



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

ALEXANDRE HENRIQUE SOARES DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE ANTENA CPW EM SUBSTRATO TÊXTIL EM
ESTRUTURA DE MALHA PARA UTILIZAÇÃO EM SISTEMAS DE
IDENTIFICAÇÃO POR RÁDIO FREQUÊNCIA**

MOSSORÓ

2017

ALEXANDRE HENRIQUE SOARES DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE ANTENA CPW EM SUBSTRATO TÊXTIL EM
ESTRUTURA DE MALHA PARA UTILIZAÇÃO EM SISTEMAS DE
IDENTIFICAÇÃO POR RÁDIO FREQUÊNCIA**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

Linha de Pesquisa: Sistemas de Comunicação.

Orientador: Prof. Dr. André Pedro Fernandes Neto – UFERSA.

MOSSORÓ

2017

©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)

O48d Oliveira, Alexandre Henrique Soares de.
Desenvolvimento de Antena CPW em Substrato
Têxtil em Estrutura de Malha para Utilização em
Sistemas de Identificação por Rádio Frequência /
Alexandre Henrique Soares de Oliveira. - 2017.
129 f. : il.

Orientador: André Pedro Fernandes Neto.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-Árido, Programa de Pós-graduação em
Sistemas de Comunicação e Automação, 2017.

1. Antenas CPW. 2. Antenas Têxteis. 3. Tecidos
de Malha. 4. RFID. 5. IoT. I. Fernandes Neto,
André Pedro, orient. II. 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.

ALEXANDRE HENRIQUE SOARES DE OLIVEIRA

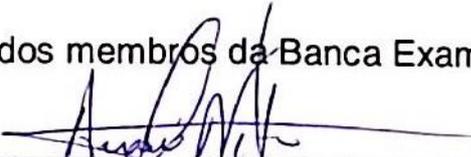
**DESENVOLVIMENTO DE ANTENA CPW EM SUBSTRATO TÊXTIL EM
ESTRUTURA DE MALHA PARA UTILIZAÇÃO EM SISTEMAS DE
IDENTIFICAÇÃO POR RÁDIO FREQUÊNCIA**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

Linha de Pesquisa: Sistemas de Comunicação

Defendida em: 07/04/2017

Assinatura dos membros da Banca Examinadora:



Prof. Dr. André Pedro Fernandes Neto (Presidente e Orientador(a) - UFRERSA)



Prof. Dr. Humberto Dionísio de Andrade (Membro Interno - UFRERSA)



Prof. Dr. Marinaldo Pinheiro de Souza Neto (Membro externo - IFRN)

A meus avós Antonio Soares de Silva (In Memoriam) e Francisca Lopes da Silva (In Memoriam), pelo ensinamento e acima de tudo pelo exemplo de vida e união.

A minha família pelo apoio e cumplicidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e pelas oportunidades e desafios que a mim foram propiciados.

Agradeço a minha família, meus pais pelo incentivo e apoio, sobre tudo minha mãe Antônia Dalva Soares de Oliveira, pelo exemplo de força e perseverança. E as minhas irmãs Anna Kézia Soares de Oliveira e Anna Raquel Soares de Oliveira.

Agradeço a minha fiel companheira Ana Patrícia Magalhães Silva, pelo apoio, compreensão e confiança no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a meu orientador e amigo Professor Dr. André Pedro Fernandes Neto pelos ensinamentos e exemplos profissionais e pessoais. Além de me permitir, incentivar e orientar minha participação neste programa de pós-graduação.

Agradeço ao professor Dr. Humberto Dionísio de Andrade pelo apoio, ensinamentos e por praticamente estabelecer um trabalho de coorientação, viabilizando a realização deste trabalho.

Agradeço ao professor Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior pelos ensinamentos e apoio na realização deste trabalho e um trabalho de praticamente coorientação.

Agradeço ao Professor Dr. Marinaldo Pinheiro de Sousa Neto e a toda Banca Examinadora pela disponibilidade para realização desta etapa de avaliação e agradeço antecipadamente pelas críticas e orientações que servirão de base para o aprimoramento deste trabalho como também para meu aprimoramento profissional.

Agradeço aos professores de Departamento de Engenharia Têxtil da UFRN, Dr. Marcos Silva de Aquino, Dr. Neil de Oliveira Lima Filho e Dr. Moises Vieira de Melo, pela disponibilização das amostras têxteis, disponibilização de materiais de pesquisa e infraestrutura para realização dos testes dos tecidos.

Agradeço ao professor Dr. Alfredo Gomes Neto do Laboratório de Medidas em Micro-ondas do IFPB, pela disponibilização dos equipamentos e pelas orientações para realização da etapa de medição.

Agradeço aos Engenheiros e amigos Ma. Samanta Mesquita de Holanda e Me. Juan Rafael Filgueira Guerra, por apoiarem minha inserção neste campo de pesquisa e auxiliarem em diversas etapas deste trabalho.

Aos meus amigos Arimateia Magno, Alexandre Araújo, Thomas Tadeu, Talles Amony, Isaú Macedo Balbino, Manassés Rocha, Flávia Elionara, Kaick Viana, Magno Monteiro, Alison

Cunha, Allyson Arilson, Anamaria sena, Diego Pires, Isaac Barros, Gregory Luid, Franscico, Marks que me propiciaram momentos de descontração, estudo e boas discussões.

Agradeço as instituições UFERSA, UFRN, IFPB pela disponibilização de sua estrutura para realização da presente pesquisa.

Agradeço a Fundação de Apoio à Pesquisa do Rio Grande do Norte, FAPERN, pelo apoio financeiro viabilizando o desenvolvimento deste trabalho.

“Comece fazendo o que é necessário, depois o que é possível e de repente você estará fazendo o impossível.”

São Francisco de Assis

RESUMO

Os tecidos de malha apresentam propriedades de elasticidade, facilidade de fabricação e maleabilidade, devido a estas características a utilização desse tipo de tecido traz vantagens na fabricação de antenas para aplicação no desenvolvimento de uma *tag* RFID. O presente trabalho tem como objetivo desenvolver antenas com guias de ondas coplanares (CPW), em substrato têxtil em estruturas de malha, para utilização em sistemas ativos de Identificação por Rádio Frequência, RFID, para frequência de operação em micro-ondas de 2,45 GHz. Foi realizada a caracterização das propriedades elétricas por meio de um Analisador de Redes Vetoriais e com uma sonda de medição de matérias dielétricos, obtive-se então os valores de Permissividade elétrica e Tangentes de perdas, em sequência foi realizada a caracterização das propriedades têxteis de Título, Gramatura, Estabilidade Dimensional e Resistência a tração, com base nos dados obtidos no processo de caracterização se elegeu dois tecidos com propriedades favoráveis ao projeto, modelagem e construção das antenas têxteis. Após a seleção dos tecidos foram feitas simulações no Ansys HFSS[®] (*High Frequency Structural Simulator*) para obtenção dos parâmetros de Perda de retorno, Diagrama de radiação, Densidade de corrente, Impedância, Ganho e VSWR, além da otimização dimensional das antenas. Foram simuladas duas antenas CPW, uma em substrato têxtil feito de fibras de Proteína de Soja (SPF) e outra com fibras de Polipropileno com Ácido Polilático de Milho (PP+PLA). Com base nas simulações foram construídas duas antenas com os respectivos substratos têxteis e utilizando um analisador de redes vetoriais foram medidos a perda de retorno e a impedância, mostrada por meio da Carta de Smith. Ambas apresentaram uma perda de retorno abaixo de -10 dB para frequência central de projeto e uma alta largura de banda. Foi realizada a comparação dos resultados simulados e os efetivamente medidos, analisando-os de acordo com a literatura especializada na área. Mostrando a viabilidade do desenvolvimento de antenas CPW em tecidos de malha para sistemas RFID ativos, além da possibilidade da interoperabilidade em sistemas de comunicação por *Internet* das coisas, *Internet of Things*, IoT.

Palavras-chave: Antenas CPW. Antenas Têxteis. Tecidos de Malha. RFID. IoT

ABSTRACT

The knitted fabrics have elastic, easy production and malleability properties, these characteristics be useful in the design of flexible antennas, that can be used in a RFID tag, for example. The main objective of this work is development of antenna with a Coplanar Waveguide fed (CPW), in a textile knitted substrate, for use in active RFID systems in microwave frequency of 2.45 GHz. From the characterization of the electrical properties by a Vector Networks Analyzer and one with a Dielectric Probe kit, obtained the values of Electrical Permissiveness and Loss Tangent, in sequence was carried out the characterization of the textile properties of Linear Density, Basis weight, Dimensional stability and Tensile Strength, based on the data obtained in characterization process, was chosen two fabrics with properties favorable to the design, modeling and construction of antennas. After the selection of the tissues, simulations were performed on Ansys HFSS[™] (High Frequency Structural Simulator) to obtain the parameters of Return Loss, Radiation Diagram, Current Density, Impedance, Gain and VSWR, as well as dimensional optimization of the antennas. Two CPW-fed antennas were simulated, one on textile substrate made from Soybean Protein Fibers (SPF) and the other with Polypropylene with corn Polylactic Acid fibers (PP + PLA). Based on the simulations, two antennas with their respective textile substrates were constructed and using a vector network analyzer, the return loss and the impedance shown by the Smith Chart were measured. Both showed a return loss below -10dB for central design frequency and wide bandwidth. The simulated and measured results were compared, analyzing them according to the specialized reading in the area. Showing the feasibility of developing CPW antennas in knitted fabrics for active RFID systems, in addition to the possibility of interoperability in internet of things (IoT) communication systems.

Keywords: CPW-fed antennas. Textile antennas. Knitted fabrics. RFID. IoT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de espionagem implantando na embaixada dos Estados Unidos em Moscou.	26
Figura 2 – Componentes básicos de um sistema RFID.	28
Figura 3 – Volume do mercado RFID e expectativas futuras.	33
Figura 4 – Classificação das fibras têxteis.....	38
Figura 5 – Tipos de tecidos.	40
Figura 6 – Fibra de proteína de soja SPF.	44
Figura 7 – Tipos de tecidos Planos.....	45
Figura 8 – Estrutura básica do tecido de malha.....	46
Figura 9 – Malha por urdume.	46
Figura 10 – Tipos de laçadas de malha.....	47
Figura 11 – Estrutura básica Antena de Microfita.....	52
Figura 12 – Efeito de franjamento na antena.....	54
Figura 13 – Efeito de franjamento comprimento do patch.....	54
Figura 14 – Paredes do substrato pelo Modelo da Cavidade.....	56
Figura 15 – Distribuição de cargas e densidade de corrente.	56
Figura 16 – Linha de transmissão guias de onda coplanares.....	58
Figura 17 – Estrutura guia de onda coplanar.	59
Figura 18 – Guia de onda coplanar com plano de terra posterior.....	59
Figura 19 – Antena CPW por acoplamento direto.	61
Figura 20 – Antena CPW por acoplamento magnético.	62
Figura 21 – Antena CPW de Acoplamento por Abertura.....	63
Figura 22 – Modelo do Quadripolo.	64
Figura 23 – Linha de transmissão para sinal enviado a uma carga Z_c	65
Figura 24 – Representação do diagrama de radiação na forma polar.....	68
Figura 25 – Diagrama de Radiação em três dimensões com exposição do sistema de coordenadas.	68
Figura 26 – Gráfico de perda de retorno mostrando a largura de banda.	71
Figura 27 – Círculo unitário base para construção da carta de Smith.	72
Figura 28 – Círculos parciais para construção da Carta de Smith.....	73
Figura 29 – Diagrama básico da Carta de Smith.	74
Figura 30 – Tag RFID flexível em material têxtil condutivo.....	76

Figura 31 – Fluxograma da metodologia do trabalho.....	78
Figura 32 – Equipamentos utilizados no teste de gramatura. (a) Balança analítica digital Shimadzu AUy-220. (b) Cortador Circular Mesdan modelo 175B.....	81
Figura 33 – Ensaio de resistência a tração.....	82
Figura 34 – Analisador de Rede Vetorias Agilent E5071C e kit Agilent 85070.	83
Figura 35 – Sondas kit Agilent 85070. (a) Sonda para medição de Permissividade. (b) Ponta de Curto-circuito.	83
Figura 36 – Visão geral da geometria das antenas.	85
Figura 37 – Procedimento de corte folha de cobre.....	86
Figura 38 – Conector SMA-KE.....	87
Figura 39 – Analisador Redes Vetoriais Agilent Technologies E5071C-2K5.....	87
Figura 40 – Resultados dos ensaios de titulação.	89
Figura 41 – Gramatura dos tecidos.....	91
Figura 42 – Variação dimensional das amostras.	91
Figura 43 – Variação percentual das dimensões.	92
Figura 44 – Resultados do teste de resistência à tração no sentido da carreira dos tecidos da amostra.	94
Figura 45 – Resultados do teste de resistência a tração sentido da coluna dos tecidos da amostra.	94
Figura 46 – Variação da constante dielétrica em função da frequência.	95
Figura 47 – Variação da tangente de perdas em função da frequência.	96
Figura 48 – Permissividade elétrica real e imaginária e tangente de perdas.	97
Figura 49 – Dimensões das antenas simuladas.....	98
Figura 50 – Dimensões finais da simulação antena SPF (em mm).	99
Figura 51 – S_{11} simulado da antena em substrato SPF.....	101
Figura 52 – Diagrama de Radiação da antena com substrato em SPF.	102
Figura 53 – Diagrama de Radiação sobreposto à Antena SPF simulada.....	103
Figura 54 – Densidade de corrente nas estruturas condutoras da antena de substrato SPF. ..	104
Figura 55 – Gráfico VSWR da antena SPF Simulada.	105
Figura 56 – Dimensões finais da simulação antena PP+PLA (em mm).....	107
Figura 57 – S_{11} simulado da antena em substrato PP+PLA.	108
Figura 58 – Diagrama de Radiação da antena com substrato em PP+PLA.....	109
Figura 59 – Diagrama de Radiação sobreposto à Antena PP+PLA simulada.	110

Figura 60 – Densidade de corrente nas estruturas condutoras da antena de substrato PP+PLA.	111
Figura 61 – Gráfico VSWR da antena PP+PLA Simulada	112
Figura 62 – Antena SPF Construída.	114
Figura 63 – Procedimento de medição no ARV da antena SPF.	114
Figura 64 – S_{11} medido da antena em substrato SPF.	115
Figura 65 – Comparação entra os valores de S_{11} medido e simulado da antena SPF.	116
Figura 66 – Carta de Smith medida da antena SPF.	117
Figura 67 – Antena PP+PLA construída.	118
Figura 68 – Procedimento medição no ARV da antena PP+PLA.	118
Figura 69 – S_{11} medido da antena em substrato PP+PLA.	119
Figura 70 – Comparação entra os valores de S_{11} medido e simulado da antena PP+PLA.	119
Figura 71 – Carta de Smith medida da antena PP+PLA.	120

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação segundo ISO 18000.	30
Quadro 2 – Classificação segundo EPCglobal.	30
Quadro 3 – Faixas de Frequência RFID no Brasil	32
Quadro 4 – Normas para ensaios de materiais têxteis	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de fibras quanto a origem	39
Tabela 2 – Tecidos utilizados	40
Tabela 3 – Gramatura dos tecidos.	90
Tabela 4 – Variação dimensional após o processo de lavagem.....	93
Tabela 5 – Valores de permissividade elétrica e tangente de perdas, para 2,44 GHz.....	97
Tabela 6 – Dimensões finais antena SPF.	100
Tabela 7 – S_{11} simulado para a frequência e largura de banda de projeto da antena SPF.....	101
Tabela 8 – Frequência de ressonância e limites de largura de banda para simulação da antena SPF.	102
Tabela 9 – Impedância das frequências de projeto da antena SPF Simulada.....	105
Tabela 10 – Valores de VSWR para Frequência e largura de banda de projeto antena SPF.	106
Tabela 11 – S_{11} simulado para a frequência e largura de banda de projeto da antena PP+PLA.	108
Tabela 12 – Frequência de ressonância e limites de largura de banda para simulação da antena PP+PLA.....	108
Tabela 13 – Impedância das frequências de projeto da antena PP+PLA Simulada.	112
Tabela 14 – Valores de VSWR para Frequência e largura de banda de projeto antena PP+PLA.	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AL	Ácido Láctico
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ARV	Analisador de Redes Vetoriais
ASIC	<i>Application-Specific Integrated Circuit</i> (Circuito Integrado de Aplicação específica)
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento
BW	<i>Band Width</i> (Largura de Banda)
CAD	<i>Computed Aided Design</i> (Projeto Auxiliado por Computador)
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i> (Semicodutor de Metal-Óxido Complementar)
CO	<i>Cotton</i> (algodão)
CPW	<i>Coplanar Waveguide</i> (Guia de Onda Coplanar)
Dr.	Doutor
EPCglobal	<i>Electronic Product Code</i> (Código Eletrônico de Produto)
e-Textiles	<i>Electronic-Textiles</i> (Têxteis Eletrônicos)
FAPERN	Fundação de Apoio à Pesquisa do Rio Grande do Norte
FSS	<i>Frequency Selective Surface</i> (Superfície Seletora de Frequência)
GCPW	<i>Grounded Coplanar Waveguide</i> (Guia de Onda Coplanar com Plano de Terra)
HFSS®	<i>High Frequency Structural Simulator</i> (Simulador de Estruturas de Alta frequência)
ID	<i>IDentification</i> (Identificação)
IFPB	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
IFRN	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i> (<i>Internet</i> das Coisas Industriais)
IoT	<i>Internet of Things</i> (<i>Internet</i> das Coisas)
ISO	<i>International Standards Organization</i> (Organização Internacional de Padronização)
KGB	<i>Komitet Gosudarstvennoi Bezopasnosti</i> (Comitê de Segurança de Estado)
M2M	<i>Machine to Machine</i> (Máquina à Máquina)

Ma.	Mestra
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
Me.	Mestre
MICs	<i>Microwave integrated Circuits</i> (Circuitos Integrados de Micro-Ondas)
MMICs	<i>Monolithic Microwave Integrated Circuits</i> (Circuitos Integrados Monolíticos de Micro-Ondas)
NBR	Norma Brasileira
PAC	<i>Polyacrylonitile</i> (acrílico)
PAC_Ting.	Tecido à base de Acrílico Tingido
PLA	<i>Polylactic Acid</i> (Ácido Polilático)
PP	<i>Polypropylene</i> (Polipropileno)
RADAR	<i>Radio Detection And Ranging</i> (Detecção e Telemetria por Rádio)
RCA	<i>Radio Corporation of America</i> (Corporação de Rádio da América)
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i> (Identificação por Rádio Frequência)
RL	<i>Return Loss</i> (Perda de Retorno)
SMP	Serviço Móvel Pessoal
SPF	<i>Soybean Protein Fibres</i> (Fibras de Proteína de Soja)
THID	<i>Terahertz Identification</i> (Identificação em Terahertz)
TNT	Tecido Não Tecido
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
UHF	<i>Ultra-High frequency</i> (Frequência Ultra Alta)
VNA	<i>Vector Network Analyzer</i> (Analisador de Redes Vetoriais)

LISTA DE SÍMBOLOS

®	Marca registrada
%	Porcentagem
\$	Cifrão
ϵ_0	Permissividade elétrica no vácuo
ϵ_r	Permissividade relativa
ϵ_r'	Parte real da permissividade relativa
ϵ_r''	Parte imaginária da permissividade relativa
$tg \delta$ ou $\tan \delta$	Tangente de Perdas
σ	Condutividade do material
ω	Coefficiente angular
η	Eficiência da antena
Γ	Coefficiente de Reflexão
T	Título
K	Constante de proporcionalidade
P	Massa da amostra em grama (g)
C	Comprimento em metros (m)
\vec{J}	Densidade de Corrente
\vec{E}	Campo elétrica
\vec{D}	Densidade do fluxo elétrico
P_{rad}	Potência Radiada
P_0	Potência da Fonte
D	Diretividade
U	Intensidade de Radiação
P_{perdas}	Potência Dissipada
G	Ganho
r	Resistência da carga
x	Reatância

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	OBJETIVOS	23
1.1.1	Objetivo Geral	23
1.1.2	Objetivos Específicos	23
1.2	DIVISÃO DO TRABALHO	23
2	REVISÃO DE LITERATURA	25
2.1	IDENTIFICAÇÃO POR RÁDIO FREQUÊNCIA (RFID)	25
2.1.1	Principais tipos de tags	28
2.1.2	Frequências para RFID	31
2.1.3	Tendências de mercado	33
2.1.3.1	Internet das Coisas, IoT e RFID	35
2.1.3.2	Novas tecnologias em RFID e IoT	36
2.2	TECIDOS E FIBRAS TÊXTEIS	38
2.2.1	Fibras Têxteis	41
2.2.1.1	Algodão (CO).....	41
2.2.1.2	Acrílico (PAC)	42
2.2.1.3	Ácido Polilático (PLA).....	42
2.2.1.4	Polipropileno (PP).....	43
2.2.1.5	Fibras de Proteína de Soja (SPF).....	43
2.2.1.6	Poliamida (PA).....	44
2.2.2	Estruturas têxteis	44
2.2.2.1	Estruturas de Tecidos Planos.....	45
2.2.2.2	Estruturas de Tecidos Malha	45
2.2.3	Análise da Propriedade dos Tecidos	48
2.2.3.1	Titulação.....	48
2.2.3.2	Gramatura.....	49
2.2.3.3	Estabilidade Dimensional.....	50
2.2.3.4	Ensaio de Resistência à Tração	50
2.2.3.5	Caracterização das Propriedades Elétricas	50
2.3	ANTENAS	51
2.3.1	Análise e Projeto de Antenas	53
2.3.1.1	Método da Linha de Transmissão	53
2.3.1.2	Modelo da cavidade	55
2.3.2	Guia de Onda Coplanar, CPW	57
2.3.3	Antenas CPW	61
2.3.4	Parâmetros de Antenas.	64
2.3.4.1	Perda de Retorno e Matriz de espalhamento	64
2.3.4.2	Densidade de Corrente e Tangente de Perdas	66
2.3.4.3	Diagrama de Radiação	67
2.3.4.4	Intensidade de Radiação, Diretividade, Eficiência e Ganho da antena	69
2.3.4.5	Largura de Banda	71
2.3.4.6	Carta de Smith.....	72
2.3.4.7	VSWR	74
2.3.5	Antenas Têxteis	75
3	MATERIAIS E MÉTODOS	78
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS TECIDOS	79
3.1.1	Procedimentos de medição da Titulação	80
3.1.2	Procedimentos de medição da Gramatura	80

3.1.3	Procedimentos do Ensaio de Estabilidade Dimensional.....	81
3.1.4	Procedimentos do Ensaio de Resistência a Tração	81
3.1.5	Caracterização das Propriedades Elétricas.....	82
3.2	ESCOLHA DO TECIDO.....	84
3.3	PROJETO E SIMULAÇÃO DA ANTENA	84
3.4	CONSTRUÇÃO E MEDIÇÃO DAS ANTENAS.....	86
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	89
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS TECIDOS	89
4.1.1	Titulação	89
4.1.2	Gramatura	90
4.1.3	Ensaio de estabilidade dimensional	91
4.1.4	Ensaio de Resistência à tração	93
4.1.5	Caracterização das Propriedades Elétricas.....	95
4.2	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	98
4.2.1	Resultados da Simulação da Antena com substrato em SPF.....	99
4.2.2	Resultados da Simulação da Antena com Substrato em PP+PLA	106
4.3	MEDIÇÃO DAS ANTENAS	113
4.3.1	Resultado medição antena substrato em SPF	113
4.3.2	Resultado medição antena substrato em PP+PLA	117
5	CONCLUSÕES	121
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	122
	REFERÊNCIAS	123

1 INTRODUÇÃO

As primeiras aplicações de sistemas de Identificação por Rádio Frequência, RFID, iniciaram na década de 1940, voltadas principalmente para o uso militar. Com o desenvolvimento de novas tecnologias de comunicação e a diminuição dos custos de produção, os sistemas RFID passaram a ser cada vez mais utilizados em ambientes empresariais, no rastreamento de insumos e ativos, entre outras aplicações para obtenção de dados (LANDT, 2005; ROBERTI, 2007).

Os dados obtidos por meio de sistemas RFID são utilizados no desenvolvimento de informações para subsidiar a tomada de decisão de gestores das organizações. Com informações mais precisas e acuradas o processo de tomada de decisão pode se tornar mais rápido e assertivo, diminuindo custos e trazendo vantagens competitivas e estratégicas para as organizações (MARQUES et al., 2009).

Devido a essas características o mercado de sistemas RFID movimenta anualmente uma quantidade expressiva de capital, em 2016 estima-se que tenha movimentado cerca de US\$ 10,4 bilhões de dólares e apresenta uma tendência de crescimento na ordem de 30% para os próximos três anos (DAS; HARROP, 2015).

Quanto a forma de transmissão de dados os sistemas RFID são classificados em três categorias principais: Sistemas Passivos, Semipassivos e Ativos. Nos sistemas passivos, a leitura dos dados do sistema de identificação ocorre pela reflexão do sinal de rádio emitido por um leitor, ou seja, o equipamento ou objeto a ser identificado não emite seu próprio sinal de identificação. Este é um dos sistemas RFID mais utilizados comercialmente devido ao baixo custo dos sistemas de identificação fixados nos objetos, ou seja, as *tags* RFID (BOLIC; SIMPLOT-RYL; STOJMENOVIC, 2010; PERRET, 2014; REZAIESARLAK; MANTEGHI, 2015a).

Nos sistemas semipassivos, o objeto ou equipamento a ser identificado também não emite um sinal de identificação próprio, dependendo da reflexão do sinal do leitor para efetuar a transmissão de seus dados, todavia, este tipo sistema possui algum método de fornecimento energia, como uma bateria por exemplo, que é utilizada para ampliar a capacidade de armazenamento de dados referentes ao equipamento a ser identificado, assim como na alimentação de sensores para captação de informações (BOLIC; SIMPLOT-RYL; STOJMENOVIC, 2010; PERRET, 2014).

Os sistemas RFID ativos, possuem uma fonte interna de energia, fazendo com que possam emitir seu próprio sinal de identificação, apesar de possuir um valor de aquisição e

desenvolvimento maior em relação aos demais métodos, este apresenta uma maior capacidade de transmissão de dados com um maior alcance de leitura, uma vez que não depende apenas da reflexão de um sinal eletromagnético vindo de um leitor. Geralmente este tipo de sistema é utilizado na identificação de ativos de maior valor agregado (BOLIC; SIMPLOT-RYL; STOJMENOVIC, 2010; PERRET, 2014).

Sistemas ativos podem ser utilizados para leituras dos demais sistemas RFID. Dessa forma, nesse tipo de sistema de identificação, busca-se antenas que possam prover uma alta largura de banda, devido à maior necessidade de transmissão e recepção de dados e um padrão de radiação omnidirecional para que a leitura das informações possa ser realizada sem a necessidade de um posicionamento específico. Tais características devem ser consideradas no projeto e modelagem de antenas para esta finalidade e podem ser alcançadas com utilização de técnicas como a alimentação de antenas por Guia de Onda Coplanar, *Coplanar Waveguide* (CPW) (IHAMJI; ABDELMOUNIM, 2016; LIU; LU, 2014; PERRET, 2014).

As antenas são um dos principais componentes das *tags* RFID e são indispensáveis para comunicação sem fios em qualquer aplicação, pois são as estruturas que efetivamente viabilizam a transmissão e a recepção de dados, as antenas de microfita com alimentação por guia de onda coplanar são uma das principais formas aplicada no desenvolvimento de *tag* antenas para obtenção de um padrão de radiação Omnidirecional, facilitando a captação e a leitura das informações (ALSHAREEF et al., 2016; IHAMJI; ABDELMOUNIM, 2016).

As antenas de microfita foram desenvolvidas em 1953 por George A. Deschamps, com intuito do desenvolvimento de estrutura planares para comunicação, tendo se desenvolvido sobretudo para as frequências em micro-ondas (BALANIS, 2009). Em 1969, Cheng P. Wen com base nos estudos de estrutura de microfita desenvolve os Guia de Ondas Coplanares, permitindo o desenvolvimento de estruturas de comunicação planares com elementos de presente no mesmo plano, além de prover facilidade de fabricação e uma maior largura de banda quando utilizado na alimentação de antenas (SIMONS, 2001). Devido a tais características as *tags* RFID, principalmente para frequências mais elevadas em micro-ondas, utilizam este de tipo de estrutura no desenvolvimento das antenas (PERRET, 2014).

Devido ao tamanho do mercado de sistemas RFID e uma expressiva variedade de aplicações e investimento em pesquisas e desenvolvimento, uma das tendências dessa tecnologia é propiciar a integração de objetos permitindo a comunicação e obtenção de grande volume de dados, esta integração tem sido chamada de *Internet das Coisas*, em inglês *Internet of Thing*, IoT (PERRET, 2014).

O foco principal da IoT é a conexão das "coisas" para obtenção de informações que possam ser utilizadas para diversas finalidades, desde de controle automático de parâmetros de armazenamento de produtos, como temperatura e umidade de ambientes controlados; dados referentes ao funcionamento do equipamento para planejamento de manutenção, até a análise de hábitos de consumo entre outras aplicações (ATTARAN; RASHIDZADEH, 2016; HARROP; HARROP; PUGH, 2017; PERRET, 2014).

Por ser uma tendência relativamente nova a IoT, não possui protocolos de comunicações e regulamentações para determinação dos parâmetros de funcionamento como faixas de frequência e largura de banda, porém acredita-se que uma considerável parte desses sistemas utilizem os padrões e protocolos presentes em sistemas RFID (PERRET, 2014). Para viabilizar este tipo de aplicação faz-se necessária a integração de sistemas de comunicação embarcados que possam permitir a transmissão e recepção desses dados. Pesquisas recentes têm desenvolvido aplicações de sistemas integrados de comunicação em materiais têxteis, ou seja, tem-se realizado o desenvolvimento de antenas para transmissão/recepção de dados com a utilização de tecidos como substrato dielétrico para antenas (SHAO, 2015).

A integração de componentes de sistemas eletrônicos em materiais têxteis recebe o nome *e-textiles*, *electronic textiles*, consistindo na integração de sensores, antenas e utilização de fibras têxteis condutivas diretamente nos tecidos, permitindo a integração de sistemas de comunicação no vestuário, também chamada de tecnologia vestível, o desenvolvimento de antenas em substrato têxtil pode permitir a integração de sistemas de identificação por rádio frequência diretamente em insumos e produtos têxteis, permitindo o rastreamento de ativos e obtenção de informações do processo produtivo das indústrias têxteis e de confecção (HAYWARD, 2017).

Dentro do universo da engenharia têxtil os tecidos de malha se destacam por sua, flexibilidade, elasticidade, facilidade de fabricação, conforto entre uma série de outras características, permitindo o desenvolvimento de materiais com possibilidade de utilização em finalidades industriais ou domésticas (AQUINO, 2012; LIMA FILHO, 2009). Tais características podem trazer vantagens no desenvolvimento de sistemas de comunicação para identificação em ambientes comerciais/industriais, devido sua boa elasticidade, os tecidos de malha podem ser empregados em antenas que podem estar sujeitas a movimentações e esforços. Pois posteriormente a submissão da estrutura da antena a tais esforços devido a movimentação, a estrutura do tecido de malha pode possibilitar a antena a voltar para seu posicionamento inicial garantindo a integridade de operação do sistema (GUERRA, 2016; HOLANDA, 2016). Na seção 1.1 são apresentados o objetivos geral e específicos do presente trabalho.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolvimento de antena em substrato têxtil com tecido em estrutura de malha, por meio de alimentação de Guia de Onda Coplanar, CPW, para obtenção de um padrão de radiação omnidirecional, com alta largura de banda para aplicação em sistemas de *tag* ativos de Identificação por Rádio Frequência, RFID e possibilitar a interoperabilidade em sistemas de comunicação por computação física conhecido como *Internet* das Coisas, IoT.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar amostras de tecidos de estrutura de malha para obtenção de suas propriedades físicas e elétricas para viabilizar a construção da antena;
- Projetar e simular a antena escolhendo-se tecidos que apresentem características que viabilizem a sua utilização destes materiais como substrato de antenas;
- Construir antena com base nos resultados obtidos na etapa de projeto e simulação;
- Mensurar as propriedades da antena construída e comparar os resultados simulados com os experimentais.

1.2 DIVISÃO DO TRABALHO

O presente trabalho é dividido em 5 capítulos, no Capítulo 1 é mostrada uma introdução sobre o tema abordado, assim como o objetivo geral e os objetivos específicos que nortearam o desenvolvimento desta pesquisa.

No Capítulo 2 é mostrada uma revisão de literatura sobre os principais conceitos utilizados, iniciando com uma seção abordando os sistemas de Identificação por Rádio Frequência (RFID), posteriormente, em outra seção, são abordados os conceitos gerais sobre Tecidos e Fibras têxteis, seguindo com uma seção sobre Antenas.

No Capítulo 3 são mostrados os materiais e métodos utilizados na presente pesquisa, com uma seção onde é explanado sobre os processos de caracterização das propriedades dos materiais têxteis analisados, seguindo pelo processo de escolha do tecido, os métodos de projeto e simulação da antena e finalizando com o detalhamento da forma de construção e medição da antena.

No Capítulo 4 são mostrados os resultados obtidos e as discussões realizadas, para a etapa de simulação assim como para a construção e medição das antenas. Por fim, no Capítulo 5 são mostradas as conclusões e as recomendações para futuros trabalhos, seguido pela exposição das referências utilizadas para o desenvolvimento do presente trabalho.

2 REVISÃO DE LITERATURA

No presente capítulo são apresentados os conceitos teóricos utilizados ao longo deste trabalho, na seção 2.1 é abordada a Identificação por Rádio frequência, na Seção 2.2 Tecidos e Fibras têxteis e na seção 2.3 Antenas.

2.1 IDENTIFICAÇÃO POR RÁDIO FREQUÊNCIA (RFID)

A última metade do século XIX ficou marcada pelo início do entendimento fundamental do eletromagnetismo, em 1864, James Clerk Maxwell publica sua teoria sobre o eletromagnetismo, unificando o estudo do magnetismo e da eletricidade, por meio das quatro equações de Maxwell. Em 1887, Heinrich Hertz confirma a teoria proposta por Maxwell, com experimentos de produção de ondas eletromagnéticas, já em 1896, Guglielmo Marconi realiza a primeira transmissão radiotelegráfica através do oceano atlântico (LANDT, 2005).

No Brasil em 1892, o padre Roberto Landell de Moura construiu o primeiro transmissor sem fio para transmissão de mensagens, em 1894 ele realizou a primeira transmissão pública utilizando ondas de rádio em uma distância de oito quilômetros sem a utilização de fios, alguns anos antes de Marconi. Em 1904 foi proferida a ele, pelo escritório de patentes dos Estados Unidos, as patentes de três inventos: o Telegrafo sem fio, o Telefone sem fio e o Transmissor de ondas eletromagnéticas. Sendo estes destacados como importantes feitos para a telecomunicação (ALENCAR; LOPES; ALENCAR, 2007).

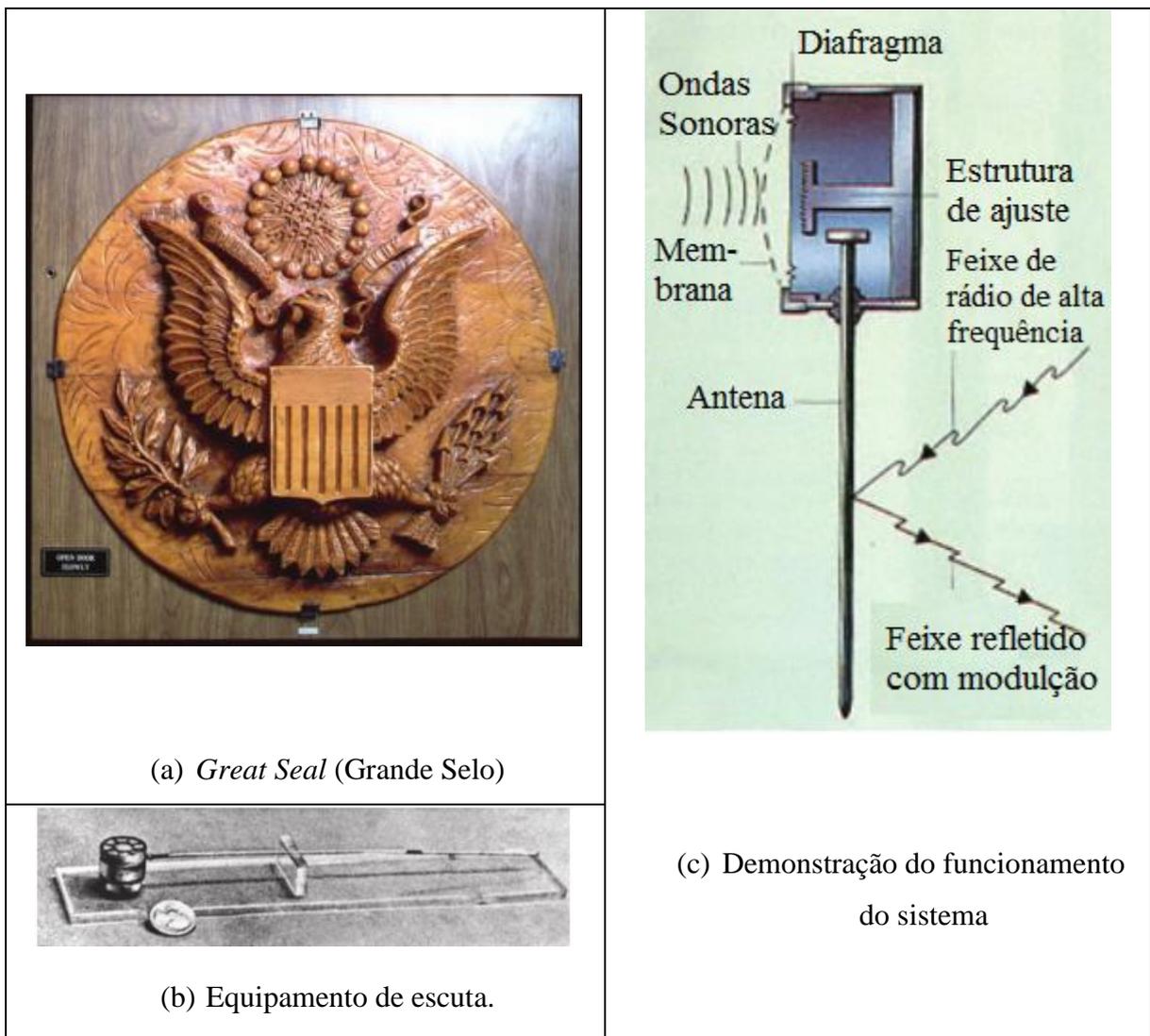
Tais pesquisas permitiram o desenvolvimento e o avanço das tecnologias de informação e comunicação. Durante a segunda guerra mundial foram desenvolvidas as primeiras aplicações da Identificação por Rádio Frequência (RFID, *Radio Frequency Identification*). A tecnologia de RADAR (*Radio Detection And Ranging*), Detecção e Telemetria por Rádio, da época permitia apenas a detecção, localização e análise da velocidade de um objeto, todavia não permitia a identificação do mesmo, pois esta consistia na emissão de ondas eletromagnéticas e a detecção das ondas refletidas, permitindo a localização de aeronaves (LANDT, 2005; ROBERTI, 2007).

Desta forma, para evitar ataques a aeronaves aliadas, a Real Força Aérea Britânica passou a instalar em seus aviões um *transponder*, desenvolvido pelo físico Sir Robert Watson-Watt, este dispositivo emitia sinais de rádio que identificavam as aeronaves a uma grande distância. Portanto, quando uma aeronave era detectada no sistema de Radar e não era detectado

o sinal de rádio de identificação do *transponder*, as tropas poderiam antecipar um ataque aéreo inimigo. O sistema de identificação de aeronaves comerciais funciona de forma similar até os dias atuais (ROBERTI, 2007).

Em 1945, um grupo de crianças russas apresentou o embaixador dos Estados Unidos em Moscou, com um símbolo de estado, conhecido como *Great Seal of United States* (Grande Selo dos Estados Unidos, em tradução livre), entalhado em madeira. Sete anos após a sua doação foi descoberto acidentalmente que o objeto continha uma sistema de transmissão de dados utilizado para espionagem (NIKITIN, 2012). É mostrado na Figura 1 a ilustração de como funcionava o equipamento.

Figura 1 – Sistema de espionagem implantando na embaixada dos Estados Unidos em Moscou.



Fonte: adaptado de Nikitin (2012).

Na Figura 1a é mostrado o entalhe de madeira utilizado, dentro deste foi acondicionado o equipamento de escuta (vide Figura 1b), como mostrado na Figura 1c o equipamento era

composto por uma antena monopolo conectado a um ressoador de cavidade com uma pequena membrana sensível a ondas acústicas, feita em material condutivo, a deformação da membrana modificava a frequência de ressonância da cavidade e da antena, essa modificação de frequência era percebida através da deformação de um sinal de alta frequência de rádio refletido e captado em uma estação de transmissão e recepção móvel, instalada em um veículo que deveria ficar há alguns metros da parede onde estava localizado o equipamento, para poder captar o sinal. Este equipamento ficou conhecido como “*The Thing*”, “A Coisa” e todo o episódio como “*The Great Seal Bug*”. (NIKITIN, 2012; PERRET, 2014)

O desenvolvimento deste equipamento foi creditado ao Engenheiro Russo Leon Theremin, para o Comité de Segurança de Estado da Rússia, (*Komitet Gosudarstvennoi Bezopasnosti*, KGB), em termos práticos este é considerado o primeiro sistema RFID passivo de longo alcance, não necessitava de qualquer fonte interna de energia, a própria potência do sinal enviado era suficiente para fazer o sistema funcionar (NIKITIN, 2012).

Atualmente a tecnologia RFID possui uma vasta gama de aplicações, percebeu-se que esta tecnologia poderia ser utilizada no ganho de produtividade e conveniência, tanto para pessoas como organizações, sendo utilizada para identificar e rastrear produtos, veículos, documentos, animais ou mesmo indivíduos, por meio de ondas eletromagnéticas (LANDT, 2005; MARQUES et al., 2009).

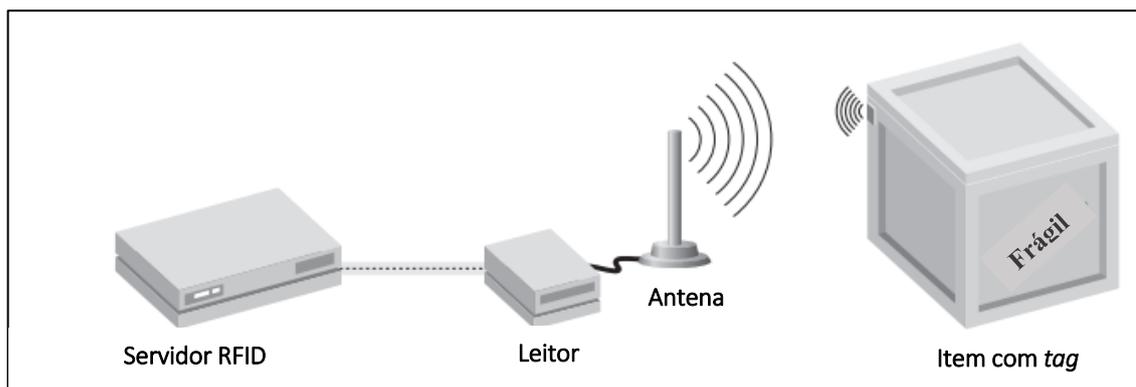
O Departamento de Defesa dos Estados Unidos foi um dos pioneiros da utilização de sistemas RFID para gestão de ativos e controle da cadeia de suprimentos, uma das primeiras utilizações foi para fazer o rastreamento de componentes e insumos para tecnologia nuclear (LANDT, 2005). Em Síntese, esta tecnologia consiste em uma forma rápida e eficiente de troca de dados e informações. Estas informações podem gerar o subsídio necessário para auxiliar a tomada de decisões de forma mais rápida e acurada, gerando redução de custos e vantagens competitivas (MARQUES et al., 2009).

Basicamente um sistema RFID comercial consiste em *tags*, leitores e uma infraestrutura de *hardware* e *software* para processamento e armazenamento dos dados. Na Figura 2 é mostrada a estrutura de componentes básicos dessa tecnologia (GLOVER; BHATT, 2006).

Como pode ser observado na Figura 2, um sistema RFID é composto basicamente por um leitor, que está ligado a uma antena que irá transmitir o sinal de leitura ou de interrogação, para o meio onde se encontram os objetos que estão com uma *tag* fixada em seu corpo ou embalagem, a partir do sinal recebido da *tag*, as informações são comparadas e/ou armazenadas em um sistema de servidores, onde serão realizadas a análise e utilização dos dados.

Segundo Glover e Bhatt (2006) um dos componentes mais críticos de um sistema RFID é a *tag*, ela consiste basicamente em uma antena com algum sistema identificação e codificação de informações, que é fixada no item, objeto ou equipamento que se deseja efetuar o rastreamento, devendo apresentar característica de frequência de operação, durabilidade e alcance de leitura adequados ao propósito da aplicação.

Figura 2 – Componentes básicos de um sistema RFID.



Fonte: adaptado de Glover e Bhatt (2006).

Os principais parâmetros que são utilizados no momento de definir as especificações do sistema RFID a ser utilizado por uma organização, são: custo, tamanho, frequência de operação, alcance de leitura, mobilidade da aplicação, confiabilidade da leitura e captação e segurança da informação. Cada aplicação irá exigir um diferente nível de importância para cada um desses parâmetros, exigindo diferentes tipos de *tags*, sistemas e protocolos de comunicação (PRERADOVIC; KARMAKAR, 2012a).

2.1.1 Principais tipos de *tags*

Existem diferentes formas de classificação das *tags* RFID, uma das mais usuais é classificação quanto a forma de transmissão dos sinais eletromagnéticos que transmitem as informações da *tag*. Dentro dessa metodologia de classificação existem três tipos principais de *tags* RFID, as *tags* ativas, as quais possuem uma fonte de energia interna que auxilia na transmissão/recepção de dados; *tags* passivas que não possuem nenhuma fonte de energia interna, sendo o processo de comunicação restritamente dependente da potência do sinal enviado pelo leitor RFID; e as *tags* semipassivas, que possuem fonte de energia interna, mas esta não é utilizada para transmissão/recepção de dados, geralmente alimentam alguns sensores ou são utilizadas para aumentar a capacidade de armazenamento de dados da *tag*, o

processo de comunicação é dependente do sinal enviado pelo leitor RFID assim como nas *tags* passivas (DUCHOVNI, 2006; PERRET, 2014; REZAIESARLAK; MANTEGHI, 2015b).

Outra forma corriqueira de se classificar uma tag RFID é por meio da presença ou ausência de um *chip* de memória como uma parte constitutiva. As *tags* que possuem um *chip* de memória (geralmente circuitos CMOS) ligado a antena para o armazenamento das informações, são atualmente as mais comuns no mercado, a utilização destes circuitos integrados permitem guardar informações como a identificação (ID) do produto, o protocolo de comunicação a ser utilizado entre outras informações (PERRET, 2014; PRERADOVIC; KARMAKAR, 2012b).

Entretanto é cada vez mais comum a utilização de *tags Chipless*, ou seja, sem *chip*, o desenvolvimento deste tipo de *tag* é voltado para a obtenção de menor custo de produção das *tags*, é viabilizado graças ao desenvolvimento de sistemas mais modernos e avançados de leitura de dados, que permitem atribuir a este tipo *tag* capacidades similares as *tags* com *chip*. a um custo menor, pois os *chips* de memória são os componentes mais caros para construção de uma *tag* RFID, todavia as *tags Chipless* podem necessitar de geometrias de antena e construção mais complexa (PRERADOVIC; KARMAKAR, 2012; PERRET, 2014).

Rezaiesarlak e Manteghi (2015) destacam que as *tags* RFID *Chipless* passivas apresentam uma grande possibilidade de aplicações e integração direta com processos de manufatura e fabricação. Com o desenvolvimento das técnicas de construção e barateamento dos circuitos semicondutores empregados na fabricação das *tags* RFID tradicionais, os sistemas sem *chip* devem apresentar um grande desenvolvimento e expansão em sua utilização (PRERADOVIC; KARMAKAR, 2010, 2012b; VENA et al., 2013; VENA; PERRET; TEDJINI, 2012).

Outro importante fator de classificação das *tags* e neste caso inclusive dos leitores RFID é o tipo de protocolo e padrões de comunicação que eles estão preparados para utilizar. No geral as *tags chipless* não possuem nenhum padrão de comunicação ou protocolo, uma vez que elas possuem uma baixa capacidade de armazenamento de informações em relação as *tags* com *chip*, ou *chipped tags*, limitando a sua gama de aplicações, porém este tipo de *tag* é indicada para aplicações similares aos códigos de barras, com a vantagem da leitura e captação das informações por meio de ondas eletromagnéticas, não necessitando de área livre e um posicionamento específico do leitor como ocorre em sistemas ópticos de leitura de códigos de barra (PERRET, 2014; PRERADOVIC; KARMAKAR, 2010).

Em termos de identificação por rádio frequência em *tags* com *chip*, existem duas organizações que estabelecem padrões e normas de comunicação, são elas: a ISO (*International*

Standards Organization) e EPCglobal (*Electronic Product Code*). A ISO por meio da norma ISO 18000, estabelece a classificação de *tags* mediante a divisão de frequências para utilização em ambiente aberto, seguindo os demais parâmetros descritos na norma (SMILEY, 2016). No Quadro 1 é mostrado o sistema de classificação utilizado pela ISO 18000.

Quadro 1 – Classificação segundo ISO 18000.

Código do Padrão de comunicação	Frequência
ISO 18000 – v1	Padrão genérico para frequências ISM globais
ISO 18000 – v2	135 KHz
ISO 18000 – v3	13,56 MHz
ISO 18000 – v4	2,45 GHz
ISO 18000 – v5	5,8 GHz
ISO 18000 – v6	860 MHz 960 MHz
ISO 18000 – v7	433,92 MHz

Fonte: adaptado de Smiley (2016).

Como pode ser observado no Quadro 1, o padrão ISO 18000, estabelece a divisão em sete frequências diferentes, necessitando que as *tags* e leitores também atendam os demais requisitos descritos na norma, uma das funções principais do *chip* presente nas *tags* é de portar os protocolos de comunicação compatíveis com a aplicação e o sistema de leitura planejado.

Por sua vez a EPCglobal, divide as *tags* em cinco classes principais, estabelecendo critérios quanto a capacidade leitura da leitura e memória da *tag* (SMILEY, 2016). No Quadro 2 são mostradas as formas de classificação segundo a EPCglobal.

Quadro 2 – Classificação segundo EPCglobal.

Classe	Descrição
Classe 0	Permite apenas leitura de dados; Uso exclusivo em <i>tags</i> passivas
Classe 1	Permite apenas leitura de dados; Uso exclusivo em <i>tags</i> passivas
Classe 2	<i>Tag</i> passiva Leitura e escrita de dados (acima de 65 kb)
Classe 3	<i>Tag</i> semipassiva; Leitura e escrita de dados
Classe 4	<i>Tag</i> ativa; Permite leitura de outras <i>tags</i>
Classe 5	<i>Tag</i> ativa; Capacidade de comunicação com <i>tags</i> classe 4 e 5 além de outros dispositivos

Fonte: adaptado de Smiley (2016).

Como pode ser observado no Quadro 2 o critério básico utilizado pela EPCglobal, na classificação das *tags* RFID é sua capacidade de leitura e/ou escrita de novos dados nas *tags* e

tipos de sistemas de comunicação ativos, semipassivos ou passivos. Tantos as *tags* como os leitores podem ou não ser compatíveis com ambos os padrões e protocolos de comunicação, cabendo ao usuário do sistema atentar-se para compatibilidade dos sistemas de identificação (MARQUES et al., 2009).

As *tags* ativas geralmente apresentam a maior capacidade de comunicação e armazenamento de dados, utilizadas principalmente na identificação e rastreamento de produtos ou insumos de alto valor, o presente trabalho tem o objetivo de desenvolver uma antena CPW em substrato têxtil para aplicações em sistemas RFID, com base nas classificações mostradas na presente seção, um exemplo de utilização final da antena poderia se dá em uma *tag* ativa, com *chip* e padrão ISO 18000-v4 e EPCglobal classe 4 ou 5, destacando-se que não necessariamente precisaria atender aos padrões estabelecidos pela norma ISO e EPCglobal simultaneamente.

2.1.2 Frequências para RFID

Os sistemas de Identificação por Rádio Frequência podem ser utilizados para diferentes aplicações, desta forma, existem uma série de frequências que podem ser utilizadas em sistemas RFID, cada uma delas apresentando características que beneficiam tipos determinados de aplicações (BOLIC; SIMPLOT-RYL; STOJMENOVIC, 2010).

A variação do espectro de frequência entre países e regiões dificulta a adoção de sistemas de *tags* e de leitura de dados unificados, geralmente exigindo a utilização de *tags* e sistemas de leitura que permitam a utilização de mais de uma faixa de frequência. No Brasil as frequências utilizadas são relativamente próximas as faixas utilizadas nos Estados Unidos e nos demais países do continente americano, com algumas exceções (DIAS, 2013).

Segundo a Resolução nº 506, de 1º de julho de 2008, Regulamento Sobre Equipamentos de Radiação Restrita, da Agência Nacional de Telecomunicações, ANATEL e Seguindo o Plano Nacional de Atribuição, Destinação e Distribuição de Frequências, os sistemas de Identificação por Rádio Frequência, RFID, podem operar nas faixas de frequências descritas no Quadro 3 (ANATEL, 2008, 2016).

Comercialmente, a frequência mais utilizada em sistemas RFID é na faixa UHF (*Ultra-High Frequency*) que compreende a faixa de 860 MHz à cerca de 930 MHz, no Brasil conforme pode ser observado no Quadro 3, ocorre uma série de subdivisões dessa faixa de frequência,

pois são utilizadas por outros serviços de comunicação além do RFID, como telefonia móvel e *internet* (DIAS, 2013).

No geral as divisões de frequência levam em consideração as faixas de serviços definidas em cada país ou região, o Brasil utiliza geralmente padrões internacionais para o estabelecimento de suas resoluções, mas levando em consideração as faixas dos serviços locais. Nos Estados unidos por exemplo a faixa UHF para RFID corresponde a 902-928 MHz, no Brasil a divisão fica entre 902-907,5 MHz e 915-928 MHz, esta divisão ocorre pois a faixa de 907,5-915 MHz é utilizada para Serviço Móvel Pessoal (SMP), que possui caráter primário enquanto RFID possui um caráter secundário de serviço, ou seja, serviços SMP tem prioridade em relação aos de caráter secundário (DIAS, 2013).

Quadro 3 – Faixas de Frequência RFID no Brasil

Faixa de Frequência	Largura de banda
119-135 KHz	16,00 KHz
13,11-13,36 MHz	0,25 MHz
13,41-14,01 MHz	0,60 MHz
433,4-434,5 MHz	1,10 MHz
860-869 MHz	9,00 MHz
894-898,5 MHz	4,50 MHz
902-907,5 MHz	5,50 MHz
915-928 MHz	13,00 MHz
2400-2483,5 MHz	83,5 MHz*
5725-5859 MHz	135 MHz

*Faixa de frequência central da aplicação do presente trabalho.

Fonte: adaptado de Anatel (2008).

No momento de definição do tipo de aplicação do sistema RFID se estabelece qual faixa de frequência utilizar de acordo com o caráter da aplicação, por exemplo, frequências muito baixas possuem uma menor largura de banda; sistemas UHF RFID, geralmente possuem um desempenho ruim quando as *tags* são fixadas em locais metálicos (DIAS; BALADEI, 2012). Desta forma o desenvolvimento de equipamentos de leitura, antenas entre outros elementos do sistema RFID deve considerar os aspectos e as necessidades de cada utilização (BOLIC; SIMPLOT-RYL; STOJMENOVIC, 2010; DIAS, 2013; PERRET, 2014).

Uma das formas de se evitar interferência e problemas de compatibilidade entre as frequências utilizadas pelo sistemas e a de outros serviços é atentar-se para cumprimento de

normas e homologações de órgãos de regulamentação de telecomunicações (DIAS, 2013; DIAS; BALADEI, 2012).

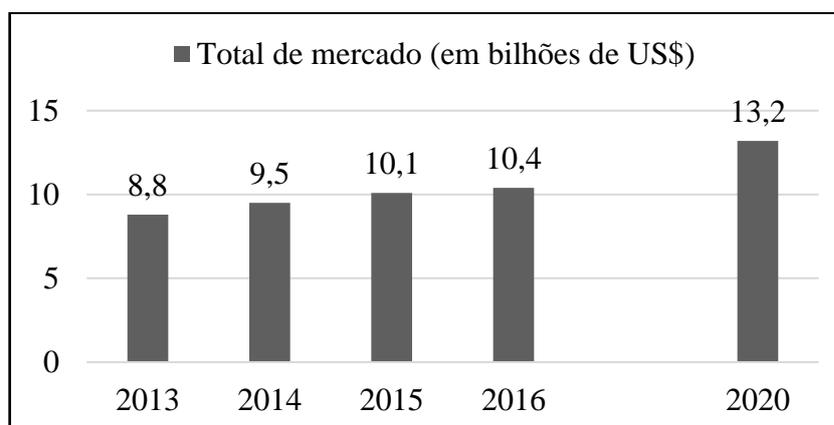
2.1.3 Tendências de mercado

As duas últimas décadas foram marcadas pela grande adoção e desenvolvimento da tecnologia RFID, aplicada principalmente na gestão de ativos, segurança e controle de acesso, gestão da cadeia de suprimentos dentre outras diversas aplicações. Esta tecnologia tem sido cada vez mais adotada por grandes cadeias varejistas dos Estados Unidos, Europa e Ásia (PRERADOVIC; KARMAKAR, 2012a)

Em 2013 este mercado movimentou cerca US\$ 8,8 bilhões, US\$ 9,5 bilhões em 2014 e fechando 2015 com uma movimentação total estimada em US\$ 10,1. Um mercado bilionário que envolve uma vasta gama de empresas, desde os fabricantes de infraestrutura para os sistemas RFID, como *tags*, leitores e *data centers* para processamento e armazenamento de dados, até empresas de consultoria e instalação, atendendo a clientes de diversos setores (DAS; HARROP, 2015)

Este é um mercado em franca expansão e ainda apresenta uma vasta gama de oportunidades não exploradas. Para o ano de 2016 este mercado apresentou crescimento, mesmo com a desaceleração das economias asiáticas e emergentes, movimentando cerca de US\$ 10,4 bilhões em 2016 e a expectativa é que até 2020 já corresponda a um total de US\$ 13,2 bilhões (DAS; HARROP, 2015). Estes dados são representados graficamente na Figura 3.

Figura 3 – Volume do mercado RFID e expectativas futuras.



Fonte: adaptado de (DAS; HARROP, 2015).

Todavia, esta tecnologia ainda não é explorada em todo seu potencial em aplicações de baixo custo, apesar dos avanços nas técnicas de fabricação dos componentes e a contínua redução de custos das *tags* e da infraestrutura de leitura e armazenamento de dados, o preço da

tag ainda se caracteriza como um fator impeditivo para adoção em maior escala desta tecnologia, em alguns segmentos e aplicações. Outro fator que prejudica a expansão deste mercado é a falta de conhecimento adequado por parte de usuários finais, desconhecendo soluções que se adequariam as suas necessidades (PRERADOVIC; KARMAKAR, 2012b)

Um das tecnologias que vem sendo pesquisada e que pode diminuir o valor da *tag* auxiliando na expansão deste mercado é a utilização de *tags* RFID *chipless*. Os circuitos integrados de aplicação específicas, *Application-Specific Integrated Circuit*, (*ASIC chip*), ou seja, os *chips* das *tags*, geralmente, são os componentes mais caros, dificultando a adoção desta tecnologia em soluções que exijam baixo custo (REZAIESARLAK; MANTEGHI, 2015a).

Por conseguinte, desenvolver *tags* que não exijam um *ASIC chip* pode reduzir o preço desta tecnologia, viabilizando uma expansão de sua adoção pelo mercado. A tecnologia RFID *chipless* tem potencial de substituir e/ou se integrar a trilhões de códigos de barras impressos a cada ano, pois a intenção de se baratear cada vez mais o preço de uma *tag* é torná-la mais competitiva em relação ao baixo custo de sistemas de identificação óptica por código de barras, trazendo as vantagens da comunicação por rádio frequência (REZAIESARLAK; MANTEGHI, 2015a).

Desde as primeiras proposições de um sistema RFID similar a um código de barras mostrado em Jalaly e Robertson (2005), esta tecnologia apresentou um considerável desenvolvimento como mostram Preradovic e Karmakar (2012), entretanto, no geral, a capacidade de codificação de dados é inferior aos sistemas RFID com *chip*. Apesar de ser uma tecnologia promissora sistemas RFID *chipless* devem coexistir com aplicações mais tradicionais, sendo utilizadas geralmente onde seriam aplicados os códigos de barras ópticos (PERRET, 2014).

As *tags* passivas são as mais comuns em termos de utilização de mercado devido a seu baixo custo, entretanto há um nicho bastante expressivo para utilização de *tags* RFID ativas e semipassiva. Pois estas permitem uma maior capacidade de processamento de dados e interação com o meio. Por exemplo, as *tags* ativas podem ler e armazenar informações presentes em outras *tags* (passivas, semipassivas e ativas) presentes em sua proximidade, permitindo uma redução da quantidade de leitores necessários para instalação em um ambiente comercial (PERRET, 2014).

A utilização de *tags* semipassiva permitem a integração de sensores que podem obter informações do ambiente onde se encontra a mercadoria ou insumo e servir de base para o controle de variáveis como temperatura e umidade local. Mesmo com a possibilidade de desenvolvimento de sistemas passivos com capacidade de sensoriamento como mostrado em

Guillet et al.(2012), este no geral apresentam limitações para processamento de dados e alcance de leitura quando comparado aos demais. Desta forma são indicados quando o parâmetro de custos é bastante restrito (PERRET, 2014).

Como tecnologia de Identificação por Rádio Frequência, permite a comunicação e obtenção de informações tanto de objetos como de seus ambientes, além de abranger uma vasta gama tecnologias com diferentes especificações de frequência, alcance, custo dentre outros fatores, ela é considerada um dos alicerces para comunicação da chamada *Internet* das coisas, *Internet of Things*, IoT.(PERRET, 2014; REZAIESARLAK; MANTEGHI, 2015a).

2.1.3.1 *Internet* das Coisas, IoT e RFID

A *Internet* das coisas é um conceito que surgiu nos últimos anos que se refere a capacidade de conectar dispositivos, objetos, edificações, equipamentos e pessoas para obtenção e troca de informações (HEMMERICH, 2016).

Tais vantagens da comunicação sem fio da tecnologia RFID são fundamentais para o desenvolvimento da chamada “*Internet* das coisas”, em inglês “*Internet of Thing*”, IoT, que consiste em tecnologias aplicadas na integração de objetos, “coisas”, reais e virtuais através de interações multimídia, captação e processamento de dados e informações para aplicações sociais, comerciais dentre outras finalidades. Desta forma, a tecnologia RFID é um importante pilar para muitas aplicações da IoT, uma vez que já possui uma série de padrões, protocolos e infraestrutura já estabelecida (VERMESAN et al., 2009).

A tecnologia de IoT visa, sobretudo, a comunicação entre diferentes tipos de objetos, para obtenção de dados que possam ser utilizados para análise de informações que permitam desde do controle ambiental, análise de comportamento de consumidor, informações sobre funcionamento de equipamentos para planejamento de manutenção dentre outras aplicações. Estima-se que a maior parte dos sistemas de telecomunicações para IoT seja desenvolvida com base em tecnologias e protocolos de comunicação já existentes como os que são utilizados em RFID, ZigBee e demais padrões M2M (*Machine to Machine*) em geral (HARROP; HARROP; PUGH, 2017).

Todavia, o desenvolvimento de protocolos e padrões de comunicações próprios para IoT se fazem necessários devido ao grande volume de informações e objetos a serem conectados, no Brasil o Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTI), está desenvolvendo um Plano Nacional de *Internet* das coisas, onde prever este como um setor

estratégicos de investimento, O Banco Nacional de Desenvolvimento (BNDES) é um dos principais órgãos na operacionalização e desenvolvimento do Plano e já prevê incentivo financeiro e linhas de créditos para empreendimentos na área (MCTI, 2016).

Warfield (2016) destaca que as tecnologias existentes em termos de identificação de objetos e produtos é voltada, sobretudo para aplicações comerciais, porém as aplicações em IoT devem trazer vantagens e aplicações para o uso pessoal, desde que se desenvolva formas mais baratas de comunicação e a integração de componentes eletrônicos aos objetos. Apesar rápido avanço e adoção da IoT ainda é necessária a pesquisa e o desenvolvimento de diversas tecnologias que viabilizem novas aplicações

2.1.3.2 Novas tecnologias em RFID e IoT

Uma linha pesquisa que vem crescendo nos últimos anos é utilização de materiais têxteis no desenvolvimento de antenas, como a tecnologia RFID já possui um mercado com cifras expressivas, são cada vez mais comuns pesquisas quanto a utilização de substratos têxteis no desenvolvimento de *tags* RFID. (BJÖRNINEN et al., 2014; SALVADO et al., 2012)

A utilização de materiais têxteis no desenvolvimento de circuitos planares, como antenas, superfícies seletivas de frequência (FSS) e filtros planares, podem trazer a maleabilidade, flexibilidade e leveza a estes componentes, estas são importantes características buscadas quando se implementa estas soluções em sistemas embarcados por exemplo (CAVALCANTE, 2014).

Empregar matérias têxteis na construção e desenvolvimento de *tags* RFID pode proporcionar estas características mostradas por Cavalcante (2014), assim possibilitando que a indústria têxtil possa integrar, tais soluções diretamente em seus processos de fabricação de tecidos ou na indústria de confecção de roupas, como é mostrado por Ukkonen, Sydänheimo e Rahmat-Samii (2012), integrando uma *tag* RFID diretamente em uma roupa, através da técnica de construção de uma antena têxtil.

As principais formas de se fabricar uma antena em substrato têxtil são: Bordado de fio condutivo diretamente no tecido; Fixação de uma fina folha de cobre (ou outro metal ou material condutivo) diretamente sobre o tecido; ou ainda através de Tinta Condutiva. Dentre estas opções a que apresenta maior durabilidade e resistência a lavagem é o método de bordar fio condutivo, porém tal método necessita de materiais e equipamentos próprios para esta

finalidade, aumentando custos e dificultando sua adoção (UKKONEN; SYDÄNHEIMO; RAHMAT-SAMII, 2012).

Devido ao crescente interesse acadêmico e de mercado nestas tecnologias, surgiu a nomenclatura de “tecidos e-têxteis” (em inglês, *e-textiles*) para designar tecidos, fibras e outros materiais utilizados nesta indústria como base para integração em sistemas elétricos e eletrônicos. Este é um segmento de mercado ainda pequeno, mas em 2015 apresentou investimentos em pesquisa e desenvolvimento na ordem de US\$ 100 milhões de dólares, mas apresenta um grande potencial de crescimento para os próximos dez anos, podendo chegar a US\$ 3 bilhões de dólares até 2026 (HAYWARD, 2017).

Apesar do crescimento do interesse na utilização desses materiais, sua aplicação deve vir acompanhada de uma série de caracterizações para análise da viabilidade do emprego de tecidos na construção de antenas que supram as necessidades de aplicações propostas. Pois características individuais de cada material têxtil como permissividade elétrica e a espessura do material, quando utilizado como substrato de uma antena, influenciam diretamente em fatores como largura de banda e eficiência (CAVALCANTE, 2014).

Além da viabilidade da utilização de tecidos como substratos de antenas para essas aplicações, novas frequências de operação vem sendo utilizadas no desenvolvimento de sistemas de comunicação, uma tendência em desenvolvimento para RFID e IoT é a utilização do espectro de ondas eletromagnéticas em terahertz, THz, além de permitir o desenvolvimento de estruturas de comunicação relativamente pequenas, facilitando a integração com equipamentos e objetos. Podendo também permitir o desenvolvimento de sistemas de identificação que não utilizam materiais condutivos (PERRET et al., 2013).

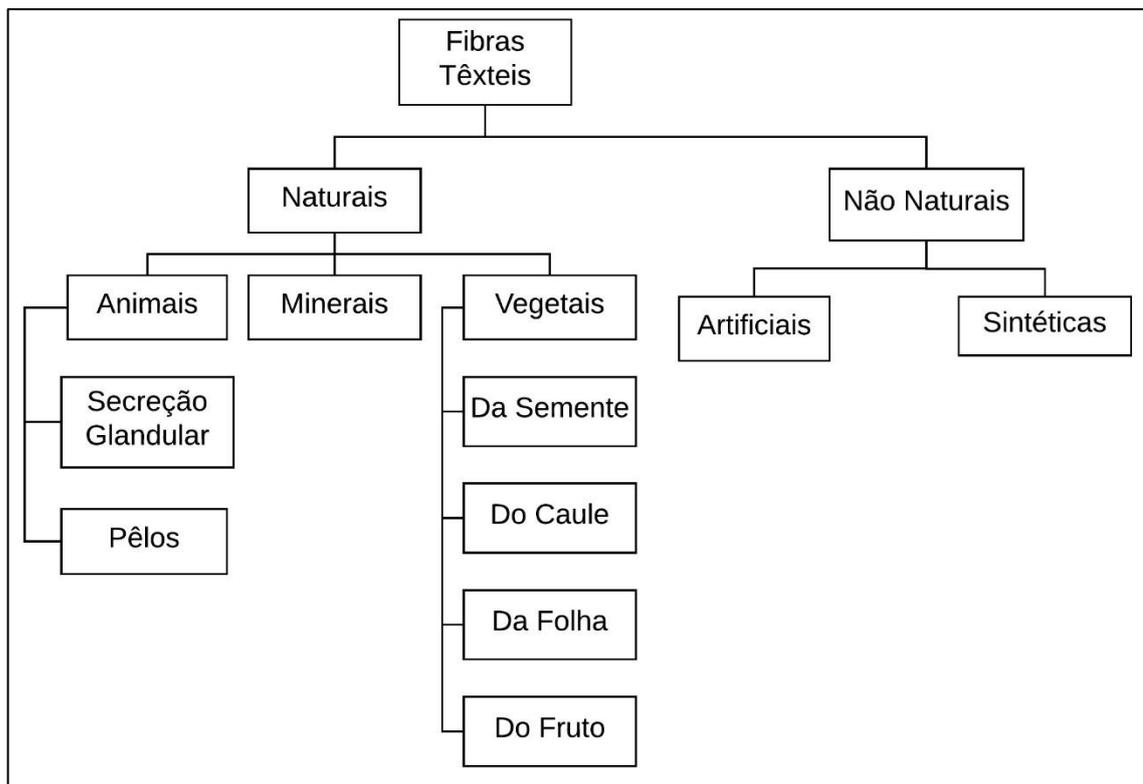
Esta tecnologia vem sendo chamada de THID, *Terahertz IDentification*, como uma área particular ainda em desenvolvimento do RFID e propiciando futuras aplicações em IoT por exemplo. Permitindo a utilização de pequenas estruturas em material condutor para transmissão e recepção de dados, utilizar este espectro de frequência permite o desenvolvimento de *tags* RFID sem utilização de materiais condutivos, apenas intercalando camadas de materiais que a afetam a propagação do sinal eletromagnético nessa faixa de frequência (PERRET, 2014; PERRET et al., 2013). Além dessas, existem muitas outras tecnologias em desenvolvimento para utilização em RFID e IoT. Na seção 2.2 é abordado o conceito referentes a tecidos e fibras têxteis

2.2 TECIDOS E FIBRAS TÊXTEIS

Os tecidos são materiais fibrosos, ou seja, materiais que são compostos por fibras, segundo Pereira (2009) fibras têxteis são unidades de matéria que se caracterizam por sua flexibilidade, finura e uma elevada proporção entre comprimento e espessura, cujo as propriedades viabilizam a transformação destes materiais em fios.

As fibras têxteis podem ser de origem Natural ou Não-Natural, as fibras naturais podem ser de origem animal, como lã e seda, origem vegetal (algodão e linho) ou de origem mineral (fibra amianto, fibra de basalto). Por sua vez, as fibras não-naturais são divididas em Artificiais, que são produzidas por meio de processos industriais utilizando como matéria-prima polímeros de origem natural, por exemplo acetato de celulose; ou podem ser fibras Sintéticas, que utilizam como matéria-prima compostos de origem química, como derivados de petróleo, como é o caso do Poliéster (ARAÚJO et al., 2001; PEREIRA, 2009). A Figura 4 mostra um resumo esquemático da classificação das fibras têxteis

Figura 4 – Classificação das fibras têxteis.



Fonte: adaptado de Pereira (2009).

Cada fibra pode apresentar propriedades particulares, diferindo-se entre si, mesmo quando são de origem similar. Propriedades como massa específica, elasticidade, hidrofiliidade e as próprias cadeias moleculares que constituem a fibra influenciam diretamente em suas

características, por conseguinte também influenciaram os tecidos a serem produzidos com estas matérias-primas (PEREIRA, 2009).

Para facilitar a identificação das fibras utilizadas na produção de materiais têxteis, utilizam-se siglas que designam quais materiais foram empregados, na Tabela 1 é mostrado o exemplo de algumas designações utilizadas no Brasil, pela NBR 12744:1992, estas siglas podem sofrer algumas variações dependendo da norma que é adotado.

Tabela 1 – Classificação de fibras quanto a origem

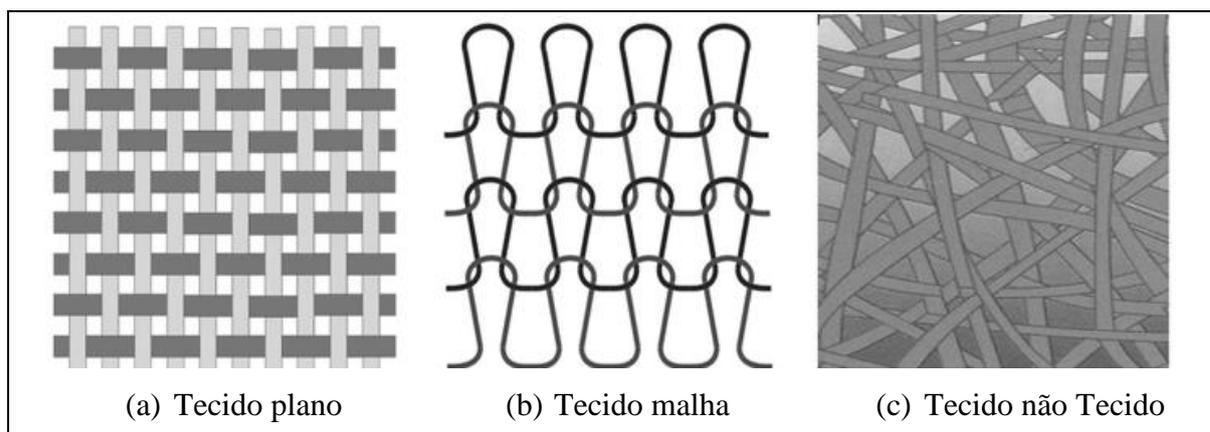
Natural			Não-Natural		
Origem	Composição	Sigla	Origem	Composição	Sigla
Vegetal	Algodão	CO	Artificial	Acetato	CA
	Juta	CJ		Liocel	CLY
	Linho	CL		Modal	CMO
	Rami	CR		Viscose	CV
Animal	Lã	WO	Sintético	Acrílico	PAC
	Seda	S		Elastano	PUE
Mineral	Fibra de Amianto	A		Poliéster	PES
	Fibra de Basalto	-		Poliéster alifásico	PLA
	Crisotila	-		Poliamida	PA

Fonte: adaptado de Pereira (2009).

Para a criação dos fios, as fibras passam pelo processo de fiação, após este processo obtém-se o insumo necessário para se desenvolver os tecidos têxteis por meio de tecelagem, produzindo tecidos planos através do entrelaçamento de fios verticais (fios de Urdume) e horizontais (fios de Trama). Ou produz-se tecidos por meio dos processos de malharia, ou seja, tecidos malha. As malhas são fabricadas por meio de laçadas entre fios no mesmo sentido. Ainda há os Tecidos não Tecidos (TNT), eles não passam por processos de tecelagem ou malharia, em síntese são aglomerados planares de fibras que são fabricados por processos mecânicos, como fricção; químicos, adesão química; ou por combinações destes métodos (NEMR, 2012). Na Figura 5 é ilustrada a disposição física dos fios em cada tipo de tecido.

Na Figura 5a é mostrada a disposição física dos fios em um tecido do tipo plano, de acordo com cada tipo de tecido plano pode haver algumas variações no entrelaçamento entre os fios de trama e urdume (horizontal e vertical, respectivamente). Na Figura 5b é mostrada a estrutura dos tecidos de malha, onde a principal característica é a utilização de laçadas para formação do tecido, os tecidos de malha podem variar de acordo com o tipo de laçada utilizada. Na Figura 5c pode ser observada a estrutura genérica de um Tecido Não Tecido, também conhecido como TNT, onde as fibras são a aglomeradas por meio de processos físicos e/ou químicos, logo, no geral, não há uma disposição uniforme das fibras.

Figura 5 – Tipos de tecidos.



Fonte: adaptado de Pereira (2009).

Inicialmente o presente estudo realizou o teste em seis tecidos do tipo malha, na Tabela 2 são mostrados os tecidos utilizados na caracterização das propriedades físicas e elétricas das amostras.

Tabela 2 – Tecidos utilizados

Tecido	Sigla	Origem
Acrílico	PAC	Sintética
Polipropileno + Poliéster Alifático Termoplástico	PP + PLA	Sintética
Acrílico Tingido	PAC_tingido	Sintética
100% SPF	SPF	Vegetal
100% Algodão	CO	Vegetal
Algodão + Poliamida	CO+PA	Vegetal+sintética

Fonte: autoria própria.

Conforme mostrado na Tabela 2 os tecidos caracterizados foram: três de origem sintética, dois de origem vegetal e um que mescla ambos tipos de fibras. Sendo que dois dos tecidos sintéticos são de amostras de mesmo material, mas passaram por processos diferentes, um deles apresenta tingimento, o que pode influenciar nas propriedades finais do tecido (CAVALCANTE, 2014).

O presente trabalho irá utilizar exclusivamente tecidos do tipo malha, aplicados na confecção de uma antena em substrato têxtil para utilização em uma *tag* RFID ativa e/ou sistemas para comunicação em computação física. Além do tipo de material que o tecido é feito, outros fatores importantes para obtenção de características desejadas no projeto devem ser consideradas, pois estas características influenciam diretamente na construção de uma antena têxtil devido sua influência nas propriedades físicas e elétricas de um tecido, são elas: a Titulação do tecido; Gramatura; Resistência à tração, Estabilidade dimensional e a Caracterização das propriedades elétricas do tecido, como permissividade elétrica do material

e tangente de perdas (CAVALCANTE, 2014). Nas seções de 2.2.3.1 à 2.2.3.5 são detalhadas estas propriedades dos materiais têxteis analisados. Na seção 2.2.1 são mostradas as características das fibras têxteis dos tecidos analisados.

2.2.1 Fibras Têxteis

Como mostrado na Tabela 2, os seis tecidos analisados no presente trabalho são constituídos de fibras de diferentes origens, com um total de seis tipos de fibras utilizadas: Algodão (CO), Acrílico (PAC), Ácido Polilático (PLA), Polipropileno (PP), Fibras de Proteína de Soja (SPF), Poliamida (PA).

Nesta seção serão detalhadas características de cada uma das fibras utilizadas na constituição dos tecidos analisados

2.2.1.1 Algodão (CO)

O algodão, do inglês *cotton* (CO), é um tipo de fibra natural amplamente utilizado na indústria, é um derivado natural das plantas do gênero *gossypium*. As referências históricas da utilização do algodão pelo homem veem de muitos séculos antes de Cristo. Os povos árabes foram os primeiros na utilização das fibras do algodoeiro para fiação e tecelagem de forma rudimentar. Com o aumento do comércio entre a Europa e o Oriente médio por meio da expansão de rotas comerciais marítimas, este tipo de material acabou superando a utilização da lã na indústria têxtil (BARROS JÚNIOR, 2013).

Durante a revolução industrial uma das primeiras atividades de produção em larga escala foi a indústria têxtil e os tecidos de fibra de algodão eram os mais produzidos. O Brasil e principalmente os Estados Unidos ao longo desse período passaram a ser um dos maiores fornecedores de matéria-prima as indústrias têxteis inglesas (BARROS JÚNIOR, 2013).

Segundo Aquino (2012), dentre suas características as fibras de algodão apresentam uma alta durabilidade, resistência à lavagem e ao uso, hidrofiliidade e boa condutividade térmica, além da facilidade da criação de fios com suas fibras. Contudo, também demonstram fácil combustão, intolerância a ácidos e fácil proliferação de fungos.

Desta forma, as fibras de algodão são comumente utilizada em associação com outras fibras, geralmente de origem artificial ou sintética para proferir diferentes propriedades finais a

cada tecido, esta técnica também é bastante comum na engenharia têxtil para outros tipos de matéria-prima (AQUINO, 2012).

Devido a grande utilização das fibras de algodão na indústria têxtil para o desenvolvimento de diversos tipos de tecidos também em associação com outros materiais fibrosos, geralmente os tecidos desenvolvidos com este tipo de material vem sendo pesquisados na utilização de substratos de antenas para diferentes aplicações (LI et al., 2012; SANKARALINGAM; GUPTA, 2010; VENA et al., 2013; WHITTOW et al., 2014).

2.2.1.2 Acrílico (PAC)

A fibra sintética de acrílico foi desenvolvida na década de 1940, foi umas das primeiras fibras sintéticas utilizadas em larga escala na indústria têxtil junto com a poliamida. Geralmente o acrílico é utilizado em associação com outras fibras para composição de tecidos inteiramente deste material ou com a associação de outros materiais fibrosos, utilizados corriqueiramente na constituição de pequenas partes das roupas como golas, estruturas para reforço entre outras aplicações (NEMR, 2012).

O acrílico é obtido a partir da polimerização do Poliacrilonitrilo (*Polyacrylonitrile*, PAC), no geral as fibras de acrílico possuem alto módulo de elasticidade, maciez, ductibilidade e elevada resistência a tração, porém em baixas temperaturas pode se tornar quebradiço (NEMR, 2012).

Além das aplicações têxteis o acrílico possui uma série de outras aplicações na indústria, desde a utilização das fibras de acrílico no desenvolvimento de estruturas de construção (PEREIRA-DE-OLIVEIRA; CASTRO-GOMES; NEPOMUCENO, 2012), como no desenvolvimento de estruturas eletrônicas e sensores (STEMPIEN et al., 2015).

2.2.1.3 Ácido Polilático (PLA)

As fibras de ácido polilático ou polilactato (*Polylactic Acid*, PLA) são um tipo de fibra sintética produzida a partir do ácido láctico (AL), este por sua vez, pode ser produzido por meio da fermentação de açúcares, seguindo pelos processos de purificação e polimerização, produzindo um poliéster alifático que é onde se enquadra o PLA (LIMA FILHO, 2009).

O PLA pode ser produzido a partir de diferentes açúcares sendo geralmente extraídos de grãos. Geralmente grãos com proporções maiores de polissacarídeos apresentam um melhor rendimento de produção, sendo o milho um dos mais utilizados. Os tecidos desenvolvidos com PLA, apresentam características como estabilidade dimensional, transferência de líquidos e não irritabilidade da pele (AQUINO, 2012).

2.2.1.4 Polipropileno (PP)

A fibra de polipropileno é uma fibra sintética obtida por meio do processo de polimerização do propeno (C_3H_6), ou seja, o processo de polimerização consiste na combinação química de moléculas de propeno para formação de moléculas maiores, como o Polipropileno (LIMA FILHO, 2009).

As características de destaque deste tipo de fibra aplicada ao processo de fabricação de tecido são a resistência a umidade, leveza, resistência a abrasão, elevada inércia química e resistência a fatores biológicos como fungos e bactérias. Este tipo de fibra pode ser utilizado na produção de tecidos integralmente feitos deste material ou em associação com outras fibras têxteis (LIMA FILHO, 2009).

2.2.1.5 Fibras de Proteína de Soja (SPF)

A fibra de Proteína de Soja (*Soybean Protein Fibers*, SPF) é considerada uma fibra artificial, pois é formada a partir da regeneração da cadeia proteica do grão de soja, assim é uma fibra biodegradável que apresenta uma mescla das características das fibras naturais e sintéticas (AQUINO, 2012; LIMA FILHO, 2009).

O processo de síntese deste tipo de fibra gera uma quantidade de proteínas na ordem de 40% do volume de matéria-prima, apresentando uma boa rentabilidade de produção das fibras em comparação a outros grãos como milho e amendoim, os primeiros estudos para produção destas fibras datam da década de 1940 inicialmente no Japão e posteriormente no Estados Unidos (VYNIAS, 2011). Na Figura 6 é mostrada uma representação das fibras obtidas a partir dos grãos de soja.

Figura 6 – Fibra de proteína de soja SPF.



Fonte: Adaptado de Swicofil (2015).

Como mostrado na Figura 6, uma das principais características das fibras de soja é o seu brilho característico, outro fator de destaque é sua fácil associação com outras fibras naturais como algodão, permitindo a fabricação de tecidos compostos (VYNIAS, 2011).

2.2.1.6 Poliamida (PA)

A poliamida também conhecida pelo nome comercial de Nylon (quando em forma de fibras têxteis) foi uma das primeiras fibras sintéticas desenvolvidas na década de 1930, pelo químico Wallace H. Carothers, nos laboratórios da empresa americana *E. I. du Pont Nemours and Company* (DuPont), entre suas propriedades se destacam a resistência elevada, maciez, conforto e absorção equilibrada de umidade (LIMA FILHO, 2009).

Devido estas características fibras de poliamidas tem sido utilizadas em associação com outras fibras, principalmente naturais para composição de tecidos com propriedades mais próximas da fibra sintética (LIMA FILHO, 2009).

2.2.2 Estruturas têxteis

Segundo Lima Filho (2009) e Aquino (2012) as estruturas têxteis consistem nas formas de entrelaçamento dos fios utilizados na produção de um tecido. A forma como são realizados o processos de entrelaçamento dos fios pode influenciar diretamente em características físicas do tecido, como estabilidade, conforto térmico e resistência, devido aos níveis de tensão

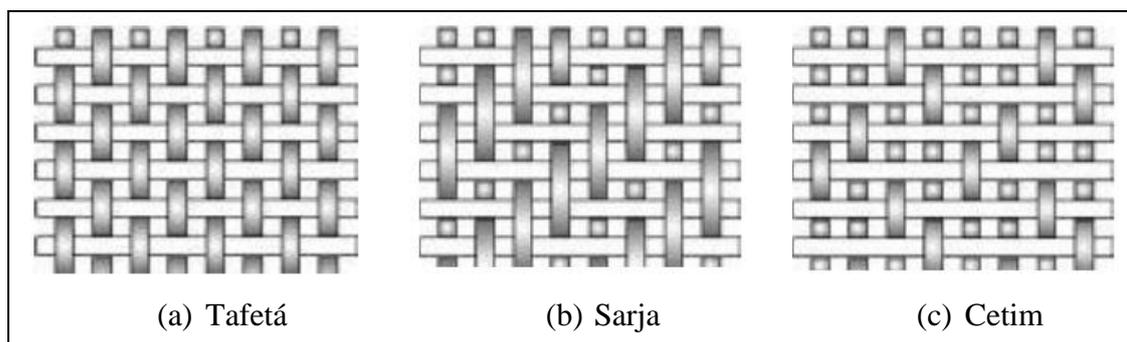
aplicados, influenciando na porosidade do tecido de acordo também com as características das fibras empregadas (NEMR, 2012).

A seguir serão detalhadas as principais formas entrelaçamento de fios utilizados em tecidos planos e tecidos de malhas focando nas de tecido de malha devido aos objetivos deste trabalho.

2.2.2.1 Estruturas de Tecidos Planos

Os tecidos planos são formados pelo entrelaçamento entre fios verticais, também chamados de fios de urdume e fios horizontais, conhecidos como trama. Dentre os tecidos planos se destacam três estruturas tradicionais, Tafetá (Figura 7a), Sarja (Figura 7b) e Cetim (Figura 7c). A forma de entrelaçamento desses tecidos é mostrada na Figura 7 (PEREIRA, 2009).

Figura 7 – Tipos de tecidos Planos.



Fonte: adaptado de Pereira (2009).

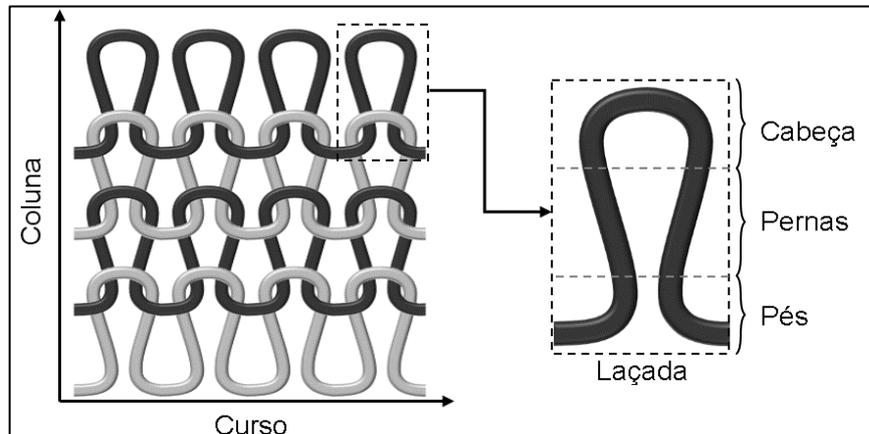
Como mostrado Figura 7 a principal diferença entre as estruturas tradicionais de tecido plano são as formas de entrelaçamento entre os fios de Trama e Urdume. A forma de entrelaçamento pode prover características distintas aos tecidos dependendo das características dos fios e das fibras utilizadas na constituição do tecido (PEREIRA, 2009).

2.2.2.2 Estruturas de Tecidos Malha

A produção de tecidos de malha não ocorre por meio do entrelaçamento de fios horizontais e verticais como nas estruturas planas, os tecidos de malhas são compostos por meio da formação de laços, a partir de um ou mais fios todos verticais ou todos horizontais, ou seja,

os fios que compõem os tecidos de malha devem estar no mesmo sentido (AQUINO, 2012). A estrutura básica da composição das malhas é mostrada na Figura 8.

Figura 8 – Estrutura básica do tecido de malha.

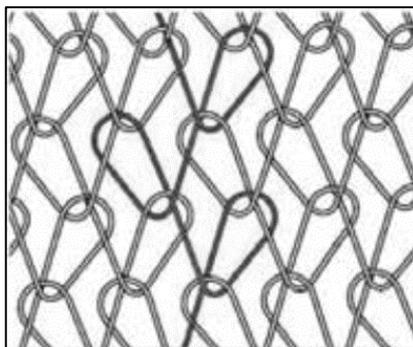


Fonte: adaptado de Holanda (2016).

Na Figura 8 é mostrada a forma básica do entrelaçamento dos tecidos do tipo malha, cada laçada é composta por três partes: Cabeça, parte superior do laço, Pernas, região intermediária do laço e Pés, região onde inicia-se a curvatura do fio para o início de outra laçada (HOLANDA, 2016; MACEDO, 2016).

Existem dois tipos principais de entrelaçamento de fios para formação de malha, as malhas de trama e as malhas de urdume. As malhas de trama possuem a estrutura mostrada na Figura 8, o tecido é formado por laçadas de múltiplos fios no sentido horizontal. Por sua vez as malhas por urdume são formadas por laçadas verticais como mostradas na Figura 9 (AQUINO, 2012).

Figura 9 – Malha por urdume.



Fonte: adaptado de Aquino (2012).

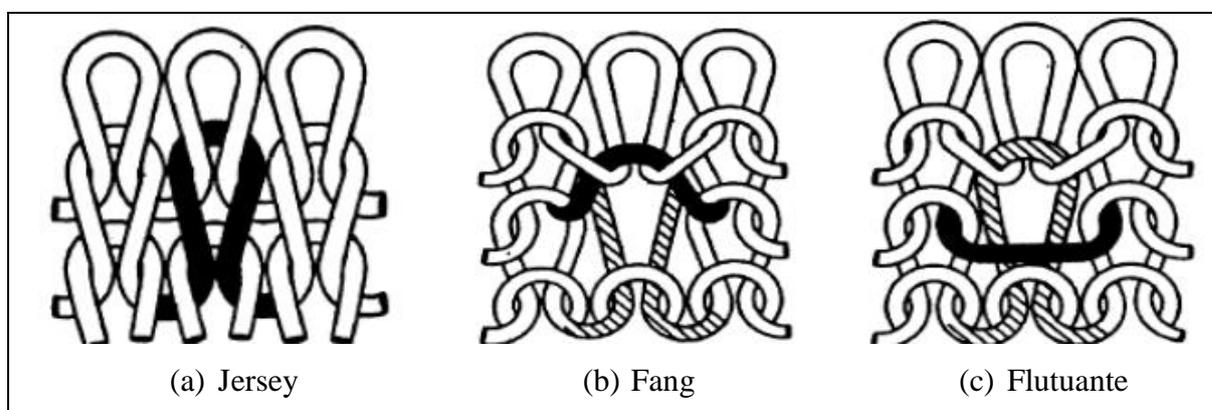
Como mostrado na Figura 9, a estrutura de malha por urdume apresenta uma forma de laçada distinta da malha por trama. Uma das principais características desse tipo de tecido é sua “indesmaltabilidade”, ou seja, o tecido não desfia, não desmalha quando algum fio é puxado (AQUINO, 2012).

Independente do tipos de laçada utilizada na construção do tecido o comprimento da laçada é um importante fator na constituição destes, ele relaciona o nível de proximidade entre a cabeça e os pés da laçada, quanto mais próximos menor o espaçamento entre os fios do tecido e conseqüente menor a porosidade da malha (KUASNE, 2008).

Guerra (2016) destaca que o comprimento da laçada é determinado no processo de fabricação do tecido estando intimamente ligado a capacidade de resistência a tração do fio, pois quanto mais próximos os elementos de cabeça e pés da laçada maior a tensão aplicada.

Macedo (2016) mostra que outra forma de classificação e modificação da estrutura dos tecidos de malha é através de combinações dos tipos de laçadas, destacando-se três tipos básicos, mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Tipos de laçadas de malha.



Fonte: adaptado de Macedo (2016).

Na Figura 10a é mostrado a laçada Jersey também conhecida como Meia Malha, neste tipo estrutura as laçadas são realizadas em apenas um lado do tecido utilizando pontos simples, este tipo estrutura apresenta uma boa elasticidade em diversas direções do tecido, porém apresenta uma tendência característica de enrolar nas bordas (MACEDO, 2016).

Na Figura 10b é mostrada a laçada do tipo Fang, ou laçada de retenção, neste tipo de laçada há uma inversão de sentido em algumas laçadas periódicas definidas durante o processo de fabricação, uma das principais características desse tipo de método de entrelaçamento é prover uma maior estabilidade a malha retendo algumas movimentações, por isso laçada de retenção (MACEDO, 2016).

É mostrada na Figura 10c, a laçada flutuante, também conhecida como laçada não trabalhada, este nome se deve ao fato de parte das laçadas não passarem por entrelaçamento ficando com uma porção do fio sem estar presa a estrutura do tecido, permitindo uma maior movimentação e porosidade (MACEDO, 2016).

Com base nas estruturas mostradas são criadas uma série de variações nos tecidos de malha, de acordo com as necessidade encontradas no desenvolvimento do tecido e das

características das fibras utilizadas na sua fabricação, Malhas de multicamada, malhas com textura Piquet entre outras variações construídas de acordo com os tipos básicos de laçada, estas variações produzem propriedades bastante características de cada tecido construído, por isso a importância da análise das propriedades das estruturas têxteis (LIMA FILHO, 2009; AQUINO, 2012; GUERRA, 2016; HOLANDA, 2016; MACEDO, 2016).

2.2.3 Análise da Propriedade dos Tecidos

Para o desenvolvimento de antenas em substratos têxteis a caracterização das propriedades do tecido é necessária, pois a origem da fibra, o tipo de estrutura têxtil e uma série de outros fatores influencia diretamente na constituição do tecido e suas propriedades, por consequência na utilização mais adequada dada suas características (KIM et al., 2007; SABA et al., 2012; VIRILI et al., 2014; YAO; QIU, 2015).

Nesta seção serão detalhados os conceitos e as principais propriedades para caracterização dos tecidos, abordando os parâmetros de Titulação, Gramatura, Estabilidade dimensional, Resistência à Tração e a Caracterização das propriedades elétricas.

2.2.3.1 Titulação

A titulação de um tecido propicia uma classificação normalizada em relação ao seu comprimento e massa. Existem duas metodologias para classificação do título de um tecido, a primeira é o Tex, também conhecido como método de titulação direto, pois seu resultado é diretamente proporcional ao diâmetro, ou seja, quanto maior o valor do título em Tex maior o diâmetro do fio, quando em materiais equivalentes, foi desenvolvido pelo *The Textile Institute* (ARAÚJO; CASTRO, 1987).

$$T = \frac{K \cdot p}{C} \quad (1)$$

Onde,

T = Título;

K = Constante de proporcionalidade, 1000 g/m (pode variar com o sistema utilizado);

p = Massa da amostra em grama (g);

C = Comprimento em metros (m).

O método de titulação Tex utiliza as unidades do Sistema Internacional em suas variáveis e constantes, além disso ele se caracteriza pela utilização de comprimento constante da amostra, variando a massa desta de acordo com o material, vide equação (1). A outra forma de titulação é através do método Ne, que utiliza unidades do sistema inglês e se caracteriza por manter a massa da amostra constante e variar o comprimento, esta metodologia é conhecido como método de titulação indireta, pois seu valor de título é inversamente proporcional ao diâmetro, logo quanto menor o título por esta metodologia maior a espessura do material, conforme mostrado na equação (2) (NEMR, 2012).

$$T = \frac{K \cdot C}{p} \quad (2)$$

Onde,

T = Título;

K = Constante de proporcionalidade, 8,33 gr/jd (pode variar com sistema utilizado);

p = massa em *grains*;

C = Comprimento em jardas, jd.

No sistema Ne as unidades da constante de proporcionalidade (K), massa (P) e comprimento (C) podem variar dentro do sistema inglês, desde que se respeite a correspondência entre elas.

$$T_{Ne} = \frac{590}{T_{Tex}} \quad (3)$$

Na Equação 3 é mostrada uma forma de correspondência entre os métodos Tex e Ne, facilitando a conversão entre valores calculados em cada metodologia utilizada para caracterização da titulação dos tecidos (ABNT, 2008).

2.2.3.2 Gramatura

Segundo a norma ABNT NBR 10591:2008 a gramatura de uma amostra têxtil é definida como a quantidade de massa em gramas (g) contida em um metro quadrado (m²) de área, estabelecendo a relação de massa por unidade área, logo o parâmetro de gramatura de uma amostra têxtil se refere a sua densidade, ou seja, quanto maior gramatura de um tecido maior a sua densidade de material. Desta forma, tecidos com maior gramatura apresenta mais massa por unidade de área, no geral apresentando uma estrutura de fibras menos porosas que tecidos de baixa gramatura.

2.2.3.3 Estabilidade Dimensional

O teste de Estabilidade dimensional consiste em submeter amostra de tecidos de tamanhos padronizados (100x100mm) a um processo de lavagem em uma solução de água e sabão à uma concentração de 4 g/l e volume máximo de 150 ml em um recipiente adequado para a realização do teste. Os tecidos são lavados a uma temperatura de 60 °C durante trinta minutos e posteriormente secados durante 4 horas em uma estufa à 37 °C. Após este processo as amostras são medidas para averiguar alguma alteração dimensional em relação ao estado original da amostra, tecidos com boa estabilidade dimensional são aqueles que apresentam uma variação dimensional de 5% de expansão ou encolhimento (ABNT, 1988).

2.2.3.4 Ensaio de Resistência à Tração

Segundo a norma ASTM D5034-09 o ensaio de resistência a tração deve abranger os procedimentos para determinar a resistência de ruptura do tecido assim como seu alongamento, ou seja, o quanto o tecido se deforma até o rompimento total de suas fibras. Tal ensaio possui o intuito de determinar a resistência do tecido definindo uma largura específica padrão da amostra, permitindo analisar a resistência de diversos tipos de tecidos testados sob os mesmos procedimentos. Devendo o ensaio ser realizado tanto no sentido vertical quanto horizontal do tecido.

2.2.3.5 Caracterização das Propriedades Elétricas

Com a caracterização dos principais parâmetros físicos pertinentes, outro importante fator para o desenvolvimento de antenas têxteis é a caracterização das propriedades elétricas que influenciam diretamente no desempenho da antena (LESNIKOWSKI, 2012). Por meio de um Analisador de Redes Vetoriais, ARV, comumente designado pela sigla VNA (*Vector Network Analyzer*), com auxílio de um kit para medição da Permissividade Elétrica e da Tangente de perdas tais parâmetros podem ser medidos, por meio do método da sonda coaxial. (AGILENT TECHNOLOGIES, 2013)

Segundo Cavalcante (2014), as principais propriedades para a caracterização elétrica de um material são determinadas a partir da permissividade elétrica (ϵ) e da permeabilidade

magnética (μ), a permissividade elétrica mostra como o material irá se comportar quando submetido a um campo elétrico, já permeabilidade magnética mostra como o material se comportará sob uma excitação magnética. A permissividade elétrica é uma grandeza dada pela equação 4:

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon_0(\epsilon_r' - j\epsilon_r'') \quad (4)$$

Onde,

ϵ_0 , é a permissividade no vácuo ($8,854 \times 10^{12}$ F/m);

ϵ_r , Permissividade relativa;

ϵ_r' , Constante dielétrica, parte real da permissividade relativa, expressa a quantidade de energia armazenada a partir de um campo elétrico no material;

ϵ_r'' , Fator de perda, parte imaginária da permissividade relativa, expressa quantidade de perdas ou dissipação de energia a partir de um campo elétrico no material.

$$\text{tg } \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (5)$$

A tangente de perdas consiste na razão entre o fator de perdas e a constante dielétrica sendo representada pela equação 5(5).

A obtenção desses parâmetros se dará pela utilização de um analisador de redes vetoriais pelo método da sonda coaxial, este método geralmente é utilizado para a caracterização de amostras líquidas ou semissólidas. Contudo amostras têxteis podem ser medidas com esse procedimento (LESNIKOWSKI, 2012).

2.3 ANTENAS

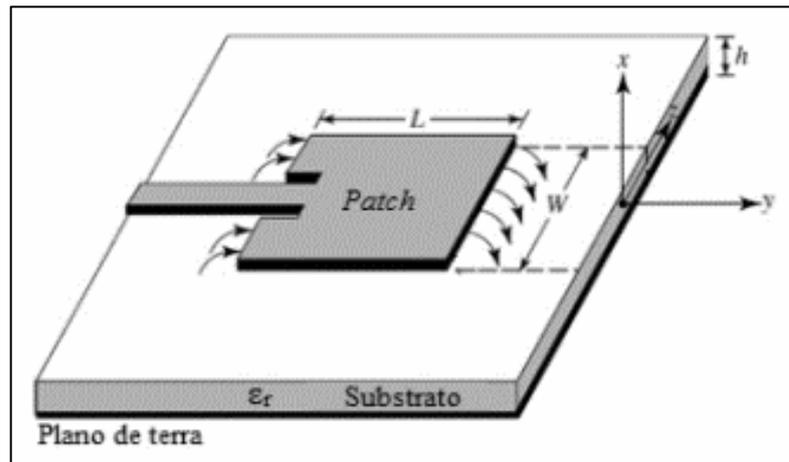
As antenas são dispositivos capazes de prover a transição de ondas eletromagnéticas guiadas, por meio de linhas de transmissão, cabos coaxiais ou outras formas de transmissão guiada, em propagação em um meio livre, desta forma as antenas são dispositivos utilizados para transmissão/recepção de sinais eletromagnéticos sem a utilização de fios ou meios mecânicos (BALANIS, 2009).

Existem diversos tipos de antenas, com diferentes características operacionais, cada uma delas faz com que sejam mais adequadas para um tipo determinado de aplicação (BALANIS, 2009). Com o surgimento da necessidade de sistemas de comunicação cada vez menores para utilização em sistemas embarcados, comunicação móvel entre outras finalidades tem-se

buscado desenvolver estruturas de transmissão e recepção que se adequem a necessidade de miniaturização (POZAR, 2012).

A antena de Microfita é uma das tecnologias amplamente utilizadas na produção de estruturas planas para operação na faixa de frequência de micro-ondas, esse tipo de antena foi apresentada em 1953 por George A. Deschamps, consistindo na utilização de um substrato dielétrico, um *patch* ressonador e um plano de terra para emissão de sinais eletromagnéticos (DESCHAMPS, 1953). A estrutura básica de antenas de microfita é mostrada na Figura 11 .

Figura 11 – Estrutura básica Antena de Microfita.



Fonte: Adaptado de Balanis (2009).

Como mostrado na Figura 11, o *patch* é localizado sobre o substrato dielétrico, esta estrutura é a principal responsável pela transmissão do sinal. Na parte inferior das antena há o plano de terra que propicia suporte mecânico e reflexão de ondas eletromagnéticas do substrato, concentrando as ondas eletromagnéticas em direção do *patch* permitindo um aumento de ganho e diretividade da antena, porém diminuindo a largura de banda (BALANIS, 2009). Os parâmetros citados serão detalhados na seção 2.3.4.

As antenas de microfita podem ser adaptadas para uma ampla gama de aplicações variando-se sua geometria, o tipo de dielétrico e o tipo de alimentação utilizada. Uma das técnicas utilizadas para aumentar a largura de banda das antenas de microfita é a utilização de estruturas de Guia de Onda Coplanar (SIMONS, 2001). Que será abordado em mais detalhes na seção 2.3.2.

Na seção 2.3.1 são mostradas algumas técnicas de Análise e Projeto de Antenas, destacando-se os principais métodos numéricos utilizados no desenvolvimento antenas e estruturas de transmissão de ondas eletromagnéticas para telecomunicações.

2.3.1 Análise e Projeto de Antenas

A modelagem e o projeto de antenas estão diretamente relacionados às características da estrutura da antena, como o tipo do substrato e suas características, geometria do *patch* ressoador e dimensões gerais da antena. Existem diversos métodos para a análise destas características, a utilização dos métodos de análise permite o desenvolvimento e o projeto das antenas para atender as necessidades da aplicação (CARNEIRO FILHO, 2010).

Existem métodos de análise que são fundamentados em formulações matemáticas rigorosas, exigindo um maior esforço computacional, contudo oferecem resultados mais precisos, como no caso do método da onda completa, que pode utilizar modelos matemáticos como Método dos Elementos Finitos (*Finite Elements Method*, FEM), Método dos Momento (*Method of Moments*, MoM) e o Métodos das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (*Finite Difference Time Domain*, FDTD) (CARNEIRO FILHO, 2010).

Em alguns casos a utilização destes métodos mais precisos dificulta ou inviabiliza o desenvolvimento de antenas devido sua alta necessidade de processamento computacional, desta forma não é incomum a utilização de métodos aproximados para o desenvolvimento de antenas, no geral, tais métodos se baseiam na distribuição de correntes magnéticas equivalentes no *patch*, simplificando a modelagem e a análise do mecanismo de radiação das antenas. Os principais modelos aproximados são o Método da Linha de Transmissão, Modelo da Cavidade e o Modelo de Rede Multiporta (CARNEIRO FILHO, 2010).

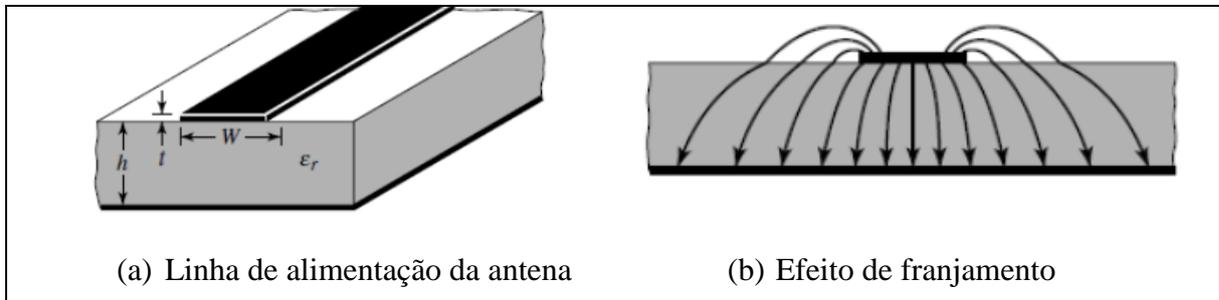
Dentre estes métodos aproximados, os mais corriqueiramente utilizados são o modelo da Linha de Transmissão e o Modelo da Cavidade, devido sua simplicidade de cálculo e a apresentação de resultados satisfatórios para determinadas faixas de frequências, outra característica destes métodos é a utilização de correções empíricas em seu equacionamento para determinados tipos de estrutura de antenas, para obtenção de resultados mais acurados em determinadas situações. Nas seções 2.3.1.1 e na 2.3.1.2 são brevemente detalhados o Método da Linha de Transmissão e o Modelo da Cavidade, respectivamente.

2.3.1.1 Método da Linha de Transmissão

O Método da Linha de Transmissão leva em consideração os efeitos de bordas causados pelas dimensões finitas do *patch*, tal características causo o chamado efeitos de franjamento das ondas eletromagnéticas radiadas pela estrutura da antena que entram no substrato dielétrico,

quantidade de franjamento é estabelecida em função das dimensões do *patch* e do substrato da antena (BALANIS, 2009). Na Figura 12 é mostrada a representação do efeito de franjamento na estrutura da antena.

Figura 12 – Efeito de franjamento na antena.



Fonte: Adaptado de Balanis (2009).

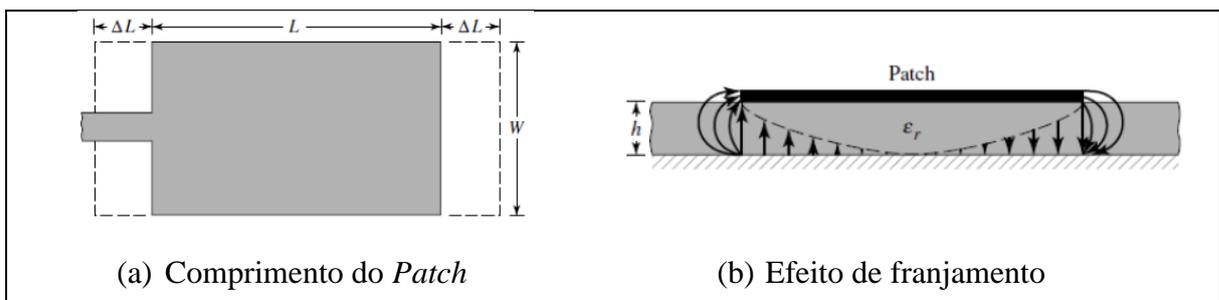
Como pode ser observado na Figura 12, as linhas de campo radiado pela antena percorram o ar e o substrato desta. Tal efeito requer uma modelagem em que sejam consideradas a permissividades do substrato (ϵ_r) assim como a permissividade do ar (ou do meio específico onde a antena será aplicada). Desta forma para o projeto e o desenvolvimento de uma antena por este método deve-se considerar uma permissividade efetiva (ϵ_{ef}) que é definida como uma permissividade elétrica uniforme onde a linha de transmissão da antena sob efeito de franjamento apresenta característica similar a uma antena ideal onde este efeito não está presente, a Permissividade dielétrica efetiva é mostra na equação 6 (BALANIS, 2009).

$$\epsilon_{ef} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (6)$$

Em que (h) é a espessura do substrato e (W) a Largura do *Patch*.

Outro parâmetro dimensional influenciado pelo efeito de franjamento é o comprimento do *patch* (L), esta dimensão da antena é influenciada pela permissividade relativa do material do substrato dielétrico e pela razão entre o a largura (W) e a espessura do substrato (h). Na Figura 13 é mostrada a influência do efeito de franjamento no comprimento do *patch*.

Figura 13 – Efeito de franjamento comprimento do *patch*.



Fonte: adaptado de Balanis (2009).

A variação de comprimento (ΔL) mostrada na Figura 13 é detalhada na equação 7.

$$\Delta L = 0,412h \frac{(\epsilon_{ef} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{ef} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8\right)} \quad (7)$$

Como pode ser observado na Figura 13 e na equação 7, o comprimento efetiva do *patch* da antena, por este método, é dado pelo comprimento físico com a adição da variação do comprimento devido ao efeito de franjamento tanto na parte anterior quanto na parte posterior do *patch*. As Equações 8 e 9 são mostradas as formas de cálculo do comprimento (L) e da largura (W) do *patch* para uma frequência de ressonância (f_r) específica, respectivamente.

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{ef}}} - 2\Delta L \quad (8)$$

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (9)$$

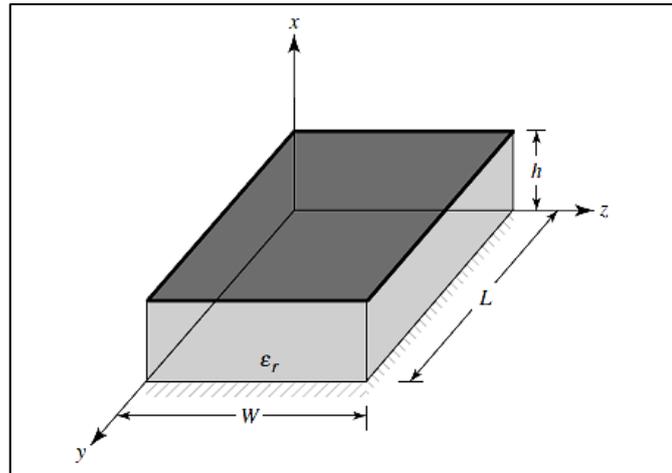
Onde, (L) é o comprimento do *patch*, (W) a largura do *Patch*, (c) a velocidade das ondas eletromagnéticas no espaço livre e (f_r) a frequência de ressonância.

Um das principais desvantagens da modelagem pelo método da linha de transmissão é a alta impedância de entrada resultante, no geral quatro vezes maior que a impedância ideal de 50 Ω (Cinquenta Ohms), exigindo a utilização de técnicas para o casamento de impedância (BALANIS, 2009). Todavia a utilização de estruturas de guias de onda coplanar pode facilitar o projeto final da antena para este tipo de modelagem, devido facilidade de casamento de impedância neste tipo de estrutura.

2.3.1.2 Modelo da cavidade

O modelo da cavidade assume que a antena é uma cavidade que está contida em uma estrutura entre duas placas condutoras perfeitas, na parte inferior e superior em relação a antena, ou seja, a cavidade, e que as paredes laterais são condutores magnéticos perfeitos. Desta forma, as componentes tangenciais dos campos na parede do substrato são nulas e conseqüente mente os campos elétricos são nulos. O modelo da cavidade pode ser empregado na análise de antenas com geometrias regulares, onde não são utilizadas em frequências muito elevadas, é um método que exige pouco esforço computacional, porém apresenta uma precisão relativamente baixa em relação a outros métodos de análise de estruturas para transmissão de ondas eletromagnéticas (MILLIGAN, 2005). Na Figura 14 é mostrada a geometria retangular considerada na análise pelo Modelo da Cavidade.

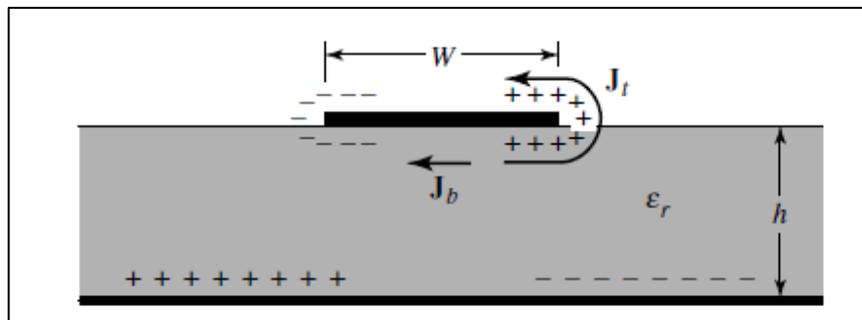
Figura 14 – Paredes do substrato pelo Modelo da Cavidade.



Fonte: Adaptado de Balanis (2009).

Por meio do modelo da cavidade é demonstrado que antenas de microfita retangulares podem ser representadas como duas fendas radiantes, causadas pela distribuição de cargas nas superfícies condutoras na parte inferior (J_b) e superior (J_t) na estrutura de ressonância da antena assim como no plano de terra (MILLIGAN, 2005). Na Figura 15 são mostradas as formas de distribuição de carga e densidade de corrente em uma estrutura de microfita.

Figura 15 – Distribuição de cargas e densidade de corrente.



Fonte: Adaptado de Balanis (2009).

Como pode ser observado na Figura 15, a distribuição de cargas e densidade de correntes na estrutura apresenta um mecanismo de atração entre as cargas de sinal oposto entre a estrutura da linha de transmissão e o plano de terra e um mecanismo de repulsão entre as cargas de mesmo sinal nas extremidades destas estruturas, tal movimentação de cargas gera as densidades de corrente (J_b) e (J_t) na área superficial do *patch*, devido a baixa espessura das estruturas planares de microfita o mecanismo de atração predomina e há uma concentração das cargas na parte superior do *patch* (BALANIS, 2009).

Desta forma as configurações de campo, presentes no interior da cavidade podem ser expressas por intermédio de uma abordagem potencial vetorial, podendo ser expressa como mostrado na equação 10.

$$A_x = [A_1 \cos(k_x x) + B_1 \sin(k_x x)] [A_2 \cos(k_y y) + B_2 \sin(k_y y)] [A_3 \cos(k_z z) + B_3 \sin(k_z z)] \quad (10)$$

Em que k_x , k_y , k_z representam os números de ondas em suas respectivas direções cartesianas. Os campos elétricos e magnéticos no interior da cavidade são expressos por meio do conjunto de Equações 11.

$$\begin{aligned} E_x &= j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + k^2 \right) A_x; & H_x &= 0 \\ E_y &= j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \left(\frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial y} \right); & H_y &= \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial z} \\ E_z &= j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \left(\frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial y} \right); & H_z &= -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial y} \end{aligned} \quad (11)$$

Onde, x , y e z são as representações de direção das componentes dos campos no interior da cavidade. Com a aplicação das condições contorno os números de onda podem ser expressos por meio da equação 12.

$$\begin{aligned} k_x &= \left(\frac{m\pi}{h} \right), \quad m=0, 1, 2, \dots \\ k_z &= \left(\frac{p\pi}{W} \right), \quad p=0, 1, 2, \dots \\ k_y &= \left(\frac{n\pi}{L} \right), \quad n=0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (12)$$

Onde m , n e p representam, respectivamente, a quantidade variações no do campo em meio período nas direções x , y , z . A partir dos números de onda as frequências de ressonância na cavidade podem ser expressas pela equação 13.

$$(f_r)_{mnp} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W}\right)^2} \quad (13)$$

Onde (W) , (L) e (h) , são a largura do *patch*, o comprimento do *Patch* e a altura do substrato respectivamente, (μ) a permeabilidade magnética do substrato e (ϵ) a permissividade elétrica do substrato. O modo de frequência dominante é definido a partir do sequenciamento das frequências em ordem crescente, desta forma a frequência mais baixa de ressonância da cavidade é tida como a dominante por este método.

2.3.2 Guia de Onda Coplanar, CPW

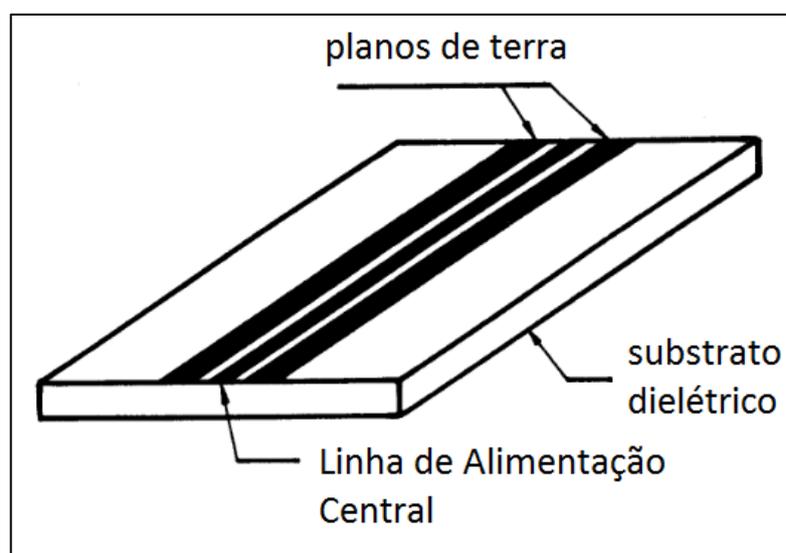
O primeiro Guia de Onda Coplanar (*Coplanar Waveguide*, CPW), fabricado sobre substrato dielétrico foi proposto em 1969 por Cheng P. Wen como resultado de sua pesquisa

nos Laboratórios RCA, desde então esta técnica vem sendo empregada em diversos Circuitos Integrados de Micro-Ondas (MICs, *Microwave integrated Circuits*) assim como em Circuitos Integrados Monolíticos de Micro-Ondas (MMICs, *Monolithic Microwave Integrated Circuits*). Este tipo de estrutura possui uma vasta gama de aplicações em eletrônica e microeletrônica, como amplificadores, Circuitos dobradores de frequência, *mixers* entre outras, além de ser uma das forma de alimentação e construção de antenas (SIMONS, 2001).

Como pode ser observado na Figura 16, a estrutura CPW consiste no truncamento do plano de terra, ou seja, deixando-o no mesmo plano da linha de transmissão no substrato dielétrico, mantendo uma determinada distância entre a linha de alimentação central e os planos de terras coplanares, criado assim uma estrutura que permite guiar as ondas eletromagnéticas (GARG et al., 2001; SIMONS, 2001).

Existem diversos tipos de guias de onda coplanares, um dos guias mais comum consiste em uma linha de transmissão central com planos laterais Semi-infinitos em material condutor, montados sob um material dielétrico, como mostrado na Figura 16 e com parâmetros de dimensão detalhados na Figura 17. Uma das características desse tipo de estrutura é a capacidade de propagação de ondas eletromagnéticas em modo Quasi-TEM. Este tipo de modo propagação possui baixa dispersão permitindo a construção de estruturas com alta largura de banda (SIMONS, 2001).

Figura 16 – Linha de transmissão guias de onda coplanares.

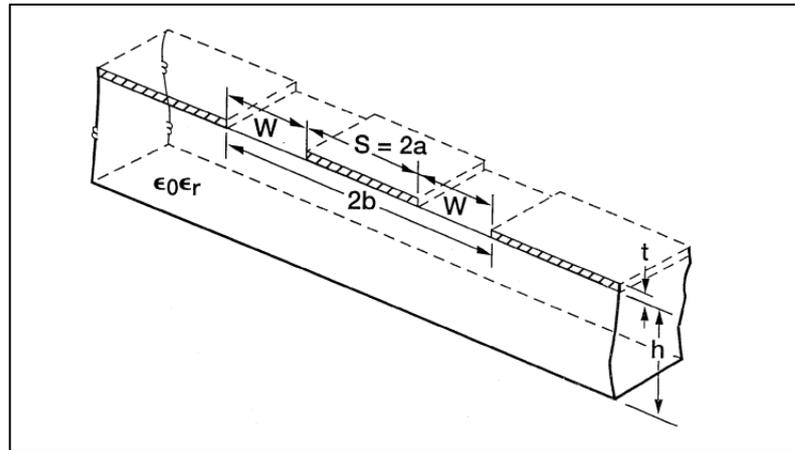


Fonte: adaptado de Wen (1969).

Na Figura 17 são mostrados os aspectos construtivos usuais de um guia de onda coplanar, onde, (S) é a largura da linha de alimentação central, também comumente expressa como a relação (2a), (W) a distância entre a linha central de alimentação e os planos laterais, (2b) representa a largura total da linha central de alimentação e as distâncias laterais da linha

(podendo ser representada pela relação $2b = S+2W$), (h) a altura do substrato dielétrico, (t) a espessura do material condutor, (ϵ_0) representa a Permissividade do Vácuo ($8,8854 \cdot 10^{12}$ F/m) e (ϵ_r) a permissividade Relativa do material, gerando a permissividade efetiva do substrato (SIMONS, 2001).

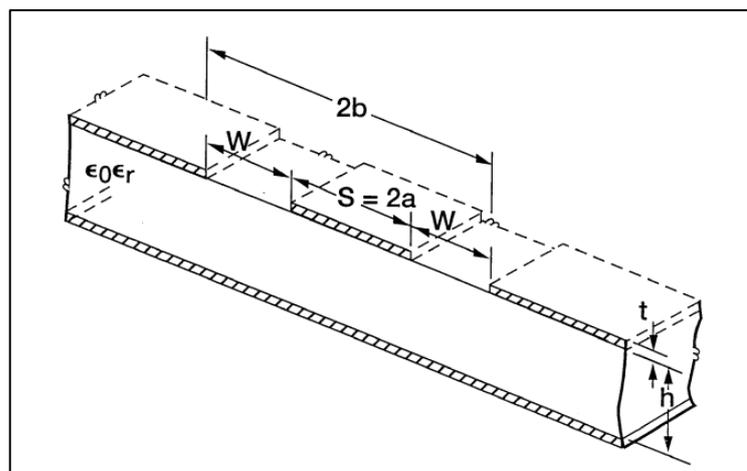
Figura 17 – Estrutura guia de onda coplanar.



Fonte: adaptado de Simons (2001).

As principais vantagens deste tipo estrutura em relação as linhas de microfita são: a simplicidade de fabricação, pois a linha de alimentação e os planos de terra estão no mesmo plano; a fácil montagem sob estruturas passivas e ativas assim como a fácil modificação de suas especificações, além de reduzir as perdas por radiação (SIMONS, 2001). Simons (2001) destaca dois tipos básicos de guias de ondas coplanares, além do modelo mostrado na Figura 17, há o guia de onda coplanar com condutor de fundo, ou seja, que apresenta um plano de terra na região posterior do substrato, como mostrado na Figura 18.

Figura 18 – Guia de onda coplanar com plano de terra posterior.



Fonte: adaptado de Simons (2001).

O plano de terra posterior presente na estrutura CPW mostrado na Figura 18, além de prover um maior suporte mecânico auxilia na dissipação de calor em sistemas de transmissão

ativos. Este tipo de estrutura também é conhecida como *Grounded Coplanar Waveguide* (GCPW) Guia de Onda Coplanar com Plano de Terra (SIMONS, 2001). Devido a estas características o presente trabalho optou por utilizar este tipo de estrutura na alimentação da antena, pois os substratos têxteis e especialmente os tecidos de malhas apresentam uma alta flexibilidade e maleabilidade, desta forma a utilização de uma estrutura GCPW pode trazer uma maior resistência mecânica, sem comprometer a flexibilidade e auxiliar na dissipação de calor na utilização de sistemas ativos de transmissão e aumentar o ganho da antena.

No dimensionamento de uma estrutura CPW como a mostrada na Figura 18 a impedância característica pode ser determinada pela razão de a/b , conforme detalhada nas equações 14, 15 e 16 (WADELL, 1991).

$$Z_0 = \frac{60\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \times \frac{1}{\frac{K(k)}{K(k')} + \frac{K(k_1)}{K(k_1')}} \quad (14)$$

Dentre os parâmetros mostrado na equação 14, Z_0 é a impedância característica, ϵ_{eff} é permissividade elétrica efetiva do substrato e os valores em função de K são mostrados na equação 7 e na equação 16

$$k = \frac{a}{b}; \quad k' = \sqrt{1 - k^2} \quad (15)$$

$$k_1 = \frac{\tanh\left(\frac{\pi a}{4h}\right)}{\tanh\left(\frac{\pi b}{4h}\right)}; \quad k_1' = \sqrt{1 - k_1^2} \quad (16)$$

A permissividade elétrica efetiva no substrato, ϵ_{eff} , é obtida por meio da equação 17.

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{1 + \epsilon_r \frac{K(k')}{K(k)} \frac{K(k_1)}{K(k_1')}}{1 + \frac{K(k')}{K(k)} \frac{K(k_1)}{K(k_1')}} \quad (17)$$

As restrições para utilização das equações de 14 à 17 são as seguintes: $h \gg b$, ou seja, a altura do substrato deve ser consideravelmente maior que largura total do guia de onda coplanar, e o valor da largura total da antena seja maior que o valor de b , segundo Wadell (1991) estas equações apresentam uma boa concordância com as técnicas de variação de domínio espectral. Com a permissividade efetiva pode-se calcular o comprimento de onda guiado mostrado na equação 18(13).

$$\lambda_g = \frac{c/f}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (18)$$

Onde, (λ_g) é comprimento da onda guiada, (c) é velocidade da onda eletromagnética no vácuo, (f) a frequência de ressonância (LIU; LU, 2014).

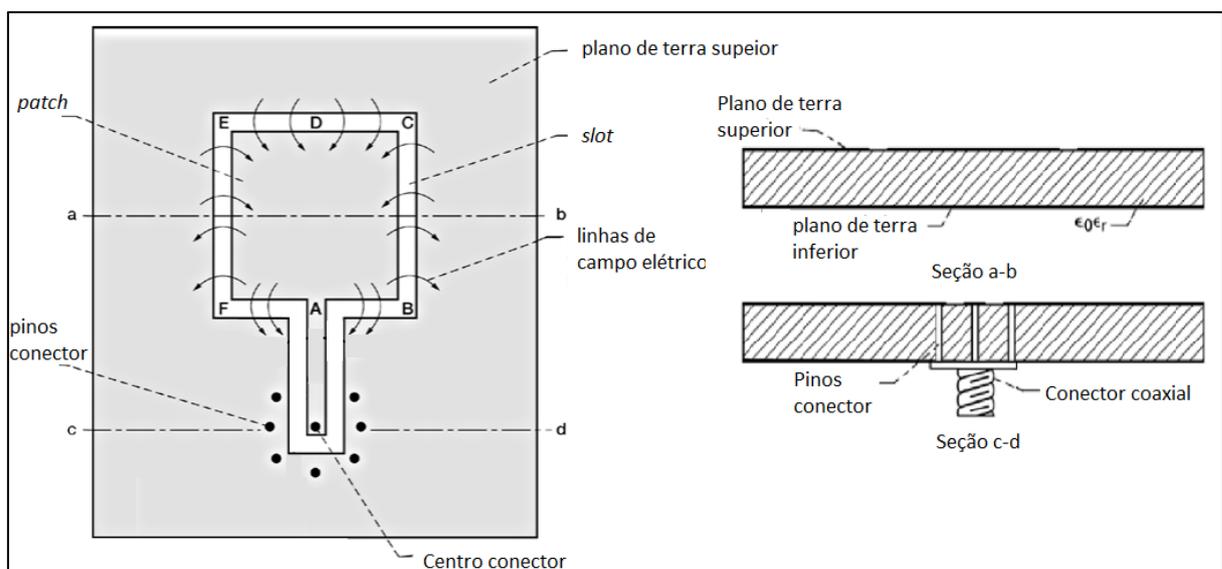
2.3.3 Antenas CPW

Como destacado anteriormente os guias de onda coplanares apresentam uma série de aplicações, uma dessas aplicações é a utilização em sistemas de alimentação de antenas, também conhecidas como antenas CPW derivado do termo original em inglês “*Antennas CPW-fed*” (LIU; LU, 2014; MALEK et al., 2015; PHAD; KASABEGOUDAR, 2016; SIMONS, 2001; WADELL, 1991).

A utilização dos guias de ondas coplanares na alimentação de antenas pode ocorrer por meio de três formas principais: Acoplamento Direto, quando a estrutura CPW é utilizada para alimentar diretamente a antena, estando o *Patch* e a antena no mesmo plano (SIMONS, 2001).

Na Figura 19 é mostrado um exemplo de antena CPW por acoplamento direto, a alimentação da antena ocorre de forma direta, o *patch* e a estrutura do guia de onda coplanar se encontram no mesmo lado do substrato dielétrico, ou seja, no mesmo plano.

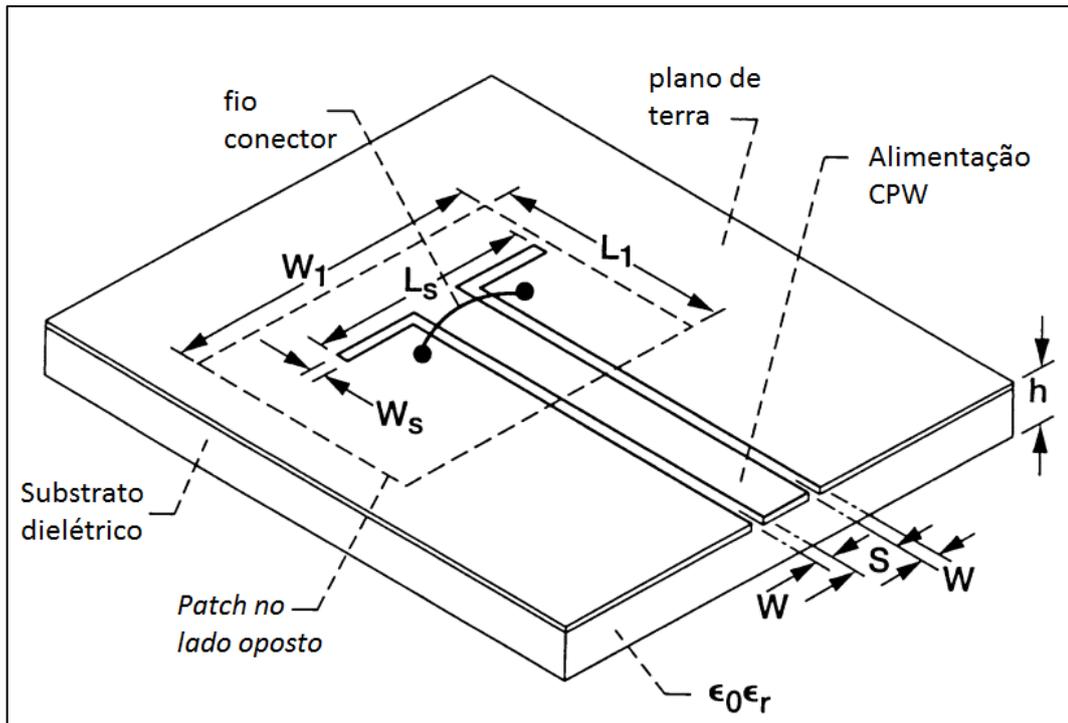
Figura 19 – Antena CPW por acoplamento direto.



Fonte: adaptado de Simons (2001).

Outra forma de alimentação é por meio do Acoplamento Eletromagnético, onde o *patch* e a estrutura CPW estão em lados opostos do substrato dielétrico, desta forma a conexão entre o elemento ressonador e estrutura de alimentação ocorre por meio das eletromagnéticas através do substrato dielétrico (SIMONS, 2001). Este tipo de estrutura é mostrada na Figura 16.

Figura 20 – Antena CPW por acoplamento magnético.



Fonte: adaptado de Simons (2001).

Na Figura 20 a variável (W_1) representa a largura do *patch*, (L_1) o comprimento do *Patch*, (W_s) a largura da linha de acoplamento, (L_s) o Comprimento da linha de acoplamento, (S) é a largura da linha de alimentação central do guia de onda coplanar, (W) a distância entre a linha central de alimentação e os planos laterais, (h) a altura do substrato dielétrico, (t) a espessura do material condutor, (ϵ_0) representa a Permissividade do Vácuo ($8,8854 \cdot 10^{12}$ F/m) e (ϵ_r) a permissividade Relativa do material, gerando a permissividade efetiva do substrato (SIMONS, 2001).

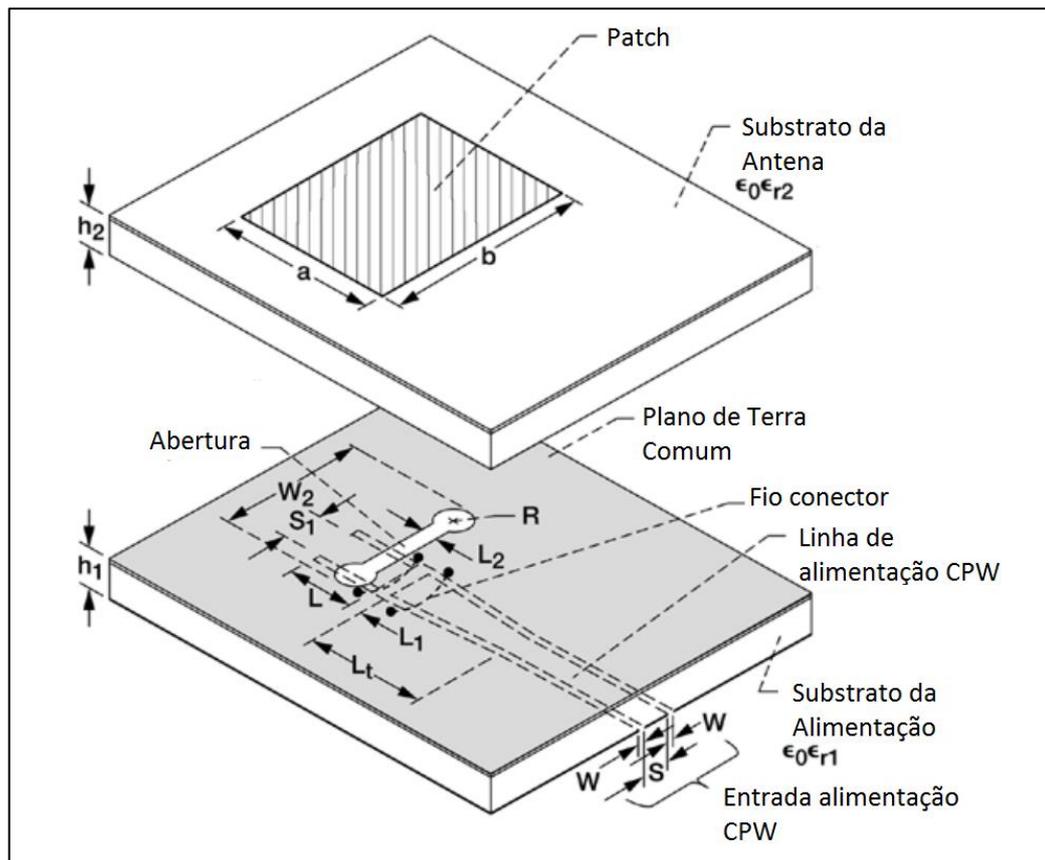
Outro método de alimentação de antenas utilizando guias de onda coplanares é por meio do Acoplamento eletromagnético por Abertura ou simplesmente Acoplamento por Abertura, neste tipo de topologia o elemento ressonador da antena é conectado por meio das onda eletromagnéticas que passam através de uma abertura em um elemento condutor entre a fonte do sinal e o substrato dielétrico da antena (SIMONS, 2001). Na Figura 21 é mostrada uma representação deste tipo de antena.

Como mostrado na Figura 21, a abertura para o acoplamento eletromagnético é localizada no plano terra comum entre a antena e estrutura de alimentação, dentre outras funções a abertura pode funcionar como um filtro para determinadas faixas de frequências. Este tipo de antena também permite a construção da linhas de alimentação e da antena com substratos diferentes, fato o qual, pode reduzir custos de produção caso o substrato da antena

possua um valor de produção ou aquisição elevado, produzindo a estrutura de alimentação da antena com um substrato mais acessível e de menor valor (SIMONS, 2001).

Dos tipos de antenas apresentados, a antena CPW por acoplamento direto é a mais simples de ser fabricada, projetada e modelada computacionalmente, devido as suas características construtivas mais simples (SIMONS, 2001).

Figura 21 – Antena CPW de Acoplamento por Abertura.



Fonte: adaptado de Simons (2001).

Na Figura 21 a variável (a) representa a largura do *patch*, a variável (b) o comprimento do *Patch*, (W_2) apresenta a largura da abertura de acoplamento, (S) é a largura inicial da linha de alimentação central do guia de onda coplanar, (S_2) a largura final da linha de alimentação central do guia de onda coplanar, (W) a distância entre a linha central de alimentação e os planos laterais, (h_1) a altura do substrato dielétrico 1, (h_2) a altura do substrato dielétrico 2, (L) comprimento final da estrutura CPW, (L_1) comprimento entre fio conector e abertura, (L_2) largura central da abertura, (L_t) comprimento de aumento da largura da estrutura CPW, (R) raio das circunferências laterais da abertura, (ϵ_0) representa a Permissividade do Vácuo ($8,8854 \cdot 10^{12}$ F/m) e (ϵ_{r1}) a permissividade Relativa do material 1 e (ϵ_{r2}) no material 2 (SIMONS, 2001).

Uma das principais características das antenas com alimentação por guia de onda coplanar é um padrão de radiação omnidirecional e uma alta largura de banda, tais

características são interessantes para aplicações em Identificação por Rádio Frequência, pois o padrão de radiação omnidirecional facilita na leitura das *tags* independente da orientação e posicionamento do leitor e a alta largura de banda propicia a aplicação desse tipo de antena em sistemas de transmissão ativa de dados, uma vez que, no geral, este tipo *tag* recebe e transmite um maior volume de dados (PERRET, 2014; REZAIESARLAK; MANTEGHI, 2015a). As propriedades de antenas citadas são detalhadas na seção 2.3.4.

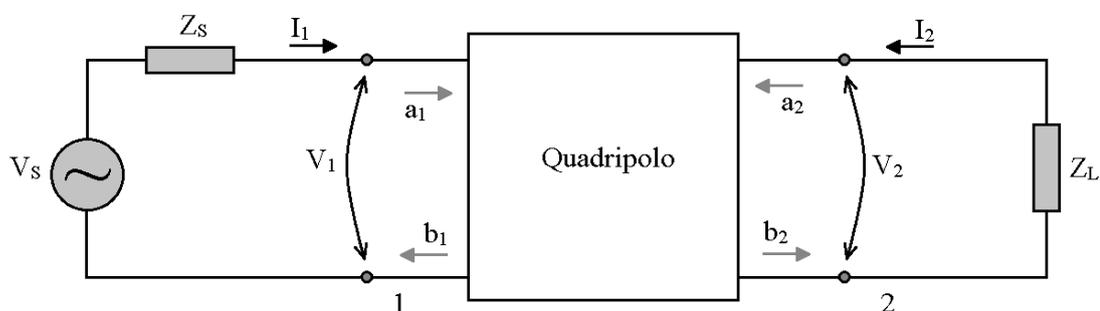
2.3.4 Parâmetros de Antenas.

As antenas são estruturas basilares para comunicação sem fios, pois são responsáveis pela transmissão e recepção de dados através de sinais emitidos por meio de ondas eletromagnéticas, na presente seção serão descritos os principais parâmetros e propriedades de antenas (BALANIS, 2009).

2.3.4.1 Perda de Retorno e Matriz de espalhamento

Os parâmetros de espalhamento, também conhecidos por parâmetros S (*Scattering Parameters*) buscam descrever o comportamento de redes elétricas quando submetidos a um estímulo por um sinal elétrico, tais parâmetros são utilizados diretamente no projeto e análise de antenas, uma vez que estas podem ser modeladas como circuitos de linhas de transmissão (ANDERSON, 1967).

Figura 22 – Modelo do Quadripolo.



Fonte: Adaptado de Holanda (2016).

Dentre os parâmetros de espalhamento a perda de retorno é um dos principais fatores analisados no projeto de antenas. O modelo do quadripolo é utilizado para definição de tais parâmetros (ANDERSON, 1967).

Na Figura 22 é mostrada a representação do modelo do quadripolo para a definição de alguns dos parâmetros de espalhamento. Com base nas tensão e corrente de entrada, V_1 e I_1 , respectivamente, e na tensão e corrente de saída, V_2 e I_2 são calculadas as tensões normalizadas complexas incidentes, a_1 e a_2 , e refletidas, b_1 e b_2 , assim como a impedância da carga, por meio das equações 19 à 22.

$$a_1 = \frac{V_1 + Z_0 I_1}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{\text{onda de potência incidente em 1}}{2\sqrt{Z_0}} \quad (19)$$

$$a_2 = \frac{V_2 + Z_0 I_2}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{\text{onda de potência incidente em 2}}{2\sqrt{Z_0}} \quad (20)$$

$$b_1 = \frac{V_1 - Z_0 I_1}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{\text{onda de potência incidente em 1}}{2\sqrt{Z_0}} \quad (21)$$

$$b_2 = \frac{V_2 - Z_0 I_2}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{\text{onda de potência incidente em 2}}{2\sqrt{Z_0}} \quad (22)$$

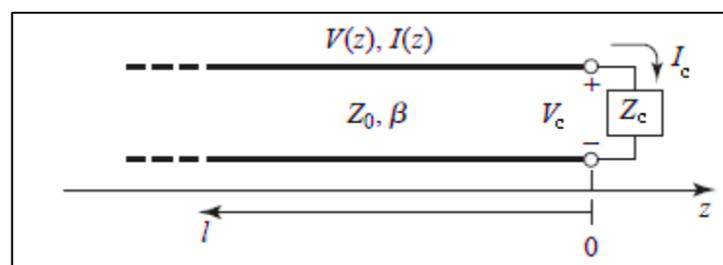
Em que Z_0 consiste em uma impedância de referência. A partir das equações 11 à 14, podem ser representadas de forma matricial como é mostrado a equação 23.

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Os termos do tipo S_{ij} mostrados na equação 23, também são conhecidos como parâmetros de espalhamento do quadripolo. O S_{11} , representa o coeficiente de reflexão de tensão na porta 1; O S_{12} , isolamento do quadripolo ou ganho de tensão reversa; S_{21} , ganho de tensão direto do quadripolo; S_{22} , coeficiente de reflexão de tensão na porta 2 (ANDERSON, 1967).

Outra forma de se obter o coeficiente de reflexão, S_{11} , é por meio da modelagem da reflexão de um sinal elétrico em uma linha de transmissão, enviado de uma fonte para uma carga, como mostrado na Figura 23 (POZAR, 2012).

Figura 23 – Linha de transmissão para sinal enviado a uma carga Z_c .



Fonte: Adaptado de Pozar (2012).

A onda incidente na carga Z_c , conforme ilustrado na Figura 23, é do tipo $V_0^+ e^{-j\beta z}$, onde a tensão total na linha de transmissão será da forma mostrada na equação 24, sendo $V(z)$ a tensão total na linha, $V_0^+ e^{-j\beta z}$ é a porção incidente da onda, e $V_0^- e^{j\beta z}$ é a parcela refletida da onda e V_0 é tensão da fonte.

$$V(z) = V_0^+ e^{-j\beta z} + V_0^- e^{j\beta z} \quad (24)$$

Seguindo os mesmos procedimentos a corrente total na linha, $I(z)$ e a impedância da carga Z_c podem ser expressas segundo as equações 25 e 26 respectivamente.

$$I(z) = \frac{V_0^+}{Z_0} e^{-j\beta z} - \frac{V_0^-}{Z_0} e^{j\beta z} \quad (25)$$

Sendo a Z_0 a impedância característica da linha de transmissão. A impedância na carga na linha pode ser expressa em termos da razão entre as ondas refletidas e incidentes, como mostrado na equação 27.

$$Z_c = \frac{V_0^+ + V_0^-}{V_0^+ - V_0^-} Z_0 \quad (26)$$

$$\Gamma = \frac{V_0^-}{V_0^+} = \frac{Z_c - Z_0}{Z_c + Z_0} \quad (27)$$

A perda de retorno está diretamente ligada ao parâmetro S_{11} da matriz de espalhamento, também conhecido como coeficiente de reflexão, também representado pela letra grega gama maiúsculo (Γ), como mostrado na equação 28.

$$RL = 20 \log|S_{11}| \quad \text{ou} \quad RL = 20 \log|\Gamma| \quad (28)$$

Na equação 28, a perda de retorno, *Return loss*, (RL), pode ser encontrada diretamente pelo parâmetro S_{11} , tanto em alguns trabalhos são tratados abertamente como sinônimos. Este é importante parâmetro de avaliação de antenas, pois relaciona a potência fornecida pela fonte à carga e a potência refletida, em termos práticos a perda de retorno para antenas é considerada para valores menores que -10 dB (SILVA, 2014).

2.3.4.2 Densidade de Corrente e Tangente de Perdas

A densidade de corrente é um vetor de magnitude diretamente proporcional ao campo elétrico aplicado ao material, como é descrito na equação 29 (POZAR, 2012).

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (29)$$

Onde, \vec{J} é a densidade de corrente, σ é a condutividade do material e \vec{E} o campo elétrico. Quando se aplica o campo elétrico em um material dielétrico os átomos do material passam por polarização, surgindo momentos de dipolos elétrico que podem aumentar o deslocamento ou a densidade de fluxo elétrico de acordo com as propriedades de permissividade elétrica do material, como mostrado na equação 30 (HUANG; BOYLE, 2008; POZAR, 2012).

$$\vec{D} = (\epsilon' - j\epsilon'')\vec{E} \quad (30)$$

Em que \vec{D} é a densidade do fluxo elétrico, ϵ' é parte real da permissividade elétrica do material que representa a quantidade energia que este material pode armazenar a partir de um campo elétrico externo incidente. Já o ϵ'' é a parte imaginária da permissividade elétrica complexa do material, representando a perda de energia, ou seja, a dissipação de energia causada no material.

A equação de Maxwell para o campo magnético H, pode ser representada como mostra a equação 31, desde que se estabeleça uma dependência temporal do tipo $e^{-j\omega t}$, permitindo que os termos derivativos sejam substituídos por $j\omega$.

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega \vec{D} + \vec{J} \quad (31)$$

Aplicando as equações 29 e 30 nos termos mostrados na equação 31 ela pode ser reescrita para forma mostrada na equação 32.

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega \epsilon' \vec{E} + (\sigma + \omega \epsilon'') \vec{E} \quad (32)$$

Uma vez que sigma (σ) representa a condutividade elétrica do material e $\omega \epsilon''$ representa o fator de perdas devido ao amortecimento dielétrico, o termo $(\sigma + \omega \epsilon'')$ mostra a condutividade efetiva total do material, não devendo ser expresso separadamente quando um material for analisado. Desta forma a razão da entre as partes real e imaginária da equação é definida como a tangente de perdas do material, como mostrado na equação 33 (POZAR, 2012).

$$\tan \delta = \frac{\sigma + \omega \epsilon''}{\omega \epsilon'} \quad (33)$$

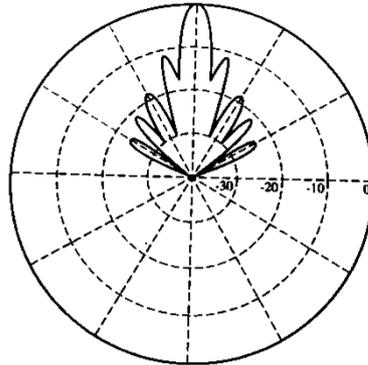
Uma forma resumida da equação 33 é mostrada na equação 5 na seção 2.2.3.5, pois para certas faixas de frequência o termo $\omega \epsilon''$ se torna significativamente maior que a condutividade do material σ .

Um material com alta tangente de perdas significa que a maior parte da energia advinda do campo elétrico externo que incide sobre ele é perdido por meio de dissipação, pois como pode ser analisando na equação 33, para apresentar uma alta tangente de perdas o material deve possuir uma parcela imaginária da permissividade elétrica significativamente alta e/ou uma parcela real da permissividade elétrica relativamente baixa.

2.3.4.3 Diagrama de Radiação

O gráfico do padrão de radiação ou o diagrama de radiação de uma antena consiste na representação gráfica da densidade de potência radiada pela antena em determinados planos, analisados a partir de uma distância fixa (IEEE, 1983; ANATEL, 2008).

Figura 24 – Representação do diagrama de radiação na forma polar.

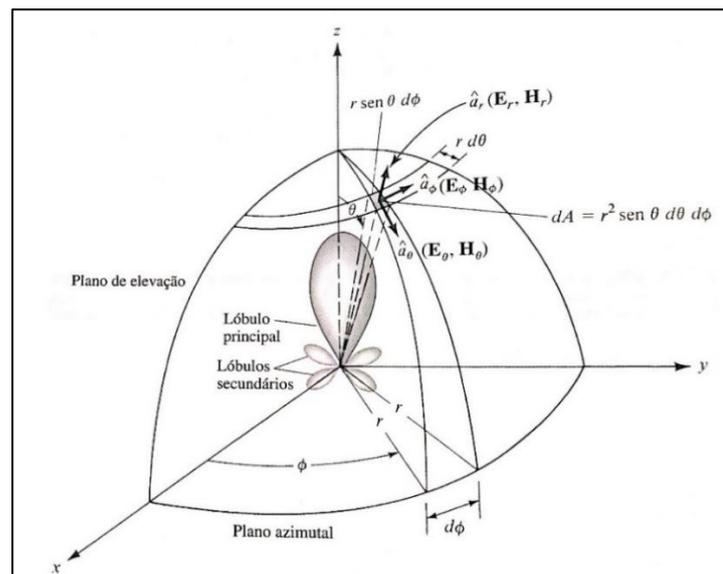


Fonte: adaptado de Pozar (2012).

O diagrama de radiação é uma importante ferramenta para visualização do comportamento da antena, permitindo identificar a direção de maior concentração de radiação por meio da verificação do posicionamento e da intensidade dos lóbulos principais e secundários da antena (BALANIS, 2009; POZAR, 2012). Na Figura 20 é mostrada uma representação de um diagrama de radiação na forma polar.

Na Figura 24 é mostrada a representação gráfica de um diagrama de radiação polar do plano E de uma antena. Outra forma bastante comum de utilização dos gráficos do padrão de radiação na forma polar é sobrepondo mais de um plano de corte, mostrando simultaneamente os planos E e H. Na Figura 25 é mostrado um exemplo de diagrama de radiação em três dimensões com o sistema de coordenadas esféricas.

Figura 25 – Diagrama de Radiação em três dimensões com exposição do sistema de coordenadas.



Fonte: Adaptado de Balanis (2009).

Conforme pode ser observado na Figura 25, o diagrama de radiação permite a identificação rápida dos lóbulos principais e secundários da antena assim como a sua disposição

em relação aos planos vertical ou de elevação, onde φ assume os valores de 0° ou 90° , e ao plano horizontal ou azimutal para θ em um ângulo de 90° . A definição destes planos pode ser utilizadas para a representação na forma polar do diagrama de radiação da antena.

2.3.4.4 Intensidade de Radiação, Diretividade, Eficiência e Ganho da antena

A intensidade de radiação é conceituada como a potência radiada pela antena por unidade de ângulo, este parâmetro de campo distante pode ser obtido pelo produto entre a densidade de potência ou densidade de radiação (P_{rad}) pelo quadrado da distância, como expressado na equação 34 (BALANIS, 2009).

$$U = r^2 P_{\text{rad}} \quad (34)$$

Desta forma, a intensidade de radiação é geralmente expressa na unidade de Watts por esferorradianos (W/sr), em função dos ângulos θ e φ do diagrama de radiação $U(\theta, \varphi)$.

A diretividade é considerada como a capacidade de uma antena radiar para uma determinada direção em detrimento de outras, assim ela pode ser expressa como a razão entre intensidade radiação máxima de uma determinada direção e a intensidade de radiação média da antena, como mostra a equação 35 (BALANIS, 2009; POZAR, 2012).

$$D = \frac{U_{\text{máximo}}}{U_{\text{média}}} \quad (35)$$

Onde D , é a diretividade (adimensional) e U representa a intensidade de radiação em determinada direção, a intensidade de radiação média, $U_{\text{média}}$, pode ser calculada dividindo-se a potência radiada pela antena por 4π , ou seja, considera-se a média da potência radiada em todas as direções como em um radiador isotrópico, logo para uma fonte anisotrópica a diretividade pode ser dada pela razão entre a sua intensidade de radiação em uma dada direção, geralmente a de maior potência radiada, e a intensidade de radiação de uma fonte isotrópico, como mostrado na equação 36.

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{U}{\frac{P_{\text{rad}}}{4\pi}} = \frac{4\pi U}{P_{\text{rad}}} \quad (36)$$

Onde U_0 é a intensidade de radiação de uma fonte isotrópica, a equação 36 ainda pode ser expressa em relação as coordenadas x , y , z caso necessário analisar o comportamento de diretividade ao longo de algum eixo cartesiano (POZAR, 2012).

O conceito de diretividade não leva em consideração perdas ôhmicas e de reflexão do sinal enviado, por isso um conceito importante é a eficiência de antena, que pode ser expresso

como a razão entre a potência efetivamente radiada pela antena e a potência de entrada (POZAR, 2012).

$$\eta_{\text{rad}} = \frac{P_{\text{rad}}}{P_0} = \frac{P_0 - P_{\text{perdas}}}{P_0} = 1 - \frac{P_{\text{perdas}}}{P_0} \quad (37)$$

Na equação 37 é mostrada a representação da eficiência da antena ou eficiência de radiação da antena, representada pela letra grega eta, η_{rad} , P_{rad} é a potência radiada, P_0 é a potência de entrada e P_{perdas} é potência dissipada através de perdas ôhmicas ou por reflexão de sinal devido ao descasamento de impedâncias.

Segundo Balanis (2009) uma das formas de se representar a eficiência em termos de reflexão da antena (η_{ref}) é por meio da equação 38.

$$\eta_{\text{ref}} = 1 - |\Gamma|^2 \quad (38)$$

Onde o coeficiente de reflexão Γ é o mesmo abordado na equação 27. Uma das formas de se mostrar a eficiência total da antena é mediante a consideração das eficiências dos fatores de influência de perdas da antena, mostrado na equação 39.

$$\eta = \eta_c \eta_{\text{ref}} \eta_d \quad (39)$$

Onde a eficiência total da antena é dada pelo produto entre a eficiência de condução, η_c , eficiência de reflexão, η_{ref} , e eficiência do dielétrico, η_d .

Por sua vez, o ganho da antena pode ser considerado como um resumo dos conceitos dos parâmetros analisados na presente seção, sobretudo os de Diretividade e Eficiência, pois este parâmetro pode ser conceituado como a potência que é efetivamente irradiada em determinada direção, como mostrado na equação 40, o ganho pode ser expresso como o produto entre a diretividade e a eficiência da antena.

$$G = D \eta \quad (40)$$

Geralmente realiza-se a análise do ganho em comparação com um radiador isotrópico, com as unidades em dB ou dBi, substituído a diretividade na equação 36 na equação 40, obtém-se a equação 41.

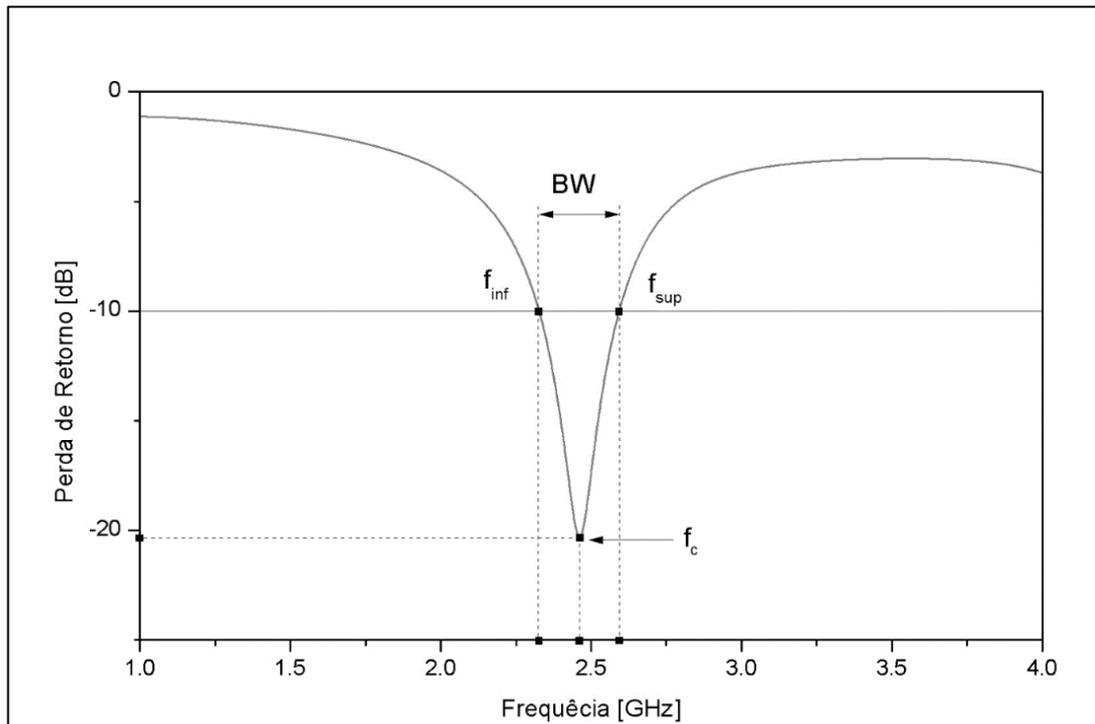
$$G = \eta \frac{4\pi U}{P_{\text{rad}}} \quad (41)$$

Por conseguinte, o ganho pode ser conceituado como uma medida da capacidade da antena em direcionar a potência de radiação efetiva, ou seja, considerando os fatores de eficiência para uma determinada direção em relação a um radiador isotrópico (MILLIGAN, 2005).

2.3.4.5 Largura de Banda

A largura de banda consiste no intervalo de frequência o qual uma antena atinge determinado padrão de desempenho, em termos práticos, considera-se a largura de banda toda a faixa de frequência que ao redor da frequência de operação da antena ainda apresentar um coeficiente de reflexão abaixo de -10 dB, como pode ser vista na Figura 26 (SILVA, 2014, HOLANDA, 2016).

Figura 26 – Gráfico de perda de retorno mostrando a largura de banda.



Fonte: adaptado de Holanda (2016).

Na Figura 26 é mostrada um gráfico de perda de retorno em função da frequência de ressonância com os destaques para os pontos f_{inf} que representa o limite inferior da frequência de ressonância expressa no gráfico para uma perda de retorno em até -10 dB, f_{sup} que é o limite de frequência superior, f_c , a frequência central do gráfico. Na equação 42 são mostradas as formas de cálculo usuais para a largura de banda.

$$BW = f_{sup} - f_{inf} \quad \text{OU} \quad BW(\%) = \frac{f_{sup} - f_{inf}}{f_{sup} + f_{inf}} \times 100\% \quad (42)$$

Geralmente, este parâmetro é designado utilizando a sigla BW, do inglês, *Band Width*, utiliza-se a largura de banda em valores percentuais ou em múltiplos da frequência de operação (por exemplo, expressa-se em: MHz, KHz).

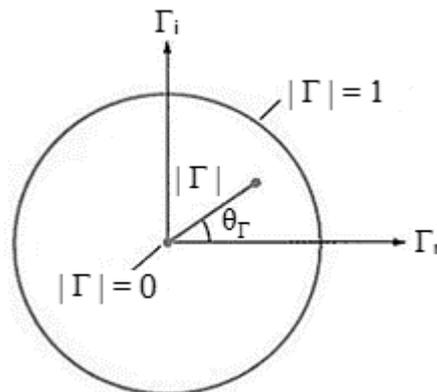
2.3.4.6 Carta de Smith

A Carta de Smith é uma forma de representação gráfica de como a impedância varia na linha de transmissão da antena de acordo com a movimentação do sinal ao longo desta, esta ferramenta foi inventada na década de 1930 pelo engenheiro eletricitista Philip H. Smith, enquanto trabalhava na *Bell Telephone Laboratories* (WHITE, 2004).

Parâmetros como impedância na linha de transmissão, coeficiente de reflexão, reatância e impedância a partir da conversão do coeficiente de reflexão, entre outros parâmetros podem ser obtidos e expressos por meio da Carta de Smith. Ela é construída a partir da análise de carga no ponto de casamento de impedância, por isso pode ser expressa por meio do coeficiente de reflexão para a representação gráfica em relação a impedância da carga (WHITE, 2004; POZAR, 2012).

Uma das formas de se construir a Carta de Smith é por meio de um círculo de raio unitário a partir do coeficiente de reflexão, Γ , como é mostrado na Figura 27.

Figura 27 – Círculo unitário base para construção da carta de Smith.



Fonte: adaptado de Sadiku (2012).

O círculo mostrado na Figura 27 é traçado a partir do coeficiente de reflexão, Γ , que pode ser matematicamente representado na forma da equação 43, onde Γ_r , é parte real e Γ_i a parte imaginária do coeficiente de reflexão (SADIKU, 2012).

$$\Gamma = |\Gamma| \angle \theta_{\Gamma} = \Gamma_r + j\Gamma_i \quad (43)$$

De maneira geral utiliza-se a impedância de forma normalizada em relação a impedância característica, Z_0 , desta forma a impedância normalizada da carga, Z , é representada na forma mostrado na equação 44.

$$Z = r + jx \quad (44)$$

Onde, (r) é a resistência da carga e (x) a reatância. Substituindo na equação 44 as formas mostradas do coeficiente de reflexão da equação 43 e 27, obtém-se a equação 45.

$$r + jx = \frac{(1 + \Gamma_r) + j\Gamma_i}{(1 - \Gamma_r) - j\Gamma_i} \quad (45)$$

A partir da equação 45, pode-se expressar os termos (r) e (x), isoladamente como mostrado nas equações 46 e 47 respectivamente.

$$r = \frac{1 - \Gamma_r^2 + \Gamma_i^2}{(1 - \Gamma_r)^2 - \Gamma_i^2} \quad (46)$$

$$x = \frac{2\Gamma_i}{(1 - \Gamma_r)^2 - \Gamma_i^2} \quad (47)$$

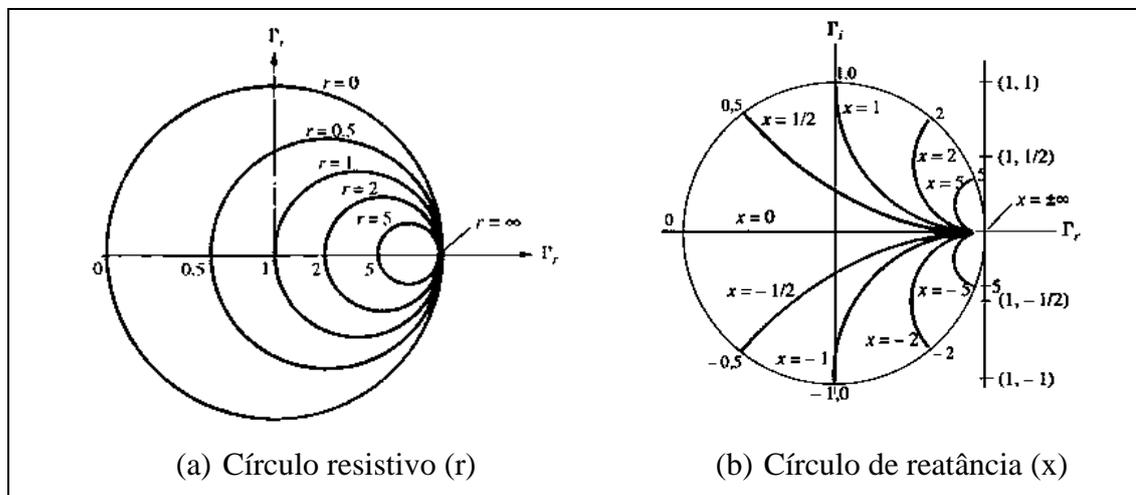
Rearranjando as equações 46 e 47 elas podem ser expressas nas formas mostradas nas equações 48 e 49 respectivamente.

$$\left(\Gamma_r - \frac{r}{1+r}\right)^2 + \Gamma_i^2 = \left(\frac{1}{1+r}\right)^2 \quad (48)$$

$$(\Gamma_r - 1)^2 + \left(\Gamma_i - \frac{1}{x}\right)^2 = \left(\frac{1}{x}\right)^2 \quad (49)$$

Como pode ser observado nas equações 48 e 49, elas se aproximam da forma da equação geral da circunferência, que é do tipo: $(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2$. Deste modo estas equações podem ser representadas graficamente como mostrado na Figura 28.

Figura 28 – Círculos parciais para construção da Carta de Smith.



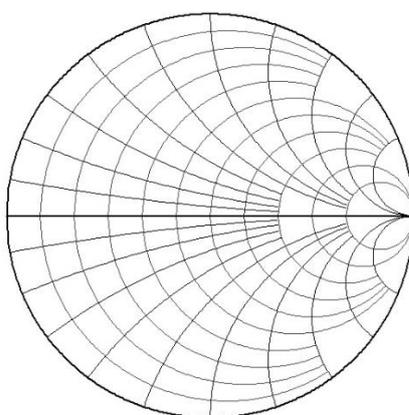
Fonte: adaptado de Sadiku (2012).

Na Figura 28a é mostrado o círculo referente a parte resistiva da impedância normalizada, com o centro do círculo do tipo (Γ_r, Γ_i) igual a $\left(\frac{1}{1+r}, 0\right)$ e raio $\left(\frac{1}{1+r}\right)$, por sua vez a Figura 28b, mostra a representação gráfica referente aos círculos de reatância com centro do círculo $\left(1, \frac{1}{x}\right)$ e raio $\left(\frac{1}{x}\right)$ (SADIKU, 2012). A carta de Smith é geralmente representada a mediante a sobreposição destes círculos, como mostrado na Figura 29.

A quantidade de círculos tanto para demonstração de resistência como para demonstração de reatância pode variar de acordo com a necessidade de representação para visualização de valores significativos da antena ou equipamento testado (WHITE, 2004).

Apesar da comum representação da Carta de Smith em valores normalizados para impedância em alguns casos a escala utilizada no gráfico da carta pode apresentar valores diretos da impedância, assim como a variação da quantidade círculos de resistência e reatância para a melhor visualização dos dados, as escalas de valores podem variar de acordo com a melhor representação dos dados mostrados na Carta de Smith (WHITE, 2004).

Figura 29 – Diagrama básico da Carta de Smith.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 29 é mostrada uma representação simplificada da Carta de Smith, com a sobreposição dos círculos referentes a parcela de resistência e reatância da impedância complexa. No geral, Para o bom desempenho de uma antena, os valores mostrados na Carta de Smith para impedância devem estar próximos de 1 (um) para uma carta normalizada ou próximo do valor nominal de referência para o casamento de impedância, por exemplo 50 Ω , assim como apresentar uma pequena parte imaginária (WHITE, 2004).

2.3.4.7 VSWR

VSWR é sigla para *Voltage Standing Wave Ratio*, em uma tradução direta seria “Proporção de Voltagem de Onda Estacionária”. Este parâmetro descreve o estado do casamento de impedância de um sistema de transmissão/recepção de sinal de ondas eletromagnéticas, por meio da razão entre os módulos dos valores máximo e mínimo valor de tensão ao longo da linha de transmissão. conforme mostrado na equação 50, o parâmetro de

VSWR também pode ser expresso em função do coeficiente de reflexão (Γ) (HUANG; BOYLE, 2008).

$$VSWR = \frac{|V_{\max}|}{|V_{\min}|} = \frac{|V_+| + |V_-|}{|V_+| - |V_-|} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (50)$$

O mínimo valor que este parâmetro pode atingir é 1 (um), um VSWR unitário significa que a impedância da carga e da linha de transmissão estão perfeitamente casadas, outro extremo de valor para o VSWR é quando ele tende para o infinito indicando um circuito aberto ou um curto circuito. Usualmente um sistema de transmissão é considerado com casamento de impedância satisfatórios quando apresenta valores VSWR menores que 2: $VSWR < 2$. Em termos de simulação computacional este tipo de parâmetro é utilizado como referência para o projeto e desenvolvimento da antena (CHEN; CHIA, 2006; HUANG; BOYLE, 2008).

2.3.5 Antenas Têxteis

Antenas têxteis são antenas que utilizam como substrato dielétrico tecidos constituídos de fibras têxteis. Nos últimos anos pesquisas nesta área veem crescendo, todavia, a utilização desses materiais deve vir acompanhada de uma série de caracterizações para análise da viabilidade do emprego de tecidos na construção de antenas que supram as necessidades de suas aplicações, pois características individuais de cada material têxtil como permissividade elétrica e a espessura do material, quando utilizado como substrato de uma antena, influenciam diretamente em fatores chave, como largura de banda e eficiência (CAVALCANTE, 2014).

Devido à natureza da aplicação dos tecidos, uma linha de pesquisa comum envolvendo a área de antenas têxteis é a utilização em aplicações próximas ao corpo humano. Uma das principais características de aproveitamento de tecidos como substratos de antena é a flexibilidade. Estruturas flexíveis para transmissão e recepção de dados podem se moldar as curvaturas do corpo humano facilitando a integração da antena com o vestuário (GUERRA, 2016; MANZARI; OCCHIUZZI; MARROCCO, 2011, 2012; SALVADO et al., 2012).

Além da utilização em aplicações próximas ao corpo, tecidos empregados como substratos de antenas podem ser aplicados em situações onde há a necessidade de estruturas flexíveis, Shao (2015) mostra o desenvolvimento de uma antena flexível utilizando fios condutivos de fibras têxteis para o projeto de uma *tag* RFID para integração e rastreamento de pneus para veículos de transporte de carga, destacando a viabilidade da utilização de antenas

têxteis para aplicações de rastreamento comercial. A *tag* têxtil desenvolvida em Shao (2015) é mostrada na Figura 30.

Figura 30 – *Tag* RFID flexível em material têxtil condutivo.



Fonte: adaptado de Shao (2015).

Em termos de flexibilidade os tecidos de malha, no geral, apresentam uma flexibilidade maior que os tecidos planos, desta forma, a utilização de tecidos de malha como substrato de antenas têxteis pode trazer diversas possibilidades de aplicações, todavia independentemente do tipo de tecido utilizado e da aplicação prevista para antena, faz-se necessária a caracterização de suas propriedades, tanto físicas como elétricas, para o desenvolvimento de antenas com desempenho satisfatórios (CAVALCANTE, 2014; GUERRA, 2016; HOLANDA, 2016).

O projeto e a modelagem de antenas têxteis são viabilizados por meio da caracterização das propriedades dos tecidos. Devido à presença de espaços vazios na estrutura dos tecidos há, no geral, uma grande quantidade de ar e dependendo da natureza da fibra utilizada o tecido pode acumular ou repelir umidade dificultando o projeto e a modelagem da antena, pois variações expressivas neste parâmetro podem influenciar na permissividade elétrica. Devido a porosidade característica de muitos tecidos, geralmente o parâmetro de permissividade elétrica é relativamente baixo em torno de 2 (dois) e em alguns casos apresentam altas tangentes de perda. Contudo a presença dessa porosidade acaba aumentando a largura de banda da antena favorecendo algumas aplicações (BJORNINEN et al., 2014; SALVADO et al., 2012; UKKONEN; SYDÄNHEIMO; RAHMAT-SAMII, 2012).

Existem diversas formas de se fabricar antenas têxteis além da utilização de fios de fibras têxteis condutivas (SHAO, 2015). Uma das mais comuns devido sua facilidade de construção é fixação do material condutivo sobre o substrato têxtil como abordado em (GUERRA, 2016; HOLANDA, 2016; MANZARI; OCCHIUZZI; MARROCCO, 2011). O cobre é um dos materiais comumente utilizados devido suas características condutivas e maleabilidade favoráveis, mas é comum a utilização de outros materiais condutivos, como malhas condutivas como mostrada em (RAJO-IGLESIAS et al., 2014).

Outra forma de fabricação de antenas têxteis consistem no bordado da geometria da antena com fio condutivo, permitindo uma maior integração do material condutor em uma das camadas de substrato (ZHANG et al., 2012). Dentre os processos de fabricação de antenas têxteis este é o que apresenta maior durabilidade em termos de resistência a esforços mecânicos e a lavagem dos tecidos (KAZMI et al., 2016).

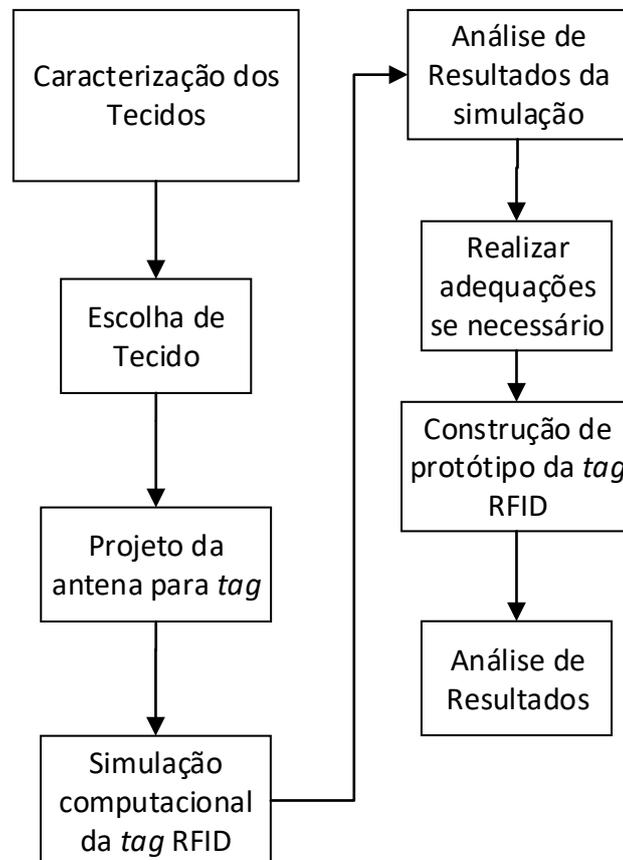
Outra forma de fabricação é utilização de tinta condutiva, imprimindo a geometria da antena diretamente no tecido, todavia este tipo de antena têxtil, no geral, apresenta baixa performance, caso o material condutivo da tinta não apresente uma alta concentração, o surgimento de discontinuidades, como fissuras, no desenho impresso é outro fator que pode prejudicar o desempenho das antenas fabricadas por este processo (AKBARI et al., 2016; ZHONG et al., 2017).

Devido a facilidade de construção o foi utilizada na presente pesquisa a técnica de fixação de material condutivo, no caso cobre, sobre o substrato da antena como abordado em (GUERRA, 2016; HOLANDA, 2016; MANZARI; OCCHIUZZI; MARROCCO, 2011). Na seção 3 serão mostrados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do presente trabalho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção será mostrada a metodologia utilizada na elaboração do presente trabalho, conforme pode ser observado na Figura 31, será dividida em oito etapas, as quais serão detalhadas a seguir.

Figura 31 – Fluxograma da metodologia do trabalho.



Fonte: autoria própria.

O presente trabalho consiste na continuidade da pesquisa de desenvolvimento de antenas com substrato em material têxtil, feita em parceria entre o Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, UFERSA, e o Departamento de Engenharia Têxtil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN.

Como mostrado na Figura 31, uma das primeiras etapas para o desenvolvimento deste trabalho é realização da caracterização dos tecidos utilizados, esta etapa da pesquisa foi

majoritariamente realizada pelos engenheiros Ma. Samanta Mesquita de Holanda e Me. Juan Rafael Filgueira Guerra, com pequenas contribuições do autor deste trabalho. Os procedimentos de caracterização seguiram as etapas desenvolvidas e detalhadas em Holanda (2016) e Guerra (2016), respectivamente.

Após a devida caracterização das propriedades físicas e elétricas dos materiais têxteis, obtém-se informações necessárias para o projeto e aplicação destes materiais no desenvolvimento de antenas.

Posteriormente a etapa de projeto, inicia-se a simulação, para averiguar o comportamento da antena projetada, no presente trabalho esta etapa será realizada por meio do *software* Ansys HFSS[®], ferramenta computacional que utiliza o Método de Elementos Finitos para simulação de ondas eletromagnéticas em estruturas sob altas frequências (ANSYS, 2015).

Com a devida avaliação dos resultados obtidos com as simulações realizadas no HFSS[®], realizar-se-á a construção das antenas, utilizando-se folha de cobre fixada diretamente no substrato de material têxtil, mesma técnica utilizada em Guerra (2016) e Holanda (2016).

Uma vez construídas as antenas, elas serão testadas em um Analisador de Redes Vetoriais e a partir dos resultados obtidos através desta medição será realizada uma comparação entre os resultados da simulação com os valores efetivamente medidos.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS TECIDOS

Foram realizados testes de Titulação, Gramatura, Resistência à tração e Estabilidade Dimensional, para se traçar um perfil das características físicas das amostras têxteis, os ensaios foram realizados no Departamento de Engenharia Têxtil da UFRN, pelos autores de Guerra (2016) e Holanda (2016). As normas que nortearam a realização dos ensaios citados são elencadas no Quadro 4.

Quadro 4 – Normas para ensaios de materiais têxteis

Ensaio	Norma
Titulação	ASTM D 3776
Gramatura	ASTM 3887
Estabilidade Dimensional	ASTM 6207
Resistência à Tração	ASTM D 5034

Fonte: Adaptado de Guerra (2016).

As normas utilizadas para o desenvolvimento dos ensaios são de autoria da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), conforme é mostrado no Quadro 4. A utilização das

referidas normas se deu por indicação dos professores do Departamento de Engenharia Têxtil, uma vez que são internacionalmente utilizadas e a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), quando possui uma normatização específica para tais ensaios na área de Engenharia têxtil, se baseia nas referidas normas ASTM. Nas seções 3.1.1 à 3.1.5 são detalhados os procedimentos realizados em cada etapa de medição.

3.1.1 Procedimentos de medição da Titulação

Este parâmetro também conhecido como densidade linear, influencia de forma direta na gramatura e conseqüentemente, na permissividade efetiva do material quando utilizado como substrato de antena (GUERRA, 2016).

Seguindo os procedimentos da norma ASTM 3776, a princípio são desfiados trechos da malha de cada tecido em análise, processo conhecido como “desmalhamento”, que consiste na retirada dos fios individualmente da estrutura do tecido, neste processo são separadas ao menos três amostras de fio com comprimento de 1 m (um metro) cada. Essas amostras foram pesadas em uma balança analítica (Bel Mark M214ai), aplicando-se as equações mostradas na seção 2.2.3.1, encontrou-se os valores dos títulos das amostras.

3.1.2 Procedimentos de medição da Gramatura

A partir das informações do parâmetro de gramatura de um tecido faz-se uma relação da quantidade massa de uma amostra por unidade de área, desta forma tecidos com alta porosidade, que apresentam uma quantidade significativa de “espaços vazios” apresentam uma gramatura menor. Esta característica pode afetar diretamente o desempenho de antenas fabricadas com tais materiais (SHAO et al., 2015)

Para aferir a gramatura das amostras utilizadas na presente pesquisa utilizou-se de uma balança analítica e um cortador padrão para se manter a uniformidade dimensional em relação a área de cada amostra. Tais equipamentos utilizados são mostrados na Figura 32.

Figura 32 – Equipamentos utilizados no teste de gramatura. (a) Balança analítica digital Shimadzu AUy-220. (b) Cortador Circular Mesdan modelo 175B.



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de Guerra (2016) e Holanda (2016).

Conforme descrito na norma ASTM 3887, para a realização do ensaio de Gramatura das amostras de tecido, primeiramente utilizando-se um cortador circular, como mostrando na Figura 32b, retira-se uma amostra com 1dm^2 , seja, $0,01\text{ m}^2$ de cada tecido. Com as devidas amostras em dimensões padronizadas devido a utilização do cortador, afere-se a quantidade de massa em cada amostra com a utilização de uma balança analítica como mostra a Figura 32a.

3.1.3 Procedimentos do Ensaio de Estabilidade Dimensional

O ensaio de estabilidade dimensional seguiu os procedimentos descritos na norma ASTM 6207. Por meio de uma máquina para teste de lavagem, *whashtester* Mathis, amostras com dimensões de $100\times 100\text{mm}$ foram colocadas no equipamento durante 30 (trinta) minutos a uma temperatura de $60\text{ }^\circ\text{C}$, em uma solução de água e sabão com concentração de 4g/l e posteriormente colocadas em uma estufa para secagem durante 4 (quatro) horas a uma temperatura de $37\text{ }^\circ\text{C}$.

O objetivo do teste é avaliar o grau de variação das dimensões do tecido quando submetido ao processo de lavagem, geralmente os tecidos de malha apresentam uma variação dimensional considerável quando comparado aos tecidos planos (CAVALCANTE, 2014).

3.1.4 Procedimentos do Ensaio de Resistência a Tração

Seguindo os parâmetros da norma ASTM D5034-09, foi obtida a curva de resistência a esforços de tensão em Newtons (N) em função do alongamento percentual do tecido, utilizando-

se cinco amostras em sentido de coluna e cinco amostras em sentido de carreira da malha com dimensões de 50x70mm, por meio de um equipamento adequado para este tipo de finalidade, no caso o Tensolab 3000 Mesadan mostrado na Figura 29.

Figura 33 – Ensaio de resistência a tração.



Fonte: Adaptado de Holanda (2016).

Na Figura 33 é mostrado o equipamento utilizado para a realização do teste de resistência a tração, os dados obtidos mediante a utilização do equipamento foram tabulados e analisados, conforme é mostrado na seção 4.1.4, na Tabela 4 e nas Figuras 38 e 39.

3.1.5 Caracterização das Propriedades Elétricas

A caracterização das propriedades elétricas foi realizada com o objetivo de embasar a relação entre os aspectos físicos e elétricos das amostras têxteis analisadas na presente pesquisa, além de viabilizar o projeto e a construção de antenas utilizando tais substratos. A medição dos parâmetros elétricos das amostras têxteis foi realizada no Laboratório de Micro-ondas da UFRN. Utilizando o Analisador de Redes Vetoriais, Agilent Technologies E5071C e um conjunto para medição de impedância *Dielectric probe* Agilent 85070E, o método desse sistema de medição é o da transmissão/reflexão com sonda coaxial.

Na Figura 30 é mostrado o analisador de redes vetoriais com a sonda de medição de permissividade, utilizados na obtenção parâmetros de permissividade elétrica e tangente de perdas dos tecidos analisados.

Figura 34 – Analisador de Rede Vetorias Agilent E5071C e *kit* Agilent 85070.



Fonte: adaptado de Guerra (2016) e Holanda (2016).

Na Figura 34 são mostrados os equipamentos utilizados, um cabo é utilizado para conectar a sonda e o Analisador de Rede Vetoriais, a faixa de frequência do equipamento utilizados vai de 9 KHz à 4,5 GHz, inicia-se o processo de calibração, que consiste, segundo o guia de usuário do equipamento, nos seguintes procedimentos: Primeiramente ajustar as faixas frequências para varredura e o passo, (no caso 0,2 GHz a 4,5 GHz, com passo de 0,086); Posteriormente faz-se a medição da permissividade no ar; utiliza-se uma ponta de prova para gerar um curto-circuito (Figura 35b) na sonda medição (Figura 35a), e por fim coloca-se a sonda em meio aquoso a 25 °C (AGILENT TECHNOLOGIES, 2013).

Figura 35 – Sondas *kit* Agilent 85070. (a) Sonda para medição de Permissividade. (b) Ponta de Curto-circuito.



(a)

(b)

Fonte: adaptado de Agilent Technologies (2013).

Após a calibração, as amostras de tecidos são colocadas sob a sonda de medição, a espessura mínima de cada amostra foi calculada com base na indicação da equação 51, como mostrado no manual do equipamento, ficando com a dimensão aproximada de 15 mm (AGILENT TECHNOLOGIES, 2013).

$$h = \frac{20}{\sqrt{|\epsilon'|}} \quad (51)$$

Onde, h é a altura do substrato mínima recomendada pela fabricante do equipamento de medição. Os dados são captados pela sonda por intermédio do Analisador de Redes Vetoriais e armazenadas em um computador de apoio com o *software* específico para essa finalidade, cujo o qual, faz parte do *kit* de medição. O conjunto de dados de saída do processo de medição fornece a componente real da permissividade elétrica do material (ϵ') e a parte imaginária (ϵ''), viabilizando o cálculo da tangente de perdas ($\tan \delta$).

3.2 ESCOLHA DO TECIDO

A escolha de qual tecido utilizado na simulação e confecção da antena, procedeu-se pelos dados obtidos mediante a caracterização das propriedades mecânicas e elétricas, descritas na seção 3.1, elegendo os tecidos que apresentaram a maior permissividade elétrica e sobretudo, menor tangente de perdas, levando-se em consideração as demais características físicas analisadas.

Os principais fatores de desempenho a serem avaliados em uma *tag* RFID são a frequência e alcance de leitura, que são influenciados diretamente pelas propriedades de permissividade e tangente de perda, outro fator é a segurança, no que diz respeito a confiabilidade da *tag* resistir a movimentações de forma íntegra, garantindo a leitura dos dados (BOLIC; SIMPLOT-RYL; STOJMENOVIC, 2010).

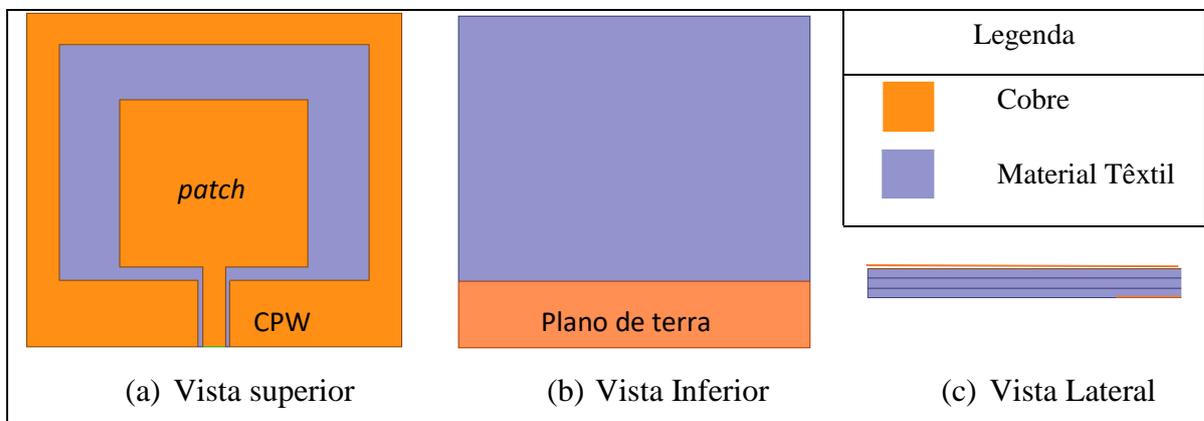
3.3 PROJETO E SIMULAÇÃO DA ANTENA

A frequência de operação utilizada para o projeto da antena é centrada em 2,45 GHz, seguindo a resolução nº 506, de 1º de julho de 2008, da Agência Nacional de Telecomunicações, ANATEL, e o padrão internacional IEEE 802.15.4, estabelecendo as frequências para aplicações Industriais, Científicas e Médicas (*Industrial, Scientific and Medical*), ISM. A largura de banda prevista para aplicações em Identificação em Rádio Frequência, *internet* da coisas e aplicações gerais na área Industrial, Científica e Médica é de 2,400 GHz à 2,4835 GHz, desta forma, dispondo de uma largura de banda de 83,5 MHz.

A geometria utilizada no projeto da antena foi um *patch* retangular monopolo alimentado por Guia de Onda Coplanar, *Coplanar Waveguide*, (CPW), esta técnica consiste no truncamento de plano de terra para o mesmo plano da linha de alimentação, uma das principais características deste tipo de antena é o comportamento do diagrama de radiação omnidirecional (SIMONS, 2001).

Como pode ser visto na Figura 36a, a geometria utilizada possui traços que facilitam a fabricação da antena, foi utilizando um pequeno plano de terra na parte inferior da antena (Figura 36b), esta inserção permite um melhor casamento de impedância e uma melhora no ganho da antena (LIU, LU, 2014).

Figura 36 – Visão geral da geometria das antenas.



Fonte: Autoria Própria.

Durante a etapa de simulação também foi considerado a utilização de diferentes camadas do tecido, no caso três camadas (Figura 36c), na camada superior será fixado o *patch* e a estrutura CPW da antena, a camada mediana auxilia no distanciamento das camadas onde serão fixadas as estruturas em material condutor, no caso sobre. Na camada de tecido inferior será fixada o plano de terra parcial da antena.

Para a simulação das antenas foi utilizada a versão 16.2 do *software* Ansys HFSS[®] (*High Frequency Structural Simulator*) da Suíte de programas Ansys *Electromagnetics*. Os principais parâmetros avaliados na simulação foram o S_{11} (coeficiente de reflexão), Diagrama de Radiação e Ganho, Carta de Smith e VSWR. A simulação foi realizada com uma frequência de 1 GHz até 10 GHz, com passo de 0,045.

Para a simulação, considerando os tecidos analisados, o HFSS[®] permite a inserção de novos materiais em sua biblioteca de dados, exigindo para tal, parâmetros como a permissividade elétrica e a tangente de perdas do material para frequências específicas, dados obtidos na etapa de caracterização das amostras têxteis. Um dos principais empecilhos na etapa

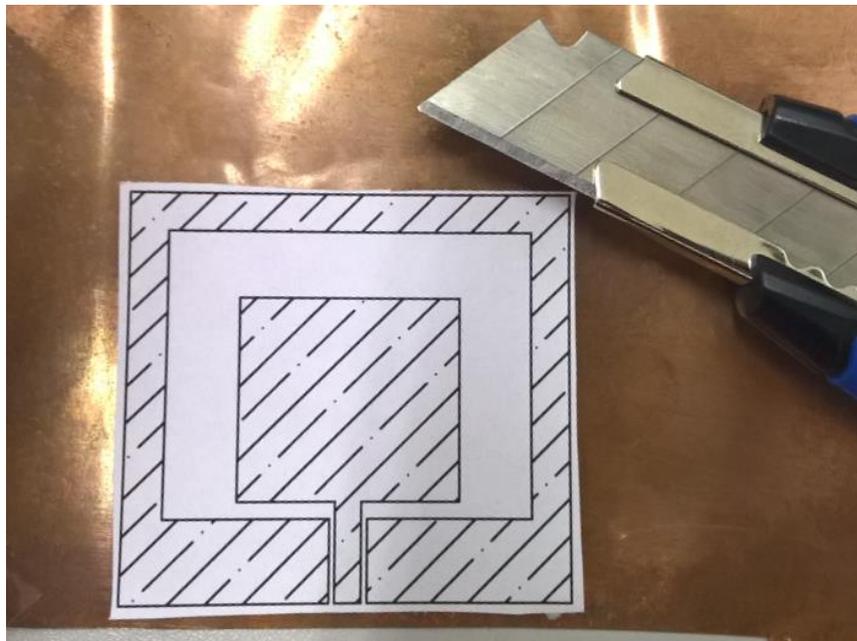
de simulação foi o fato da impossibilidade de se considerar a influência da porosidade dos materiais têxteis analisados, logo a simulação considerou um material homogêneo e isotrópico.

3.4 CONSTRUÇÃO E MEDIÇÃO DAS ANTENAS

Após a caracterização das propriedades físicas e elétricas das amostras de tecido, projeto e simulação das antenas, realizou-se a construção das antenas, com base nos resultados obtidos mostrados nas seções 4.1 a 4.2, foram selecionados 2 (dois) tecidos (SPF, Tecido de Proteína de Soja e PP+PLA, Polipropileno e Ácido Polilático de Milho), para utilização como substrato.

Realizou-se, inicialmente, a preparação dos substratos têxteis, por meio de corte e fixação das três camadas do material têxtil mediante a costura das laterais dos tecidos. O material condutor utilizado foi uma folha de cobre com condutividade de $5,8 \cdot 10^7$ S/m e espessura de 0,05 mm. O cobre foi escolhido como material condutor devido a boa maleabilidade, facilitando a etapa de construção da antena, a boa condutividade, permitindo analisar a influência do substrato utilizado no desempenho da antena (GUERRA, 2016; HOLANDA, 2016).

Figura 37 – Procedimento de corte folha de cobre.



Fonte: autoria própria.

Para a realização do corte da folha de cobre na geometria e nas dimensões da antena, foi impresso o desenho das antenas simuladas em folha de papel no formato A4, em escala 1:1, o desenho da geometria das antenas foi realizado em um programa CAD (*Computed Aided*

Design) com base nas dimensões finais das simulações realizadas no HFSS[®]. Fixou-se o desenho impresso na folha de cobre e realizou-se o corte desta com uma lâmina, conforme é ilustrado na Figura 37.

Após os procedimentos de corte da folha de cobre, fixou-se o material condutivo no substrato têxtil com o auxílio de um adesivo líquido a base de um éster de cianoacrilato de etila. Devido a porosidade e os espaços presentes entre as fibras do tecido a utilização deste tipo de adesivo pode influenciar nos resultados finais da antena, porém com uma influência relativamente pouco significativa, segundo metodologia similar a encontrada em Guerra (2016) e Holanda (2016).

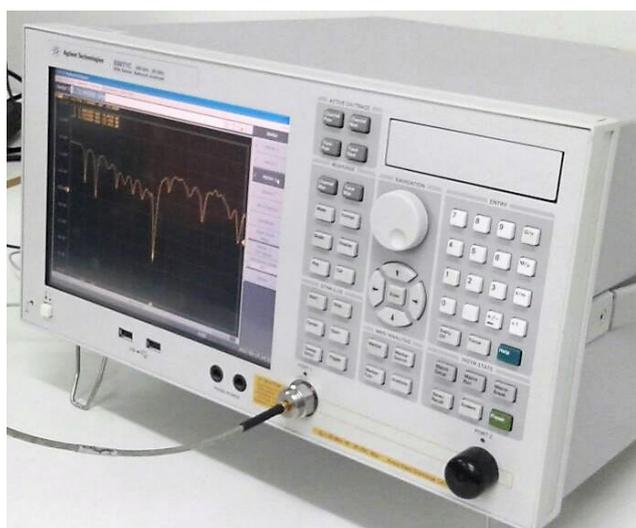
Figura 38 – Conector SMA-KE.



Fonte: Autoria Própria.

Para a alimentação e teste da antena foi utilizado um conector SMA-KE do tipo fêmea reverso (mostrado na Figura 38), com impedância de 50Ω (cinquenta ohms), com 5mm de diâmetro. O conector foi soldado utilizando material de solda à base de uma liga metálica de chumbo e estanho, com auxílio de um ferro de solda.

Figura 39 – Analisador Redes Vetoriais Agilent Technologies E5071C-2K5.



Fonte: autoria própria.

Com a construção dos protótipos, estes foram medidos no Laboratório de Medidas em Micro-ondas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, IFPB, Campus João Pessoa. Foi utilizado um Analisador de Redes Vetoriais, Agilent Technologies E5971C-2K5 (vide Figura 35), e um suporte de acrílico para segurar as antenas em posição vertical

devido a flexibilidade dos materiais têxteis na fabricação. Os resultados das medições, tanto as realizadas no Laboratório de Medidas em Micro-ondas do IFPB, como dos demais ensaios descritos neste capítulo, serão detalhados no Capítulo 4, deste trabalho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados e discussões da presente pesquisa, na seção 4.1 são mostrados os resultados obtidas da caracterização dos tecidos analisados, na seção 4.2 os resultados referentes a simulação computacional e na seção 4.3 os resultados obtidos mediante a medição das antenas fabricadas.

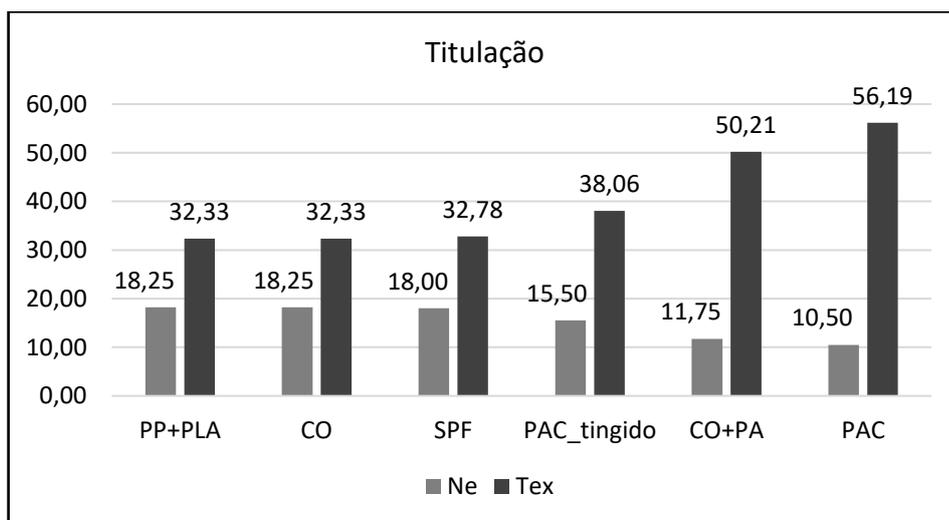
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS TECIDOS

A seguir serão apresentados os resultados dos ensaios realizados conforme procedimentos e normas descritas na seção 3.1 do Capítulo 3. Não seção 4.1.1 serão mostrados os resultados do ensaio de Titulação, na 4.1.2 Gramatura, 4.1.3 Estabilidade dimensional, 4.1.4 Resistência à tração e em 4.1.5 Caracterização das propriedades elétricas dos tecidos analisados.

4.1.1 Titulação

Os resultados dos ensaios de titulação, realizados conforme as normas pertinentes e descrito na seção 3.1.1 são mostrados no gráfico da Figura 40.

Figura 40 – Resultados dos ensaios de titulação.



Fonte: autoria própria.

Conforme pode ser observado na Figura 40 os tecidos de maior título são PAC (acrílico) e CO+PA (Algodão+Poliamida), vale ressaltar a diferença entre os títulos do CO (algodão) e o

CO+PA, como há a adição de fibras sintéticas é esperado um título maior em relação ao tecido feito apenas de fibras naturais de algodão, fator observado nos resultados da medição.

Em ordem crescente de título (Tex) o resultado apresentado pelos tecidos feitos com fibra de PAC (acrílico), apesar de serem constituído de mesmo material, as etapas de manufatura, como a de tingimento, podem influenciar no resultado final do tecido, como ocorre entre o PAC e PAC_tingido.

4.1.2 Gramatura

Para realização dos ensaios de gramatura foram utilizadas três amostras de cada tecido, estas possuíam a mesma área, obtida por meio da utilização um cortador circular padrão, de 1dm² (um decímetro quadrado), ou 0,01 m² (zero vírgula zero um metro quadrado), conforme mostrado na Figura 32b na seção 3.1.2. Em sequência foi efetuada a média aritmética de cada amostra obtendo-se os valores mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Gramatura dos tecidos.

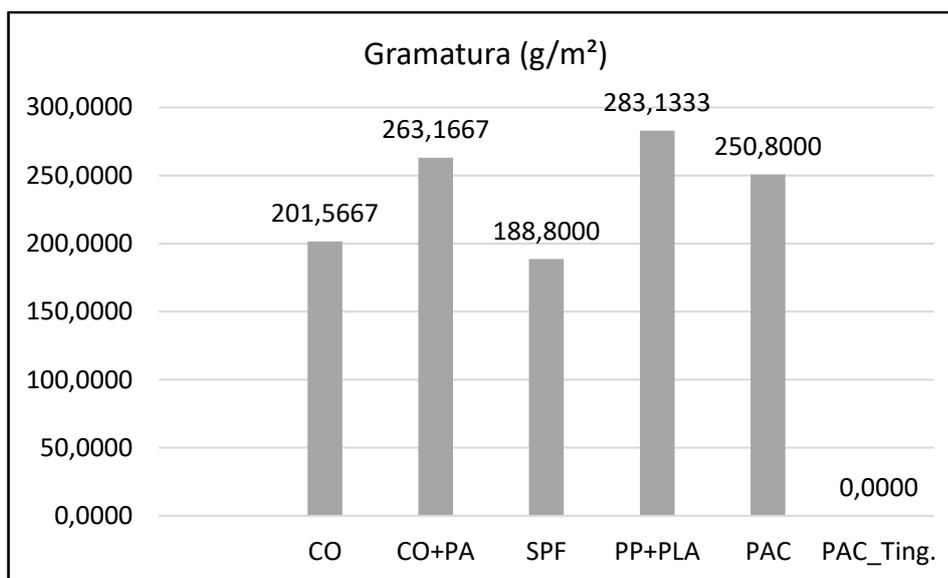
Tecido	Massa (g)				Gramatura (g/m ²)
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	
CO	1,989	2,061	1,997	2,0157	201,5667
CO+PA	2,563	2,763	2,569	2,6317	263,1667
SPF	1,865	1,891	1,908	1,8880	188,8000
PP+PLA	3,001	2,991	2,502	2,8313	283,1333
PAC	2,555	2,525	2,444	2,5080	250,8000
PAC_Ting.	-	-	-	*	*

*Não foi possível aferir medida de massa do tecido, pois este não apresentava formato adequado que possibilitasse o preparo da amostra de acordo com a norma utilizada.

Fonte: autoria própria.

Com base nos dados finais da Tabela 3, na Figura 41 são mostrados os resultados da gramatura dos tecidos analisados. Com exceção do tecido fabricado com fibras de acrílico com posterior processo de tingimento (PAC_Tingido), pois a amostra disponível do material não apresentava área suficiente para atender os requisitos estabelecidos pela norma ASTM 3887, para realização do teste da amostra, pois não foi possível retirar pelo menos três amostras circulares com 0,01 m² e posterior aferição de massa.

Figura 41 – Gramatura dos tecidos.



Fonte: autoria própria.

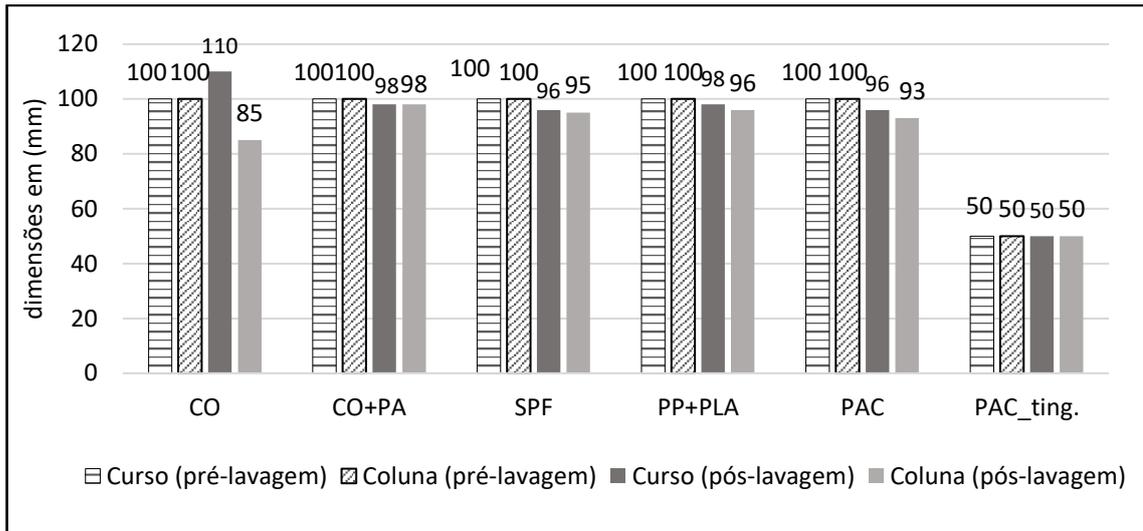
O tecido que apresentou maior gramatura, como ilustrado na Figura 41, foi o PP+PLA, seguido do tecido à base de CO+PA e PAC, dos tecidos medidos o SPF apresentou a menor gramatura, se mostrando como o mais leve por unidade de área.

4.1.3 Ensaios de estabilidade dimensional

O teste de estabilidade dimensional foi realizado seguindo os procedimentos descritos na seção 3.1.3, onde foram feitas amostras de cada tecido de 100x100mm exceto para o PAC_tingido, onde foi feita uma amostra de 50x50mm devido a indisponibilidade de material para se manter a geometria seguida. Como mostrado na Figura 38, os valores obtidos dos tecidos após a etapa de lavagem do ensaio de estabilidade dimensional, indicam reduções das dimensões das amostras tanto no sentido de coluna (vertical) como de carreira (horizontal) dos tecidos, com exceção do tecido de Algodão (CO), que apresentou alongamento de 10 mm no sentido do curso e o tecido de Acrílico Tingido (PAC_tingido) que não apresentou variação dimensional em nenhum sentido.

Na Figura 38 e na Figura 39 são mostradas a variação dimensionais no sentido da carreira ou curso e da coluna, além da variação percentual destas dimensões em cada tipo de tecido respectivamente.

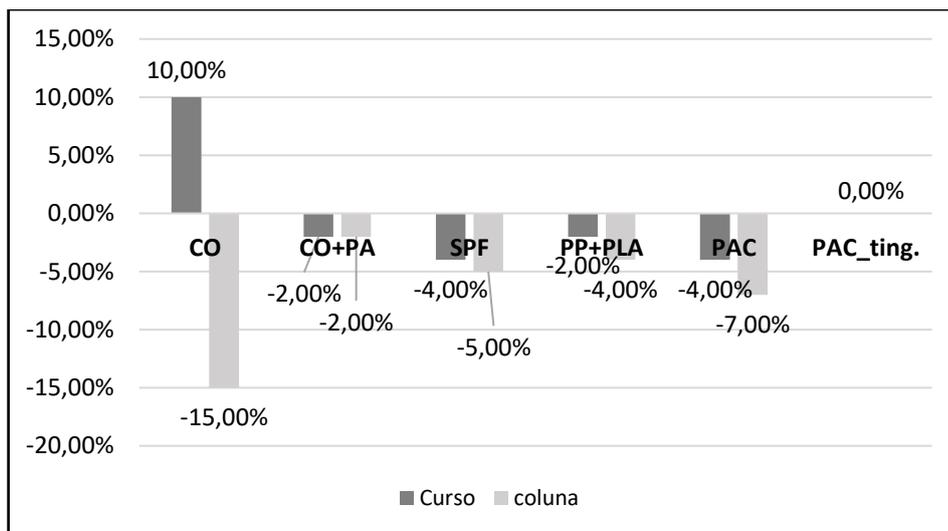
Figura 42 – Variação dimensional das amostras.



Fonte: autoria própria.

Na Figura 39, são mostradas as variações em termos percentuais dos tecidos em relação aos sentidos de curso e coluna.

Figura 43 – Variação percentual das dimensões.



Fonte: autoria própria.

Na Tabela 4, são mostrados os valores encontrados após o processo de lavagem, tanto para variação linear de curso e coluna da malha como para área final das amostras têxteis submetidas ao processo de avaliação da estabilidade dimensional.

Como pode ser observado na Tabela 4, a maioria dos tecidos analisados apresentou variação negativa, ou seja, encolhimento em relação as medidas de pré-lavagem, a maior modificação dimensional foi no CO (composto de fibras de algodão) que apresentou uma variação positiva de 10% no sentido da trama e uma variação de -15% no sentido da coluna apresentando uma modificação final de área de -10,72% e o PAC_tingido, não apresentou variação dimensional.

Tabela 4 – Variação dimensional após o processo de lavagem.

Tecido	Medidas					
	Pós-lavagem			Variação (%)		
	Curso (mm)	Coluna (mm)	Área (mm ²)	Curso	Coluna	Área
CO	110	85	9350	10,00%	-15,00%	-6,50%
CO+PA	98	98	9604	-2,00%	-2,00%	-3,96%
SPF	96	95	9120	-4,00%	-5,00%	-8,80%
PP+PLA	98	96	9408	-2,00%	-4,00%	-5,92%
PAC	96	93	8928	-4,00%	-7,00%	-10,72%
PAC_ting.	50	50	2500	0,00%	0,00%	0,00%
Variação dimensional percentual média				-0,33%	-5,50%	-5,98%
Desvio Padrão				0,0528	0,0524	0,0376

Fonte: autoria própria.

A variação dimensional percentual média da área das amostras têxteis foi de cerca de 5,98% com um desvio padrão de 0,0376, a maiores variações dimensionais encontradas foram no sentido da coluna das malhas, com uma média de -5,50%, sendo a do sentido do curso de apenas -0,33%.

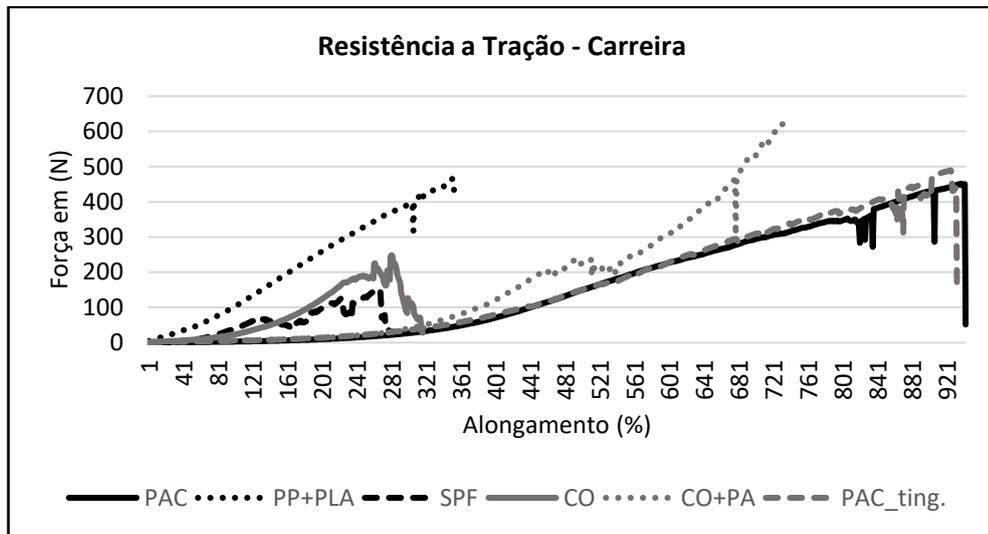
4.1.4 Ensaio de Resistência à tração

Os resultados do ensaio de resistência à tração são mostrados no sentido de carreira e coluna, uma das características das malhas é o maior alongamento e resistência no sentido da carreira (MACEDO, 2016). Esta característica também foi observada nos tecidos analisados.

Na Figura 44 são mostrados os resultados do teste de resistência à tração no sentido da carreira, dos tecidos analisados, os que apresentaram maior pico de resistência em Newtons (N) foram o PP+PLA e o CO+PA, todavia o último apresentou um maior alongamento em relação ao primeiro, os tecidos que apresentaram o maior alongamento foram os de fibras de acrílico, PAC.

Para realização deste ensaio no sentido da coluna, os tecidos a base de fibras de Acrílico, PAC, não foram testados devido a indisponibilidade do material, contudo, como mostra a Figura 45, no sentido da coluna os tecidos do tipo malha apresentam uma menor resistência e alongamento em comparação a sentido da carreira do tecido, como é ressaltado em (MACEDO, 2016).

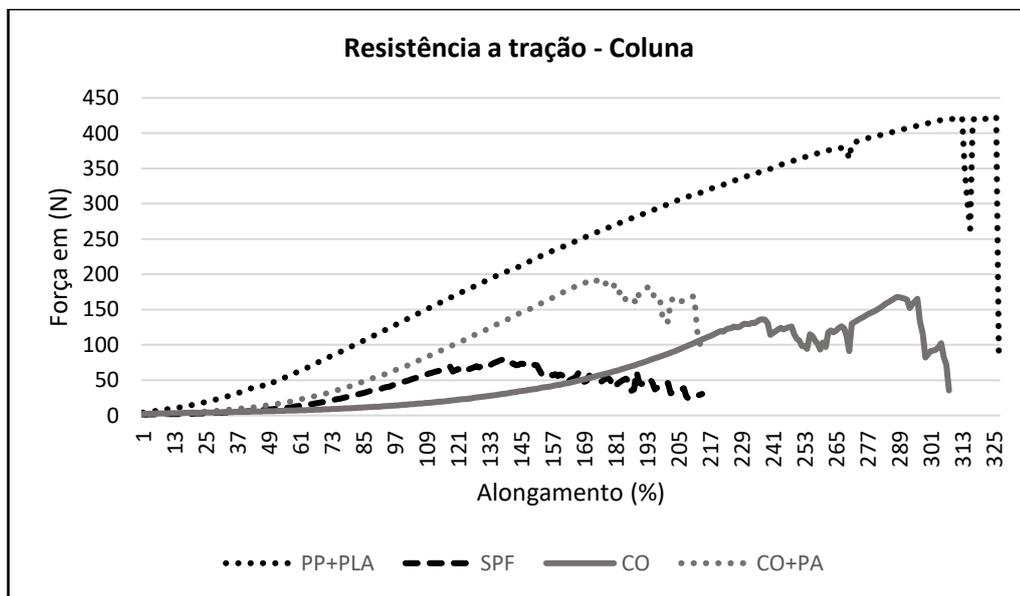
Figura 44 – Resultados do teste de resistência à tração no sentido da carreira dos tecidos da amostra.



Fonte: Autoria própria.

Como mostrado na Figura 45, dos tecidos analisados neste ensaio, o que apresentou maior resistência a tração e o maior alongamento no sentido da Coluna foi o PP+PLA, o menor desempenho nestes parâmetros foi o tecido à base de fibras de Soja, SPF.

Figura 45 – Resultados do teste de resistência a tração sentido da coluna dos tecidos da amostra.



Fonte: Autoria própria.

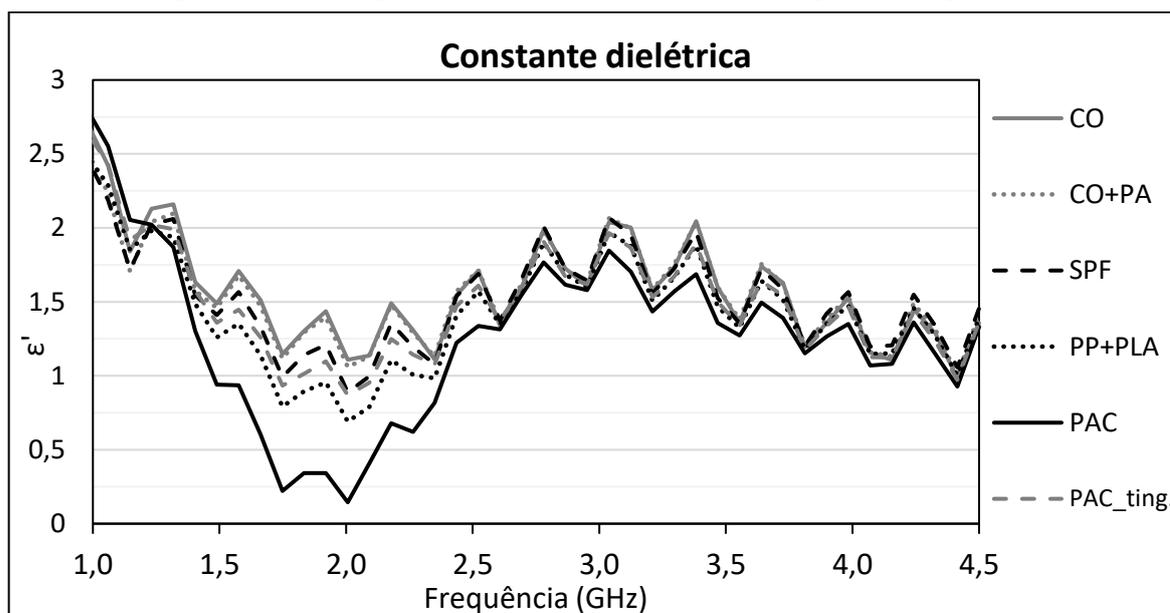
Para a escolha do tecido quanto a parâmetro de resistência serão priorizados os resultados do teste de resistência a tração na carreira dos tecidos, pois se realizou o teste em mais amostras de tecidos. Este tipo de teste é importante para garantir que o material utilizado no desenvolvimento de uma *tag* RFID, ou demais aplicações em antenas possa resistir a movimentações e a ambientes hostis, como no chão de fábrica (SHAO, 2015).

4.1.5 Caracterização das Propriedades Elétricas

A caracterização das propriedades físicas é necessária para o projeto e desenvolvimento da utilização de tecidos como substratos de antenas, todavia as características elétricas devido à natureza da aplicação possuem influência significativa no projeto e no desenvolvimento da antena (CAVALCANTE, 2014).

Como descrito na seção 3.1.5, as permissividades elétricas relativas para os tecidos analisados foram medidas dentro do intervalo de 0,2 GHz a 4,5 GHz com passo de 0,086. O comportamento dos tecidos estudados, quanto este parâmetro, é mostrado na Figura 46. Como o desenvolvimento da antena para aplicação proposta no presente trabalho é centrada na frequência de 2,45 GHz, optou-se por mostrar os dados obtidos na medição entre 1 GHz e 4,5 GHz, para melhor visualização dos detalhes no gráfico.

Figura 46 – Variação da constante dielétrica em função da frequência.



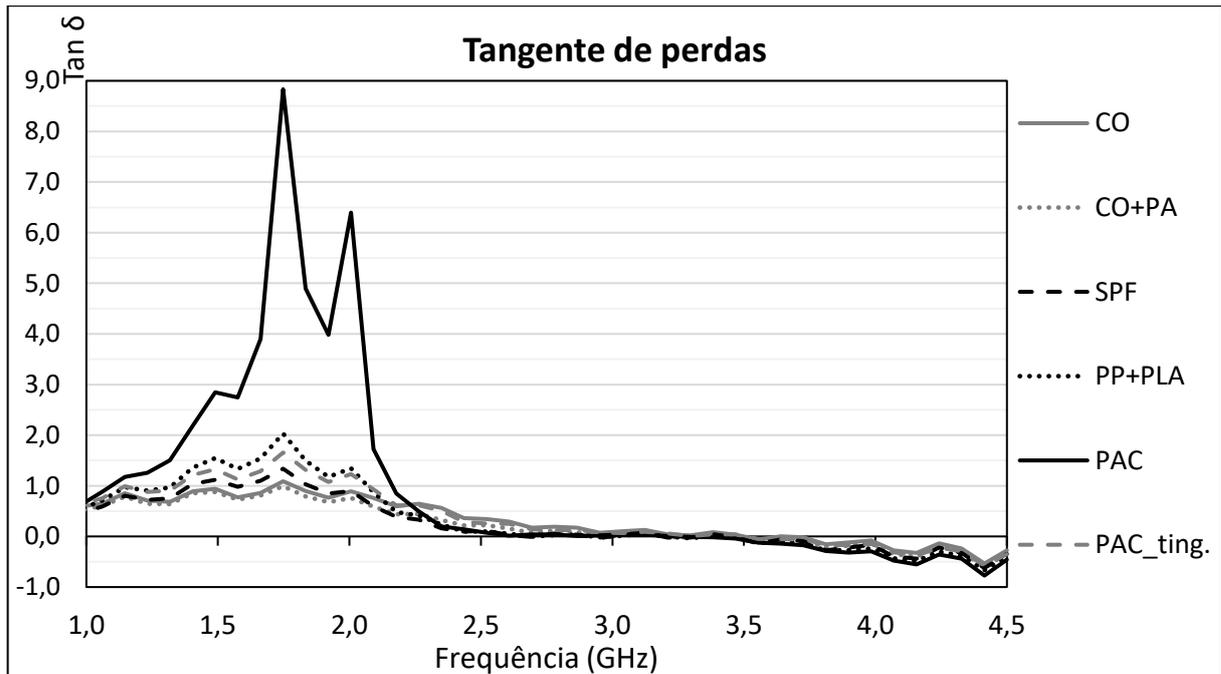
Fonte: autoria própria.

Como mostrado na Figura 46, para a faixa de frequência alvo desse estudo (2,400 GHz-2,4835), as amostras têxteis analisadas apresentaram um comportamento relativamente próximo para o parâmetro de permissividade elétrica. O pico da constante dielétrica ocorre entre, aproximadamente 0,37 GHz e 1,14 GHz.

Com base nos valores medidos das permissividades elétricas foram calculados os respectivos valores para tangentes de perdas, utilizando-se a equação (5), mostrada na seção 2.2.3.5. Obtendo-se os dados necessários para o desenvolvimento do gráfico de tangente de perdas.

Na Figura 47 pode ser observado que o pico da tangente de perdas, ocorre entre aproximadamente 1,23 GHz e 2,01 GHz, desta forma, a frequência de operação escolhida de aproximadamente 2,45 GHz, não possui os valores menos favoráveis para o parâmetro de tangentes de perda nas amostras têxteis analisadas, contudo, para esta mesma faixa de frequência não apresenta a melhor zona da permissividade dielétrica.

Figura 47 – Variação da tangente de perdas em função da frequência.



Fonte: autoria própria.

A amostra do tecido constituído de fibras de acrílico, PAC, apresentou uma zona pico para tangente de perdas consideravelmente maior aos outros tecidos analisados, porém ao se confrontar a mesma zona mostrada na Figura 46, observa-se que o mesmo tecido apresentou uma baixa permissividade elétrica em comparação ao demais tecidos, como para o cálculo da tangente de perdas o parâmetro de permissividade elétrica real constitui num denominador de uma fração, como pode ser visto na equação 5, tal comportamento é justificado uma vez que o para esta faixa de frequência o material manteve uma parcela de permissividade elétrica imaginária relativamente alta.

Na Figura 48, são mostrados os valores de permissividade elétrica real aferidos para a frequência de 2,44 GHz, os tecidos que apresentaram maior parcela real da permissividade elétrica (ϵ') foram Algodão com Poliamida (CO+PA), 100% fibras de Algodão (CO), e o tecido feito à base de fibras de soja, (SPF). Os valores mostrados na Figura 44 são mostrados em formato tabular na Tabela 6.

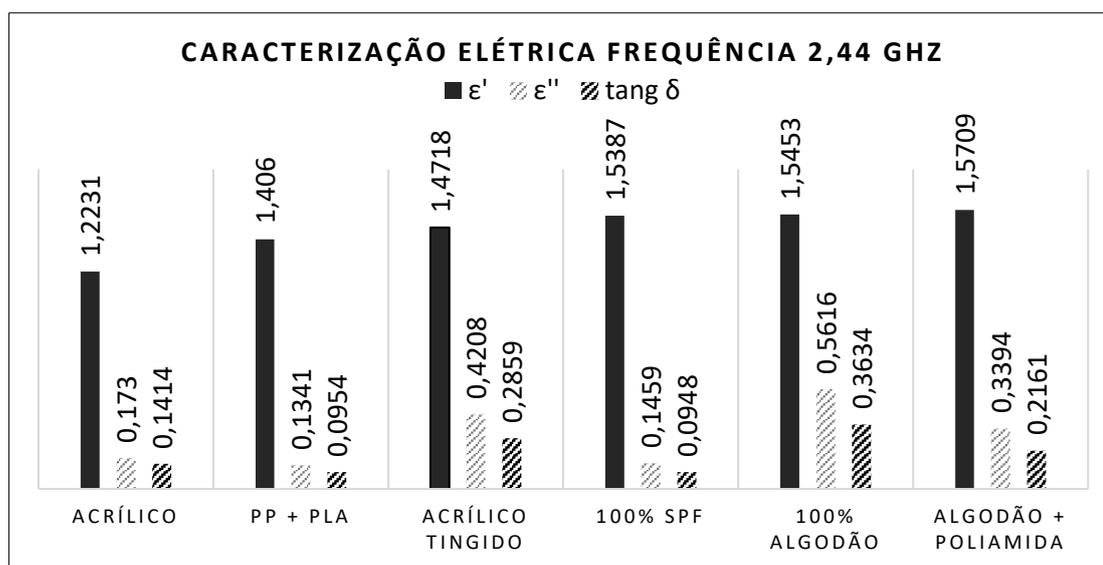
Tabela 5 – Valores de permissividade elétrica e tangente de perdas, para 2,44 GHz.

Tecidos	ϵ'	ϵ''	$\tan \delta$
Acrílico (PAC)	1,2231	0,1730	0,1414
PP + PLA	1,4060	0,1341	0,0954
Acrílico Tingido	1,4718	0,4208	0,2859
100% SPF	1,5387	0,1459	0,0948
100% Algodão (CO)	1,5453	0,5616	0,3634
Algodão + Poliamida (CO+PA)	1,5709	0,3394	0,2161

Fonte: autoria própria.

Na Tabela 5, são mostrados os valores tabulados para permissividade elétrica (real e imaginária, ϵ' e ϵ'') e a tangente de perdas ($\tan \delta$). Com exceção do tecido de SPF, os demais apresentaram tangentes de perdas relativamente altas, dificultando suas aplicações na utilização como substrato de antenas, devido aos valores de tangente de perdas apresentados, alguns dos materiais analisados seriam mais propícios para utilização em estruturas absorvedoras de radiação eletromagnética (BALANIS, 2009).

Figura 48 – Permissividade elétrica real e imaginária e tangente de perdas.



Fonte: autoria própria.

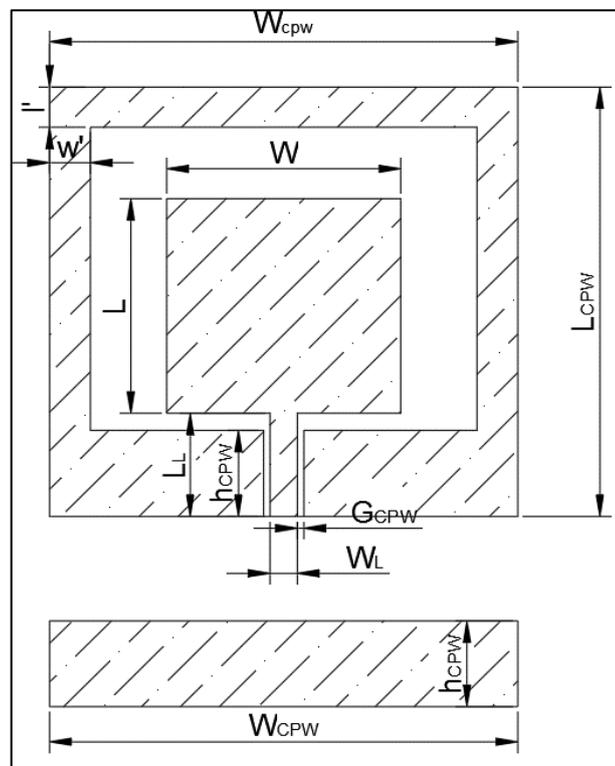
Na Figura 48, pode ser observado que as menores tangentes de perda são dos tecidos constituídos de SPF e PP+PLA, respectivamente, tais resultados mostram uma faixa de valores propícia para aplicação destes materiais como substrato de antenas (BALANIS, 2009). Na seção 4.2 serão mostrados os resultados obtidos com a simulação computacional das antenas construídas com ambos os substratos.

4.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Dadas as análises quanto as características físicas e elétricas dos tecidos estudados, priorizou-se o projeto do protótipo de duas antenas, uma utilizando o tecido a base de fibras derivadas de soja, SPF, mesmo possuindo uma baixa estabilidade dimensional e resistência à tração em comparação aos demais tecidos analisados, a baixa tangente de perdas em relação aos demais materiais observados tornou este tecido interessante para a fabricação de uma antena. Além de permitir uma análise de viabilidade para construção de antenas com materiais têxteis que possuam estes parâmetros físicos com valores relativamente baixos em comparação a outros materiais.

O segundo tecido utilizado para fabricação de uma antena foi o composto por fibras de Polipropileno e Ácido Polilático de Milho, PP+PLA, adição de fibras sintéticas proferiu características físicas e elétricas favoráveis para o teste de uma antena em comparação aos demais materiais têxteis estudados, apresentando um equilíbrio favorável entre as propriedades físicas e elétricas analisadas.

Figura 49 – Dimensões das antenas simuladas.



Fonte: autoria própria.

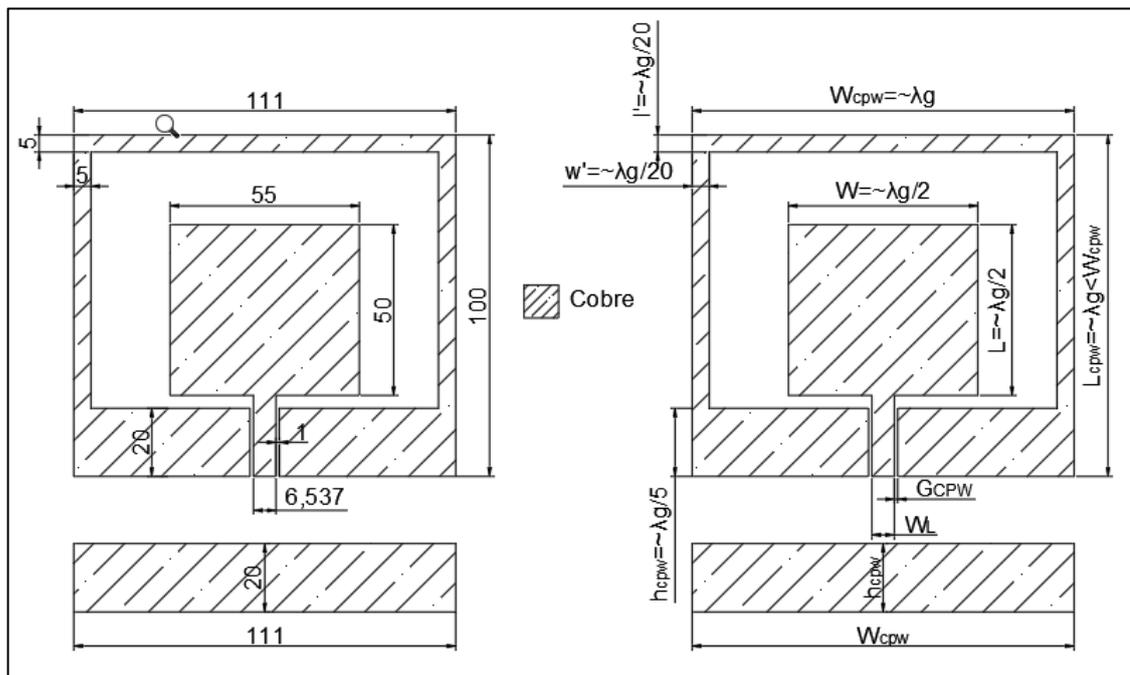
Na Figura 49, são mostrados os parâmetros dimensionais das antenas simuladas, área hachurada representa o material condutor, região em cobre. As variações nas simulações consistiram basicamente na modificação das variáveis G_{CPW} , que representa a distância entre a

linha de alimentação e a estrutura do guia de onda coplanar; e do parâmetro W_L , que representa largura da linha da parte central da linha de transmissão.

4.2.1 Resultados da Simulação da Antena com substrato em SPF

O tecido feito em fibras derivadas de soja é uma malha do tipo Piquet, foi selecionado para simulação do protótipo devido a sua baixa tangente de perdas em relação aos demais tecidos analisados. Devido as suas características construtivas e ao tipo de fibra utilizada apresentou baixos resultados de estabilidade dimensional e resistência à tração. Apesar destas características, inicialmente, serem desfavoráveis, resolveu-se simulá-lo para avaliar sua viabilidade como substrato de antenas, para integração em aplicações em identificação por rádio frequência e em sistemas de *internet* das coisas. Na Figura 50 são mostradas as dimensões da antena em substrato de SPF.

Figura 50 – Dimensões finais da simulação antena SPF (em mm).



Fonte: autoria própria.

A geometria utilizada na simulação segue a indicada na seção 3.3, na Figura 36. Realizou-se os cálculos iniciais das dimensões da antena como expresso na seção 2.3.2, após algumas correções e modificações dimensionais em relação aos cálculos iniciais, obteve-se as dimensões finais das antenas simuladas em SPF (para frequência = 2,45 GHz; $\epsilon' = 1,5387$; tan

$\delta= 0,0948$), como mostrado na Figura 50, todas as dimensões estão em milímetros (mm). Na Tabela 6 são mostradas as dimensões da antena SPF.

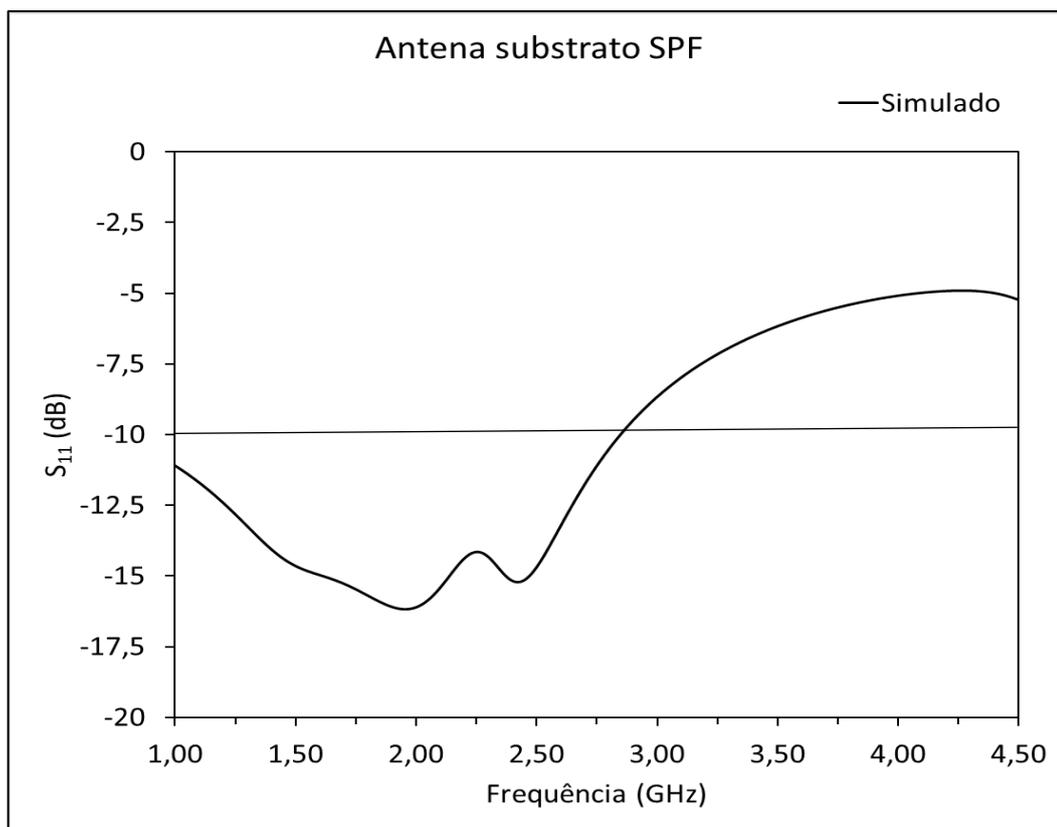
Tabela 6 – Dimensões finais antena SPF.

Parâmetros de dimensão	Dimensão em (mm)
W_{CPW}	111
L_{CPW}	100
W	55
L	50
W'	5
L'	5
W_L	6,537
L_L	21,53
G_{CPW}	1
h_{CPW}	20

Fonte: autoria própria.

Como pode ser observado na Tabela 6, as dimensões finais da antena se mostraram relativamente elevadas dificultando as aplicações em RFID e IOT, porém não inviabilizando a utilização da mesma em tais aplicações, apenas restringindo-as devido suas características dimensionais. Pois, nas simulações realizadas no Ansys HFSS[®], os valores de ganho obtido foram de 2,2557 dB, em comparação, uma antena de microfita simulada com o mesmo substrato em Holanda (2016), apresentou ganho de 1,3252 dB, mesmo com as antenas de microfita, no geral, apresentando um ganho maior que antenas com alimentação CPW, uma vez que o plano de terra nas antenas de microfita auxiliam na reflexão de ondas eletromagnéticas aumentando, naturalmente, o ganho e a diretividade da antena.

Na Figura 51 é mostrado o comportamento obtido para o S_{11} da antena simulada entre a frequência de 1 GHz até 4,5 GHz, esta faixa de frequência foi utilizada devido ser a mesma que foi realizada a medição das propriedades dielétricas do tecido, a antena apresentou uma alta largura de banda, característica intrínseca do tipo de antena utilizada no projeto e simulação, todavia apresentou um comportamento do S_{11} relativamente baixo, contudo, abaixo de -10 dB viabilizando a aplicação da estrutura simulada.

Figura 51 – S_{11} simulado da antena em substrato SPF.

Fonte: autoria própria.

Na Tabela 7, são mostrados os valores do S_{11} para os limites superior e inferior da largura de banda da aplicação de projeto da antena, assim como para a frequência central de projeto em 2,45 GHz.

Tabela 7 – S_{11} simulado para a frequência e largura de banda de projeto da antena SPF.

Frequência (GHz)	S_{11} (dB)
2,4000	-15,3606
2,4500	-15,1964
2,4835	-15,0192

Fonte: autoria própria.

Na Tabela 8 são mostradas a frequência de ressonância que obteve o pico no S_{11} e os limites da largura de banda, ou seja, a região de frequência que em o S_{11} ficou abaixo de -10 dB. O pico da encontrado na simulação foi de -16,9825 dB na frequência de 1,87 GHz, frequência abaixo da frequência de projeto em 2,45 GHz, todavia como visto, a antena ressoou a baixo de -10dB na região de projeto.

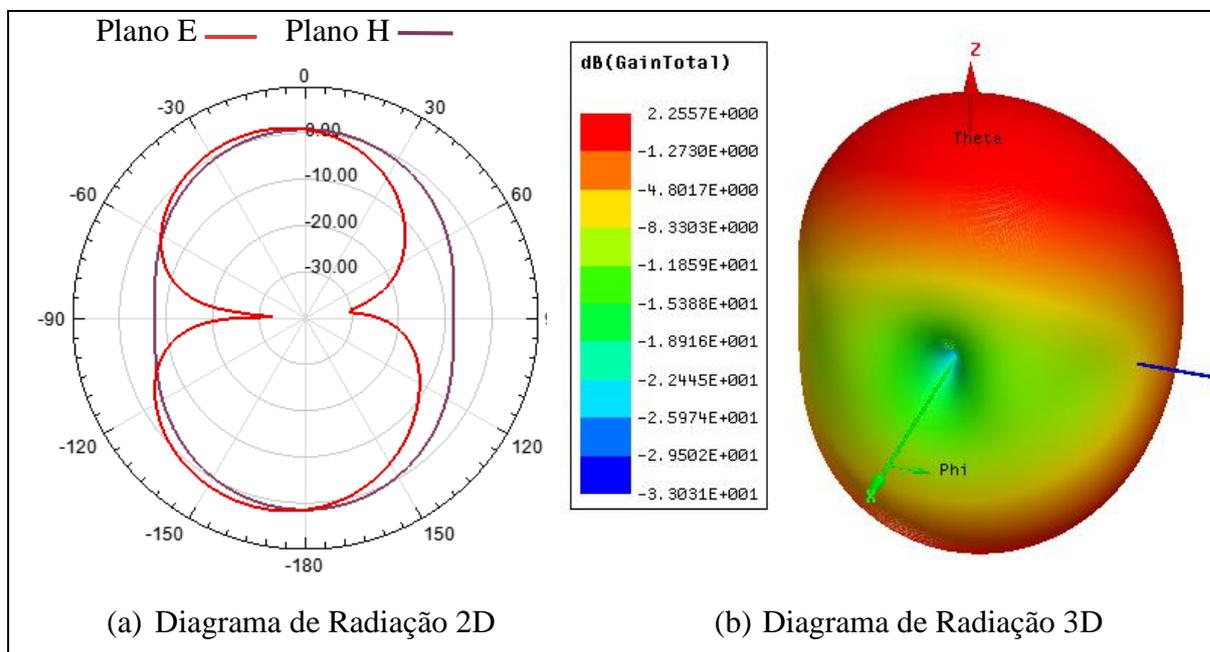
Tabela 8 – Frequência de ressonância e limites de largura de banda para simulação da antena SPF.

Descrição	Frequência (GHz)	S ₁₁ (dB)
Ressonância	1,8700	-16,9825
Limite inferior da largura de banda	1,000	-11,3443
Limite superior da largura de banda	2,8400	-10,0848

Fonte: autoria própria.

Os limites superior e inferior de frequência mostram uma alta largura de banda de aproximadamente de 1,84 GHz, atendendo a largura de banda necessária para aplicação de projeto em frequências ISM, RFID e aplicações em *Internet* das Coisas, IoT e *Internet* das Coisas Industriais, Industrial IoT ou IIoT. A largura de banda obtida pode propiciar flexibilidade para diferentes aplicações da antena e a interoperabilidade destas aplicações, e por se tratar de dispositivos de comunicação por espalhamento espectral não propiciariam interferências em outros serviços desde que os circuitos de geração de sinal sigam os parâmetros estabelecidos por normas e protocolos de comunicação para RFID. O diagrama de radiação da simulação da antena com substrato têxtil à base de SPF é mostrado na Figura 52.

Figura 52 – Diagrama de Radiação da antena com substrato em SPF.

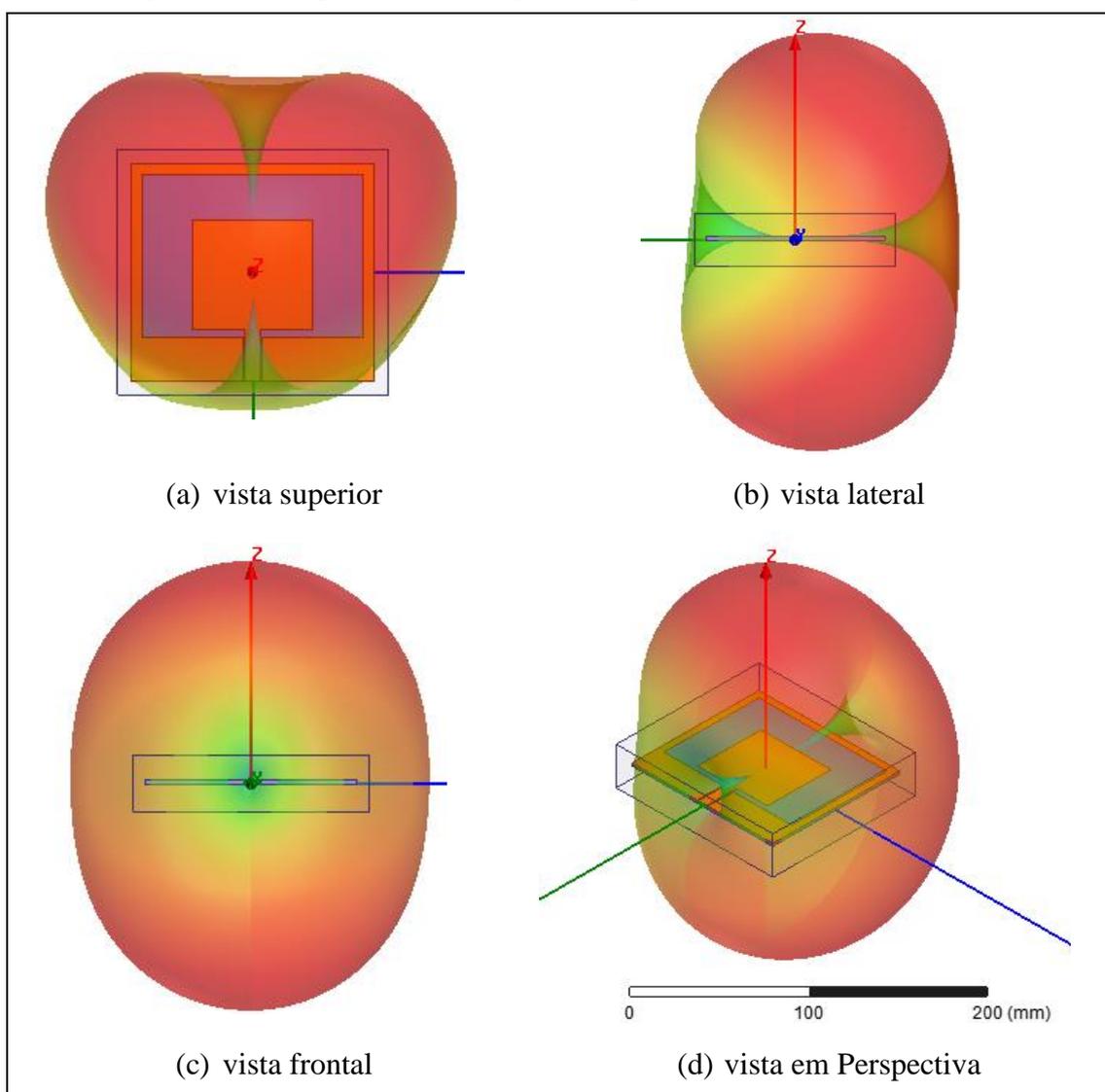


Fonte: autoria própria.

Como pode ser observado na Figura 52, a antena apresentou um comportamento omnidirecional, para aplicação de projeto mantendo um ganho satisfatório, na Figura 52a é mostrado a perspectiva na forma polar dos planos E e H, e na Figura 52b o diagrama de radiação em três dimensões e o valor do ganho em (dB).

Com a utilização de recursos do Ansys HFSS[®], o resultado do diagrama de radiação simulado foi sobreposto em relação a antena, para uma melhor visualização do comportamento desta, como pode ser visto na Figura 53. Para sobreposição foi utilizada uma transparência de 75% e fator de escala unitário, com o intuito de visualizar o comportamento do diagrama de radiação simulado mantendo, visível a proporção e a geometria da antena.

Figura 53 – Diagrama de Radiação sobreposto à Antena SPF simulada.



Fonte: autoria própria.

Na Figura 53, são mostradas diferentes vistas da antena com sobreposição do diagrama de radiação, na Figura 53a é mostrada uma vista superior da antena, onde podem ser observados o *patch*, o guia de onda coplanar e toda a estrutura superior. Em relação ao diagrama de radiação pode ser observado que há uma concentração das ondas radiadas no topo da antena, esta concentração é ocasionada, em parte, pela utilização de um plano de terra parcial na área posterior, inferior da antena, pois, esta estrutura auxilia na reflexão das ondas eletromagnéticas,

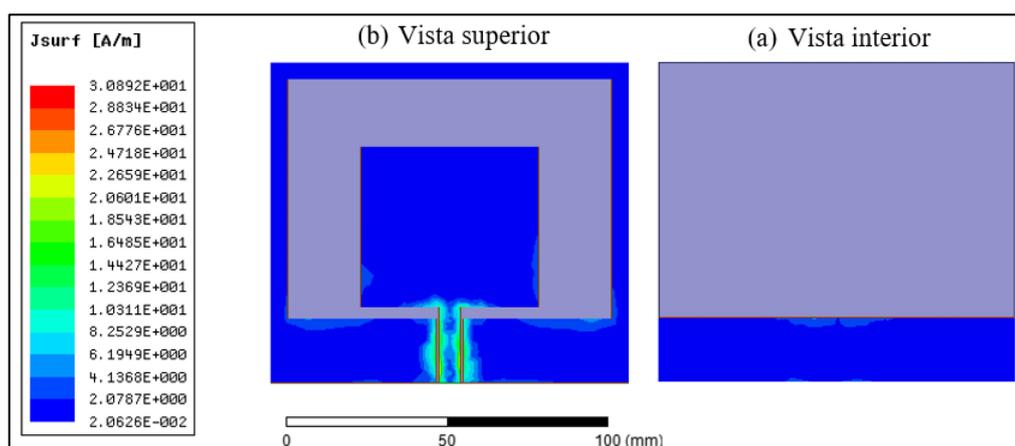
concentrando-as na região superior adjacente, garantindo os resultados de ganho obtidos na simulação.

Nas Figura 53b e Figura 53c, são mostradas as vistas lateral e frontal da antena, respectivamente. Possibilitando uma visualização do comportamento dos planos E e H mostrados no diagrama de radiação na forma polar na Figura 52a. Por fim, na Figura 53d é mostrada uma vista em perspectiva da sobreposição do diagrama de radiação na geometria da antena.

Outra característica importante, viabilizada pela simulação no HFSS[®] é a densidade linear de corrente, pois este parâmetro permite visualizar a forma como o sinal de alimentação da antena se distribui pelas estruturas condutoras da antena, permitindo modificações e melhoramento da estrutura antes da construção da antena. Os resultados de simulação obtidos neste parâmetro são mostrados na Figura 54.

Na Figura 54a, é mostrada a vista superior da antena, onde pode ser visto uma maior concentração da densidade linear de corrente na estrutura da linha de alimentação central do guia de onda coplanar e nas laterais adjacentes a linha, as demais regiões apresentam uma distribuição relativamente uniforme, porém com concentrações mostradas nas extremidades laterais e inferiores do *patch*, e em parte da região do guia de onda coplanar próxima ao *patch*. Na Figura 54b é mostrada a densidade linear de corrente no plano de terra da antena, onde pode ser vista uma distribuição uniforme, porém com concentrações na parte superior central desta estrutura.

Figura 54 – Densidade de corrente nas estruturas condutoras da antena de substrato SPF.



Fonte: autoria própria.

Outro parâmetro analisado na simulação foi o S_{11} , também destacado na literatura técnica como Coeficiente de Reflexão da antena ou como Perda de Retorno como representado em Módulo. Os resultados obtidos na simulação podem ser vistos na Figura 51.

Além dos parâmetros do diagrama de radiação, densidade de corrente e S_{11} , foram analisados na simulação os valores de impedância, como mostrado na Tabela 9, para frequência central de projeto, 2,45 GHz, para a largura de banda da aplicação, de 2,4GHz à 2,4835GHz e para a frequência de 1,87 GHz, que apresentou, em módulo, a maior potência em dB no S_{11} .

Tabela 9 – Impedância das frequências de projeto da antena SPF Simulada.

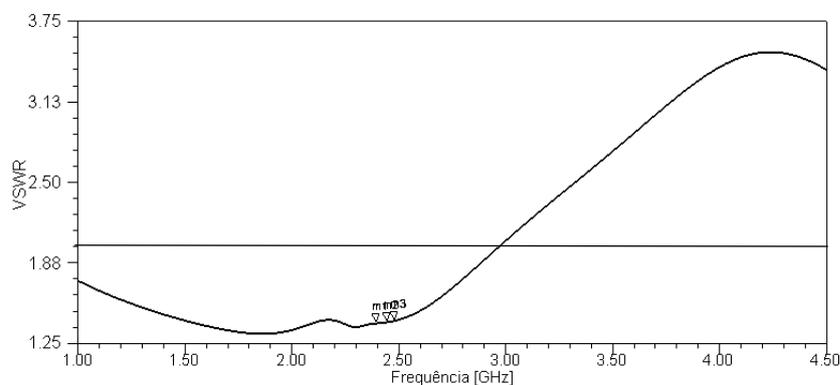
Frequência (GHz)	Ang	Mag	Rx
2,4000	-51,8066	0,1706	1,1867 – j0,3278
2,4500	-57,0600	0,1739	1,1529 – j0,3469
2,4835	-59,7041	0,1770	1,1359 – j0,3584
1,8700	127,0352	0,1415	0,8231 – j0,1898

Fonte: autoria própria.

Na Tabela 9 são mostrados os valores de impedância obtidos no HFSS[®], tais valores são utilizados apenas como referência para análise, pois características de construção da antena podem influenciar significativamente os resultados efetivamente medidos em uma antena construída. Todavia, como pode ser observado, na coluna Rx da Tabela 9, as frequências destacadas apresentaram um comportamento de impedância padronizada relativamente próximos a 50 Ω (ohms) e com valores da parcela imaginária da impedância relativamente baixos.

Outro parâmetro avaliado na simulação foi o VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*), em outras palavras a taxa de amplitude máxima de tensão sobre a amplitude de tensão mínima. Na Figura 55 é mostrado o gráfico do comportamento de VSWR simulado no HFSS[®] e na Tabela 10 são mostrados os valores de VSWR para as frequências destacadas.

Figura 55 – Gráfico VSWR da antena SPF Simulada.



Fonte: autoria própria.

Na Figura 55 é mostrado um VSWR com uma ampla área onde este parâmetro se encontra com valor abaixo de 2 (dois), os valores exatos da simulação dos pontos marcados m1, m2 e m3 são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores de VSWR para Frequência e largura de banda de projeto antenna SPF.

Ponto	Frequência (GHz)	VSWR
m1	2,4000	1,4114
m2	2,4500	1,4209
m3	2,4835	1,4314

Fonte: autoria própria.

Os pontos destacados na Tabela 10, mostram que para frequência central de projeto da antenna (m2) e para a largura de banda designada para a aplicação de projeto da antenna (m1 e m3) os valores de VSWR ficaram entre 1,4 e 1,45, valores satisfatórios para simulação. Mas, vale ressaltar que parâmetros como impedância através da carta de Smith e VSWR em termos de simulação são utilizados como referência para o desenvolvimento e projeto de antenas, pois estes fatores são influenciados na construção final da antenna.

Com base nos resultados simulados, foi construída a antenna com substrato em material derivado de soja SPF e foi realizada a medição de propriedades como o S_{11} e a impedância através da Carta de Smith como são mostrados na seção 4.3.1. Com base nos resultados de simulação encontrados para antenna SPF, as especificações dimensionais da geometria utilizada foram aprimoradas para utilização em um tecido com maior estabilidade dimensional, o tecido utilizado foi o PP+PLA, como é mostrado na seção 4.2.2.

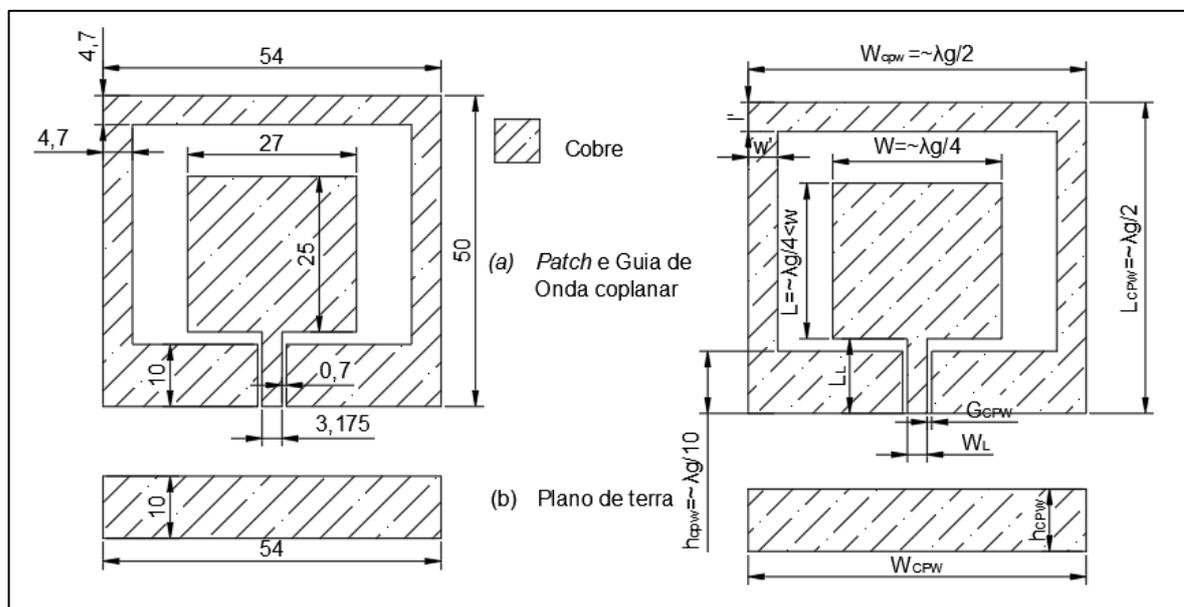
4.2.2 Resultados da Simulação da Antena com Substrato em PP+PLA

Como mostrado na seção 4.2.1, os resultados de simulação obtidos para a antenna em substrato em SPF, foram satisfatórios viabilizando a construção da antenna, todavia a principal restrição encontrada foi o tamanho da antenna, característica essa que não inviabiliza a aplicação da antenna projetada, mas pode restringir para futuras aplicações reais da antenna. Desta forma, utilizando outro tipo de tecido, aprimorou-se as dimensões da antenna, conseguindo estrutura com dimensões consideravelmente menores.

No desenvolvimento da antenna em SPF, a dimensão da lateral superior do *patch* da antenna foi considerada a dimensão de aproximadamente: $\lambda_g/2$, ou seja, aproximadamente uma metade do comprimento de onda no substrato para o desenvolvimento da antenna *patch* retangular CPW. Para a antenna projetada utilizando como substrato o tecido composto por fibras de PP+PLA, foi utilizada a dimensão de aproximadamente: $\lambda_g/4$, ou seja, por volta de um quarto

do comprimento de onda no substrato da antena. As dimensões finais da antena simulada são mostradas na Figura 56.

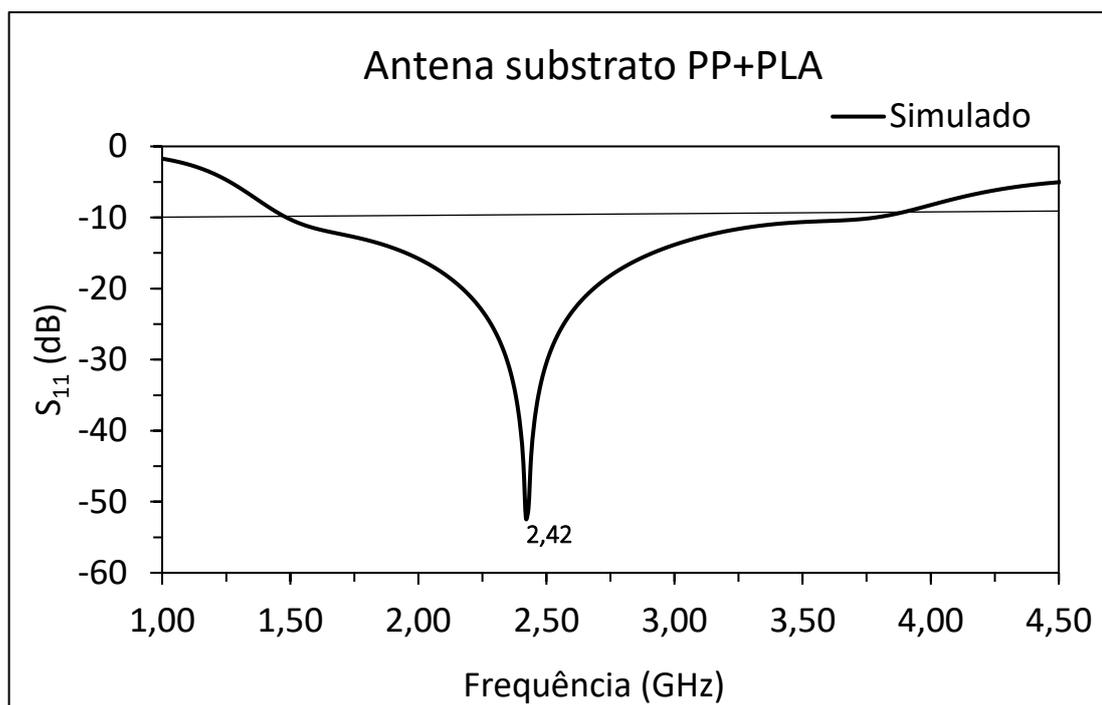
Figura 56 – Dimensões finais da simulação antena PP+PLA (em mm).



Fonte: autoria própria.

Na Figura 56a, é mostrada a vista superior da estrutura da antena onde são mostradas o *patch* e a o guia de onda coplanar, a área em hachuras representa o material condutor utilizado na simulação e posterior fabricação da antena, em cobre. Na Figura 56b, são mostradas as dimensões utilizadas no plano de terra parcial da parte posterior da antena. Todas dimensões mostradas são em milímetros (mm).

Comparando-se as dimensões finais das antenas em substrato em tecido à base de SPF (Fibras de Proteína de Soja) com a antena em substrato com tecido de malha de PP+PLA (Polipropileno e Ácido Polilático de Milho) é possível perceber que a antena desenvolvida para o substrato em PP+PLA (para frequência = 2,45 GHz; $\epsilon' = 1,4060$; $\tan \delta = 0,0954$) é consideravelmente menor, devido a técnica de se reduzir o comprimento de onda para frequência central de projeto de um quarto de onda guiada no substrato. O resultado da simulação para o parâmetro de S_{11} para tais dimensões e geometria de antena é mostrado na Figura 57.

Figura 57 – S_{11} simulado da antena em substrato PP+PLA.

Fonte: autoria própria.

Como mostrado na Figura 57, a antena simulada apresentou uma considerável largura de banda, característica intrínseca de antenas com guia de onda coplanar, os resultados obtidos para a largura de banda da aplicação em identificação por rádio frequência e para a frequência central de projeto são mostradas na Tabela 11.

Tabela 11 – S_{11} simulado para a frequência e largura de banda de projeto da antena PP+PLA.

Frequência (GHz)	S_{11} (dB)
2,4000	-40,2167
2,4500	-39,7088
2,4835	-32,6308

Fonte: autoria própria.

Como pode ser observado na Tabela 11, os valores obtidos na simulação para o S_{11} das frequências da aplicação RFID ficaram bem abaixo de -10 dB, permitindo da utilização da antena projetada na finalidade de projeto desta. Os valores da frequência de pico do S_{11} e os limites superior e inferior da largura de banda obtidos na simulação são mostrados na Tabela 12.

Tabela 12 – Frequência de ressonância e limites de largura de banda para simulação da antena PP+PLA.

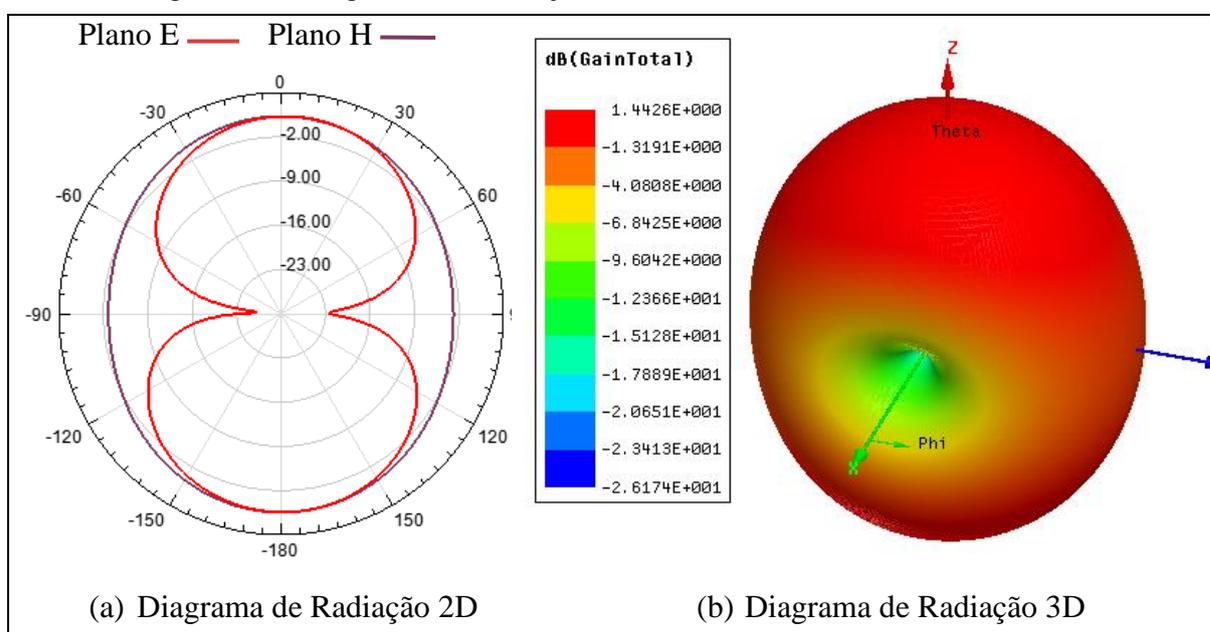
Descrição	Frequência (GHz)	S_{11} (dB)
Ressonância	2,4200	-52,4407

Descrição	Frequência (GHz)	S ₁₁ (dB)
Limite inferior da largura de banda	1,4900	-10,0259
Limite superior da largura de banda	3,7800	-10,0931

Fonte: autoria própria.

Como é mostrado na Tabela 12, pico do gráfico S₁₁ foi para a frequência de 2,42 GHz com -52,4407 dB, dentro da faixa de utilização de serviços em RFID, os limites de frequência para a largura de banda abaixo de -10 dB são de 1,49 GHz a 3,78 GHz, conferindo a antena além da viabilidade de utilização em RFID, flexibilidade para possíveis outras aplicações. Outros parâmetros da antena avaliados na simulação foram o diagrama de radiação e o ganho que são mostrados na Figura 58.

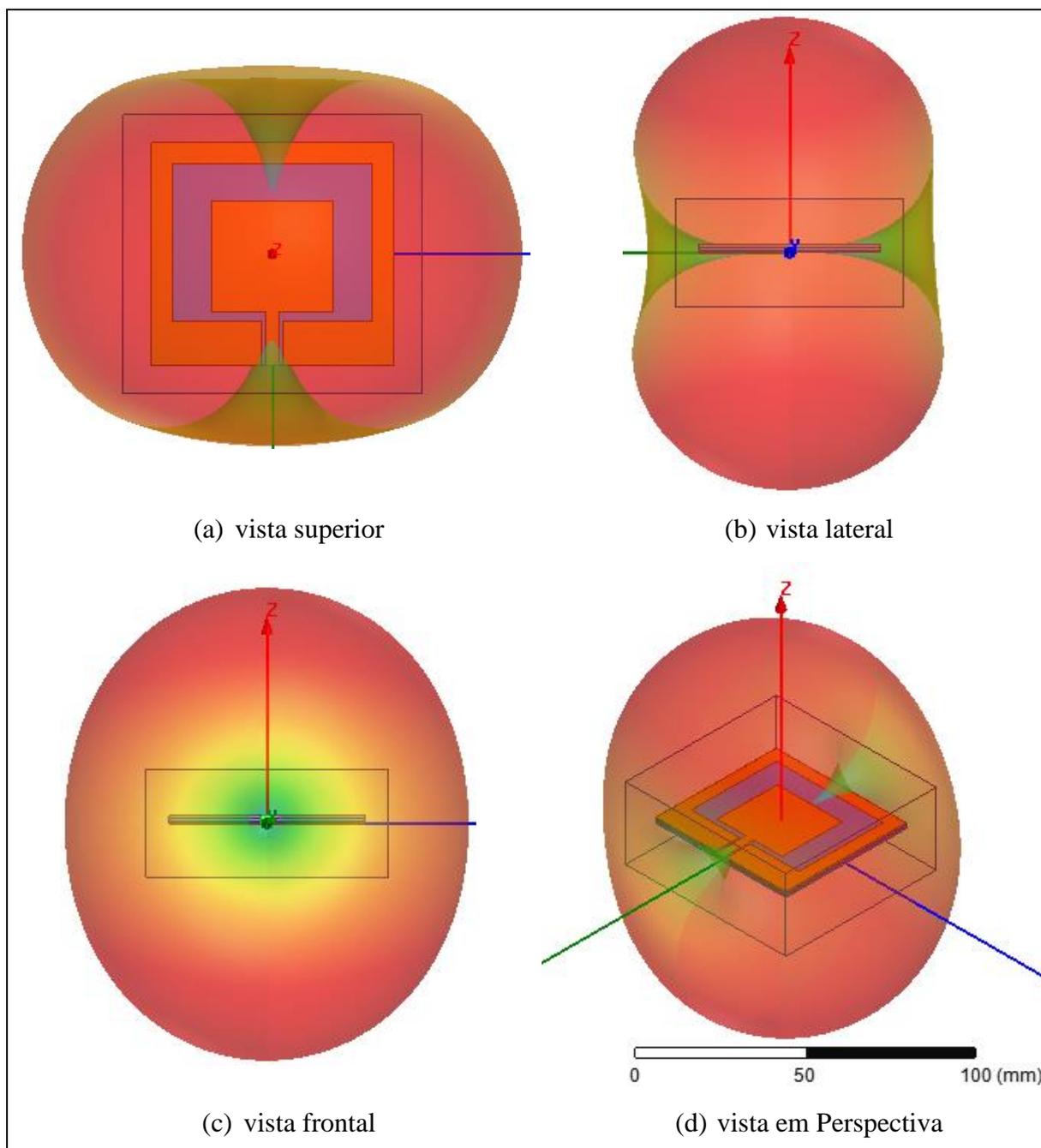
Figura 58 – Diagrama de Radiação da antena com substrato em PP+PLA.



Fonte: autoria própria.

Na Figura 58a é mostrado o diagrama de radiação na forma polar com a sobreposição dos planos do campo elétrico (plano E) e plano do campo magnético (plano H). Na Figura 58b, é mostrado o diagrama de radiação em três dimensões com os respectivos ganhos para as zonas do gráfico de acordo com a coloração apresentada, obtendo-se um ganho de 1,4426 dB, valor satisfatório para o tipo de utilização de projeto, porém menor quando comparado a antena com dimensões maiores construídas em substrato de SPF descrita na seção 4.2.1, tal comportamento é esperado uma vez que há uma área menor feita de material condutor. Na Figura 59, são mostradas diferentes vistas do diagrama de radiação com sobreposição na antena.

Figura 59 – Diagrama de Radiação sobreposto à Antena PP+PLA simulada.



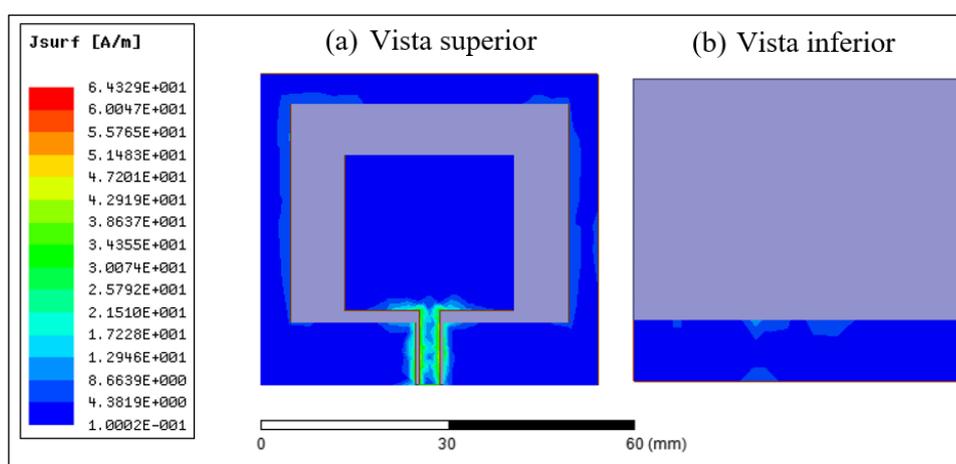
Fonte: autoria própria.

Na Figura 59a é mostrada a vista superior da antena onde pode ser observado o *patch* e o guia de onda coplanar com a sobreposição do diagrama de radiação com as propriedades de exibição definidas com HFSS[®] de transparência em 75% e fator de escala unitário, comprando-se com a Figura 53a, é possível perceber uma geometria mais uniforme, sem grande reflexões causadas na área do guia de onda coplanar com o plano de terra parcial, presente na parte posterior-inferior da antena. Isso ocorre devido à dimensão reduzida da antena com substrato em PP+PLA, a menor quantidade de material condutor, cobre, faz com que haja um menor grau

de reflexão de ondas eletromagnéticas, mantendo o padrão de radiação mais difuso, porém reduzindo o ganho em relação a antena construída com substrato em SPF.

Na Figura 59b e Figura 59c, são mostradas as vistas lateral e frontal, respectivamente, a sobreposição destas duas vistas em um diagrama na forma polar gera o gráfico mostrado na Figura 58a. Na Figura 59d é mostrada a visão em perspectiva da sobreposição do diagrama de radiação na antena simulada, como pode ser observado o diagrama apresentou um comportamento omnidirecional, importante para aplicação prevista em RFID. Na Figura 60 é mostrada a Densidade Linear de Corrente para as estruturas condutoras da antena.

Figura 60 – Densidade de corrente nas estruturas condutoras da antena de substrato PP+PLA.



Fonte: autoria própria.

Na Figura 60a, é indicado o comportamento da densidade linear de corrente do *patch* e do guia de onda coplanar, em uma vista superior da antena, pode ser observado uma concentração nas áreas da linha de alimentação e nas laterais da estrutura CPW, sendo o *gap* do guia de onda coplanar, ou seja, a distância da lateral do CPW e da linha de alimentação da antena, uma das importantes características deste tipo de antena, pois influencia na concentração da densidade linear de corrente e consequentemente na forma como este parâmetro vai se dispor ao longo de toda a antena (SIMONS, 2001).

Na Figura 60b, a partir da vista da porção inferior da antena, pode ser observada uma distribuição de densidade linear de corrente relativamente uniforme, com concentrações na parte superior do plano de terra. Contudo, de forma geral, em ambas as vistas da antena, pode-se perceber uma distribuição relativamente uniforme de densidade de corrente.

Além dos parâmetros de S_{11} , ganho, diagrama de radiação e densidade linear de corrente, na simulação da antena em substrato de PP+PLA, assim como na antena SPF, foram avaliados a impedância através da carta de Smith, fornecida pela simulação do HFSS[®] e o VSWR da antena simulada para fins de referência para avaliação do desempenho global da antena, uma

vez que tais fatores podem ser significativamente influenciados por condições e materiais de construção da antena. Na Tabela 13 são mostrados os valores obtidos de impedância para a frequência de projeto, para as frequências limite da largura de banda para aplicação em RFID e para frequência de ressonância de maior valor de S_{11} .

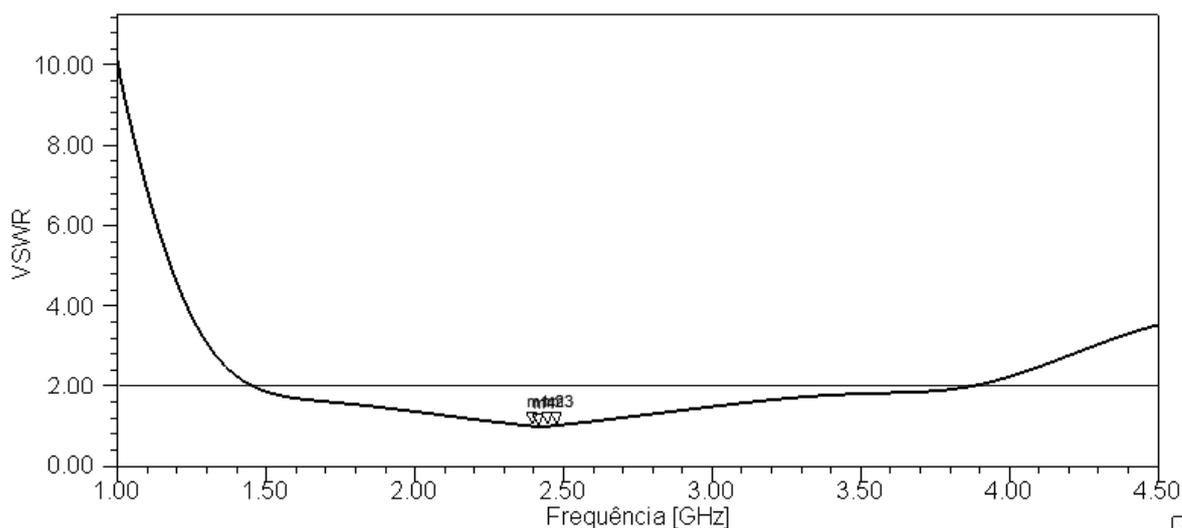
Tabela 13 – Impedância das frequências de projeto da antena PP+PLA Simulada.

Frequência (GHz)	Ang	Mag	Rx
2,4000	-56,0232	0,0098	1,0108 – j0,0164
2,4500	100,5259	0,0103	0,0996 + j0,0203
2,4835	103,3826	0,0221	0,9889 + j0,0425
2,4200	-21,9036	0,0024	1,004 – j0,0018

Fonte: autoria própria.

Como apresentado na Tabela 13, a impedância da antena simulada se mostrou bastante próxima de 50Ω , pois como mostra na coluna (Rx) os valores da parcela real da impedância estão bem próximos de 1 (um) para as frequências analisadas e possuem uma pequena parcela imaginária, sugerindo uma impedância satisfatória para estrutura simulada. Na Figura 61, são mostrados os valores de VSWR para as mesmas frequências que tiveram os valores de impedância analisados.

Figura 61 – Gráfico VSWR da antena PP+PLA Simulada



Fonte: autoria própria.

Na Figura 61, pode ser observado uma ampla região do gráfico com valores de VSWR inferiores a 2 (dois), ou seja, com valores relativamente satisfatórios em termos de referência para o desempenho da antena. Os pontos listados como m1, m2, m3 e m4, são bastante próximos, interferindo na leitura do gráfico, desta forma é mostrado na Tabela 14 os valores de VSWR para estes pontos.

Tabela 14 – Valores de VSWR para Frequência e largura de banda de projeto antena PP+PLA.

Ponto	Frequência (GHz)	VSWR
m1	2,4000	1,4114
m2	2,4500	1,4209
m3	2,4835	1,4314
m4	2,4200	1,0048

Fonte: autoria própria.

Na Tabela 14, o ponto m1 representa o a frequência do limite inferior da faixa de frequência RFID, m2 a frequência de projeto, m3 o limite superior da faixa espectral para RFID e m4 a frequência de ressonância principal na antena simulada, como pode ser observado, todos os valores de VSWR apresentados estão abaixo de 2 (dois).

Como os parâmetros avaliados na simulação se mostraram satisfatórios, produziu-se um protótipo da antena PP+PLA simulado e posteriormente realizou-se a medição de alguns desses parâmetros das antenas construídas, conforme é detalhado na seção 4.3.2.

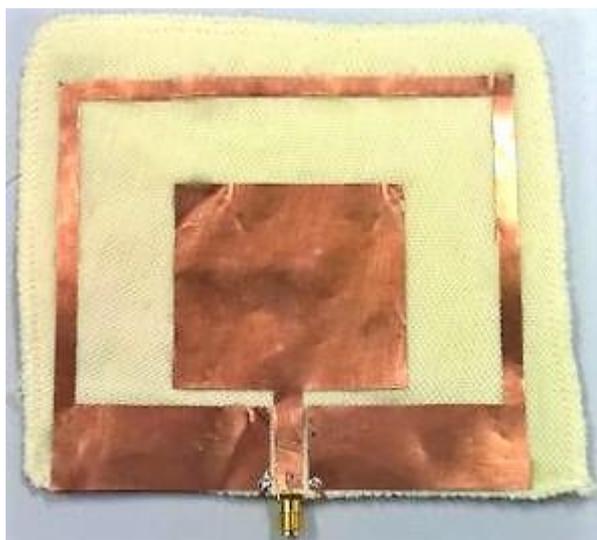
4.3 MEDIÇÃO DAS ANTENAS

A partir dos resultados obtidos com as simulações mostradas na seção 4.2, foram construídas duas antenas, cada uma seguindo suas respectivas especificações. As medições foram realizadas no Laboratório de Medidas em Micro-ondas do IFPB, utilizando o Analisador de Redes Vetoriais (ARV) da fabricante Agilent Technologies, modelo E5071C-2K5. Nas seções 4.3.1e 4.3.2 são mostrados os procedimentos e resultados obtidos da medição da antena em substrato SPF e PP+PLA, respectivamente.

4.3.1 Resultado medição antena substrato em SPF

Seguindo-se os procedimentos descritos na seção 3.4, realizou-se a construção da antena em substrato de SPF, na Figura 62 é mostrada a antena SPF construída, já com o conector SMA-KE montado na estrutura de alimentação, pronta para o processo de medição. Foram medidos os parâmetros de S_{11} e a carta de Smith para análise da impedância da antena.

Figura 62 – Antena SPF Construída.



Fonte: autoria própria.

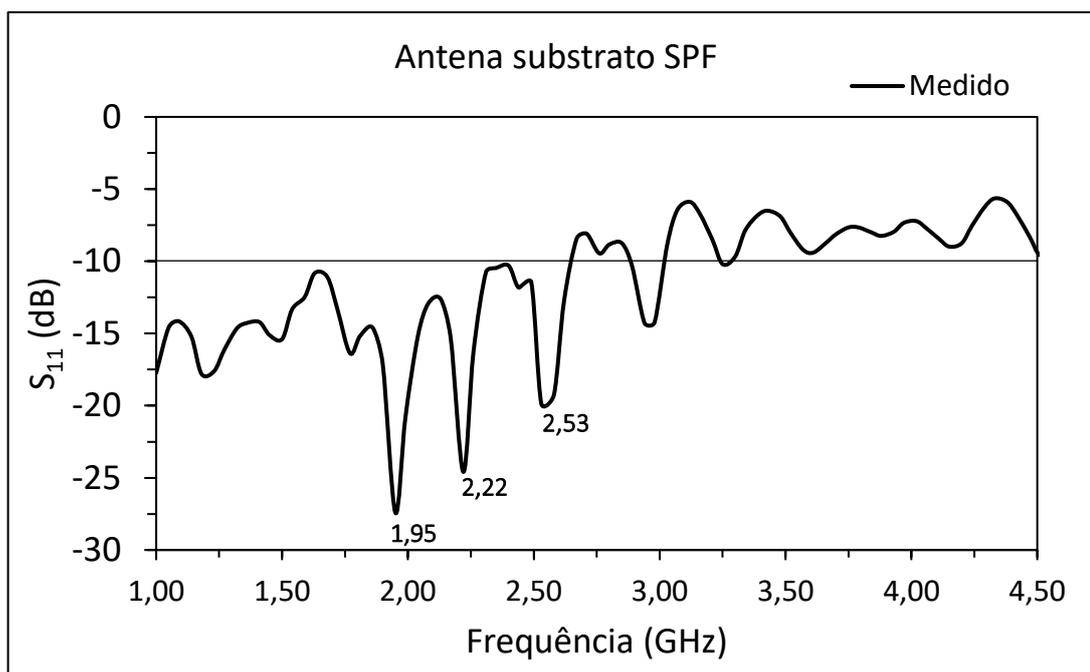
Como pode ser observado na Figura 62, a antena SPF foi construída em uma amostra de tecido um pouco maior que as dimensões finais da antena, definidas através de simulações no Ansys HFSS[®], tal procedimento foi realizado com intuito de facilitar a construção da antena não interferindo com o resultado final da mesma. Devido a flexibilidade do substrato, a antena foi colocada em suporte de acrílico, para se efetuar as medições, como mostrado na Figura 63.

Figura 63 – Procedimento de medição no ARV da antena SPF.



Fonte: autoria própria.

Após a fixação da antena SPF no suporte, como mostrado na Figura 63, efetuou-se o procedimento de medição do S_{11} , obtendo-se os valores mostrados na Figura 64. A medição do S_{11} foi realizada entre as frequências de 1 GHz à 10 GHz, todavia, para manter o padrão de exibição das figuras no presente trabalho, será mostrada da frequência de 1 GHz à 4,5 GHz, mesmas frequências as quais os tecidos testados foram caracterizados.

Figura 64 – S_{11} medido da antena em substrato SPF.

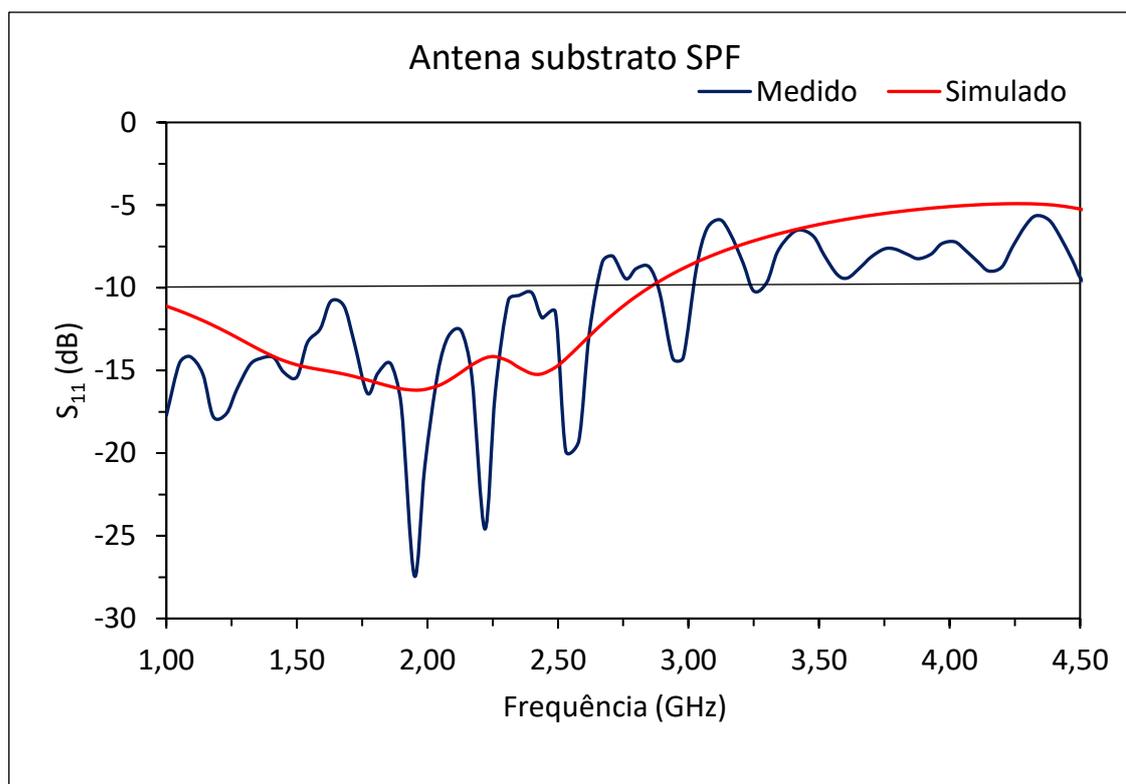
Fonte: autoria própria.

Na Figura 64 é mostrado o comportamento da antena com substrato têxtil em fibras SPF, a antena apresentou uma relativamente alta largura de banda com uma série de frequências apresentando maiores intensidades de S_{11} , ressoando desde a frequência inicial de 1 GHz (-17,7313 dB) até cerca de 2,98 GHz.

A frequência de ressonância da antena com maior pico de S_{11} foi em 1,95 GHz (-27,4129 dB) seguida por 2,22 GHz (-24,5894 dB) e 2,53 GHz (-19,8727). Para a frequência central de projeto, 2,45 GHz, obteve-se o valor de -11,8259 dB, ou seja, a antena apresentou um S_{11} abaixo de -10 dB, permitindo a utilização desta em sistemas de Identificação por Rádio Frequência, RFID, toda a faixa de frequência para esta aplicação, entre 2,4GHz e 2,4835 GHz, apresentaram um comportamento abaixo de -10dB, todavia não foram as frequências que apresentaram o melhor desempenho de S_{11} , contudo, tal fato, não inviabiliza a utilização da antena construída.

Na Figura 65 é mostrada a sobreposição dos gráficos de S_{11} para os valores medidos pelo ARV e para os resultados obtidos através de simulação no Ansys HFSS[®]. Como pode ser observado, os gráficos apresentaram um comportamento distinto, principalmente no que tange a localização das áreas de maior intensidade de S_{11} nas frequências de ressonância. Entretanto pode ser observada um comportamento similar no decorrer dos valores apresentados, sendo que o os valores medidos mostraram um maior valor de S_{11} que os valores simulados.

Figura 65 – Comparação entre os valores de S_{11} medido e simulado da antena SPF.



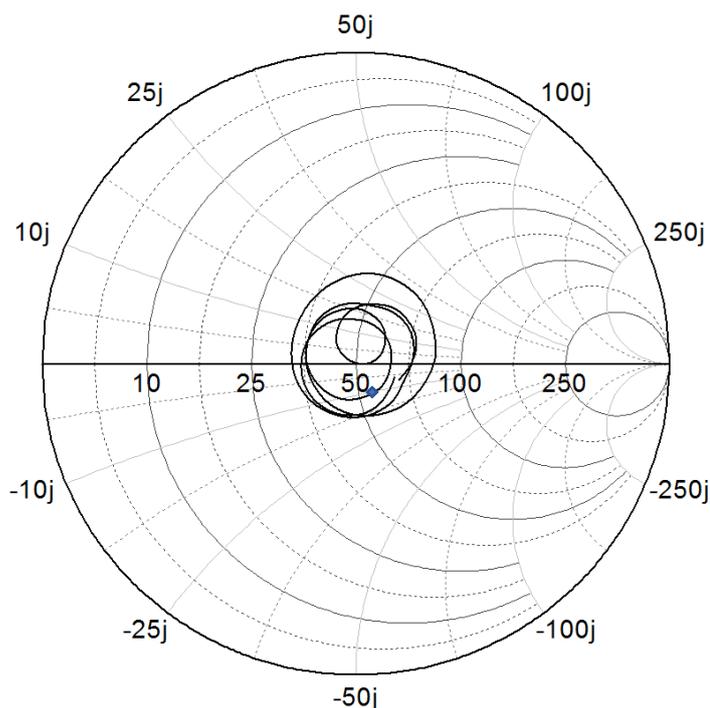
Fonte: autoria própria.

A disparidade entre os resultados medidos e simulados mostrados na Figura 65, pode ser explicada pelo fato da simulação no Ansys HFSS[®] considerar o material do substrato como uniforme e isotrópico. Contudo, tecidos de malha apresentam uma série de porosidades e espaços vazios os quais podem interferir significativamente nos valores finais da medição. Outro fator que pode ter influenciado é a utilização de adesivo líquido de cianoacrilato de etila para fixação do cobre no substrato, pois o material pode se impregnar nas fibras têxteis e preencher os espaços entre os elementos de curso e coluna do tecido.

Além do S_{11} foi realizada medição da impedância da antena mostrada por meio da carta de Smith expressa na Figura 66 para as frequências de 1 GHz à 4,5 GHz, mantendo-se o padrão de exibição dos dados do presente trabalho.

Conforme pode ser observado na Figura 66, há uma concentração das impedâncias medidas no centro da carta de Smith o que representa um bom casamento de impedância da antena construída, pois indica que os valores medidos estão próximos a 50Ω (cinquenta ohms), tais resultados corroboram na indicação de que parâmetros dimensionais de projeto foram satisfatórios, assim como a execução das técnicas para fabricação da antena. Para a frequência de projeto da antena 2,45 GHz a impedância medida foi de aproximadamente $46,6816 - j17,0024$, de acordo com ponto mostrado na Figura 66, mostrando um valor satisfatório.

Figura 66 – Carta de Smith medida da antena SPF.



Fonte: autoria própria.

Com a medição do S_{11} e da impedância da antena através do Analisador de Redes Vetoriais, os resultados encontrados corroboram para viabilidade da utilização da antena construída para a finalidade concebida em projeto.

4.3.2 Resultado medição antena substrato em PP+PLA

Utilizando-se dos mesmos procedimentos empregados na construção da antena com substrato em fibras de SPF, foi realizada a construção da antena com substrato em PP+PLA, todavia com as modificações descritas na seção 4.2.2.

Na Figura 67 é mostrada uma vista superior da antena PP+PLA, as dimensões utilizadas no substrato são as mesmas da antena SPF, com o intuito de mostrar a diferença de dimensões entre ambas. Na simulação realizada no Ansys HFSS[®] foi colocado um substrato com apenas as dimensões da antena, como mostrado na seção 4.2.2, todavia este fator não influencia nos resultados de simulação como descreve o guia de usuário do *software*. Na Figura 68 é mostrado o procedimento de medição no Analisador de Rede Vetoriais para antena PP+PLA.

Figura 67 – Antena PP+PLA construída.



Fonte: autoria própria.

Como mostrado na Figura 68 o procedimento de medição foi o mesmo da antena SPF, com a fixação da antena PP+PLA em suporte de acrílico na vertical e realização dos procedimentos de medição do S_{11} e da impedância no ARV.

Figura 68 – Procedimento medição no ARV da antena PP+PLA.



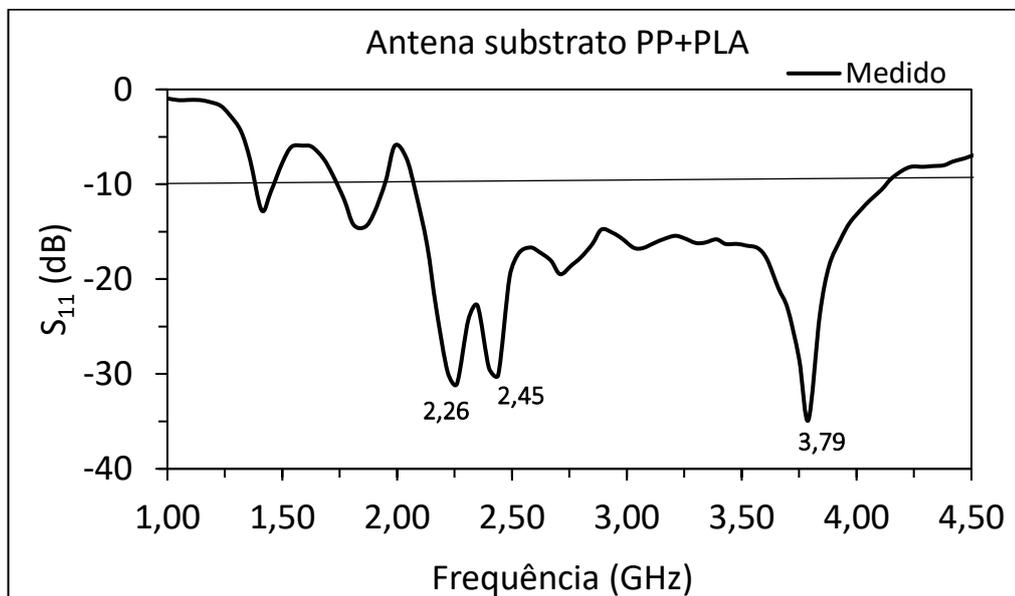
Fonte: autoria própria.

Na Figura 69 são mostrados os valores do S_{11} medidos para antena em substrato feito de fibras de PP+PLA. Como pode ser observado, a antena apresentou uma considerável largura de banda e várias frequências com picos de S_{11} , o primeiro deles em 1,41 GHz com -12,7447 dB, o pico seguinte aparece na frequência de 1,86 GHz com aproximadamente -14,4943 dB, com a maior região de ressonância abaixo de -10 dB indo de aproximadamente 2,08 GHz à 4,11 GHz, apresentando uma largura de banda superior a antena simulada, como detalhado na seção 4.2.2.

Como mostrado na Figura 69, o S_{11} medido da antena PP+PLA apresentou pico em 3 (três) frequências principais, dentro da região de frequência de 2,08 GHz à 4,11 GHz, o primeiro

pico é em 2,21 GHz com aproximadamente -31,0565 dB, o segundo em 2,44 GHz com -30,1173 e o maior foi na frequência de 3,79 GHz com aproximadamente -34,8723 dB. Toda a faixa de frequência para utilização em RFID (2,4 GHz à 2,4835 GHz) ficou abaixo de -10 dB.

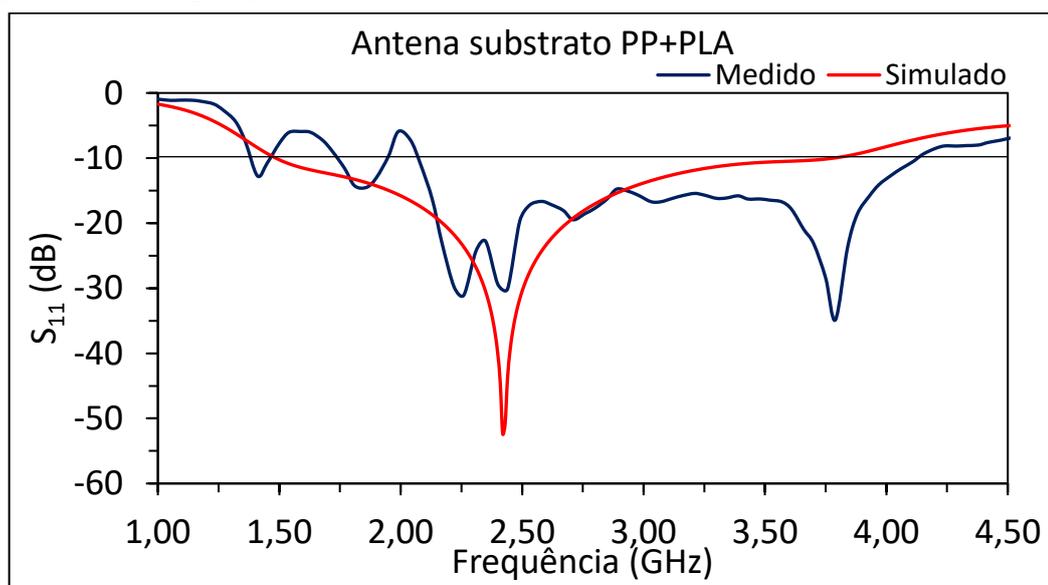
Figura 69 – S_{11} medido da antena em substrato PP+PLA.



Fonte: autoria própria.

Na Figura 70 é mostrada a sobreposição do S_{11} medido com o simulado no HFSS®, seguindo o ocorrido com a antena com substrato em SPF, há uma perceptível disparidade entre os comportamentos de ambos os gráficos.

Figura 70 – Comparação entra os valores de S_{11} medido e simulado da antena PP+PLA.



Fonte: autoria própria.

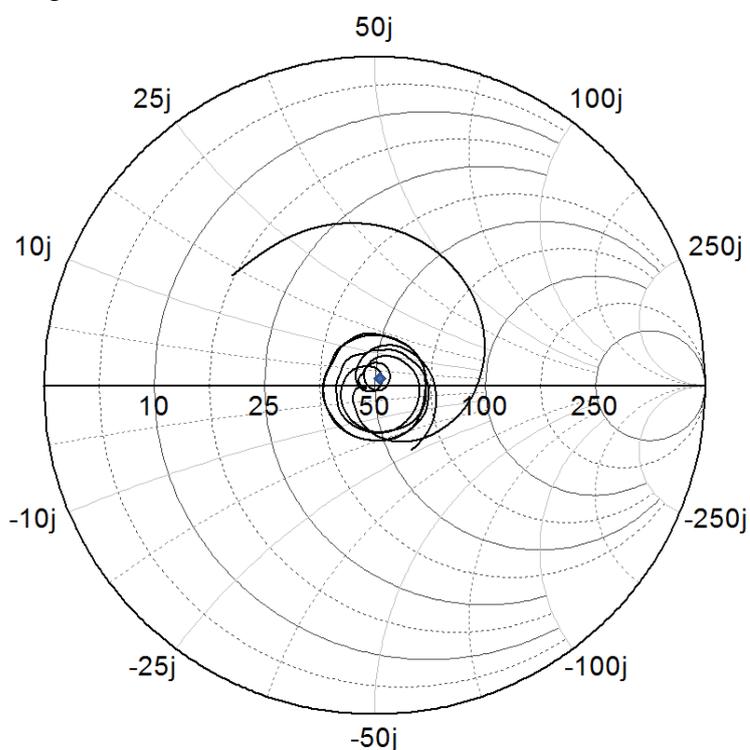
Como pode ser observado na Figura 70, os valores medidos do S_{11} apresentam um menor módulo quando comparado ao simulado, porém com uma quantidade maior de picos de

frequência com ressonância baixo de -10 dB. Tal comportamento pode ser justificado pelos mesmo fatores expostos para antena SPF, mostrados na seção 4.3.1.

Devido ao fato do HFSS[®] simular considerando o material do substrato como homogêneo e isotrópico é encontrada esta diferença entre o resultado simulado e o efetivamente medido, entretanto, nas duas antenas medidas no presente trabalho, ambas ressoaram a -10 dB na frequência central de projeto e na faixa de frequência planejada.

Outro parâmetro medido foi a impedância da antena expressa pela Carta de Smith mostrada na Figura 71 para as frequências de 2 GHz à 4 GHz, focando na região do gráfico da Figura 69 de maior largura de banda abaixo de -10 dB.

Figura 71 – Carta de Smith medida da antena PP+PLA.



Fonte: autoria própria.

Como pode ser observado na Figura 71, os valores medidos de impedância mostrados na Carta de Smith apresentam uma perceptível concentração na região de 50 Ω (cinquenta ohms), indicando características satisfatórias de projeto e execução da antena, para a frequência central de projeto em 2,45 GHz a impedância medida foi de aproximadamente $47,3592 + j0,59313$, conforme ponto destacado na Figura 71. Um valor com uma parcela real próxima a 50 Ω e uma parcela imaginária relativamente pequena.

5 CONCLUSÕES

O desenvolvimento do presente trabalho possibilitou uma análise da viabilidade da utilização de tecidos têxteis com estrutura de malha como substrato de antenas para aplicação em sistemas de *tag* ativas de Identificação por Rádio Frequência, RFID e/ou para sistemas de comunicação e aquisição de dados para *Internet* da Coisas, IoT, devido a ampla faixa de frequência para possíveis utilizações para esta aplicação.

A caracterização das amostras têxteis analisadas por meio do método da sonda coaxial, foi necessária para o estudo das características elétricas, como permissividade elétrica e tangente de perdas. A caracterização das propriedades físicas como título, gramatura, estabilidade dimensional e resistência à tração, permitiu analisar os tecidos viabilizando a triagem das amostras mais e menos propícias para utilização como substrato de antena.

Com base nos dados obtidos da caracterização das propriedades físicas e elétricas das amostras têxteis analisadas foi possível desenvolver as etapas de projeto e simulação das antenas, com o auxílio do *software* Ansys HFSS[®] foi realizado inicialmente a simulação e otimização de uma antena com tecido feito à base de fibras derivadas de proteína de soja, SPF, com os resultados simulados para a essa antena foi desenvolvida outra antena com substrato têxtil feito à base de fibras de polipropileno e ácido polilático de milho, PP+PLA, focando esta última na obtenção de dimensões menores que a primeira antena simulada.

Por meio dos resultados obtidos na etapa de simulação foram construídas duas antenas, uma em substrato têxtil de fibras derivadas de soja, designada como antena SPF, e outra antena com dimensões menores, utilizando substrato têxtil composto de fibras de Polipropileno e ácido polilático de milho, designada como antena PP+PLA. Devido a limitações na disponibilidade de material para confecção de mais antenas, não foi possível desenvolver antena SPF e PP+PLA com os parâmetros dimensionais iguais uma da outra, com as devidas adaptações ao tipo de material.

Contudo, ambas as antenas construídas tiveram seus parâmetros de S_{11} e impedância medidos por meio do analisador de redes vetoriais, apresentando resultados satisfatórios para utilização destas na aplicação proposta no presente trabalho. Certas disparidades no comportamento dos gráficos dos valores medidos e simulados são justificados pelo fato do ambiente de simulação do Ansys HFSS[®], não está plenamente adaptado para utilização de antena com substratos têxteis, todavia, em ambos os casos as antenas ressoaram a baixo de -10 dB para as frequências de projeto em 2,45 GHz e na faixa de frequência para utilização de sistemas RFID, entre 2,4 GHz e 2,4835 GHz. Por sua vez, os valores de impedância medidos

mostraram que ambas as antenas projetadas, simuladas e construídas, apresentaram resultados satisfatórios de desempenho.

Desta forma, ao final do presente, trabalho pode-se concluir a viabilidade da utilização de antenas com substrato têxtil com estrutura de malha e alimentação por guia de onda coplanar, para aplicação em sistemas de *tag* ativa para RFID e IoT para comunicação e aquisição de dados.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do desenvolvimento do presente trabalho são indicadas as seguintes recomendações para futuros trabalhos:

- Desenvolvimento de antenas com outros materiais condutores, como tinta condutiva impressa sobre o tecido ou utilização de linha condutiva bordada na geometria da antena;
- Desenvolvimento de antena com substrato têxtil com camada de tecido condutivo cortado na geometria da antena projetada e fixado por meio de costura nas camadas de substrato da antena;
- Utilizar as antenas construídas no presente trabalho em circuitos de *tag* RFID comercial;
- Desenvolvimento de *tag* RFID passiva com os tecidos utilizados;
- Desenvolvimento de antenas com mesmo material de fibras têxteis, porém com diferentes estruturas de construtivas, como tecidos planos, tecidos não tecidos, malhas Jersey, Piquet dentre outras variações;
- Utilização de estruturas para filtrar bandas de frequências, diminuindo a largura banda da antena para uma aplicação ou frequência de serviço específica;
- Desenvolvimento de antena com geometrias diferentes no *patch*;
- Desenvolvimento de outros tipos de antenas com substrato têxtil, como antenas monopolo de microfita, antenas quase-yagi, antenas de linha de meandro;
- Projetar antenas com os substratos têxteis analisados para outras frequências RFID e IOT, como por exemplo, 5,8 GHz;
- Simular e realizar medições com antena coberta por outras camadas de tecido.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. **Resolução Nº 506, de 1º de Julho de 2008, Regulamentação Sobre Equipamentos de Radiocomunicação de Radiação Restrita** Brasil Agência Nacional de Tele Comunicações, ANATEL, , 2008.

_____. **Plano Nacional de Atribuição, Destinação e Distribuição de Frequências no Brasil**. 2016. ed. Rio de Janeiro: ANATEL, 2016.

AGILENT TECHNOLOGIES. **85070E Dielectric Probe Kit**. Santa Clara: Agilent, 2013.

AKBARI, M. et al. Textile Tags : A Reliability Study. **IEEE Transactions on Device and Materials Reliability**, v. 16, n. 3, p. 429–431, 2016.

ALENCAR, M. S.; LOPES, WASLON T. A.; ALENCAR, T. T. **O fantástico Padre Landell de Moura e a Transmissão sem Fio**. Disponível em: <http://www.memoriallandelldemoura.com.br/imagen/documentos/fantastico_landell.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2016.

ALSHAREEF, M. R. et al. Time Analysis of Frequency Coded Chipless RFID Tag Based on CPW Multi-Band Resonators. p. 7–8, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D3776**: Standard Test Methods for Mass Per Unit Area (Weight) of Fabric. West Conshohocken, 2013.

_____. **ASTM 3887**: Standard Specification for Tolerances for Knitted Fabrics. West Conshohocken, 2008.

_____. **ASTM D5034**: Standard Test Method for Breaking Strength and Elongation of Textile Fabrics (Grab Test). West Conshohocken, 2013.

_____. **ASTM 6207**: Standard Test Method for Dimensional Stability of Fabrics to Changes in Humidity and Temperature. West Conshohocken, 2015.

ANDERSON, R. W. S. S-Parameter Techniques for Faster, More Accurate Network Design. **Hewlett-Packard Journal**, p. 13–24, 1967.

ANSYS. **Ansys HFSS**. Disponível em: <<http://resource.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/brochure/ansys-hfss-brochure-16.0.pdf>>. Acesso em: 19 dez. 2016.

AQUINO, M. S. **Análise Tribológica das malhas multicuncionais obtidas por multicamadas**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.

ARAÚJO, M. et al. **Têxteis Técnicos: Materiais do novo milénio**. Braga: Williams Lda, 2001.

ARAÚJO, M.; CASTRO, E. M. **Manual de Engenharia Têxtil**. [s.l.] CALOUSTE GULBENKIAN, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10591 - Determinação da**

Gramatura de superfícies Têxteis Associação Brasileira de Normas Técnicas, , 2008.

ATTARAN, A.; RASHIDZADEH, R. Chipless Radio Frequency Identification Tag for IoT Applications. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 4662, n. c, p. 1–1, 2016.

BALANIS, C. A. **Teoria de Antenas: Análise e Síntese**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

BARROS JÚNIOR, A. P. **Cultura do Algodão [Gossypium Hirsutum L.]** MossoróUFERSA, , 2013.

BJORNINEN, T. et al. Impact of recurrent washing on the performance of electro-textile UHF RFID tags. **RFID Technology and Applications Conference (RFID-TA), 2014 IEEE**, n. Ic, p. 251–255, 2014.

BJÖRNINEN, T. et al. Impact of recurrent stretching on the performance of electro-textile UHF RFID tags. **Proceedings of the 5th Electronics System-Integration Technology Conference, ESTC 2014**, n. Ic, p. 251–255, 2014.

BOLIC, M.; SIMPLOT-RYL, D.; STOJMENOVIC, I. **RFID Systems: Research Trends and Challenges**. Chichester: John Wiley and Sons, 2010.

CARNEIRO FILHO, R. **Desenvolvimento de substrato cerâmico BiNbO4 para antenas de microfita de sistemas de comunicações sem fio**. Natal, 2010, 82 p. Tese (Doutorado em Ciências). Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

CAVALCANTE, G. A. **Desenvolvimento de Circuitos Planares sobre Substratos Têxteis**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2014.

CHEN, Z. N.; CHIA, M. Y. W. **Broadband Planar Antenas: Design and Applications**. Chichester: John Wiley & Sons, 2006.

DAS, R.; HARROP, P. **RFID Forecast, Players and Opportunities 2016-2026**. Disponível em: <<http://www.idtechex.com/research/reports/rfid-forecasts-players-and-opportunities-2016-2026-000451.asp>>. Acesso em: 16 fev. 2016.

DESCHAMPS, G. A. Microstrip Patch Antenna. **3th USAF Symposium on Antenas**, 1953.

DIAS, R. R. DE F. Regulamentação do Espectro de Frequência para Sistemas RFID. **RFID Journal Brasil**, 2013.

DIAS, R. R. DE F.; BALADEI, S. D. P. Diferenças entre as Frequências do sistema RFID Passivo. **RFID Journal Brasil**, 2012.

DUCHOVNI, D. **Identificação por Rádio Frequência: RFID**. Campinas, São Paulo: PUC-Campinas, 2006.

GARG, R. et al. **Microstrip Antenna Design Handbook**. Boston: Artech House, 2001.

GLOVER, B.; BHATT, H. **RFID Essentials**. Sebastopol: O'reily, 2006.

GUERRA, J. R. F. **Projeto de Antena de Microfita Flexível Utilizando Tecido de Malha a**

Base de Fibras naturais e Sintéticas. 2016. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, 2016.

GUILLET, A. et al. Design of a chipless RFID sensor for water level detection. **2012 15th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics, ANTEM 2012**, p. 1–4, 2012.

HARROP, J.; HARROP, P.; PUGH, D. **Internet Of Things (IOT) 2017-2027 - Thing that think: Ip adressed sensor node systems.** Disponível em: <<http://www.idtechex.com/research/reports/internet-of-things-iot-2017-2027-000499.asp>>. Acesso em: 3 mar. 2017.

HAYWARD, J. **E-Textiles 2017-2027: Technologies Markets, Players -.** Disponível em: <<http://www.printedelectronicsworld.com/research/reports/e-textiles-2017-2027-technologies-markets-players-000522.asp>>. Acesso em: 24 fev. 2017.

HEMMERICH, M. **The Internet of Things Explained: A guide for ISPs on the Opportunities and Challenges coming with the IoT.** Alpharetta: Zcorum, 2016.

HOLANDA, S. M. DE. **Estudo e Desenvolvimento de Antenas de Microfita Utilizando Tecido de Malha a Base de Fibras Têxteis compostas.** 2016. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, 2016.

HUANG, Y.; BOYLE, K. **Antennas: from Theory to Practice.** Chichester: John Wiley & Sons, 2008.

IEEE. **Standard Definitions of Terms for Antennas**, 1983.

IHAMJI, M.; ABDELMOUNIM, E. Novel Design of a Miniature L-slot Microstrip CPW- Fed Antenna for RFID Reader. p. 3–6, 2016.

JALALY, I.; ROBERTSON, I. D. RF barcodes using multiple frequency bands. **IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest**, v. 2005, n. C, p. 139–142, 2005.

KAZMI, A. et al. **A reliability study of coating materials for brush-painted washable textile RFID tags.** 2016 6th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC). **Anais...IEEE**, set. 2016 Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7764735/>>

KIM, Y. et al. Wearable UHF RFID Tag Antenna Design Using Flexible Electro-thread and textile. **International Symposium on Antennas and Propagation**, p. 5487–5490, 2007.

KUASNE, A. **Apostila de Engenharia Têxtil** Araranguá Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, , 2008.

LANDT, J. The history of RFID. **IEEE Potentials**, v. 24, n. 4, p. 8–11, out. 2005.

LESNIKOWSKI, J. Dielectric Permittivity Measurement Methods of Textile Substrate of Textile Transmission Lines. **Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)**, v. 88, n. 3, p. 148–151, 2012.

LI, Y. et al. Inkjet printed flexible antenna on textile for wearable applications. **2012 Textile Institute World Conference**, 2012.

LIMA FILHO, N. O. **Design de Estruturas de Malhas Multifuncionais: Otimização da Transferência de Líquidos**. [s.l.] Universidade do Minho, 2009.

LIU, Q.; LU, Y. CPW-fed wearable textile L-shape patch antenna. **Proceedings of 3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, APCAP 2014**, p. 461–462, 2014.

MACEDO, A. M. K. DA S. **Análise de Malhas**. Araranguá: IFSC, 2016.

MALEK, M. A. et al. Dual-Band CPW-Fed Transparent Antenna for Active RFID Tags. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 14, p. 919–922, 2015.

MANZARI, S.; OCCHIUZZI, C.; MARROCCO, G. Reading range of wearable textile RFID tags in real configurations. **Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)**, n. 1, p. 433–436, 2011.

MANZARI, S.; OCCHIUZZI, C.; MARROCCO, G. Feasibility of body-centric systems using passive textile RFID tags. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, v. 54, n. 4, p. 49–62, 2012.

MARQUES, C. A. et al. A tecnologia de identificadores de rádio frequência (RFID) na logística interna industrial : pesquisa exploratória numa empresa de usinados para o setor aeroespacial. **Revista Gepros: Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v. 4, n. 2, p. 109–122, 2009.

MCTI. **Avança debate no governo sobre Plano Nacional de Internet das Coisas**.

MILLIGAN, T. A. **Modern Antenna Design**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.

NEMR, A. EL. **Textiles: Types, Uses and Production Methods**. New York: Nova Science, 2012.

NIKITIN, P. Leon Theremin (Lev Termen). **Antennas and Propagation Magazine, IEEE**, v. 54, n. 5, p. 252–257, 2012.

PEREIRA-DE-OLIVEIRA, L. A.; CASTRO-GOMES, J. P.; NEPOMUCENO, M. C. S. Effect of acrylic fibres geometry on physical, mechanical and durability properties of cement mortars. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 189–196, 2012.

PEREIRA, G. DE S. **Materiais e Processos Têxteis**. Araran: IFSC, 2009.

PERRET, E. et al. THID, the next step of chipless RFID. **2013 IEEE International Conference on RFID, RFID 2013**, p. 261–268, 2013.

PERRET, E. **Radio Frequency Identification and Sensors: From RFID to Chipless RFID**. London: ISTE, 2014.

PHAD, P. G.; KASABEGOUDAR, V. G. A Planar CPW Antenna Loaded with Rectangular Slot for Triple Bands Operation. **Global Journal of Reseach Engineering**, v. 16, n. 2, 2016.

POZAR, D. M. **Microwave Engineering**. 4. ed. [s.l.] Wiley, 2012.

PRERADOVIC, S.; KARMAKAR, N. C. Chipless RFID: Bar code of the future. **IEEE Microwave Magazine**, v. 11, n. 7, p. 87–97, 2010.

PRERADOVIC, S.; KARMAKAR, N. C. Multiresonator-based chipless RFID: Barcode of the future. **Multiresonator-Based Chipless RFID: Barcode of the Future**, v. 9781461420, p. 1–170, 2012a.

PRERADOVIC, S.; KARMAKAR, N. C. **Multiresonator-based chipless RFID: Barcode of the future**. Heidelberg: Springer, 2012b.

RAJO-IGLESIAS, E. et al. Textile soft surface for back radiation reduction in bent wearable antennas. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 62, n. 7, p. 3873–3878, 2014.

REZAIESARLAK, R.; MANTEGHI, M. **Chipless RFID - Design Procedure and Detection Techniques**. Nova Iorque: Springer, 2015a.

REZAIESARLAK, R.; MANTEGHI, M. Design of chipless RFID tags based on Characteristic Mode Theory (CMT). **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 63, n. 2, p. 711–718, 2015b.

ROBERTI, M. The History of RFID Technology The History of RFID Technology. **Energy**, p. 1–3, 2007.

SABA, R. et al. A Novel Textile Antenna for Passive UHF RFID Tag. **Proceedings of ISAP2012**, p. 882–885, 2012.

SADIKU, M. N. O. **Elementos de Eletromagnetismo**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

SALVADO, R. et al. Textile materials for the design of wearable antennas: A survey. **Sensors (Switzerland)**, v. 12, n. 11, p. 15841–15857, 2012.

SANKARALINGAM, S. .; GUPTA, B. Development of Textile Antennas for Body Wearable Applications and Investigations on Their Performance Under Bent Conditions. **Progress In Electromagnetics Research B**, v. 22, p. 53–71, 2010.

SHAO, S. **Design and Optimization of Passive UHF RFID Tag Antenna for Mounting on or inside Material Layers** 2015. 140 f. Dissertação Doctor of Philosophy in the Graduate School of The Ohio State By Dissertation Committee : Ohio State University, Columbus, 2015.

SHAO, S. et al. Broadband Textile-Based Passive UHF RFID Tag Antenna for Elastic Material. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 14, p. 1385–1388, 2015.

SILVA, I. B. T. DA. **Projeto e Análise de Antena de Microfita com Utilização de Metamaterial do Tipo CSSR**. 2014. 124f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, 2014.

SIMONS, R. N. **Coplanar Waveguide Circuits, Components, and Systems**. New York: John Wiley & Sons, 2001.

SMILEY, S. **UHF RFID Tag Communications: Protocols and Standards**. Disponível em: <<http://blog.atlasrfidstore.com/uhf-rfid-tag-communications-protocols-standards>>. Acesso em: 6 jan. 2017.

STEMPIEN, Z. et al. Inkjet-printing deposition of silver electro-conductive layers on textile substrates at low sintering temperature by using an aqueous silver ions-containing ink for textronic applications. **Sensors and Actuators, B: Chemical**, v. 224, p. 714–725, 2015.

SWICOFIL. **Harvest SPF Textile Co.: TExtile Soybean Protein Fibers and Yarns**. Disponível em: <http://www.swicofil.com/harvest_textile_soybean.html>. Acesso em: 18 fev. 2017.

UKKONEN, L.; SYDÄNHEIMO, L.; RAHMAT-SAMII, Y. Sewed textile RFID tag and sensor antennas for on-body use. **Proceedings of 6th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2012**, p. 3450–3454, 2012.

VENA, A. et al. Design and realization of stretchable sewn chipless RFID tags and sensors for wearable applications. **2013 IEEE International Conference on RFID, RFID 2013**, p. 176–183, 2013.

VENA, A.; PERRET, E.; TEDJINI, S. Design of compact and auto-compensated single-layer chipless RFID tag. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v. 60, n. 9, p. 2913–2924, 2012.

VERMESAN, O. et al. Internet of Things Strategic Research Roadmap. **Internet of Things Strategic Research Roadmap**, p. 9–52, 2009.

VIRILI, M. et al. Wearable textile antenna magnetically coupled to flexible active electronic circuits. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 13, p. 209–212, 2014.

VYNIAS, D. Soybean Fibre: A Novel Fibre in the Textile Industry. In: **Soybean - Biochemistry, Chemistry and Physiology**. [s.l.] InTech, 2011.

WADELL, B. C. **Transmission Line Design Handbook**. Norwood: Artech House, 1991.

WARFIELD, H. **Barcode, RFID and The Internet Of Things: How Automatic Identification is Changing the World**. [s.l.] Amazon books, 2016.

WEN, C. P. Coplanar Wguide: A Surface Strip Transmission Line Suitable for Nonreciprocal Gyromagnetic Device Applications. **IEEE Transactions on Microwave Theory Technologies**, v. 17, n. 12, p. 1087–1090, 1969.

WHITE, J. F. The Smith Chart. In: **High Frequency Techniques**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2004. p. 119–160.

WHITTOW, W. G. et al. Inkjet-printed microstrip patch antennas realized on textile for wearable applications. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 13, 2014.

YAO, L.; QIU, Y. Design and electromagnetic properties of conformal single-patch microstrip antennas integrated into three-dimensional orthogonal woven fabrics. **Textile Research Journal**, v. 85, n. 6, p. 561–567, 2015.

ZHANG, S. et al. Embroidered wearable antennas using conductive threads with different stitch spacings. **LAPC 2012 - 2012 Loughborough Antennas and Propagation Conference**, 2012.

ZHONG, J. et al. Conformal Load-Bearing Spiral Antenna on Conductive Textile Threads. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 16, p. 230–233, 2017.