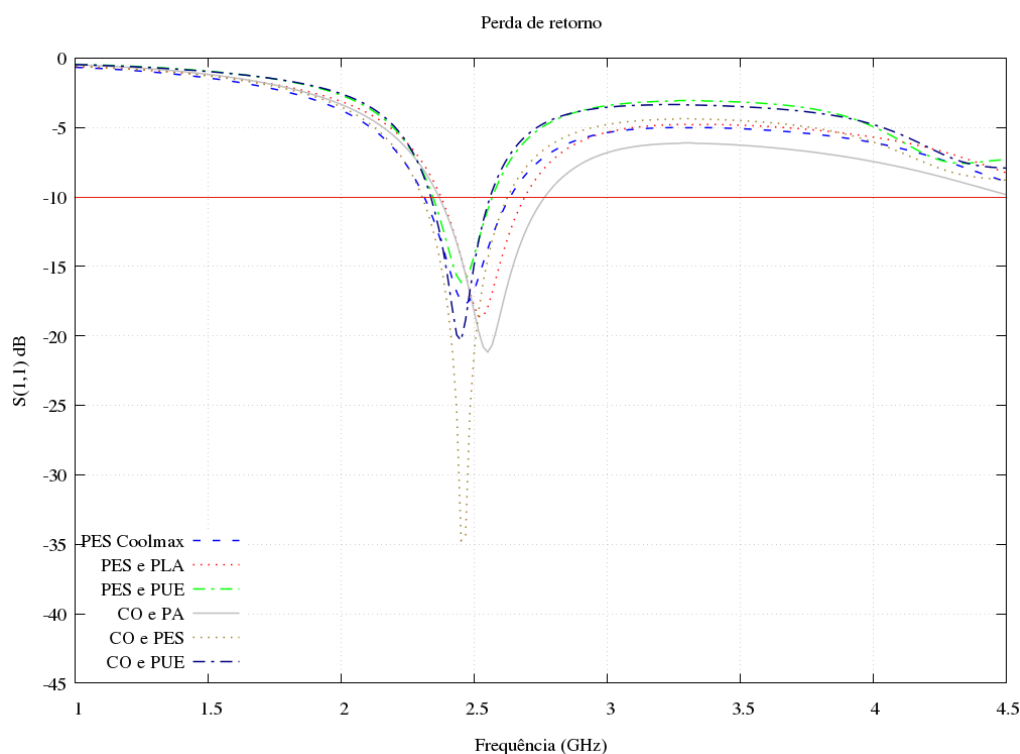


Figura 69 – Perdas de retorno dos tecidos de malha estudados  
 Fonte: Autoria própria

O tecido com menor pico negativo de perda de retorno é do tecido composto por CO e PES (-34.7280 dB). É possível perceber que os resultados computacionais apontam a possibilidade do uso de todos os 6 tecidos como substrato das antenas de microfita. Além disso, há uma grande similaridade dos comportamentos das perdas de retorno das antenas simuladas, o que valida o uso dos métodos da Linha de Transmissão e Método da Cavidade para o dimensionamento da antena de microfita retangular. Apesar do comportamento do coeficiente de reflexão da antena com substrato composto por PES e PUE não ser o melhor dentre os simulados, esse é condizente com as necessidades do projeto e juntamente com a baixa tangente de perdas que mantém a eficiência do dielétrico em um valor aceitável definem a escolha do tecido de malha composto por PES e PUE como tecido ideal para a composição do substrato do dispositivo proposto.

## **7 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo são apresentados e discutidos os principais resultados do trabalho. primeiramente é analisada a comparação entre as perdas de retornos das antenas simuladas a fim de discutir a relação entre os comportamentos dos 6 tecidos de malha aplicados como dielétricos. Em segundo lugar, são abordados os resultados das perdas de retorno das antenas simulada e construída, permitindo a análise dos efeitos do uso do tecido de malha PES e PUE, além disso, é apresentada a carta de Smith da antena simulada, permitindo assim a análise da impedância de entrada da antena na faixa de frequência de 1 a 6 GHz.

### **7.1 PROJETO DO DISPOSITIVO PROPOSTO**

Este capítulo aborda as etapas do projeto da antena de microfita construída. O tecido adotado para compor o substrato é composto por PES e PUE. A escolha é devido à permissividade e tangente de perdas que esse material apresentou na frequência de 2,45 GHz. Os resultados da caracterização física deste material não apresentam os melhores resultados. Portanto, para a construção da antena foram consideradas somente as características elétricas dos tecidos de malha.

#### **7.1.1 Escolha dos componentes da antena**

O tecido de malha escolhido é composto pela mistura de PES e PUE, devido somente ao melhor comportamento elétrico dentre os outros tecidos analisados. Quanto às características físicas, o tecido apresenta baixa estabilidade dimensional, com variação de 5% no sentido da coluna e 17% no sentido do curso além da resistência à tração mediana quando os valores são comparados aos dos outros tecidos.

A estrutura da malha unitária é Jersey, o que resulta em um tecido com baixa estabilidade dimensional. Na composição do tecido está presente fibras de PUE, que resultam em uma menor estabilidade. Isso demonstra que o tecido apresenta uma maior porção de fibras de PUE no sentido do curso do tecido de malha.

O material condutor é composto por folha metálica de espessura 0,05 mm, apresentada na Figura 70. O não uso de fio condutivo se deve a não necessidade do condutor ser atrelado ao fio, haja vista que o trabalho em questão pretende avaliar o desempenho do substrato composto pelos tecidos.



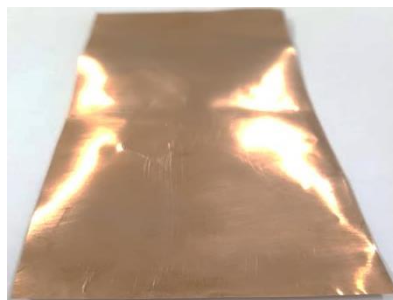


Figura 70 - Folha metálica composta por cobre.

Fonte: Autoria própria.

O cobre apresenta condutividade  $\sigma = 5,8 \times 10^7 \text{ (S.m)}^{-1}$ , comercialmente é muito utilizado para compor as partes condutivas das antenas. Apesar de não ser flexível, a folha apresenta flexibilidade que permite deformar a antena, isso é devido à reduzida espessura da folha.

### 7.1.2 Construção da antena proposta

O processo de construção da antena proposta é dividido em quatro etapas: sobreposição de três camadas do tecido de malha composto por PES e PUE; fixação das extremidades da antena com uso de linhas convencionais; colagem do ressoador em uma das camadas externas do dielétrico com o uso de cola a base de Cianocrilato; colagem do plano de terra na camada externa contrária a do ressoador com cola a base de Cianocrilato. A Figura 71 apresenta a antena confeccionada. A placa de cobre foi cortada de acordo com as dimensões da antena projetada para o tecido.



(a)



(b)

Figura 71 – Antena flexível construída.

Fonte: Autoria própria

Os pontos de costura garantem que o substrato não reduza suas dimensões naturalmente devido a baixa estabilidade física natural do tecido de malha PES e PUE. A cola foi adicionada somente nas extremidades das folhas de cobre reduzindo assim a interferência nos parâmetros da antena.

O conector do tipo SMA fêmea de 4 pinos, demonstrado na Figura 72 é utilizado para alimentar a antena, onde o ressoador é soldado ao pino interno e o plano de terra a carcaça do conector. A solda foi realizada com o uso de ferro de solda e solda composta de cobre estanho com fios de espessura de 1 mm.



Figura 72 – Imagens do conector SMA fêmea de 4 pinos.

Fonte: Autoria própria.

A solda realizada para o acoplamento do conector a antena tem como objetivo fixar os seus terminais e garantir que o sistema de alimentação consiga enviar o sinal a ser irradiado pela antena de microfita. O terminal interior é conectado diretamente ao ressoador da antena, enquanto os terminais conectados a estrutura do dispositivo são soldados junto ao plano de terra. Esse procedimento é sensível à adição em excesso de solda, pois pode interferir na impedância equivalente e assim resultar em erros quanto ao casamento de impedância da antena de microfita.

## 7.2 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA ANTENA CONSTRUÍDA

Com base nos estudos teóricos apresentados nos capítulos anteriores e com o uso dos resultados das medições da perda de retorno e da carta de Smith da antena construída é possível realizar a comparação entre os valores reais medidos no analisador de espectro Rohde & Schwarz FSH6 e os valores simulados. Portanto, estão são apresentados no gráfico da Figura 73. Considerando o caráter investigado quanto ao uso dos tecidos de malha como substrato para antenas de microfita, os valores resultantes apresentam concordância com o

projeto proposto no trabalho. Portanto, é comprovada a possibilidade do uso do tecido de malha PES e PUE como dielétrico da antena de microfita.

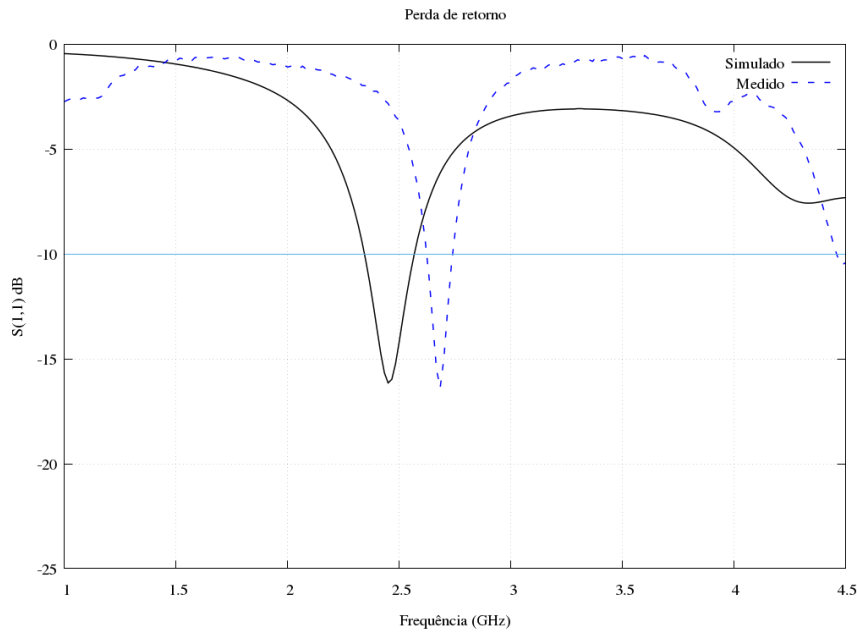


Figura 73 – Comparação entre a perda de retorno simulada e medida.

Fonte: Autoria própria.

Quanto ao comportamento do coeficiente de reflexão de acordo com a variação da frequência, ocorrem divergências entre os valores medidos e simulados. A frequência de ressonância da antena construída ocorre em torno de 2,68 GHz com perda de retorno -16,3856 dB, com largura de banda de 100 MHz, partindo da frequência de 2,63 GHz com perda de retorno de -11,0795 dB a 2,73 GHz com perda de -10,5742 dB. A diferença entre a frequência de 2,45 GHz com coeficiente de reflexão de -16,1470 dB da antena simulada e a frequência 2,68 GHz que obteve a perda de retorno de -16,3856 dB da antena medida é cerca de 230 MHz.

As variações entre os valores simulados e medidos permitem associar os aspectos quanto ao desempenho do tecido de malha PES e PUE aplicado como substrato e o comportamento físico intrínseco a estrutura e composição da malha têxtil utilizada. Esse deslocamento é atribuído às dificuldades da fixação das partes condutivas e entre as camadas do tecido de malha PES e PUE. A baixa estabilidade física do tecido impede que a antena permaneça plana normalmente, a consequência direta dessa circunstância é que a folha de cobre afasta-se do tecido, produzindo assim espaços vazios de ar entre as partes condutivas e

os tecidos. Esses espaços reduzem a permissividade efetiva da antena, deslocando a frequência de ressonância da antena, pois a permissividade reflete diretamente nas reatâncias do dispositivo. A Figura 74 – **Carta de Smith com variação de frequência de 1 a 6 GHz com passo de 16,67 MHz.** apresenta o gráfico da carta de Smith plotada com o uso dos pontos obtidos pela medição no analisador de espectro Rohde & Schwarz FSH6 e com o auxílio do *software Matrix Laboratory Matlab®* versão R2015. O resultado demonstra que apesar de não alcançar o valor de  $50 \Omega$  da parte real da impedância da antena assim como  $0j \Omega$  da parte imaginária na frequência principal no primeiro modo de 2,68 GHz, o resultado está em concordância do estudo de caráter investigativo proposto.

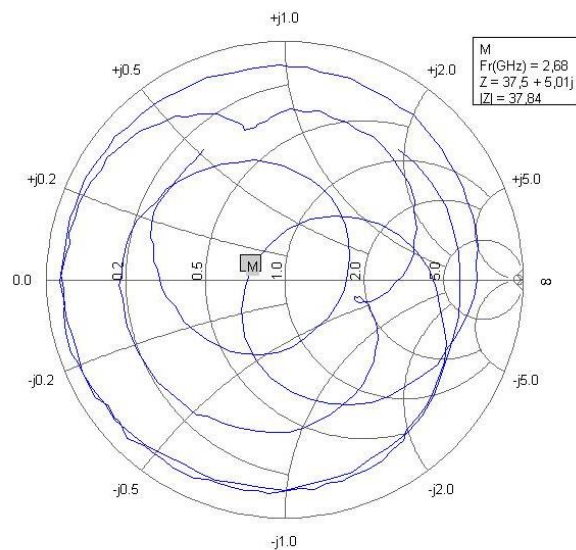


Figura 74 – Carta de Smith com variação de frequência de 1 a 6 GHz com passo de 16,67 MHz.

Fonte: Autoria própria.

Outro aspecto relevante é a adição da cola a base de Cianoacrilato que no momento da aplicação tem uma textura líquida que infiltra facilmente a estrutura do tecido devido à porosidade, gerando assim uma alteração nas características da antena. Em alternativa a adicionar mais cola a base de Cianoacrilato, as camadas dos tecidos que formam o substrato foram fixadas por meio de pontos de costura com o uso de linhas comerciais nas extremidades. Além disso, somente foi depositado cola nas extremidades das partes condutoras da antena. Por fim, o uso desse tecido como substrato é viável quanto às características elétricas, mas necessita de ajustes quanto à construção devido a sua baixa estabilidade física.

## 8 CONCLUSÕES

Os testes e ensaios realizados para caracterizar os tecidos de malha estudados subsidiaram o desenvolvimento das etapas de simulação, correlação e construção do dispositivo proposto. Foram realizadas as fases de caracterização e construção de uma antena de microfita com dielétrico composto de tecido de malha PES e PUE. Sendo realizado um projeto e execução de caráter experimental a fim de estudar as correlações entre os atributos físicos e elétricos aplicados à confecção do dispositivo proposto.

O dispositivo construído apresentou comportamento de ante em pelo menos três faixa de frequência, sendo a frequência central no primeiro modo deslocada em relação a projetada. Este efeito é em decorrência aos aspectos físicos do tecido utilizado como substrato, bem como o casamento de impedância que difere ao simulado

A presença de fibras sintéticas na composição da malha garantem diferenças quanto ao desempenho físico e elétrico, mas apresentam relativa semelhança quando se leva em consideração a frequência de trabalho do sistema. Este fato facilita a escolha do tecido e sua aplicação. Outro aspecto relevante é a proposição de que a mudança de características do tecido de malha, variando a laçada da malha é de suma importância para o aumento do desempenho da permissividade frente a variação da frequência.

Há a importância direta do tipo de mistura do fio que compõe o tecido de malha, este efeito possibilita a um possível projetista escolher qual composição do substrato a ser utilizado. Para esse estudo, o tecido de malha composto pela mistura de PES e PUE tem melhor desempenho das propriedades elétricas quanto a permissividade relativa e tangente de perdas.

A porosidade dos tecidos de malha estudados influenciam nas propriedades elétricas, devido o tamanho da laçada e o título do fio que resulta diretamente na permissividade e tangente de perda do material a depender também da frequência. Isso pode ser contornado alterando as propriedades do tecido malha. A correlação entre as propriedades físicas e elétricas é complexa, pois existem muitos aspectos que são estudados entre os 8 tecidos de malha. Porém, é estabelecida a possibilidade do uso do substrato a base de tecido de malha como dielétrico de antenas de microfita.

## 8.1 CONSIDERAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao final do trabalho são apontadas algumas sugestões para trabalhos que utilizem este como base para o desenvolvimento de um projeto seguinte:

- Escolha de tecidos planos para caracterização e possíveis comparações com os tecidos de malha;
- Construção da antena utilizando tecido com maior estabilidade a fim de evitar problemas com a deformação física da antena;
- Ajuste da confecção dos tecidos de malha, comparando vários tecidos que tenham diferenças controladas, como por exemplo: variação somente da gramatura, considerando o mesmo título e os mesmos tipos de fibras. Portanto, assumindo somente uma variação da laçada do tecido, resultando na mudança da densidade de fios do tecido;
- Confecção de um tecido condutivo por malharia ou mesmo tecido plano para ser costurado nas camadas inferior e superior do substrato;
- Tratamento físico em relação ao acabamento aplicado ao tecido de malha PES e PUE para melhorar a estabilidade física, assumindo uma nova caracterização elétrica após o tratamento;
- Utilizar superfícies impermeabilizantes para proteger os materiais que compõem a antena do contato com a umidade;
- Desenvolver outros dispositivos aplicados a telecomunicações com o uso de tecidos de malha como substrato, tais como: absorvedores e superfícies seletoras em frequência.

## REFERÊNCIAS

- 3776, ASTM. **Standard Test Method For Mass Per Unit Area (Weight) Of Fabric**, 2002.
- 3887, ASTM. **Standard Specification For Tolerances For Knitted Fabrics**, 2008.
- 5034, ASTM. **Standard Test Method For Breaking Strength And Elongation Of Textile Fabrics (Grab Test)**, 2013.
- 6207, ASTM. **Test Method For Dimensional Stability Of Fabrics To Changes In Humidity And Temperature**, 2015.
- 802.15, IEEE. **Wireless Body Area Networks Wireless: Personal Area Network Working Group and others**. IEEE standards, 2012
- AGNEESSENS, S. et al. **Wearable, small, and robust: The circular quarter-mode textile antenna**. *Antennas And Wireless Propagation Letters, IEEE, IEEE*, v. 14, p. 1482–1485, 2015.
- AGNEESSENS, S.; ROGIER, H. **Compact half diamond dualband textile hmsiw on-body antenna**. *Antennas And Propagation, IEEE Transactions On, IEEE*, v. 62, n. 5, p. 2374–2381, 2014.
- ANSYS HFSS. Disponível em: [www.ansys.com](http://www.ansys.com)
- AQUINO, M. S. **Análise tribológica das malhas multifuncionais obtidas por multicamadas**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.
- ARAÚJO, M.; CASTRO, E. M. e. **Manual de Engenharia Têxtil**, 1987.
- BAI, Q.; LANGLEY, R. **Crumpling of pifa textile antenna**. *Antennas And Propagation, IEEE Transactions On, IEEE*, v. 60, n. 1, p. 63–70, 2012.
- BALANIS, C. A. **Antenna Theory: Analysis and Design**. 3 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- BOYES, S. J. et al. **Measurement and performance of textile antenna efficiency on a human body in a reverberation chamber**. *Antennas And Propagation, IEEE Transactions On, IEEE*, v. 61, n. 2, p. 871–881, 2013.
- BOYLESTAD, R. L. **Introductory Circuit Analysis**. 12 ed. United States of America: Prentice-Hall. p. 1200. 2010.
- CAVALCANTE, G. A.; D’ASSUNÇÃO, A. G. **An iterative full-wave method for designing bandstop frequency selective surfaces on textile substrates**. *Microwave And Optical Technology Letters, Wiley Online Library*, v. 56, n. 2, p.383–388, 2014.

CAVALCANTE, G. A. et al. **Compact multiband reject inverted double-e microstrip filter on textile substrate**, a. *Microwave And Optical Technology Letters*, Wiley Online Library, v. 57, n. 11, p. 2543–2548, 2015.

CHAHAT, N. et al. 60-ghz textile antenna array for body-centric communications. **Antennas And Propagation, IEEE Transactions On**, IEEE, v. 61, n. 4, p.1816–1824, 2013.

DESCHAMPS, G. A. Microstrip Patch Antennas. **Third USAF Symposium on Antennas**. out. 1953.

DHUPKARIYA, S.; SINGH, V. K.; SHUKLA, A. **Review of textile materials for wearable antenna**, a. *Journal Of Microwave Engineering & Technologies*, v. 1, n. 3, p. 7–14, 2014.

HAAGENSON, T. et al. **Textile antennas for spacesuit applications: Design, simulation, manufacturing, and testing of textile patch antennas for spacesuit applications**. *Antennas And Propagation Magazine, IEEE, IEEE*, v. 57, n. 4, p. 64–73, 2015.

JAMES, R. **Handbook of Microstrip Antennas**. United States of America: IET. 1989.

KAUFMANN, T.; FUMEAUX, C. **Wearable textile half-mode substrate-integrated cavity antenna using embroidered vias**. *Antennas And Wireless Propagation Letters, IEEE, IEEE*, v. 12, p. 805–808, 2013.

KAUFMANN, T. et al. **Wearable quarter-wave folded microstrip antena for passive uhf rfid applications**. *International Journal Of Antennas And Propagation, Hindawi Publishing Corporation*, v. 2013, 2013.

KUASNE, A. **Fibras têxteis**. Santa Catarina: CEFET/SC. 2008.

LES ´NIKOWSKI, J. **Dielectric permittivity measurement methods of textile substrate of textile transmission lines**. *Przeglad Elektrotechniczny*, v. 88, n. 3a, p. 148–151, 2012.

LOSS, C. **Novos horizontes em design de moda: desenvolvimento de antena para vestuário**. Dissertação de mestrado. Universidade da Beira Interior, 2012.

MILLIGAN, T. A. **Modern Antenna Design**. 2 ed. United States of America: John Wiley & Sons. 2005.

LUI, K.; MURPHY, O.; TOUMAZOU, C. Wearable wideband circularly polarized textile antenna for effective power transmission on a wirelessly powered sensor platform, a. **Antennas And Propagation, IEEE Transactions On**, IEEE, v. 61, n. 7, p. 3873–3876, 2013.

OSMAN, M.; RAHIM M.; SAMSURI, N.; ELBASHEER, M. **Textile UWB antenna bending and wet performances**. *International Journal of Antennas and Propagation*. 2012.

PITA, P. **Fibras têxteis**. Rio de Janeiro: Senai/Cetiqt, v. 1, 1996.

POZAR, David M. **Microwave Engineering**. 4 ed. United States of America: John Wiley & Sons. p. 756. 2012.



- ROMERO, L. L. et al. **Fibras artificiais e sintéticas**. Rio de Janeiro: BNDS. Relatório setorial Junho de, v. 1995, 1995.
- SADIKU, M. N. O. **Elements of Electromagnetics**. 3 ed. England: Oxford University Press. p. 896. 2014.
- SALVADO, R. et al. **Textile materials for the design of wearable antennas: a survey**. *Sensors*, v. 12, n. 11, p. 15841–15857, 2012.
- SOH, P. J. et al. **Specific absorption rate (sar) evaluation of textile antennas**. *Antennas And Propagation Magazine, IEEE, IEEE*, v. 57, n. 2, p. 229–240, 2015.
- SUN, Y.; CHEUNG, S. W.; YUK, T. I. Design of a textile ultrawideband antenna with stable performance for body-centric wireless communications. **IET Microwaves, Antennas & Propagation, IET**, v. 8, n. 15, p. 1363–1375, 2014.
- SUNDARSINGH, E. F.; RAMALINGAM, V. S.; KANAGASABAI, M. Statistical analysis on the bandwidth of a dual frequency textile antenna. **Microwaves, Antennas & Propagation, IET, IET**, v. 9, n. 15, p. 1683–1690, 2015.
- TAK, J.; LEE, S.; CHOI, J. All-textile higher order mode circular patch antenna for on-body to on-body communications. **Microwaves, Antennas & Propagation, IET, IET**, v. 9, n. 6, p. 576–584, 2014.
- TSOLIS, A. et al. **Embroidery and related manufacturing techniques for wearable antennas: Challenges and opportunities**. *Electronics, Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, v. 3, n. 2, p. 314–338, 2014.
- VANVEERDEGHEM, P. et al. Flexible dual-diversity wearable wireless node integrated on a dual-polarised textile patch antenna. **Science, Measurement & Technology, IET, IET**, v. 8, n. 6, p. 452–458, 2014.
- VIRILI, M. et al. **Wearable textile antenna magnetically coupled to flexible active electronic circuits**. *Antennas And Wireless Propagation Letters, IEEE, IEEE*, v. 13, p. 209–212, 2014.
- VIRKKI, J. et al. **The effects of recurrent stretching on the performance of electro-textile and screen-printed ultra-high-frequency radio-frequency identification tags**. *Textile Research Journal, SAGE Publications*, v. 85, n. 3, p. 294–301, 2015.
- YAN, S.; SOH, P. J.; VANDENBOSCH, G. A. Dual-band textile mimo antenna based on substrate-integrated waveguide (siw) technology. **Antennas And Propagation, IEEE Transactions On, IEEE**, v. 63, n. 11, p. 4640–4647, 2015.
- YOO, H.-J. **Your heart on your sleeve: Advances in textile-based electronics are weaving computers right into the clothes we wear**. *Solid-State Circuits Magazine, IEEE, IEEE*, v. 5, n. 1, p. 59–70, 2013.