

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JULIANA BORGES FERREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE ETIQUETAS PLANARES
PASSIVAS UHF RFID EM SUPERFÍCIES METÁLICAS E NÃO
METÁLICAS COM A PROPOSTA DE UMA FIGURA DE
MÉRITO PARA AVALIAÇÃO**

Porto Alegre

2021

JULIANA BORGES FERREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE ETIQUETAS PLANARES
PASSIVAS UHF RFID EM SUPERFÍCIES METÁLICAS E NÃO
METÁLICAS COM A PROPOSTA DE UMA FIGURA DE
MÉRITO PARA AVALIAÇÃO**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia de Computação – Redes e Telecomunicações

ORIENTADOR: Dr. Álvaro Augusto Almeida de Salles

Porto Alegre

2021

JULIANA BORGES FERREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE ETIQUETAS PLANARES
PASSIVAS UHF RFID EM SUPERFÍCIES METÁLICAS E NÃO
METÁLICAS COM A PROPOSTA DE UMA FIGURA DE
MÉRITO PARA AVALIAÇÃO**

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Álvaro Augusto Almeida de Salles, UFRGS

PhD pela London University - Londres, Inglaterra.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. André Augusto Mariano, UFPR

Doutor pela Université de Bordeaux – França.

Prof. Dr. Marcos Vinício Thomas Heckler, UNIPAMPA

Doutor pela Technische Universität München – Alemanha.

Prof. Dr. Ivan Müller, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil.

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. Sérgio Luís Haffner.

Porto Alegre, março de 2021.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, por ter me dado força e coragem para seguir em frente.

Aos meus pais João Francisco Peres Ferreira e Neiva Eva Borges Ferreira por conduzirem a minha educação formal e pelos exemplos de caráter e simplicidade.

A minha irmã Isabel Borges Ferreira por todo carinho e cuidado em todos os momentos difíceis.

Aos meus sobrinhos Lucas Ferreira da Silva e Matheus Ferreira da Silva que no intuito de incentivá-los acabaram sendo meu incentivo.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

Ao professor PhD. Álvaro Augusto Almeida de Salles pela oportunidade concedida, pela compreensão, orientação e colaboração em todas as etapas de desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Dr. Giovani Bulla meu agradecimento especial pelo compartilhamento de sua vasta experiência em todas as etapas de desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Dr. Sandro Binsfeld Ferreira (UNISINOS-SÃO LEOPOLDO), ao professor Ms. Claudio Enrique Fernández Rodríguez (IFRS-CANOAS) e aos colegas do PPGEE e ITTCHIP-UNISINOS pelo auxílio no compartilhamento de experiências e conhecimentos.

Ao Instituto Tecnológico de Semicondutores da UNISINOS (ITTCHIP-UNISINOS) coordenado pelo professor Eng. Celso Peter pela disponibilização dos softwares, materiais e equipamentos de medição.

Ao Centro Nacional de Tecnologia Eletrônica Avançada (CEITEC S.A) pela disponibilização dos equipamentos de soldagem do CI e medidas.

Ao Eng. Michel Bardauil pelas medidas realizadas no Laboratório da UNICAMP.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pela provisão da bolsa e publicação dos artigos.

A secretaria Miriam Rosek (PPGEE - UFRGS) pela ajuda referente aos esclarecimentos das diretrizes do programa de Doutorado.

RESUMO

As etiquetas planares passivas de identificação por radiofrequência (*Radio Frequency Identification* – RFID) em ultra-alta frequência (*Ultra High Frequency* – UHF) têm sido amplamente estudadas para a utilização em superfícies metálicas e não metálicas, entre outros. Com o aumento de novas tendências relacionadas à Internet das Coisas, a necessidade de desenvolvimento de novos modelos de etiquetas que atendam com eficiência aos diversos paradigmas torna-se oportuno. Essa eficiência depende da necessidade de cada aplicação. Uma variedade considerável de fatores influencia na indicação do desempenho dessas etiquetas. Em termos de comparação, a miniaturização, o amplo alcance de leitura e o baixo custo são relevantes na maioria dos casos, porém em outros, uma etiqueta miniaturizada que não tenha um grande alcance de leitura irá atender completamente a necessidade do usuário. Na busca por uma ampla possibilidade de quantificação, esta tese apresenta uma solução para avaliação: a implementação de uma Figura de Mérito (*Figure of Merit* – FoM) que englobe as principais métricas dessas etiquetas (alcance de leitura, área, sensibilidade de leitura do CI, custo do substrato e custo do processo de fabricação). Na parte inicial da tese é feito um estudo sobre as métricas utilizadas nas FoM existentes. Com base nas considerações referentes às FoM apresentadas na bibliografia foram definidas as escolhas das métricas mais adequadas e proposta a FoM para etiquetas passivas RFID em superfícies metálicas e não metálicas. Duas novas etiquetas passivas UHF RFID de estruturas diferentes foram projetadas para serem utilizadas na avaliação da FoM juntamente com as etiquetas existentes na literatura. A primeira refere-se a uma etiqueta para utilização em objetos metálicos e a segunda trata-se de uma etiqueta para utilização em objetos não metálicos, desenvolvidas através do processo de Remoção – *Etching* e do processo de Impressão por Transferência Térmica – *ThermalTransfer*, respectivamente. Os resultados das simulações eletromagnéticas das etiquetas foram verificados através de medidas experimentais em ambiente controlado. Finalmente, é feita a aplicação da FoM nas etiquetas desenvolvidas e existentes. A FoM proposta emprega métricas ainda não utilizadas e fornece a possibilidade de avaliação e quantificação de etiquetas, indicando que o valor derivado do mérito é particularmente útil não somente para comparação de etiquetas correlatas como para análise de decisões iniciais de projetos de etiquetas UHF RFID, tendo também potencial para aplicação em outros tipos de etiquetas.

Palavras-chave: Figura de mérito. RFID. UHF. Etiquetas passivas. Superfícies metálicas. Superfícies não metálicas. Processo de fabricação de etiquetas.

ABSTRACT

Passive planar radio frequency identification tags antennas - RFID in ultra-high frequency - UHF have been widely studied for use on metallic and non-metallic surfaces, among others. With the increase in new trends related to the Internet of Things, the need to develop new models of tag antennas that efficiently meet the different paradigms becomes opportune. This efficiency depends on the needs of each application. A considerable variety of factors influence the indication of the performance of these tag antennas. In terms of comparison, miniaturization, long reading range and low cost are relevant in most cases, but in others, a miniaturized tag antenna that does not have a long reading range will completely meet the user's needs. In the search for the broad possibility of quantification, this thesis presents a solution for evaluation: the implementation of a Figure of Merit (Figure of Merit - FoM) that uses several of its main metrics of these tag antennas (reading range, area, reading sensitivity of the chip, cost substrate and cost of the manufacturing process). In the initial part of the thesis, a study is made on the metrics used in the existing FoM. Based on the FoM considerations presented in the bibliography, the choices of the most appropriate metrics were defined and FoM was proposed for passive RFID tag antennas on metallic and non-metallic surfaces. Two new passive UHF RFID tags of different structures have been designed to be used in the evaluation of FoM together with the existing tags in the literature. The first refers to a tag antenna for use on metallic objects and the second is a tag antenna for non-metallic objects developed through the Removal - Etching and Thermal Transfer Printing - ThermalTransfer processes, respectively. The results of the electromagnetic simulations of the tag antennas were verified through experimental measurements in a controlled environment. Then, the proposal used for the figure of merit for passive RFID tags on metallic and non-metallic surfaces is presented. Finally, FoM is applied to the developed and existing tag antennas. The proposed figure of merit, besides employing several characteristics, provides a wide possibility for its quantification of tag, indicating that the value derived from merit is particularly useful not only for comparing related tag antennas but also for analyzing initial decisions of a UHF RFID tag antenna design , also having potential for application in other types of tag antennas.

Keywords: Figure of merit. RFID. UHF. Passive tag antennas. Metal surface. Non-Metal surface. Tag antenna manufacturing process.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Etapas do processo de fabricação de <i>RFtag</i> UHF	34
Figura 2 – Componentes básicos de um sistema RFID	38
Figura 3 – Identificação EPC de uma etiqueta de RFID	43
Figura 4 – Processos de fabricação de antenas	51
Figura 5 – Fluxo do processo de fabricação de antenas por Remoção Química	53
Figura 6 – Equipamento de Estampagem modelo 350	58
Figura 7 – Fluxo do processo de fabricação de antenas através de impressão a Jato de Tinta	60
Figura 8 – Fluxo do processo de fabricação de antenas através de impressão por Serigrafia	63
Figura 9 – Resumo do processo de fabricação de antenas através de impressão por Transferência Térmica	65
Figura 10 – Fluxo do processo de fabricação de antenas por Eletrodeposição	67
Figura 11 – Estrutura de uma ILA	73
Figura 12 – Estrutura de uma IFA	73
Figura 13 – Estrutura de uma PIFA	74
Figura 14 – Solda com adesivo ACA	81
Figura 15 – Composição do laminado	84
Figura 16 – Etiqueta desenvolvida para objetos metálicos	86
Figura 17 – Dimensões da etiqueta desenvolvida (a) Vista frontal e (b) Vista lateral	87
Figura 18 – Solucionadores e opções do software HFSS	88
Figura 19 – Resistência de entrada (R_a) da antena para diferentes valores da dimensão “a”	90
Figura 20 – Reatância de entrada da antena (X_a) para diferentes valores da dimensão “a”	91
Figura 21 – Resistência de entrada (R_a) da antena para diferentes valores da dimensão “b”	91
Figura 22 – Reatância de entrada da antena (X_a) para diferentes valores da dimensão “b”	92
Figura 23 – Resistência de entrada da antena $Re(Z_a) \times$ Resistência de entrada do CI $Re(Z_c)$	93
Figura 24 – Reatância de entrada da antena $Im(Z_a) \times$ Reatância de entrada do CI $Im(Z_c)$	93
Figura 25 – Coeficiente de transmissão de potência simulado	94
Figura 26 – Alcance de leitura simulado	95
Figura 27 – Ganho de potência simulado, normalizado em 0 dB (plano z-y)	95
Figura 28 – Alcance de leitura simulado sem base metálica	96
Figura 29 – Protótipo da etiqueta	97
Figura 30 – Medida realizada com leitor portátil	97
Figura 31 – Leitor Intermec	98
Figura 32 – Antenas modelo MK 7.0 do kit Intermec	98
Figura 33 – Etiqueta com base metálica de 130 \times 130 mm	99
Figura 34 – Câmara anecóica utilizada nas medições	100
Figura 35 – Alcance de leitura medido com base metálica	100
Figura 36 – Ganho de potência medido normalizado em dB = 0 (plano z-y)	101
Figura 37 – Alcance de leitura medido sem base metálica	102
Figura 38 – Alcance de leitura simulado e medido com a base metálica	103
Figura 39 – Alcance de leitura simulado e medido sem a base metálica	103
Figura 40 – Comparação entre o ganho de potência (plano z-y)	104
Figura 41 – Etiqueta para superfície não metálica (Modelo E62)	105
Figura 42 – Circuito integrado modelo Monza R6	108

Figura 43 – Modelo circuital simplificado da impedância complexa do CI Monza R6.....	108
Figura 44 – Alterações no Loop Indutor da etiqueta desenvolvida para superfície não metálica.	110
Figura 45 – Alterações nas extremidades da etiqueta desenvolvida	111
Figura 46 – Etiqueta desenvolvida para superfície não metálica	112
Figura 47 – Alcance de leitura simulado	112
Figura 48 – Protótipo da etiqueta desenvolvida para objetos não metálicos.....	112
Figura 49 – Alcance de leitura medido em 10 protótipos	113
Figura 50 – Alcance de leitura simulado com material PET puro.....	123
Figura 51 – Alcance de leitura simulado com encapsulamento	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixas de frequências no espectro	44
Tabela 2 – Bandas de frequências e limites de EIRP para sistemas RFID em UHF	46
Tabela 3 – Principais vantagens e desvantagens	55
Tabela 4 – Alternativas tecnológicas	56
Tabela 5 – Principais vantagens e desvantagens	58
Tabela 6 – Principais vantagens e desvantagens	61
Tabela 7 – Principais vantagens e desvantagens	63
Tabela 8 – Principais vantagens e desvantagens	65
Tabela 9 – Principais vantagens e desvantagens	67
Tabela 10 – Resumo normalizado dos fatores de custo de fabricação por antena	69
Tabela 11 – Resumo das características de alguns tipos de substratos	82
Tabela 12 – Dimensões dos parâmetros relevantes da etiqueta.....	87
Tabela 13 – Resumo das etiquetas UHF RFID para objetos metálicos pesquisadas.....	116
Tabela 14 – Resumo das etiquetas UHF RFID para objetos não metálicos pesquisadas	117
Tabela 15 – Resultado da FoM _{JB} para superfícies metálicas.....	119
Tabela 16 – Resultado da FoM _{JB} para superfícies não metálicas.....	121
Tabela 16 – Variáveis de processo usadas como referência em todas as técnicas	133
Tabela 18 – Planilha de estimativa de custo de equipamentos.....	134

LISTA DE SÍMBOLOS

R	Alcance de leitura
ϕ	Ângulo phi
θ	Ângulo theta
A	Área da antena
A _l	Alumínio
E	Intensidade de campo Elétrico
H	Intensidade de Campo Magnético
C	Capacitância
C _{mount}	Capacitância parasita
C _p	Capacitância equivalente paralela
C _u	Cobre
τ	Coefficiente de transmissão
Γ	Coefficiente de reflexão
L	Comprimento do elemento irradiante da antena
L _e	Comprimento efetivo da antena
L _f	Comprimento da fenda/reentrância da antena
L _g	Comprimento do plano de terra da antena
L _s	Comprimento do substrato da antena
λ	Comprimento de onda
ΔL	Comprimento fringe
σ	Condutividade elétrica

D	Diretividade
η	Eficiência da antena
T_{pm}	Espessura das partes metálicas da antena
T_s	Espessura do substrato da antena
f	Frequência
f_o	Frequência central
f_r	Frequência de ressonância
G	Ganho
G_r	Ganho do receptor
G_t	Ganho do transmissor
Z_a	Impedância da antena
Z_{in}	Impedância de entrada
Z_c	Impedância do CI
$U_{máx}$	Intensidade de irradiação máxima
$U_{méd}$	Intensidade de irradiação média
W_c	Largura da conexão entre elemento irradiante e plano de terra
W	Largura do elemento irradiante da antena
W_f	Largura da fenda/reentrância da antena
W_g	Largura do plano de terra da antena
W_s	Largura do substrato da antena
BW	Largura de banda
S_{11}	Parâmetro de reflexão
X_{in}	Parte imaginária (reativa) da impedância
R_{in}	Parte real (resistiva) da impedância
ϵ_r	Permissividade relativa

ϵ_{re}	Permissividade relativa efetiva
P	Potência
P_{diss}	Potência dissipada
P_{rad}	Potência radiada
R_a	Resistência da antena
R_{loss}	Resistência de perdas da antena
R_r	Resistência de radiação da antena
R_c	Resistência do CI
$\tan\delta$	Tangente de perdas
V	Tensão elétrica
V_0^-	Tensão refletida
V_0^+	Tensão incidente
c	Velocidade da luz no vácuo
$\hat{\rho}_r$	Vetor unitário de polarização da antena receptora
$\hat{\rho}_t$	Vetor unitário de polarização da antena transmissora

LISTA DE SIGLAS

ACA	Anisotropic Conductive Adhesive – Adesivo Anisotrópico Condutivo
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
CAPEX	Capital Expenditure – Despesas de Capital
CI	Circuito Integrado
DMT	Dimethyl Terephthalate - Dimetil Tereftalato
EG	Ethylene Glycol - Etileno Glicol
EHF	Extremely High Frequency- Frequência Extremamente Alta
EIRP	Equivalent Isotropic Radiated Power – Potência Isotrópica Radiada Equivalente
ELF	Extremely Low Frequency - Frequência Extremamente Baixa
EPC	Electronic Product Code - Código Eletrônico de Produto
FCC	Federal Communications Commission
FEM	Finite Element Method – Método de Elementos Finitos
FoM	Figure of Merit – Figura de Mérito
HF	High Frequency – Frequência Alta
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFA	Inverted-F Antenna - Antena F-Invertido
ILA	Inverted-L Antenna - Antena L-Invertido
IoT	Internet of Things – Internet das Coisas
ISM	Industrial, Scientific and Medical

ITU	International Telecommunication Union
ISO	International Standards Organization
LF	Low Frequency – Frequência Baixa
MF	Medium Frequency – Frequência Média
PET	Polyethylene Terephthalate - Polietileno Tereftalato
PET-G	Polyethylene Terephthalate with Glicol - Polietileno Tereftalato com Glicol
PIFA	Planar Inverted-F Antenna - Antena Planar em Formato F-Invertido
PTA	Purified Terephthalic Acid - Ácido Tereftálico Purificado
RFID	Radio Frequency Identification – Identificação por Radiofrequência
RFtag	Etiqueta de Radiofrequência
RF	Radio Frequency – Radiofrequência
SHF	Super High Frequency - Frequência Super Alta
UHF	Ultra High Frequency – Ultra-Alta Frequência
UV	Ultravioleta
VLF	Very Low Frequency - Frequência Muito Baixa
VHF	Very High Frequency - Frequência Muito Alta
WI-FI	Wireless Fidelity – Padrão de Comunicação sem Fio

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	18
1.1.	MOTIVAÇÃO.....	18
1.2.	ESCOPO	19
1.3.	OBJETIVOS	20
1.3.1.	Objetivo Principal	20
1.3.2.	Objetivos Específicos.....	20
1.4.	PUBLICAÇÕES ASSOCIADAS À TESE	21
1.5.	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO.....	23
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE FIGURA DE MÉRITO	25
3.	DESCRIÇÃO DA FIGURA DE MÉRITO PROPOSTA.....	33
4.	ETIQUETAS PARA APLICAÇÃO EM SISTEMAS RFID.....	37
4.1.	COMPOSIÇÃO DO SISTEMA	37
4.2.	ASPECTOS HISTÓRICOS DO SISTEMA RFID.....	39
4.3.	CODIFICAÇÃO DAS ETIQUETAS RFID	41
4.4.	CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS RFID	43
4.4.1.	Frequência de Operação	44
4.4.2.	Alimentação do CI da Etiqueta	47
4.5.	PARÂMETROS FUNDAMENTAIS DE ANTENAS PARA ETIQUETAS RFID	48
4.5.1.	Alcance de Leitura e Coeficiente de Transmissão	49
5.	TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO DE ANTENAS UHF RFID	51
5.1.	REMOÇÃO QUÍMICA	52
5.1.1.	Considerações sobre o Custo do Processo Remoção Química.....	57
5.2.	FABRICAÇÃO POR ESTAMPAGEM	58
5.2.1.	Considerações sobre o Custo do Processo de Fabricação por Estampagem.....	59
5.3.	IMPRESSÃO POR JATO DE TINTA	59
5.3.1.	Considerações sobre o Custo do Processo Impressão por Jato de Tinta.....	61
5.4.	IMPRESSÃO POR SERIGRAFIA	62
5.4.1.	Considerações sobre o Custo do Processo de Impressão por Serigrafia	64
5.5.	IMPRESSÃO POR TRANSFERÊNCIA TÉRMICA	65
5.5.1.	Considerações sobre o Custo do Processo de Impressão por Transferência Térmica.....	66
5.6.	ELETRODEPOSIÇÃO	66
5.6.1.	Considerações sobre o Custo do Processo de Eletrodeposição.....	68
5.7.	FATOR DE CUSTO DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO POR ANTENA	69
6.	ETIQUETAS PLANARES PASSIVAS RFID PARA OBJETOS METÁLICOS	71
6.1.	CARACTERÍSTICAS DA ANTENA PLANAR EM FORMATO F INVERTIDO (PIFA).....	72
6.1.1.	Localização do Ponto de Alimentação	74
6.1.2.	Localização do Curto-Circuito entre o Elemento Irradiante e o Plano de Terra.	75
6.1.3.	Distância entre Plano de Terra e Elemento Irradiante.....	75
6.1.4.	Largura e Comprimento do Elemento Irradiante.....	76
6.1.5.	Tamanho do Plano de Terra.....	78

6.2.	DESCRIÇÃO DA ETIQUETA DESENVOLVIDA	78
6.3.	SIMULAÇÕES	88
6.4.	PROTÓTIPO	96
6.5.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	97
6.6.	ANÁLISE DE RESULTADOS	102
7.	ETIQUETA PLANAR PASSIVA UHF RFID PARA SUPERÍFICES NÃO METÁLICAS	105
7.1.	CARACTERÍSTICAS DAS ETIQUETAS.....	105
7.2.	DESCRIÇÃO DA ETIQUETA DESENVOLVIDA	107
7.3.	SIMULAÇÕES, PROTÓTIPOS, RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	110
8.	APLICAÇÃO DA FIGURA DE MÉRITO PROPOSTA	115
9.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	122
	REFERÊNCIAS	126
	APÊNDICE A – CUSTOS DE FABRICAÇÃO	133

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

A identificação por radiofrequência (RFID) é uma tecnologia sem fio amplamente difundida que permite identificar objetos através de ondas eletromagnéticas (WANT, 2006). Um sistema RFID permite que as informações armazenadas na etiqueta colocada em um objeto sejam rastreadas remotamente por um equipamento de leitura.

Sistemas RFID podem ser classificados de acordo com a fonte de alimentação de energia da etiqueta como: ativo ou passivo e também com base na frequência do sinal. Os sistemas que operam na faixa de ultra-alta frequência (UHF) entre 860 MHz e 960 MHz têm como característica a obtenção de um maior alcance de leitura (FINKENZELLER, 2010).

Estima-se que até 2022 o mercado total de RFID movimentará cerca de US\$ 13 bilhões, enquanto que, para as etiquetas RFID passivas alcançará em torno de 5 US\$ bilhões (IDTECHEX, 2018). Esses números motivam as pesquisas para a redução do custo das etiquetas e a necessidade de uma ferramenta de comparação dentre as diversas características da etiqueta para o desenvolvimento de um projeto otimizado.

Obter uma etiqueta com desempenho satisfatório e custo mínimo é fundamental, porém em muitos casos etiquetas de RFID são elaboradas para atender objetivos específicos como: alcance de leitura, área, custo do material e custo do processo de fabricação. A definição de uma Figura de Mérito (FoM) corresponde a uma ferramenta que pode ser utilizada em projetos de etiquetas passivas UHF RFID auxiliando na definição de requisitos específicos de diferentes aplicações. Algumas FoMs são obtidas através de informações estimadas como em (BAO, 2018), outras FoMs incluem na sua equação a análise das dimensões, porém fazem somente uma observação do processo de fabricação mais vantajoso (KHAN, 2015), não tendo assim uma aplicação concreta para tomadas de decisões iniciais em projetos de desenvolvimento de etiquetas. Desenvolver uma FoM que contenha uma ampla

quantidade de características até então não incluídas nas FoMs existentes nas bibliografias torna-se uma ferramenta que poderá ser usada não somente para tomada de decisões em projetos iniciais como também para avaliações de etiquetas existentes.

1.2. ESCOPO

Nesta tese, o tema central é a definição de uma FoM para etiquetas passivas UHF RFID incluindo o desenvolvimento de etiquetas. O interesse inicial foi o desenvolvimento de uma etiqueta miniaturizada com longo alcance de leitura e de baixo custo, isso trouxe à tona a necessidade de utilização de materiais e técnicas de fabricação diferentes sem alteração da faixa de frequência estipulada no Brasil para esse tipo de sistema. Porém, as tentativas incansáveis para o desenvolvimento de uma etiqueta ótima que mantivesse um bom casamento de impedância para uma máxima transferência de potência e conseqüentemente um longo alcance de leitura levou aos seguintes questionamentos: Como projetar a melhor etiqueta? Qual a etiqueta com melhor desempenho dentre as etiquetas existentes? Para resposta a essas perguntas e para conseguir quantificar e comparar etiquetas de um determinado tipo foi definida a criação de uma FoM incluindo as variáveis que afetam o desempenho das etiquetas, sendo gerado assim o escopo da tese em três partes:

- Realização de pesquisa sobre os fatores que influenciam no desempenho e no custo das etiquetas planares passivas UHF RFID. Com base nisso, estabelecer parâmetros que mostrem o vínculo entre essas variáveis e o desempenho/custo, propondo assim, critérios de projeto para etiquetas planares passivas UHF RFID.
- Projeto de etiquetas planares passivas UHF RFID com características distintas utilizando os métodos anteriormente definidos. Desenvolver etiquetas com o objetivo principal de encontrar um melhor alcance de leitura/custo. O principal desafio será a criação de uma etiqueta para utilização em superfícies metálicas e outra para

superfícies não metálicas. Esses novos modelos além de trazer a vantagem de uma nova opção de etiquetas também servirão para utilização na FoM a ser criada cuja comparação será feita com etiquetas apresentadas na literatura;

- Desenvolvimento de uma nova FoM para avaliação de etiquetas planares passivas UHF RFID e conseqüentemente utilização da equação para comparação das duas novas etiquetas desenvolvidas com etiquetas correlatas apresentadas na literatura.

Nos itens descritos anteriormente, o projeto, a simulação e os resultados experimentais das etiquetas não consideraram o invólucro da etiqueta. Dependendo do tipo de aplicação o invólucro das etiquetas pode ser fabricado com diferentes materiais. Invólucros com diferentes características apresentam resultados diferentes. No entanto, os conceitos desenvolvidos nesta tese também poderão ser utilizados em trabalhos futuros para projetar etiquetas envoltas por uma camada protetora específica.

É importante salientar que o trabalho desta tese tratará de etiquetas com CIs passivos.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo Principal

- Desenvolver uma nova FoM que abrange variáveis que influenciam no projeto de etiquetas passivas UHF RFID (alcance de leitura, área, sensibilidade de leitura do CI, custo do substrato e custo do processo de fabricação).

1.3.2. Objetivos Específicos

- Realizar pesquisa sobre materiais e processos atrativos para o projeto de etiquetas UHF RFID;

- Projetar duas novas etiquetas, uma para utilização em superfícies metálicas e outra para utilização em superfícies não metálicas, com tamanho compatível com os projetos relevantes apresentados na literatura e materiais adaptados para o processo de fabricação em larga escala;
- Implementar no *software* de simulação eletromagnética HFSS um modelo de simulação para essas etiquetas, construir o protótipo, realizar as medições em ambiente controlado (câmara anecóica), analisar a concordância das simulações e resultado experimentais, calcular e analisar o valor do mérito nas novas etiquetas e nas etiquetas existentes.

1.4. PUBLICAÇÕES ASSOCIADAS À TESE

Como resultado das atividades desenvolvidas no decorrer da tese de doutorado foram apresentados três artigos em conferências. Abaixo segue o resumo das publicações.

Paper I. Etiqueta UHF RFID compacta, de baixo custo e com longo alcance de leitura para ser montada em superfície metálica (FERREIRA, 2016).

CONFERÊNCIA: 2016 9th Latin America Networking Conference (LANC).
Valparaíso – Chile.

RESUMO: Esse trabalho apresenta o projeto de uma etiqueta passiva RFID compacta e de baixo custo para uso na banda de comunicação UHF podendo ser montada em superfície metálica. A etiqueta consiste em uma antena e um CI onde ambos têm impedâncias complexas. A antena Planar em Formato F Invertido (PIFA) é projetada para operar na frequência de 915 MHz. As simulações eletromagnéticas para verificar os parâmetros da etiqueta foram feitas com o programa Ansys HFSS baseado no Método de Elementos Finitos (MEF). A etiqueta proposta apresenta um bom desempenho e um máximo alcance de leitura quando colocada sob um substrato de Tereftalato de Polietileno (PET-G) de baixo custo com

uma camada metálica de alumínio de 10 μm de espessura, apresentando em torno de 9,8 metros de alcance de leitura e com tamanho total de $46,1 \times 28,58 \times 6 \text{ mm}^3$. A etiqueta proposta fornece uma referência valiosa para o projeto de etiqueta RFID montada em superfície metálica e pode ser amplamente utilizada em sistemas UHF RFID.

Paper II. Uma nova estrutura de etiqueta UHF RFID montada em superfície metálica usando fendas duplas (FERREIRA, 2017). Cidade da Guatemala – Guatemala.

CONFERÊNCIA: 2017 IEEE 9th Latin-American Conference on Communications (LATINCOM).

RESUMO: Neste artigo, está sendo proposta uma nova etiqueta passiva metálica UHF RFID montada em superfície metálica atuando na frequência de ressonância de 930 MHz. A técnica com fendas duplas para o casamento de impedância e melhoria do alcance de leitura é usada para obter um bom desempenho. Todas as simulações foram realizadas pelo *software* Ansys HFSS e os resultados medidos de alcance de leitura foram verificados através do kit de leitura Intermec. As dimensões da etiqueta proposta ficam em torno de $46 \times 28 \text{ mm}$. O CI modelo Monza R6 (IMPINJ, 2012) com sensibilidade de leitura de -20 dBm foi utilizado. Foram observados bons desempenhos, com uma distância de leitura razoável. A etiqueta proposta fornece valores de referência para etiquetas RFID, pode ser projetada para ser montada em superfície metálica e pode ser amplamente utilizada em sistemas UHF RFID.

Paper III. Desenvolvimento de uma nova FoM para avaliação de etiquetas passivas UHF RFID em superfícies metálicas e não metálicas (FERREIRA, 2020).

CONFERÊNCIA: MOMAG 2020 - 19º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas (SBMO) e Optoeletrônica e 14º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (CBMag).

RESUMO: Neste artigo é apresentada uma nova FoM para avaliação de etiquetas planares passivas UHF RFID para uso em superfícies metálicas e não metálicas. Desenvolver uma FoM se justifica devido a uma variação considerável de fatores (alcance de leitura, área,

sensibilidade de leitura do Circuito Integrado (CI), custo do substrato e custo do processo de fabricação) que influenciam na avaliação e comparação de etiquetas, estabelecendo assim, um padrão de comparação que englobe os parâmetros relevantes. Duas novas etiquetas passivas UHF RFID de estruturas diferentes foram criadas para serem avaliadas através da nova FoM. A primeira refere-se a uma etiqueta para utilização em objetos metálicos e a segunda trata-se de uma etiqueta para objetos não metálicos, ambas desenvolvidas através dos processos de Remoção – *Etching* e Impressão por Transferência Térmica – *ThermalTransfer*, respectivamente. Etiquetas existentes na bibliografia também foram utilizadas para a quantificação da FoM. A FoM proposta emprega diversas características da etiqueta fornecendo assim uma ampla possibilidade para quantificação da mesma, indicando que o valor derivado do mérito é particularmente útil para o projeto de etiquetas UHF RFID quando comparada com as FoMs existentes, tendo também potencial para aplicação em outros tipos de etiquetas.

1.5. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

A seguir consta como está organizado o restante deste trabalho.

Capítulo 2. Alguns conceitos são apresentados para ajudar no entendimento sobre a FoM. São abordadas as FoMs apresentadas na literatura sendo feita uma análise do tipo de solução apresentada e uma discussão sobre as escolhas das métricas consideradas e rejeitadas.

Capítulo 3. É proposta a FoM detalhando cada uma das variáveis escolhidas.

Capítulo 4. É feita a descrição do sistema RFID juntamente com a evolução dos aspectos históricos. São abordados itens sobre a codificação e a classificação do sistema. São indicados os fundamentos sobre as antenas para aplicação em etiquetas UHF RFID.

Capítulo 5. São abordados os processos de fabricação das etiquetas RFID-UHF. As vantagens e desvantagens de cada uma das técnicas são apresentadas. São indicadas as estimativas de custo das etiquetas elaboradas para cada um dos processos.

Capítulo 6. Mostra as características das antenas planares usualmente utilizadas para projeto de etiquetas UHF RFID. Descreve o projeto para criação de uma etiqueta planar passiva UHF RFID para utilização em superfícies metálicas. Apresenta a análise dos resultados verificados através das simulações eletromagnéticas e medidas experimentais, bem como, a construção do protótipo.

Capítulo 7. Descreve o projeto para criação de uma etiqueta planar passiva UHF RFID para utilização em superfície não metálica. Apresenta a análise dos resultados verificados através das simulações eletromagnéticas e medidas experimentais, bem como, a construção do protótipo.

Capítulo 8. Mostra a aplicação da FoM analisada através das novas etiquetas desenvolvidas e também das etiquetas apresentadas na literatura.

Capítulo 9. Apresenta o resumo das contribuições inseridas na tese e indica opções de possíveis pesquisas futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE FIGURA DE MÉRITO

Nas pesquisas realizadas na literatura não foram encontradas FoMs específicas para utilização em etiquetas passivas UHF RFID com CI. A FoM encontrada na literatura que era para uso específico em etiquetas RFID não possuía CI, incluindo em sua equação da FoM somente a variável dimensão, não incluindo, portanto as quantidades de interesse desejadas como: alcance de leitura, área, custo do substrato e custo do processo de fabricação.

Neste capítulo a pesquisa bibliográfica foi desenvolvida buscando FoMs que correspondessem às demandas de desempenho e custo. Será demonstrado que as FoMs existentes contemplam parcialmente tais requisitos, deixando espaço para a proposta de uma FoM mais abrangente neste sentido. Tendo em vista que a FoM visa orientar os projetistas em suas escolhas serão apresentadas discussões sobre as especificações dos projetos existentes baseados no atingimento de alguma meta de FoM.

Em busca de maiores contribuições que servissem de embasamento para a criação da nova FoM foram analisadas FoMs de vários dispositivos diferentes, porém voltados para aplicações em RFID pela falta de FoM específica para etiquetas RFID. As referências serviram para a escolha/rejeição das métricas a serem utilizadas na proposta da FoM intitulada como FoM_{JB}, pois cada uma delas apresentou um enfoque útil apresentando variáveis como: dimensão, frequência, potência, área e fator de arquitetura, sendo que algumas também indicavam práticas adotadas como: normalizações (dimensão e área), conversões de unidade (linear para dB), etc. Além disso, em alguns casos estava explícita a utilização de valores assumidos ou intuitivos para alcance da resposta.

A seguir são descritas as análises informando o objetivo de cada FoM encontrada, algumas discussões pertinentes às métricas utilizadas nas equações e a indicação da escolha das contribuições mais assertivas.

- Uma FoM utilizada em etiquetas UWB RFID sem CI é apresentada por (KHAN, 2016), a etiquetas é fabricada pela técnica de impressão a jato de tinta e relaciona a capacidade de codificação (bits codificados por etiqueta) com a superfície da etiqueta (comprimento \times largura) para alcance de uma maior densidade de código conforme indicado na equação (1):

$$Densidade\ de\ código = \frac{Capacidade\ de\ codificação}{Superfície\ da\ etiqueta} = \frac{Bits\ codificados\ por\ etiqueta}{Comprimento_{tag} \times Largura_{tag}} \quad (1)$$

A etiqueta projetada contendo capacidade de código de 28,5 bits e dimensões $2 \times 4\text{ cm}^2$ é comparada com outras cinco etiquetas sem CI com capacidades de código entre 9 e 35 bits e dimensões entre $2 \times 4\text{ cm}^2$ e $8,8 \times 6,5\text{ cm}^2$. Calculando a equação (1) para todas as etiquetas, o maior valor de mérito é o da etiqueta proposta com densidade de código de $3,56\text{ bits/cm}^2$, mostrando uma FoM maior para etiquetas com menor dimensão e maior capacidade de código.

A limitação percebida no artigo é que o mesmo trata do desenvolvimento de uma equação para a análise de uma FoM específica para apenas um tipo de processo de fabricação. O artigo cita que a etiqueta é fabricada pela tecnologia de impressão a jato de tinta informando que o mesmo é um processo econômico, não existindo neste caso, possibilidade de comparação com outras tecnologias de fabricação.

A dimensão utilizada na equação da FoM do artigo refere-se à inclusão de variáveis de comprimento e largura, porém essa métrica foi rejeitada como contribuição para o projeto proposto, pois observa-se que o artigo não está levando em consideração a espessura da etiqueta que é relevante para etiquetas para uso em objetos metálicos que utilizam substratos mais espessos.

A questão da densidade de bits abordada no artigo foi rejeitada em um primeiro momento devido à análise do artigo ser voltada para etiquetas ativas, porém a ideia poderá ser adicionada em uma melhoria futura da FoM proposta que compare, por exemplo, etiquetas passivas × etiquetas ativas.

- Em (ZHANG J, 2013b) é desenvolvido o projeto de um oscilador de baixa potência e de alta precisão destinado a servir como uma referência para etiquetas RFID passivas. Na FoM proposta se observa a utilização de variáveis como potência dissipada, área e frequência. O artigo compara três projetos de osciladores apresentados na bibliografia com o projeto proposto que possui tecnologia de 0,18 μm , frequência de 1,28 MHz, potência dissipada de 0,8 μW , precisão da frequência $\pm 2,5\%$ e área de 1,6e-2 mm^2 . A FoM proposta utiliza o cálculo indicado na equação (2).

$$FOM = 10 \log \left(\frac{\alpha^2}{P} \frac{\alpha^2}{A} \frac{f}{F} \right) \quad (2)$$

onde α representa o fator de escala; P é a potência dissipada; A é a área do layout; f é a frequência e F é a frequência de precisão.

A resposta do mérito do artigo proposto é indicada em escala logarítmica apresentando – 14 dB por possuir dissipações de potência, área e frequências de precisão menores.

A métrica escolhida como contribuição para a FoM proposta trata-se da conversão de escala da resposta de linear para dB, pois em alguns casos o cálculo pode apresentar respostas com ordens de grandeza maior.

- No trabalho de (MIRZAEI, 2013) a FoM da equação (3) foi desenvolvida para análise de filtros passa baixa planares para aplicação em receptores UWB RFID sem CI.

$$FOM = \frac{\zeta \times RSB \times SF}{NCS \times AF} \quad (3)$$

A equação (3) utiliza como variáveis a inclinação da função de transferência (ζ), a largura de banda de rejeição relativa (RSB - *Relative Stopband Bandwidth*), o fator de supressão da largura de banda de rejeição (SF-*Suppression Factor*), o tamanho do circuito normalizado (NCS - *Normalised Circuit Size*) indicado na equação (4) e um fator de arquitetura que define a complexidade do circuito (AF - *Architecture Factor*) sendo que filtros com maior complexidade serão indicados com um maior fator.

$$NCS = \frac{\text{tamanho físico (comprimento} \times \text{largura)}}{\lambda_g^2} \quad (4)$$

onde NCS refere-se ao tamanho físico que é representado pelas dimensões comprimento \times largura e normalizado através de λ_g que é o comprimento de onda na frequência de corte de 3 dB.

A FoM do artigo é comparada com outros cinco projetos de filtros passa baixa planares sendo que o filtro do referido artigo apresentou o valor de 8657 como valor do cálculo representando o melhor resultado. As comparações mostram que, o filtro projetado atinge a maior FoM quando possui maior inclinação da função de transferência, maior largura de banda de rejeição relativa, maior fator de supressão, menor dimensão e baixo fator de arquitetura.

As métricas indicadas na FoM do artigo relacionadas inclinação da função de transferência, a largura de banda de rejeição relativa e o fator de supressão da largura de banda de rejeição, foram rejeitados, pois se referem a características específicas de filtros.

Já a métricas relacionadas ao fator de arquitetura trata-se de uma contribuição relevante escolhida para inclusão no projeto proposto, porém em detrimento a isso é

percebido que no artigo os pesos utilizados para o encontro deste fator são atribuídos de forma intuitiva, fornecendo desta maneira uma resposta com um grau de confiabilidade menor. Da inclusão de um fator de arquitetura também partiu a ideia não somente incluir um fator de custo de processo de fabricação para etiquetas em tipos diferentes de tecnologias, como também o custo de seu substrato.

A ideia de se usar uma métrica relacionada ao tamanho normalizado pode ser interessante se a FoM for desenvolvida para comparar etiquetas em frequências significativamente diferentes, não sendo este o caso do projeto proposto, pois trabalha com faixas de frequências estabelecidas.

- No artigo (YU, 2009) é desenvolvida uma FoM conforme equação (5) para utilização em osciladores nas frequências de 1,2, 4 e 8 GHz.

$$FOM = -10 \log \left(\frac{F \times kT}{V_o^2} \times \frac{R_P}{Q^2} \times \frac{V_{DD} \times I_{BIAS}}{1mW} \right) \quad (5)$$

onde F é o fator de ruído, k é a constante de Boltzmann e T é temperatura, V_o é a tensão de saída, R_P é a resistência paralela, Q é o fator de qualidade, V_{DD} é a fonte de alimentação e I_{BIAS} é a corrente.

A partir da equação (5) é feita uma normalização na área da FoM indicada pelo autor como FoMA como mostra a equação (6):

$$FoMA = FOM - 10 \log \left(\frac{\text{Área}}{1mm^2} \right) \quad (6)$$

O artigo faz o resumo de diferentes parâmetros de simulação para osciladores, apresentado o cálculo da FoM para essas variações de parâmetros e também apresentando os cálculos para a FoM utilizando a normalização da área.

O fato relevante da equação deste artigo que serviu de contribuição para o projeto da FoM se refere à importância da normalização para os casos onde existem variações consideráveis.

- O artigo (BAO, 2018) apresenta um sensor para etiqueta UWB RFID que visa reduzir a quantidade de dados enviados utilizando uma potência extremamente baixa. A FoM criada tem foco no circuito e leva em consideração o consumo de potência, a taxa de amostragem e o número de bits (ENOB – *Effective Number of Bits*) conforme mostrado na equação (7):

$$FOM = \frac{Potência}{Taxa\ de\ amostragem \times 2^{ENOB}} \quad (7)$$

Juntamente com o sensor deste artigo são comparados mais sete sensores utilizando valores oriundos de cada projeto, porém é percebido que os valores utilizados para a taxa de amostragem e são estimados, assim como o número efetivo de bits, retratando desta maneira uma resposta da FoM não tão efetiva.

Com base nas percepções relacionadas ao artigo, o mesmo utiliza valores estimados para o cálculo da FoM. Escolhas deste tipo, que não tenham dados concretos serão rejeitadas como contribuição para o desenvolvimento da FoM proposta. As informações que serão inseridas no cálculo da equação da FoM só serão utilizadas se estiverem contidas explicitamente na descrição dos artigos apresentados na bibliografia tendo desta maneira um total controle das informações.

- Em DEMIRKAN (2008) é desenvolvida uma FoM para análise de osciladores controlados por tensão (VCOs) com indutores mutuamente acoplados e comutados conforme equação (8).

$$FOM = 10 \log \left[\frac{kT}{P} (f_{max} - f_{min})^2 \right] - PN(f_{off}) \quad (8)$$

onde P é a dissipação de potência no núcleo do VCO, T é a temperatura, k é a constante de Boltzmann's, $(f_{max} - f_{min})$ é a variação de frequência e $PN(f_{off})$ é o ruído de fase na frequência de *off-set*.

Os resultados das comparações de desempenho da FoM do artigo com FoMs VCOS WIDE-TR apresentadas na literatura indicam valores de mérito mais altos para as três variações de VCO desenvolvidas neste artigo com relação aos VCOs publicados, isso demonstra que a faixa de sintonia de um LC VCO pode ser melhorada com apenas um pequeno aumento no ruído de fase.

Na FoM do artigo são utilizadas as métricas de potência e frequência e também a indicação do valor do mérito em dB, sendo essas métricas também utilizadas na FoM proposta.

- Em LI (2012) é apresentado um oscilador controlado por tensão em quadratura (QVCO) para RFID que conforme a indicação da FoM da equação (9) alcança um melhor desempenho com um ruído de fase deslocado de 1 MHz da portadora.

$$FOM = L(\Delta\omega) - 20 \log \left(\frac{\omega_0}{\Delta\omega} \right) + 10 \log \left(\frac{P_{diss}}{1mW} \right) \quad (9)$$

onde P_{diss} é a potência dissipada, $L(\Delta\omega)$ é o ruído de fase, ω_0 é a frequência de oscilação e $(\Delta\omega)$ é o deslocamento da portadora.

No artigo é feita uma comparação de desempenho do QVCO com outros cinco projetos apresentados na literatura, o resultado do mérito do oscilador do referido artigo não se destaca, porém concorre com os valores de mérito de projetos apresentados na literatura.

Nesse artigo são utilizadas variáveis de frequência e potência. É feita uma normalização em relação a potência porém o autor somente indica que foi utilizada uma arquitetura aprimorada não incluindo a mesma em sua FoM.

- Em ROH (2007) é apresentado um oscilador controlado por tensão (VCO) diferencial Colpitts para a utilização em sistema RFID. Para análise é utilizada a FoM da equação (10):

$$FOM = 10 \log \left(\left(\frac{\omega_0^2}{\Delta\omega} \right) \frac{1}{L\{\Delta\omega\}P} \right) \quad (10)$$

onde ω_0 é a frequência da portadora, $\Delta\omega$ é a frequência de deslocamento, P é a potência dissipada e $L\{\Delta\omega\}$ é o ruído de fase na frequência de deslocamento.

No artigo consta a comparação entre o VCO projetado e outros sete VCOs correlatos existentes na literatura.

A FoM indicada também utiliza como variáveis a frequência e a potência dissipada.

A proposta da FoM será descrita no capítulo 3, e as comparações serão feitas no capítulo 8.

3. DESCRIÇÃO DA FIGURA DE MÉRITO PROPOSTA

Neste capítulo será descrita a proposta da FoM sendo também indicadas as decisões das métricas mais assertivas utilizando algumas contribuições das FoM apresentadas na literatura e já discutidas no Capítulo 2.

Uma variedade considerável de fatores influencia na indicação do desempenho das etiquetas. Obter uma etiqueta com desempenho satisfatório e custo mínimo é fundamental, porém em muitos casos etiquetas de RFID são elaboradas para atender objetivos específicos de diferentes aplicações como: alcance de leitura, área, custo do material e processo.

Em termos de comparação, a miniaturização, o amplo alcance de leitura e o baixo custo são relevantes, bem como o processo de fabricação das etiquetas.

Fazendo uma análise de etiquetas que tenham mesma frequência, área, CI e processo de fabricação será percebido que para substratos melhores como podemos citar os substratos cerâmicos o alcance de leitura será maior devido ao fato de que esse tipo de substrato apresenta um tangente de perdas muito baixa, porém seu custo é elevado. Refazendo a mesma análise para um substrato de baixo custo como podemos citar o substrato tipo FR4 que possui um tangente de perdas maior será percebido que o alcance de leitura apresentará um valor mais baixo. Com essa análise podemos perceber que o custo do substrato está diretamente ligado ao desempenho da etiqueta.

Analisando agora etiquetas com mesma frequência, substrato, CI e processo de fabricação pode-se perceber que etiquetas que possuem maior dimensão terão consequentemente um maior custo devido à quantidade de material que será utilizado e como irão dispor de uma área maior para casamento de impedância através de alterações na geometria, as etiquetas irão apresentar um melhor desempenho com relação ao alcance de leitura.

O desempenho das etiquetas está relacionado também ao tipo que CI utilizado, CIs que possuem menor sensibilidade de leitura (potência necessária para ativar o CI) apresentarão maior alcance de leitura e maior custo.

Conforme percebido nas análises, o alcance de leitura normalmente é definido como o objetivo principal em projetos. A equação do alcance de leitura que será demonstrada no capítulo 4 leva em consideração o comprimento de onda, a potência transmitida pelo leitor, o ganho do transmissor, a Potência Efetiva Isotropicamente Irradiada (EIRP), o ganho do receptor e o limite mínimo de potência necessária para ativar o CI da etiqueta conhecido como sensibilidade de leitura do CI.

Etiquetas cujos métodos não levam em consideração as necessidades e a agilidade dos processos de fabricação em larga escala irão apresentar um maior custo, pois necessitarão de um tempo maior para fabricação de cada unidade. Processos atuais de fabricação como o da Figura 1 geram na etapa do processo de solda 15000 peças, na etapa do processo de laminação 60000 peças e na etapa do processo de gravação 20000 peças. (IMPINJ, 2017)

Figura 1 – Etapas do processo de fabricação de *RFtag* UHF



Fonte: (IMPINJ, 2017)

Enfim, agregar um fator de custo de processo de fabricação na avaliação de etiquetas, principalmente em etiquetas UHF RFID que são as mais utilizadas atualmente, é uma contribuição de grande valia, pois se refere a informações específicas/complexas que muitas vezes não são disponibilizadas ficando em domínio apenas dos fabricantes.

Vale ressaltar também que essas informações de custo dos processos, mesmo que não sejam utilizadas para cálculos da FoM serão extremamente úteis para análise em projetos de etiquetas em diferentes tecnologias.

As características de cada processo, bem como a variação observada nos resultados da estimativa de custo de produção estão descritas na Tabela 10 e mostram a importância da inclusão dos resultados dos custos do processo de fabricação.

Várias perspectivas foram analisadas para propor uma FoM adequada, porém nesta tese as etiquetas somente serão utilizadas para avaliação quando todos os dados necessários estiverem descritos, não serão utilizadas informações estimadas ou intuitivas.

Nesta tese, uma nova FoM nomeada (FOM_{JB}) foi desenvolvida para fazer a análise comparativa de soluções completas para aplicações passivas de etiquetas UHF RFID (antena + CI) e também para auxiliar nos projetos de aplicações destas em superfícies metálicas e não metálicas.

A equação (11) leva em consideração o alcance de leitura normalizado pela sensibilidade de leitura do CI, a área da etiqueta, o custo do substrato e o fator do custo do processo de fabricação.

$$FOM_{JB} = 10 \log \left(\frac{R^*}{A \times C_s \times F_{CP}} \right) \quad (11)$$

onde A é o valor calculado referente à área da etiqueta [mm^2], C_s é o custo do substrato utilizado na etiqueta [$\text{R\$/mm}^2$], F_{CP} é o fator do custo do processo de fabricação

normalizado com o custo do processo *Etching* e R^* é o valor medido do alcance de leitura da etiqueta [metros] normalizado com o valor da sensibilidade de leitura P_{th} [dBm] do CI a ser utilizado $R^* = R/P_{th}$ (BJÖRNINEN, 2014).

Com relação aos casos de normalização também apresentados no Capítulo 2, a normalização do alcance de leitura medido é feita dividindo a valor do alcance de leitura R da equação (11) pelo valor da sensibilidade de leitura do CI indicada na especificação/*Datasheet*.

A FOM_{JB} irá apresentar um mérito maior para valores maiores de alcance de leitura assim como, devido à proporcionalidade indireta, irá apresentar valores maiores para etiquetas com menor área, menor custo do substrato e menor custo de processo de fabricação.

Mesmo que uma alteração das unidades (por exemplo, ao invés da utilização da unidade em metros colocar centímetros) não gerasse influência na comparação as etiquetas, as dimensões utilizadas na equação foram expressas em unidades menores nas quais são mais frequentes na tecnologia atual e mais próximas as dimensões miniaturizadas existentes.

Consequentemente, a alteração da resposta de linear para logaritmo também não iria acarretar alteração, porém a opção da alteração para dB se deve ao fato de que em algum momento as comparações entre diferentes etiquetas resultariam em respostas com diferentes ordens de grandeza.

No Capítulo 8 será feita a aplicação da FOM_{JB} proposta através da avaliação de diferentes tipos de etiquetas existentes na literatura tanto para superfícies metálicas quanto para superfícies não metálicas. Serão analisadas também as duas novas etiquetas projetadas nesta tese.

4. ETIQUETAS PARA APLICAÇÃO EM SISTEMAS RFID

RFID é uma tecnologia bastante conhecida que permite identificação sem fio e sem contato, podendo substituir a tecnologia de código de barras para várias aplicações tais como controle de acesso, logística e gestão de segurança. Esta identificação é possível através do uso de etiquetas (*RFtags*) colocadas sob os objetos. As etiquetas são compostas por um CI que é conectado a uma antena (FINKENZELLER, 1999), este conjunto também é conhecido como *Inlay*. As informações são armazenadas na memória do CI e lidas pelos leitores ou portais de RFID. Os *RFtags* podem usar diferentes frequências do espectro eletromagnético, como por exemplo, 125 kHz (*LF-Low Frequency*), 13,56 MHz (*HF-High Frequency*) ou 915 MHz (UHF). A faixa de frequências mais empregada para aplicações de logística em geral é a UHF. No Brasil a faixa liberada para uso é de 902 a 908 e de 915 a 928 MHz (RAO, 2005). O sistema RFID na faixa de frequências UHF tem a vantagem de grandes distâncias de comunicação entre o leitor RFID e a etiqueta RFID, além da habilidade de identificação de múltiplas etiquetas. Devido a isso, o sistema RFID UHF é amplamente utilizado para identificação de uma grande variedade de itens e em grandes volumes o que requer um grande número de etiquetas.

4.1. COMPOSIÇÃO DO SISTEMA

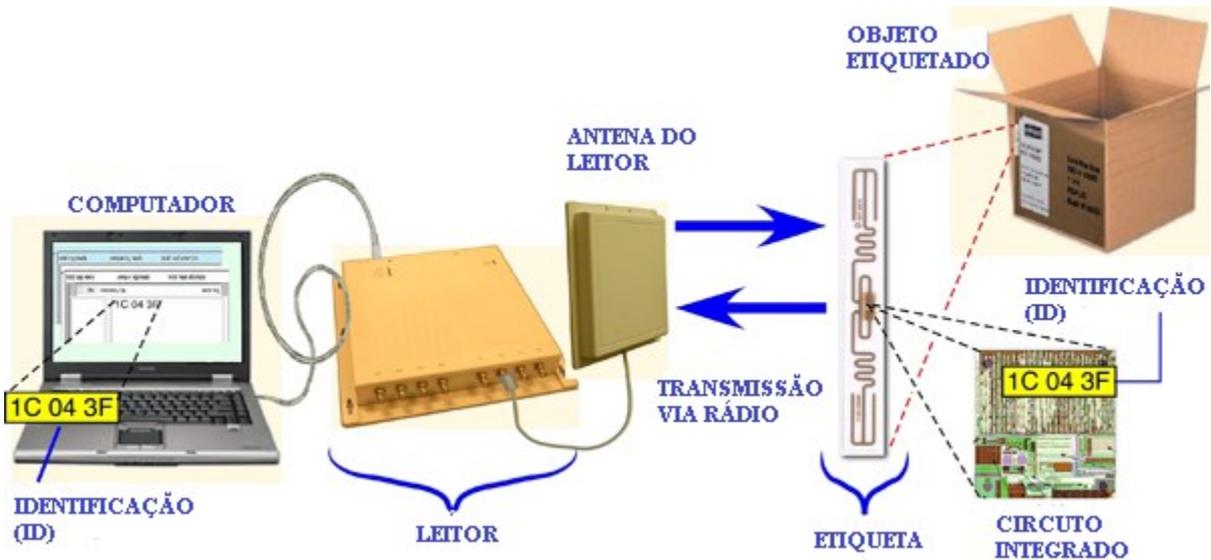
A Figura 2 mostra os elementos básicos de um sistema RFID:

- Etiqueta ou transponder ou rótulo: é o principal elemento do sistema RFID sendo aplicada no objeto a ser identificado;
- Leitor ou Interrogador: equipado com uma antena, o leitor é utilizado para interrogar a etiqueta e receber desta o código EPC (*Electronic Product Code* - Código Eletrônico de Produto) do objeto etiquetado, tendo a capacidade de gerenciar múltiplas etiquetas

separadamente e ser a interface com o banco de dados através do computador que é conectado ao leitor;

- Aplicação: geralmente desenvolvida em um computador que se encontra integrado em uma rede.

Figura 2 – Componentes básicos de um sistema RFID



Fonte: (NIST, 2014)

Na arquitetura básica da tecnologia RFID, objetos são individualmente equipados com uma etiqueta. Esta etiqueta contém uma antena com um CI de memória digital, ao qual é atribuído um código eletrônico único de identificação. O leitor, composto por uma antena e um transmissor/receptor, emite um sinal/onda eletromagnética em direção à etiqueta que irá ativar o CI quando o mesmo receber a potência mínima necessária também conhecida como sensibilidade de leitura do CI. O leitor interroga e recebe os dados constantes no CI da etiqueta e o dado é transmitido para o computador que, dependendo da aplicação, poderá não somente ler como escrever novos dados no CI. A resposta pode conter somente o código de identificação da etiqueta ou qualquer outra informação que esteja armazenada em sua memória. O *software* da aplicação no computador poderá decifrar a criptografia dos dados, processar, comparar e atualizar os mesmos no banco de dados.

A etiqueta é composta por três partes:

- CI: é o componente eletrônico que tem a função de administrar todas as identificações e comunicações. Quando interrogado, o CI responde com a informação contida nele;
- Antena: tem a função de receber e transmitir as informações. No caso de antenas com CIs passivos terão também a função de fornecer energia para o CI;
- Encapsulamento: é o material ou componente sobre o qual o CI e a antena são embutidos, tendo a função de protegê-los.

O leitor é dividido em duas partes:

- A unidade de controle é um microprocessador que permite gerenciar: a interface com as antenas, a requisição das etiquetas que entram no campo magnético das antenas, a colisão entre as diversas respostas vindas das etiquetas e a interface com o sistema de informação;
- A antena do leitor é a interface entre a unidade de controle do leitor e a etiqueta.

O computador deve ser adaptado para ser conectado à unidade de controle e para receber o *software middleware* (mediador). Neste caso, *middleware* é um termo genérico usado para descrever um *software* que se encontra entre o leitor e as aplicações da empresa. É um componente crítico de qualquer sistema RFID, porque os *middlewares* recebem os dados brutos do leitor (um leitor pode ler cerca de 100 vezes por segundo uma mesma etiqueta) filtram esses dados e repassam somente os dados úteis para os terminais.

4.2. ASPECTOS HISTÓRICOS DO SISTEMA RFID

A tecnologia RFID não é uma tecnologia que possa ser considerada nova. Baseada em sistemas de radar, na qual a identificação de objetos era feita por meio de reflexão difusa e espalhamento das ondas eletromagnéticas através do retroespalhamento. Eram utilizados refletores passivos que ao serem instalados em aviões os tornavam com maior brilho na tela de radar em relação aos aviões inimigos (FINKENZELLER, 2010; CHAWLA, 2007).

Aplicações comerciais da tecnologia RFID existem desde a década de 60, porém apenas no início do século XXI essa tecnologia foi percebida como uma promessa de utilização no ramo industrial, com isso iniciaram-se estudos relacionados que atraíram a atenção do meio, reconhecendo desde então as vantagens competitivas que surgiriam com sua implementação (ZHU, 2012).

O interesse da comunidade acadêmica pela tecnologia RFID se deu entre as décadas de 60 e 70. Uma etiqueta passiva capaz de receber energia oriunda das ondas eletromagnéticas emitidas por um leitor através de acoplamento eletromagnético e assim transmitir a informação requisitada foi desenvolvida e patenteada por RICHARDSON em 1963.

A comercialização de sistema antifurto se deu no final da década de 60. Esses sistemas utilizavam ondas de radiofrequência para determinar o pagamento de um item ou não. Essas etiquetas denominadas "etiquetas de vigilância eletrônica" ainda existem atualmente.

Mesmo existindo sucesso em alguns casos, a comercialização desses sistemas em outras aplicações passou a ocorrer globalmente nas décadas de 1980 e 1990. Nos EUA, as aplicações de maior interesse foram na área de transporte e controle de acesso, já na Europa as aplicações mais relevantes foram nas áreas industriais, de negócios, rastreamento animal e praças de pedágio (CHAWLA, 2007).

Em 1975 foi desenvolvido um novo conceito de sistema baseado em trabalhos desenvolvidos por (STOCKMAN, 1948) onde a comunicação entre o leitor e a antena se estabelecia através do espalhamento do sinal. Este ocorria através da modulação do sinal refletido pela etiqueta por meio de alteração da carga.

Com a crescente comercialização a padronização do sistema se fez necessária devido à compatibilidade entre equipamentos de diferentes fabricantes. Na década de 1990, a maioria dos trabalhos desenvolvidos para padronização dos sistemas RFID nas faixas de frequências foram elaborados por organizações internacionais como a ISO (*International Standards*

Organization), a IEC (*International Electrotechnical Commission*), dentre outras. As padronizações iniciais foram para utilização nas aplicações de rastreamento de animais (ISSO - 11784 e ISO-11785) e também de cartões de identificação sem contato (ISO-14443).

De 1991 a 2005 foram constatados 3 períodos diferentes relacionados a inovação da tecnologia nos sistemas RFID. O primeiro focou em melhorias na comunicação, maior transferência de dados, menor consumo de energia, aprimoramento de controles de acessos e desenvolvimento de etiquetas ativas. O segundo deu um enfoque à aplicação de etiquetas na área de automação e integração das mesmas em aplicações computacionais. O terceiro período levou automação às empresas gerando produção em larga escala mundial de etiquetas de baixo custo e menor dimensão, onde podemos citar: comércio eletrônico, rastreamento logístico e de bens de consumo,

Em NGAI *et. al.* (2008) foi apresentada uma revisão da literatura de 85 artigos publicados em jornais científicos entre os anos de 1995 e 2005 relacionados à tecnologia RFID e a suas aplicações. O estudo alocou os artigos em categorias com base no seu enfoque, porém não gerou nenhuma FoM relacionada aos mesmos.

Avanços nos processos de CI de silício para aplicações em RFID tornaram as etiquetas confiáveis e de baixo custo. A comercialização global da tecnologia RFID em larga escala desde a primeira década do século XXI ainda é contínua com previsões de um maior crescimento em todo o mundo.

4.3. CODIFICAÇÃO DAS ETIQUETAS RFID

No princípio de funcionamento dos sistemas RFID, a antena da etiqueta recebe a onda de radiofrequência emitida pelo leitor, quando esta onda tem potência suficiente para ativar o CI este irá demodular e decodificar o sinal recebido que contém em seu protocolo de comunicação os critérios estabelecidos. A informação do EPC armazenado na memória do CI

é transmitida através da etiqueta para o leitor em resposta aos comandos do mesmo (FINKENZELLER, 2010).

Devido ao desenvolvimento dos sistemas de RFID por diversas marcas em várias bandas de frequência, a criação de protocolos e normas que regulassem os sistemas de RFID era uma tarefa complicada, sobretudo quando não existia um consenso entre os grandes fabricantes de sistemas RFID. No entanto para o funcionamento destes sistemas foi necessária à criação de protocolos de comunicação. Estes protocolos estão relacionados com as frequências que os leitores e etiquetas comunicam entre si, assim foram criadas pela ISO (Organização Internacional de Normalização) as seguintes normas (RFIDTEK 2009):

ISO 18000-1: parâmetros genéricos para frequências aceitas globalmente

ISO 18000-2: para frequências abaixo de 125 kHz (LF)

ISO 18000-3: para a frequência de 13,56 MHz (HF)

ISO 18000-4: para frequência de 2,45 GHz (UHF)

ISO 18000-5: para frequências de 5,8 GHz (SHF)

ISO 18000-6: para frequências entre 860 e 930 MHz (UHF – etiqueta passiva)

ISO 18000-7: para a frequência de 433,92 MHz (UHF – etiqueta ativa)

As etiquetas UHF RFID pertencem ao protocolo ISO 18000-6 que está dividido em 3 partes, sendo o tipo C o mais atual designado como 18000-63 (EPC GlobalGen2).

O EPC indicado na Figura 3 fornece ao objeto etiquetado uma identidade única, além do código outras informações associadas ao objeto podem também ser armazenadas na etiqueta (EPC™, 2014).

Figura 3 – Identificação EPC de uma etiqueta de RFID



Fonte: (RFIDTEK, 2009)

A diferença entre o código de barras e o EPC das etiquetas RFID é que com o código de barras é possível identificar apenas o grupo do produto (referência do item), com o EPC além de identificarmos o grupo do produto, é possível identificar também o produto específico, pois cada etiqueta tem um número de série único que lhe é associado ao seu EPC.

4.4. CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS RFID

Sistemas RFID utilizam o espectro eletromagnético para a comunicação entre etiquetas e leitores e possuem características diferentes dependendo da banda de frequência utilizada. Com propósitos distintos daqueles de comunicação existem determinadas bandas de frequência que são destinadas a aplicações industriais, científicas e médicas (ISM). São nas bandas ISM que, em geral, encontram-se os sistemas RFID.

Nesta seção serão apresentadas as classificações necessárias para a condução da tese como: frequência de operação adotada e tipo de fonte de alimentação adotada pelo CI da etiqueta.

4.4.1. Frequência de Operação

No Brasil, várias bandas de operação são designadas pela Resolução nº 506/2008 para RFID em UHF, sendo que na faixa de 900 MHz, são as frequências de 902 - 907,5 MHz e 915 - 928 MHz.

No Brasil, as frequências de operação são regulamentadas pela ANATEL (2002) que direciona as condições de uso das faixas de frequência para os equipamentos, conforme Tabela 1.

Tabela 1– Faixas de frequências no espectro

Sigla	Nome da faixa de frequência	Faixa de Frequência
ELF	<i>Extremely Low Frequency</i> - Frequência Extremamente Baixa	300 – 3000 Hz
VLF	<i>Very Low Frequency</i> - Frequência Muito Baixa	3 – 30 kHz
LF	<i>Low Frequency</i> - Baixa Frequência	30 – 300 kHz
MF	<i>Medium Frequency</i> - Frequência Média	300 – 3000 kHz
HF	<i>High Frequency</i> - Alta Frequência	3 – 30 MHz
VHF	<i>Very High Frequency</i> - Frequência Muito Alta	30 – 300 MHz
UHF	<i>Ultra High Frequency</i> – Ultra-Alta Frequência	300 – 3000 MHz
SHF	<i>Super High Frequency</i> - Frequência Super Alta	3 – 30 GHz
EHF	<i>Extremely High Frequency</i> - Frequência Extremamente Alta	30 – 300 GHz

Fonte: (Anatel, 2002)

Com relação às faixas de frequência utilizadas, aplicações em RFID utilizam as faixas LF, HF e UHF, onde cada faixa de frequência possui características distintas para cada tipo de aplicação (FINKENZELLER, 2010):

- Baixa Frequência (LF): Possui um alcance de leitura em torno de 0,5 m, o que indica a utilização para conexão de curta proximidade entre etiqueta e leitor. Exemplo de aplicações: Controle de acesso de portas e catracas, controle de inventário e de identificação animal, etc.

- Alta Frequência (HF): Possui uma faixa de leitura entre curta e média, com alcance de leitura máximo de 1 metro de distância. Os CIs com frequência HF (*Smart Cards*) são encontrados em objetos como chaveiros, cartões utilizados para controle de acesso, bilhetes de transporte público para acesso a catracas, etc.
- Ultra-Alta Frequência (UHF): Em diversos países, as frequências de operação dos sistemas UHF RFID encontram-se alocadas pelo padrão ITU (*International Telecommunication Union*) principalmente entre 860 MHz a 960 MHz. Dependendo da antena utilizada e do tipo de etiqueta (ativa ou passiva), um maior alcance de leitura pode ser encontrado. Com isso a frequência UHF é muito utilizada no setor de transporte para monitoramento de veículos em estradas ou acesso a catracas de estacionamentos.

As maiores vantagens estão na banda de UHF (860 a 960 MHz) onde as etiquetas apresentam maior alcance de leitura e habilidade de identificação de múltiplas etiquetas (DOBKIN, 2007).

Essa faixa de frequência tem sido considerada para utilização em diversos sistemas sem fio, principalmente nas frequências de 900 MHz, 2,4 GHz e 5,8 GHz. Nessas faixas os sistemas são classificados como secundários, podendo estar sujeitos à interferência dos serviços primários, porém não podem causar interferência nos mesmos.

Visando minimizar possíveis interferências entre os sistemas de RF foi necessária a elaboração de um plano de distribuição das frequências e da limitação da potência emitida expressa em termos da EIRP (*Equivalent Isotropic Radiated Power*), referenciada à radiação emitida por um radiador isotrópico. No Brasil, a ANATEL é a agência regulamentadora para a operação de Sistemas de Telecomunicações.

Nota-se na Tabela 2, que pelo fato da alocação do espectro não ser global, um determinado sistema não pode ser operado em qualquer lugar do mundo utilizando as mesmas frequências e potências.

Tabela 2 – Bandas de frequências e limites de EIRP para sistemas RFID em UHF

Região/País	Espectro alocado para operação de sistemas RFID (MHz)	Potência máxima efetivamente radiada – EIRP	Regulamento
EUA	902 - 908	4,0 W	FCC Part 15
Europa	865,6 - 867,6	3,2 W	EN302 208
Coréia	917 - 920,8	4,0 W	
	917 - 923,5	0,2 W	
Japão	952 - 956,4	0,02 W – 0,5 W – 4,0 W	
	916,7 - 920,9	4,0 W	
	916,7 - 923,5	0,5 W	
Brasil	902 - 907,5	4,0 W	Resolução 506 Anatel
	915 - 928		
China	920,5 - 924,5	3,2 W	

Fonte: (Anatel, 2002)

Com intuito de permitir a compatibilidade entre todos os dispositivos de fabricantes distintos e desenvolver o uso dos sistemas UHF RFID, existe a padronização do protocolo de comunicação na interface aérea, descrito na norma ISO/IEC 18000-6 (ISOIEC, 2010) e no documento EPC global (EPC, 2010). Ambos os documentos descrevem a camada física de um sistema UHF RFID e abrangem os tipos de modulação, codificação, protocolo anticolisão, comandos para a escrita e leitura das etiquetas e muitas outras características.

4.4.2. Alimentação do CI da Etiqueta

Em termos da fonte de alimentação do CI da etiqueta, estas podem ser classificadas como passivas, semi-passivas e ativas (FINKENZELLER, 2010).

Etiquetas passivas

Etiquetas RFID passivas não possuem uma fonte de energia interna e são mais sensíveis a ambientes eletromagnéticos, principalmente quando os objetos etiquetados são metalizados ou líquidos. O alcance de leitura para essas etiquetas é menor em relação às etiquetas ativas, pois sua operação é vinculada a quantidade de energia captada pela antena da etiqueta. O custo é menor pelo fato de não agregar o custo da bateria.

A antena da etiqueta captura a energia necessária para alimentá-la utilizando-se da energia emitida pela antena do leitor. Em termos mais práticos, a etiqueta apenas responde ao sinal que é emitido pelo leitor.

A comunicação entre leitor e etiqueta é estabelecida por meio de chaveamento da impedância nos terminais da antena da etiqueta. Através do processo de retroespalhamento (*backscattering*) baseado na transmissão e reflexão de energia, o leitor envia ondas de radiofrequência para a etiqueta, quando a etiqueta recebe o sinal na sua frequência de operação, o casamento de impedância entre a antena e o CI permite a ativação do CI. Quando o CI é ativado, ele transmite as informações contidas em sua memória através do chaveamento de sua impedância. Finalmente, a etiqueta reflete parte do sinal de energia oriunda do leitor e o sinal modulado pelo CI é recebido pelo leitor (NIKITIN, 2006).

Etiquetas semi-passivas

Esse tipo de etiqueta também possui uma bateria interna que alimenta o CI e sua comunicação com o leitor também é estabelecida por retro espalhamento, devido ao fato da etiqueta não possuir circuito transmissor.

Etiquetas ativas

Possuem sua própria fonte de energia (bateria interna) que fornece alimentação para o CI. Possui um circuito transmissor que emite o sinal de rádio permitindo estabelecimento de comunicação com o leitor a distâncias maiores utilizando diferentes frequências, característica essa que permite uma comunicação mais confiável mesmo sendo utilizada em ambientes com um grande número de objetos etiquetados. A inclusão da fonte de alimentação na etiqueta fornece uma modulação com uma maior taxa de transmissão de dados, possuindo uma capacidade de armazenamento maior. Etiquetas ativas são pouco utilizadas por possuírem custo elevado devido à necessidade de utilização de bateria.

Sistemas RFID que utilizam etiquetas ativas são mais confiáveis mesmo em ambientes propícios à atenuação do sinal devido a obstruções, atingindo assim, um alcance de leitura mais elevado devido a este fato. Em detrimento ao uso da bateria, as etiquetas ativas possuem maior tamanho e maior custo. Necessitam também de atendimento aos protocolos de RF devido à presença de um transmissor na etiqueta.

4.5. PARÂMETROS FUNDAMENTAIS DE ANTENAS PARA ETIQUETAS RFID

Em geral, a comunicação é limitada à máxima distância no enlace direto, ou seja, na condição de resposta da etiqueta passiva à interrogação do sistema. Dessa forma, pode-se concluir que o limite de distância para que ocorra a detecção de uma etiqueta passiva, e a consequente comunicação com o sistema, é dado pela distância máxima.

Para aumentar o alcance de leitura da etiqueta, é importante que a impedância da antena seja compatível com a impedância do CI. Geralmente, um CI comercial não possui uma impedância de entrada de 50Ω . Portanto, a impedância de entrada da antena deve ser combinada com o valor conjugado da impedância de entrada do CI para que seja alcançado o máximo coeficiente de transmissão, ou seja, transferir a máxima potência para o CI (RAO, 1999; FINKENZELLER, 1999).

Nesta seção serão apresentadas características relevantes relacionadas ao alcance de leitura e ao coeficiente de transmissão da etiqueta conduzindo às considerações para a determinação de uma distância máxima e de uma máxima transferência de potência.

4.5.1. Alcance de Leitura e Coeficiente de Transmissão

O parâmetro mais importante para caracterizar o desempenho da etiqueta RFID é a distância máxima de leitura. Esta é a máxima distância que o leitor pode detectar o sinal refletido da etiqueta. Como a sensibilidade do leitor é tipicamente alta em relação à etiqueta, o limiar de resposta da etiqueta define a máxima distância de leitura. O alcance de leitura é sensível, entre outros, à orientação da etiqueta, ao material sobre o qual a etiqueta está colocada e ao ambiente de propagação.

Assumindo condições de propagação no espaço livre, o máximo alcance de leitura R pode ser calculado usando a equação (12) (RAO, 2005):

$$R = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \tau}{P_{th}}} |\hat{\rho}_t \cdot \hat{\rho}_r|^2 \quad (12)$$

onde λ é o comprimento de onda, P_t é a potência transmitida pelo leitor, G_t é o ganho do transmissor/da antena do leitor, $P_t G_t$ é a Potência Efetiva Isotropicamente Irradiada (EIRP), G_r é o ganho do receptor/antena da etiqueta simulado, P_{th} é o limite mínimo de potência necessária para ativar o CI da etiqueta, $\hat{\rho}_t$ é o vetor unitário de polarização da antena transmissora, $\hat{\rho}_r$ é o vetor unitário de polarização da antena receptora onde $|\hat{\rho}_t \cdot \hat{\rho}_r|^2 = 1$ quando há casamento de polarização entre as mesmas e τ é o coeficiente de transmissão de potência dado pela equação (13) (RAO, 2005):

$$\tau = \frac{4 R_c R_a}{|Z_c + Z_a|^2} \quad 0 \leq \tau \leq 1 \quad (13)$$

onde $Z_a = R_a + jX_a$ é a impedância complexa da antena, sendo R_a é a parte resistiva da antena e X_a a parte reativa imaginária da antena. $Z_c = R_c - jX_c$ é a impedância complexa do CI, sendo R_c é a parte resistiva do CI e X_c a parte reativa imaginária do CI.

Os coeficientes de reflexão e de transmissão indicam também as condições de máxima ou nenhuma transferência de potência, isso ocorre respectivamente quando $\tau = 1$ ($|\Gamma| = 0$) ou $\tau = 0$ ($|\Gamma| = 1$). A variação entre os limites 0 e 1 referem-se a reflexão ou transmissão parcial de potência.

As potências dissipadas nos resistores R_c e R_a serão máximas e iguais quando ocorrer o casamento de impedâncias entre a antena e o CI ($Z_c = Z_a^*$). A identificação de descasamento pode ser feita através de um coeficiente de reflexão que relaciona as amplitudes complexas das ondas refletida e incidente.

Quando o CI é conectado diretamente na antena não existe linha de transmissão conectando a antena à carga, podendo então utilizar a definição de coeficiente de reflexão de tensão na linha de transmissão Γ (KUROKAWA, 2012) que é dado pela equação (14):

$$\Gamma = \frac{Z_c - Z_a^*}{Z_c + Z_a} \quad (14)$$

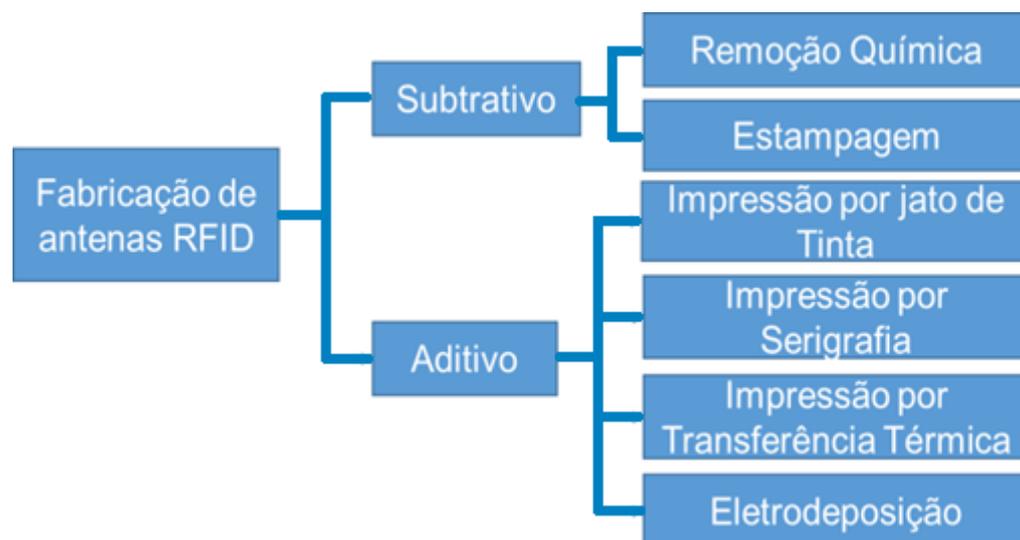
onde (*) representa o complexo conjugado.

5. TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO DE ANTENAS UHF RFID

O custo de etiquetas para sistema RFID UHF tem se tornado um fator importante para a implantação do sistema. Diferentes tecnologias são viáveis em diferentes cenários de volume, prazo e aplicações. Nesta tese foram feitos levantamentos sobre as tecnologias atuais, avaliações e comparações entre as diferentes técnicas de fabricação de antenas, sendo apresentado um resumo de cada processo e considerações sobre os custos, por fim foi apresentado o fator de custo necessário para a fabricação de antenas para etiquetas UHF RFID nas tecnologias descritas. Detalhes sobre as estimativas de custo estão apresentadas no Apêndice A.

Existem diversos processos de fabricação de antenas UHF (COLELLA, 2017; KHAN, 2014; SIPILA, 2016), porém há diferenças significativas entre o investimento necessário para a produção (CAPEX - Despesa de Capital), custo de fabricação da antena (Custo Variável) e também no desempenho máximo alcançável em cada tecnologia. Para fabricação de antenas, diferentes processos podem ser empregados. Na Figura 4 consta um comparativo entre as principais tecnologias de fabricação de antenas para UHF RFID.

Figura 4 – Processos de fabricação de antenas



Fonte: Ferreira (2020)

Para criação da estimativa de custo de todos os processos citados foi desenvolvido um novo modelo de etiqueta intitulado “modelo JBF” que está indicado no capítulo 7. A etiqueta possui dimensões aproximadas de 14×70 mm, com $4,32 \text{ cm}^2$ de área referente à geometria da parte metálica. O CI disponível para utilização foi o Monza R6 da Impinj (IMPINJ, 2012) que oferece bom desempenho de leitura e uma integridade de dados eficaz incluindo tecnologias de diagnósticos de codificação e de ajustes de desempenho automáticos através da função “*auto tune*” que ajusta a capacitância de entrada do CI.

. As indicações de custo foram realizadas somente para a antena, não levando em consideração o custo do CI.

5.1. REMOÇÃO QUÍMICA

A Remoção Química (ou *Aluminum Etching*) Atualmente é o processo empregado para definição de estruturas em metais sendo o mais utilizado na fabricação de antenas UHF RFID (MASTERETCH, 2019; PILL, 2003; BEIJING, 2002).

O processo de remoção química é composto pelas seguintes etapas:

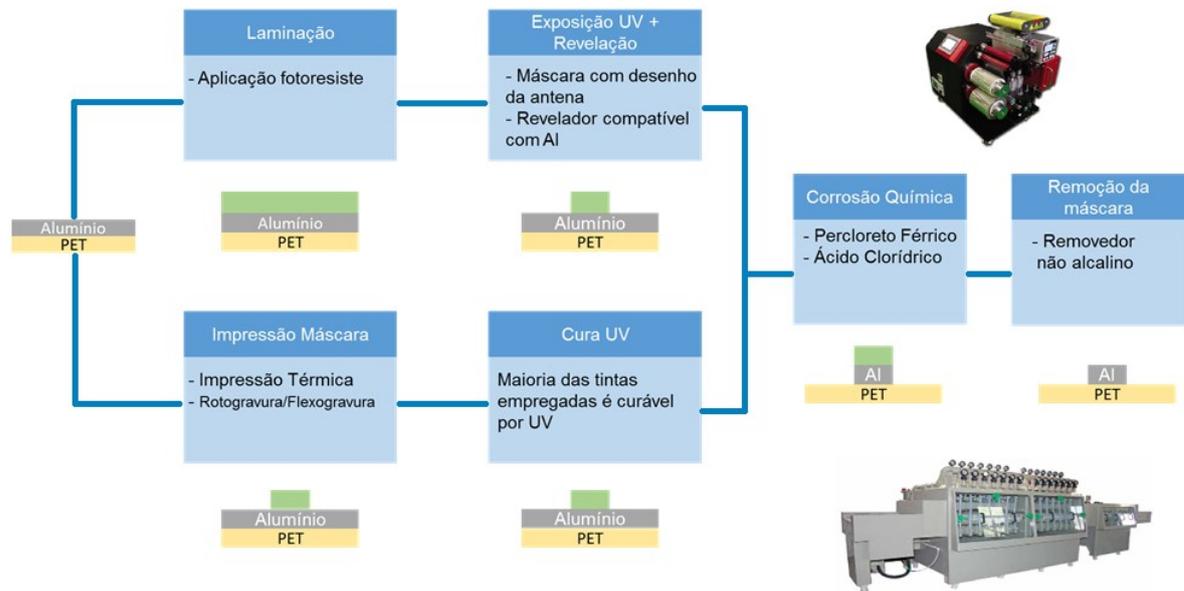
1 – Aplicação da máscara ou impressão do desenho da antena sobre a camada metálica;

2 – Remoção da camada metálica não protegida pela máscara; e

3 - Remoção da máscara e limpeza.

A Figura 5 a seguir mostra um fluxo resumido do processo.

Figura 5 – Fluxo do processo de fabricação de antenas por Remoção Química



Fonte: Elaborado pelo autor

Para um melhor entendimento é feito um detalhamento do processo:

(i) **Aplicação da máscara ou impressão do desenho da antena sobre a camada metálica:** nesta etapa é feita a definição da geometria da antena a ser fabricada, onde diferentes técnicas de impressão podem ser empregadas, como: aplicação de uma resina fotossensível (conhecida como fotorresiste) ou impressão direta de tinta curável por radiação ultravioleta (UV). A aplicação do fotorresiste sobre o metal pode ser por meio de laminação ou serigrafia. Na laminação o fotorresiste (em filme) e o material a ser laminado (substrato contendo a camada de alumínio ou cobre) passam através de dois cilindros que unem os materiais devido à pressão e temperatura aplicados pelo equipamento de laminação. Após a aplicação, o fotorresiste é exposto à luz UV. A exposição é realizada através de uma máscara contendo a geometria da antena a ser gravada no fotorresiste (fotolito). A parte não exposta é posteriormente removida com uso de uma solução (carbonato de sódio - Na^2CO^3 ou outro revelador) finalizando o processo de aplicação da máscara. Na aplicação por serigrafia emprega-se fotorresiste líquido ao invés de filme no qual é aplicado através de uma máscara ou estêncil, por um equipamento de Serigrafia (*Screen Printer*) e depois é curado antes da

remoção química do metal. Na impressão direta do desenho da antena sobre a camada metálica a técnica mais empregada é a rotogravura. Nessa técnica um cilindro com o desenho da antena (clichê) é impregnado com tinta curável por ultravioleta que é transferida rotativamente para o substrato, através da pressão. O processo é simples, porém o grau de controle e a precisão do clichê, que contém dimensões da ordem de 100 μm , não são triviais, por isso, não há muitos fabricantes dessas impressoras disponíveis no mercado. Outro método de impressão direta é por Serigrafia rotativa ou *Rotary Screen Printer* (SPG, 2013), a impressão também é rotativa como na rotogravura, mas ao invés do clichê, emprega-se uma tela ou estêncil em forma de cilindro, porém, a oferta de equipamento é limitada e de alto custo.

(ii) **Remoção da camada metálica não protegida pela máscara:** o material que não foi protegido pela máscara é removido através de uma solução corrosiva. A taxa de remoção é controlada pelo tempo e temperatura em que o material fica imerso na solução e pela concentração da solução utilizada. Nas aplicações de antenas RFID, usualmente é utilizado alumínio como metal para fabricação da antena devido ao baixo custo, com espessura de aproximadamente 10 μm , levando tipicamente menos de 1 minuto para remoção.

(iii) **Remoção da máscara e limpeza:** ambos os processos são feitos quimicamente. Para a remoção da máscara é utilizado hidróxido de potássio ou outro *Stripper* (removedor) adequado para retirada à tinta ou fotorresiste. No processo de limpeza é feito um enxágue com água para remoção de contaminantes oriundos das etapas anteriores.

Para obter a produtividade e conseqüentemente o baixo custo necessário, todas as 3 etapas precisam ser realizadas em equipamentos rolo a rolo (*Reel to Reel*) (PEMS, 2015). No caso de equipamentos para fabricação de antenas de alumínio sobre substrato PET (Polietileno Tereftalato), o processo funciona da seguinte forma: entra um rolo de laminado

(um rolo de filme contendo uma camada de alumínio de 10 μm sobre um substrato de PET de 50 μm) e sai um rolo de antenas de alumínio sobre substrato PET prontas.

O processo de Remoção Química produz antenas de melhor qualidade devido à espessura da camada de alumínio. A qualidade das antenas geradas depende da qualidade da impressão do padrão e a principal matéria-prima é o laminado de PET/alumínio.

A Tabela 3 mostra as principais vantagens e desvantagens deste processo e a Tabela 4 mostra um resumo das melhores alternativas tecnológicas.

Tabela 3 – Principais vantagens e desvantagens

Vantagens	Desvantagens
Custo por antena muito baixo	Método subtrativo
Custo dos equipamentos de produção é de médio a elevado	Geração de resíduos da remoção do metal
Alta capacidade de produção (<i>Reel to Reel</i>)	Emprego de químicos que precisam ser reciclados
	Espessura do alumínio limitada pelo laminado (~10 μm)
	Qualidade definida pela impressão

Tabela 4 – Alternativas tecnológicas

Etapa	Tecnologia	Avaliação
Impressão	Laminação de fotorresiste	Muito complexo e de custo elevado – em desuso
	Serigrafia de fotorresiste	Necessita de <i>Screen Printer Reel to Reel</i> – nesse caso pode ser melhor imprimir direto uma camada de tinta condutiva por serigrafia.
	Serigrafia rotativa	Oferta de equipamentos muito limitada e custo elevado.
	Rotogravura	Mais empregada – mas a oferta de equipamentos de boa resolução é limitada.
Remoção	Cloreto de Ferro	Pode ser regenerado, reduzindo custo.
	Hidróxido de Amônia	O uso vem aumentando por ser atualmente a solução mais empregada pela indústria eletrônica na fabricação de PCIs.

As principais variáveis envolvidas neste processo são:

- O método de impressão do desenho da antena (laminação, serigrafia ou rotogravura);
- A solução química empregada na remoção;
- O tempo de remoção química, que depende da velocidade e/ou comprimento da linha.

Como a um tempo mínimo de impressão e remoção, para taxas de produção mais elevadas é necessário aumentar o comprimento dos equipamentos ou da linha;

- A solução corrosiva, dependendo do reagente químico empregado e da sua concentração, pode ou não ser reutilizada, além de definir a velocidade de processo.

As possibilidades de soluções usadas para corrosão de alumínio são principalmente ácido fosfórico, ácido acético, ácido nítrico, percloro de ferro, hidróxido de amônia e ácido clorídrico. Os mais utilizados industrialmente são o percloro de ferro e hidróxido de amônio, ambos são filtrados, tem suas concentrações ajustadas

continuamente e são recirculados para o máximo aproveitamento. O percloroeto de ferro e o hidróxido de amônio também são utilizados na fabricação de placas de circuito impresso, essas soluções removem tanto o cobre bem como alumínio.

5.1.1. Considerações sobre o Custo do Processo Remoção Química

Esta tecnologia ainda é a mais competitiva em termos de custo, mas possui limitações. Emprega produtos químicos que precisam ser reciclados. A produção do laminado é dominada por um pequeno grupo de empresas multinacionais. Embora sejam necessários apenas 3 μm de espessura de alumínio para que a antena funcione, não existem laminados com espessuras menores que 8 μm ou 9 μm , limitando o custo mínimo da antena.

O custo dos equipamentos de produção é de médio a elevado, viabilizando o processo para grandes volumes, porém há uma diferença significativa dependendo da empresa/país de origem da aquisição, sendo menor para os equipamentos chineses. O custo variável é dominado pelo custo da matéria prima principal, ou seja, do laminado Al + PET (cerca de 90% do total).

Como o processo é similar ao de fabricação de placas de circuito impresso, usando os mesmos produtos químicos, uma forma de redução de custo pode ser a parceria com fabricantes de placas de PCIs locais. Outra possibilidade de redução de custo seria diminuir a camada de substrato PET de 50 μm para 38 μm . Mesmo existindo a opção de um substrato mais fino disponível comercialmente essa hipótese seria inviável, pois no processo de conexão do CI na antena é necessário que a cura do adesivo utilizado seja feita em uma estufa com temperatura específica onde o substrato por ser muito fino sofre deformação devido ao aquecimento. O substrato PET mais fino é menos resistente à temperatura, enrugando mais facilmente. Deve ser combinado com ajuste fino de processo e talvez o uso de um adesivo que necessite de um tempo de cura mais rápido.

5.2. FABRICAÇÃO POR ESTAMPAGEM

A fabricação por estampagem ou Corte (*Cutting System*) Utiliza um “clichê”, ou faca, que contém o desenho da antena a ser fabricada que é pressionado contra o laminado subjacente cortando o desenho das antenas no mesmo (MUHELBAUER, 2019). O material adjacente, que não faz parte da antena é removido enquanto o laminado da camada inferior permanece intacto deixando um padrão condutivo no laminado.

A Figura 6 apresenta um modelo de equipamento utilizado no processo de fabricação de antenas por estampagem e a Tabela 5 mostra as principais vantagens e desvantagens deste processo.

Figura 6 – Equipamento de Estampagem modelo 350



Fonte: Muhelbauer (2019)

Tabela 5 – Principais vantagens e desvantagens

Vantagens	Desvantagens
Alta velocidade/capacidade de produção	Custo elevado do equipamento
Simplicidade do processo	Método subtrativo
Insumo único e processo seco	

Trata-se de um processo extremamente simples que emprega apenas uma matéria prima, no caso a mesma já utilizada por outras técnicas como na Remoção Química, e

também apenas um equipamento. A qualidade da antena depende basicamente da ferramenta de corte. A variável de processo mais importante é a velocidade de corte. O processo é totalmente automático.

5.2.1. Considerações sobre o Custo do Processo de Fabricação por Estampagem

O custo do equipamento é elevado, isso torna o investimento inicial consequentemente muito elevado, no entanto, como a capacidade produtiva é muito grande, o custo da amortização/peça passa a ser atrativo para grandes volumes.

5.3. IMPRESSÃO POR JATO DE TINTA

No processo Jato de Tinta são utilizados cabeçotes de impressão piezoelétricos ou térmicos e tintas compatíveis com estes cabeçotes para impressão das geometrias nos substratos (PEL, 2018; PIXDRO, 2015; YANG, 2007). É possível imprimir camadas finas, entre 1 e 3 μm de espessura, sendo necessário que as partículas metálicas na tinta tenham dimensões da ordem de 100 a 500 nm (FERNANDEZ, 2018).

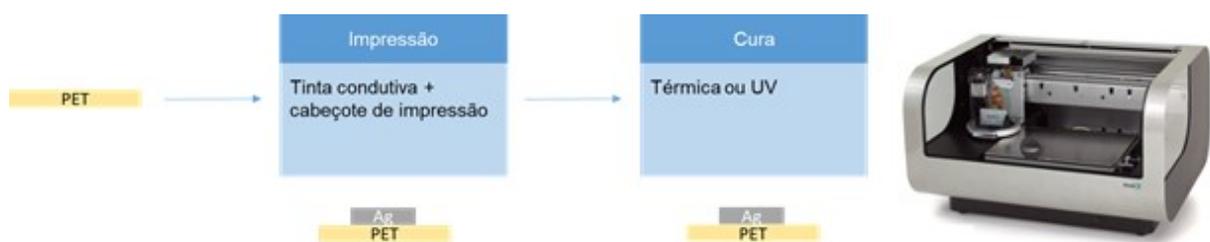
Todas as propriedades finais do material desenvolvido dependem da qualidade da tinta, como evaporação, homogeneidade do filme, propriedades elétricas, dentre outras. Em geral, para formulação de tintas condutoras, os materiais mais utilizados são partículas e nano partículas de prata dispersas em um veículo apropriado, permitindo bom controle de ejeção da tinta. Dessa forma, o controle da síntese de nano partículas é importante para o desenvolvimento da tinta. O cobre também pode ser utilizado na formulação de tintas condutoras, no entanto a obtenção de uma tinta com esse material enfrenta a dificuldade de sua rápida oxidação na atmosfera ambiente (FERNANDEZ, 2018).

A principal vantagem da utilização da impressão a jato de tinta é que se trata de uma tecnologia digital em que cada antena pode ser única sem incorrer em maiores custos. A impressão a jato de tinta é atualmente a tecnologia mais investigada na área de eletrônica

flexível. É capaz de imprimir linhas muito pequenas (até 10 μm) com excelente resolução, mas ainda apresenta vários desafios, pois é complexo manter partículas de metal densas em suspensões estáveis. Outro fator a ser considerado é que essas partículas metálicas, mesmo no caso de nano partículas, tendem a obstruir o bocal durante o processo de jateamento. Uma alternativa é a adição de polímeros condutores, porém esta alternativa é severamente limitada pela baixa concentração em que os polímeros condutores são solúveis. Outro ponto a salientar é que a uniformidade da linha impressa é ruim devido à natureza dos pontos da disposição e à cinética da tensão superficial. No caso específico da produção de antenas RFID, a condutividade necessária para que as antenas tenham desempenho básico é relativamente elevada, e os polímeros condutores normalmente não alcançam a faixa de condutividade desejada (FERNANDEZ, 2018).

A Figura 7 ilustra resumidamente o processo de fabricação de antenas por impressão a jato de tinta e a Tabela 6 mostra as principais vantagens e desvantagens deste processo.

Figura 7 – Fluxo do processo de fabricação de antenas através de impressão a Jato de Tinta



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 6 – Principais vantagens e desvantagens

Vantagens	Desvantagens
Método aditivo	Custo dos insumos elevado
Flexibilidade	Investimento em equipamento ainda elevado
Padrões de impressão facilmente modificados	Na prática, é muito complexo imprimir camadas com espessura maior de 1 μm
	Dificuldades técnicas para aplicação em larga escala

A qualidade da antena impressa estará diretamente relacionada com as características da tinta formulada e com as características dos cartuchos e cabeçotes utilizados para impressão. A secagem da tinta, espalhamento, adequação entre propriedades da tinta e substrato são fatores que devem ser considerados nesta tecnologia.

5.3.1. Considerações sobre o Custo do Processo Impressão por Jato de Tinta

Os maiores custos respectivamente são: a impressora, o laminado e a tinta. O que dificulta a viabilidade comercial dessa tecnologia não é o custo da tinta, é o custo das impressoras, já que não existem impressoras ou cabeçotes industriais com velocidade suficiente para produção em alto volume a custo baixo. O custo dos equipamentos depende do tipo, tamanho e quantidade de *nozzles* do cabeçote. No entanto, mesmo uma impressora com elevado número de *nozzles* conseguiria imprimir apenas cerca de 10 milhões de antenas/ano, isso eleva o investimento necessário para produção em volume. Pode vir a competir com a Remoção Química caso venham a surgir impressoras/cabeçotes mais velozes.

O custo do substrato também representa potencial de redução, pode ser empregado substrato de papel, mas o papel necessita de tratamento superficial para melhorar a adesão da tinta, também precisa ser resistente à tração para resistir ao processo de fabricação rolo a rolo e resistir às temperaturas do tratamento térmico (cura da tinta).

Se for empregado substrato de PET, apesar de não conter a camada metálica, como no caso da Remoção Química, a superfície do PET necessita de tratamento extra para garantir a boa adesão e definição da impressão. Isso faz com que o substrato tenha praticamente o mesmo custo do laminado PET + Al.

Os custos de mão de obra e energia são muito baixos nessa tecnologia, as máquinas são automáticas e o consumo de energia é baixo, então esses custos não interferem significativamente no comparativo das tecnologias. Imprimir por rotogravura pode deixar o processo competitivo, mas precisa desenvolver/adaptar a impressora.

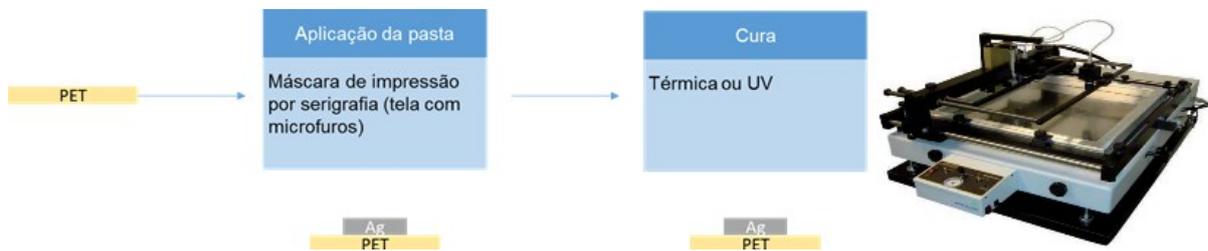
5.4. IMPRESSÃO POR SERIGRAFIA

Serigrafia ou *Screen Printing* é uma técnica bastante tradicional, simples, versátil, de baixo custo e largamente utilizada pela indústria de eletrônica. É uma técnica de impressão direta, que possibilita aplicação em diversos tipos de substratos e o uso de tintas que tenham partículas maiores (METALLOGRAPH, 2000).

A serigrafia, também conhecida como impressão em tela, é um processo robusto, simples e pode ser facilmente automatizado. O método de impressão é direto e aditivo. Neste processo, uma tinta ou pasta de viscosidade alta é pressionada em um substrato através de um molde (tela) com auxílio de um rodo. O rodo é posicionado sobre a tela a um ângulo de 45°. A velocidade de aplicação da tinta na tela tem papel importante na quantidade de tinta depositada no substrato. Quando a velocidade de aplicação for muito alta, a tinta fica pouco tempo em contato com a tela e não preenche a abertura, em contrapartida, baixas velocidades de aplicação resultam em transferência excessiva de tinta, gerando desperdícios.

A Figura 8 apresenta um esquema do processo de fabricação de antenas por serigrafia e a Tabela 7 mostra as principais vantagens e desvantagens deste processo.

Figura 8 – Fluxo do processo de fabricação de antenas através de impressão por Serigrafia



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 7 – Principais vantagens e desvantagens

Vantagens	Desvantagens
Investimento baixo	Perdas de material
Processo aditivo	Dificuldade de deposição de espessuras inferiores a 8 – 10 μm
	Não adequada para impressão de protótipos

Com relação às variáveis de processo, a qualidade e as características da impressão por serigrafia são dependentes de fatores como viscosidade da tinta, tensão superficial do substrato e da tinta, velocidade de impressão, ângulo de aplicação, tamanho e material da malha. Neste processo o estêncil define a qualidade de impressão. É um método aditivo, assim gerando menor desperdício de materiais sendo esses relativos à aplicação da pasta na tela, já que nem toda tinta aplicada é usada para impressão.

Outra questão importante é que essa técnica não seria a mais adequada para impressão de protótipos ou lotes piloto, já que demanda a fabricação da tela para impressão. Diferentemente do que ocorre nas impressões a jato de tinta ou por transferência térmica, onde o projeto feito digitalmente pode ser diretamente impresso.

Para a fabricação em volume é necessário que a linha de fabricação seja adaptada para o processo rolo a rolo (*Reel to Reel*). A velocidade da linha está diretamente relacionada ao

tamanho do estêncil empregado, mas hoje em dia existem equipamentos automáticos rolo a rolo que usam máscaras grandes, com elevadas capacidades de produção.

5.4.1. Considerações sobre o Custo do Processo de Impressão por Serigrafia

O investimento em equipamentos é baixo e a capacidade de produção é alta. Na serigrafia, em função da presença de um veículo não condutivo, são necessários elevados percentuais de sólidos, entre 50 e 70% para produção de tintas com condutividade e viscosidade adequadas. O veículo é formado por solventes e aditivos, que são diversos químicos utilizados para conferir as propriedades necessárias e desejáveis para o processo de impressão onde os resultados são satisfatórios apenas para percentuais a partir de 60% de prata. Esse elevado percentual de prata faz com que os custos das pastas/tintas para serigrafia sejam significativamente mais elevados comparados às tintas para impressão a jato de tinta.

Para diminuir o custo, uma alternativa é reduzir a espessura da camada de tinta referente ao elemento irradiante, sendo possível por meio de ajustes do processo de impressão e estêncil podendo chegar a 8 μm . A desvantagem é que através dessa técnica não é possível imprimir camadas muito finas, menores que 8 a 10 μm , por exemplo, o que aumenta o consumo de matéria-prima e conseqüentemente o custo.

O custo do substrato pode ser considerado o mesmo empregado na técnica de jato de tinta, inclusive valem as mesmas considerações de tratamento superficial e resistência. Da mesma forma, a serigrafia pode ser realizada sobre papel ou PET.

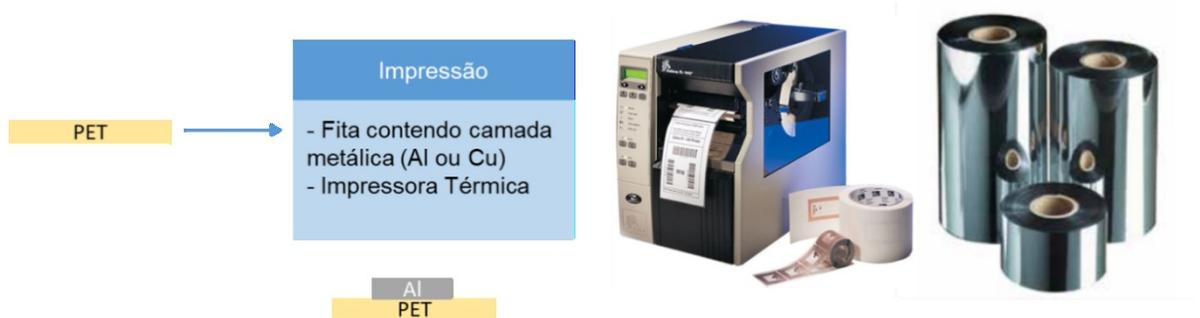
Os custos de mão de obra e energia são muito baixos nessa tecnologia, as máquinas são automáticas e o consumo de energia é baixo, portanto esses custos não interferem significativamente no comparativo das tecnologias.

5.5. IMPRESSÃO POR TRANSFERÊNCIA TÉRMICA

É uma tecnologia digital onde a antena é impressa por aquecimento e pressão de cabeçotes contendo agulhas térmicas sobre o substrato que contém o filme metálico (Cu ou Al) sendo este liberado nos pontos aquecidos (LINGTIE, 2003). Cada impressão pode ser única, permitindo a produção de protótipos com ciclos rápidos, bem como a produção de um pequeno número de unidades sendo necessária apenas uma impressora de transferência térmica de boa resolução (600 dpi).

A Figura 9 apresenta um esquema do processo de fabricação de antenas por transferência térmica e a Tabela 8 mostra as principais vantagens e desvantagens deste processo.

Figura 9 – Resumo do processo de fabricação de antenas através de impressão por Transferência Térmica



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 8 – Principais vantagens e desvantagens

Vantagens	Desvantagens
Investimento capital praticamente inexistente ou muito baixo	Custos dos <i>ribbons</i> condutivos
Imprime sobre papel e diferentes tipos de substratos	Método subtrativo
Flexibilidade e facilidade de uso	

Neste tipo de processo as variáveis são mais simples comparadas com os demais tipos de impressão. A qualidade de impressão depende basicamente do cabeçote de impressão, do ribbon e do substrato.

5.5.1. Considerações sobre o Custo do Processo de Impressão por Transferência Térmica

O custo da impressora utilizada depende da velocidade e resolução e o custo dos *ribbons* depende da quantidade a ser adquirida. O custo do substrato pode ser considerado o mesmo das técnicas anteriores. Essa técnica de impressão pode ser usada sobre diferentes substratos de PET ou papel podendo obter uma camada de metal impressa (alumínio) de apenas 0,5 μm de espessura com uma excelente qualidade

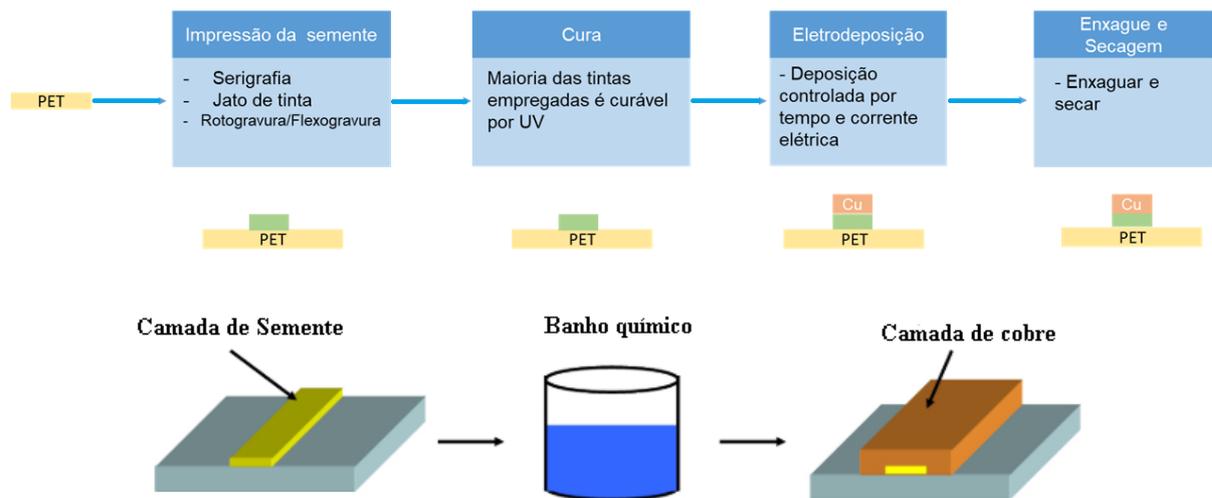
5.6. ELETRODEPOSIÇÃO

É um processo aditivo, onde a geometria da antena é impressa sobre o substrato com uma camada mínima de tinta condutiva que servirá de semente para a posterior eletrodeposição de cobre em banhos químicos (a semente precisa ser condutiva para aplicar-se o campo elétrico e a corrente que atrai e deposita os íons do metal) (MECO, 2019). A espessura da camada final depositada é controlada pela corrente elétrica, pelo tempo, temperatura e concentração da solução de deposição. As limitações deste processo são a aderência do material depositado, que depende muito da aderência da tinta (semente), a camada de semente também necessita ter uma condutividade mínima para que a deposição seja uniforme e emprega produtos químicos que precisam ser reciclados. Para efeitos de comparação, a resistência de folha (superficial) da camada de semente precisa ser da ordem de 300 $\text{m}\Omega/\square$ (miliohms/quadrado) (BHOORE, 2013), enquanto a camada metálica da antena

necessita de $30 \text{ m}\Omega/\square$. Em geral são empregadas tintas à base de carbono ou prata para a semente e depois é depositada uma camada mais espessa de cobre por eletrodeposição.

A Figura 10 apresenta um esquema do processo de fabricação de antenas por eletrodeposição e a Tabela 9 mostra as principais vantagens e desvantagens deste processo.

Figura 10 – Fluxo do processo de fabricação de antenas por Eletrodeposição



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 9 – Principais vantagens e desvantagens

Vantagens	Desvantagens
Método aditivo	Investimento elevado
Controle de espessura	Aderência do material depositado depende da aderência da semente
Boa qualidade da camada metálica depositada	Emprego de elevada quantidade de químicos
	Necessita impressão da semente utilizando tinta condutiva
	Oxidação do cobre depositado

As principais variáveis desse processo são a qualidade da semente (condutividade, espessura, uniformidade e aderência), concentração e temperatura da solução de deposição, o

tamanho dos banhos químicos ou comprimento do equipamento, sendo que quanto maior o equipamento, maior a capacidade de produção. O processo também precisa ser rolo a rolo para a fabricação de antenas (*Reel to Reel*). O desenho da antena precisa garantir o contato elétrico entre todas as antenas para passagem da corrente e esse contato é posteriormente cortado quando as antenas são individualizadas. Em geral os equipamentos são modulares e acrescentando-se mais módulos (banhos) a capacidade aumenta. É a técnica mais indicada para deposição de camadas mais espessas.

5.6.1. Considerações sobre o Custo do Processo de Eletrodeposição

O custo dos equipamentos de eletrodeposição é elevado. Há no mercado nacional diversos fabricantes de equipamentos de eletrodeposição, porém para deposição em placas ou peças mecânicas, não são utilizados equipamentos rolo a rolo, precisariam ser adaptados. O controle do processo precisa ser muito bom devido às baixas espessuras. Uma antena para etiqueta UHF necessita de apenas 2 μm de cobre para funcionar bem. Isso requer um equipamento com excelente controle de concentração, pH e temperatura, ou seja, bem superior aos equipamentos existentes no mercado nacional. A vantagem é que os equipamentos têm elevadíssima capacidade de produção, podem ser usados para a fabricação de antenas para etiquetas nas faixas de frequência de LF e HF também, já que é possível depositar camadas espessas, como por exemplo, 10 μm de cobre, bastando assim aumentar o tempo de deposição.

Quanto ao custo variável, acaba sendo elevado também porque é necessário imprimir semente a camada e depois depositar o cobre. Mesmo trabalhando com reposição e filtragem dos químicos há consumo e custos de tratamento de efluentes.

5.7. FATOR DE CUSTO DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO POR ANTENA

A Tabela 10 mostra o fator do custo de fabricação unitário, calculado para as diferentes tecnologias pesquisadas e normalizado com o custo da tecnologia *Etching* por ser o processo que fornece as etiquetas mais baratas existentes no mercado atual. No Apêndice A encontram-se as tabelas com os cálculos detalhados dos processos.

Tabela 10 – Resumo normalizado dos fatores de custo de fabricação por antena

Processo de Fabricação	Fator de Custo do Processo
Remoção química	1
Estampagem	1,4
Impressão por Jato de tinta	2,3
Impressão por Serigrafia	3
Impressão por Transferência Térmica	3,9
Eletrodeposição	3,2

Fonte: (Ferreira , 2020)

A técnica de Remoção Química se mostra uma opção viável, uma vez que apresenta o menor custo de fabricação por antena sendo o processo comercialmente mais vantajoso para produção de elevados volumes. Uma alternativa para diminuição do custo seria a fabricação de antenas por fabricantes nacionais de PCIs devido à similaridade dos processos, materiais e equipamentos.

As tintas condutivas, tanto para impressão por jato de tinta quanto para impressão por serigrafia apresentam inúmeras vantagens para utilização na área de eletrônica flexível, entretanto, comercialmente não são competitivas com a tecnologia de remoção química de alumínio para fabricação de antenas UHF RFID. Isso ocorre principalmente porque não houve evolução suficiente dos cabeçotes de impressão. Mesmo usando os maiores cabeçotes

disponíveis no mercado, a velocidade é baixa, então para a produção em grande volume é necessário o emprego de muitos cabeçotes ou impressoras aumentando o custo dos equipamentos. Uma alternativa que pode viabilizar o uso das tintas é a impressão por rotogravura ao invés de jato de tinta. Para isso é necessário ajustar/adaptar uma impressora, e o clichê precisa ser de alta definição, em torno de 0,1 mm.

Novas tecnologias de fabricação devem ser consideradas como a impressão por transferência térmica e a estampagem, que podem se tornar competitivos em alguns cenários.

6. ETIQUETAS PLANARES PASSIVAS RFID PARA OBJETOS METÁLICOS

Na bibliografia são apresentados vários modelos para utilização em aplicações RFID para etiquetas planares passivas e ativas: antena de fenda coberta, antena patch circular, antena com meandros, antena planar em formato F invertido (PIFA), antena dipolo dobrada, etc. Neste capítulo serão exploradas somente as características e detalhes referentes ao modelo de antena tipo PIFA.

O modelo de antena PIFA que será descrito no item 6.1 é o mais utilizado em sistemas UHF RFID para operar em superfícies metálicas pois já contém um plano de terra em seu projeto. (TASHI, 2011), além de possuir tamanho reduzido, ser de fácil fabricação e baixo custo.

Etiquetas UHF RFID que não foram projetadas para serem usadas em metais mostram bom desempenho no espaço livre, mas quando colocadas próximas a materiais metálicos sofrem degradação de desempenho. A perda de desempenho se dá pelo fato das características dos materiais afetarem as propriedades da antena (impedância de entrada, diagrama de radiação e eficiência) (AYAD, 2012; RAUMONEN, 2003). O plano de terra cria uma inversão de fase na onda eletromagnética refletida, causando uma significativa redução na eficiência e na distância de operação das etiquetas.

O equacionamento utilizado para o projeto da antena PIFA da tese é equivalente ao equacionamento do modelo de linha de transmissão para o projeto da antena de microfita retangular apresentado em (ANTONCHIK, 2007). Trata-se de um modelo teórico simples para a antena PIFA retangular descrito como modelo de linha de transmissão que é apresentado juntamente com medições extensivas e simulações numéricas que confirmam as características de radiação e a impedância da PIFA. O modelo de linha de transmissão representa a PIFA como um arranjo de linhas de transmissão equivalentes com três ramificações representando seus slots radiantes e uma ramificação em curto-circuito.

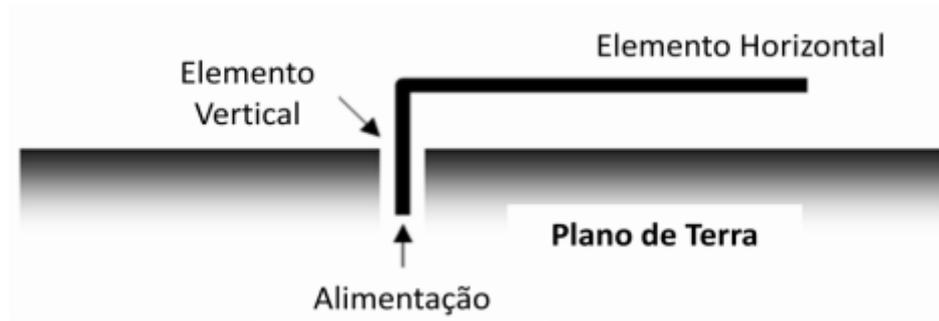
Este capítulo mostra as características da antena planar usualmente utilizada para projeto de etiquetas UHF RFID. Serão apresentadas as principais características da antena PIFA incluindo diversos e importantes parâmetros necessários para a formulação da equação do alcance de leitura e também as equações de cálculo das dimensões que servirão como primeira aproximação das dimensões iniciais da geometria da antena para inserção posterior desses dados no *software* de simulação eletromagnética HFSS onde serão feitas as análises paramétricas e de otimizações.

6.1. CARACTERÍSTICAS DA ANTENA PLANAR EM FORMATO F INVERTIDO (PIFA)

Uma antena PIFA é obtida pelo curto-circuito entre o elemento radiante e o plano de terra. O curto-circuito pode ser feito através de um segmento do elemento irradiante em direção ao plano de terra ou através da utilização de um pedaço de fio (pino) para conexão das duas partes denominado pino de curto. Dessa forma, a antena pode ressoar em uma frequência fixa de operação com um tamanho menor. Devido ao tamanho compacto, o projeto de antena PIFA têm despertado atenção dos pesquisadores de antenas, e uma variedade de antena planar do tipo PIFA tem sido desenvolvida.

A antena PIFA é uma variante da antena de microfita que foi introduzida em meados de 1970 (HIRASAWA, 1992), herdando suas qualidades de antena de baixo custo de fabricação e flexibilidade de operação, com as vantagens de ter tamanho menor e largura de banda maior. O desenvolvimento estrutural da PIFA segue a ideia apresentada em FUJIMOTO (1987) e parte da antena L-invertido (ILA: *Inverted-L Antenna*), ilustrada na Figura 11.

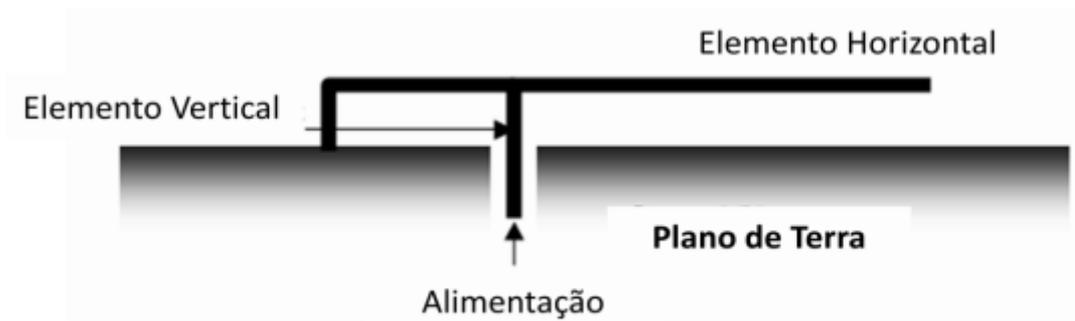
Figura 11 – Estrutura de uma ILA



Fonte: (Fujimoto, 1987)

Diversas modificações podem ser aplicadas na ILA para melhorar o seu desempenho. Uma dessas alterações resulta na antena F-invertido (IFA: *Inverted-F Antenna*) ao adicionar um elemento em formato de L invertido, indicado na Figura 12, o que resulta em um ajuste de impedância de entrada da antena. Com o comprimento adequado deste novo elemento pode-se realizar o casamento de impedância da antena com a carga sem utilizar componentes adicionais de circuito.

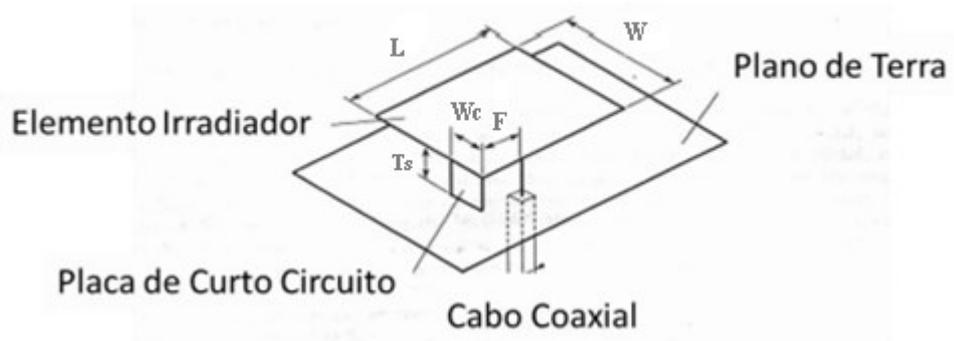
Figura 12 – Estrutura de uma IFA



Fonte: (Fujimoto, 1987)

Subsequentemente, ao utilizar uma placa no lugar do fio que responde pelo elemento horizontal da IFA, obteve-se maior largura de banda. O resultado é a PIFA ilustrada na Figura 13, na qual os elementos básicos consistem em: uma placa de curto-circuito entre o elemento irradiante e o plano de terra com largura W_c e espessura T_s , um elemento irradiante com largura W e comprimento L e de um plano de terra.

Figura 13 – Estrutura de uma PIFA



Fonte: (Hirasawa, 1992)

Entre o plano de terra e o elemento irradiador pode-se utilizar uma camada de substrato sólido ou deixar uma camada de ar. A escolha da permissividade elétrica do substrato pode alterar a frequência de ressonância.

A complexidade do projeto de uma antena PIFA deve-se à sensibilidade das suas características de operação diante das mudanças de suas dimensões. Embora muitas das operações, e características da antena PIFA sejam conhecidas, após o encontro das dimensões através das equações ainda se faz necessário fazer o ajuste fino das dimensões no simulador até que a PIFA atenda satisfatoriamente às características de operação almeçadas.

6.1.1. Localização do Ponto de Alimentação

Há uma relação direta entre o casamento de impedância e a posição do ponto de alimentação da antena. Isso ocorre porque a variação da posição do ponto de alimentação causa variação na impedância de entrada do elemento irradiante (JAMES, 1989). O aumento da indutância, causado pelo distanciamento entre o curto-circuito e o ponto de alimentação, aumenta a frequência de ressonância (NASCIMENTO, 2007).

6.1.2. Localização do Curto-Circuito entre o Elemento Irradiante e o Plano de Terra

O uso da placa de curto-circuito indicada na Figura 11 proporciona redução na frequência de ressonância, o que possibilita uma maior miniaturização da antena para uma frequência de operação. O efeito do segmento pode ser explicado pela teoria de circuitos.

Quando um pino de curto é colocado próximo à fonte de alimentação, ocorre um acoplamento capacitivo e quando o pino de curto é movido para longe da fonte, o acoplamento capacitivo diminui e a reatância indutiva aumenta, portanto a frequência de operação pode ser aumentada ou diminuída dependendo do afastamento ou aproximação do pino de curto em relação à fonte de alimentação. (VENUGOPAL, 2001).

6.1.3. Distância entre Plano de Terra e Elemento Irradiante

O mecanismo de radiação de uma antena planar depende do campo de borda entre o elemento radiante e o plano de terra. Em geral, a antena em microfita é composta por uma camada de dielétrico entre o elemento radiante e o plano de terra. Variar a distância entre o plano de terra e o elemento radiante é uma forma de controlar a frequência de operação (JAMES, 1989). Na ausência de substrato, espera-se que a radiação eletromagnética seja pouco afetada pela variação na distância entre as placas.

Uma das formas de reduzir a frequência de operação de antenas em microfita é o uso de substrato entre o elemento radiante e o plano de terra. Um substrato espesso, além de diminuir a frequência de operação, aumenta a potência de radiação, reduz as perdas por condução e melhora a largura de banda.

A diferença entre substratos de baixa e alta permissividade está no fato de que um substrato de alta permissividade relativa implica na diminuição da eficiência de radiação e no estreitamento da largura de banda e vice-versa (LO, 1997).

6.1.4. Largura e Comprimento do Elemento Irradiante

A largura W do elemento radiante tem pouco efeito sobre a frequência de ressonância e diagrama de radiação da antena. Se W for muito pequeno, tem-se pouca eficiência de radiação, e para valores muito altos de W excita-se modos indesejados de propagação. O comprimento L do elemento irradiante determina a frequência de ressonância.

Na prática, o campo elétrico não fica confinado no elemento irradiante, essa parte do campo elétrico que fica em volta das dimensões $W \times L$ do elemento irradiante é denominado campo de borda. Ao longo das bordas relacionadas ao comprimento L , os efeitos podem ser descritos em termos de um comprimento adicional ΔL ao longo da dimensão L . O comprimento efetivo L_e pode ser escrito como $L_e = L + 2\Delta L$. O valor de L é dado pela equação (15) (GARG, 2001):

$$L = \frac{c}{2 f_r \sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (15)$$

onde $c = 3 \times 10^8$ m/s é a velocidade da luz no vácuo, f_r é a frequência de ressonância e a permissividade efetiva ϵ_{re} é dada pela equação (16):

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (16)$$

Pelo fato dos campos eletromagnéticos ultrapassarem os limites físicos do elemento irradiante formando campos de franja nas bordas, o comprimento *fringe* ΔL indicado na equação 17 é considerado. Isso ocorre quando os campos eletromagnéticos se propagam através do elemento irradiante e encontram uma descontinuidade nas dimensões finitas do elemento irradiante (GARG, 2001).

$$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(\epsilon_{re} + 3) \left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{re} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8\right)} \quad (17)$$

sendo assim, o valor de L será calculado pela equação 18:

$$L = \frac{c}{2 f_r \sqrt{\epsilon_{re}}} - 2 \Delta L \quad (18)$$

Além deste, existem outros métodos para relacionar a frequência de ressonância com o comprimento L do elemento radiante, sendo que a maioria desses métodos é empírica (GARG, 2001).

A presença de fendas duplas introduz uma indutância que é usada como uma opção de melhoria no casamento de impedância entre o CI e a antena. A inserção de *inset-fed* (reentrâncias) é utilizada para melhorar o casamento de impedância entre o patch irradiante e a alimentação. Devido às dimensões para conexão do CI, a largura da reentrância W_s deve ser considerada como a mesma largura do CI, enquanto o valor do comprimento da reentrância a é calculado através da equação (19) aproximada de (BALANIS, 1997).

$$a = \frac{L}{\pi} \cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{Z_{in}}{R_{in}}} \right) \quad (19)$$

onde Z_{in} é a impedância de entrada na frequência de ressonância, R_{in} é a resistência de entrada na frequência de ressonância e X_{in} é a reatância de entrada na frequência de ressonância, sendo $Z_{in} = R_{in} + j X_{in}$, e R_{in} é dada pela equação (20):

$$R_{in} = \frac{1}{2 (G_1 + G_{12})} \quad (20)$$

onde G_1 é a condutância na abertura radiante, G_{12} é a condutância entre os slots de radiação podendo também ser chamada de condutância mútua.

6.1.5. Tamanho do Plano de Terra

Um dos principais objetivos de projeto é reduzir o tamanho da antena, assim como o plano de terra. O problema é que plano de terra finito possibilita que ocorra difração em suas bordas causando mudança no diagrama de radiação. Para um plano de terra com as dimensões exatamente iguais ao elemento radiante, a frequência de ressonância é maior, se comparada ao caso em que um plano de terra muito grande é utilizado (GARG, 2001). Quando se aumenta o plano de terra gradativamente, além do elemento radiante, a frequência de ressonância para o caso do plano de terra infinito é atingida quando o plano de terra é aumentado em cerca de $\frac{\lambda_0}{20}$ em todas as direções, onde λ_0 é o comprimento de onda no espaço livre (LIER, 1983). Com relação aos planos de radiação, mostra-se que o plano E é mais fortemente afetado pelo tamanho do plano de terra, em comparação com o plano H (LIER, 1983).

6.2. DESCRIÇÃO DA ETIQUETA DESENVOLVIDA

O projeto de desenvolvimento de uma etiqueta passiva planar UHF RFID para utilização em superfícies metálicas foi baseado na antena PIFA cujas características foram detalhadas no item 6.1. Com o objetivo de apresentar uma solução para identificação de objetos metálicos com uma menor dimensão e um maior alcance de leitura, outras escolhas que iriam influenciar no alcance dessas características tiveram que ser feitas antes do desenvolvimento como, por exemplo: estrutura, processo de fabricação e geometria.

Para a estrutura da etiqueta foi necessário definir o CI, o tipo de solda do CI, o substrato dielétrico e o metal a ser utilizado nas partes metálicas. Para a escolha do CI foi levado em consideração o fator sensibilidade de leitura que se refere à potência mínima

necessária para ativar o CI, devido a essa análise foi escolhido um CI que tivesse uma menor sensibilidade de leitura e conseqüentemente pudesse fornecer um maior desempenho pois quanto menor for o valor do P_{th} , menor a potência de sinal detectável na sua antena.

* O CI escolhido foi o Higgs-3 (ALIEN, 2016) que atua na faixa de frequência de operação de 860 MHz a 960 MHz, trata-se de um CI passivo com resistência paralela de entrada equivalente $R_p = 1500 \Omega$, capacitância equivalente paralela $C_p = 0,85 \text{ pF}$ e sensibilidade de leitura $P_{th} = -18 \text{ dBm}$. A impedância complexa do CI na frequência de 915 MHz é $Z_c = 27,43 - j 200,98 \Omega$.

O CI possui entradas de alimentação do tipo diferencial (RF- e RF+) onde as conexões do CI com o metal do elemento irradiante da etiqueta são feitas através dessas portas. Etiquetas diferenciais (balanceadas) são alimentadas por um sinal que é referenciado um ao outro ao invés de estarem ligadas ao plano de terra. Devido a esse fato muitos CI de RF têm portas diferenciais (WALLACE, 2017).

A alimentação do CI diverge da alimentação da antena PIFA convencional que geralmente é 50Ω sendo realizada por meio de alimentação externa através de cabos coaxiais ou conectores. A maioria dos equipamentos de medição de RF é referenciada a 50Ω , portanto, se torna fácil realizar medições das características dessas etiquetas com esses equipamentos. Antenas de terminação única (desbalanceadas) são alimentadas por um sinal que é referenciado ao plano de terra e as características de impedância de entrada dessas antenas são normalmente 50Ω , necessitando de uma rede de transformação (balun) para transformar sinais balanceados em desbalanceados.

* Após a escolha do CI foi necessário fazer a escolha do tipo de solda para conexão do CI no metal do elemento irradiante da antena. Considerando a dificuldade de solda em alumínio e também a possibilidade de curto-circuito do CI devido a miniaturização do CI

foram analisadas três possibilidades de solda: solda com fio, solda com Flip Chip e adesivo condutivo.

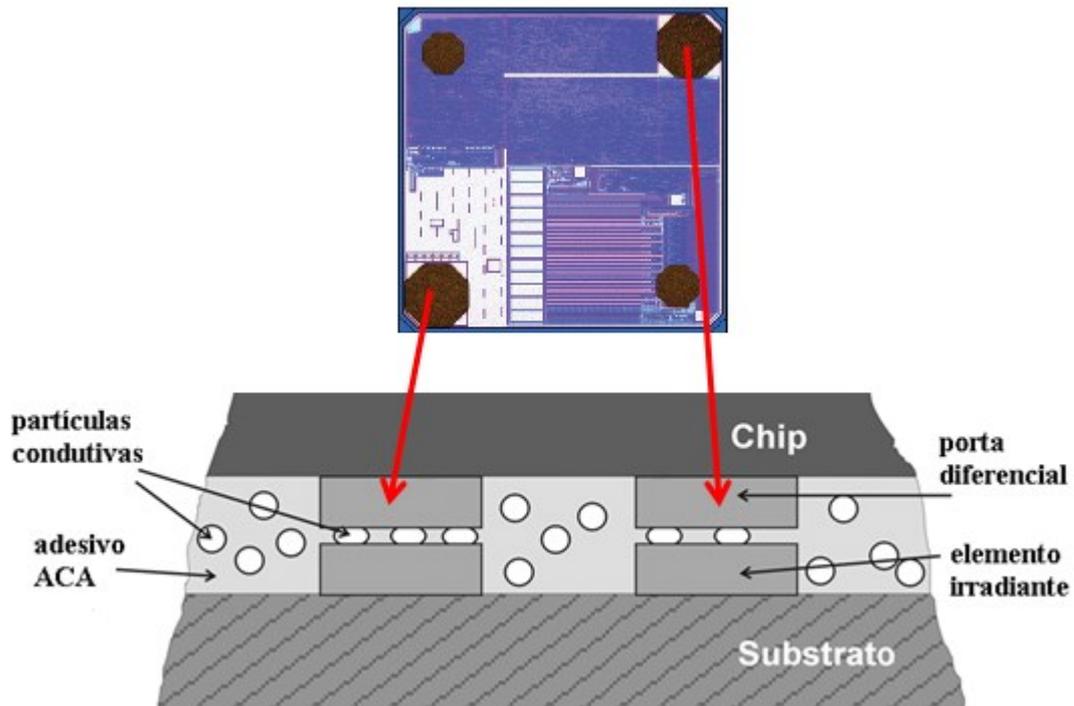
- Na solda com fio, o processo se torna caro pela necessidade do uso de fios de ouro e equipamento de solda desses fios, além da necessidade de cobertura dos fios para a proteção do mesmo aumentando assim a espessura do produto final.

- Na solda com Flip Chip, o processo necessita de temperatura de 250°C para fusão das esferas de solda, limitando desta maneira a maioria das opções de substratos devido ao fato dos mesmos não suportarem temperaturas tão altas. Neste processo existe também a necessidade de aplicação das esferas de solda no CI.

- A solda com adesivo condutivo (ACA) é o processo mais utilizado, é rápido, barato e necessita de temperaturas em torno de 150°C para seu processo de cura que são compatíveis com a maioria dos substratos.

Além das características indicadas acima, o adesivo do tipo ACA – Adesivo Anisotrópico Condutivo conduz em apenas uma única direção, ou seja, as partículas condutoras elétricas (preenchedores) indicadas na Figura 14 quando submetidas à pressão e temperatura indicadas pelo fabricante irão conduzir apenas na direção vertical, evitando a possibilidade de curto-circuito nos terminais do CI. Ao pressionar as partículas condutivas na direção vertical, em temperatura adequada, ocorre à fusão das mesmas e as portas diferenciais do CI são conectadas ao metal do elemento irradiante/laminado da antena. O restante das partículas, mesmo pressionadas, não irá conduzir na direção horizontal.

Figura 14 – Solda com adesivo ACA



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir das considerações descritas foi feita a escolha do adesivo ACA modelo ACA268 (DELO, 2015) não fabricado no Brasil cuja importação necessita de transporte diferenciado devido à necessidade do material estar refrigerado a -20°C para não perder suas características.

* A partir da escolha do adesivo ACA foram analisados substratos que suportassem as características do processo de cura do adesivo utilizadas no processo de fabricação e estipuladas pelo fabricante: temperatura de 150°C por um período de 8 s.

A escolha adequada do substrato possui características importantes que devem ser levadas em consideração: custo atrativo, espessura e características dielétricas desejadas como, por exemplo, uma baixa tangente de perdas com o intuito de alcançar um bom desempenho.

Para definição do substrato foi feito o levantamento dos dielétricos mais utilizados e de suas principais características conforme indicado na Tabela 11.

Tabela 11 – Resumo das características de alguns tipos de substratos

Substrato				
Material	ϵ_r	Tangente de perdas	Temperatura Máxima (°C)	Custo
Cerâmica DR36	36	0,000028	4127	Alto
Rogers RO3010	10,2	0,0023	500	Alto
PTFE (Teflon)	2,65	0,0016	326	Alto
FR4	4,2	0,02	130	Médio
PET filme	3	0,002	260	Baixo
PET-G placa	3	0,0208	260	Baixo
PVC	3	0,1	Rígido 127 Flexível 150	Baixo
Polipropileno	2	0,006	160	Baixo

Através das características indicadas foram feitas as seguintes considerações:

Os substratos cerâmicos são considerados os melhores, pois possuem uma baixíssima tangente de perdas, porém o custo elevado do mesmo o tornou inviável para este projeto.

Os substratos Rogers e Teflon apresentam melhores características dielétricas em altas frequências em comparação ao substrato FR4, porém seu custo também é alto.

O substrato FR4 amplamente empregado possui custo médio, porém sua temperatura máxima não é elevada podendo causar deformações em sua geometria e alterações nas características do material no momento da cura do adesivo.

O PVC e o Polipropileno seriam adequados, pois possuem baixo custo, mas possuem tangente de perdas alta e permissividade baixa, respectivamente.

O substrato escolhido foi o Tereftalato de Polietileno (PET) que pode ser apresentado em formato de placa com diversas espessuras ou em formato de filme com espessuras mais usuais de 35 μm e 50 μm . É um substrato considerado de baixo custo e é classificado quimicamente como um polímero termoplástico semicristalino atóxico da família dos

poliésteres. É um material leve, de alta resistência mecânica (impacto) e química. Pode ser obtido por meio de reação entre o Dimetil Tereftalato (DMT) ou Ácido Tereftálico (PTA), e o etileno glicol (EG). A resina PET embora seja largamente utilizada em todo o mundo para a fabricação de embalagens, notadamente garrafas para bebidas carbonatadas (refrigerantes, águas com gás, cervejas, etc.), têm várias outras utilidades, sendo encontrada em diversos segmentos de mercado. Outra característica relevante é que o mesmo suporta a temperatura de 150°C necessária no momento da cura do adesivo, além de possuir uma baixa tangente de perdas.

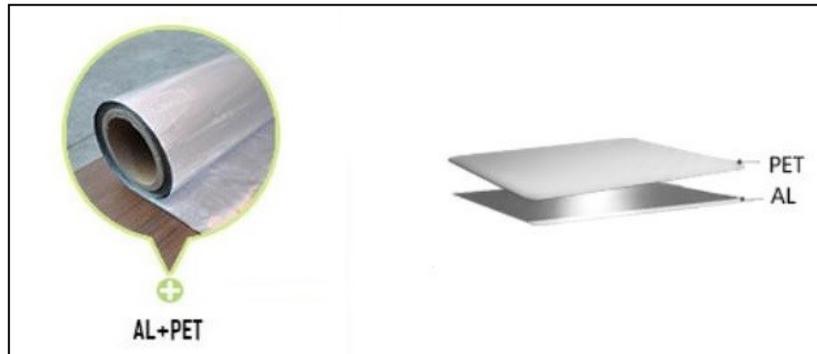
Com base nas considerações descritas, a prioridade era definir um substrato de baixo custo que tivesse uma tangente de perdas aceitável e principalmente que a temperatura máxima aceita pelo material fosse menor que a temperatura utilizada na estufa para fusão do CI no laminado da antena.

O substrato escolhido foi o PET em formato de placa. Para aquisição do material foram encontrados dois tipos: O substrato PET-G (PET com adição de Glicol) cujas espessuras eram de 1,5 mm, 2 mm, 3 mm e 6 mm, encontrado comercialmente e com baixo custo, e o PET em sua forma original, não encontrado comercialmente, fornecido somente em grandes quantidades.

O material adquirido foi o PET-G, pois acreditava-se que suas propriedades dielétricas eram as mesmas indicadas na literatura para o PET original que tem como parâmetros: permissividade $\epsilon_r = 3$ e tangente de perdas $\tan\delta = 0,002$.

* Para as partes metálicas da antena (elemento irradiante, plano de terra e curto circuito) a opção escolhida foi o laminado por ser usualmente utilizado em etiquetas UHF RFID e ter um custo baixo. O laminado é composto por uma camada de PET filme com espessura $T_{pm} = 50 \mu\text{m}$ e uma camada de alumínio com espessura $T_{pm} = 10 \mu\text{m}$, possui condutividade $\sigma = 38 \times 10^6 \text{ S/m}$ e é fornecido em rolos conforme Figura 15.

Figura 15 – Composição do laminado



Fonte: (ClearPet, 2019)

- Após a escolha de todos os itens relacionados à estrutura foi analisado o tipo de tecnologia de fabricação a ser empregada para a viabilidade de construção dos protótipos. A análise do processo de fabricação foi feita através das características e custos indicados no capítulo 4. O tecnologia de fabricação escolhida foi o processo *Etching* pela disponibilidade dos equipamentos, facilidade de construção do protótipo, por possuir baixo custo e possibilidade de implementação em processos de larga escala.

- Enfim, a análise da escolha da geometria considerando o uso do laminado que já havia sido definido e também na possibilidade de escolher uma técnica que permitisse o uso de vários graus de liberdade para o encontro de um melhor casamento de impedância.

A técnica para casamento de impedância escolhida foi o uso de fendas no elemento irradiante (parte superior metálica da antena). Uma primeira aproximação da dimensão da fenda pode ser calculada através da equação da reentrância (equação 19).

O corte da geometria das fendas no laminado pode ser feita utilizando equipamentos precisos e de baixo custo.

Com a escolha de todos os principais itens já definidos, o próximo passo foi o cálculo das dimensões da etiqueta.

ETAPA 1:

Para o cálculo das dimensões do substrato foram também necessárias as definições das seguintes variáveis:

- Faixa de frequência: dentro da faixa de frequência disponível para aplicação de etiquetas UHF RFID que é de 860 a 960 MHz foi definida a frequência de ressonância f_0 de 915 MHz e conseqüentemente o comprimento de onda de $\lambda_0 = 327,64\text{mm}$.

- Espessura do substrato: dentre as espessuras disponíveis a escolhida foi a mais espessa $T_s = 6\text{ mm}$ pela menor possibilidade de não ocorrência de inversão de fase da onda eletromagnética.

A partir das definições de $T_s = 6\text{ mm}$ e $\lambda_0 = 327,64\text{ mm}$, adotando as equações (15 a 28) foram encontradas, como uma primeira aproximação:

- dimensões W_s e L_s do substrato;
- dimensão W e L do material laminado do elemento irradiante;
- dimensão da fenda L_f relacionada a reentrância denominada como fenda 1.

A dimensão W_f da fenda 1 foi definida sem cálculo levando em consideração a dimensão para conexão do CI.

ETAPA 2:

Primeiramente foi feito o desenho da geometria da antena no *software* HFSS com os valores iniciais calculados juntamente com a indicação das características dos materiais referente a cada uma das suas partes.

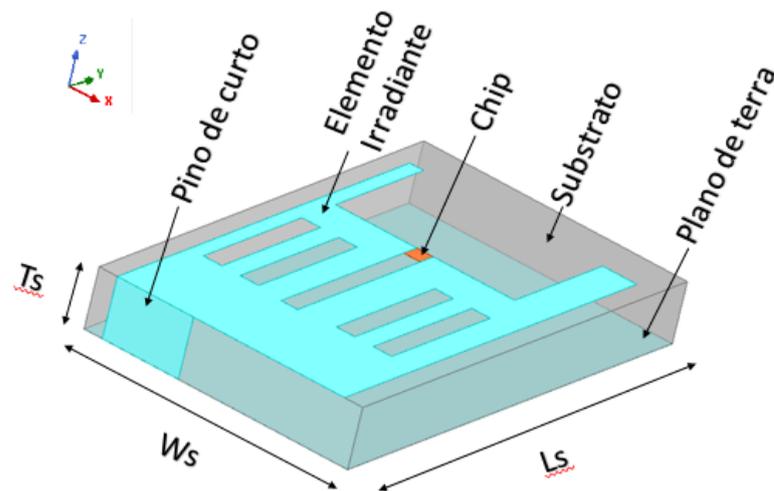
A alimentação da antena foi feita através de uma excitação com os mesmos valores de impedância do CI.

Para o encontro de um melhor casamento de impedância as análises paramétricas e otimizações do *software*, descritas detalhadamente no item 6.3, foram utilizadas para o encontro dos valores ótimos. As dimensões simuladas foram: dimensão da conexão de curto

W_s , dimensão da fenda 2 indicada por “a” e “b” e dimensões das fendas duplas constantes na Figura 17.

A partir do encontro das dimensões a Figura 16 mostra a composição da etiqueta dividida em 3 partes: um plano de terra ocupando toda a parte inferior da etiqueta conectado lateralmente por um pino de curto ao elemento irradiante que fica na parte superior da etiqueta, existindo ainda um substrato entre o plano de terra e o elemento irradiante e um CI inserido na fenda 1.

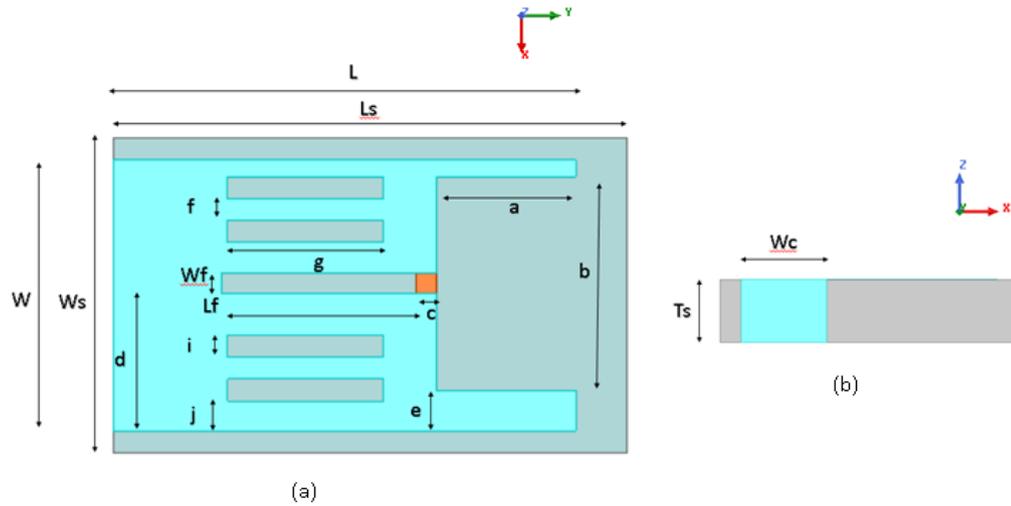
Figura 16 – Etiqueta desenvolvida para objetos metálicos



Fonte: (Ferreira, 2020)

A etiqueta projetada apresentou como dimensão final $46,1 \times 28,58 \times 6 \text{ mm}^3$ ($L_s \times W_s \times T_s$). A Figura 17 mostra os detalhes da etiqueta e a Tabela 12 indica os valores encontrados para cada variável.

Figura 17 – Dimensões da etiqueta desenvolvida (a) Vista frontal e (b) Vista lateral



Fonte: (Ferreira, 2017)

Tabela 12 – Dimensões dos parâmetros relevantes da etiqueta

Parâmetro	Valor (mm)	Descrição
L_g	46,1	Comprimento do Plano de terra
L_s	46,1	Comprimento do Substrato
W_g	28,58	Largura do Plano de terra
W_s	28,58	Largura do Substrato
T_s	6	Espessura do Substrato
L	41,35	Comprimento do Elemento Irradiante
W	24,62	Largura do Elemento Irradiante
L_f	19,27	Comprimento da Fenda
W_f	1,8	Largura da Fenda/Reentrância
W_c	8,25	Largura da conexão entre Elemento Irradiante e Plano de terra
a	12,5	Comprimento da Fenda
b	19,42	Largura da Fenda
c	1,87	Comprimento da conexão do CI
d	12,51	Dimensão de assimetria da Fenda
e	3,7	Comprimento do terminal inferior
f	2	Distância entre as fendas duplas
g	14	Comprimento da Fenda
i	2	Largura da Fenda
j	2,7	Dimensão de Assimetria

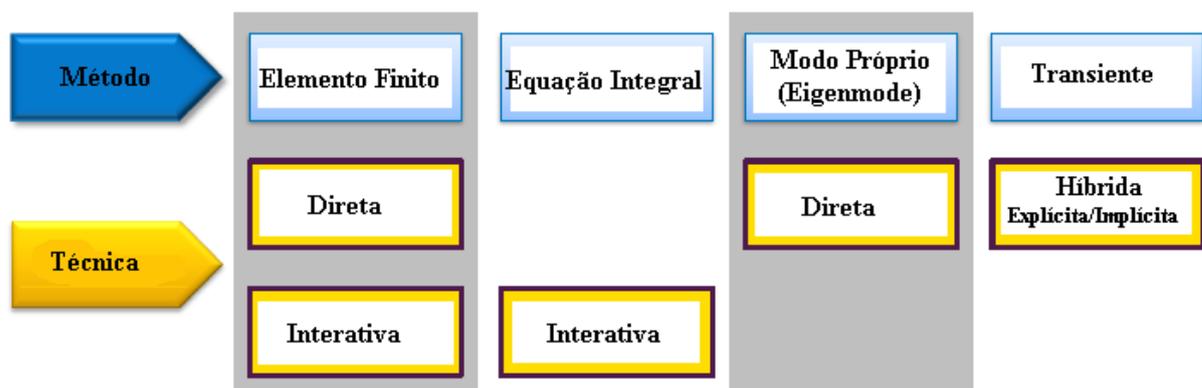
Fonte: (Ferreira, 2017)

6.3. SIMULAÇÕES

Todas as simulações foram feitas utilizando o *software* comercial HFSS® que é um programa desenvolvido pela Ansys® para a simulação de campos eletromagnéticos em estruturas em geral (ANSYS, 1990).

Conforme mostra a Figura 18 o *software* dispõe de vários solucionadores e módulos para calcular o comportamento elétrico de componentes em altas frequências, tais como antenas, dispositivos sem fio, celulares, filtros, etc., e altas velocidades, como, por exemplo, circuitos integrados, placas de circuitos impressos e conectores.

Figura 18 – Solucionadores e opções do software HFSS



Fonte: Elaborado pelo autor

O método escolhido para as simulações foi o Método de elementos finitos (*Finite Element Method* - FEM) que é o principal e mais tradicional no HFSS. Nas simulações iniciais foi escolhida a técnica Interativa, pois fornece simulações com menor velocidade e nas simulações finais foi selecionada a opção Direta que é mais exata, porém mais demorada no ponto de vista computacional.

O tipo de solução escolhida define o tipo de resultado, como as excitações são definidas e a convergência. A solução escolhida foi a *Driven Modal* que é mais adequada para o cálculo dos parâmetros de espalhamento em estruturas passivas de alta frequência. A

condição de contorno escolhida foi à excitação através de *Lumped Ports* que é definida para excitações que estão presentes internamente na estrutura sendo um pulso gaussiano senoidal modulado no domínio do tempo, cuja simulação é terminada quando a excitação do sinal é desprezível (acaba). Com base na observação da convergência sobre o final do pulso gaussiano, diversas quantidades de períodos foram testadas e então foi definido que o número de 6 períodos iria atender a convergência e ainda sobriam uns instantes de tempo como margem de segurança.

No software o modelo geométrico é automaticamente dividido em um grande número de tetraedros, onde um único tetraedro é uma pirâmide. Esta coleção de tetraedros é referida como malha de elementos finitos. É possível refinar a malha, ou seja, diminuir o tamanho dos tetraedros e, conseqüentemente, aumentar a quantidade deles, a fim de obter uma maior precisão nos resultados. O HFSS trabalha com malha adaptativa que é o método empregado para que a malha mais eficiente seja utilizada para resolução. Este método refina a malha nos locais onde a variação de campo elétrico é maior.

O software HFSS não possui a equação do alcance incluída não permitindo assim o cálculo direto. Para que o *software* calculasse o alcance de leitura foi necessária a implementação da equação do alcance de leitura (10) e do coeficiente de transmissão (11), a partir daí as simulações foram realizadas no domínio do tempo na frequência de 915 MHz. Todas as análises paramétricas/otimizações foram feitas em função de um melhor alcance de leitura e em todas as simulações foi constatada a condição de convergência da simulação.

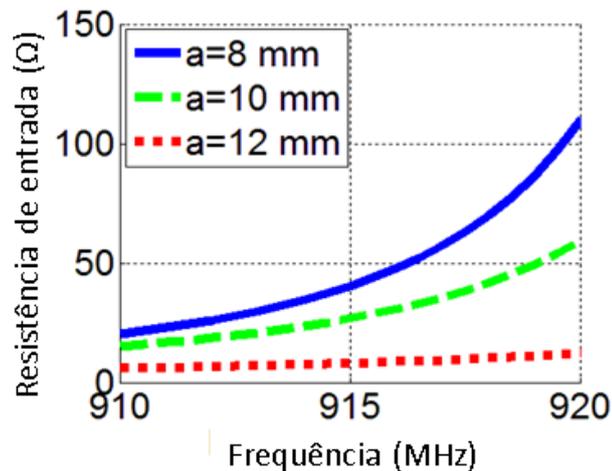
A etiqueta foi simulada com uma base metálica de alumínio situada no centro da mesma, com dimensões de 130×130 mm e espessura de 3 mm. Foram utilizados os valores de potência isotrópica radiada equivalente $P_t G_t = 4$ W EIRP e sensibilidade de leitura do CI $P_{th} = -18$ dBm.

Abaixo constam as simulações para o encontro das variáveis indicadas no item 6.2. Inicialmente foram feitas as simulações para o encontro das dimensões da fenda 2 indicadas por “a” e “b” em busca do melhor casamento de impedância.

Os valores de “a” e “b” foram calculados em busca de valores mais próximos ao casamento de impedância. As Figuras 21 a 26 mostram o resultado da resistência de entrada e da reatância de entrada para diferentes valores de “a” e “b” na faixa de frequência de 910 MHz e 920 MHz. As primeiras simulações de parametrização foram realizadas com poucas variações de “a” e “b” para chegar ao encontro de uma faixa de valores mais próxima aos valores do complexo conjugado do CI que é $Z_c = 27,43 - j 200,98 \Omega$, para desta forma proceder com a simulação de otimização.

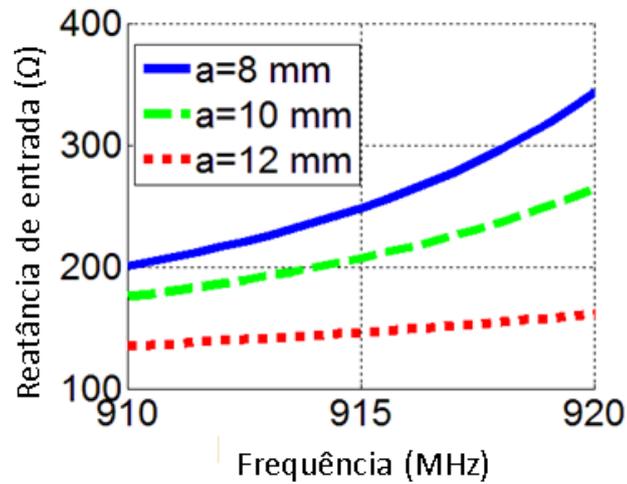
As Figuras 19 e 20 mostram a resistência de entrada e a reatância de entrada para diferentes valores da dimensão “a”.

Figura 19 – Resistência de entrada (R_a) da antena para diferentes valores da dimensão “a”



Fonte: Elaborado pelo autor

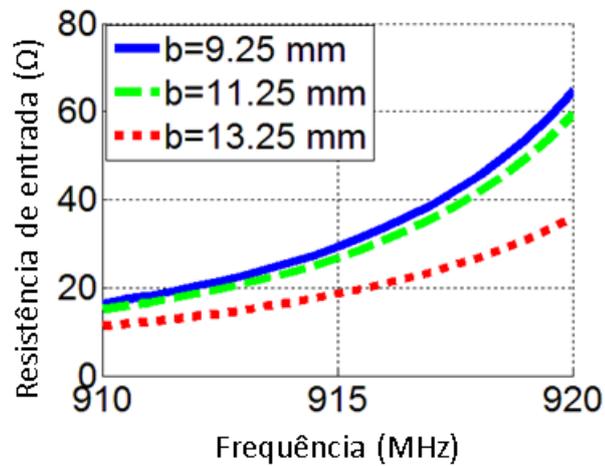
Figura 20 – Reatância de entrada da antena (X_a) para diferentes valores da dimensão “a”



Fonte: Elaborado pelo autor

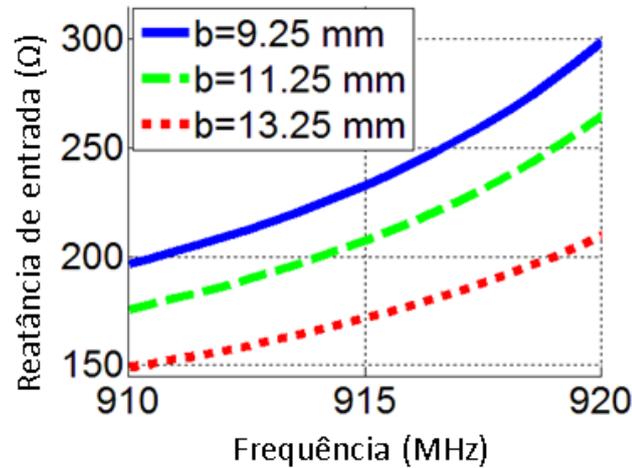
A Figuras 21 e 22 mostram a resistência de entrada e a reatância de entrada encontrados para diferentes valores da dimensão “b”.

Figura 21 – Resistência de entrada (R_a) da antena para diferentes valores da dimensão “b”



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 22 – Reatância de entrada da antena (X_a) para diferentes valores da dimensão “b”



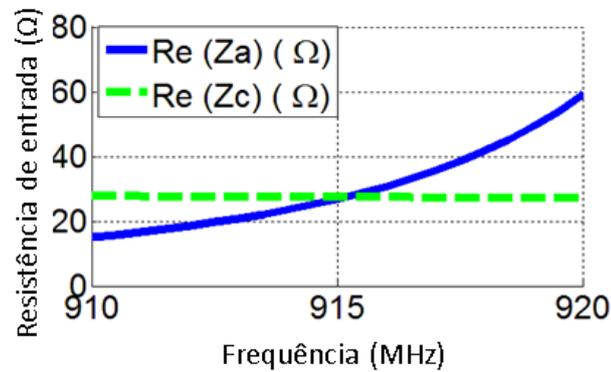
Fonte: Elaborado pelo autor

A análise paramétrica indicou valores próximos para o alcance da impedância desejada, sendo iniciada a análise de otimização indicando uma faixa de frequência próxima as já utilizadas na análise paramétrica. Valores de “a” de 10 a 16 e valores de “b” de 17 a 23.

O resultado da otimização para $a = 12$ mm e $b = 19$ mm indica valores próximos à impedância desejada, desta forma foram utilizadas as fendas duplas na tentativa de melhorar o casamento de impedância.

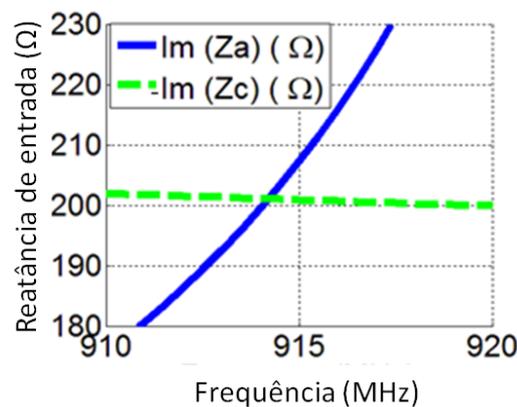
Após a realização de novas otimizações utilizando as fendas duplas e alterações no valor de W_s foram encontradas as dimensões finais indicadas na Tabela 12. A impedância de entrada complexa da antena em torno da frequência de 915 MHz é de aproximadamente $Z_a = 28 + j 202 \Omega$ conforme indicado nas Figuras 23 e 24.

Figura 23 – Resistência de entrada da antena $Re(Z_a)$ × Resistência de entrada do CI $Re(Z_c)$



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 24 – Reatância de entrada da antena $Im(Z_a)$ × Reatância de entrada do CI $Im(Z_c)$



Fonte: Elaborado pelo autor

Após o alcance das dimensões finais foi simulado o alcance de leitura e o mesmo apresentou um valor em torno de 22 m.

Como os resultados experimentais apresentaram discrepância com relação às simulações indicando um alcance de leitura em torno de 7 metros houve a necessidade de caracterização do material PET-G.

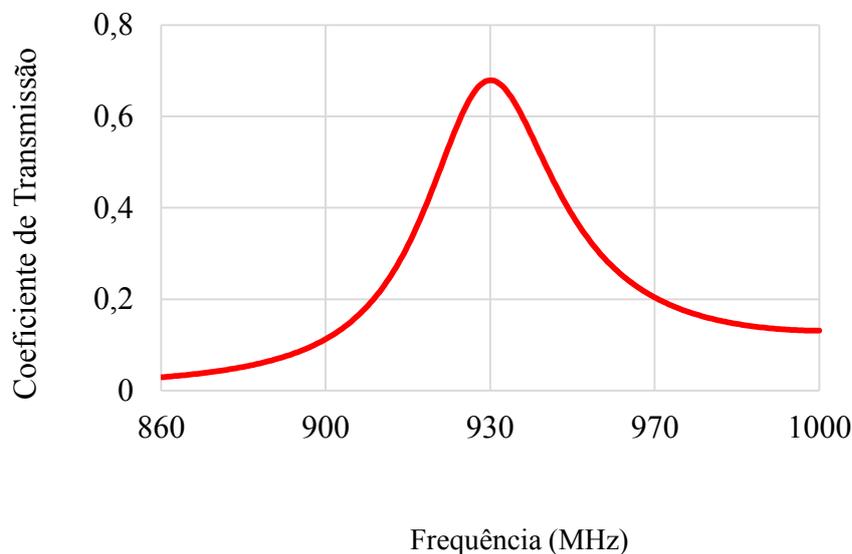
A caracterização feita no Laboratório da Unicamp mostrou que o material PET-G possuía um tangente de perdas mais alta $\tan\delta = 0,0208$ devido à adição do Glicol. O PET original (sem impurezas) indicava na bibliografia uma tangente de perdas menor $\tan\delta = 0,002$.

Após a alteração da tangente de perdas para $\tan\delta = 0,0208$ as simulações foram refeitas e o resultado apresentou o pico do alcance de leitura em uma frequência um pouco deslocada em relação ao projeto original, então, se deu início aos processos de parametrização e otimização disponíveis no *software*. Desta forma, ajustes finos referentes aos valores das dimensões para um melhor desempenho foram atingidos, bem como um máximo alcance de leitura.

Apesar do PET-G utilizado neste projeto não ter as mesmas propriedades do PET puro utilizado nas simulações iniciais, foi verificada uma resposta aceitável em relação ao alcance de leitura.

A Figura 25 mostra o coeficiente de transmissão de potência simulado que foi de aproximadamente 0,7, onde “1” representa a máxima transferência de potência.

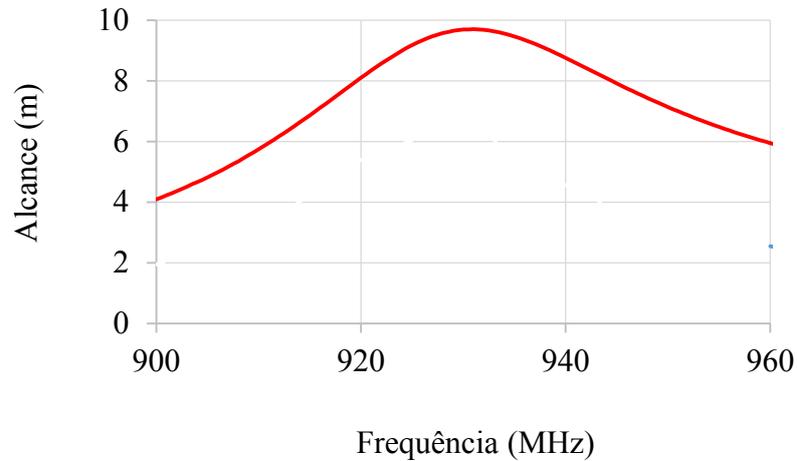
Figura 25 – Coeficiente de transmissão de potência simulado



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 26 mostra o alcance de leitura da etiqueta simulado alcançando aproximadamente 10 m.

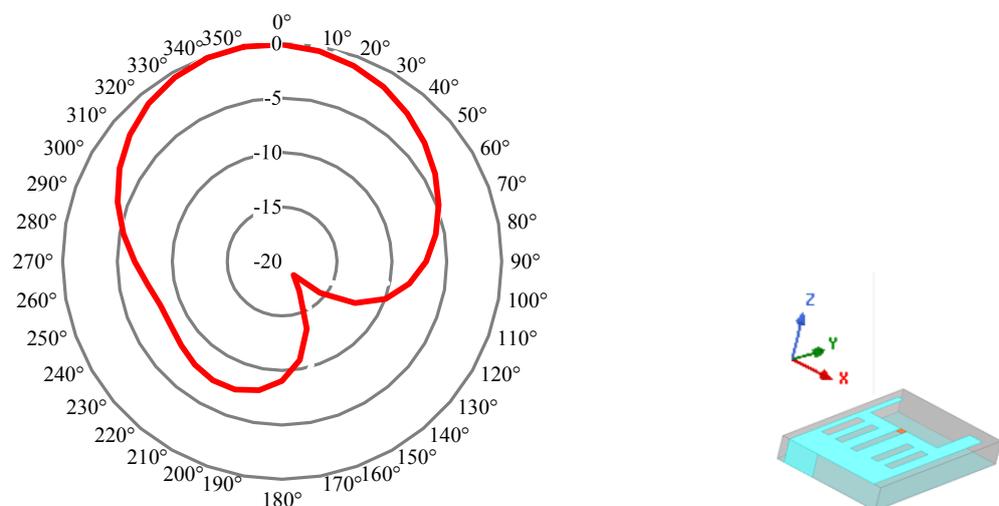
Figura 26 – Alcance de leitura simulado



Fonte: Elaborado pelo autor

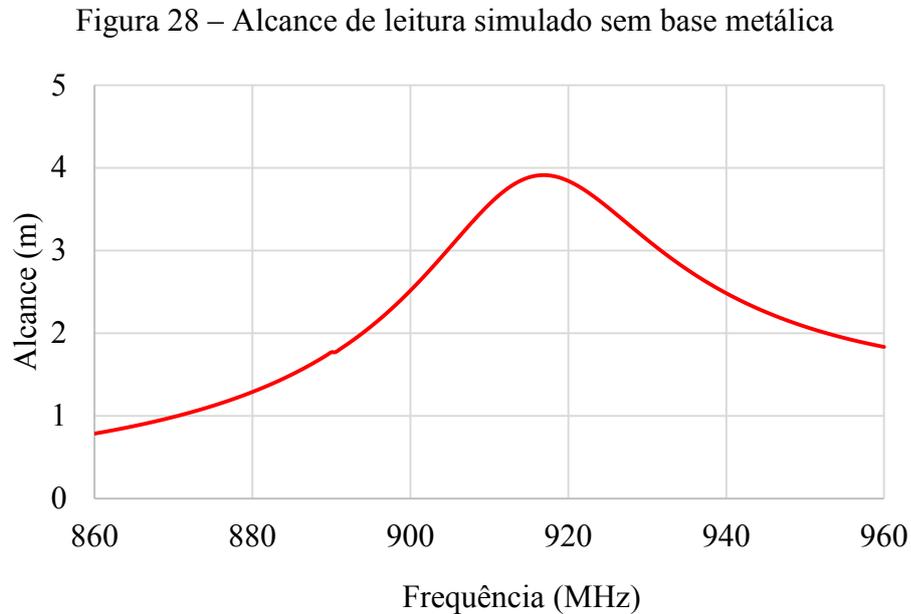
A Figura 27 mostra o diagrama 2D (plano zy) do resultado simulado de ganho de potência da etiqueta proposta com utilização da base metálica. O ganho indicado no diagrama se refere ao ganho total e foi normalizado em 0 dB. Observa-se um diagrama em formato polar em que o máximo da irradiação no campo distante ocorre na direção perpendicular ao elemento irradiante (direção z). O ganho de pico simulado de 0,63 dBi.

Figura 27 – Ganho de potência simulado, normalizado em 0 dB (plano z-y)



Fonte: Elaborado pelo autor

Para verificar o comportamento da etiqueta em objetos não metálicos, também foram feitas simulações do alcance de leitura sem a adição da base metálica conforme consta na Figura 28.



Fonte: Elaborado pelo autor

6.4. PROTÓTIPO

Com respeito à construção da etiqueta indicada na Figura 29, uma placa do substrato PET-G com espessura de 3 mm foi utilizada. Para alcançar a espessura de 6 mm foi necessário o recorte a laser de duas partes iguais e a conexão das mesmas. A conexão das placas foi feita utilizando o material etil-cianoacrilato tendo espessura aproximada de 0,005 mm.

O laminado correspondente ao material do elemento irradiante, curto-circuito e plano de terra foi recortado com uma cortadora *plotter* de alta precisão. A conexão do laminado com o substrato também foi feita utilizando o material etil-cianoacrilato tendo também a espessura aproximada de 0,005 mm.

A conexão do CI na fenda do laminado foi feita utilizando adesivo ACA, sendo que para a fusão foram utilizadas as instruções fornecidas pelo fabricante (DELO, 2015) colocando sob o CI um peso de 2 N ficando durante 8 s em uma estufa com temperatura de 150°C.

Figura 29 – Protótipo da etiqueta



Fonte: (Ferreira, 2017)

6.5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Antes da realização dos testes da etiqueta em câmara anecóica foi utilizado o mini leitor da Identix para verificação da correta conexão e consequente ativação do CI. O leitor portátil da Figura 30 identifica o CI somente a curtas distâncias, ele funciona juntamente com o *software* da IMPINJ que além de outras funções mostra o código EPC do CI.

Figura 30 – Medida realizada com leitor portátil



Fonte: Elaborado pelo autor

Após a constatação da ativação do CI foram feitas as medições com o kit Intermecc da Voyantic que é composto por um leitor e antenas externas conforme mostram as Figuras 31 e 32 respectivamente.

Figura 31 – Leitor Intermecc



Fonte: Elaborado pelo autor

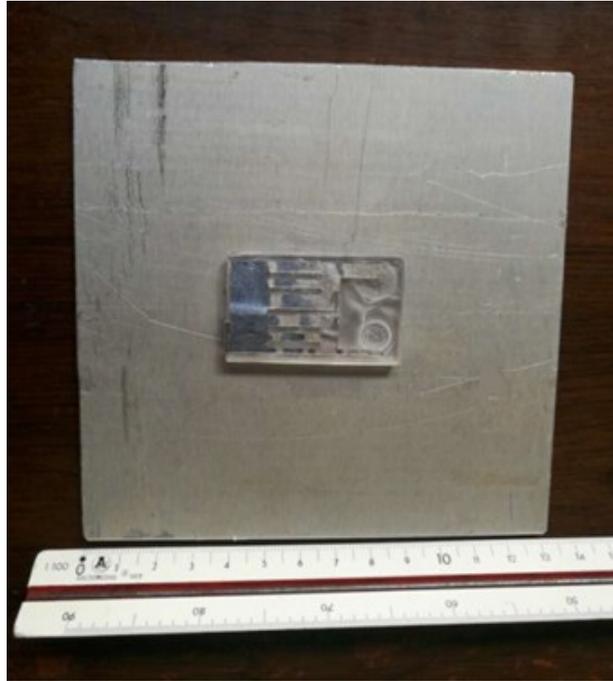
Figura 32 – Antenas modelo MK 7.0 do kit Intermecc



Fonte: Elaborado pelo autor

Para a realização dos testes a etiqueta foi conectada a uma base metálica de alumínio com 130×130 mm conforme indicado na Figura 33.

Figura 33 – Etiqueta com base metálica de 130×130 mm



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados experimentais em ambiente não controlado demonstraram um alcance de leitura de aproximadamente 7 m. Com o intuito de realizar uma medida mais precisa foi necessária a medição em ambiente controlado utilizando uma câmara anecóica da Voyantic. A câmara é projetada para conter reflexões, tanto de ondas sonoras quanto eletromagnéticas e possui em seu interior uma etiqueta com polarização linear horizontal, conforme Figura 34.

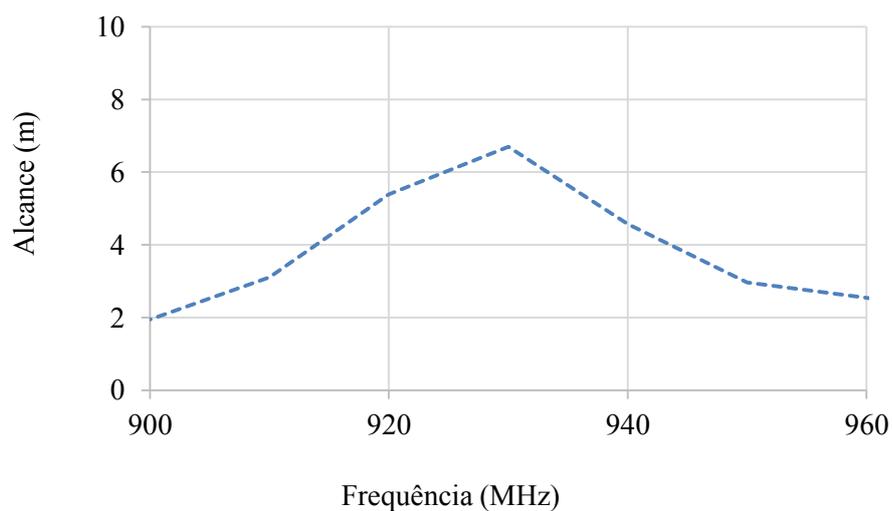
Figura 34 – Câmara anecóica utilizada nas medições



Fonte: Elaborado pelo autor

As medidas foram feitas no Laboratório da UNICAMP e conforme indicado na Figura 35, o alcance de leitura medido foi também de aproximadamente 7 m.

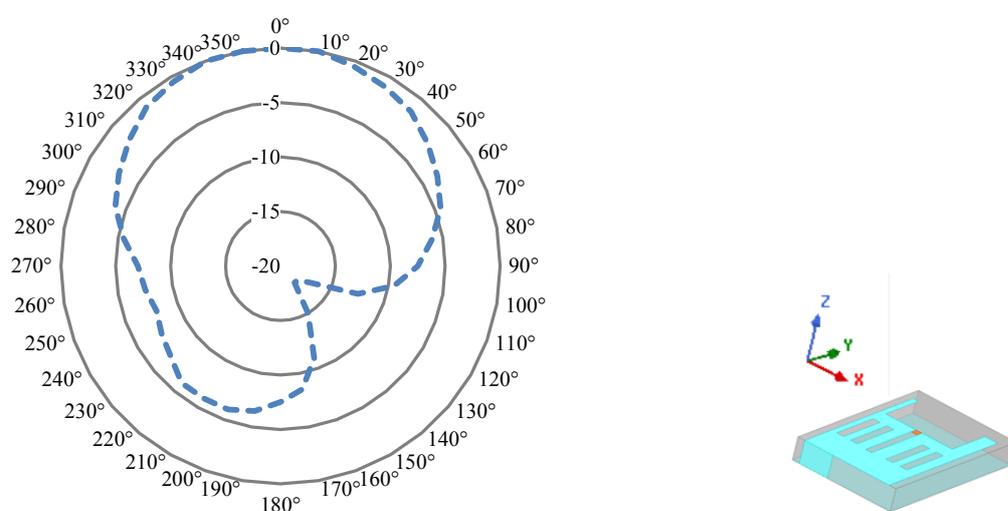
Figura 35 – Alcance de leitura medido com base metálica



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 36 mostra o diagrama 2D (plano zy) do resultado medido de ganho de potência da etiqueta proposta com a utilização da base metálica. O ganho indicado no diagrama se refere ao ganho total e foi normalizado em 0 dB. Observa-se um diagrama em formato polar em que o máximo da irradiação no campo distante ocorre na direção perpendicular ao elemento irradiante (direção z).

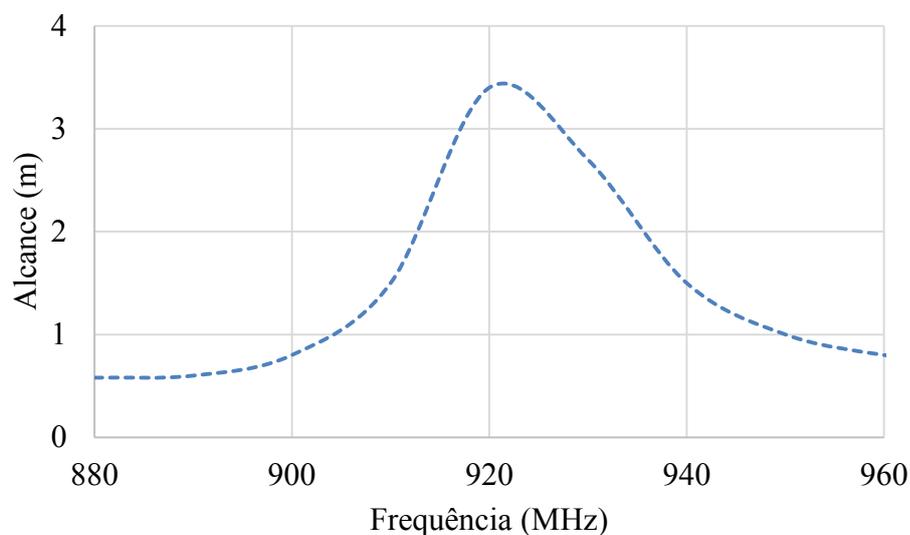
Figura 36 – Ganho de potência medido normalizado em dB = 0 (plano z-y)



Fonte: Elaborado pelo autor

Para verificar o comportamento da etiqueta em objetos não metálicos, também foram feitas medidas de alcance de leitura sem a adição da base metálica conforme consta na Figura 37.

Figura 37 – Alcance de leitura medido sem base metálica



Fonte: Elaborado pelo autor

6.6. ANÁLISE DE RESULTADOS

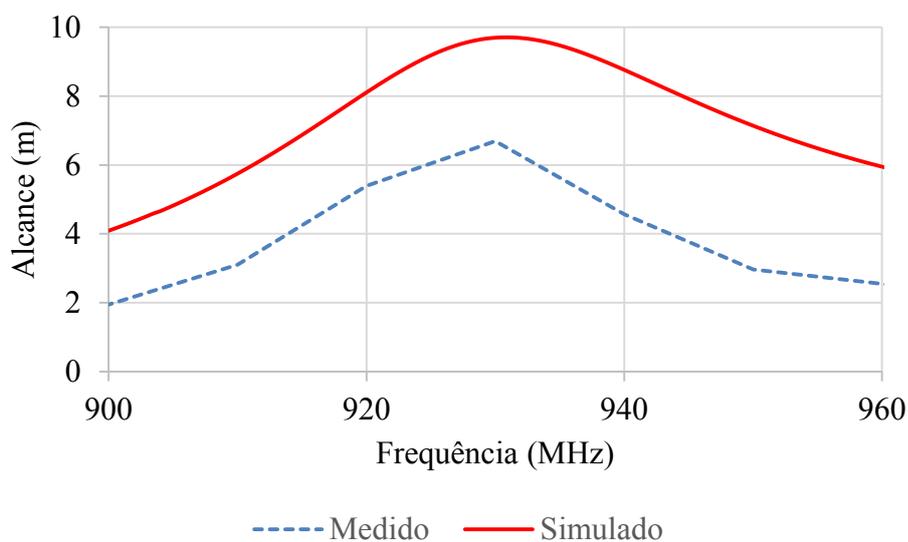
O resultado da Figura 38 mostra uma comparação entre os valores simulados e medidos da etiqueta projetada com inclusão da base metálica. É possível observar uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais. Observa-se também que houve um deslocamento na frequência para um valor superior à frequência central do projeto que foi de 915 MHz. Essa etiqueta apresentou um resultado medido em torno de 7 m, inferior ao simulado que apresentou 10 metros de alcance de leitura na frequência de 930 MHz.

Levando em consideração que os protótipos foram fabricados manualmente, uma grande variabilidade de resultados pode ser esperada. A diferença entre o resultado simulado e medido é provavelmente devido:

- a construção manual do protótipo;
- a conexão manual das duas placas do substrato PET-G de 3 mm para alcançar a espessura final de 6 mm;
- a conexão manual do CI;

- a não consideração nas simulações das características e espessura do material utilizado para unir (etil-cianoacrilato) as duas placas de PET-G e também a não consideração da referida cola para conectar o laminado no substrato.

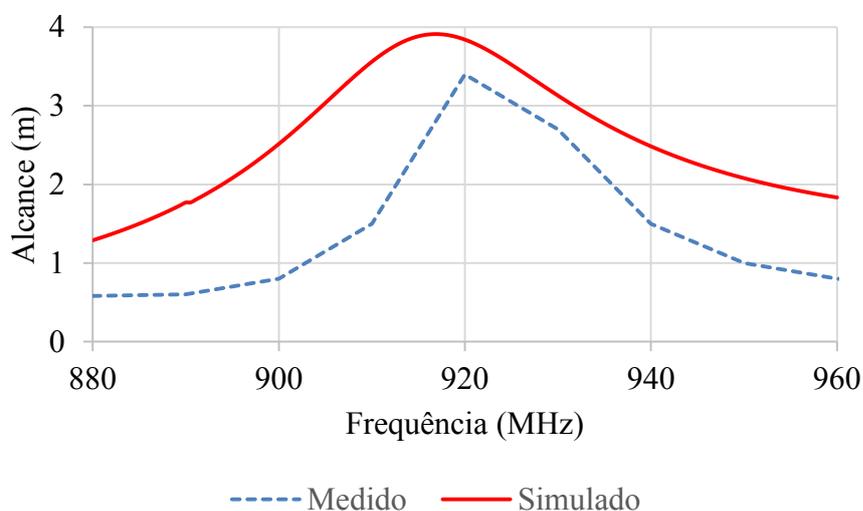
Figura 38 – Alcance de leitura simulado e medido com a base metálica



Fonte: (Ferreira, 2017)

Os resultados da Figura 39 sem a utilização de base metálica demonstram que a etiqueta também apresenta um bom funcionamento quando colocada em superfície não-metálica, porém com alcance de leitura menor.

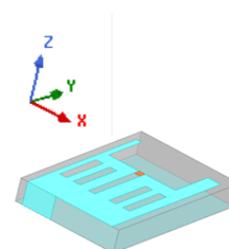
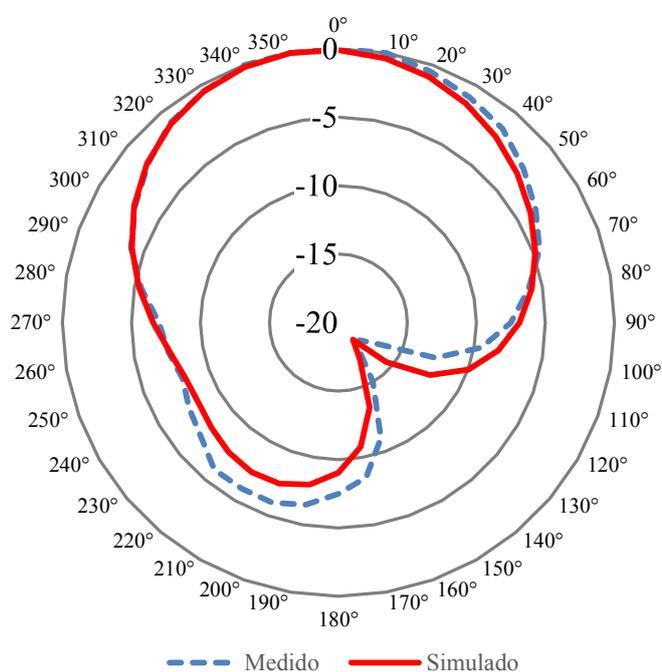
Figura 39 – Alcance de leitura simulado e medido sem a base metálica



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 40 mostra o diagrama 2D (plano zy) dos resultados simulados e medidos de ganho de potência da etiqueta proposta com a utilização da base metálica. Os ganhos indicados no diagrama se referem ao ganho total normalizado em 0 dB. Observa-se um diagrama em formato polar em que o máximo da irradiação no campo distante ocorre na direção perpendicular ao elemento irradiante (direção z) e os resultados apresentam boa concordância.

Figura 40 – Comparação entre o ganho de potência (plano z-y)



Fonte: Elaborado pelo autor

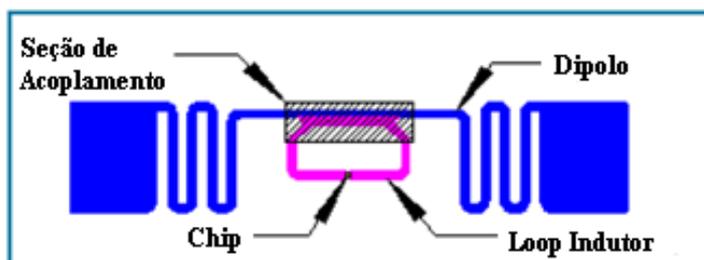
7. ETIQUETA PLANAR PASSIVA UHF RFID PARA SUPERFÍCIES NÃO METÁLICAS

Neste capítulo serão abordadas as características relevantes das etiquetas planares passivas UHF RFID para utilização em superfícies não metálicas. Após será feita a descrição da etiqueta projetada, a indicação de seus valores simulados e medidos e uma análise dos resultados.

7.1. CARACTERÍSTICAS DAS ETIQUETAS

A maioria das etiquetas planares passivas UHF RFID para utilização em superfícies não metálicas existentes no mercado são etiquetas que possuem dipolos em sua composição conhecidas como antenas com meandros. A Figura 41 mostra um modelo de uma tradicional etiqueta para objetos não metálicos contendo a descrição das partes que a compõem. Essas etiquetas são constituídas por quatro componentes principais: Seção de acoplamento, CI, Dipolo e Loop Indutor.

Figura 41 – Etiqueta para superfície não metálica (Modelo E62)



Fonte: (IMPINJ, 2017)

A seção de acoplamento transfere energia entre o dipolo e o loop do indutor. Esta seção conecta o dipolo e o circuito do indutor indutivamente, semelhante ao acoplamento entre os núcleos em um transformador, ou seja, o dipolo induz corrente na outra região. Isso permite que a energia coletada em longas distâncias usando a antena dipolo seja entregue ao

CI da etiqueta. O circuito do indutor e o dipolo podem ser separados para reduzir o acoplamento ou podem ser aproximados para aumentar o acoplamento.

O loop indutor também conhecido como loop de alimentação ressoa com a capacitância do CI da etiqueta e fornece energia ao CI. As duas funções principais do loop indutor são: estar casado com a capacitância do CI e fornecer a energia acoplada do dipolo ao CI.

A antena dipolo é o componente físico que permite comunicação à longa distância entre o leitor e a etiqueta. Como mostrado na Figura 34 ela possui dois braços radiantes que se estendem em direção oposta à fonte (distante, porém se mantendo no mesmo eixo). O comprimento e a espessura do braço do dipolo determinam as principais características da etiqueta. O dipolo comumente usado para esse tipo de antena é o dipolo de meia onda.

O comprimento elétrico de um dipolo de meia onda se aproxima $\frac{1}{2}\lambda$ (meio comprimento de onda) na frequência de interesse. O dipolo irradia muito eficientemente em $\frac{1}{2}\lambda$. Entretanto, o valor da impedância do dipolo na ressonância está longe de ser a ideal para garantir um bom casamento de impedância entre antena e CI. Além disso, o comprimento físico (aproximadamente 15 cm a 900 MHz para um dipolo de meia onda) geralmente é muito grande para utilização na maioria das aplicações RFID.

Algumas considerações se fazem relevantes com relação ao tamanho da etiqueta. Normalmente, o tamanho da etiqueta é especificado no início do projeto pelo fato das etiquetas possuírem um tamanho predefinido adequado para a inclusão no objeto da aplicação. Portanto, a etiqueta deve ser otimizada dentro de restrições de tamanho do rótulo. Para rótulos menores, o dipolo pode precisar usar técnicas de miniaturização, como meandros, para atender ao requisito de desempenho.

Considerações com relação ao dipolo com meandros também se faz necessária. Tipicamente, devido às propriedades dielétricas do material, a ressonância do dipolo com

meandros é mais afetada do que a ressonância do loop indutor. O comprimento da antena deve ser projetado de tal forma que a ressonância do dipolo com meandros esteja na frequência desejada para os materiais utilizados. Dipolo com meandros mais largos reduzem a perda ôhmica, mas a área do loop deve crescer para compensar a indutância reduzida.

Da mesma forma que acontece no dipolo com meandros, no loop indutor uma largura maior do meandro também minimizará a perda, mas exigirá um comprimento maior para atingir a mesma frequência de ressonância. Por outro lado, se o material tiver propriedades dielétricas baixas, talvez seja necessário reduzir a largura do meandro.

Uma vez que o loop indutor e o dipolo são acoplados, a frequência de ressonância do loop indutor e do dipolo mudará e precisará de reajuste (IMPINJ, 2017). Etiquetas acopladas onde o loop indutor e o dipolo estão sobrepostos, aumentarão a eficiência na transferência de energia, podendo levar a uma etiqueta de banda mais estreita. Se a frequência de ressonância do circuito for muito baixa, deverá ser diminuído o loop indutor e vice-versa. Da mesma forma, se a frequência de ressonância do dipolo for muito baixa, devem ser reduzidos os meandros ou tornar o meandro mais espesso e vice-versa.

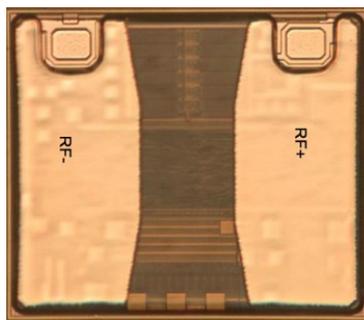
O desempenho normalmente está relacionado com o alcance mínimo de leitura ou distância operacional. Os requisitos de desempenho descrevem o quão bem a etiqueta deve funcionar nos objetos para uma determinada aplicação. O dipolo da antena, o loop do indutor e o acoplamento devem ser otimizados para atender a esses requisitos de desempenho.

7.2. DESCRIÇÃO DA ETIQUETA DESENVOLVIDA

O tipo escolhido de antena para desenvolvimento da etiqueta planar UHF RFID para superfícies não metálicas foi à antena com meandros.

O CI utilizado foi o modelo Monza R6 (IMPINJ, 2012) com sensibilidade de leitura $P_{th} = -20$ dBm conforme indicado na Figura 42.

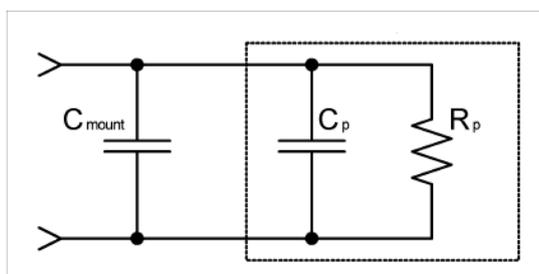
Figura 42 – Circuito integrado modelo Monza R6



Fonte: (IMPINJ, 2012)

O CI possui dimensões $464,1 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ ($W \times L$), faixa de frequência de operação de 860 MHz a 960 MHz, resistência paralela de entrada equivalente $R_p = 1200 \Omega$, capacitância total = 1,44 pF (Capacitância equivalente paralela $C_p = 1,23 \text{ pF}$ + Capacitância parasita $C_{mount} = 0,21 \text{ pF}$) e sensibilidade de leitura $P_{th} = -20 \text{ dBm}$. A impedância complexa do CI é calculada através do modelo de circuito indicado na Figura 43. Para a frequência de 915 MHz a impedância do CI calculada foi de $Z_c = 12,03 - j 119,58 \Omega$.

Figura 43 – Modelo circuital simplificado da impedância complexa do CI Monza R6



Fonte: (IMPINJ, 2012)

O adesivo escolhido foi o ACA e o substrato utilizado foi o PET filme com permissividade relativa $\epsilon_r = 3$, espessura de $50 \mu\text{m}$ e tangente de perdas $\tan \delta = 0,002$. O processo de fabricação disponível para esse tipo de etiqueta foi o processo *Thermal Transfer* cujas vantagens estão indicadas no Capítulo 4 e a geometria escolhida da antena foi através de dipolos com meandros.

O processo para encontro das dimensões utilizado no projeto será descrito em três etapas que analisam os componentes individuais da etiqueta e como eles interagem uns com os outros.

ETAPA 1:

A primeira definição foi em relação à largura do loop indutor, para isso a dimensão do CI a ser conectado no loop indutor foi levado em consideração, devido a esta necessidade de conexão foi feita a reserva de uma largura mínima.

ETAPA 2:

Como o formato do loop do indutor pode assumir praticamente qualquer forma, desde que complete um loop e mantenha o casamento de impedância com o CI que será inserido, o loop indutor foi projetado utilizando análises paramétricas e de otimização disponíveis no *software* HFSS considerando as variáveis relacionadas.

O loop do indutor tem três variáveis: a largura do traço, a área do laço e o comprimento do traço, como regra se utiliza uma largura de traço maior para minimizar a perda ôhmica, portanto nas primeiras análises foram utilizadas dimensões maiores nas variações simuladas.

Foram verificadas algumas tendências relacionadas às simulações referentes à largura do traço e a forma do loop. Foi percebido que traços mais largos reduzem a perda ôhmica, mas a área do loop tinha que crescer para compensar a indutância reduzida.

A segunda percepção foi com relação à área do loop e a forma, foi visto que se a forma estivesse mais próxima do formato circular ou quadrado, a área necessária para obter a mesma indutância tinha que ser menor do que se a forma fosse longa e estreita. Portanto, para uma forma de etiqueta longa e estreita, uma forma de loop circular ou quadrado não será adequado.

ETAPA 3:

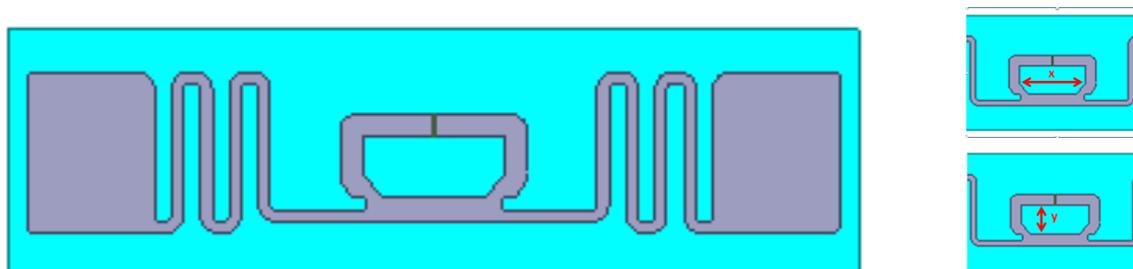
O dipolo foi projetado atendendo a característica de comprimento de onda, onde foram realizadas simulações de análise paramétrica e otimização para um maior alcance, alterando também as variáveis: largura do traço, comprimento do dipolo e distância entre os dipolos.

A frequência utilizada inicialmente foi um pouco menor que a frequência desejada, em torno de 890 MHz, devido ao fato que a frequência de ressonância aumenta com a conexão do loop indutor no dipolo.

7.3. SIMULAÇÕES, PROTÓTIPOS, RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

As simulações da etiqueta UHF RFID foram realizadas utilizando o *software* comercial Ansys HFSS, o CI utilizado foi o Monza R6, a frequência de operação foi de 915 MHz e a EIRP foi de 4 W. Primeiramente foi feito o desenho inicial da geometria da etiqueta indicado na Figura 44 incluindo as propriedades dielétricas do material. A etiqueta foi alimentada com mesmos valores de impedância do CI.

Figura 44 – Alterações no Loop Indutor da etiqueta desenvolvida para superfície não metálica



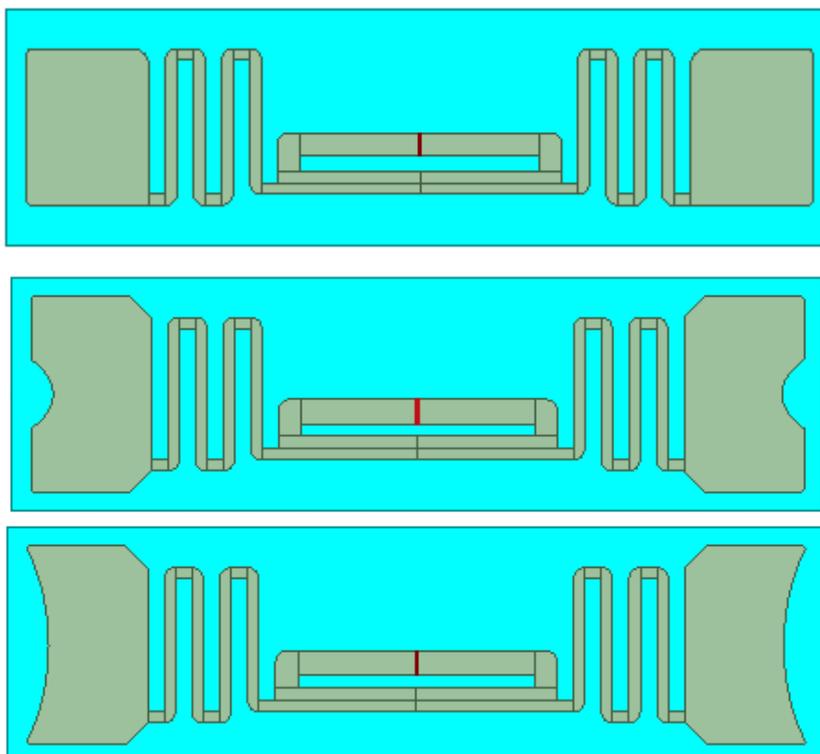
Fonte: Elaborado pelo autor

As análises paramétricas do loop indutor foram feitas utilizando:

- valores entre 1,2 mm e 4 mm para a espessura do traço;
- valores entre 0,4 mm a 22 mm para dimensão x;
- valores entre 12 mm e 17 mm para a dimensão y.

As simulações com os melhores resultados indicaram um loop mais largo conforme Figura 45. Após foram feitas alterações nas extremidades da etiqueta alterando o formado de quadrado para curvilíneo. As simulações mostraram melhores resultados com relação ao alcance de leitura para a terminação curvilínea.

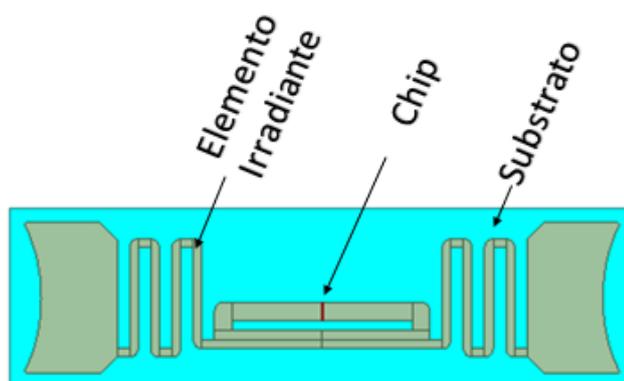
Figura 45 – Alterações nas extremidades da etiqueta desenvolvida



Fonte: Elaborado pelo autor

A Fig. 46 mostra a etiqueta projetada para utilização em superfície não metálica com dimensões $70 \times 14 \times 0,05 \text{ mm}^3$ ($L \times W \times H$). As partes metálicas em alumínio pelo processo de Transferência Térmica apresentam condutividade $\sigma = 38 \times 10^6 \text{ S/m}$ e espessura $T = 5 \text{ }\mu\text{m}$.

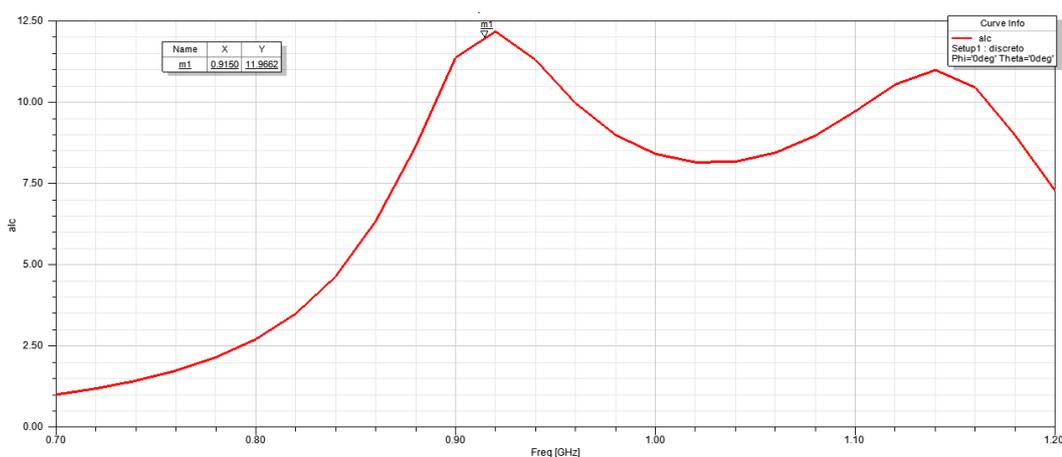
Figura 46 – Etiqueta desenvolvida para superfície não metálica



Fonte: (Ferreira, 2020)

Conforme Figura 47 a simulação mostrou um alcance de leitura em torno de 12 metros em 915 MHz. A impedância da antena apresentou para a frequência de 915 MHz $Z_a = 11,65 + j 117,69 \Omega$.

Figura 47 – Alcance de leitura simulado



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 48 mostra o protótipo desenvolvido pelo método de Transferência Térmica.

Figura 48 – Protótipo da etiqueta desenvolvida para objetos não metálicos

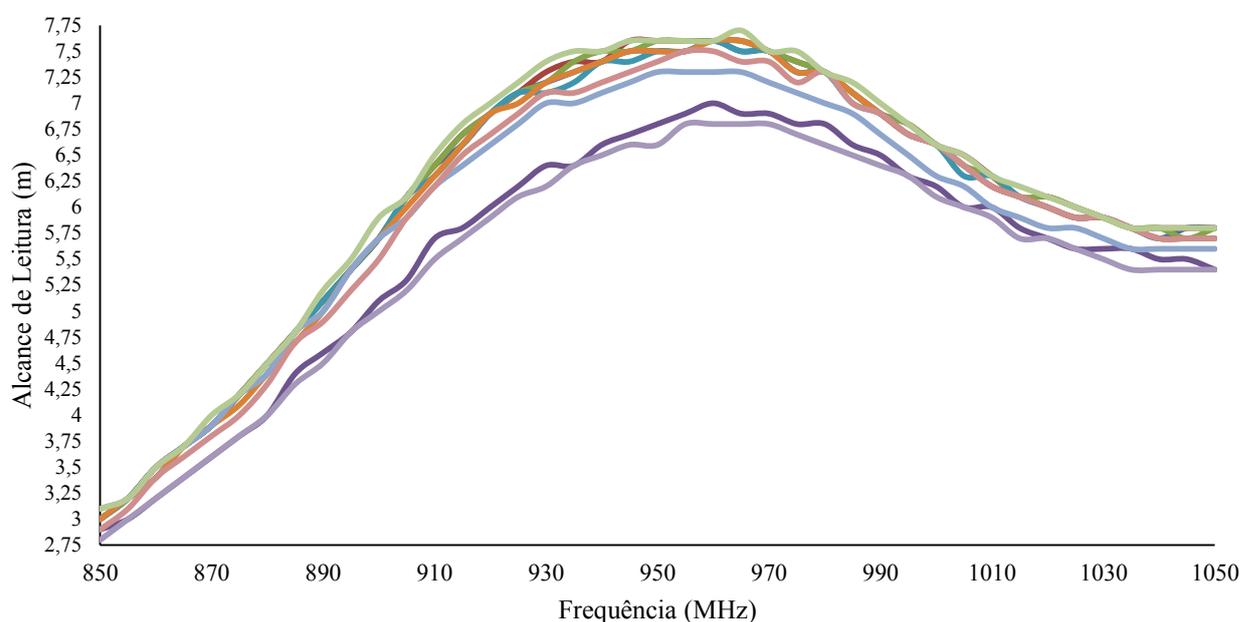


Fonte: Elaborado pelo autor

No Laboratório do CEITEC foram feitas medidas em ambiente controlado utilizando a câmara anecóica da Voyantic, conforme indicado na Figura 30, o alcance de leitura medido foi de aproximadamente 8 m.

Para as medidas foram confeccionados 10 protótipos para considerar uma correta reprodutibilidade. A Figura 49 mostra que na faixa de interesse de 915 MHz os valores do alcance de leitura ficaram entre 6 e 7 m.

Figura 49 – Alcance de leitura medido em 10 protótipos



Fonte: Elaborado pelo autor

O alcance de leitura simulado ficou em torno de 12 metros na frequência de 915 MHz. Os valores de alcance de leitura medidos nos 10 protótipos ficaram em torno 6 e 7 metros na frequência de 915 MHz com um pico de aproximadamente 8 metros em frequências próximas.

As medidas mostraram que houve uma variação de aproximadamente 1 metro de diferença no resultado do alcance de leitura dos 10 protótipos analisados, isso mostra que para

etiquetas idênticas as variações apenas na conexão do CI, mesmo sendo feitas em equipamentos industrializados, geram alterações significativas no resultado.

As possíveis diferenças entre os resultados simulados e medidos podem estar relacionadas com variações na pressão da impressora utilizada no processo de Transferência Térmica que não fornece a mesma espessura metálica indicada na simulação.

8. APLICAÇÃO DA FIGURA DE MÉRITO PROPOSTA

Para análise da nova FoM_{JB} foram utilizados os valores de alcance de leitura medidos das duas etiquetas desenvolvidas e também foram utilizados os valores de alcance de leitura medidos indicados nos dados das etiquetas existentes na bibliografia.

Na Tabela 13 foi feito um levantamento na literatura de etiquetas passivas UHF RFID para objetos metálicos e na Tabela 14 foi feito um levantamento na literatura de etiquetas passivas UHF RFID para objetos não metálicos.

As etiquetas pesquisadas irão servir de comparação com as etiquetas desenvolvidas neste trabalho. Algumas etiquetas não fornecem em seus trabalhos todas as informações necessárias para a inclusão no cálculo, bem como alguns materiais indicados não são conhecidos comercialmente, se tornando impossível a realização de orçamento para verificação do custo dos mesmos.

Portanto, as etiquetas utilizadas no cálculo da FoM_{JB} foram aquelas onde foi possível utilizar informações disponíveis para uma avaliação concreta levando em consideração também a confiabilidade das informações.

Tabela 13 – Resumo das etiquetas UHF RFID para objetos metálicos pesquisadas

Alcance (m)	Dimensão (W × L) (mm)	Espessura (mm)	Circuito Integrado		Substrato			Frequência (MHz)	Referência
			Fabricante	Sensibilidade de leitura do CI (dBm)	Material	ϵ_r	Tangente de Perdas		
13	14,3 × 25	3	ALIEN Higgs-3	-18	Cerâmica DR36	36	0,000028	850	(SORIANO, 2016)
8	120 × 15	40	ALIEN Higgs-3	ND	Silicone Elastômero	4	ND	866	(KAUR 2015)
7,3	140 × 40	3	Gen2	ND	Polipropileno	2	0,006	900	(WANG, 2007)
7	46 × 28	6	ALIEN Higgs-3	-18	PET-G	3	0,0208	930	ESTE TRABALHO
6,8	45 × 45	1,27	ALIEN Higgs-3	-17	Rogers RO3010	10,2	0,0023	913	(ZUFFANELLI, 2017)
6,7	40 × 80	1,6	RI-UHF-STRAP-08	ND	FR4	ND	ND	915	(LEE, 2008)
6,6	25 × 25	3	ALIEN Higgs	ND	Cerâmica	48	ND	910	(KIM, 2008a)
6	25 × 25	3	ALIEN Higgs-2	ND	Cerâmica	37	0,002	911	(CHOI, 2008)
5,5	26 × 14	0,8/1,6	NXP	-15	PTFE/FR4	2,65/4,4	0,0016/0,01	923	(ZHANG J, 2013a)
5,4	88 × 60	0,76	NXP	-15	GIL GM 1000	3,2	0,003	866	(POLIVKA, 2015)
5	25 × 25	3	ALIEN Higgs	ND	Cerâmica	48	ND	910	(KIM, 2008b)
4,9	47,5 × 50	3	ALN-9338-R	ND	FR4	ND	ND	915	(YU, 2007)

4,8	80 × 110	0,8	ALIEN Higgs	-14	FR4	4,4	ND	915	(CHEN H, 2010)
4,6	42 × 42	1,6	Alien's ALN-9338-R	ND	ROGERS RT/DUROID	2,3	ND	915	(KOSKINEN, 2011)
4	36 × 36	4	ND	ND	Espuma	1	ND	911	(KWON, 2005)
2,65	28 × 14	1,5	NXP G2iL	-18	Cerâmica (BaTiO ³)	12	0,01	880	(BABAR, 2012)
1,6	33,5 × 20	2	ALIEN Higgs	ND	PVC	3	0,1	911	(PARK, 2008)
1,2	36 × 36	0,8	TEXAS	ND	FR4	4,4	0,02	915	(CHEN W, 2010)

(ND): não disponível.

Tabela 14 – Resumo das etiquetas UHF RFID para objetos não metálicos pesquisadas

Alcance (m)	Dimensão (W×L) (mm)	Espessura (µm)	Circuito Integrado		Substrato			Frequência (MHz)	Referência
			Fabricante	Sensibilidade de leitura do CI (dBm)	Material	ε _r	Tangente de Perdas		
12	70 × 14	50	Monza R6	-20	PET-Filme	3	0,002	915	Modelo E62 R6 (CCRR, 2019)
11	105 × 6	50	Monza R6	-20	PET-Filme	3	0,002	915	Modelo E64 R6 (CCRR, 2019)
8,08	70 × 14	50	Monza R6	-20	PET-Filme	3	0,002	915	ESTE TRABALHO
6,1	40 × 15	50	Monza R6	-20	PET-Filme	3	0,002	915	Modelo E61F R6 (CCRR, 2019)
1,2	22 × 13,5	50	Monza R6	-20	PET-Filme	3	0,002	915	Modelo F62 R6 (CCRR, 2019)

A Tabela 15 mostra os valores calculados para a FoM_{JB} de etiquetas RFID para superfícies metálicas e compara os tipos de substratos mais conhecidos na fabricação dessas etiquetas.

O substrato FR4 que tem um custo baixo é o mais utilizado na construção de etiquetas, porém tem uma tangente de perdas muito alta gerando alcances menores, por outro lado compara uma etiqueta com substrato cerâmico que tem um custo considerado alto, porém devido a sua tangente de perdas ser muito baixa proporciona alcances maiores, foi citada também uma etiqueta com substrato Roger que é considerado um avanço em relação ao substrato FR4 por apresentar tangente de perdas menores e por fim, a comparação de uma etiqueta com substrato PET que é o substrato utilizado na etiqueta desenvolvida neste trabalho possuindo um custo considerado baixo, baixa tangente de perdas e a vantagem do substrato poder ser utilizado em temperaturas que suportam os processos de cura dos adesivos condutivos.

A análise da Figura de Mérito mostra que a etiqueta desenvolvida neste trabalho apresenta um mérito maior em detrimento às outras devido a utilização de um substrato de baixo custo que mesmo possuindo uma tangente de perdas menor do que de outros substratos de baixo custo (como FR4) acarreta em uma maior eficiência de radiação e conseqüentemente num maior ganho.

Tabela 15 – Resultado da FoM_{JB} para superfícies metálicas

Alcance de leitura (m)	Sensibilidade de leitura do CI (dBm)	Alcance de leitura normalizado com P _{th}	Área (mm ²)	Substrato	Custo do Substrato [R\$/mm ²]	Processo de Fabricação	Fator de Custo do Processo de Fabricação	FoM _{JB} (dB)	Referência
13	-18	0,72	357,5	Cerâmica DR36	0,0086	<i>Etching</i>	1	1,49	(SORIANO, 2016)
7	-20	0,38	3864	PET-G	0,0004	<i>Etching</i>	1	6,5	Este trabalho
6,8	-18	0,37	2571	Rogers RO3010	0,0005	<i>Etching</i>	1	5,56	(ZUFFANELLI, 2017)
5,5	-15	0,36	537,6	PTFE/FR4	0,00035	<i>Etching</i>	1	2,81	(ZHANG J, 2013a)

Fonte: (Ferreira, 2020)

A Tabela 16 mostra os valores calculados para a FoM_{JB} de etiquetas UHF RFID para superfícies não metálicas. A tabela compara quatro etiquetas comerciais fabricadas pelo processo *Etching* com a etiqueta desenvolvida neste trabalho (capítulo 6) pelo processo de fabricação *Thermal Transfer*.

A limitação para o desenvolvimento de uma etiqueta pelo processo *Thermal Transfer* e não pelo processo *Etching* se dá pelo fato de que para fabricar etiquetas com o substrato PET filme se faz necessário utilizar equipamentos/linhas de processos de fabricação encontrados somente em empresas de produção de larga escala, por isso foi utilizado o processo *Thermal Transfer* que necessita apenas de uma impressora específica como equipamento.

Mesmo utilizando o mesmo CI, o mesmo substrato e a mesma área, a FoM_{JB} da antena desenvolvida neste trabalho para etiquetas UHF RFID em superfícies não metálicas apresentou um mérito menor em detrimento à antena comercial E62 R6, isso se deve ao fato da antena desenvolvida neste trabalho utilizar um processo de fabricação com um custo mais alto e também por apresentar um menor alcance de leitura.

Para uma adequada avaliação o indicado é comparar etiquetas levando em consideração todos os parâmetros da FoM. Com a análise de somente uma métrica não é possível dizer com certeza que exista alguma aproximação em relação a outra etiqueta sem que as outras métricas envolvidas sejam verificadas em conjunto.

Tabela 16 – Resultado da FoM_{JB} para superfícies não metálicas

Alcance de leitura (m)	Sensibilidade do CI (dBm)	Alcance de leitura normalizado com Pth	Área (mm ²)	Substrato	Custo do Substrato [RS/mm ²]	Processo de Fabricação	Fator de Custo do Processo de Fabricação	FoM _{JB} (dB)	Referência
12	-20	0,6	490	PET-Filme	0,00005	<i>Etching</i>	1	20,87	Modelo E62 R6 (CCRR, 2019)
11	-20	0,55	630	PET-Filme	0,00005	<i>Etching</i>	1	12,42	Modelo E64 R6 (CCRR, 2019)
8,08	-20	0,4	490	PET-Filme	0,00005	<i>Thermal Transfer</i>	3,9	12,12	Este trabalho
6,1	-20	0,3	600	PET-Filme	0,00005	<i>Etching</i>	1	10	Modelo E61F R6 (CCRR, 2019)
1,2	-20	0,06	297	PET-Filme	0,00005	<i>Etching</i>	1	6,06	Modelo F62 R6 (CCRR, 2019)

Fonte: (Ferreira, 2020)

9. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Nesta tese é apresentada uma nova FoM nomeada FoM_{JB} para avaliação de etiquetas planares passivas UHF RFID para uso em superfícies metálicas e não metálicas. Foi visto que uma variação considerável de fatores (alcance de leitura, área, sensibilidade de leitura do chip, custo do substrato e custo do processo de fabricação) influencia nas definições iniciais de projetos de antenas e na avaliação e comparação de antenas existente, portanto, desenvolver uma FoM_{JB} que prove auxiliar nas questões indicadas, se justifica.

Duas novas etiquetas planares passivas UHF RFID de estruturas diferentes foram criadas para avaliação através da nova FoM_{JB} juntamente com antenas existentes na bibliografia. A primeira refere-se a uma antena para utilização em objetos metálicos e a segunda trata-se de uma antena para objetos não metálicos desenvolvidas através dos processos de Remoção – *Etching* e Impressão por Transferência Térmica – *ThermalTransfer*, respectivamente. As duas novas etiquetas projetadas mostraram ser uma boa alternativa para utilização em sistemas UHF RFID. O processo de fabricação dos dispositivos e os experimentos realizados foram descritos com o detalhamento necessário para reprodução dos resultados. Muito embora, levando-se em consideração que os protótipos foram fabricados manualmente, uma grande variabilidade dos resultados pode ser esperada.

A FoM_{JB} desenvolvida emprega cinco variáveis correspondentes ao projeto de etiquetas RFID, fornecendo assim uma ampla possibilidade para quantificação da mesma, indicando que o valor derivado do mérito é adequado avaliação de etiquetas planares passivas UHF RFID existentes e também útil para auxiliar em projetos análogos diminuindo assim, o tempo-solução nas tomadas de decisões.

Além disso, as informações contidas no levantamento realizado relativo às técnicas atuais de fabricação e a tabela desenvolvida sobre fatores de custo de processo de fabricação

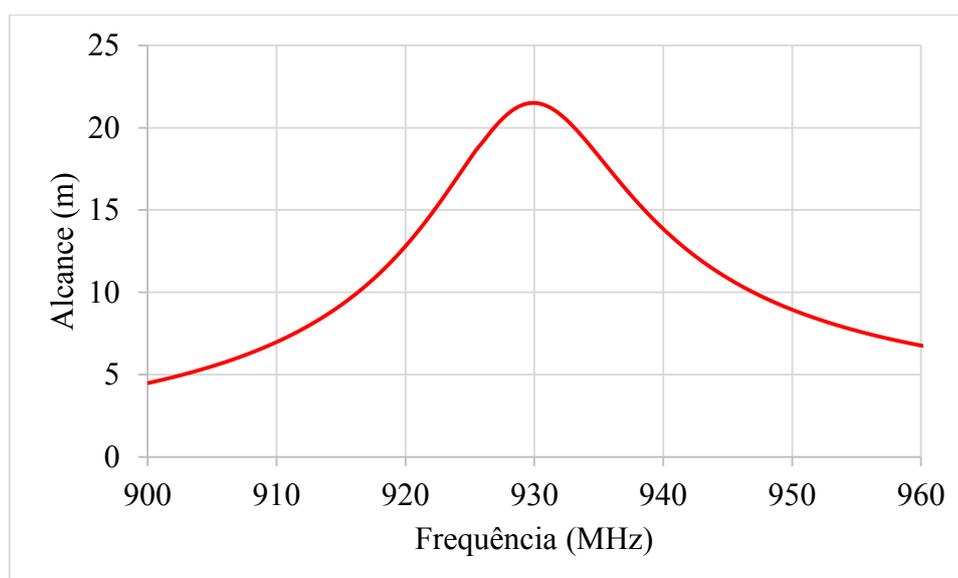
são de grande valia não somente para utilização em antenas RFID, mas também para utilização em outros tipos de antenas.

Enfim, as antenas desenvolvidas apresentam bom desempenho para utilização em objetos metálicos e não metálicos podendo concorrer com as antenas existentes na literatura e comerciais. A FoM_{JB} resulta em um abrangente mecanismo de avaliação e comparação tendo também potencial para aplicação em outros tipos de antenas, par

Trabalhos Futuros

Na presente tese a etiqueta para objetos metálicos foi projetada utilizando o substrato disponível comercialmente PET-G que devido à adição de glicol apresentou após sua caracterização uma tangente de perdas maior do que a informada na literatura referente ao PET puro. Um projeto complementar utilizando o substrato sem impurezas seria oportuno já que as simulações realizadas incluindo a tangente de perdas $\tan \delta = 0,002$ mostraram um aumento esperado de 115% no alcance de leitura, conforme Figura 50.

Figura 50 – Alcance de leitura simulado com material PET puro

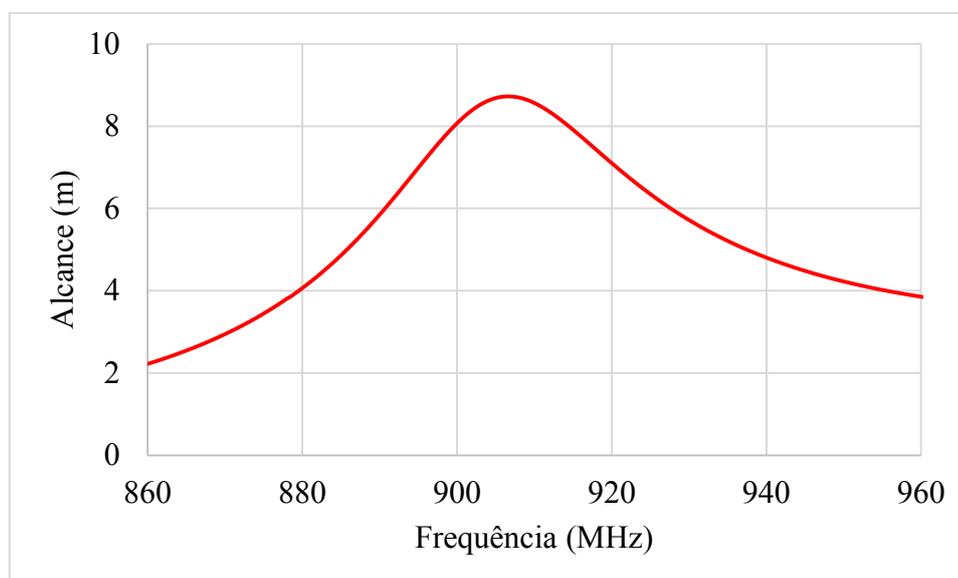


Fonte: Elaborado pelo autor

Para garantir a reprodutibilidade seria adequada a prototipação de uma quantidade maior de etiquetas para objetos metálicos para a confirmação dos resultados experimentais.

Mesmo que no ato da elaboração do projeto não se saiba em que tipo de aplicação a etiqueta desenvolvida será utilizada, seria interessante implementar algum tipo de encapsulamento na etiqueta como por exemplo incluir um invólucro de um material já utilizada nas etiquetas existentes como é o caso do material TPE que possui as seguintes características: espessura 0,5mm, $\epsilon_r = 2,4$ e $\tan\delta = 0,02$. Uma simulação feita utilizando essas características indica conforme Figura 51 que a inclusão do invólucro não irá alterar substancialmente os valores de alcance de leitura, havendo apenas um deslocamento de frequência que poderá ser corrigido alterando outros parâmetros como a geometria da antena.

Figura 51 – Alcance de leitura simulado com encapsulamento



Fonte: Elaborado pelo autor

Ainda com relação às etiquetas para objetos metálicos seria interessante também a realização de medidas com bases metálicas de diferentes tamanhos, essa hipótese iria demonstrar a porcentagem de influência relacionada ao desempenho da antena quando colocada sobre objetos com diferentes tipos de tamanho.

A inclusão da métrica referente ao custo do chip na proposta da FoM_{JB} iria complementar a equação, porém nesta tese a mesma não foi incluída pois normalmente a etapa do processo de fabricação da antena nem sempre ocorre no mesmo local/empresa onde é feita a etapa do processo de fabricação do inlay (antena + chip).

O processo de fabricação de etiquetas (CI + antena + *bottom layer* + *top layer*) normalmente não acontece em uma empresa única. Existem empresas que produzem apenas as antenas e empresas que compram a antena de uma determinada empresa A, compram o chip de uma empresa B e enviam para a empresa C fazer apenas conexão do chip na antena (*inlay*) esse fato se dá, pois o processo de conexão do chip requer laboratórios específicos.

Outras complementações relacionadas à Figura de Mérito seriam: desenvolver uma figura de mérito para análise da quantidade de bits, comparação de etiquetas sem CI e também etiquetas ativas, utilização de um tamanho normalizado poderia também ser interessante se o intuito fosse comparar circuitos em frequências significativamente diferentes.

REFERÊNCIAS

- ALIEN. **Higgs 3 datasheet**. 3 p. 2012. Disponível em: <<https://www.alientechnology.com/products/ic/higgs-3/>>. Acesso em: 06 mar. 2016.
- ANATEL – AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. **Resolução nº 303, de 2 de julho de 2002**. 2002. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/17-2002/128-resolucao-303>>. Acesso em: 05 abr. 2015.
- ANSYS. **Ansys HFSS**: Software de simulação de campo eletromagnético de alta frequência. 1990. Disponível em: <<https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>>. Acesso em: 15 mar. 2016.
- ANTONCHIK, V. **Theory and experiment of planar inverted F-antennas for wireless communications applications**. 2007. 198p. Thesis (Degree of Master of Science) – School of Engineering Science, Simon Fraser University, Canada, 2007.
- AYAD, H. *et al.* Performances of low profile dipole antenna AMC-based surface using metamaterials structures. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TELECOMMUNICATIONS (ICT)*, 19, 2012, Jounieh. **Proceedings [. . .]** New York: IEEE, 2012. p. 1-5. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6221218>. Acesso em: 06 abr. 2016.
- BABAR, A. Ali *et al.* Small and flexible metal mountable passive UHF RFID tag on high-dielectric polymer-ceramic composite substrate. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, New York, v. 11, p. 1319-1322, Nov. 2012.
- BALANIS, C. A. **Antenna theory: analysis and design**. New York: John Wiley, 1997.
- BAO, D. *et al.* A Wirelessly powered UWB RFID sensor tag with time-domain analog-to-information interface. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, New York, v. 53, n. 8, p. 2227-2239, Aug. 2018.
- BEIJING GOLDEN EAGLE ELECTRONIC EQUIPMENT. Metal etching equipment. 2002. Disponível em: < <http://photoetchingmachine.com/index.html>>. Acesso em: 10 maio 2019.
- BHORE, S. S. **Formulation and evaluation of resistive inks for applications in printed electronics**. 2013. 94 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Chemical and Paper Engineering, Western Michigan University, Michigan, 2013.
- BJÖRNINEN, T. *et al.* Advances in antenna designs for UHF RFID tags mountable on conductive items. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, New York, v. 56, n. 1, p. 79-103, Feb. 2014.
- CCRR - GRUPO COLACRIL. **UHF RFID Inlay CCRR E62 R6**. 1 p. 2019. Disponível em: < <https://rfidccrr.com.br/wp-content/uploads/2020/06/CCRR-E62-R6.pdf>>. Acesso em: 02 jun. 2019.

CHAWLA, V.; HA, D. S. An overview of passive RFID. **IEEE Communications Magazine**, New York, v. 45, n. 9, p.11-17, Sept. 2007.

CHEN, H. D.; TSAO, Y. H.; KUO, C. Y. Low-profile radio frequency identification tag antenna using a trapezoid patch mountable on metallic surfaces. **Microwave and Optical Technology Letters**, [S.1.], v. 52, n. 8, p. 1697-1700, May 2010.

CHEN, W. S.; CHEN, J. C.; LEE, B. Y. A compact UHF RFID tag antenna design for metallic objects. *In: IEEE ANTENNAS AND PROPAGATION SOCIETY INTERNATIONAL SYMPOSIUM*, 2010, Toronto. **Proceedings [. . .]** New York: IEEE, 2010. p. 1-4. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5561151>. Acesso em: 17 abr. 2016.

CHOI, W. *et al.* RFID tag antenna coupled by shorted microstrip line for metallic surfaces. **ETRI Journal**, Korea, v. 30, n. 4, p. 597-599, Aug. 2008.

CLEARPET. Bobinas PET. 1p. 2019. Disponível em: <http://www.clearpet.com.br>. Acesso em: 24 jan. 2019.

COLELLA, R. *et al.* Comparison of fabrication techniques for flexible UHF RFID tag antennas [wireless corner]. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, New York, v. 59, n. 5, p. 159-168, Oct. 2017.

DELO. Anisotropic conductive adhesive: product specification. 4 p. 2015. Disponível em: https://www.deloadhesives.com/fileadmin/datasheet/DELO%20MONOPOX_AC265_%28TIDB-en%29.pdf. Acesso em: 28 jan. 2017.

DEMIRKAN, M.; BRUSS, S. P. and SPENCER, R. R. Design of wide tuning-range CMOS VCOS using switched coupled-inductors. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, New York, v. 43, n. 5, p. 1156-1163, May. 2008.

DOBKIN, D. M. **The RF in RFID**: passive UHF RFID in practice. Waltham: Elsevier, 2013.

EPC. **EPC radio-frequency identity protocols generation2 uhf rfid Standard**. 157 p. 2018. Disponível em: https://www.gs1.org/sites/default/files/docs/epc/gsl-epc-gen2v2-uhf-airinterface_i21_r_2018-09-04.pdf. Acesso em: 22 dez. 2018.

FERREIRA, J. B. et al. Compact, low cost and long read range RFID UHF Tag Antenna mounted on a metallic surface. *In: LATIN AMERICA NETWORKING CONFERENCE (LANC)*, 9, 2016, Valparaíso. **Proceedings [. . .]** Valparaíso: ACM, 2016, p. 28-31. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/2998373.2998449>. Acesso em: 1 jan. 2017.

FERREIRA, J. B. et al. A new structure of UHF RFID tag antenna mountable on metallic surface using double slits. *In: IEEE 9th LATIN-AMERICAN CONFERENCE ON COMMUNICATIONS (LATINCOM)*, 2017, Guatemala City. **Proceedings [. . .]** New York: IEEE, 9, 2017, p. 1-3. Disponível em: <https://ieeexplore-ieee.org.ez45.periodicos.capes.gov.br/document/8240165>. Acesso em: 21 abr. 2018.

FERREIRA, J. B. et al. Desenvolvimento de uma nova Figura de Mérito para avaliação de etiquetas passivas UHF RFID em superfícies metálicas e não metálicas. *In: MOMAG - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (SBMO) e Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (CBMag)*, 2020, Rio de Janeiro. **Anais [. . .]** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Micro-ondas e Optoeletrônica e a Sociedade Brasileira de Eletromagnetismo, 19 e 14, 2020, p. 436. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1awjFbTcPKIOPFysm7B4sbeM2LxB-AcKG/view?ts=602fbb6b>. Acesso em: 2 dez. 2020.

FINKENZELLER, K. **RFID handbook: radio-frequency identification fundamentals and applications**. New York: John Wiley, 1999.

FINKENZELLER, K. **RFID handbook: fundamentals and applications in contactless smart cards, radio frequency identification and near-field communication**. New York: John Wiley, 2010. 478 p.

FUJIMOTO, K. **Small antennas**. New York: John Wiley, 1987.

GARG, R. *et al.* **Microstrip antenna design handbook**. Norwood: Artech House, 2001.

HIRASAWA K.; HANEISHI M. **Analysis, design and measurements of small and low-profile antennas**. Boston: Artech House, 1992.

IDTECHEX. **RFID forecasts, players and opportunities 2018-2028**. 11p. 2018. Disponível em: <https://www.idtechex.com/tw/research-report/rfid-forecasts-players-and-opportunities-2018-2028/642>. Acesso em: 08 fev. 2018.

IMPINJ. **Monza R6 datasheet**. 20 p. 2012. Disponível em: <https://support.impinj.com/hc/en-us/articles/202765328-Monza-R6-Product-Brief-Datasheet>. Acesso em: 06 mar. 2016.

IMPINJ. **RFID Tag Antenna Design: design overview and guidelines**. 8 p. 2017. Disponível em: <https://support.impinj.com/hc/en-us/articles/360000157019-RFID-Tag-Antenna-Design>. Acesso em: 21 jun. 2018.
<https://support.impinj.com/hc/en-us/articles/360000157019-RFID-Tag-Antenna-Design>

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO/IEC 18000-6:2013 Information technology - Radio frequency identification for item management**. 9 p. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/59644.html>. Acesso em: 06 maio 2017.

JAMES, J. R. *et al.* **Handbook of microstrip antennas**. London: Peter Peregrinus Ltd., 1989.

KAUR, N. et al. Design and performance of a flexible metal mountable UHF RFID tag. *In: IEEE ELECTRONIC COMPONENTS AND TECHNOLOGY CONFERENCE (ECTC)*, 65, 2015, San Diego. **Proceedings [. . .]** New York: IEEE, 2015. p. 2120-2126. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7159895>. Acesso em: 011 sept. 2018.

KHAN, M. M. *et al.* 3.56-bits/cm² Compact Inkjet Printed and Application Specific Chipless RFID Tag. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, New York, v. 15, p. 1109-1112, Oct. 2015.

KHAN, S.; LORENZELLI, L.; DAHIYA, R. S. Technologies for printing sensors and electronics over large flexible substrates: a review. **IEEE Sensors Journal**, New York, v. 15, n. 6, p. 3164-3185, Jun. 2014.

KIM, J. S.; CHOI, W. K.; CHOI, G. Y. Small proximity coupled ceramic patch antenna for UHF RFID tag mountable on metallic objects. **Progress in Electromagnetics Research**, [S.1.], v. 4, p. 129-138, 2008a.

KIM, J. S. *et al.* Shorted microstrip patch antenna using inductively coupled feed for UHF RFID tag. **ETRI Journal**, Korea, v. 30, n. 4, p. 600-602, Jun. 2008b.

KOSKINEN, T. V.; RAJAGOPALAN, H.; RAHMAT-SAMII, Y. A thin multi-slotted dual patch UHF-band metal-mountable RFID tag antenna. **Microwave and Optical Technology Letters**, [S.1.], v. 53, n. 1, p. 40-47, 2011.

KUROKAWA, K. **An introduction to the theory of microwave circuits**. Academic Press, 2012.

KWON, H.; LEE, B. Compact slotted planar inverted-F RFID tag mountable on metallic objects. **Electronics Letters**, [S.1.], v. 41, n. 24, p. 1308-1310, Dec. 2005.

LEE, B.; YU, B. Compact structure of UHF band RFID tag antenna mountable on metallic objects. **Microwave and Optical Technology Letters**, [S.1.], v. 50, n. 1, p. 232-234, 2008.

LI, J; HASAN, S. M. R. Pulse-Biased Low-Power Low-Phase-Noise UHF LC-QVCO for 866 MHz RFID Front-End. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, New York, v. 60, n. 10, p. 3120-3125, Oct. 2012.

LI, Y; WONG, C. P. High performance anisotropic conductive adhesives for lead-free interconnects. **Soldering & Surface Mount Technology**, [S.1.], v. 18, n. 2, p. 33-39, Apr. 2006.

LIER, E.; JAKOBSEN, K. Rectangular microstrip patch antennas with infinite and finite ground plane dimensions. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, New York, v. 31, n. 6, p. 978-984, Nov. 1983.

LINGTIE (XIAMEN) MACHINERY CO. LTD. **LTA5060 Rool to rool screen printer machine**. 2003. Disponível em: <<https://www.xmlingtie.com/>>. Acesso em: 15 maio 2019.

LO, T. K. *et al.* Miniature aperture-coupled microstrip antenna of very high permittivity. **Electronics Letters**, [S.1.], v. 33, n. 1, p. 9-10, Jan. 1997.

MASTERETCH SERVICES. **Etching process and information**. 2019. Disponível em: <https://www.masteretching.com/chemical-etching-process>. Acesso em: 01 maio 2019.

MECO. **FAP330**. 2019. Disponível em: <<https://www.meco.nl/>>. Acesso em: 18 maio 2019.

METALLOGRAPH. **Conductive thermal transfer ribbons for printed electronics and RFID antennas**. 1p. 2000. Disponível em: <<https://spf-inc.com/wp-content/uploads/2016/05/Metallograph-TT-Conductive-Ribbon-Data-Sheet.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2019.

MUHELBAUER. **The RFID factory**. 2019. 23p. Disponível em: <https://www.muehlbauer.de/media/19621/rfid-brochure_2019-07-18_ebook.pdf>. Acesso em: 15 set. 2019.

NASCIMENTO, D. C. *et al.* Antenas de microfita linearmente polarizadas: nova estratégia de projeto. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications (JMoe)**, [S.1.], v. 6, n. 2, p. 346-363, Aug. 2007.

NGAI, E. W. T. *et al.* RFID research: An academic literature review (1995–2005) and future research directions. **International Journal of Production Economics**, [S.1.], v. 112, n. 2, p. 510-520, Apr. 2008.

NIKITIN, P. V.; RAO, K. V. S. Performance limitations of passive UHF RFID systems. *In: IEEE ANTENNAS AND PROPAGATION SOCIETY INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 2006, Albuquerque. Proceedings [. . .]* New York: IEEE. p. 1011-1014, <https://ieeexplore.ieee.org/document/1710704>. Acesso em: 30 nov. 2019.

NIST – National Institute of Standards and Technology. **NIST Study 'Makes the Case' for RFID Forensic Evidence Management**. 2014. Disponível em: <https://www.nist.gov/news-events/news/2014/12/nist-study-makes-case-rfid-forensic-evidence-management>. Acesso em: 22 maio 2017.

PARK, J.Y.; WOO, J.M. Miniaturised dual-band s-shaped RFID tag antenna mountable on metallic surface. **Electronics Letters**, [S.1.], v. 44, n. 23, p. 1339-1341, Nov. 2008.

PEL – Printed electronics Ltd. **Multihead jet printer MDS300**. 2018. Disponível em: <<https://www.printedelectronics.com/>>. Acesso em: 13 maio 2019.

PEMS - Printed electro mechanical system. **Roll to roll micro gravure coater RGC 150**. 1 p. 2015. Disponível em: <[http://www.pems-korea.com/brochure/coating/RGC-150\(Roll%20to%20Roll%20Micro%20Gravure%20Coater\).pdf](http://www.pems-korea.com/brochure/coating/RGC-150(Roll%20to%20Roll%20Micro%20Gravure%20Coater).pdf)>. Acesso em: 12 maio 2019.

PILL GMBH. **Etching line**. 2003. Disponível em: <<https://www.pill-germany.com/>>. Acesso em: 07 maio 2019.

PiXDRO JETx, MEYER BURGER TECHNOLOGY. Inkjet printing. 2015. Disponível em: <<https://www.suss.com/en/products-solutions/inkjet-printing>>. Acesso em: 14 maio 2019.

POLIVKA, M.; SVANDA, M. Stepped impedance coupled-patches tag antenna for platform-tolerant UHF RFID applications. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, New York, v. 63, n. 9, p. 3791-3797, Sept. 2015.

RAO, K. V. S. An overview of backscattered radio frequency identification system (RFID). *In: ASIA PACIFIC MICROWAVE CONFERENCE (APMC'99)*, 1999, Singapore.

Proceedings [. . .] New York: IEEE, 1999. p. 746-749. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/833700>. Acesso em: 30 nov. 2019.

RAO, K. V. S.; NIKITIN, P. V.; LAM, S. F. Antenna design for UHF RFID tags: a review and a practical application. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, New York, v. 53, n. 12, p. 3870-3876, Dec. 2005.

RAUMONEN, P. *et al.* Folded dipole antenna near metal plate. *In: IEEE ANTENNAS AND PROPAGATION SOCIETY INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 2003, Columbus. Proceedings* [. . .] New York: IEEE, 2003. p. 848-851. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1217593>. Acesso em: 30 nov. 2019.

RFIDTEK. **Protocolos e normas EPC**. 2009. Disponível em: <http://rfidtek.blogspot.com.br/2009/09/protocolos-e-normas-epc.html>. Acesso em: 10 abr. 2017.

RICHARDSON, R. M. **Remotely actuated radio frequency powered devices**. U.S. Patent n. 3.098.971. 23 jul. 1963.

ROH, H. H. et al. A regulated low phase noise differential colpitts VCO for mobile RFID system. *In: EUROPEAN MICROWAVE CONFERENCE, 200, Munich. Proceedings* [. . .] New York: IEEE, 2007, p. 1113-1116. Disponível em: [Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/1217593](https://ieeexplore.ieee.org/document/1217593). Acesso em: 30 nov. 2019. Acesso em: 29 jan. 2019.

SIPILÄ, E. Novel Manufacturing methods and materials for UHF RFID Tags in identification and sensing applications. 2016. Thesis (Doctor o Schience in Technology). Tampere University of Technology. Publication; Vol. 1421. Tampere. 2016.

SORIANO, L. S.; PARRÓN, J. Parallel plate antenna for UHF RFID tags operating over metallic objects. *In: EUROPEAN CONFERENCE ON ANTENNAS AND PROPAGATION (EuCAP), 10, 2016, Davos. Proceedings* [. . .] New York: IEEE, 2016. p. 1-3. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7481959>. Acesso em: 10 abr. 2019.

SPG Prints. **Rotary screen printer**. 2013. Disponível em: [https:// www.spgprints.com/](https://www.spgprints.com/). Acesso em: 10 maio 2019.

STOCKMAN, H. Communication by means of reflected power. **Proceedings of the IRE**, New York, v. 36, n. 10, p. 1196-1204, Oct. 1948.

TASHI, M. S. H.; Yu, H. Design and simulation of UHF RFID tag antennas and performance evaluation in presence of a metallic surface. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOFTWARE, KNOWLEDGE INFORMATION, INDUSTRIAL MANAGEMENT AND APPLICATIONS (SKIMA), 5, 2011, Benevento. Proceedings* [. . .] New York: IEEE, 2011. p. 1-5. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6089974>. Acesso em: 01 dez. 2017.

WALLACE, R. **Antenna selection guide**. 45 p. 2013. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/an/swra161b/swra161b.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2017.

VENUGOPAL, A. *et al.* **Analysis and design of microstrip antenna for a smart-antenna test-bed**. 2001. 54 p. Thesis (Degree of Master of Science) – Department of Electric and Computer Engineering, North Carolina State University, Raleigh, 2001.

WANG, W. H. *et al.* A metal mounting tag for passive UHF RFID applications. *In: IEEE ANTENNAS AND PROPAGATION SOCIETY INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 2007, Honolulu. Proceedings [. . .]* New York: IEEE, 2007. p. 1769-1772. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1217593>. Acesso em: 10 out. 2019.

WANT, Roy. An introduction to RFID technology. **IEEE Pervasive Computing**, New York, v. 5, n. 1, p. 25-33, Feb. 2006.

YANG, L. *et al.* RFID tag and RF structures on a paper substrate using inkjet-printing technology. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, New York, v. 55, n. 12, p. 2894-2901, Dec. 2007.

YU, B. *et al.* RFID tag antenna using two-shortened microstrip patches mountable on metallic objects. **Microwave and Optical Technology Letters**, [S.l.], v. 49, n. 2, p. 414-416, Feb. 2007.

ZHANG, J.; LONG, Y. A miniaturized via-patch loaded dual-layer RFID tag antenna for metallic object applications. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, New York, v. 12, p. 1184-1187, Sep. 2013a.

ZHANG, J. *et al.* A 800nW high-accuracy RC oscillator with resistor calibration for RFID. *In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ASIC, 10, 2013, Shenzhen. Proceedings [. . .]* New York: IEEE, 2013b, p. 1-4. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6811876>. Acesso em: 9 set. 2019.

ZHU, X.; MUKHOPADHYAY, S. K.; KURATA, H. A review of RFID technology and its managerial applications in different industries. **Journal of Engineering and Technology Management**, Netherlands, v. 29, n. 1, p. 152-167, Jan. 2012.

ZUFFANELLI, S. *et al.* On-metal UHF-RFID passive tags based on complementary split-ring resonators. **IET Microwaves, Antennas & Propagation**, United Kingdom, v. 11, n. 7, p. 1040-1044, Jun. 2017.

APÊNDICE A – CUSTOS DE FABRICAÇÃO

Neste trabalho foram consideradas algumas variáveis de processo para todas as tecnologias estudadas. As avaliações e comparações entre as diferentes tecnologias realizadas foram sempre ponderando as variáveis indicadas na Tabela 16.

Tabela 17 – Variáveis de processo usadas como referência em todas as técnicas

Velocidade de impressão	~ 200 mm/s
Espaçamento entre antenas	~ 10 mm
Quantidade de antenas/minuto	~ 40 pçs/min
Largura do substrato	105 - 300 mm
Tempo de utilização	85% (0,85)
Tempo em que o equipamento está disponível (Uptime)	90% (0,9)
Horas máquina/ano	~ 3000 h (considerando 2 turnos de 8h)

Outra informação importante refere-se à taxa de câmbio empregada nas conversões que foi de 1 USD = 3,9 R\$ (março/2019).

Quanto ao custo dos equipamentos há uma diferença significativa dependendo da origem e da configuração específica, conforme pode ser visto na Tabela 18.

Tabela 18 – Planilha de estimativa de custo de equipamentos

Equipamento	Custo FOB - USD	Internação	Instalação	Custo Total USD	Custo Amortização 5a/100Mpcs/ano	US\$cents /etiqueta	CAPEX R\$ @ USD=3,9R\$	CAPEX/ano R\$
Cutting ACS100 Muhlbauer - Alemanha	750.000,00	35%	1%	1.020.000,00	0,00204	0,20	3.978.000,00	795.600,00
Serigrafia reel to reel - Lingtie Chinês	80.000,00	35%	10%	116.000,00	0,00023	0,02	452.400,00	90.480,00
Etching Al - Masteretch 750 Inglês + SPGprint Holandês	300.000,00	35%	15%	450.000,00	0,00090	0,09	1.755.000,00	351.000,00
Etching Al - PILL Gmb Alem. Em linha SMT	180.000,00	35%	15%	270.000,00	0,00054	0,05	1.053.000,00	210.600,00
Etching Al - Beijing G. Eagle Electronic - China - Em linha SMT	120.000,00	35%	15%	180.000,00	0,00036	0,04	702.000,00	140.400,00
Thermal Transfer - impressora Zebra 610L	22.000,00	35%		29.700,00	0,00006	0,01	115.830,00	23.166,00
Jato de Tinta - Impressoras PEL ou PiXDRO (2015) (UK, Suíça)	1.440.000,00	35%	1%	1.958.400,00	0,00392	0,39	7.637.760,00	1.527.552,00
Eletrodeposição - Meco FAP 330 - Holanda	840.000,00	35%	15%	1.260.000,00	0,00252	0,25	4.914.000,00	982.800,00