ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ROBSON VALMIRO

ANTENAS PARA SISTEMAS RFID IMPRESSAS EM SUBSTRATO FLEXÍVEL

São Paulo 2015 **ROBSON VALMIRO**

ANTENAS PARA SISTEMAS RFID IMPRESSAS EM SUBSTRATO FLEXÍVEL

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

São Paulo 2015 **ROBSON VALMIRO**

ANTENAS PARA SISTEMAS RFID IMPRESSAS EM SUBSTRATO FLEXÍVEL

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Microeletrônica (3140)

Orientador: Prof. Dr. Silvio Ernesto Barbin

São Paulo 2015

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob
responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 04 de Maio de 2015.

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catalogação-na-publicação



DEDICATÓRIA

Dedico este Trabalho com amor, admiração e gratidão a minha esposa Rivane, a minha filha Daniella e ao meu filho Matheus, pela compreensão, carinho, presença e incansável apoio ao longo do período de elaboração desse trabalho.

AGRADECIMENTOS

Sou muito grato pelas oportunidades que DEUS tem disponibilizado no meu caminho.

À minha esposa e aos meus filhos, por terem me apoiado em todos os momentos da minha vida, tanto os pessoais quanto os profissionais, permitindo-me chegar a este ponto da minha carreira.

Ao professor e orientador Dr. Silvio Ernesto Barbin, pela dedicação, orientação e constantes estímulos transmitidos durante todo o curso do mestrado.

Aos professores da Pós-Graduação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, por todo ensinamento passado durante as aulas.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pela oportunidade de realizar o curso de mestrado.

Aos engenheiros e amigos Alessandro Lucindo da Luz, Manoel Vitório Barbin, Pedro Rebello e Vinicius Ferro, pela grande colaboração e apoio ao longo do mestrado.

Aos amigos e profissionais, em geral, que de alguma forma colaboraram direta ou indiretamente na execução desse trabalho.

À Motorola Solutions, pelo apoio e incentivo durante o curso.

Muito Obrigado a todos!

RESUMO

Identificação de Dispositivos por Radiofrequência, do inglês, Radio Frequency Identification Device (RFID), é uma tecnologia para identificação, rastreamento e gerenciamento de produtos, animais e até mesmo pessoas sem a necessidade de um campo visual. Com o objetivo de alcançar custos menores e a utilização de processos de fabricação menos agressivo ao meio ambiente, tornou-se importante o desenvolvimento de novos tipos de etiquetas (tags). Em vista disso, a fabricação de antenas impressas compactas usando tinta condutiva, representa uma boa opção. O objetivo dessa pesquisa é o projeto e fabricação de antenas impressas sobre substratos flexíveis utilizando tinta condutiva composta de nanopartículas de prata. O desenvolvimento deste tipo de etiquetas é justificado principalmente pelos seguintes motivos. Primeiro, o processo reduz o uso de agentes químicos comumente empregados na fabricação convencional, levando a uma significativa redução no impacto ambiental. Segundo, a fabricação utilizando substratos como, por exemplo, papel ou polímero, reduz substancialmente o custo final da etiqueta. Estudos teóricos e práticos, juntamente com simulações eletromagnéticas foram realizados. Dois processos de prototipagem da etiqueta foram executados: um utilizando uma impressora jato de tinta que funciona propelindo gotas de tinta sobre o substrato e o outro utilizando serigrafia ou silkscreen printing que é muito prático para imprimir formas geométricas através de uma tela de fios trançados. Esses métodos de impressão permitiram a produção rápida da antena sem a necessidade de máscaras de fotolitografia, como é amplamente utilizado na indústria eletrônica. Quatro protótipos foram produzidos e medidas foram realizadas para verificar a viabilidade da utilização dessas etiquetas impressas em relação à sua operação, a confiabilidade das informações armazenadas e a troca de dados com o leitor RFID via interface aérea. Os resultados práticos foram comparados com os obtidos de etiquetas comerciais, onde foi possível verificar que a antena fabricada com tinta condutiva é capaz de capturar e radiar ondas eletromagnéticas de forma eficiente, resultando em uma troca de dados confiáveis através da interface aérea.

Palavra-chave: *RFID*. Tinta condutiva. Jato de tinta. Impressora. Antena flexível. Eletrônica impressa.

ABSTRACT

Radio Frequency Identification Device (RFID), it is a technology using electromagnetic waves for identifying, tracking and management of products, animals and even people without requiring a visual field. Aiming at achieving low costs and using less aggressive manufacturing processes to the environment, it has become important to develop new types of RFID tags. In view of that, manufacturing compact printed antennas using conductive ink represents a good option. The goal of this research is the design of printed antennas on flexible substrates using silver nanoparticles ink. The developing of this type of tags is justified mainly by the following reasons. First, the process reduces the use of chemical agents commonly employed in conventional manufacturing leading to a significant reduction of the environmental impact. Second, the fabrication using substrates such as paper and polymer foils, substantially reduces the final cost of the tags. Theoretical and practical studies along with electromagnetic simulations were conducted. Two process of RFID prototyping were performed: one using an inkjet printer that operates by propelling particles of conductive ink onto the substrate and another using silkscreen printing that is a very practical method to print geometric forms through a twisted wires screen. These technologies allowed fast production of the antenna without requiring photolithographic masks, as it is widely used in the electronics industry. Four prototypes were produced and measurements were taken to verify the feasibility of using RFID tags printed with conductive ink regarding to its operation, reliability of the stored information and the exchange of data with the RFID reader via air interface. Practical results were compared with those obtained of the commercial tags. It was possible to verify that the antenna manufactured with conductive ink was able to capture and radiate efficiently electromagnetic waves, resulting in reliable exchange of data with the reader through the air interface

Keyword: RFID. Conductive ink. Inkjet. Printer. Flexible antenna. Printed electronics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Identificação de avião amigo	22
Figura 2 - Experimento de Harry Stockman em 1948	23
Figura 3 - Retroespalhamento de sinal de RF	24
Figura 4 - Etiqueta RFID; Leitor RFID e Antena do Leitor	25
Figura 5 - Microchip RFID e Circuito de Entrada	25
Figura 6 - Onda radiada por uma antena transmissora em direção a uma ante	ena
receptora	26
Figura 7 - Sinal de retroespalhamento – Baixa impedância	27
Figura 8 - Não existe sinal retroespalhado – Alta impedância	27
Figura 9 - Sistema RFID básico	28
Figura 10 - Sinal completo do leitor e etiqueta	28
Figura 11 - Cobrança de pedágio	29
Figura 12 - Controle de acesso	29
Figura 13 - Varejo controle de mercadorias	29
Figura 14 - Controle bovino	30
Figura 15 - Hospitalar	30
Figura 16 - Logística	30
Figura 17 - Sinal retroespalhado modulado usando um transistor como chave	31
Figura 18 - Diagrama em blocos de um microchip RFID	32
Figura 19 - Etiquetas RFID com encapsulamento rígido	33
Figura 20 - Modelos de antenas para etiquetas RFID passivas 900 MHz	34
Figura 21 - Faixa de frequência	34
Figura 22 - Faixa de frequência por região	35
Figura 23 - Microchip RFID montado sobre o strap	36
Figura 24 - Circuito RC visto pela antena	36
Figura 25 - Características elétricas e condições de operação do microchip H	iggs™4
	37
Figura 26 - Circuito RC equivalente para o modelo em paralelo	
Figura 27- Circuito RC equivalente para o modelo em série	
Figura 28 - Antena Dipolo de comprimento x/2	40
Figura 29 - Antena dipolo em microfita	43
Figura 30 - Antena Dipolo de microfita	44

Figura 32 - Casamento de impedância entre a antena e o <i>microchip</i>
Figura 33 - Bobina de papel – Produção em Massa
 Figura 34 - Gota de água sobre um substrato de papel
 Figura 35 - Gráfico resistividade (μΩ*cm) x tempo (min)
 Figura 36 - Tinta CCi300 de prata após cura por 15 minutos a 100°C (a) e 150°C (b)
53 Figura 37 - Condutor fino tridimensional
Figura 37 - Condutor fino tridimensional54 Figura 38 - Impressora <i>Fujifilm Dimatix</i> DMP-283157 Figura 39 - Foto ilustrativa destacando as 4 partes principais da impressora58
Figura 38 - Impressora <i>Fujifilm Dimatix</i> DMP-283157 Figura 39 - Foto ilustrativa destacando as 4 partes principais da impressora58
Figura 39 - Foto ilustrativa destacando as 4 partes principais da impressora58
Figura 40 - Esquema ilustrativo do cartucho e cabeça de impressão58
Figura 41 - Visualização dos bicos59
Figura 42 - Impressão jato de tinta em modo DOD59
Figura 43 - Fotolito utilizado para fabricação da tela61
Figura 44 - Tela para serigrafia61
Figura 45 - Ilustração das forças envolvidas na deposição da tinta (F, $F_n e F_t$)62
Figura 46 - Sequência de Transferência da tinta para substrato62
Figura 47 - Dimensões da antena dipolo reto64
Figura 48 - Modelagem computacional da antena dipolo reto65
Figura 49 - Representação do <i>microchip</i> conectado a antena66
Figura 50 - Parâmetro S ₁₁ em relação impedância característica de 50 Ω 67
Figura 51 - Parâmetro S ₁₁ - Casamento da impedância entre antena e <i>microchip</i> 67
Figura 52 - S ₁₁ em função da frequência68
Figura 53 - Padrão de radiação 3D para 915 MHz68
Figura 54 - Antena Dipolo com extremidades dobradas70
Figura 55 - Modelagem computacional da antena dipolo com as extremidades
dobradas71
Figura 56 - Parâmetro S ₁₁ em relação à impedância característica de 50 Ω 73
Figura 57 - Parâmetro S ₁₁ - Casamento da impedância entre antena e <i>microchip</i> 73
Figura 58 - S ₁₁ em função da frequência74
Figura 59 - Padrão de radiação 3D para 915 MHz74
Figura 60 - Modelagem computacional da antena dipolo com as extremidades
dobradas
Figura 61 - Parâmetro S ₁₁ em relação à impedância característica de 50 Ω 76

Figura 62 - Parâmetros S ₁₁ - Casamento da impedância entre antena e microch	1ip77
Figura 63 - S ₁₁ em função da frequência	77
Figura 64 - Padrão de radiação 3D para 915 MHz	78
Figura 65 - Modelagem computacional da antena dipolo dobrada – Tinta CCi30	079
Figura 66 - Parâmetros S ₁₁ em relação a impedância característica de 50 Ω	80
Figura 67 - Parâmetro S11 - Casamento da impedância entre antena e microchi	<i>p</i> 80
Figura 68 - S ₁₁ em função da frequência	81
Figura 69 - Padrão de radiação 3D para 915 MHz	81
Figura 70 - Distribuição do campo dentro da <i>GTEM</i>	84
Figura 71 - Medição da perda de sinal no interior da célula GTEM	85
Figura 72 - Identificação da <i>GTEM</i>	86
Figura 73 - Setup para teste estático da etiqueta RFID	87
Figura 74 - Fotolito das antenas fabricadas com a tinta 5064H da DUPont	89
Figura 75 - Tela para produção das antenas protótipos 1 e 2	89
Figura 76 - Foto das antenas de prata impressa por serigrafia	90
Figura 77 - Foto das etiquetas impressa com prata por serigrafia	90
Figura 78 - Protótipo 1 e Protótipo 2 dentro da GTEM	91
Figura 79 - Mínima potência para ativar a etiqueta fabricada com a tinta 5064H	da
DuPont	93
Figura 80 - Processo de filtragem da tinta para dentro do cartucho	94
Figura 81 - Configuração da impressora para ejeção da tinta CCI300	96
Figura 82 - Foto das antenas impressas por Inkjet	96
Figura 83 - Foto de antenas impressa por <i>Inkjet</i>	97
Figura 84 - Valores das resistências medidas entre os pontos A e B	97
Figura 85 - Imagem da trilha impressa com impressora a jato de tinta CCI300	98
Figura 86 - Protótipo 3 e Protótipo 4 no interior da <i>GTEM</i>	98
Figura 87 - Mínima potência para ativar a etiqueta fabricada com a tinta CCi300) da
Cabot	101
Figura 88 - Etiqueta <i>RFID</i> modelo Ad-223 da Avery Dennison	102
Figura 89 - Mínima potência para ativar a etiqueta AD-223	103
Figura 90 - Linha de microfita sobre substrato	119
Figura 91 - Antena dipolo em microfita	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Medidas para construção do Dipolo Reto	.69
Tabela 2 - Medidas para construção do Dipolo com extremidades dobradas	.72
Tabela 3 - Medidas para construção do dipolo com extremidades dobradas	.75
Tabela 4 - Medidas para construção do dipolo com extremidades dobradas	.79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Alternate Current
CST MWS	Computer Simulation Technology Microwave Studio
Cs	Capacitância em Série
C _p	Capacitância em Paralelo
CW	Continuous Wave
DC	Direct Current
EPC	Electronic Product Code
FEM	Finite Element Method
FR	Flame Resistant
GTEM	Gigahertz Transverse Electromagnetic
l _{ant}	Corrente na Antena
IFF	Identify Friend or Foe
МоМ	Method of Moments
P _{carga}	Potência na Carga
PSK	Phase Shift Keying
R _s	Resistência em série
R _p	Resistência em Paralelo
R _{rad}	Resistência de Radiação
RFID	Identificação por Rádio Frequência
UHF	Ultra High Frequency
V _{ant}	Tensão na Antena
Z _{ant}	Impedância da Antena
Z _{ci}	Impedância do <i>Microchip</i>

SUMÁRIO

1. I	INTRODUÇÃO	16
1.1	1. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	16
1.2	2. DESCRIÇÃO DO TRABALHO	16
1.3	3. OBJETIVOS	17
1.4	4. ELEMENTOS MOTIVADORES	18
1.5	5. JUSTIFICATIVAS	19
1.6	6. MATERIAIS E METODOLOGIA	19
2.	HISTÓRIA DO <i>RFID</i>	21
2.1	1. IDENTIFICAÇÃO DE AMIGO OU INIMIGO <i>– IEE (IDENTIFICATION, EE</i>	RIFND
OF	R FOE)	21
2.2	2. UMA VISÃO SOBRE O FUNCIONAMENTO DO SISTEMA <i>RFID</i>	24
2.3	3. ALGUMAS APLICAÇÕES DO SISTEMA <i>RFID</i>	29
3.	DISPOSITIVO RFID	31
3.1	1. DISPOSITIVOS <i>RFID</i> - ETIQUETAS COMPACTAS	31
	3.1.1. DISPOSITIVO RFID	31
	3.1.2. FREQUÊNCIAS DE OPERAÇÃO	34
	3.1.3. IMPEDÂNCIA COMPLEXA DO MICROCHIP	35
÷	3.1.4. ANTENA DIPOLO	39
	3.1.5. ANTENA DIPOLO PARA SISTEMAS <i>RFID</i>	43
4 . I	MATERIAIS PARA DISPOSITIVO <i>RFID</i>	49
4.1	1. FR4 COMO SUBSTRATO	49
4.2	2. PAPEL COMO SUBSTRATO PARA ANTENAS RFID	50
4.3	3. TINTAS PARA IMPRESSÃO DO DISPOSITIVO RFID	52
4	4.3.1. TINTA PARA IMPRESSORA INKJET	52
4	4.3.2. TINTA DE PRATA PARA SERIGRAFIA	53
5.	TÉCNICAS UTILIZADAS PARA PRODUZIR O DISPOSITIVO <i>RFID</i>	57
5.1	1. TÉCNICA DE IMPRESSÃO POR JATO DE TINTA (<i>INKJET</i>)	57
5.2	2. TÉCNICA SERIGRÁFICA (SILKSCREEN PRINTING)	60

5.3. MODELAMENTO COMPUTACIONAL DA ANTENA63
5.3.1. MODELAMENTO DO PROTÓTIPO 1 - DIPOLO RETO63
5.3.2. MODELAMENTO DO PROTÓTIPO 2 - DIPOLO COM
EXTREMIDADES DOBRADAS69
5.3.3. MODELAMENTO DO PROTÓTIPO 3 - DIPOLO COM
EXTREMIDADES DOBRADAS75
5.3.4. MODELAMENTO DO PROTÓTIPO 4 - DIPOLO COM
EXTREMIDADES DOBRADAS78
6. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS DE TESTES82
6.1. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA MEDIÇÃO DE DESEMPENHO
DA ETIQUETA <i>RFID</i> 82
6.1.1. CONFIGURAÇÃO DE TESTE E VALIDAÇÃO82
6.1.2. POTÊNCIA MÍNIMA PARA ATIVAR A ETIQUETA <i>RFID</i>
6.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA IMPRESSÃO SERIGRÁFICA88
6.2.1. RESULTADOS E DISCUSSÕES90
6.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA IMPRESSÃO JATO DE TINTA .94
6.3.1. RESULTADOS E DISCUSSÕES97
6.4. PROCEDIMENTO DE TESTE DA ETIQUETA COMERCIALMENTE
DISPONÍVEL NO MERCADO102
7. CONCLUSÕES104
PUBLICAÇÕES107
REFERÊNCIAS108
APÊNDICE A – Fórmula aproximada de projeto para linha microfita119
ANEXO A – Especificação da célula <i>GTEM</i> 123

1. INTRODUÇÃO

1.1. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho apresenta o estudo e o desenvolvimento de antenas compactas impressas sobre substrato flexível, tais como, papel e polímeros, empregando tinta condutiva composta por nanopartículas de metal. O conteúdo é explorado de maneira simples com a finalidade de garantir o entendimento de seus tópicos, na sua essência e ao mesmo tempo detalhes necessários para o seu desenvolvimento.

Não há pretensão de que o material exposto trate o tema em sua totalidade, mas que contribua para o entendimento da importância deste trabalho e que possibilite o uso das antenas fabricadas por processos de impressão com tinta condutiva em grande escala. O presente material é fruto de uma evolução de trabalhos de outros pesquisadores citados nas referências bibliográficas pertinentes ao tema desta dissertação.

Os tópicos mencionados neste trabalho formam a estrutura sobre a qual o tema foi desenvolvido para obtenção dos objetivos descritos anteriormente.

1.2. DESCRIÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está dividido em sete capítulos, que apresentam: introdução, história do *RFID*, dispositivos, materiais, técnicas, procedimentos experimentais e resultados de testes e as conclusões, além das publicações e das referências utilizadas para o desenvolvido do tema durante o curso de Mestrado.

A introdução apresentada no capítulo 1 discorre sobre o estudo de antenas impressas, usando tinta condutiva, como também apresenta uma revisão da literatura que aborda os objetivos, a motivação, as justificativas, a metodologia para o desenvolvimento do tema relacionado a antenas impressas, assim como os desafios e as necessidades de se empregar esse tipo de dispositivo.

O capítulo 2 apresenta uma sequência cronológica dos principais acontecimentos que dizem respeito à tecnologia *RFID*, que tem suas bases nos

sistemas de radares utilizados na Segunda Guerra Mundial. O capítulo 3 engloba a descrição dos dispositivos para *RFID* passivo, acompanhada das explicações sobre seu funcionamento, bem como a importância do casamento de impedância entre a antena e o *microchip* que formam a etiqueta *RFID*. O capítulo 4 apresenta os materiais que foram utilizados para produzir as etiquetas *RFID*. O capítulo 5 descreve os métodos utilizados nesse trabalho para construir os protótipos propostos neste estudo. Os procedimentos experimentais e resultados obtidos estão descritos no capítulo 6. No capítulo 7, são apresentadas as conclusões e na sequência as publicações e as referências bibliográficas.

1.3. OBJETIVOS

O uso da tecnologia *RFID* vem aumentando fortemente devido à facilidade e à agilidade de obtenção de informações armazenadas na etiqueta, fornecendo a rastreabilidade e o monitoramento automático de produtos por diversas áreas de uma empresa. A tecnologia *RFID* fornece soluções para gestão logística, cuidados médicos, rastreamento de remédios, indústria pecuária, sistemas produtivos, entre outros. Os sistemas *RFID* UHF (902 MHz a 930 MHz) apresentam uma maior distância de leitura, uma alta taxa de transferência de dados e a capacidade de ler uma grande quantidade de etiquetas simultaneamente (1).

O objetivo da presente pesquisa constitui no estudo, na simulação e no desenvolvimento de uma antena compacta de baixo custo (2), impressa sobre substrato flexível, tais como papel e polímero, empregando os métodos de serigrafia ou *silkscreen* e impressora jato de tinta, onde a tinta utilizada nos dois métodos é composta de nanopartículas de prata. Tem aplicações em sistemas de Identificação de Dispositivos por Radiofrequência, do inglês, *Radio Frequency Identification Device RFID*, de baixo custo (3) (4) (5).

Mesmo com a tecnologia apresentando todos esses benefícios, alguns desafios precisam ser ainda superados para não prejudicar sua aplicação na prática. Aspectos tais como a confiabilidade das informações armazenadas, o uso de material ecologicamente amigável e o custo final da etiqueta são apenas alguns exemplos importantes.

Esta pesquisa visa superar principalmente dificuldades inerentes aos dois últimos exemplos de desafios apresentados, empregando os métodos de impressão de tinta condutiva em substrato flexível (6).

1.4. ELEMENTOS MOTIVADORES

Papel e polímeros são substratos de base orgânica, apropriados para aplicações de baixo custo em RF por várias razões. Além de serem ambientalmente amigáveis e amplamente disponíveis, apresentam alta demanda de consumo.

Atualmente a eletrônica impressa já está presente em alguns circuitos eletrônicos, como por exemplo, o *flat cable* e há grande possibilidade de em breve conquistar uma parte maior do mercado de eletrônicos, pois apresenta vantagens em relação ao processo de fabricação, sendo mais amigável ao meio ambiente, reduzindo o tempo de fabricação, diminuindo o consumo de energia e evitando possíveis contaminações por produtos químicos que são utilizados na fabricação de etiquetas *RFID*.

A *RFID* é uma tecnologia de identificação que usa ondas eletromagnéticas para a comunicação e alimentação de dispositivos semicondutores. Para se obter custos menores torna-se importante, por exemplo, a busca por novos processos de fabricação de etiquetas e que não provoquem prejuízo ao meio ambiente. Nesse contexto, a aplicação de antenas impressas (7) para formar dispositivos *RFID* pode vir a contribuir neste tema, tornando-se um motivador para os fabricantes de etiquetas *RFID*.

Os elementos motivadores deste trabalho estão justamente baseados na dificuldade de produzir as antenas pelo processo de impressão, sobre substrato flexível utilizando tinta condutiva, que seja capaz de apresentar desempenho satisfatório no que diz respeito à capacidade de receber e retransmitir sinais de RF por retroespalhamento, quando excitada por uma onda eletromagnética.

1.5. JUSTIFICATIVAS

Como o papel e os polímeros são de base orgânica, podem perfeitamente ser utilizados como substrato apropriado para aplicações de baixo custo em RF e por várias razões. Além de serem ambientalmente amigáveis e amplamente disponíveis em diferentes tipos, variam em densidade, espessura, textura e propriedades dielétricas, também apresentando alta demanda de consumo e sua produção em larga escala os tornam um dos materiais mais baratos já fabricados.

A necessidade de redução de custo das etiquetas *RFID* nos direciona na busca de novas técnicas de fabricação desses dispositivos de identificação. Dessa forma, uma das opções é o uso de serigrafia ou *silkscreen* que é um processo de impressão onde a tinta é transferida pela pressão de um rodo através de uma tela preparada e impressora jato de tinta que opera propelindo gotículas de líquido (8). Essas formas de fabricação de antenas por impressão (9) (10) (11), utilizando tinta condutiva, podem contribuir para uma rapidamente fabricação de antenas ou circuitos em geral, além de serem tecnologias de escrita por transferência direta, ao contrário da tradicional técnica de corrosão empregada em circuitos impressos, que é um método subtrativo, que gera resíduos na remoção do metal da superfície de um substrato laminado ou que depende de outros processos químicos para fabricação do circuito desejado (12).

Um dos principais desafios no projeto da antena *RFID* é o casamento de impedância da antena (Z_{ant}) com a do *microchip RFID* (Z_{chip}). Durante anos, as antenas foram projetadas principalmente para combinar com carga de 50 Ω ou 75 Ω . No entanto, *microchips RFID* apresentam impedâncias de entrada complexa, tornando difícil o casamento. Entretanto, a evolução tecnológica das ferramentas de *software* para simulação eletromagnética nos ajuda na definição de projetos mais eficientes de antenas.

1.6. MATERIAIS E METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi realizada uma revisão bibliográfica objetivando determinar as contribuições existentes no que se refere a antenas para

RFID impressas em substrato rígido, como o FR-4 que utiliza o cobre como material condutor e substrato flexível, como o papel ou polímeros para impressão da antena utilizando tinta condutiva. Em seguida, foram realizados estudos com ênfase em simulações eletromagnéticas de antenas para confecção de protótipos e finalmente, foram executados os testes para verificar a funcionalidade da etiqueta *RFID* comparando os resultados com os resultados obtidos de uma etiqueta *RFID* comercialmente disponível no mercado.

Como pode ser visto em (13) (14) (15) (16) (17) (18) (19) (20) (21) (22) (23), algumas experiências já estão sendo realizadas utilizando o processo de impressão com tinta condutiva para fabricação de antenas em substratos flexíveis e rígidos.

Este trabalho também apresenta uma contribuição, uma técnica para determinar a potência mínima necessária para ativar a etiqueta *RFID* passiva. Para essa finalidade, a etiqueta foi testada em uma célula *GTEM* pequena, de baixo custo, que fornece um ambiente imune à radiação eletromagnética. Esse procedimento foi inspirado nos padrões da *EPCglobal*, órgão que regulamenta a tecnologia *RFID* (24). Com a técnica proposta para realização dos testes, a sensibilidade da etiqueta, ou a mínima potência necessária para ativá-la, pode ser rapidamente determinada de uma forma muito econômica, permitindo também realizar uma comparação de desempenho entre as etiquetas.

Por fim, foi realizada uma análise dos resultados, visando aprimorar o projeto e a fabricação das etiquetas *RFID* utilizando os métodos de impressão com tinta condutiva sobre substratos flexíveis.

2. HISTÓRIA DO RFID

Apresentaremos neste tópico uma sequência cronológica dos principais acontecimentos que dizem respeito à tecnologia *RFID*, que tem suas bases nos sistemas de radares utilizados na Segunda Guerra Mundial.

2.1. IDENTIFICAÇÃO DE AMIGO OU INIMIGO – IFF (IDENTIFICATION, FRIEND OR FOE)

No início na década de 1930, os antigos aviões eram fabricados de madeira e tecido, sua identificação só era possível visualmente, assim, em época de conflitos não havia tempo algum para tomar qualquer decisão. Durante a Segunda Guerra Mundial esses aviões tornaram-se monomotores, fabricados totalmente de metal e utilizados para transportar explosivos. Nessa mesma época iniciou-se o desenvolvimento dos sistemas de radares, no qual a transmissão de um sinal de rádio era refletida pelos aviões que agora eram fabricados de metal (25).

A detecção além do alcance visual foi a tarefa dos radares de micro-ondas, contudo, somente a detecção de um avião não era suficiente para tomar uma decisão correta, pois ainda não era possível saber se o avião era "amigo ou inimigo".

A Força Aérea Alemã, inicialmente, resolveu o problema da identificação de seus aviões amigos por meio de uma manobra de giro do avião, realizada pelos seus pilotos, quando estes estavam voltando para a base e era detectado pelo radar em solo, como mostrado na Figura 1. Essa manobra alterava o sinal eletromagnético que era refletido nas aeronaves, alertando os técnicos responsáveis pelo radar de que se tratava de um avião amigo, mas logo no início da Segunda Guerra esse fato foi percebido pelos britânicos. Pelos estudos realizados, esse foi considerado o primeiro caso de identificação passiva de *RFID* (26).

Figura 1 - Identificação de avião amigo



Fonte: D. M. DOBKIN, The RF in RFID, Second Edition, USA, Elsevier (2008)

O primeiro sistema de radar (27) foi desenvolvido pelo físico escocês Sir Robert Alexander Watson-Watt durante a Segunda Guerra Mundial, que sob seu comando liderou um projeto secreto em conjunto com o exército britânico, em que foi desenvolvido o primeiro identificador ativo de amigo ou inimigo (IFF – Identify Friend or Foe) no radar. Foram implantados transmissores em cada avião britânico e, quando esses transmissores recebiam sinais das estações de radar no solo, começavam a transmitir um sinal de resposta, que os identificava como amigo (Friendly), tornando efetivas as ações de contra-ataques dos inimigos.

O sistema *RFID* funciona com o mesmo princípio básico do sistema de radares. Um sinal de radiofrequência é emitido por um transmissor, no caso do sistema de *RFID*, esse transmissor é chamado de Leitor (*Reader*), em direção a uma etiqueta *RFID* ou *transponder*, que é capaz de captar esse sinal de radiofrequência e, por meio do retroespalhamento de sinal ou sinal refletido, enviar uma resposta de volta para o leitor, esse sistema é chamado de passivo, ou a etiqueta pode transmitir seu próprio sinal, porque possui um transmissor próprio, chamado de sistema ativo.

Na década de 1940, Harry Stockman foi o primeiro a publicar um artigo explorando a possibilidade do uso da potência refletida como meio de comunicação para identificação de objeto, sua configuração é mostrada na Figura 2.

Em sua experiência, foram utilizados como principais componentes um microfone convencional e uma bobina. O microfone foi conectado à bobina que era usada para modular o sinal recebido por uma antena receptora. Apesar da inexistência de um transmissor de rádio do lado do microfone, o sinal de RF recebido pela antena conectada na bobina foi refletido de volta para o emissor e pôde ser ouvido no alto-falante (28) (29). As pesquisas continuaram avançando na área dos radares e nas comunicações por radiofrequência nas décadas de 1950 e 1960. Cientistas e acadêmicos dos Estados Unidos, Europa e Japão realizaram pesquisas e apresentaram estudos explicando como a energia de RF poderia ser utilizada na identificação de objetos.





Fonte: Harry Stockman (1948)

Na década de 1970, mais precisamente em 1973, Mário W. Cardulho patenteou uma etiqueta ativa para *RFID*, ou seja, capaz de gerar seu próprio sinal, que incluía uma memória com capacidade de escrita e leitura, uma memória reprogramável (30) (31).

Em 1983, Charles Walton recebeu a patente de um dispositivo capaz de abrir uma trava de porta sem uso de chaves convencionais (32) (33) (34) (35), utilizando um dispositivo passivo que funciona por meio de retroespalhamento do sinal recebido, como mostrado na Figura 3.





Fonte: http://web.mit.edu/invent/iow/waltonc.html (2005)

As pesquisas continuaram ao longo dos anos, dando origem a dispositivos agora conhecidos como etiquetas *RFID* ou *Tags* (36).

Nos anos da década de 1990, surgiu um sistema RFID, na faixa de UHF, operando em 900 MHz. Um link de comunicação entre a etiqueta/tag e o leitor/reader de alguns metros de distância foi o suficiente para uma leitura confiável de um objeto etiquetado. Entre os anos de 1999 a 2003, grandes fabricantes e usuários dessa tecnologia uniram-se e lançaram o Auto-ID Center no Instituto de Tecnologia de Massachusetts – MIT (Massachusetts Institute of Technology), onde foram desenvolvidas etiquetas de *RFID* de baixo custo (37). A pesquisa do Auto-ID Center forneceu um documento com especificações obrigatórias e opcionais para uma etiqueta de identificação de baixo custo operando na faixa de frequência ultra alta (UHF). A etiqueta agora contém um código eletrônico do produto (Electronic Product Code – EPC), utilizado para identificação única de um determinado item (38). Com esse "EPC" foi possível mudar a natureza do sistema RFID, que consistia de um pequeno banco de dados para um número de série, reduzindo consideravelmente os custos e transformando o RFID em uma tecnologia de rede, ou seja, cada um desses números de série pode ser armazenado em banco de dados externo, possibilitando acesso remoto pela internet.

2.2. UMA VISÃO SOBRE O FUNCIONAMENTO DO SISTEMA RFID

Um sistema *RFID* é comumente composto de etiquetas *RFID* (também conhecidas como *tags* ou *transponders*), um interrogador, frequentemente referido

como um leitor (*reader*) e as antenas que são usadas tanto para as etiquetas *RFID* quanto para o leitor, como mostrado na Figura 4. Cada etiqueta é essencialmente um *microchip* (circuito integrado) (39), que é fisicamente integrado com uma antena, como mostrado a Figura 5. Esses dispositivos pertencem à camada física do sistema, enquanto que, o *software* apropriado para operação do sistema, tais como, *middleware*, banco de dados aplicativos do usuário, etc., pertencem à camada da tecnologia da informação (TI).





Fonte: www.alientechnology.com – DS_ALN-9627_H (2011)





Fonte: Alien-Technology-Higgs-4-EPC-Class-1-Gen-2-RFID-Tag-IC (2013)

O leitor normalmente contém um módulo de frequência de rádio (transmissor e receptor), uma unidade de controle e uma antena. Sua função é ler e decodificar os dados que estão em uma etiqueta que passa pela área de cobertura do sinal eletromagnético gerado pela sua antena. Além disso, muitos leitores estão equipados com uma interface adicional (RS 232, RS 485, etc.), para capacitá-los a encaminhar os dados recebidos para outro sistema (PC, sistema de controle..., etc.); seus parâmetros são definidos por *software*.

As etiquetas *RFID* passivas não usam um transmissor de rádio; em vez disso, elas usam modulação da energia refletida do sinal de radiofrequência, emitida pelo leitor, como mostrado nas figuras a seguir, permitindo de maneira simples o entendimento da modulação do sinal retroespalhado na antena de uma etiqueta de *RFID*.

A Figura 6 mostra uma onda sendo radiada de uma antena transmissora para uma antena receptora. Se a antena receptora estiver conectada a uma carga que apresente uma baixa impedância ou uma baixa resistência ao fluxo de corrente, como por exemplo, um curto-circuito, então, uma corrente flui na antena receptora, ou seja, a corrente que circula na antena de transmissão provoca uma tensão induzida na antena receptora. Essa corrente induzida na antena receptora não é diferente da corrente induzida na antena transmissora, pois o princípio da reciprocidade diz que qualquer estrutura que recebe uma onda também pode transmitir uma onda.



Figura 6 - Onda radiada por uma antena transmissora em direção a uma antena receptora

Fonte: D. M. DOBKIN, The RF in RFID, Second Edition, USA, Elsevier (2008)

A onda radiada pode fazer o seu caminho de volta para a antena transmissora, induzir uma tensão e, portanto, produzir um sinal que pode ser detectado: um sinal retroespalhado, como mostrado na Figura 7.



Figura 7 - Sinal de retroespalhamento – Baixa impedância

Fonte: D. M. DOBKIN, The RF in RFID, Second Edition, USA, Elsevier (2008)

Por outro lado, se uma antena receptora estiver conectada a uma carga que apresente uma alta impedância ou uma alta resistência ao fluxo de corrente, como por exemplo, um circuito aberto, então, nenhuma corrente flui na antena receptora, ou seja, não há tensão induzida na antena, como mostrado na Figura 8.





Fonte: D. M. DOBKIN, The RF in RFID, Second Edition, USA, Elsevier (2008)

A Figura 9 mostra um sistema básico *RFID*, em que as respostas das etiquetas para o leitor são fornecidas quando existe uma comutação de sua impedância de entrada entre alta e baixa, para assegurar uma diferença significativa no sinal de retroespalhamento. Assim, os dados armazenados na memória da etiqueta são enviados de volta para o leitor por meio de um sinal modulado retroespalhado (40) (26). Essas etiquetas podem estar presentes em pessoas, animais, produtos, embalagens, enfim, podem ser usadas em diversas aplicações.





Fonte: D. M. DOBKIN, The RF in RFID, Second Edition, USA, Elsevier (2008)

Podemos ver um sinal completo de *RFID* na Figura 10, em que o sinal transmitido no link direto (leitor para etiqueta) é uma onda contínua (*CW*) que não carrega nenhuma informação. No período de interrogação do leitor "*burst*" de dados são enviados para a etiqueta. No *link* reverso (etiqueta para leitor), os dados são enviados de volta para o leitor pela modulação do sinal disperso ou sinal retroespalhado, ou ainda, o sinal de radiofrequência que reflete na etiqueta e retorna para o leitor. Isso acontece quando a impedância da etiqueta é alterada pelo chaveamento e de acordo com os dados a serem transmitidos (26). Em essência, o leitor "grita" para as etiquetas e a etiqueta "sussurra" de volta para o leitor.





Fonte: EPCglobal Tag Performance Parameters and Test Methods Version 1.1.3 (2008)

2.3. ALGUMAS APLICAÇÕES DO SISTEMA RFID

As Figuras abaixo mostram algumas aplicações de RFID.



Figura 11 - Cobrança de pedágio

Fonte: www.maismorumbi.com.br/noticias/pedagio-eletronico-tera-preco-menor-plano-pre-pago/ (2012)

Figura 12 - Controle de acesso



Fonte: www.hotfrog.com.br (2010)



Figura 13 - Varejo controle de mercadorias

Fonte: www.textilia.net (2011)

Figura 14 - Controle bovino



Fonte: www.epocanegocios.globo.com (2010)



Figura 15 - Hospitalar

Fonte: www.diytrade.com (2014)



Figura 16 - Logística

Fonte: www.loginteriorsp.blogspot.com.br (2009)

3. DISPOSITIVO RFID

3.1. DISPOSITIVOS RFID - ETIQUETAS COMPACTAS

3.1.1. DISPOSITIVO RFID

A etiqueta *RFID* encontra-se dentro da classe de dispositivos de rádio denominado *transponder*. Esse tipo de dispositivo pode ser implementado em pessoas, animais, equipamentos, embalagem, dentre outros. A etiqueta *RFID* passiva não possui bateria (ou outra fonte de energia) interna para o seu funcionamento. Em vez disso a etiqueta aproveita a energia enviada pelo leitor para alimentar todos os blocos do *microchip* e transmitir os dados que estão armazenados em sua memória. Essa transmissão acontece através do sinal retroespalhado (*backscatter)*, que é o principal meio de comunicação sem fio entre uma etiqueta *RFID* passiva e um leitor. O chaveamento da impedância de entrada do *microchip* entre os estados de impedância alta e baixa interrompe o fluxo de corrente através da antena modulando o sinal RF retroespalhado (*backscattered*) emitido pelo leitor, Figura 17, (26), ou seja, deflexão da radiação por dispersão ou espalhamento em uma direção oposta à direção da onda incidente. Uma etiqueta passiva normalmente apresenta uma constituição simples e com um número de elementos reduzido.



Figura 17 - Sinal retroespalhado modulado usando um transistor como chave

Fonte: D. M. DOBKIN, The RF in RFID, Second Edition, USA, Elsevier (2008)

Sendo assim, é necessário que um *microchip* de uma etiqueta possua uma unidade digital lógica responsável pela implementação do protocolo de

comunicação, uma memória interna para armazenamento de dados, uma interface analógica de RF capaz de retificar a energia do sinal RF em potência DC e um modulador para modular a onda recebida do leitor, como mostrado na Figura 18.

As etiquetas com a capacidade de leitura e escrita são as mais versáteis, pois podem ser reprogramadas inúmeras vezes. Tipicamente esse número pode ultrapassar 10.000 vezes, permitindo constantes atualizações das informações contidas na sua memória.



Figura 18 - Diagrama em blocos de um microchip RFID

Fonte: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/SL3S1003_1013.pdf (2014)

Devido à ausência de bateria, a etiqueta passiva pode ter uma longa vida de funcionamento sem que seja necessário qualquer tipo de manutenção. Pode suportar condições ambientais hostis sem prejudicar o seu funcionamento, é normalmente menor do que as etiquetas ativas, que usam baterias, e a sua produção em massa proporciona custos de produção baixos (na casa dos centavos de Reais).

Na comunicação entre o leitor e a etiqueta, o leitor terá sempre a tarefa de comunicar em primeiro lugar, pois a etiqueta necessita da energia radiada pelo leitor para funcionar. Por esta razão, em um sistema *RFID* passivo, o leitor deve estar constantemente transmitindo sinais de RF para conseguir detectar a presença de uma etiqueta. Além da função de recepção e transmissão de dados para o leitor, a

antena da etiqueta tem como missão captar energia do sinal recebido para alimentar o *microchip*.

Essa antena está fisicamente conectada ao *microchip* e pode ter diversos formatos que dependem da aplicação, do espaço disponível, das frequências, entre outros. As dimensões da antena são, normalmente, muito maiores que as dimensões do *microchip*, razão pela qual o tamanho da antena é quem determina o tamanho da etiqueta.

As etiquetas *RFID* passivas podem ser encontradas em dois formatos, o rígido e o flexível atendendo a demanda de cada sistema *RFID*. A Figura 19 mostra alguns modelos de etiquetas com encapsulamento rígido.



Figura 19 - Etiquetas RFID com encapsulamento rígido

Fonte: www.rfid-webshop.com (2014)

A Figura 20 mostra alguns modelos de etiquetas flexíveis com diversas geometrias de antenas.



Figura 20 - Modelos de antenas para etiquetas RFID passivas 900 MHz

Fonte: www.alientechnology.com/tags (2014)

3.1.2. FREQUÊNCIAS DE OPERAÇÃO

As bandas de funcionamento dos sistemas *RFID* estão apresentadas na Figura 21, o espectro de frequência é fortemente disputado, daí a necessidade de um controle muito rigoroso por parte de entidades reguladoras de cada país.



Figura 21 - Faixa de frequência

Fonte: http://www.congressorfid.com.br/rfid/ (2011)

Esse controle é realizado a nível nacional, tornando-se por vezes, complexo encontrar um consenso mundial para as definições de bandas de frequência para funcionamento de uma dada tecnologia. Embora não tenha sido possível encontrar uma banda única de funcionamento comum em todo o mundo para *RFID*, um primeiro passo foi dado, dividindo em três grandes regiões regulamentadas, como mostrado na Figura 22. Na região um estão a Europa, a África e o Norte da Ásia, na região 2 estão as Américas e na região 3 o Sul da Ásia e a Oceania.



Figura 22 - Faixa de frequência por região

Fonte: http://www.congressorfid.com.br/rfid/ (2011)

3.1.3. IMPEDÂNCIA COMPLEXA DO MICROCHIP

Para o desenvolvimento da etiqueta *RFID*, utilizamos o *microchip RFID strap ou alça*, chamado de *Higgs 4* modelo ALC-370-FS-CU do fabricante *Alien Technology*. Esse dispositivo *RFID* é composto por um *microchip* com dois *pads* de contato de grandes dimensões montado sobre um filme de poliimida, que é considerado um polímero de alto desempenho devido sua elevada estabilidade térmica e boas propriedades mecânicas. O *microchip RFID strap* é normalmente comercializado em forma de rolos, como mostrado na Figura 23. A grande vantagem de usar o *strap* é a facilidade de manipulação do dispositivo e que permitiu uma conexão fácil e rápida com a antena.



Figura 23 - Microchip RFID montado sobre o strap

Fonte: HiggsTM 4 Strap Datasheet Addendum (2012)

Informações mais detalhadas do *microchip* de *RFID* strap considerado no desenvolvimento da etiqueta podem ser encontradas em (42), esse *microchip* apresenta um circuito RC paralelo como mostrado na Figura 24. Com as informações obtidas do *datasheet*, foi possível obter o valor teórico da impedância complexa de entrada do *microchip*, a qual deverá ser levada em consideração na simulação para o projeto da antena.



Figura 24 - Circuito RC visto pela antena

Fonte: http://www.alientechnology.com/wp-content/uploads/Alien-Technology-Higgs-Strap.pdf (2014)

A Figura 25 apresenta as características elétricas e as condições de operação do *microchip* fornecidas pelo *datasheet* do fabricante. Duas informações importantes
para definirmos a impedância de entrada do *microchip* podem ser retiradas da Figura abaixo, que são: a resistência e a capacitância de entrada paralela equivalente (43).

Parameter	Symbol	Units	Min.	Тур.	Max.	Conditions	Comments
RF Frequency	RF	MHz	860	915	960		
RF parallel equivalent input capacitance	Cin	pF		0.85 (chip alone) 0.95 (SOT/Tag) 0.89 (strap)		25 °C	@ minimum operational power
RF parallel equivalent input resistance	Rn	KΩ		1800]	
Minimum RF communication power	P _{com} (min)	dBm		-20.5		TARI=25µs, 25 °C	With 2dBm directivity of dipole
Minimum RF programming power	P _P (min)	dBm		-17		25 °C, @ matched parameters as specified for example in Fig 5.1	Word write (16-bits). With 2dBm directivity of dipole
NVM Use model		cycles	100,000			At 25°C	
NVM data retention		years	50				

Figura 25 - Características elétricas e condições de operação do microchip Higgs™4

Fonte: http://www.alientechnology.com/wp-content/uploads/Alien-Technology-Higgs-4-IC-Datasheet.pdf (2014)

Um dos fatores mais importante para se obter um bom funcionamento de uma etiqueta *RFID* é garantir a máxima transferência de energia da antena para o *microchip*, essa transferência deve ser a mais eficiente possível e esse fator depende de um bom casamento de impedância entre a antena e o *microchip* a qual chamamos de Z_{ant} para impedância complexa da antena e de Z_{ci} para a impedância complexa do *microchip*.

O fabricante desse *microchip* nos fornece, através do catálogo, o valor de entrada em paralelo da resistência e da capacitância, como pode ser visto na Figura 25. É sugerido nessa dissertação trabalhar com um circuito em série ao invés do paralelo. Sendo assim, foi convertido o circuito paralelo para um circuito em série e calculado o valor da impedância de entrada do *microchip* Z_{ci} , este é o primeiro passo utilizado para começarmos o desenvolvimento da antena no qual será demonstrado no próximo capítulo.

A impedância e a admitância de circuitos RC série e paralelo apresentam um comportamento que depende da frequência. Existem valores de frequências que fazem com que a parte reativa complexa se anule, tornando a impedância puramente resistiva, para estas frequências dizemos que o circuito esta em

ressonância ou que esta é uma frequência de ressonância. Neste trabalho foi utilizada como referência para os cálculos e as simulações a frequência de 915 MHz, pois, a faixa de frequência disponível no Brasil para *RFID* é de 902 MHz a 907 MHz e de 915 MHz a 928 MHz, regulamentada pela Anatel, Agência Nacional de Telecomunicações.

A equação abaixo representa a impedância complexa do *microchip* para o circuito em série.

$$Z_{ci} = R_S - jX_S \tag{1}$$

Sendo que a parte real representa a resistência de perdas em série R_S e a parte imaginária representa a reatância em série X_S .

Para o modelo em paralelo mostrado na Figura abaixo, apresentamos os valores da resistência e capacitância fornecidas pelo fabricante, representando a impedância de entrada do *microchip*.



Fonte: Robson Valmiro (2014)

O circuito em paralelo mostrado na Figura 26 pode ser representado por um circuito em serie. Os valores de R_S e C_S formam o circuito em série, equivalente ao circuito em paralelo, como mostrado na Figura 27.

Figura 27- Circuito RC equivalente para o modelo em série



Fonte: Robson Valmiro (2014)

A impedância complexa do circuito série é dada pela eq.(2).

$$Z_{ci} = R_S - jX_S \Omega$$
 (2)
 $Z_{ci} = 20,97 - j193,16\Omega$

3.1.4. ANTENA DIPOLO

A antena dipolo é o tipo mais simples de antenas (44). Como o próprio nome sugere, é uma antena com dois polos sendo simples de se fabricar. Consiste basicamente de dois condutores radiantes, em geral de mesmo comprimento separados por um espaço central (45). Para aplicações em *RFID* os condutores podem ser impressos sobre um substrato, isto é planares sendo a antena chamada antena de microfita; no espaço central insere-se um *microchip RFID strap*. Muitas vezes o comprimento total da antena é da ordem de meio comprimento de onda, na frequência que se deseja captar ou transmitir o sinal de RF. Outros comprimentos também podem ser utilizados. O substrato é um material dielétrico e os condutores podem assumir qualquer forma geométrica (46) (47). Por simplicidade, neste trabalho utilizou-se formas geométricas retangulares para as trilhas ou microfitas (48).

Para uma onda senoidal propagando-se no espaço livre, o comprimento de onda (λ) equivale à distância entre dois máximos de sua intensidade, sendo igual à razão entre a velocidade de propagação (c) e a frequência (f).

Normalmente é adotado para fabricação de uma antena um comprimento 5% menor do que seria o seu valor teórico com base no comprimento de onda. Isto se deve ao acumulo de cargas nas bordas, provocando um aumento no comprimento elétrico da antena. Para minimizar esse efeito, o comprimento físico da antena dipolo de um comprimento de onda na frequência de 915 MHz é:

$$L=0,95*\lambda=0,95\frac{c}{f}=0,95*\frac{300.10^{6}}{915.10^{6}}\cong31,148\,cm$$
(3)

Em geral, para antenas dipolo o comprimento é escolhido entre $\frac{\lambda}{4}$ e λ .

Como indicado anteriormente, o dipolo mais amplamente usado é o de metade do comprimento de onda, para o qual:

$$L=0,95*\frac{\lambda}{2} \tag{4}$$

Para o dipolo de meio comprimento de onda, mostrado na Figura 28, temos:

$$L_1 = 0,95*\frac{\lambda}{2} = \frac{31,148}{2} = 15,574 \, cm$$



Figura 28 - Antena Dipolo de comprimento x/2

Fonte: Robson Valmiro (2014)

As trilhas, também chamada de microfita, são os elementos radiadores da antena e possuem uma espessura muito pequena quando comparada ao comprimento de onda no espaço livre. Quanto à sua forma, a trilha influencia na distribuição de corrente e, consequentemente, no campo radiado. Há casos em que o formato geométrico é mais complexo, como por exemplo, a geometria das antenas fractais.

Nesse trabalho é apresentada uma antena dipolo fabricada utilizando uma tinta condutiva. As principais vantagens das antenas de microfita para *RFID* são:

- Adaptáveis a superfícies planares e não planares;
- Sustentação mecânica com pequeno peso e volume reduzido;
- Baixo custo de fabricação com uma produção em série;
- Facilmente construída com pequena espessura.
- Polarizações lineares ou circulares podem ser conseguidas, em alguns casos, pela simples troca da posição do ponto de alimentação;
- Dependendo do formato das trilhas, as antenas podem ser versáteis em termos de frequência de ressonância, polarização e impedância.
- As antenas de microfita são compatíveis com projetos modulares, assim, dispositivos de estado sólido podem ser conectados ou integrados diretamente no substrato, neste caso o *microchip;*
- As linhas de alimentação e circuitos de casamento podem ser fabricadas simultaneamente com a estrutura da antena, no caso de etiquetas para *RFID* ativas.

Contudo, as antenas de microfita apresentam algumas desvantagens em relação às antenas convencionais de micro-ondas; são elas:

- Perdas consideráveis, mesmo com baixo ganho;
- Baixo ganho;

Uma linha de microfita não pode suportar uma onda TEM pura, uma vez que a velocidade de fase da onda TEM na região do ar é a mesma que da luz (*c*), enquanto que a velocidade de fase da onda TEM que existiria na região do dielétrico depende da permissividade dielétrica do material, assim, uma condição de casamento entre a interface dielétrica e o ar fica impossível de satisfazer. Os campos exatos da linha de microfita constituem-se de onda *TM* e *TE* e requerem uma técnica de analise avançada. Como para este trabalho a espessura do substrato é muito menor que o comprimento de onda (h<< λ) os campos são quase TEM. Vamos considerar que os campos são os mesmos para os casos estáticos DC, e as aproximações para a velocidade de fase e constante de propagação podem ser obtidas considerando soluções estáticas ou quase estáticas (49), sendo assim, a velocidade de fase e a constante de propagação podem ser expressas como:

Velocidade de fase do campo TEM na região do dielétrico:

$$v_p = \frac{C}{\sqrt{\mathcal{E}_e}} \tag{5}$$

Constante de propagação na região do dielétrico:

$$\beta = k_0 \sqrt{\varepsilon_e}$$
 (6)

E_r: Permissividade dielétrica do substrato

 \mathcal{E}_{e} = Permissividade dielétrica efetiva do substrato, dado que algumas linhas de campo estão na região dielétrica e outras estão no ar, satisfazendo a relação abaixo:

$$1 < \mathcal{E}_e < \mathcal{E}_r$$

Essa relação depende da Permissividade dielétrica do substrato, da espessura do substrato, da largura do condutor e da frequência.

No Apêndice A é apresentado a fórmula aproximada de projeto para cálculo da permissividade dielétrica efetiva da linha de microfita. Os resultados são aproximações da curva de ajuste para soluções quase estáticas e que pode ser visto em (50).

A Figura 29 mostra as dimensões da antena dipolo de microfita.



Figura 29 - Antena dipolo em microfita

A antena de microfita apresentada na figura acima possui um tamanho físico que é aproximadamente metade do comprimento de onda na frequência de 915 MHz. Na prática existem outras variações do dipolo, como por exemplo, o dipolo dobrado e o dipolo com extremidades dobradas; até mesmo o dipolo dobrado apresenta outras variações como mostrado em (51) (52) (53) (54) (55).

3.1.5. ANTENA DIPOLO PARA SISTEMAS RFID

Diferentemente das antenas projetadas para impedância de entrada de 50 Ω , as antenas para sistemas *RFID* devem apresentar impedância complexa indutiva para permitir um bom casamento com o *microchip* que normalmente apresenta impedância complexa, porém, capacitiva. Neste sentido as antenas não devem ser projetadas para impedância de 50 Ω .

Como descrito anteriormente, em virtude do campo eletromagnético propagarse no ar e no substrato é necessário considerar a permissividade do substrato no desenvolvimento da antena. A permissividade de um material é usualmente dada em relação à do vácuo, denominando-se permissividade relativa também conhecida como permissividade dielétrica (\mathcal{E}_r) . As antenas de microfita aqui analisadas consistem de elementos radiantes montados sobre substratos dielétricos. Os

Fonte: Robson Valmiro (2014)

substratos usados neste trabalho foram fibra de vidro (FR4) com 1,6 mm de espessura e uma permissividade dielétrica de 4,8 (56) e papel com espessura de 260 µm e permissividade dielétrica de 3,28. Esses valores foram utilizados durante as simulações das antenas

Como mostrado na eq.(7), a antena deve apresentar impedância complexa, tal que, proporcione o melhor casamento para permitir a máxima transferência de energia para o *microchip*. Para se alcançar esse objetivo é necessário que as impedâncias do *microchip* e da antena sejam conjugadas, isto é, $(Z_{ant} = Z_{ci}^{*})$ (57).

Para exemplificar, utilizamos a antena mostrada na Figura 30 para apresentarmos as equações que definem o parâmetro S₁₁ e a potência disponível nos terminais da antena dipolo proposta.



Figura 30 - Antena Dipolo de microfita

Fonte: Robson Valmiro (2014)

A Figura 31 mostra o circuito equivalente da antena dipolo proposto neste trabalho (58).





Fonte: Robson Valmiro (2014)

A Figura 32 representa a junção da antena com o *microchip;* podemos tratar eletricamente a antena como uma fonte de tensão dada como V_{ant} em série com uma impedância complexa, cuja parcela resistiva é a resistência de radiação R_{rad} . Quaisquer indutâncias ou capacitâncias estão incluídas na parcela reativa X_{ant} (59). A impedância do *microchip* pode ser aproximada por uma impedância linear complexa, apesar dos diodos existentes na sua entrada não serem dispositivos lineares (60). Mesmo com o interesse em simplificar o estudo e tratando o *microchip* como carga linear, devemos sempre manter em mente que os harmônicos gerados pelo dispositivo não são necessariamente desprezíveis e podem afetar a conformidade do leitor com a etiqueta.



Figura 32 - Casamento de impedância entre a antena e o microchip

Fonte: Robson Valmiro (2014)

A máxima transferência de energia ocorre quando as reatâncias da antena e do *microchip* são anuladas pelo casamento (61). Nessa condição a parte real da impedância da antena deve ser igual à parte real da impedância do *microchip*. As equações a seguir mostram o coeficiente de reflexão, a onda de energia, a potência disponível e a potência entregue ao *microchip* (62) (63).

$$Z_{ci} = Z_{ant}^*$$
(7)

O parâmetro S_{11} para uma fonte e uma carga complexa, é dado por:

$$S_{11} = \Gamma = \frac{b_1}{a_1} = \frac{Z_{ci} - Z_{ant}^*}{Z_{ci} + Z_{ant}}$$
(8)

A intensidade da onda incidente na porta 1 é representada por a_1 e a intensidade da onda que sai, por b_1 . Por definição, as correntes que entram nas portas são contadas de forma positiva e as correntes que saem das portas são negativas. A intensidade da onda incidente a_1 é derivada da tensão da onda que fluiria para uma carga casada.

As intensidades a₁ e b₁ são definidas como:

$$a_{1} = \frac{V_{inc} + Z_{ant} \cdot I_{inc}}{2 \cdot \sqrt{\operatorname{Re}(Z_{ant})}} = \frac{\operatorname{Tens}\tilde{a}o_da_onda_incidente_Porta_1}{2 \cdot \sqrt{\operatorname{Re}(Z_{ant})}}$$
(9)

$$b_1 = \frac{V_{inc} - Z_{ant}^* \cdot I_{inc}}{2 \cdot \sqrt{\operatorname{Re} \cdot (Z_{ant})}} = \frac{\operatorname{Tens}\tilde{ao}_da_onda_refletida_Porta_1}{2 \cdot \sqrt{\operatorname{Re} \cdot (Z_{ant})}}$$
(10)

Nota-se que a dimensão de a_1 e b_1 é raiz quadrada de unidade de potência. A potência em direção à porta 1, P_{1inc} , é a potência disponível da fonte, enquanto que a potência que sai da porta 1, P_{1refl} , é a potência associada à onda refletida.

A potência disponível é dada por:

$$P_{1inc} = |a_1|^2 = \frac{|V_{ant_inc}|^2}{4.\operatorname{Re}(Z_{ant})} =$$
(11)

$$P_{1\,refl} = \left| b_1 \right|^2 = \frac{\left| V_{ant_refl} \right|^2}{4.\text{Re}(Z_{ant})} =$$
(12)

A potência entregue ao microchip é dada pela equação abaixo:

$$P_{ci} = P_{1inc} \left(\left| a_1 \right|^2 - \left| b_1 \right|^2 \right)$$
 (13)

Os indutores e resistores da Figura 32 podem ser calculados utilizando-se equações aproximadas para indutores de microfita e resistências associadas aos indutores (64).

Nota-se que, os valores de entrada das unidades dimensionais para l, W e t são inseridos em mm nas equações eq.(14) e eq.(16).

Seja:

l : Comprimento do condutor (mm);

W: Largura do condutor (mm);

t: Espessura do condutor (mm);

h: Espessura do substrato;

*L*₀: Valor da indutância no espaço livre;

 R_{S} : Resistência de folha dado em Ω /quadrado;

L: Indutância efetiva.

47

$$L(nH) = L_0 . K_g$$

$$L(nH) = 0, 2.l \left[ln \left(\frac{l}{W+t} \right) + 1,193 + 0,2235 . \frac{W+t}{l} \right] . K_g$$
(14)

Na equação acima, *Kg* é o fator de correção que leva em conta o efeito de um plano terra que tende a diminuir o valor da indutância quando o plano terra é aproximado do indutor.

$$K_g = 0,57 - 0,145.\ln\frac{W}{h}$$
 para $\frac{W}{h} > 0,05$ (15)

A resistência associada ao indutor pode ser encontrada por:

$$R = \frac{R_{s} . l . K}{2.(W+t)}$$

$$K = 1, 4+0, 217.\ln\left(\frac{W}{5.t}\right) \qquad 5 < \frac{W}{t} < 100 \qquad para \ microfita$$
(16)

K é o fator de correção que leva em conta a aglomeração de corrente nos quantos do condutor.

4. MATERIAIS PARA DISPOSITIVO RFID

4.1. FR4 COMO SUBSTRATO

FR4 é um material isolante composto de fibra de vidro e resina epóxi. É usado principalmente na indústria de placas de circuito impresso. "FR" significa flame retardant ou retardante de chamas. Esse material está em conformidade com o padrão UL94, estabelecido pelo laboratório americano de controle de qualidade *Underwriters Laboratories* (UL). Essa organização, fundada em 1894 nos Estados Unidos realiza certificação de produtos e avalia sua segurança onde é examinada a inflamabilidade e o comportamento do material perante o fogo. O FR-4 emprega tipicamente bromo para conferir a ele propriedades de resistência ao fogo.

As placas de FR-4 são laminadas sob alta pressão e possuem uma boa resistência mecânica. Com absorção de água perto de zero, o FR-4 é comumente usado como isolante elétrico. O material é conhecido por manter suas propriedades mecânicas e de isolação elétrica, tanto em condições secas quanto úmidas. Estes atributos, juntamente com um bom processo de fabricação, permite sua utilização em uma ampla variedade de aplicações elétricas e mecânicas. As propriedades elétricas do FR-4 são muito estáveis ao longo de uma ampla faixa de frequência e temperatura e é adequado para projetos de circuito impresso para micro-ondas. Sua permissividade dielétrica permanece estável entre -55 ° C e + 125 ° C até 20 GHz (65).

National Electrical Manufactures Association (NEMA), também é uma autoridade reguladora para o FR-4 e outros tipos de laminados isolantes. Designações da categoria para laminados compostos de fibra de vidro e resina epóxi são: G10, G11, FR-4 e FR5. Destes, o FR-4 é o mais amplamente usado nos dias de hoje.

O FR4 utilizado neste trabalho apresenta uma permissividade de 4,8 e uma tangente de perdas de 0,017 em 1 GHz. Possui espessura de 1,6 mm e camada de cobre de 35 μ m de espessura ou 1oz/pe² (56).

4.2. PAPEL COMO SUBSTRATO PARA ANTENAS RFID

Há algumas características do papel que o torna um bom candidato a ser utilizado como substrato para fabricação de dispositivos eletrônicos com aplicações em RF. O papel é de base orgânica e amplamente disponível; sua alta demanda de consumo e a produção em massa, como mostrado na Figura 33 (4), o torna um dos materiais mais baratos de todos os tempos. Uma produção em massa de etiquetas *RFID* que usar papel como substrato dielétrico, poderá ter seu custo bastante reduzido.





Fonte: http://www.sdb.com.br (2014)

Com um revestimento apropriado o papel pode tornar-se hidrofóbico, resolvendo o problema de absorção de água (66), como mostrado na Figura 34, e ser adequado para o uso na indústria de produtos eletrônicos. Através de processos de impressão rápida, tais como, a técnica de escrita direta que utiliza impressora jato de tinta e a técnica de serigrafia, é possível fabricar de forma eficiente, antenas de *RFID* utilizando tinta condutiva, ao invés da tradicional técnica de deposição de cobre convencionalmente empregada para a fabricação dessas antenas. Adicionalmente, acrescentando-se determinados produtos têxteis, o papel pode tornar-se um material retardante de fogo. Não menos importante, o papel é um dos materiais mais ecologicamente corretos e que poderia definir as bases para uma geração de eletrônica de RF verdadeiramente "*Green*".



Figura 34 - Gota de água sobre um substrato de papel

Fonte: http://hypescience.com/papel-magnetico-e-a-prova-dagua-invencao/ (2014)

Existe uma ampla disponibilidade de diferentes tipos de papel, que variam em densidade, revestimento, espessura, textura e propriedades elétricas, como a permissividade dielétrica e a tangente de perdas. Devido a isto, a caracterização dielétrica do papel torna-se um passo essencial antes de se considerar à fabricação de um circuito de RF sobre o mesmo.

Entre as necessidades críticas para a seleção do tipo adequado de papel para aplicações em RF, está sua capacidade de não absorver água, a capacidade de permitir a formação de vias condutoras por impressão, a aderência do material condutor e o baixo custo. Para este trabalho foi utilizado um papel comercialmente disponível no mercado com revestimento hidrofóbico, de espessura 260 µm ± 3 µm em tamanho A4 (210 x 297 mm). Esse papel resulta em boa qualidade de impressão com alta resolução e secagem rápida. A caracterização elétrica desse tipo de papel e os resultados obtidos mostraram a viabilidade do uso do papel em frequências de UHF. Neste trabalho, papel é utilizado como substrato para a fabricação de uma etiqueta *RFID*. O papel empregado possui permissividade dielétrica $\varepsilon_r = 3, 28$ e tangente de perdas tan $\delta = 0, 061$.

O papel, por ser um dos produtos de maior consumo mundial, potencialmente pode revolucionar o mercado de produtos eletrônicos. Ele poderia eventualmente, representar o primeiro passo para a criação de uma geração de produtos eletrônicos em um ambiente amigável por ser um produto de base orgânica.

4.3. TINTAS PARA IMPRESSÃO DO DISPOSITIVO RFID

Para a construção das trilhas condutoras impressas, duas tintas comerciais foram utilizadas, uma já modificada para utilização em impressora *inkjet* e a outra para ser utilizada no método serigráfico.

4.3.1. TINTA PARA IMPRESSORA INKJET

A tinta para impressora inkjet CCI-300 fabricada pela Cabot é composta de nanopartículas de prata, e apresenta viscosidade na faixa de 12 cP, tensão superficial de 33 mN/m, e contém 19% - 21% do seu peso em nanopartículas de prata. A Cabot Conductive Ink CCI-300 é uma tinta para uso geral, projetada para uso em impressora jato de tinta e apresenta boas características condutoras sobre uma variedade de substratos. Ela proporciona uma superfície modificada com nanopartículas de prata e baixa resistividade quando impressa sobre papel, FR4, poliéster, poliimida, vidro, silício, etc.. Pode ser curada em temperaturas em torno de 150°C.

A Figura 35, reproduzida do *datasheet* da tinta (68), apresenta a relação entre a resistividade e o tempo de cura em 4 temperaturas.



Figura 35 - Gráfico resistividade ($\mu \Omega^*$ cm) x tempo (min)

Fonte: Cabot (2013)

A condutividade dessa tinta varia entre 0,4 a 2.5x10⁷ S/m, dependendo da espessura, da temperatura e da duração da cura. Na Figura 36, como também pode ser visto em (67), existe uma diferença na estrutura da tinta quando curada a 100 °C e a 150 °C durante 15 minutos. Na temperatura de 100 °C existem lacunas maiores entre as partículas, resultando numa ligação mais pobre. Quando a tinta é curada a 150 °C, as partículas começam a se expandir, e as lacunas começam a diminuir, o que garante a obtenção de um material mais condutivo, permitindo um fluxo de elétrons praticamente contínuo (69).



Figura 36 - Tinta CCi300 de prata após cura por 15 minutos a 100°C (a) e 150°C (b)

Fonte: A. RIDA, L. YANG, R. VYAS, MANOS. M. TENTZERIS. Conductive Inkjet-Printed antennas on Flexible Low-Cost Paper-Based Substrates for RFID and WSN Applications, IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 51, (2009)

4.3.2. TINTA DE PRATA PARA SERIGRAFIA

A tinta para serigrafia 5064H fabricada pela DuPont é composta de 70% de seu peso em de prata, e apresenta viscosidade entre 10 – 20 Pa.S e cobertura de 170 cm²/g usando uma tela de 200 fios/cm. Ela foi desenvolvida para aplicações onde a eficiência e o custo, são necessários. Este produto utiliza uma única combinação de pó de prata com resina à base de solvente, fornecendo uma boa condutividade quando aplicada pelo método de serigrafia ou "*silkscreen*".

O processo de cura da tinta 5064H é tipicamente a manutenção da amostra à temperatura de 130 °C que assegura a remoção completa do solvente, permitindo alcançar a menor resistência possível. Nessas condições pode-se atingir uma

resistência menor que 6 m Ω /quadrado para uma espessura de 25 µm. A tinta DuPont 5064H apresenta boa capacidade para impressão em tela, alta condutividade elétrica e boa aderência sobre vários tipos de substrato (70).

A condutividade de um material pode ser encontrada utilizando-se as equações apresentadas adiante, quando é conhecido o valor da resistência total da trilha condutora ou da resistência de folha, que também é conhecida como resistência por quadrado.

A resistência de folha (Rs) é a medida da resistência para materiais finos que possuem espessura uniforme. Ela é aplicável a estruturas bidimensionais de filmes fino, onde fica implícito que a corrente flui paralelamente ao plano da folha e não perpendicular a ela.

Para um condutor tridimensional regular, como mostrado na Figura 37, a resistência (71) pode ser escrita como:



Figura 37 - Condutor fino tridimensional

Fonte: Robson Valmiro (2014)

L: Comprimento -- *W*: Largura -- *t*. Espessura -- *S*: Área -- *J*: Densidade de corrente -- *E*: Campo elétrico -- σ : Condutividade -- ρ : Resistividade -- *V*: Tensão -- *I*: Corrente.

A corrente que circula pelo condutor é dada como:

55

$$I = J \cdot S \tag{17}$$

onde S é a área do condutor dada por:

$$S = W.t \tag{18}$$

A densidade de corrente é dada por:

$$J = \sigma . E \tag{19}$$

Substituindo-se a eq.(18) e (19) na eq.(17) temos:

$$I = \sigma . E . S = \sigma . E . W . t$$
⁽²⁰⁾

A diferença de tensão entre V_1 e V_2 é dada em função do campo elétrico e do comprimento do condutor:

$$V_1 - V_2 = E \cdot L$$
 (21)

Portanto a resistência total é dada por:

56

$$R = \frac{V_1 - V_2}{I} = \frac{E \cdot L}{\sigma \cdot E \cdot W \cdot t}$$
(22)

$$R = \frac{1}{\sigma} * \frac{L}{W.t}$$
(23)

A resistividade pode ser escrita através da equação abaixo, dada por:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \qquad [\Omega.cm] \tag{24}$$

Para:

L = W , teremos $R = R_S$

R_S:Resistência de folha;

R = Resistência total.

onde a eq.(25) fornece a resistência de folha, dada por:

$$R_{s} = \rho \frac{1}{t} = \frac{1}{\sigma} * \frac{1}{t} \qquad \left[\frac{\Omega}{quadrado}\right]$$
(25)

5. TÉCNICAS UTILIZADAS PARA PRODUZIR O DISPOSITIVO RFID

Neste capítulo são apresentadas as técnicas e equipamentos que foram utilizados produzir o dispositivo *RFID*.

5.1. TÉCNICA DE IMPRESSÃO POR JATO DE TINTA (INKJET)

A impressora a jato de tinta utilizada foi a *Dimatix Materials Printer* 2831 (DMP2831), como mostrado na Figura 38. Essa impressora é controlada por um software também fornecido pelo fabricante.



Figura 38 - Impressora Fujifilm Dimatix DMP-2831

Fonte: http://www.dimatix.com (2014)

A DMP2831 é uma impressora a jato de tinta moderna que opera propelindo gota a gota piezoelétricamente (7) (8). Essa impressora pode utilizar tinta com viscosidade entre 8 a 17 centipoise (cP), incluindo tintas condutoras (68). Ao contrário da tradicional técnica de corrosão empregada na fabricação de circuitos impressos, que é um método subtrativo e que gera resíduos na remoção do metal (9), a técnica de escrita por transferência direta (jato de tinta), permite rapidamente fabricar circuitos sem a necessidade de máscara de fotolitografia.

Através da impressão direta sobre substratos, como por exemplo, o papel ou um polímero, nenhum desperdício é gerado, o que representa uma solução econômica e ecologicamente amigável. A impressão é completamente controlada a partir de um computador, e não requer um ambiente de sala limpa. A impressora DMP2831 pode ser dividida em 4 partes principais, como mostrado na Figura 39.



Figura 39 - Foto ilustrativa destacando as 4 partes principais da impressora

Fonte: http://www.fujifilmusa.com/products/industrial_inkjet_printheads/index.html (2014)

a) Carro de impressão: É o suporte físico onde é instalado o cartucho de tinta e a câmera fiducial que é utilizada para o alinhamento e principalmente a visualização da impressão. O cartucho é formado por duas partes, o reservatório para a tinta com capacidade para 10 ml e a cabeça de impressão contendo 16 bicos com canal de 21,5 µm de diâmetro, espaçados de 25 µm um do outro, como mostrado na Figura 40.



Figura 40 - Esquema ilustrativo do cartucho e cabeça de impressão

Fonte: http://www.fujifilmusa.com/products/industrial_inkjet_printheads/index.html (2014)

 b) Mesa Aquecida: Ela é responsável pelo sistema de aquecimento do substrato podendo alcançar até 60 °C, e também pela fixação do substrato;

- c) Estação de limpeza: Onde são executados os ciclos de manutenção da cabeça de impressão.
- d) Drop watcher: Permite a visualização e modificação, em tempo real, da formação da gota e do painel ao redor dos bicos, como mostra a Figura 41.



Figura 41 - Visualização dos bicos

No processo a jato de tinta, a tinta pode ser transferida diretamente para o substrato por meio do bico de impressão. As impressoras que utilizam este processo podem ser classificadas de dois modos em relação à emissão da tinta: o modo gotaa-gota (*Drop on demand - DOD*) piezoeléctrica e o modo contínuo. Nesse trabalho utilizou-se o modo *DOD*, que depende da deformação do material piezoelétrico para provocar uma rápida mudança de volume gerando uma onda de pressão. Nesse modo a onda de pressão ejeta gotas individuais de tinta de um reservatório através de um bico (72) (73), como mostrado na Figura 42.



Figura 42 - Impressão jato de tinta em modo DOD

Fonte: http://www.fujifilmusa.com/products/industrial_inkjet_printheads/index.html (2014)

Fonte: KIPPHAN, HELMUT: Handbook of Print Media (2001)

Informações detalhadas sobre a impressora DMP2831 são encontradas no manual da impressora (8).

5.2. TÉCNICA SERIGRÁFICA (SILKSCREEN PRINTING)

A técnica de impressão serigráfica consiste em depositar uma tinta condutiva pastosa, isto é de alta viscosidade, através de uma tela na qual a tinta passa devido à pressão de um rodo ou puxador. Um padrão feito nesta tela permite que a tinta seja aplicada apenas nas regiões desejadas. A "gravação" da tela se dá por fotossensibilidade, onde uma matriz é preparada com uma emulsão fotossensível e colocada sobre um fotolito. O conjunto, matriz + fotolito, é exposto à luz e uma máscara protetora define a região onde se deseja o padrão. Os pontos escuros do fotolito correspondem aos locais que deixam a tinta passar pela tela. Os pontos claros do fotolito permite a passagem da luz garantindo o endurecimento ou cura da emulsão fotossensível.

A tela é composta de uma moldura para fixação da malha de fios, com uma pressão que garanta a abertura da malha e da emulsão fotossensível durante a aplicação da tinta condutiva. Esses elementos determinam a quantidade de tinta depositada e a resolução. As telas podem produzir espessuras diversas devido a variações no seu processo de fabricação ou por deterioração. A tensão da tela pode diminuir durante seu uso, provocando alteração da quantidade de tinta depositada. As propriedades da malha são importantes para deposição desejada de tinta, sendo que as principais características são:

Densidade: definida como o número de aberturas por unidade de comprimento, e usualmente expresso como nº fios/cm.

Diâmetro do fio: expresso em micrômetros (µm).

A Figura 43 mostra o fotolito utilizado para gerar a tela com o padrão desejado; já a Figura 44 mostra a tela utilizada para imprimir as antenas.

A resolução da tela foi de 70 fios/cm para alcançar uma espessura em torno de 15 µm.



Figura 43 - Fotolito utilizado para fabricação da tela

Fonte: Robson Valmiro (2014)

Figura 44 - Tela para serigrafia.



Fonte: Robson Valmiro (2014).

O processo serigráfico pode ser dividido em duas etapas: A primeira etapa consiste no preenchimento dos orifícios da tela, feito com o rodo durante sua aplicação. A força normal à tela é responsável pelo preenchimento das aberturas na tela, e a força tangencial à tela é responsável pelo movimento do rodo em um ângulo entre 45° e 75° em relação à força normal. A velocidade constante juntamente com as forças com que a tinta é aplicada garante uma uniformidade no condutor impresso, como mostrado na Figura 45.



Figura 45 - Ilustração das forças envolvidas na deposição da tinta (F, F_n e F_t)

Fonte: SANZ, V., SANCHEZ, E. ;TIRADO, M. Influência da Serigrafia sobre a Variação de Tonalidade de Revestimentos Cerâmicos. s.l. Cerâmica Industrial, (1999)

Para uma melhor reprodutibilidade é necessário manter constante as características dos elementos de impressão, tais como a tela, o rodo e a tinta, assim como as variações de operação (74).

A segunda etapa é referente ao método de transferência da tinta para o substrato. É um processo rápido onde atuam as forças de conexão da tinta e as forças que unem a tinta à tela e a tinta ao substrato. Ao se afastar o rodo da zona de impressão, o contato entre a tela e o substrato é desfeito, e a tinta tende a deformarse. Essa deformação ocorre até o ponto de ruptura. Nesse momento parte da tinta deixa a tela e fica aderida ao substrato, como mostra a Figura 46.





Fonte: SANZ, V., SANCHEZ, E. ;TIRADO, M. Influência da Serigrafia sobre a Variação de Tonalidade de Revestimentos Cerâmicos. s.l. Cerâmica Industrial (1999)

5.3. MODELAMENTO COMPUTACIONAL DA ANTENA

Esse item apresenta a simulação de antena dipolo tipo microfita para sistema *RFID* (75) com frequência central em 915 MHz.

A etapa de simulação da antena proposta neste trabalho foi realizada com o programa *CST MWS (Computer Simulation Technology Microwave Studio)*, uma ferramenta especializada para simulação em 3D que permite a análise de dispositivos de alta frequência, tais como filtros, acopladores, antenas, dentre outros.

O CST MWS possui módulos solucionadores no domínio do tempo e no domínio da frequência, utiliza o método de elementos finitos *FEM* e o método dos momentos *MoM*, cada um oferecendo vantagens distintas em cada caso.

5.3.1. MODELAMENTO DO PROTÓTIPO 1 - DIPOLO RETO

Nesta seção apresentamos a simulação de uma antena dipolo de meio comprimento de onda, com frequência central de 915 MHz. A antena foi projetada para ser confeccionada utilizando a tinta condutiva 5064H fabricada pela empresa DuPont. A impressão da antena sobre papel utiliza a técnica de serigrafia.

Utilizou-se um papel comercialmente disponível com revestimento hidrofóbico, de baixo custo, de espessura de 260 µm ± 3 µm e tamanho A4. Esse substrato dielétrico apresenta permissividade dielétrica $\varepsilon_r = 3,28$ e tangente de perdas tan $\delta = 0,061$. A faixa de operação da antena é entre 900 MHz e 930 MHz. O modelo foi projetado utilizando os recursos computacionais do programa *CST MWS*.

O projeto teve início com duas trilhas retangulares de comprimento $L_1 e L'_1$, alinhadas e espaçadas de 3 mm uma da outra. As larguras W e S foram mantidas fixas e seus valores estão indicados na Tabela 1. A antena também possui *as* trilhas S_1 , $S'_1 e S_2$ que representam indutâncias para o casamento da impedância com o *microchip*, como mostrado na Figura 56. A reatância indutiva criada por essas trilhas é responsável pelo cancelamento da reatância capacitiva do *microchip*. No projeto da antena é necessário considerar que se deseja uma impedância complexa indutiva igual ao valor conjugado da impedância do *microchip Higgs* 4 da *Alien Technology.*

No caso a impedância da antena deve ser:

$$Z_{ant} = 20,97 + j193,16\Omega$$

O modelamento computacional é uma ferramenta valiosa para o projeto, pois na fabricação de protótipos evita-se desperdício de material e principalmente perda de tempo empregado na atividade. As dimensões para o modelo simulado e otimizado são mostradas na Figura 47.



Figura 47 - Dimensões da antena dipolo reto

Três parâmetros da antena foram variados para se obter por simulação a impedância desejada.

Os parâmetros abaixo possuem valores fixos:

- ✓ *chip*: espaço para conectar o *microchip*;
- ✓ *tinta*: espessura da trilha do condutor;
- \checkmark **S**: largura das trilhas S₁, S'₁ e S₂;

Fonte: Robson Valmiro (2014)

Os parâmetros que sofreram alterações durante o processo de simulação e otimização são:

- ✓ L_1 : polo da antena, sendo L'_1 simétrico a L_1 ;
- \checkmark **S**₁ e **S**₂: trilhas para formar a indutância, sendo S'₁ simétrico a **S**₁

Como descrito anteriormente, o modelo proposto foi projetado através da utilização de recursos computacionais do programa *CST MWS*. A antena proposta foi configurada com os parâmetros e a seguir simulada, como mostrado na Figura 48.



Figura 48 - Modelagem computacional da antena dipolo reto

Fonte: CST MWS (2014)

As configurações utilizadas no programa CST MWS definem as dimensões de cada trilha da antena.

As antenas para sistema *RFID* não são projetadas para casamento de impedância de 50 Ω , então, o uso de uma porta configurável que simula a impedância do *microchip* fez-se necessário.

A Figura 49 mostra à representação do *microchip* no CST por uma porta conectada a antena.

O projeto visou à máxima transferência de potência da antena para o *microchip*, através do casamento de impedância.



Figura 49 - Representação do microchip conectado a antena

Fonte: CST MWS (2014)

A Figura 50 mostra o parâmetro S_{11} em relação a uma impedância característica de 50 Ω , bem como as impedâncias normalizadas da antena simulada de 0 a 2 GHz. Verifica-se que na frequência de 915 MHz a impedância da antena é igual à impedância complexa conjugada do *microchip* Higgs 4 da *Alien Technology.*



Figura 50 - Parâmetro S_{11} em relação impedância característica de 50 Ω

Fonte: CST MWS (2014)

A Figura 51 mostra o parâmetro S_{11} da antena em relação à impedância do *microchip* simulado de 0 a 2 GHz. Verifica-se que na frequência de 915 MHz há um bom casamento de impedância entre a antena e o *microchip*.



Figura 51 - Parâmetro S_{11} - Casamento da impedância entre antena e *microchip*

Fonte: CST MWS (2014)

A Figura 52 mostra a magnitude do parâmetro S_{11} da antena em função da frequência em relação à impedância do *microchip* simulado de 0 a 2 GHz. São

indicadas as frequências para magnitude igual a -10 dB, valor normalmente utilizado para caracterizar antenas *RFID*.

Verifica-se que na frequência de 915 MHz há máxima transferência de potência da antena para o *microchip*, sendo a perda de retorno maior que 35 dB.



Figura 52 - $|S_{11}|$ em função da frequência

Fonte: CST MWS (2014)

A Figura 53 mostra o diagrama de radiação 3D da antena no espaço livre em 915 MHz.



Figura 53 - Padrão de radiação 3D para 915 MHz

Fonte: CST MWS (2014)

A Tabela 1 mostra as dimensões das trilhas da antena antes e após otimização por simulação, bem como os valores do ganho e da impedância. Utilizouse os dados da coluna "simulação 2" para a fabricação da antena.

	1		
Variáveis (mm)	Simulação 1	Simulação 2	
Chip	3	3	
Espessura Tinta	0,015	0,015	
Espaço	3	3	
L1	116,3	116,5	
S	2	2	
S1	15,7	15,655	
S 2	19,15	19,15	
w	3	3	
x	2*L1+9	2*L1+9	
У	L2+6	L2+6	
z	1	1	
Zant	20,17 + J 192,63	20,97 + J 193,14	
Freq	915	915	
Z11	-35,91	-36,03	
Ganho	3,024	2,995	
Substrato	Papel	Papel	
Pasta Condutiva	1,11E+07	6,00E+06	
٤r	3,28	3,28	
Simulação CST	Transient Solver	Transient Solver	

Tabela 1 - Medidas para construção do Dipolo Reto

5.3.2. MODELAMENTO DO PROTÓTIPO 2 - DIPOLO COM EXTREMIDADES DOBRADAS

As extremidades do dipolo convencional podem ser dobradas para diminuir o comprimento da estrutura final da antena. A antena apresentada na seção anterior tem comprimento total de 26,3 cm, o que pode restringir sua utilização em varias aplicações. Dobrar as extremidades do dipolo é uma forma alternativa para se obter um comprimento menor da estrutura sem alterar o casamento de impedância, após otimização.

A configuração final da antena dipolo com as extremidades dobradas está representada na Figura 54. Com esse novo formato, foram fabricadas duas antenas impressas sobre papel e 1 sobre FR4.



Fonte: Robson Valmiro (2014)

A antena foi projetada para ser confeccionada utilizando a tinta condutiva 5064H fabricada pela empresa DuPont. A impressão da antena sobre papel utiliza a técnica de serigrafia.

Utilizou-se um papel comercialmente disponível com revestimento hidrofóbico, de baixo custo, de espessura de 260 µm ± 3 µm e tamanho A4, com a permissividade dielétrica $\mathcal{E}_r = 3,28$ e tangente de perdas tan $\delta = 0,061$. A faixa de operação da antena é entre 900 MHz e 930 MHz. O modelo foi projetado utilizando os recursos computacionais do programa *CST MWS*.

A impedância desejada da antena é a mesma proposta para o projeto do protótipo 1, ou seja:

$$Z_{ant} = 20,97 + j193,16\Omega$$

As variáveis descritas abaixo possuem valores fixos:

✓ chip: espaço para conectar o microchip;

✓ tinta: espessura da tinta;

✓ **S**: largura das trilhas S_1 e S_2 ;

As variáveis que sofreram alterações durante o processo de simulação e otimização foram:

- ✓ L_1 : polo da antena (simétrico L'_1);
- \checkmark **L**₂: trilha dobrada (simétrico L'_2);
- S₁ e S₂: são as trilhas para formar a indutância, sendo S'₁ simétrico a S'₁;
- ✓ L_3 : trilha dobrada que também é um parâmetro que sofre variação em seu comprimento, mas é dependente da variação de L_1 , L_2 e S_2 .

As dimensões das trilhas são mostradas na Figura 55 e na Tabela 2.



Figura 55 - Modelagem computacional da antena dipolo com as extremidades dobradas

Fonte: CST MWS (2014)

Os dados indicados na Tabela 2 representam os valores obtidos após a simulação e otimização da antena.

Utilizou-se os dados da coluna "simulação 2" apresentada na Tabela 2 para a fabricação da antena.

	Variáveis (mm)	Simulação 1 (mm)	Simulação 2 (mm)	
	Chip	3	3	
Espessura Tinta		0,015	0,015	
	Espaço	3	3	
	L1	49,42	49,42	
	L2	27,48	27,44	
	S	2	2	
	S1	17,84	17,81	
	S2	24,1195	24,06	
	W	3	3	
	x	2*L1+9	2*L1+9	
	у	L2+6	L2+6	
	z	1	1	
	Zant	20,97 + J 193,16	20,96 + J 193,18	
	Freq	915	915	
	Z11	-32,748	-32,281	
	Ganho	1,578	1,542	
	Substrato	Papel	Papel	
	Pasta Condutiva	1,11E+07	5,66E+06	
	٤r	3,28	3,28	
	Simulação CST	Transient Solver	Transient Solver	

Tabela 2 - Medidas para construção do Dipolo com extremidades dobradas

A Figura 56 mostra o parâmetro S_{11} em relação a uma impedância característica de 50 Ω , bem como as impedâncias normalizadas da antena simulada de 0 a 2 GHz. Verifica-se que na frequência de 915 MHz a impedância da antena é igual à impedância complexa conjugada do *microchip Higgs* 4 da *Alien Technology*.

Pode-se observar o comportamento da antena com a frequência e a indicação da frequência e da impedância para casamento com o *microchip*.


Figura 56 - Parâmetro S_{11} em relação à impedância característica de 50 Ω

Fonte: CST MWS (2014)

A Figura 57 mostra o parâmetro S_{11} da antena em relação à impedância do *microchip* simulada de 0 a 2 GHz. Verifica-se que na frequência de 915 MHz há um bom casamento de impedância entre a antena e o *microchip*.



Figura 57 - Parâmetro S₁₁ - Casamento da impedância entre antena e microchip

Fonte: CST MWS (2014)

A Figura 58 mostra a magnitude do parâmetro S_{11} em função da frequência e em relação à impedância do *microchip*. São indicadas as frequências para magnitude igual a -10 dB, valor este utilizado para caracterizar antenas *RFID*.

Verifica-se que na frequência de 915 MHz há a máxima transferência de potência da antena para o *microchip*, sendo a perda de retorno maior que 30 dB.





A Figura 59 mostra o diagrama de radiação no espaço livre em 915 MHz.



Figura 59 - Padrão de radiação 3D para 915 MHz

Fonte: CST MWS (2014)

Fonte: CST MWS (2014)

5.3.3. MODELAMENTO DO PROTÓTIPO 3 - DIPOLO COM EXTREMIDADES DOBRADAS

Nesta seção, a antena foi projetada para ser confeccionada utilizando a tinta condutiva CCI300 fabricada pela empresa Cabot. A impressão da antena sobre papel com permissividade dielétrica $\varepsilon_r = 3,28$ e tangente de perdas tan $\delta = 0,061$, utiliza a técnica de impressão a jato de tinta (*Inkjet*).

A impedância desejada da antena é a mesma proposta nos projetos anteriores. As dimensões das trilhas da antena antes e após a otimização por simulação são mostradas na Tabela 3. O modelo proposto foi projetado através da utilização dos recursos computacionais do programa *CST MWS*, como mostrado na Figura 60.

Utilizou-se os dados da coluna "simulação 2" apresentada na Tabela 3 para a fabricação da antena. O *microchip* utilizado foi o *Higgs* 4 *strap* da *Alien Technology*.

Variáveis (mm)	Simulação 1 (mm)	Simulação 2 (mm)
Chip (mm)	3	3
Espessura Tinta	0,006	0,005
Espaço	3	3
L1	49,42	49,46
L2	27,772	27,74
S	2	2
S1	17,58	17,39
S2	24,14	24,16
w	3	3
x	2*L1+9	2*L1+9
У	L2+6	L2+6
z	1	1
Zant	20,98 + J 193,14	21,53 + J 193,27
Freq	915	915
Z11	-32,26	-31,203
Ganho	1,586	1,402
Substrato	Papel	Papel
Condutividade Tinta	9,00E+06	1,00E+06
٤r	3.28	3.28
Simulação	Transient Solver	Transient Solver

Tabela 3 - Medidas para construção do dipolo com extremidades dobradas



Figura 60 - Modelagem computacional da antena dipolo com as extremidades dobradas

Fonte: CST MWS (2014)

A Figura 61 mostra o parâmetro S_{11} em relação a uma impedância característica de 50 Ω , e as impedâncias normalizadas simulada de 0 a 2 GHz. Notase que na frequência de 915 MHz a impedância da antena é igual à impedância complexa conjugada do *microchip Higgs* 4 da *Alien Technology*.



Figura 61 - Parâmetro S_{11} em relação à impedância característica de 50 Ω

Fonte: CST MWS (2014)

A Figura 62 mostra o parâmetro S_{11} da antena em relação à impedância do *microchip* simulada de 0 a 2 GHz. Na frequência de 915 MHz há um bom casamento de impedância entre a antena e o *microchip*.



Figura 62 - Parâmetros S₁₁ - Casamento da impedância entre antena e *microchip*

Fonte: CST MWS (2014)

A Figura 63 mostra a magnitude do parâmetro S_{11} em função da frequência e em relação à impedância do *microchip*. São indicadas as frequências para magnitude igual a -10 dB, valor utilizado para caracterizar antenas *RFID*.



Figura 63 - $|S_{11}|$ em função da frequência

Fonte: CST MWS (2014)

A Figura 64 fornece o diagrama de radiação no espaço livre em 915 MHz.



Figura 64 - Padrão de radiação 3D para 915 MHz

Fonte: CST MWS (2014)

5.3.4. MODELAMENTO DO PROTÓTIPO 4 - DIPOLO COM EXTREMIDADES DOBRADAS

A antena foi projetada para ser confeccionada utilizando a tinta condutiva CCI300 fabricada pela empresa Cabot. A impressão da antena sobre FR4 que apresenta permissividade dielétrica $\varepsilon_r = 4.8$ e tangente de perdas tan $\delta = 0.017$, utiliza a técnica de impressão a jato de tinta (*Inkjet*).

A Tabela 4 mostra as dimensões das trilhas da antena antes e após a otimização por simulação. Os valores do ganho e da impedância também são apresentados. Utilizou-se os dados da coluna "simulação 2" para a fabricação da antena.

Variáveis (mm)	Simulação 1 (mm)	Simulação 2 (mm
Chip (mm)	3	3
Espessura Tinta	0,0047	0,0060
Espaço	3	3
L1	48,66	48,67
L2	25	25
S	2	2
S1	17,9	17,9
S2	23,95	24
w	3	3
x	2*L1+9	2*L1+9
у	L2+6	L2+6
z	1	1
Zant	20,95 + J 193,17	20,89 + J 193,17
Freq	915	915
Z11	-31,889	-31,665
Ganho	1,970	1,990
Substrato	FR4	FR4
Condutividade Tinta	3,20E+06	4,40E+06
٤r	4,8	4,8
Simulação	Transient Solver	Transient Solver

Tabela 4 - Medidas para construção do dipolo com extremidades dobradas

As dimensões das trilhas da antena são mostradas na Figura 65.



Figura 65 - Modelagem computacional da antena dipolo dobrada - Tinta CCi300

Fonte: CST MWS (2014)

A Figura 66 mostra o parâmetro S_{11} em relação a uma impedância característica de 50 Ω , e as impedâncias normalizadas simuladas de 0 a 2 GHz. Verifica-se que na frequência de 915 MHz a impedância da antena é igual à impedância complexa conjugada do *microchip Higgs* 4 da *Alien Technology*.

Pode-se observar o comportamento da antena com a frequência e a indicação da frequência e da impedância para casamento com o *microchip*.



Figura 66 - Parâmetros S_{11} em relação a impedância característica de 50 Ω

Fonte: CST MWS (2014)

A Figura 67 mostra o parâmetro S_{11} em relação à impedância do *microchip* simulada de 0 a 2 GHz. Verifica-se que na frequência de 915 MHz há um bom casamento de impedância entre a antena e o *microchip*.



Figura 67 - Parâmetro S₁₁ - Casamento da impedância entre antena e *microchip*

A Figura 68 mostra a magnitude do parâmetro S_{11} em função da frequência e em relação à impedância do *microchip*. São indicadas as frequências para magnitude igual a -10 dB, considerada aceitável para operação da etiqueta *RFID*.

Verifica-se que na frequência de 915 MHz há máxima transferência de potência da antena para o *microchip*, sendo a perda de retorno maior que 30 dB.



Figura 68 - |S11| em função da frequência

A Figura 69 mostra o diagrama de radiação 3D em 915 MHz no espaço livre.



Figura 69 - Padrão de radiação 3D para 915 MHz

Fonte: CST MWS (2014)

Fonte: CST MWS (2014)

6. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS DE TESTES

6.1. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA MEDIÇÃO DE DESEMPENHO DA ETIQUETA *RFID*

Para se utilizar etiquetas *RFID* numa determinada aplicação, é importante realizar um estudo preliminar para selecionar a melhor etiqueta a ser usada. Uma das características mais importantes a ser considerada nessa escolha é a sensibilidade da etiqueta, que é a mínima potência necessária para ativá-la. Em geral uma câmara anecóica é usada para se realizar os testes estáticos necessários para a determinação dessa sensibilidade. Entretanto, câmaras anecóicas são geralmente equipamentos de alto custo e de grandes dimensões nas frequências atualmente regulamentadas para *RFID*. Ao invés disso, foi proposto como uma contribuição para este trabalho utilizar uma célula *GTEM* (*Gigahertz Transverse ElectroMagnetic*) compacta de baixo custo para essa finalidade (76). O modelo TC 5060A/B representa uma boa opção nesse sentido, pois além de ser de baixo custo, fornece um ambiente imune à radiação eletromagnética para a realização dos testes. O método proposto permite determinar rapidamente a sensibilidade de uma etiqueta de forma muito econômica e assim otimizar a implantação de sistemas *RFID*.

Esse método também pode ser usado para determinar a taxa de leitura das etiquetas. O método está em conformidade com os padrões da *EPCglobal* (77), órgão que regulamenta a tecnologia *RFID*, principalmente em relação ao número de tentativas de leitura utilizadas na configuração do leitor.

6.1.1. CONFIGURAÇÃO DE TESTE E VALIDAÇÃO

Esta seção apresenta uma configuração de teste para se determinar a sensibilidade da etiqueta. De inicio, faz-se necessário determinar a intensidade do sinal de RF na posição onde é colocada a etiqueta para teste dentro da câmara *GTEM* (76).

O teste pode ser executado em qualquer frequência, desde que dentro da faixa de operação da *GTEM*, do leitor e da etiqueta *RFID*.

Os equipamentos utilizados para realizar o teste são os seguintes:

- ✓ Câmara GTEM TC 5060A;
- ✓ Analisador de Espectro E4402B;
- ✓ Leitor Sirit 510;
- ✓ Acoplador Direcional 86205A;
- ✓ Atenuadores Variáveis 8495A e 8494A;
- ✓ Circulador JXWBH-T-860-960-20-100;
- ✓ Antena Dipolo Modelo TESCOM TC-92020A (900MHz~1.8GHz).

As configurações do analisador de espectro e do leitor estão indicadas abaixo:

Configuração do analisador de espectro:

- ✓ Frequência central: 915 MHz;
- ✓ Faixa de frequência: 30 MHz;
- ✓ Nível de referência de amplitude 20 dBm;
- ✓ Resolução da largura de banda: (RBW): 1 MHz;
- ✓ Largura de banda de vídeo: (VBW): 3 MHz;
- ✓ Modo de varredura: auto;
- ✓ Tipo de detecção: Peak;
- ✓ Atenuação de RF: 0 dB.

Configuração do Leitor:

- ✓ Potência de saída: 33 dBm;
- ✓ Índice de modulação: 90%;
- ✓ Taxa de dados: If 256;
- ✓ Tipo de modulação Miller 4;

- ✓ Faixa de frequência: escolher conforme regulamentação;
- ✓ Programação de leitura: modo ativo.

O sinal de RF emitido pelo leitor gera um campo eletromagnético em modo *TEM* (*Transverse Electromagnetic Mode*) conhecido no interior da câmara, para um determinado nível de potência do leitor. No final do percurso entre a porta de entrada e a posição onde será colocada a etiqueta *RFID* em teste, o sinal de RF é recebido pela antena dipolo TC92020A colocada inicialmente no interior da câmara *GTEM*, conectada à porta de saída. O nível do sinal é medido pelo analisador de espectro. Isto possibilita determinar o sinal de RF na posição onde as etiquetas serão colocadas, denominado (*M*) nas equações a seguir. Esse valor permite determinar a mínima potência necessária para ativar a etiqueta. Uma descrição mais detalhada da célula TC-5060A/B, como também suas especificações podem ser encontrada em (78).

Os campos E e H dentro da câmara são ilustrados na Figura 70, são diretamente proporcionais à tensão de entrada de RF e inversamente proporcionais à altura da câmara (L = altura da câmara = 22 cm para o modelo TC-5060A/B).





Fonte: http://www.dfwwebdesigns.net/cts/Manuals/5060AB_ER80320_CTS.pdf (2012)

O campo elétrico dentro da GTEM é dado por:

$$E = \frac{V}{L}$$

O campo magnético associado dentro da GTEM é dado por:

$$H = \frac{E}{Z_0}$$

Onde $Z_0 \notin 377\Omega$, valor da impedância da onda no espaço livre.

Devido a assimetrias e pequenos obstáculos no interior da câmara *GTEM*, outros modos de propagação, que não *TEM*, podem ser excitados para certas frequências e ressonâncias podem ocorrer. O método usado pelo fabricante para eliminar essas ressonâncias, consiste em revestir a metade da câmara com material absorvedor de RF, permitindo assim o teste de dispositivos como etiquetas *RFID*, sem interferência de modos espúrios (79).

A configuração para medição do sinal na posição de teste (*M*) no interior da câmara *GTEM* é mostrada na Figura 71.



Figura 71 - Medição da perda de sinal no interior da célula GTEM

Fonte: TC-5060A/B UHF TEM Cell Operating Manual (2014)

Perdas nos cabos C1, C2, C3 foram medidas utilizando o analisador de espectro. A antena dipolo foi conectada no interior da câmara *GTEM* ao conector SMA. O Cabo C3 é conectado ao conector SMA localizado no exterior da câmara da *GTEM*. A Figura 72 mostra os principais pontos da câmara *GTEM*.

Figura 72 - Identificação da GTEM



Fonte: http://www.dfwwebdesigns.net/cts/Manuals/5060AB_ER80320_CTS.pdf (2012)

A intensidade do sinal de RF no ponto (*M*) medido é utilizada para calcular a perda de sinal ao logo do interior da câmara *GTEM*.

A perda do sinal de RF (L_{path}) é obtida através da eq.(27) e dada por:

$$M = P - C_1 - A_t - C_2 - L_{path} + G + C_3$$
(26)

$$L_{path} = P - C_1 - A_t - C_2 + G + C_3 - M$$
(27)

onde:

M (dBm): Nível de sinal recebido pela antena dipolo no mesmo ponto onde é colocada a etiqueta *RFID*;

L_{patch} (dB): Perda no percurso dentro da GTEM;

P (dBm): Potência de transmissão do leitor;

C1 (dB): Perda no cabo 1;

At (dB): Valor da atenuação do sinal de RF;

C2 (dB): Perda no cabo 2;

G (dB): Ganho da antena dipolo;

 C_3 (dB): Perda no cabo 3 (dB).

6.1.2. POTÊNCIA MÍNIMA PARA ATIVAR A ETIQUETA RFID

A Figura 73 mostra a configuração completa utilizada para medir a intensidade de sinal de RF que ativa a etiqueta *RFID* e a mantem em operação.



Figura 73 - Setup para teste estático da etiqueta RFID

Fonte: Robson Valmiro (2014)

Onde:

 C_1 (dB): Perda no cabo 1;

 C_2 (dB): Perda no cabo 2;

BC₁ (dB): Perda de sinal entre as portas 1 e 2 do acoplador direcional;

BC₂ (dB): Perda entre as portas 1 e 3 do acoplador direcional;

Derivação de RF: leitura realizada pelo analisador de espectro;

Entrada GT (dBm) : Máxima potência na entrada da célula GTEM;

L_{path} (dB): Perda no percurso dentro da GTEM;

M (dBm): Mínima potência para ativar a etiqueta.

O leitor é programado para transmitir no modo ativo com 33 dBm de potência. Os atenuadores de Tx e Rx são ajustados para máxima atenuação para garantir que a etiqueta não seja ativada. Em seguida, a etiqueta é colocada no interior da câmara *GTEM* sobre um material inerte a RF, como por exemplo, uma espuma. O Anexo A mostra a especificação da célula *GTEM*.

Seguindo as especificações da *EPCglobal* para realização do teste de sensibilidade em modo estático, comandos de leitura são enviados pelo leitor que é a fonte de transmissão de sinal que ativa a etiqueta. Com o inicio dos testes, diminuise gradativamente o valor ajustado nos atenuadores, em passos de 1 dB, até que a etiqueta responda aos comandos de leitura enviados pelo leitor.

A sensibilidade da etiqueta ou o valor mínimo de potência necessário para ativá-la, é aquele que permite uma resposta da etiqueta para o leitor a uma taxa de rendimento de 50% das tentativas de leitura, ou seja, sendo enviados 100 comandos de leitura, no mínimo 50 respostas positivas devem ser enviadas de volta para o leitor. Desta forma, é possível identificar qual é a mínima potência necessária para ativar a etiqueta *RFID*.

$$Yield = \frac{leitura_com_Sucesso}{tentativa_leituras} *100\% \ge 50$$

O valor medido pelo analisador de espectro é utilizado na equação abaixo para determinar a mínima potência que é dada por.

$$Minima _ Potência = Derivação RF + C_1 + BC_1 - BC_2 - C_2 - L_{path}$$
(28)

6.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA IMPRESSÃO SERIGRÁFICA

Uma emulsão fotossensível foi aplicada e espalhada em uma tela de 70 fios/cm, e seca em ambiente com pouca luz. A tela seca está pronta para receber o

fotolito com o padrão desejado, que foi impresso em uma transparência utilizando uma impressora comum, como mostrado na Figura 74.

A transferência do padrão para a tela se dá pelo processo de fotossensibilidade, onde a região da tela com emulsão fotossensível é exposta a luz e endurecida, enquanto que a região bloqueada pelo fotolito pode ser limpa com a utilização de solventes orgânicos, como mostrado na Figura 75.



Figura 74 - Fotolito das antenas fabricadas com a tinta 5064H da DUPont

Fonte: Robson Valmiro (2014)

Figura 75 - Tela para produção das antenas protótipos 1 e 2



Fonte: Robson Valmiro (2014)

A tinta 5064H é então aplicada sobre o padrão formado na tela e transferida para o substrato. A Figura 76 mostra as antenas, protótipos 1 e 2, impressas com a tinta 5064H sobre substrato de papel.



Figura 76 - Foto das antenas de prata impressa por serigrafia

6.2.1. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As resistências encontradas nas antenas impressas foram de 1 Ω para o protótipo 1 que atingiu uma espessura de 15 µm, e 1,1 Ω para o protótipo 2 que também atingiu uma espessura de 15 µm. As resistências foram medidas entre os pontos A e B, utilizando-se um multímetro da marca *Fluke*. A Figura 77 mostra os protótipos 1 e 2 com *microchip*.



Figura 77 - Foto das etiquetas impressa com prata por serigrafia

Fonte: Robson Valmiro (2014).

Fonte: Robson Valmiro (2014)

A técnica de medida de quatro pontas também pode ser empregada para medir resistividades e resistências de folha, além de ser mais preciso. Trata-se, em princípio, de um método não destrutivo, muito embora a pressão exercida pelos elétrodos sobre a superfície da amostra possa vir a danificar o material caso venha a ser excessivamente alta. Uma grande vantagem do método é a simplicidade da medida. O valor medido da resistência de folha pode ser utilizado na eq.(25) para calcular a condutividade do material.

Para a caracterização dos protótipos 1 e 2, foi utilizado o procedimento de teste descrito no item 6.1 (Procedimento Experimental para Medição de Desempenho da Etiqueta RFID). As etiquetas foram testadas entre 860 MHz e 960 MHz com intervalos de 1 em 1 MHz.

O limiar de energia aceitável que se procurou obter nesse trabalho e que garante um bom funcionamento das etiquetas foi de -10. dBm.

A Figura 78 mostra os protótipos 1 e 2 no interior da câmara GTEM



Figura 78 - Protótipo 1 e Protótipo 2 dentro da GTEM

Fonte: Robson Valmiro (2014)

A intensidade de sinal no ponto de teste no interior da *GTEM* foi sendo aumentada de 1 em 1 dBm até que foi observado uma resposta da etiqueta. Os valores mínimos de potência que ativaram os protótipos 1 e 2 são mostrados na Figura abaixo. Condutividade das trilhas das antenas:

A eq.(23) permite calcular o valor da condutividade, uma vez que as resistências das antenas foram medidas.

 $\sigma = \frac{1}{R} * \frac{L}{W.t}$, onde *L* é a somatória de todas as trilhas que formam a antena;

Condutividade da antena Protótipo 1:

$$\sigma = \frac{1}{1} * \frac{11,65+1,56+1,9+1,56+11,65}{0,3*15.10^{-6}} = 6,275.10^{6} \frac{S}{m}$$

Condutividade da antena Protótipo 2:

$$\sigma = \frac{1}{1,1} * \frac{3,289+2,744+4,942+1,781+2,406+1,781+4,942+2,744+3,289}{0,3*15.10^{-6}} =$$

$$\sigma = 5,641.10^6 \frac{S}{m}$$

Quatro amostras do protótipo 1 e cinco amostras do protótipo 2 foram fabricadas e testadas, sendo identificadas no gráfico como P1a, P1b, P1c, P1d e P2a, P2b, P2c, P2d e P2e respectivamente. O nível mínimo de potência, para cada frequência em teste, necessário para ativar a etiqueta é mostrado na Figura 79 para o protótipo 1 e para o protótipo 2.







Fonte: Robson Valmiro (2014)

As etiquetas, protótipo 1, responderam em toda a faixa de frequência, sendo que na faixa de interesse que é entre 900 MHz a 930 MHz a mínima potência foi em torno de -18 dBm, enquanto que as etiquetas, protótipo 2, responderam com um nível de potência em torno de -13 dBm. Entretanto, esses dados não podem ser comparados, pois as antenas possuem grande diferença em tamanho. Devido ao fato da antena protótipo 1 ser maior, era esperado que seu desempenho também fosse superior ao da antena protótipo 2.

Este trabalho mostrou que é possível fabricar antena para etiqueta *RFID*, impressa pelo método serigráfico utilizando tinta condutiva e capaz de ser ativada com potência inferior a -10 dBm. Entretanto, esse nível pode ser ainda menor com uma fabricação automatizada das etiquetas que permitirá depositar múltiplas camadas da tinta com maior precisão, além da fixação do *microchip* com cola condutiva. As antenas fabricadas com tinta 5064H apresentaram condutividade que permitiu alcançar esses resultados. A técnica de serigrafia mostrou-se eficiente na produção dessas antenas de microfitas impressas e de baixo custo.

6.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA IMPRESSÃO JATO DE TINTA

A impressão a jato de tinta foi realizada utilizando a impressora piezoelétrica da Dimatix modelo DMP2831. Para boa formação da trilha condutiva, foi necessário filtrar a tinta antes de usá-la. Em nosso experimento utilizou-se um filtro de nylon de 0.2 µm para ejetar a tinta diretamente para dentro do cartucho, como mostra a Figura 80. Qualquer micro impureza pode entupir ou danificar os bicos da cabeça de impressão.





Fonte: http://www.fujifilmusa.com/products/industrial_inkjet_printheads/index.html (2014).

O cartucho foi regulado para ejetar a tinta Cabot CCi300 diretamente no substrato a uma temperatura de 30 °C, pressão de 9,96 milibar (4 inH2O) e frequência de 7 KHz. O cartucho foi mantido a 1 mm de altura da superfície do substrato que possui 260 µm de espessura (papel), o melhor resultado obtido neste trabalho foi a partir da forma de onda mostrado na Figura 81.

Essa forma de onda possui comprimento total de 20,096 µs e está dividida em 3 segmentos. Cada segmento tem funções diferentes, sendo eles:

Primeiro segmento: Possui tensão de aplicação de 0%, taxa de variação 1 e duração de 5,248 µs, com a função de puxar a tinta para dentro do cartucho;

Segundo segmento: Tem tensão de aplicação de 100%, taxa de variação de 2 e duração de 4,992 µs, com a função de ejetar a gota de tinta:

Terceiro segmento: Possui tensão de aplicação de 38%, taxa de variação de 2 e duração de 9,856 µs com a função de colocar o piezoelétrico na tensão de espera.

Porcentagem (%) de tensão aplicada: É a amplitude aplicada ao bico em cada segmento, que determina o quanto o dispositivo piezoelétrico é flexionado. A forma de onda é aplicas nos 16 bicos que compõem o cartucho. Entretanto, a polarização máxima pode variar de bico para bico, com a finalidade de alinhamento das gotas.

A taxa de variação (*slew rate*): Essa taxa varia entre 0 e 2, está relacionada com a mudança da tensão aplicada (inclinação do gráfico) entre um segmento e o seguinte, determinando com que rapidez o transdutor curvará.

Duração: É o tempo que o piezoelétrico fica em cada etapa.

	5.24Bus	18.240µs	15.168µs	Level (%) 0 🛨 💶
		1	2	Slew Rate: 1.00 -
1	2		3	Duration (µs): 5248 🛨 🔳
	1		-	Add Segment Delete Segment
				Overall Waveform Controls:
				Duration 1.0 ÷ Scaler. Rescale Wavefo
			20.096µs	Width (us): 20.096

Figura 81 - Configuração da impressora para ejeção da tinta CCI300

Fonte: DIMATIX. Dimatix Materials Printer DMP-2800 (2014)

Os modelos impressos são mostrados na Figura 82. Foram impressas as antenas dipolo com as extremidades dobradas, sendo o protótipo 3 sobre o substrato de papel e o protótipo 4 sobre o substrato FR4, posteriormente as impressões foram curadas a 120 °C por 35 minutos utilizando um forno elétrico modelo XF 003 Roberta. Qualquer ambiente ou equipamento em que a temperatura possa ser controlada pode ser utilizado para a cura das antenas impressas.



Figura 82 - Foto das antenas impressas por Inkjet

Fonte: Robson Valmiro (2014).

Outras amostras do protótipo 3 foram impressas e são mostradas na Figura



Figura 83 - Foto de antenas impressa por Inkjet

Fonte: Robson Valmiro (2014)

6.3.1. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As resistências encontradas nas antenas impressas foram de: 20,7 Ω para o protótipo 3 e 3,4 Ω para o protótipo 4. O protótipo 3 e 4 foram produzidos com 20 camadas de impressão e atingiram uma espessura de 4,7 µm e 6 µm respectivamente. A Figura 84 mostra os valores das resistências medidas entre os pontos A e B nos protótipos 3 e 4.



Figura 84 - Valores das resistências medidas entre os pontos A e B

Fonte: Robson Valmiro (2014)

A Figura 85 mostra a imagem obtida pela câmera fiducial da impressora. A trilha foi produzida com a tinta CCi300, o valor "*distance*" é o valor da largura da trilha (W) que se desejou obter.



Figura 85 - Imagem da trilha impressa com impressora a jato de tinta CCI300

Fonte: DIMATIX. Dimatix Materials Printer DMP-2800 (2014)

Para o planejamento de sistema *RFID*, é desejável estabelecer um nível, considerado limiar, de potência que garanta sua operação em uma faixa de frequência. O nível de potência razoável para um bom funcionamento e adotado nesse trabalho foi de -10 dBm (80). A Figura 86 mostra os protótipos 3 e 4 dentro da câmara *GTEM*.



Figura 86 - Protótipo 3 e Protótipo 4 no interior da GTEM

Fonte: Robson Valmiro (2014)

Para a caracterização dos protótipos 3 e 4, foi utilizado o procedimento de teste descrito no item 6.1 (Procedimento Experimental para Medição de Desempenho da Etiqueta *RFID*). As etiquetas foram testadas entre 860 MHz a 960 MHz com intervalos de 1 em 1 MHz. Para cada frequência de interesse, uma potência foi aplicada sobre a etiqueta. Essa potência foi sendo aumentada de 1 em 1 dBm até que foi observado uma resposta da etiqueta. Os níveis mínimos de potência que ativaram os protótipos 3 e 4 são mostrados na Figura 88.

Com esses resultados, foi possível demonstrar que trilhas construídas com a tinta condutiva para produzir antenas *RFID*, podem ser fabricadas totalmente por impressão a jato de tinta, sendo possível variar o valor da resistência com alterações no processo. Estas alterações podem ser feitas nos seguimentos mostrados na forma de onda apresentada na Figura 82 (alterando a tensão aplicada, a taxa de variação e a duração) e também pelo número de camadas impressas. Vale ressaltar que a limpeza prévia do substrato influência diretamente na aplicação da tinta, sendo que qualquer gordura ou impureza altera a formação da trilha. Por fim, o conceito de impressão das trilhas nos permitiu produzir antenas de microfitas funcionais e impressas a um custo baixo.

A eq.(23) nós fornece o valor da condutividade obtida com técnica empregada para a fabricação da antena:

 $\sigma = \frac{1}{R} * \frac{L}{W.t}$, onde *L* é a somatória de todas as trilhas que formam a antena.

Condutividade da antena Protótipo 3:

$$\sigma = \frac{1}{20,7} * \frac{3,28+2,77+4,94+1,73+2,41+1,73+4,94+2,77+3,28}{0,3*4,7.10^{-6}} \cong 1.10^{6} \frac{S}{m}$$

Condutividade da antena Protótipo 4:

$$\sigma = \frac{1}{3,4} * \frac{3,21+2,5+4,86+1,79+2,4+1,79+4,86+2,5+3,21}{0,3*6.10^{-6}} \cong 4,4.10^{6} \frac{S}{m}$$

Quatro amostras do protótipo 3 e uma amostra do protótipo 4 foram fabricadas e testadas, sendo identificadas no gráfico como P3a, P3b, P3c, P3d e P4a respectivamente.

O nível mínimo de potência, para cada frequência em teste, necessário para ativar as etiquetas é mostrado na Figura 87, para o protótipo 3 e para o protótipo 4.







Fonte: Robson Valmiro (2014)

6.4. PROCEDIMENTO DE TESTE DA ETIQUETA COMERCIALMENTE DISPONÍVEL NO MERCADO

Optou-se nesse trabalho por testar uma etiqueta *RFID* comercialmente disponível no mercado, para comparar seu resultado com os resultados dos testes dos quatro protótipos produzidos por impressão. A etiqueta utilizada foi o modelo AD-223 fabricado pela empresa Avery Dennison (81), como mostrada a Figura 88. Sua sensibilidade foi determinada utilizando o mesmo procedimento de teste aplicado aos protótipos desenvolvidos nesse trabalho, e descrito no item 6.1.



Figura 88 - Etiqueta RFID modelo Ad-223 da Avery Dennison

Fonte: www.RFID.averydennison.com (2014)

Cinco etiquetas AD-223 foram testadas e os resultados são mostrados na Figura 89.

A etiqueta AD-223 apresentou resposta a um nível de potência em torno de -14 dBm, na faixa de 860 MHz a 882. Na banda de operação disponível para o Brasil (902 MHz a 928 MHz), o valor mínimo de potência foi de -13 dBm. Comparando esse resultado com os resultados dos testes realizados com os 4 protótipos, verificase que as antenas impressas apresentam resultados satisfatórios tanto quanto esta etiqueta comercial.



Figura 89 - Mínima potência para ativar a etiqueta AD-223

Fonte: Robson Valmiro (2014)

7. CONCLUSÕES

Esse trabalho apresentou os princípios básicos de funcionamento da tecnologia *RFID* e as necessidades de se empregar esse tipo de dispositivo. Neste trabalho, um estudo e desenvolvimento de antenas compactas impressas sobre substrato flexível, empregando técnicas de impressão utilizando tinta condutiva também foi apresentado. Simulações e resultados experimentais ressaltaram o desempenho considerado satisfatório das etiquetas *RFID*.

Um estudo para identificar tintas condutivas para serem empregadas neste trabalho, foi realizado. Dentre varias opções encontradas, as tintas CCI300 para *inkjet* e a 5064H para serigrafia foram selecionadas por apresentarem boas características em relação à condutividade e processo de cura a temperaturas em torno de 150 °C.

O principal desafio desse trabalho foi fabricar etiquetas para *RFID* impressas com tinta condutiva e que operassem de modo satisfatório na faixa de frequência disponível para a tecnologia *RFID*. Dois processos diferentes foram empregados para essa finalidade: impressão por serigrafia (*silkscreen*) e impressão por jato de tinta (*inkjet*). O nível mínimo de potência necessário para ativar as etiquetas, através de interrogações enviadas pelo leitor via interface aérea, ou seja, a sensibilidade da etiqueta, foi o parâmetro de decisão que permitiu afirmar que tanto o processo de impressão por serigrafia como o processo de impressão por jato de tinta, são perfeitamente aplicáveis para a fabricação de antenas impressas. Esses processos são menos agressivos ao meio ambiente, por reduzirem o uso de agentes químicos normalmente empregados na fabricação convencional de circuitos impressos em geral. Além disso, eles proporcionam uma confecção mais rápida de protótipos de etiquetas *RFID* especialmente sobre substratos de base orgânica, como papel, o que contribui substancialmente para a redução do custo final da etiqueta.

O método serigráfico, muito usado na indústria têxtil, já tem sido empregado para o uso em eletrônica, através da aplicação de tintas condutivas para a fabricação de dispositivos eletrônicos. A tinta usada é composta de nanoparticulas de prata que apresentou condutividade satisfatória também para a fabricação de antenas. Os protótipos 1 e 2 deste trabalho apresentaram desempenho dentro do esperado, ou seja, resposta para níveis de potência abaixo de -10 dBm.

O método *inkjet*, recentemente passou a ser utilizado para fabricar dispositivos eletrônicos e foi empregado para a fabricação das antenas. Os protótipos 3 e 4 deste trabalho apresentaram desempenho satisfatório, com resposta as interrogações do leitor para níveis de potência abaixo de -10 dBm.

O primeiro protótipo denominado neste trabalho de dipolo reto foi fabricado com a tinta condutiva 5064H pelo método serigráfico e impresso sobre papel hidrofóbico. Esse processo permitiu a fabricação da etiqueta *RFID* que respondeu satisfatoriamente na faixa de frequência, sendo necessário um nível mínimo de potência em torno de -18 dBm, valor mínimo para ativar essa etiqueta *RFID*.

No segundo protótipo, as extremidades do dipolo foram dobradas, permitindo reduzir o tamanho da estrutura da antena em relação ao protótipo 1, tornando sua utilização mais ampla em aplicações de *RFID*. A etiqueta foi fabricada com a tinta condutiva 5064H pelo método serigráfico com deposição sobre papel. O nível mínimo de potência para ativá-la foi de -13 dBm na faixa de 900 MHz a 930 MHz.

O terceiro protótipo também com as extremidades do dipolo dobrada, foi fabricado com a tinta CCI300 pelo método *inkjet*. O papel também foi utilizado como substrato para deposição da tinta e o nível mínimo de potência necessário para ativar essa etiqueta *RFID* foi em torno de -13 dBm.

O quarto protótipo foi fabricado pelo método *inkjet* utilizando tinta condutiva CCI300, porém, sobre o FR4 como substrato. Esse protótipo foi ativado com um nível de potência em torno de -14 dBm.

Por último, uma etiqueta *RFID* comercialmente disponível no mercado, a AD223, também foi testada. O nível mínimo de potência necessário para ativá-la foi de -13 dBm.

Os quatro protótipos fabricados pelos métodos de impressão e tendo as tintas condutivas como material condutor, apresentaram resultados em relação à

capacidade de trocar informações via interface aérea com o leitor, tão promissores quanto os resultados obtidos com a etiqueta comercialmente disponível no mercado, indicando que antenas impressas utilizando tinta condutiva, pode ser uma boa opção para aplicações em *RFID*.

A contribuição, portanto, deste trabalho foi o desenvolvimento de antenas impressas empregando as técnicas de impressão por serigrafia e *Inkjet*, utilizando tinta condutiva para a produção de etiquetas *RFID*. De um modo geral, os resultados apresentados justificam os processos de fabricação dessas etiquetas como uma alternativa para uma nova geração de eletrônica de RF verdadeiramente "*Green*". Além disso, esse estudo abre possibilidades para aplicações em outros tipos de dispositivos eletrônicos, como por exemplo, os sensores.

PUBLICAÇÕES

Artigo Publicado:

 [1] VALMIRO, R.; BARBIN, S. E. A Measurement Technique for Static Determination of RFID Tags' Sensitivity Using a Low-cost UHF GTEM Cell.
 In: 8TH European Conference on Antennas and Propagation - EUCAP 2014, 2014, The Hague. 8TH European Conference on Antennas and Propagation -EUCAP 2014. The Haage, 2014. p. 1297-1300.

Artigos Aceitos não Publicados:

- [1] VALMIRO, R.; BARBIN, S. E. A Passive RFID Tag Microstrip Folded Dipole Antenna Printed using Conductive Ink, The 2014 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, July 6 –12, 2014, at the Memphis Convention Center in Memphis, Tennessee, USA;
- [2] VALMIRO, R.; BARBIN, S. E. Comparison Performance RFID Antenna Manufactured by Conductive Inkjet Printer and Copper RFID Antenna on Hard Substrate, ICEAA-IEEE APWC 2014 - International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications, August 3 - 9, 2014 Palm Beach, Aruba.

Artigo Submetido

[1] VALMIRO, R.; BARBIN, S. E. An Antenna for RFID Tag Printed on Paper Substrate using Conductive Ink, The 2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, 19-25 July 2015, Vancouver, British Columbia, Canada.

REFERÊNCIAS

- S. BASAT, S. BHATTACHARYA, A. RIDA, M.M. TENTZERIS, Fabrication and Assembly of a Novel High-Efficiency UHF RFID Tag on Flexible LCP Substrate, Proceedings of the 56th IEEE-ECTC Symposium, May 2006, 1352 – 1355 p.
- [2] J. SIDEN; M. K. FEIN; A. KOPTYUG; H-E. NILSON; Printed Antennas with Variable Conductive Ink Layers thickness, IET Proceedings on Microwaves, Antennas and Propagation, 1, 2, April 2007, 401 - 407 p.
- [3] M.M.TENTZERIS, R.VYAS, V.LAKAFOSIS, A.TRAILLE, A.RIDA, G.SHAKER, J.DOWLING, S.E.BARBIN, Inkjet-printed Green RFID and Wireless Sensors for Smart House and Smart Energy Applications, Proc. of WSIM 2010, International Meeting, Campina Grande, Brazil, May 2010.
- [4] RIDA, A. ; LI YANG ; TENTZERIS, M.M., Design and characterization of novel paper-based inkjet-printed UHF antennas for RFID and sensing applications, Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007 IEEE, 2007, 2749 - 2752 p
- [5] O. AZUCENA, J. KUBBY, D. SCARBROUGH, C. GOLDSMITH, Inkjet Printing of Passive Microwave Circuitry, IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, June 15-20, 2008, 1075 - 1078 p.
- [6] RIDA,A; LI YANG; VYAS, R.; BHATTACHARYA, S.; TENTZERIS, M.M. Design and integration of inkjet-printed paper-based UHF components for RFID and ubiquitous sensing applications, Microwave Conference, 2007. European, 9-12 Oct. 2007, 724 - 727 p.
- [7] DIMATIX. Dimatix Materials Printer DMP-2831. Fujifilm. Disponivel em: http://www.dimatix.com/files/DMP-2831-datasheet.pdf>. Acesso em: 23
 Outubro 2014.
- [8] DIMATIX. Dimatix Materials Printer DMP-2800 Series User Manual2008. Fujifilm. Disponivel em: <http://www.fujifilmusa.com/products/industrial_inkjet_printheads/index.html>. Acesso em: 14 Setembro 2014.
- [9] YAN ZHANG ; CHANGQING LIU ; WHALLEY, D. Direct-write techniques for maskless production of microelectronics: A review of current state-of-theart technologies, Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, 2009. ICEPT-HDP '09. International Conference on, 2009, 497-503 p.
- [10] DONG-YOUN SHIN, YONGSHIK LEE, CHUNG HWAN KIM, Performance characterization of screen printed radio frequency identification antennas with silver nanopaste, Disponivel em http://www.elsevier.com/locate/tsf, Thin Solid Films 517 (2009) 6112–6118 p.
- [11] A. CHIOLERIO, M. COTTO, P. PANDOLFI, P. MARTINO, V. CAMARCHIA, M. PIROLA, G. GHIONE, Ag nanoparticle-based inkjet printed planar transmission lines for RF and microwave applications: Considerations on ink composition, nanoparticle size distribution and sintering time. Disponivel em http://www.elsevier.com/locate/mee> Microelectronic Engineering 97 (2012) 8–15 p.
- [12] WADA, T. ; HARAICHI, S. ; ISHII, K. ; HIROSHIMA, H. ; KOMURO, M. ; GORWADKAR, S.M. The use of a Si-based resist system and Ti electrode for the fabrication of sub-10 nm metal-insulator-metal tunnel junctions, Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 1998, Page(s): 1430-1434 p.
- SHAKER, G.; SAFAVI-NAEINI, SAFIEDDIN; SANGARY, N.; TENTZERIS,
 M.M. Inkjet Printing of Ultrawideband (UWB) Antennas on Paper-Based
 Substrates, Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE (Volume:10),
 17 Janeiro 2011, 111-114 p.

- [14] L. YANG AND M. M. TENTZERIS, 3D Multilayer Integration and Packaging on Organic/Paper Low-Cost Substrates for RF and Wireless Applications. ISSSE '07 International Symposium on Signals, Systems and Electronics, July 30-August 2, 2007.
- [15] L. YANG, A. RIDA, R. VYAS, M. M. TENTZERIS, RFID Tag and RF Structures on a Paper Substrate Using Inkjet-Printing Technology. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, Vol. 55, Issue 12, Part 2. Dec. 2007.
- [16] RIDA, A.;VYAS, R. ; LI YANG;KRUESI, C.;TENTZERIS, M.M. Low Cost Inkjetprinting Paper-Based Modules for RFID Sensing and Wireless Applications, Wireless Technology, 2008. EuWiT 2008. European Conference on, Amsterdam, 27-28 Oct. 2008, 294 - 297 p
- [17] TENTZERIS, M.M.; YANG, L.; RIDA, A.; TRAILLE, A.; VYAS, R.; WU, T., RFID's on Paper using Inkjet-Printing Technology: Is it the first step for UHF Ubiquitous. Year: 2007, 1 – 4 p "Cognitive Intelligence" and "Global Tracking"?", RFID Eurasia, 2007 1st Annual,
- [18] SHAKER, G.;UNIV. OF WATERLOO, WATERLOO, ON, CANADA ;TENTZERIS, M.;SAFAVI-NAEINI, SAFIEDDIN, Low-cost antennas for mm-Wave sensing applications using inkjet printing of silver nano-particles on liquid crystal polymers. Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2010 IEEE, Toronto, ON, 11-17 July 2010, 1 - 4 p.
- [19] KOSKI, E. ; KOSKI, K. ; UKKKONEN, L. ; SYDANHEIMO, L. ; VIRTANEN, J. ; BJORNINEN, T. ; ELSHERBENI, A.Z. Performance of inkjet-printed narrowline passive UHF RFID tags on different objects, Antennas and Propagation (APSURSI), 2011 IEEE International Symposium on, 2011, 537 – 540 p.
- [20] TENTZERIS, M.M. Inkjet-printed paper-based RFID and nanotechnologybased ultrasensitive sensors: The "Green" ultimate solution for an ever improving life quality and safety?, Radio and Wireless Symposium (RWS), 2010 IEEE, 2010, 120-123 p.

- [21] RIDA, A. ; SHAKER, G. ; NASRI, F. ; REYNOLDS, T. ; NIKOLAOU, S. ; TENZERIS, M. Inkjet printing of dual band conformal antenna for use in wifi frequency bands, Radio and Wireless Symposium (RWS), 2010 IEEE, 2010, 65-67 p.
- [22] MARRONCELLI, M. ; TRINCHERO, D. ; TENTZERIS, M.M. Paper-based, inkjet-printed, text-meandered UHF resonant antennas for RFID applications, General Assembly and Scientific Symposium, 2011 XXXth URSI, 2011, 1-4 p.
- [23] TENTZERIS, M.M. ; NIKOLAOU, S. RFID-enabled ultrasensitive wireless sensors utilizing inkjet-printed antennas and carbon nanotubes for gas detection applications, Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems, 2009. COMCAS 2009. IEEE International Conference on, Year: 2009, 1-5 p.
- [24] GS1, Regulatory status for using RFID in the EPC Gen 2 band (860 to 960 MHz) of the UHF spectrum, 31 May 2013. Disponivel em, http://www.gs1.org/docs/epcglobal/UHF_Regulations.pdf. Acesso em 15 jul. 2014
- [25] J. LANDT, The History of RFID, IEEE Potentials, vol. 24, no. 4, Oct.Nov. 2005, 8-11 p.
- [26] D. M. DOBKIN, The RF in RFID, Second Edition, USA, Elsevier, 2013.
- [27] R. WANT, An Introduction to RFID Technology, IEEE Pervasive Computing, vol. 5, no. 1, Jan.-Mar. 2006, 25-33 p.
- [28] STOCKMAN, HARRY, Communication by Means of Reflected Power, Proceedings of the IRE, 1948, 1196-1204 p.

- [29] F.XAVIER, O.K.HIKAGE, M. S. DE P. PESSOA, A. L. FLEURY. A View about RFID Technology in Brazil, Technology Management for Global Economic Growth (PICMET), 2010 Proceedings of PICMET '10, 18-22 July 2010, 1 – 9 p.
- [30] CARDULLO, MARIO W. (ROCKVILLE, MD), PARKS III, WILLIAM L. **Transponder Apparatus and System** U.S. Patent 3713148, Jan. 21, 1973.
- [31] PATENTE IFI CLAIMS. Transponder apparatus and system. Disponivel em: http://www.google.com.br/patents/US3713148>. Acesso em: 19 Setembro 2014.
- [32] CHAWLA, V. ; DONG SAM HA, An overview of passive RFID, Communications Magazine, IEEE, 2007, 11 – 17 p.
- [33] MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. LemelsonMIT. Disponivel em: <http://web.mit.edu/invent/iow/waltonc.html>. Acesso em: 16 Dezembro 2014.
- [34] UNLTED STATES PATENT. US. Patent. Disponivel em: https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdf s/US4384288.pdf>. Acesso em: 24 Agosto 2014.
- [35] PATENTE IFI CLAIMS. Portable radio frequency emitting identifier. Disponivel em: http://www.google.com.br/patents/US4384288>. Acesso em: 19 Setembro 2014.
- [36] A. R. KOELLE, Short range UHF telemetry system using passive transponders for vehicle ID and status information, IEEE Workshop on Automotive Applications of Electronics, Oct. 1988, 34 – 38 p.
- [37] GS1 ORG. GS1 EPCglobal. Disponivel em: http://media.gs1pt.org/ficheiros/164/brochura_gs1_epcglobal.pdf>. Acesso em: 05 Outubro 2014.

- [38] GS1 ORG. ECPglobal. Disponivel em: http://www.gs1.org/docs/epcglobal/standards/specs/900_MHz_Class_0_RFID Tag_Specification.pdf>. Acesso em: 21 Junho 2014.
- [39] ALIEN TECHNOLOGY. Higgs[™]4 Strap. Disponivel em: < http://www.alientechnology.com/wp-content/uploads/ALC-370%20Higgs4%202014-12-21.pdf >. Acesso em: 11 Julho 2014.
- [40] K. FINKENZELLER, RFID Handbook, Second Edition, England, John Wiley & Sons Ltd , 2003, 45 – 74 p.
- [41] SEEMANN, K.; HOFER, G.; CILEK, F.; WEIGEL, R. Single-ended ultra-lowpower multistage rectifiers for passive RFID tags at UHF and microwave frequencies, Radio and Wireless Symposium, 2006 IEEE, 2006, 479 – 482 p.
- [42] ALIEN TECHNOLOGY. Higgs[™]4 Strap. Disponivel em: <http://www.alientechnology.com/wp-content/uploads/Alien-Technology-Higgs-Strap.pdf>. Acesso em: 11 Julho 2014.
- [43] ALIEN TECHNOLOGY. Higgs[™]4. Disponível em
 <http://www.alientechnology.com/wp-content/uploads/Alien-Technology-Higgs-
 4-IC-Datasheet.pdf> Acesso em 17 out. 2014.
- [44] C. BALANIS, Antenna Theory, Analysis and Design, Third Edition, New York, John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [45] NIKITIN, P.V. ; LAM, S. ; RAO, K.V.S., Low cost silver ink RFID tag antennas, Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE, 2005, vol. 2B, 353 - 356 p
- [46] BING YANG ; QUANYUAN FENG, A folded dipole antenna for RFID tag, Microwave and Millimeter Wave Technology, 2008. ICMMT 2008. International Conference on, 2008, 1047 – 1049 p.

- [47] SUNG-LIN CHEN ; KEN-HUANG LIN, A folded dipole with a closed loop antenna for RFID applications, Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007 IEEE, 2007, 2281 - 2284 p.
- [48] PAREDES, F. ; ZAMORA, G. ; HERRAIZ-MARTÍNEZ, F.J. ; MARTIN, F. ; BONACHE, J. Dual-band RFID tags based on folded dipole antennas loaded with spiral resonators, Antenna Technology (iWAT), 2012 IEEE International Workshop on, 2012, 136 – 139 p.
- [49] BAHL, I. J. Lumped elements for RF and microwave circuits, 2003 ARTECH HOUSE, INC. 685 Canton Street Norwood, MA 02062
- [50] DAVID M. POZAR, Microwave Engineering, 4th ed. JohnWiley & Sons, Inc.
- [51] MEDEIROS, C.R.; COSTA, J.R.; FERNANDES, C.A. Passive UHF RFID Tag for Airport Suitcase Tracking and Identification, Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE, Year: 2011, 123 – 126 p.
- [52] J.D.KRAUS, **Antennas** Second Edition, USA, McGraw-Hill Book Company,1997.
- [53] Tae-Wan Koo, et al. Design of a Label-Typed UHF RFID Tag Antenna for Metallic Objects, Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE, 2011, 1010 – 1014 p.
- [54] KYEONG-SIK MIN ; GUN-DO PARK ; CHUL-KEUN PARK, Design for the miniaturized RFID tag antenna in 910 MHz band, TENCON 2007 - 2007 IEEE Region 10 Conference, Year: 2007, 1 - 4 p.
- [55] CHOI, Y.; KIM, U.; KIM, J.; CHOI, J. Design of modified folded dipole antenna for UHF RFID tag, Electronics Letters, 2009, 387 - 389 p.

- [56] PLASTICSINTL, 2014. Disponivel em: https://www.plasticsintl.com/datasheets/Phenolic_G10_FR4.pdf>. Acesso em: 20 Novembro 2014.
- [57] GHIOTTO, A. ;VUONG, T.P. ; WU, K. Chip and Antenna Impedance Measurement for the Design of Passive UHF RFID Tag, Microwave Conference (EuMC), 2010 European, Paris, 28-30 Sept. 2010, 1086 - 1089 p.
- [58] FAUDZI, N.M. et Al. A Compact Dipole UHF-RFID Tag Antenna, RF and Microwave Conference (RFM), 2013 IEEE International, Penang, 9-11 Dec. 2013, 314 - 317 p
- [59] SYDANHEIMOL,L.; NUMMELA, J.; UKKONEN, L.; MCVAY, J.; HOORFAR,
 A.; KIVIKOSKI, Characterization of Passive UHF RFID Tag Performance,
 Antennas and Propagation Magazine, IEEE (Volume:50, Issue: 3), 22 Julho 2008, 207 212 p.
- [60] UKKONEN, L.; SYDANHEIMO, L. Impedance Matching Considerations for Passive UHF RFID Tags, Microwave Conference, 2009. APMC 2009, Singapore Asia Pacific DOI: 10.1109/APMC.2009.5385461, Publication Year: 2009, 2367-2370 p.
- [61] KUROKAWA, K. Power Waves and the Scattering Matrix, Microwave Theory and Techniques, IEEETransactionson (Volume:13,Issue:2), Mar 1965, 194 – 202 p.
- [62] FRITZ CASPERS, RF ENGINEERING BASIC CONCEPTS. S-Parameters, CAS, Aarhus,June-2010: https://cas.web.cern.ch/cas/UK-2007/Afternoon%20 Courses/RF/cas_rf_engineering_basic_concepts.pdf. Acesso em 15 out 2014
- [63] CRAWFORD, D. Online Design of UHF RFID Antennas Assisted by CST Microwave Studio, , 2013. Disponivel em: https://www.cst.com/Content/Events/workshop_documents/2013/Online-

Design-UHF-RFID-Antennas-CST-Microwave-Studio.pdf>. Acesso em: 20 Agosto 2013.

- [64] K. C. GUPTA, R. GARG, I. BAHL, P. BHARTIS, Microstrip Lines and Slotlines, Second Edition, Artech House, Boston, 1996.
- [65] ISOLA, 2014. Disponível em: www.isola-group.com/products/IS680-338.Acesso em 23 maio 2014.
- [66] LESSARD, M.C. MASSE, M.; PENNEAU, J.F. Grob, R." Thermal aging study of insulating papers used in power transformers, Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1996., IEEE 1996 Annual Report of the Conference on (Volume:2), Millbrae, CA, 20-23 Oct 1996, 854 - 859 p.
- [67] A. RIDA, L. YANG, R. VYAS, MANOS. M. TENTZERIS. Conductive Inkjet-Printed antennas on Flexible Low-Cost Paper-Based Substrates for RFID and WSN Applications, IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 51, No.3, June 2009, 13 - 23 p.
- [68] CABOT, 2012. Disponivel em: http://www.cabot-corp.com. Acesso em: 10 Maio 2012.
- [69] DAVID A. ROBERSON, el at. Microstructural and Process Characterization of Conductive Traces Printed from Ag Particulate Inks. Disponível em www.mdpi.com/journal/materials, ISSN 1996-1944, 963-979 p
- [70] DUPONT, 2013. Disponivel em: http://www.dupont.com/content/dam/assets/products-and-services/ electronicelectrical-materials/assets/datasheets/prodlib/5064H.pdf>. Acesso em: 14 Abril 2013.
- [71] W. ALAN DAVIS, KRISHNA AGARWAL, Radio Frequency Circuit Design, 2001 John Wiley & Sons, Inc. Print ISBN 0-471-35052-4 Electronic ISBN 0-471-20068-9.

- [72] KIPPHAN, HELMUT: Handbook of Print Media, 2001
- [73] REBELLO, P. H.P. Aplicações de técnicas de impressão à dispositivos eletrônicos orgânicos. 2013.99p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.
- [74] SANZ, V., SANCHEZ, E. ;TIRADO, M. Influência da Serigrafia sobre a Variação de Tonalidade de Revestimentos Cerâmicos. s.I. Cerâmica Industrial, 1999.
- [75] VIRTANEN, J. el at. Passive UHF Inkjet-Printed Narrow-Line RFID Tags, Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE, 2010, 440-443 p
- [76] VALMIRO, R.;BARBIN, S. E. A Measurement Technique for Static Determination of RFID Tags' Sensitivity Using a Low-cost UHF GTEM Cell". In: 8TH European Conference on Antennas and Propagation - EUCAP 2014, The Hague. 8TH European Conference on Antennas and Propagation -EUCAP 2014. The Haage, 2014. 1297-1300 p
- [77] INC., E. EPCglobal, 2012. Disponivel em: http://indicod-ecr.it/documenti/epc/static-test-method.pdf. Acesso em: 15 Maio 2012.
- [78] CORP, C., 2012. Disponivel em: <</p>
 http://www.dfwwebdesigns.net/cts/Manuals/5060AB_ER80320_CTS.pdf
 Acesso em: 23 Março 2012.
- [79] DE ARAUJO, H.X.; BARBIN, S.E.; KRETLY, L.C., The use of metamaterial technology to improve a GTEM chamber, Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC), 2013 SBMO/IEEE MTT-S International, 2013, 1-5 p
- [80] K. V. S. RAO, P. V. NIKITIN, AND S. F. LAM, Antenna design for UHF RFID tags: a review and a practical application, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 53, no. 12, Dec. 2005, 3870 -3876 p.

[81] DENNISON,A.,2013.Disponivelem:<http://rfid.averydennison.com/en/home/products/uhf-rfid-inlays/ad-</td>226im.html>. Acesso em: 12 Julho 2013.

APÊNDICE A – Fórmula aproximada de projeto para linha microfita

Vamos apresentar a fórmula aproximada de projeto para a permissividade dielétrica efetiva da linha de microfita. Estes resultados são aproximações da curva de ajuste para soluções quase estáticas como poder ser visto em (50).

Permissividade Dielétrica Efetiva para uma linha de microfita é dado aproximadamente pela equação abaixo:

$$\varepsilon_{e} = \frac{\varepsilon_{r} + 1}{2} + \left(\frac{\varepsilon_{r} - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \cdot \frac{h}{W}}}\right)$$
(29)



Figura 90 - Linha de microfita sobre substrato

Fonte: Robson Valmiro (2014)

Para uma dada impedância característica Z₀ e permissividade dielétrica \mathcal{E}_r , a relação $\frac{W}{h}$ pode ser encontrado como:

$$\frac{W}{h} = \frac{8e^{A}}{e^{2A} - 2} \qquad para \qquad \frac{W}{h} < 2 \tag{30}$$

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln\left(2B - 1\right) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r} \left[\ln\left(B - 1\right) + 0, 39 - \frac{0, 61}{\varepsilon_r} \right] \right\}$$

$$para \qquad \frac{W}{h} > 2$$
(31)

onde:

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2}} + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \cdot \left(0, 23 + \frac{0, 11}{\varepsilon_r}\right)$$
(32)

$$B = \frac{377\,\pi}{2.Z_0\,.\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{33}$$

Assim, pode-se calcular o comprimento de uma linha de microfita fabricada sobre o substrato FR4 para uma impedância (Z_0) de 50 Ω , uma espessura (h) de 1,6 mm, uma permissividade dielétrica (\mathcal{E}_r) de 4,8 e uma frequência de ressonância em 915 MHz.

Utilizando a eq.(32) temos:

$$A = \frac{50}{60} \sqrt{\frac{4,8+1}{2}} + \frac{4,8-1}{4,8+1} \cdot \left(0,23 + \frac{0,11}{4,8}\right) = 1,5847$$

Da eq.(30) temos:

$$\frac{W}{h} = \frac{8e^{1,5847}}{e^{2^{*1},5847}-2} = \frac{39,0226}{21,7932} = 1,7905$$

Para h=1,6 mm, temos:

$$W=1,7905*h=1,7905*1,6.10^{-3}=2,8648.10^{-3} \cong 3 mm$$

O comprimento *L* da linha de microfita sobre o substrato FR4 pode ser calculado pela seguinte equação:

$$L = \frac{\Phi}{\sqrt{\varepsilon_e} . k_0}$$
(34)

onde:

 Φ é a fase;

 K_0 é a constante de atenuação dada por.

$$k_0 = \frac{2.\pi \cdot f}{c} = \frac{2.\pi \cdot 915 \, e \, 6}{300 \, e \, 6} = 19,1637 \ m^{-1}$$
(35)

E a permissividade dielétrica efetiva do substrato \mathcal{E}_{e} é dada pela eq.(7) e seu valor é de:

$$\varepsilon_{e} = \frac{4,8+1}{2} + \left(\frac{4,8-1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+12 \cdot \frac{1,6e-3}{3e-3}}}\right) = 3,5984$$

O comprimento total da antena para uma mudança de fase em 270º é:

$$L = \frac{270.\frac{\pi}{180}}{\sqrt{3,5984.19,1637}} = 12,96 \ cm$$

A Figura 91 mostra as dimensões da antena dipolo de microfita.



Figura 91 - Antena dipolo em microfita

Fonte: Robson Valmiro (2014)

ANEXO A – Especificação da célula GTEM



Concentric Technology Solutions Inc

Testing Solutions for the Wireless Industry

TC-5060A/B UHF TEM Cell Data Sheet

TC-5060A/B UHF TEM Cell

TESCOM

Product Description

The TC-5060A/B, an economy UHF TEM Cell generates a consistent Electromagnetic field for testing small RF devices such as Pagers, GPS Receivers, Mobile phones, etc. An external test signal applied through the input port of the TC-5060A/B generates a consistent and predictable TEM test field inside the cell. The radiation field from a device transmitting in the Cell can also be detected through the port using a test receiver.

The unique compact and economical design is optimized for medium accuracy measurements beyond the standard TEM Cell frequency range.



R70309

Theory of operation

The TC-5060A/B UHF TEM cell is made to work beyond the typical TEM Cell operating frequency range limited by cell resonance. A typical TEM Cell is a 2-port symmetrical device; RF voltage is applied to one port while the other port is terminated in 50 ohm while maintaining 50Ω characteristic impedance along the cell. Due to expansion and contraction parts of the cell, the wave propagation beyond certain frequency is no more propagated by TEM mode alone and creates resonance. To eliminate the resonance problem, the half of the cell is replaced by the wave absorbing material. One commercial implementation is G-TEM cell. The size of the G-TEM design is too large for typical small device applications due to the type of absorber used. TESCOM borrowed the concept of G-TEM, but changed the termination implementation scheme, and designed a very compact broad band TEM Cell that can be used on a desktop.

The operation principle of TC-5060A/B is essentially the same as TEM Cell. The E-H field inside the test volume is proportional to the input voltage and inversely proportional to the cell height. If a radiating object is inserted inside the cell, the radiated wave toward input port is guided by the transmission line and picked up at the input with a receiver such as a spectrum analyzer. With this method, the RFI from a radiating Device can be measured quantitatively. Since this apparatus is very broadband, it has many applications in the area of EMI, EMS, receiver sensitivity test, etc.

Specification

- VSWR : < 1.7, 400MHz ~ 3GHz (TC-5080A); < 1.7, 100MHz ~ 3GHz (TC-5060B)
- Path Loss : 22dB Typical
- Effective Shielding : > 80dB up to 2GHz, > 70dB 2GHz ~ 3GHz
- Effective Cell Height : 220 mm
- Field Strength at Test Point : 13 dBuV/m at 1 uV input
- Data Connector : DB25(p) outside, DB25(s) inside
- RF Connector : N(f) outside, SMA(f) outside and SMA(f) inside
- Dimension : 344(W) x 380(D) x 675(H) [mm]
- Door Size : 176(W) x 130(H) [mm]
- Weight : 19 Kg

Concentric Technology Solutions Inc TEL: 817-503-8862 FAX: 817-503-8866 Email : <u>ds-sales@ctscorp-usa.com</u> Website : <u>www.ctscorp-usa.com</u>