

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA

MENA SIMÃO MAKENGO KAZU

**PROJETO DE ANTENA PARA ETIQUETA RFID EM UHF PARA APLICAÇÃO EM
OBJETOS CONTENDO LÍQUIDOS E METAIS**

São Leopoldo

2019

MENA SIMÃO MAKENGO KAZU

**PROJETO DE ANTENA PARA ETIQUETA RFID EM UHF PARA APLICAÇÃO EM
OBJETOS CONTENDO LÍQUIDOS E METAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Eletrônica, pelo Curso de
Engenharia Eletrônica da Universidade do
Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Sandro Binsfeld Ferreira

São Leopoldo

2019

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por tudo que tem feito por mim nestes últimos anos. Aos meus pais e a minha família em geral, que apesar da distância continuam me suportando no que precisar. Ao meu orientador pelo esforço, dedicação e auxílio sempre que eu precisar. Ao pessoal do ITT-Chip, especialmente ao Celso Peter e Juliana Ferreira pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho. Em especial, agradeço a minha noiva pelo apoio e pela compreensão de vários momentos ausentes para realização do presente trabalho.

RESUMO

Os Sistemas de Identificação por Rádio Frequência (RFID – *Radio Frequency Identification*) têm apresentado uma evolução considerável nos últimos anos. O surgimento de novas tecnologias e o modo de se conectar tem um papel preponderante nesta evolução. Apesar da evolução, muitas antenas dos sistemas RFID em Ultra Alta Frequência (UHF – *Ultra High Frequency*) são afetadas pela presença de metal ou líquido. O presente trabalho descreve o projeto de construção de uma estrutura de Antena Planar F Invertido (PIFA – *Planar Inverted F Antenna*) para a etiqueta RFID passiva em UHF com objetivo de identificar objetos contendo metais e líquido. A antena foi construída de modo a operar na faixa de frequência de 860 a 960 MHz com a frequência central de 915 MHz. Foram efetuadas várias simulações usando o software *HFSS* da Empresa Ansys de modo a verificar os resultados do projeto. Os principais parâmetros analisados foram perda de retorno (RL) e alcance (R). Os resultados obtidos por meio de simulações indicam um bom desempenho da antena na sua faixa de operação ($RL = -14,60\text{ dB}$, $R = 14,2\text{ m}$ para objeto metálico e $R = 15,7\text{ m}$ para objeto contendo um líquido). As medidas efetuadas apresentam um alcance da antena acima de $R = 7,6\text{ m}$ quando anexada a um material metálico e $R = 6,8\text{ m}$ sem o uso de nenhum tipo de material. Além disso, a antena apresentou dimensões bastante reduzidas, de $43 \times 30 \times 9\text{ mm}^3$.

Palavras-chave: RFID. PIFA. Antena. Metal. Líquido

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes de um sistema RFID em UHF	14
Figura 2 – Etiqueta passiva RFID.....	20
Figura 3 – Comunicação entre o software de aplicação, leitor e a etiqueta	21
Figura 4 – Diagrama de bloco de um leitor RFID	21
Figura 5 – Propagação da onda no espaço na direção do eixo z.....	24
Figura 6 – Comunicação leitor-etiqueta para sistema RFID passivo em UHF.....	27
Figura 7 – Diagrama de irradiação de uma antena	29
Figura 8 – Modelo circuital de uma antena receptora conectado a carga	33
Figura 9 – Espalhamento de energia por uma antena	36
Figura 10 – Antena dipolo de meia onda.....	37
Figura 11 – Circuito e modelo equivalente da etiqueta	38
Figura 12 – Modelo 1 da antena proposta.....	39
Figura 13 – Modelo 2 da antena proposta.....	39
Figura 14 – Estrutura de antena e as suas respectivas medidas	40
Figura 15 – Perda de retorno	41
Figura 16 – Alcance máximo da antena	42
Figura 17 – Estrutura de antena com dupla fenda	42
Figura 18 – Perda de retorno da antena	43
Figura 19 – Alcance máximo.....	43
Figura 20 – Diagrama de bloco da metodologia proposta.....	45
Figura 21 – Diagrama de bloco da simulação em HFSS.....	47
Figura 22 – Fluxograma de desenvolvimento da etiqueta	48
Figura 23 – Modelo de uma antena PIFA.....	50
Figura 24 – Antena <i>microfita</i>	51
Figura 25 – Franjamento de campo elétrico.....	53
Figura 26 – Modelo de circuito simplificado	55
Figura 27 – Configuração de campo elétrico.....	56
Figura 28 – Distribuição de campo elétrico	56
Figura 29 – Proposta de antena não otimizada.....	57
Figura 30 – Variação da permissividade relativa.....	58
Figura 31 - Variação na espessura do substrato.....	59
Figura 32 – Variação na espessura do elemento radiante	60

Figura 33 – Variação na largura da fenda central	60
Figura 34 – Variação na placa de curto circuito	61
Figura 35 – Modelo inicial	62
Figura 36 – Perda de retorno (a); Alcance da antena (b)	62
Figura 37 – Modelo de antena proposto.....	63
Figura 38 – Perda de retorno do modelo proposto.....	64
Figura 39 – Impedância da antena.....	65
Figura 40 – Ganho da antena (a); Coeficiente de transmissão (b); Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) (c); Alcance máximo sem objeto metálico (d); Diagrama de irradiação de alcance máximo (e).	65
Figura 41 – Antena meander dipolo	67
Figura 42 – Perda de retorno da antena meander dipolo.....	68
Figura 43 – Perda de retorno	68
Figura 44 – Alcance máximo da antena com objeto metálico	69
Figura 45 – Alcance máximo da etiqueta com objeto metálico.....	69
Figura 46 – Alcance máximo da antena para objetos contendo líquido	70
Figura 47 – Etiqueta montada	71
Figura 48 – Interface do leitor INTERMEC.....	71
Figura 49 – Medição do alcance da antena	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características, potencial e benefícios do sistema RFID	17
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixa de frequência de operação dos sistemas RFID no Brasil.	19
Tabela 2 – Tabela de valores utilizados nas simulações	41
Tabela 3 – Características do Chip MONZA R6 da IMPINJ	55
Tabela 4 – Dimensões da etiqueta.....	63

LISTA DE SIGLAS

ASK	<i>Amplitude-Shift Keying</i>
CI	<i>Circuito Integrado</i>
CST	<i>Computer Simulation Technology</i>
EAN	<i>European Article Numbering</i>
EPC	<i>Electronic Product Code</i>
FDX	<i>Full-duplex</i>
FEM	<i>Método de Elementos Finitos</i>
FSK	<i>Frequency-Shift Keying</i>
HDX	<i>Half-duplex</i>
HF	<i>High Frequency</i>
HFSS	<i>High Frequency Structure Simulator</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ISO	<i>International Standards Organization</i>
LF	<i>Low Frequency</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
PSK	<i>Phase-Shift Keying</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
UCC	<i>Uniform Code Council</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
VSWR	<i>Voltage Standing Wave Ratio</i>
PIFA	<i>Planar Inverted F Antenna</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos	12
1.1.1 Objetivos Específicos	12
1.2 Justificativa	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 Sistema RFID	14
2.2 Um breve histórico sobre RFID	15
2.2.1 Padronização do sistema RFID	16
2.3 Comparação do sistema RFID com a tecnologia de código de barra	17
2.4 Frequência de operação do sistema RFID	18
2.5 Etiqueta RFID	19
2.6 Leitor RFID	20
3 SISTEMAS RFID PASSIVOS EM UHF	23
3.1 Comunicação sem fio	23
3.2 Acoplamento para sistema RFID em UHF	25
3.3 Modulação e Demodulação	26
3.4 Antenas para sistema RFID em UHF	27
3.6.1 Diagrama de irradiação	28
3.6.2 Ganho de uma antena.....	29
3.6.3 Polarização.....	30
3.6.4 Impedância da antena	31
3.6.5 Área efetiva de uma antena	33
3.6.6 Potência da antena	35
3.7 Antena dipolo	37
4 TRABALHOS CORRELACIONADOS	38
5 METODOLOGIA	45
5.1 Software HFSS	46
5.2 Metodologia de projeto da antena	48
6 PROJETO DE ANTENA PARA ETIQUETA RFID EM UHF	50
6.1 Dimensionamento da estrutura	51
6.2 Circuito integrado utilizado	54
6.3 Configuração de campo elétrico	55

6.4 Polarização da antena.....	56
6.5 Radiação de antena.....	56
7 ANÁLISE DE RESULTADOS	57
7.1 Resultados das variações na antena.....	57
7.1.1 Variações no substrato.....	58
7.1.2 Variações no elemento radiante (<i>patch</i>).....	59
7.1.3 Variações no componente do curto-circuito	61
7.2 Resultados do modelo proposto	61
7.2.1 Impacto do objeto metálico sobre o <i>patch</i>	67
7.2.2 Resultados das medidas com leitor.....	70
7.3 Comparação dos resultados	72
8 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	73
REFERÊNCIAS.....	75

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia muitos sistemas de comunicação foram aperfeiçoados e entre eles os sistemas de identificação. Os sistemas de identificação têm um papel relevante, principalmente na área de logística em que é preciso coletar informações contínuas de cada produto. Com o propósito de obter informações dos produtos de maneira segura e efetiva, foram desenvolvidos vários sistemas com objetivo de melhorar a coleta de informações. Entre estes sistemas, se destaca o sistema de Identificação por Rádio Frequência. O sistema RFID (*Radio Frequency Identification*) é um sistema usado para coletar informações sobre um objeto etiquetado.

Existem diferentes tipos de sistemas RFID que são diferenciados pela sua frequência de operação, alcance de identificação e fonte de alimentação da etiqueta. Dependendo das características do objeto etiquetado e da distância entre o leitor/objeto, um tipo pode apresentar melhores resultados em relação ao outro. Sistemas RFID em HF (*High Frequency*) apresentam melhores resultados de identificação de um objeto metálico em relação ao sistema RFID em UHF (*Ultra High Frequency*), e em contrapartida, o sistema RFID em UHF consegue um alcance maior de identificação em relação ao sistema RFID em HF. (BARBIN, 2015).

O sistema RFID em UHF é composto basicamente por um leitor, uma etiqueta e um computador com software adequado para processar as informações. A etiqueta contém uma antena que tem a função de transmitir e receber informações entre leitor/etiqueta, e um chip onde são armazenadas todas as informações do objeto.

As antenas desempenham um papel bastante importante para qualquer sistema de comunicação sem fio (*wireless*), pois por intermédio delas consegue-se realizar trocas de informações de um ponto para o outro. As antenas são capazes de irradiar e/ou receber ondas eletromagnéticas. Os sistemas de RFID em UHF utilizam antenas para exercer esta função de troca de informações entre o leitor e a etiqueta, e esta troca de informações torna-se mais difícil quando o objeto etiquetado contém metal ou líquido.

O presente trabalho foi estruturado em oito capítulos. No Capítulo 2 foi apresentado um estudo geral sobre sistema RFID, tipos, seu histórico e o funcionamento de cada parte deste sistema. O Capítulo 3 traz um estudo sobre sistemas de RFID passivos em UHF, abordando o tipo de comunicação empregada e

as características de antenas para este sistema. Uma breve descrição de alguns trabalhos que já abordaram o assunto do gênero é descrita no Capítulo 4. A metodologia proposta para construção de antenas que apresentam melhorias na identificação é descrita no Capítulo 5. O desenvolvimento da antena é descrito no Capítulo 6. O Capítulo 7 apresenta resultados das simulações utilizando o Software *HFSS Electronics*, medidas de desempenho das antenas propostas e discussões dos resultados. O Capítulo 8 apresenta as conclusões do trabalho.

1.1 Objetivos

Realizar um estudo de antenas usadas nos sistemas RFID em UHF e propor uma estrutura de antena que possibilite uma melhoria na leitura das informações em um objeto contendo metal ou líquido.

1.1.1 Objetivos Específicos

- a) Realizar um estudo de antenas mais usadas nos sistemas RFID em UHF;
- b) Propor uma estrutura de antena cujas características não sejam alteradas com a presença de metal ou líquido;
- c) Verificar o desempenho das antenas com a presença de um metal e líquido;
- d) Comparar os resultados obtidos por meio de simulações e medidas.

1.2 Justificativa

A melhoria dos serviços de comunicação sem fio é uma das grandes preocupações do ser humano, isto porque muitas das vezes estes serviços são afetados por ruídos e alguns outros fatores. As antenas desempenham um papel bastante importante nestes serviços, pois elas interligam uma estação emissora e receptora. Para os sistemas RFID em UHF, muitas vezes as características destas antenas são afetadas com a presença de um metal ou líquido, fazendo com que se altere a sua frequência de ressonância, redução de ganho, aumento de perdas, entre

outros. Muitas empresas que usam o sistema RFID com a finalidade de coletar informações contínuas dos seus produtos, encontram dificuldades para identificar produtos metálicos, sendo obrigados a utilizar outros métodos para a sua identificação. Para isto, houve a necessidade de propor uma estrutura de antena cujas características sejam menos alteradas com a presença de metal ou líquido. Além disso, algumas antenas existentes no mercado apresentam dimensões maiores e difíceis de anexar a um objeto menor. Para isso, procurou-se melhorar tanto a área da etiqueta como também o alcance da antena.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo traz uma abordagem de forma geral sobre os sistemas RFID, descrevendo um pouco sobre a sua constituição, os tipos, aspectos históricos e a sua padronização.

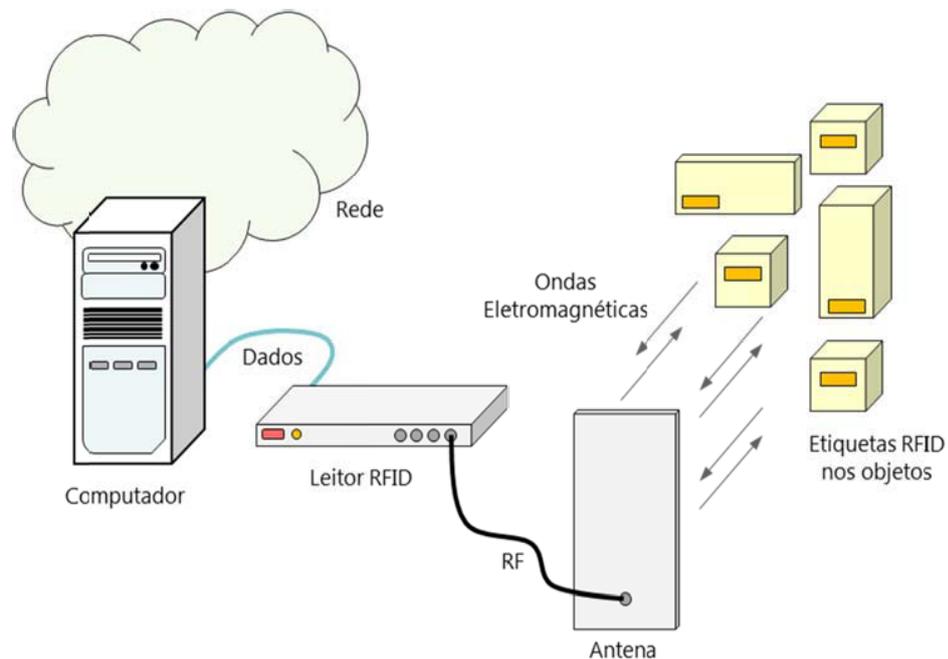
2.1 Sistema RFID

Os sistemas RFID (*Radio Frequency Identification*), conhecidos também por Identificadores por Radiofrequência, são sistemas que utilizam ondas de rádio para coletar ou armazenar informações numa etiqueta.

A base destes sistemas vem das descobertas feitas por Faraday sobre a indução mútua, isto por volta do século XIX, e das descobertas sobre as tecnologias de rádio e radar (AHSON; ILYAS, 2008).

Um sistema RFID é constituído basicamente por uma etiqueta, um leitor e um computador com software adequado para processar as informações, Figura 1. A etiqueta contém uma antena e um chip onde são armazenadas as informações a respeito do objeto a ser identificado. A alimentação do chip geralmente é provida pelo sinal RF imitado pela antena do leitor.

Figura 1 – Componentes de um sistema RFID em UHF



Fonte: (BARBIN, 2015, p. 5)

Os sistemas RFID tem uma presença bastante ativa nas áreas da logística, gerenciamento da cadeia de suprimentos, segurança da aviação, aplicações de segurança nacional, rastreamento de itens de biblioteca, implantes médicos e controle de acesso a edifícios, pois são essas principais áreas que impulsionaram a sua implementação e comercialização (AHSON; ILYAS, 2008).

Nestes sistemas, a comunicação entre o leitor e a etiqueta pode ser do tipo half-duplex (*HDX*), full-duplex (*FDX*), e sistemas sequenciais (*SEQ*). Um sistema é dito *HDX* quando a comunicação entre o leitor e a etiqueta é feita de um único sentido, ou seja, não ocorre nenhuma modulação ou codificação na parte da etiqueta quando a mesma estiver transmitindo os dados solicitados pelo leitor. Nos sistemas full-duplex, a comunicação é estabelecida nos dois sentidos. Enquanto o leitor estiver transmitindo um sinal, a etiqueta pode retransmitir ao mesmo tempo. Para implementar este tipo de comunicação nos sistemas RFID, o leitor e a etiqueta devem trabalhar em frequências diferentes para evitar a interferência entre ambos (DE SOUZA; LOUREIRO; LOPES, 2015).

Já os sistemas sequencias (*SEQ*), o sinal RF do leitor não é enviado de forma contínua, mas sim em intervalos regulares. O sinal de energia é somente enviado no momento em que os dados são enviados para o leitor (FINKENZELLER, 2010).

2.2 Um breve histórico sobre RFID

Segundo Chawla; Ha (2007), a comunicação por rádio frequência refletida (retro espalhamento) é uma tecnologia antiga e teve a sua inspiração na tecnologia de radar. Um dos exemplos da aplicação da técnica foi no sistema *Identify-Friend or Foe (IFF)*, desenvolvido na Inglaterra durante a Segunda Guerra mundial com objetivo de identificar as aeronaves amigas pelos aliados. Esta técnica consistia em usos de refletores de radar passivos sintonizados na frequência de radar local, o que tornava uma aeronave amigável muito mais brilhante que as aeronaves inimigas.

O primeiro trabalho relacionado com o sistema RFID foi publicado por Stockman em outubro de 1948, que tratava da modulação contínua do tempo dos sinais refletidos. A descoberta foi realizada enquanto trabalhava no Air Materiel Command em Massachusetts, onde projetou um dispositivo que modula a voz humana em sinais de luz refletidos (CHAWLA; HA, 2007, apud H. Stockman, Oct. 1948, pp. 1196–204).

De acordo com o Chawla; Ha (2007), a década de 1960 e 1970 foi um período marcado pelo interesse da comunidade científica nas pesquisas sobre o sistema RFID. Em julho de 1963, o Richardson desenvolveu e patenteou um transponder (etiqueta) RFID passivo, que consistia em acoplar e retirar a energia do campo eletromagnético de um interrogador e transmitir a informação requisitada em uma harmônica da frequência do sinal recebido. Na mesma década, Jorgen Vinding desenvolveu um sistema simples e barato, que foi patentado nos Estados Unidos em 1967. O sistema consistia em identificar objetos por acoplamento indutivo entre o leitor e a etiqueta (CHAWLA; HA, 2007).

Ainda na mesma década, nos finais dos anos 60, foram comercializados sistemas antifurto, que utilizavam as ondas de rádio para detectar se o cliente pagou o produto, ou se este foi roubado. O sistema utilizava apenas 1 bit de informação, que assumia o valor 0 se o produto foi pago ou valor 1 se não for. Estes sistemas são utilizados até hoje e são chamados de “etiqueta de vigilância eletrônica”. (BARBIN, 2015).

2.2.1 Padronização do sistema RFID

Nos anos 90 houve a necessidade de padronização dos sistemas RFID devido ao seu aumento no uso comercial. A maioria dos trabalhos de padronização foram conduzidas pela International Standards Organization (ISO) e pela International Electrotechnical Commission (IEC) (CHAWLA; HA, 2007). Essas duas instituições atuaram juntas na padronização dos sistemas RFID. A ISO é uma instituição voltada para a criação de normas para produtos e processos de industrialização, e a IEC está mais voltada para indústria eletroeletrônica.

O primeiro padrão criado pela ISO foi a ISO/IEC 18000-6: 2004, que estabelecia parâmetros para comunicação de interface aérea que operam na faixa de 860 a 960 MHz reservada para fins Industriais, Científicas e Médicas. Este padrão fornecia instruções técnicas sobre os dispositivos RFID (ISO, 2004). No ano de 1999, foi adotada uma faixa de frequência em UHF para sistema RFID pela EAN (*European Article Numbering*) International e pelo UCC (*Uniform Code Council*) dos Estados Unidos, que atualmente são conhecidos por GS1 e criaram o Auto-ID Center no MIT (*Massachusetts Institute of Technology*). Estas organizações foram responsáveis por criar padrões globais de RFID para as etiquetas, o chamado de EPC (*Electronic*

Product Code). Posteriormente, o Auto-ID evoluiu para Auto-ID Labs e o EPC para EPCglobal Inc (CHAWLA; HA, 2007). O EPC é um código proposto para substituir o código de barra, contendo uma série com 64, 96 ou 256 bits. (DE SOUZA; LOUREIRO; LOPES, 2015)

2.3 Comparação do sistema RFID com a tecnologia de código de barra

O Código de barra é uma das tecnologias de identificação mais bem-sucedidas nos últimos anos, isto devido a sua facilidade de implementação, agilidade na leitura das informações do produto e custo reduzido no mercado. É um código binário que consiste na configuração paralela de barras com uma alternância entre elas, que podem ser interpretadas numericamente e alfanumericamente (FINKENZELLER, 2010).

Cada um dos sistemas apresenta as suas vantagens e desvantagens. Para implementação em locais onde é necessário obter informações em um tempo contínuo dos produtos que entram e saem de um estabelecimento à uma distância considerável e ter um maior controle sobre eles, o uso do sistema RFID em UHF é aconselhável. Caso não se necessite obter as informações em tempo real e a uma distância maior, é indicado o uso de código de barra. O Código de barras ainda apresenta um custo de implementação menor comparando com o sistema RFID em UHF. O Quadro 1 traz características, potenciais e benefícios do sistema RFID.

Quadro 1 – Características, potencial e benefícios do sistema RFID

Características	Potencial operacional	Benefícios
Não requer campo de visão	Processos automatizados	Redução dos custos de mão-de-obra para leituras manuais
Evitar que um item não seja lido	A rede de leitores consegue identificar cada um dos itens automaticamente	Maiores níveis de precisão de inventário. Possibilita a rastreabilidade, o que é difícil com códigos de barras normais
Capacidade de dados	Permite informações adicionais sobre um item (lote, validade...)	Menor necessidade de integração de sistemas internos. Melhor granularidade dos dados.

		Maiores níveis de rastreabilidade e visibilidade dos produtos
Capacidade de regravação	As etiquetas podem ser utilizadas como banco de dados portáteis	Menor integração de sistemas. Redução no armazenamento de dados
Velocidade de leitura	Maiores velocidades de leitura, dado pelo fato de que itens são lidos simultaneamente	Eliminação de processos manuais e trabalho devido a leituras repetitivas.
Durabilidade	Etiquete ativos ou itens retornáveis permanentemente	Elimina tempo envolvido nos processos de reetiquetagem

Fonte: (GS1, 2016)

2.4 Frequência de operação do sistema RFID

As características mais importantes de um sistema RFID são a sua faixa de frequência de operação e o seu alcance de transmissão. A faixa de frequência de operação representa a frequência com que o leitor transmite (FINKENZELLER, 2010). Os sistemas RFID mais comuns operam na faixa de LF (*Low Frequency*), HF (*High Frequency*), UHF (*Ultra High Frequency*) e micro-ondas. A faixa LF que abrange as frequências de 30 KHz a 300 KHz possuem alcance inferior de aproximadamente 0,5 metros, com uma velocidade de transferência de dados inferior a 1 Kbit/s. Os sistemas que atuam nesta faixa de operação apresentam facilidades de penetração em substâncias líquidas e não metálicas. São bastantes usados na identificação de animais e controle de acesso (DE SOUZA; LOUREIRO; LOPES, 2015).

Os sistemas RFID atuando na faixa HF possui um alcance maior em relação a faixa de LF, de aproximadamente 1,5 metros, numa faixa de frequências de 3 MHz a 30 MHz, com uma velocidade de transferência de dados de aproximadamente 25 Kbits/s. Possuem facilidades na penetração em elementos metálicos. Muito usado em bagagens aéreas, produtos e controle de acesso. (DE SOUZA; LOUREIRO; LOPES, 2015).

A faixa UHF abrange a faixa de frequência de 300 MHz a 1 GHz, com uma velocidade de transferência de dados de 30Kbits/s com um alcance de pouco mais de 100 metros. Para o melhor funcionamento dos sistemas RFID nesta faixa, é

necessário que haja um caminho livre entre o leitor e a etiqueta devido as dificuldades que apresentam em penetrar um material. São muito utilizados em logística e rastreamento de animais. (DE SOUZA; LOUREIRO; LOPES, 2015).

E por fim, a faixa de micro-ondas que possuem um alcance de aproximadamente 30 metros, com uma banda de 1GHz a 300 GHz, operando numa velocidade de até 1 Mbits/s. Muito usados na identificação de veículos em movimento (DE SOUZA; LOUREIRO; LOPES, 2015). Os sistemas RFID de faixa LF e HF funcionam com base nos princípios de acoplamento indutivo ou capacitivo entre a antena do leitor e da etiqueta. Já os sistemas RFID de faixa UHF e micro-ondas, que atuam em distâncias maiores, onde a comunicação entre o leitor e a etiqueta é feita por ondas de rádio. (BARBIN, 2015). As faixas de frequência de operação dos sistemas RFID no Brasil são mostradas na Tabela 1

Tabela 1 – Faixa de frequência de operação dos sistemas RFID no Brasil.

LF (MHz)	HF (MHz)	UHF (MHz)	Micro-ondas (MHz)
0,12 - 0,14	13,11 - 13,36	433,5 - 434,5	2.400 - 2.483,5
	13,41 - 14,01	860 - 869	5.725 - 5.850
		894 - 898,5	
		902 - 907,5	

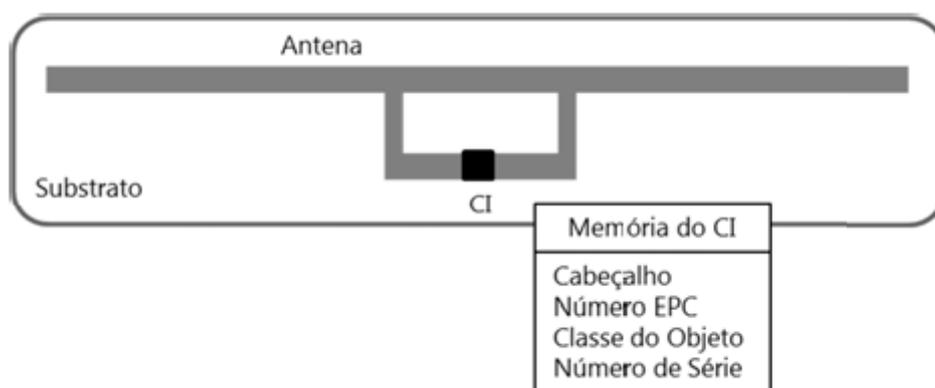
Fonte: (TELECO, 2015)

2.5 Etiqueta RFID

Uma etiqueta RFID é composta por uma antena e um circuito integrado (CI) onde é armazenado um código EPC (*Electronic Product Code*). As etiquetas são classificadas de acordo com a alimentação do CI e sua memória. Quanto a alimentação do CI, as etiquetas podem ser do tipo ativa, semipassiva e passiva. As etiquetas ativas possuem a sua própria fonte de alimentação e alcançam distâncias maiores de identificação comparado com a passiva e semipassiva. As etiquetas ativas apresentam um custo de mercado muito elevado, as dimensões da etiqueta muito maior e o tempo de vida curto, isto porque o tempo de vida é dependente do tempo de vida da bateria (DE SOUZA; LOUREIRO; LOPES, 2015). As semipassivas são intermediárias entre as ativas e as passivas, isto porque o uso de bateria é apenas para alimentação do CI e não para gerar um novo sinal RF para o leitor (GODOY,

2018). Já as passivas não possuem nenhuma fonte de alimentação interna e a sua alimentação é feita por meio de ondas eletromagnéticas emitidas pela antena do leitor. As etiquetas passivas possuem alcance menor comparando com os outros tipos, dimensões menores, menor custo de mercado e tempo de vida alto (DE SOUZA; LOUREIRO; LOPES, 2015). As características das antenas das etiquetas passivas, como ganho, impedância, entre outros, são bastante afetadas quando o objeto etiquetado contém líquido ou metal. A Figura 2 mostra uma etiqueta RFID passiva e os componentes que a compõem.

Figura 2 – Etiqueta passiva RFID



Fonte: (BARBIN, 2015)

Quanto a memória, as etiquetas podem ser do tipo *Read Only (RO)*, *Write Once Read Many (WORM)* e *Read-Write (RW)*. A memória das etiquetas RO é apenas para leitura. Após a gravação, as informações armazenadas nela são inalteráveis. A memória WORM apresenta características diferentes comparando com a RO, pois ela possibilita a codificação dos identificadores. A memória pode ser codificada uma única vez e lida diversas vezes. Na prática, as etiquetas em questão podem ser reprogramadas mais de uma vez, mas há maior probabilidade de danificar permanentemente a memória da etiqueta. Já a etiqueta do tipo RW, elas são as mais versáteis. Podem ser reprogramadas cada vez que for necessária. (DE SOUZA; LOUREIRO; LOPES, 2015).

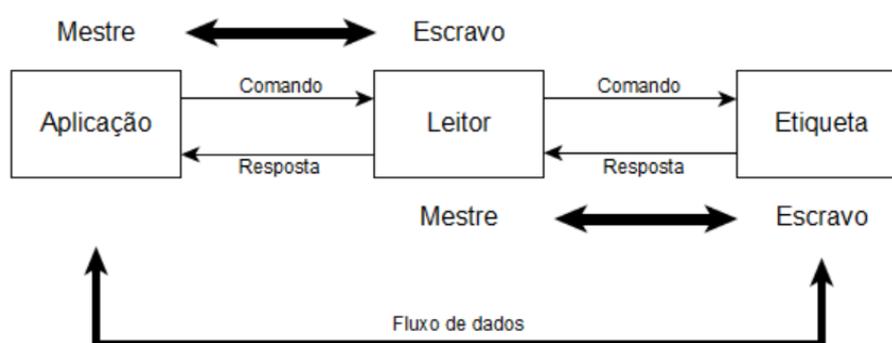
2.6 Leitor RFID

Os leitores RFID, também conhecidos como interrogadores, são dispositivos intermediários entre o sistema de processamento das informações (computador) e a

etiqueta. Eles são responsáveis pela energização das etiquetas passivas. De acordo com Finkenzeller (2010), os leitores RFID têm a função de ativar a etiqueta, estruturar a sequência de comunicação com a etiqueta e transferir dados entre a etiqueta e o software de aplicação.

O processo de comunicação entre o leitor e a etiqueta é iniciado por um software de aplicação. O processo de gravação e leitura de dados são realizados com base no princípio mestre-escravo, onde o software de aplicação representa o mestre e o leitor como escravo (FINKENZELLER, 2010). A Figura 3 mostra a sequência de comunicação entre o software de aplicação, leitor e a etiqueta.

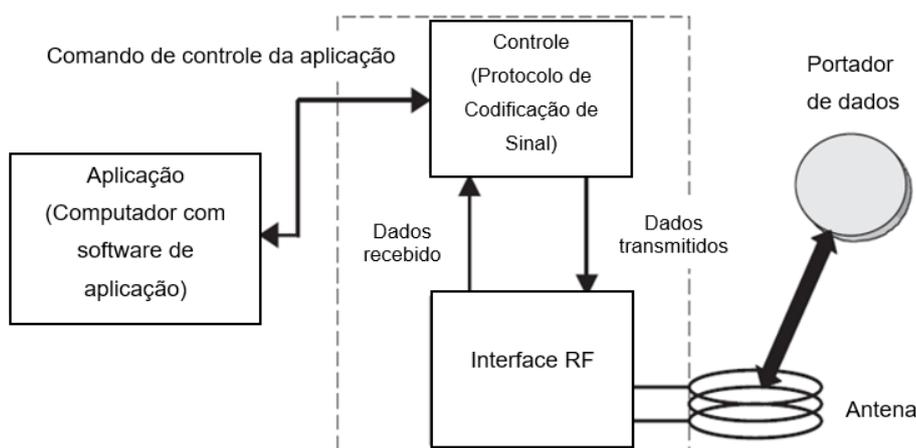
Figura 3 – Comunicação entre o software de aplicação, leitor e a etiqueta



Fonte: (FINKENZELLER, 2010)

Segundo Finkenzeller (2010), os leitores basicamente são constituídos por dois blocos principais: o sistema de controle e a interface RF, consistindo de um transmissor e um receptor, Figura 4.

Figura 4 – Diagrama de bloco de um leitor RFID



Fonte: (FINKENZELLER, 2010).

O sistema de controle do leitor tem a função de efetuar a comunicação com o software de aplicação e executar os comandos da mesma; controle de comunicação com a etiqueta; codificação e decodificação de sinais (FINKENZELLER, 2010).

A interface de RF do leitor tem a função de gerar a potência de transmissão, ativar e fornecer energia para a etiqueta; modular o sinal de transmissão; recepção e demodulação de sinais de RF vindo da etiqueta (FINKENZELLER, 2010).

3 SISTEMAS RFID PASSIVOS EM UHF

No capítulo anterior fez-se uma abordagem geral sobre o sistema RFID. Neste capítulo abordaremos especificamente os sistemas RFID passivo em UHF, como o seu funcionamento, a modulação empregada, características das antenas, entre outros aspectos.

3.1 Comunicação sem fio

O conhecimento de aspectos relacionados a comunicação sem fio é bastante importante, pois é o meio pelo qual os sistemas RFID em UHF operam. A ANATEL (2011) define a comunicação como sendo a “transferência unilateral ou bilateral de informação por meio de sinais convencionados”. Essa transferência é efetuada sem uso de nenhum cabo. As aplicações da comunicação sem fio encontram-se em muitos dispositivos e tecnologias usados atualmente, como: celulares, rádios, sistemas de Bluetooth, Wi-Fi, televisão, GPS, etc.

Saunders e Zavala (2007) afirmam que uma corrente variável gera um campo magnético variável. Do mesmo modo, um campo magnético variável gera um campo elétrico também variável. Este ciclo se repete ao longo do tempo formando assim onda eletromagnética. Estas ondas constituem os sistemas de comunicação sem fio, que foram previstas em 1865 pelo físico James Clerk Maxwell e depois observados pelo físico Heinrich Hertz em 1887. (TANENBAUM, 2003). As equações de Maxwell apresentam duas constantes que influenciam nas intensidades do campo, são elas: permeabilidade do meio μ (equação 3.1) e a constante de permissividade do meio ε (equação 3.2).

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (3.1)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad (3.2)$$

Onde:

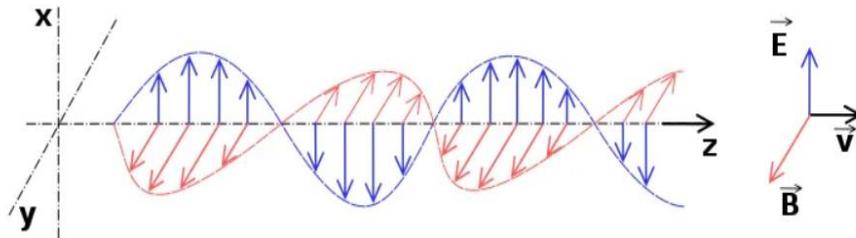
$$\mu_0 \rightarrow \text{Permeabilidade no vácuo: } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\varepsilon_0 \rightarrow \text{Permissividade no vácuo: } \varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\varepsilon_r \text{ e } \mu_r \text{ são os valores relativos. No vácuo, } \varepsilon_r = \mu_r = 1$$

Os campos elétricos e magnéticos se propagam perpendicularmente uma da outra na direção do eixo z. O vetor nesta direção é denominado de vetor de propagação ou vetor Poynting. (SAUNDERS; ZAVALA, 2007). A Figura 5 mostra uma onda se propagando pelo espaço na direção do eixo z.

Figura 5 – Propagação da onda no espaço na direção do eixo z.



Fonte: (WIKIWAND, 2011)

O vetor de Poynting (\mathcal{S}) representa a densidade de potência que descreve a concentração de potência numa determinada direção no espaço. É definido pela equação 3.3.

$$\mathcal{S} = \mathcal{E} * \mathcal{H} \quad (3.3)$$

Onde:

$\mathcal{S} \rightarrow$ Vetor de Poynting instantâneo (W/m^2)

$\mathcal{E} \rightarrow$ Intensidade de campo elétrico instantâneo (V/m)

$\mathcal{H} \rightarrow$ Intensidade de campo magnético instantânea (A/m)

O valor médio de tempo do fluxo de energia durante um período é dado pela equação 3.4.

$$S_{méd} = \frac{1}{2} Re[E * H^*] (W/m^2) \quad (3.4)$$

O valor 1/2 é usado para converter os valores de pico dos campos H e E para valores RMS. A potência média radiada é dada pela equação 3.5.

$$P_{rad} = \iint_S S_{med} \cdot ds = \iint_S Re(E * H^*) \cdot ds \quad (3.5)$$

As ondas eletromagnéticas se propagam no espaço em forma de oscilações. Este número de oscilações por segundo é denominado frequência (f) e dado em Hertz (Hz) (TANENBAUM, 2003). E a distância de uma volta completa é denominada de comprimento de onda (λ) e medida em metros (m). Estas ondas viajam na velocidade da luz, que é aproximadamente $3.10^8 m.s^{-1}$. A relação entre o comprimento de onda, a frequência e a velocidade de propagação no vácuo é dada pela equação 3.6.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.6)$$

Onde:

λ → Comprimento de onda em metros (m);

c → Velocidade da luz em metros por segundo ($m.s^{-1}$);

f → Frequência dada em Hertz (Hz)

3.2 Acoplamento para sistema RFID em UHF

O acoplamento determina a forma como as informações e energia são enviadas e recebidas entre o circuito da etiqueta e do leitor. Ele pode ser do tipo indutivo, magnético, capacitivo e difuso de retorno. Para o sistema RFID passivo em UHF, nos interessa apenas o tipo de acoplamento por difuso de retorno, pois apresenta melhores resultados nesta faixa de frequência. O acoplamento difuso de retorno descreve a forma como as ondas eletromagnéticas enviadas pelo leitor são difundidas pela etiqueta e retornadas novamente para o leitor. (GLOVER; BHATT, 2007).

Glover e Bhatt (2007) trazem uma ilustração para explicar como este tipo de acoplamento funciona. Considere um espelho e uma lanterna, a lanterna incide uma luz sobre o espelho e o espelho retorna esta mesma luz, mas com uma intensidade menor quando comparado com a luz incidida. Se no espelho existisse uma célula fotoelétrica capaz de gerar a energia a partir da luz da lanterna, e esta energia fosse utilizada para alimentar algo próximo ao espelho. É exatamente como funciona o acoplamento difuso de retorno para etiquetas passiva, onde a lanterna representa a antena do leitor, o espelho a antena da etiqueta e o material próximo ao espelho representa o CI. Uma característica muito importante para este tipo de acoplamento é

a não alteração da frequência do envio e retorno de ondas de RF entre o leitor e a etiqueta.

Como o envio e o retorno das ondas eletromagnética entre a antena do leitor e da etiqueta é efetuado na mesma frequência, para que não haja interferência entre as ondas incididas e refletidas, a etiqueta não realiza nenhum processo de demodulação e decodificação dos comandos enviados pelo leitor quando ela estiver enviando os dados primeiramente solicitados pelo leitor. Neste caso, para que não haja alteração da frequência, a modulação por desvio de amplitude (*ASK*) ou a modulação por desvio de fase (*PSK*) são os tipos possíveis de modulações usadas por retroespalhamento (GLOVER; BHATT, 2007).

3.3 Modulação e Demodulação

A modulação consiste em alterar as características de uma portadora a partir das variações da modulante. A modulante representa a informação a ser transmitida e a portadora representa um sinal de alta frequência responsável por transportar estas informações (GOMES, 2007). O sinal modulante pode ser analógico ou digital, e o mesmo para a portadora.

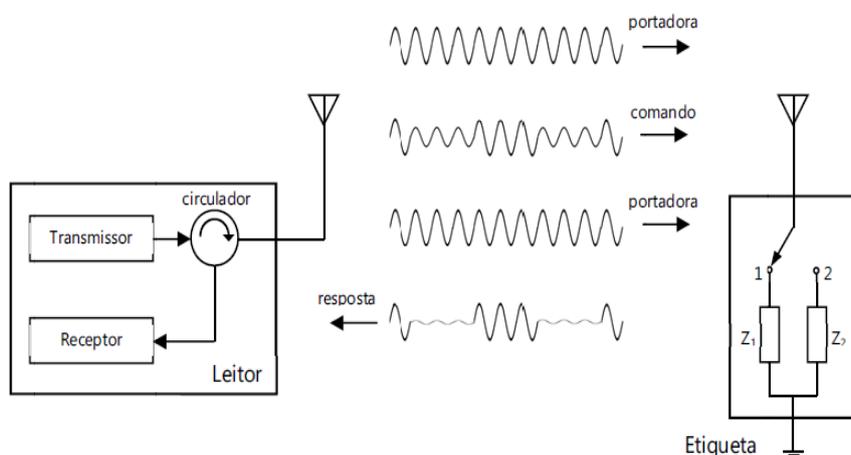
No nosso caso, nos concentraremos em sinais modulantes digitais e portadoras analógicas. Isto porque os dados a serem transmitidos são digitais e a portadora analógica porque somente este tipo pode ser irradiado com eficiência sob forma de ondas eletromagnéticas.

Existem basicamente três tipos de modulações digitais:

- Modulação por alteração da amplitude (*ASK*);
- Modulação por alteração de frequência (*FSK*);
- Modulação por alteração de fase (*PSK*).

A modulação *ASK* consiste na modificação da amplitude da portadora analógica devido a variações de estado lógico do sinal modulante. A modulação *FSK* consiste na modificação da frequência da portadora analógica conforme as variações de estado lógico do sinal modulante. Já a modulação *PSK* consiste na modificação da fase da portadora analógica conforme as variações de estado lógico do sinal modulante. Como foi visto, O sistema RFID passivo em UHF utiliza as modulações *ASK* e *PSK* por retroespalhamento. A Figura 6 mostra como opera o sistema RFID passivo em UHF.

Figura 6 – Comunicação leitor-etiqueta para sistema RFID passivo em UHF



Fonte: (BARBIN, 2015)

Antena do leitor envia uma portadora, modulada ou não, de forma contínua para a etiqueta durante a comunicação. Esta portadora gera uma diferença de potencial nos terminais da antena da etiqueta para alimentar o CI. O leitor envia um comando, codificado e modulado solicitando informações a etiqueta. A etiqueta responde através de chaveamento de impedância do CI. Essas impedâncias possuem valores diferentes. Quando conectado com a impedância de menor valor, reflete o sinal do leitor com uma alta amplitude, e quando conectado com a impedância de maior valor reflete uma baixa amplitude. Estas alterações criam um sinal modulado que será transmitido para o leitor. O leitor demodula o sinal recebido que contém as informações solicitadas (BARBIN, 2015).

3.4 Antenas para sistema RFID em UHF

Os sistemas RFID em UHF precisam de uma antena para transmissão e recepção de ondas eletromagnéticas, para o envio e recebimento de dados entre o leitor e a etiqueta, entre outras utilidades. ANATEL (2011) define antena como sendo um dispositivo capaz de radiar ou captar ondas eletromagnéticas no espaço. Dependendo da aplicação, as antenas podem ser do tipo ressonante e não ressonante.

As antenas ressonantes são aquelas que trabalham numa faixa de frequência estreita, ou seja, são sintonizadas para operarem numa frequência específica. Já as

não-ressonantes atuam numa faixa de frequência de operação ampla. A construção de antena é um processo bastante crítico porque não existe uma antena genérica para qualquer sistema. O desempenho de uma antena depende de vários fatores. Cada antena é construída para um sistema específico, levando sempre em consideração a frequência de operação do sistema, o ganho exigido, a impedância característica do sistema, o tipo de polarização e o diagrama de irradiação desejado. Um projeto bem elaborado de antena, colabora para o melhor funcionamento do sistema todo e relaxa outros requisitos do sistema. Dependendo da necessidade, as antenas podem assumir diferentes formatos, tais como de um fio condutor, uma abertura, uma plaqueta (*patch*), um agrupamento de elementos (conjunto), um refletor, uma lente, entre outros. (BALANIS, 2014).

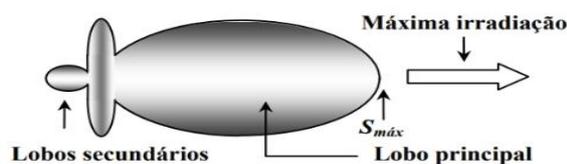
3.6.1 Diagrama de irradiação

O diagrama de irradiação é uma função matemática de representação gráfica que fornece as informações sobre a intensidade de radiação, diretividade, densidade de fluxo de potência, intensidade de campo e fase ou polarização de uma antena. Ele nos mostra como a energia irradiada pela antena se distribui no espaço. Essa distribuição é representada em função de coordenadas espaciais. (BALANIS, 2014).

A determinação do diagrama de irradiação é feita na região do campo distante. Esta região é conhecida como a região de Fraunhofer, e representa a região mais distante da antena. A região é estabelecida para distâncias maiores que $2D^2/\lambda$, onde D representa a dimensão da antena e λ o comprimento de onda. (BALANIS, 2014).

Diagrama de irradiação é formado por lóbulos (ou lobos), onde cada um deles representa a intensidade de irradiação de energia numa determinada direção no espaço. Elas são classificadas como lóbulo principal e lóbulos secundários. Os lóbulos secundários podem ser do tipo traseiro e lateral. Eles representam a irradiação de energia em direções indesejadas. (BALANIS, 2014). A Figura 7 apresenta um formato de diagrama de irradiação de uma antena, onde $S_{m\acute{a}x}$ representa a densidade máxima potência.

Figura 7 – Diagrama de irradiação de uma antena



Fonte: (RIBEIRO, 2012).

Quanto mais estreito o lóbulo principal, maior a diretividade da antena na direção da máxima irradiação. (RIOS; PERRI, 2002). A diretividade de uma antena é a razão entre a intensidade de radiação de uma antena a uma dada direção e a intensidade de radiação média. (BALANIS, 2014), como mostrado na equação 3.7.

$$D = \frac{U}{U_0} \quad (3.7)$$

Onde:

D → Diretividade (*adimensional*)

U → Intensidade de radiação de uma antena (*W/unidade de ângulo sólido*)

U_0 → Intensidade de radiação média ou intensidade de radiação de uma fonte isotrópica (*W/unidade de ângulo sólido*)

Normalmente, são usadas antenas isotrópicas como referência para comparar com as propriedades de antenas reais. (RIOS; PERRI, 2002). Uma antena isotrópica é uma antena ideal (ou seja, não existe na prática) que irradia a potência igualmente em todas direções. (BALANIS, 2014).

3.6.2 Ganho de uma antena

O ganho de uma antena é um parâmetro importante no projeto de construção de uma antena, pois nos fornece as informações sobre a relação da eficiência e da diretividade de uma antena. (BALANIS, 2014). Segundo Junior (2006), “O Ganho é o nível de amplificação de sinal que uma antena vai acrescentar ao leitor de RFID para fazer com que o sinal de RF alcance a tag (etiqueta) com níveis suficientes para atender as necessidades do sistema.”

Quanto maior for o ganho, maior será a distância de alcance entre o leitor e a etiqueta. O ganho de uma antena é dado em decibel (dB). As antenas mais utilizadas nos sistemas RFID possuem um ganho de aproximadamente 6 dB. (JUNIOR, 2006). Na maioria dos casos, o ganho de uma antena é obtido a partir de uma antena de referência com a potência conhecida, que é uma fonte isotrópica sem perda. (BALANIS, 2014). Ele é dado pela equação 3.8.

$$Ganho = 4\pi \frac{U}{P_{in}} \quad (3.8)$$

Onde:

P_{in} → Fonte isotrópica sem perda (W)

3.6.3 Polarização

Nos sistemas RFID passivo em UHF, a polarização também é um parâmetro muito importante, pois está diretamente ligada com a distância máxima de alcance entre o leitor e a etiqueta. Uma antena pode ser polarizada horizontalmente e verticalmente. A forma como é polarizada é definida pela posição do vetor campo elétrico E_x e E_y . Quando o vetor campo elétrico estiver na posição horizontal a polarização de antena é horizontal e quando estiver na vertical a polarização da antena é vertical (RIOS; PERRI, 2002).

Existem três principais tipos de polarização: linear, circular e elíptica. Uma polarização é denominada linear quando a orientação do vetor campo elétrico ou magnético é direcional ao longo de uma linha reta. Este tipo de polarização é estabelecido somente se uma ou duas componentes perpendiculares se propagam numa diferença de fase de 180° entre si. (Figura 5). (BALANIS, 2014).

A polarização linear apresenta algumas vantagens comparado com as outras, isto devido a concentração da maior parte energia RF na direção da antena da etiqueta. Para isto, a antena do leitor e da etiqueta devem estar orientados, o que as vezes dificulta a leitura, oferecendo desvantagem. Este tipo de polarização é usado para antenas de formato físico retangular. Diferente da polarização linear, a polarização circular apresenta menor concentração de energia RF na antena da etiqueta, mas em compensação não depende da orientação da antena da etiqueta. Na maioria dos casos, este tipo de polarização é característico de antenas de formato

físico quadradas ou circulares. (JUNIOR, 2006). A polarização elíptica é basicamente a polarização linear e circular, ou seja, a elipse se torna uma linha reta ou um círculo ao longo da sua variação (BALANIS, 2014). Segundo Barbin (2015), quando não se usa o mesmo tipo de polarização para o leitor e a etiqueta, resulta numa redução de distância de alcance de aproximadamente 70 % comparando com daquelas que as polarizações são coincidentes.

3.6.4 Impedância da antena

Nos sistemas RFID em UHF, a impedância de uma antena é responsável pela eficiência de transferência de potência entre a antena e o chip numa etiqueta. A impedância de entrada de uma antena é definida como sendo a impedância que uma antena apresenta à sua fonte transmissora. A sua determinação depende de vários fatores, entre eles o formato físico da antena, a frequência de operação do sistema, o material da antena, entre outros. (TELECO, 2018). A impedância da antena (Z_A) é expressa pela equação 3.9.

$$Z_A = R_A \pm jX_A \quad (3.9)$$

Onde:

Z_A → Impedância da antena em ohm (Ω)

R_A → Resistência da antena em ohm (Ω)

X_A → Reatância da antena em ohm (Ω)

A resistência da antena é dada pela equação 3.10.

$$R_A = R_r + R_{loss} \quad (3.10)$$

Onde, R_r é a resistência de radiação, e R_{loss} é a resistência das perdas na estrutura da antena.

Para os sistemas RFID passivo em UHF, a antena da etiqueta deve ser dimensionada para captar a maior potência transmitida pelo leitor que será usada para alimentar o CI e retro espalhar a mesma de maneira eficiente (BARBIN, 2015).

Para o CI conseguir captar a maior potência transmitida pela antena, deve se efetuar um processo chamado casamento de impedâncias. O casamento de impedância consiste em aproximar o valor da impedância do transmissor com o complexo conjugado da impedância do receptor a fim de obter uma baixa perda por reflexão. Neste caso, a antena se comporta como transmissor de potência e o chip como receptor. A perda por descasamento de impedância é dada pela equação 3.11.

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_A^*}{Z_L + Z_A} \quad (3.11)$$

Onde:

Γ → Coeficiente de reflexão (adimensional)

Z_A → Impedância da antena da etiqueta em (Ω)

Z_A^* → Complexo conjugado da impedância da antena da etiqueta em (Ω)

Z_L → Impedância da carga (chip) em (Ω)

Normalmente, a impedância Z_L é complexa, o que leva um coeficiente de reflexão complexa. A onda incidente e a onda refletida ao se propagarem no meio, produzem uma onda estacionária. E a relação entre a máxima e a mínima tensão da onda estacionária é denominada de coeficiente de onda estacionária de tensão, dado pela equação 3.12.

$$VSWR = \frac{V_{m\acute{a}x}}{V_{m\acute{i}n}} = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (3.12)$$

O $V_{m\acute{a}x}$ ocorre quando a tensão da onda incidente e da onda refletida se somam por estarem em fase. Já o $V_{m\acute{i}n}$ ocorre quando as duas tensões se encontram defasadas e subtraem-se uma da outra. O valor mínimo de VSWR é 1:1, que significa que não há reflexão do sinal enviado devido a descasamento de impedância. Na prática, é quase impossível conseguir um VSWR de 1:1.

3.6.5 Área efetiva de uma antena

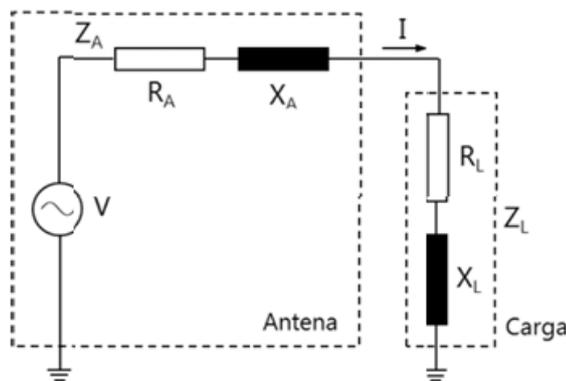
Quando uma antena atua como receptor, o conhecimento da área efetiva é bastante importante. Segundo Balanis (2014), “A área efetiva é usada para determinar a potência entregue à carga, a qual, sob casamento conjugado, é apenas a metade da potência capturada; a outra metade é espalhada e dissipada como calor”. Ela é dada pela equação 3.13.

$$A_e = \frac{P_L}{S_i} \quad (3.13)$$

Onde, P_L é a potência entregue a carga, e S_i é a densidade de potência de onda incidente na antena.

A Figura 8 mostra o circuito equivalente de uma antena receptora, onde $Z_A = R_A + jX_A$ é a impedância da antena, $Z_L = R_L + jX_L$ impedância da carga (chip) e V é a tensão induzida gerada a partir do sinal RF do leitor. (BARBIN, 2015). A tensão induzida é dependente das dimensões da antena.

Figura 8 – Modelo circuital de uma antena receptora conectado a carga



Fonte: (BARBIN, 2015)

A corrente do circuito é dada pela equação 3.14.

$$I = \frac{V}{Z_A + Z_L} \quad (3.14)$$

A partir da corrente do circuito, pode-se determinar a potência dissipada pela carga, que é dada pela equação 3.15.

$$P_L = \frac{1}{2} R_L |I|^2 \quad (3.15)$$

Quando há casamento de impedância entre a antena e a carga, ou seja, quando $Z_L = Z_A^*$, a corrente será dada pela equação 3.16.

$$I = \frac{V}{2R} \quad (3.16)$$

Segundo Balanis (2014), a área efetiva da antena receptora A_e está relacionada com a eficiência de radiação e_r e a diretividade D_r , e é dada pela equação 3.17.

$$A_e = e_r D_r \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right) = G_r \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right) \quad (3.17)$$

Onde G_r é o ganho da antena receptora

Assim, a potência máxima em função do ganho da antena é dada pela equação 3.18, que é a equação de Friis:

$$P_{Lm\acute{a}x} = P_{Am\acute{a}x} = \frac{|V|^2}{8R} = G_r \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right) S_i \quad (3.18)$$

A corrente pode ser expressa em função do coeficiente de reflexão de potência (equação 3.19).

$$I = \frac{V}{2R_A} (1 - \Gamma) \quad (3.19)$$

Quanto menor for o coeficiente de reflexão, maior é a área efetiva e conseqüentemente maior potência entregue à carga. Para sistemas RFID em UHF, um dos objetivos principais é conseguir um coeficiente de reflexão muito baixo ou praticamente zero para obter uma potência máxima na carga.

3.6.6 Potência da antena

As potências transmitida e recebida entre o leitor e a etiqueta são dadas em função da distância entre eles. Considerando a equação de transmissão de Friis, para uma antena não isotrópica, a densidade de potência a uma distância R é dada pela equação 3.20.

$$S_i = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \quad (3.20)$$

Relacionando as equações 3.18 e 3.20, temos a potência entregue à carga (equação 3.21).

$$P_L = P_r = \frac{\lambda^2}{(4\pi R)^2} P_t G_t G_r \quad (3.21)$$

Onde, P_t é a potência transmitida pelo leitor, G_t é o ganho do leitor e R é a distância entre o leitor e a etiqueta.

A partir da equação 3.21, isolando o R , chegamos a equação de alcance máximo da antena no espaço livre (equação 3.22).

$$R = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t G_t G_r}{P_r}} \quad (3.22)$$

Onde $P_t G_t$ correspondem a potência equivalente irradiada isotropicamente (Equivalent Isotropically Radiated Power – EIRP) e P_r é a potência recebida pela antena. Nos sistemas RFID em UHF, P_r corresponde a potência mínima necessária para fornecer energia para chip. Normalmente este valor é fornecido pelo fabricante do chip.

Considerando as perdas causadas por descasamento de impedância, a equação 3.22 será dada em função do coeficiente de transmissão. (FERREIRA et al., 2017).

$$R = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \tau}{P_r}} \quad (3.23)$$

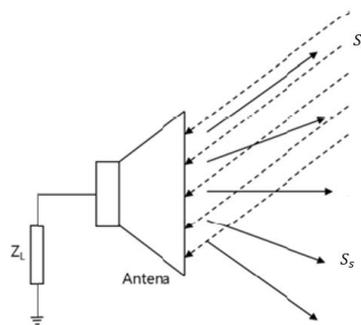
$(1 - |\Gamma|^2) = \tau$ é o coeficiente de transmissão.

A potência recebida pelo leitor é determinada a partir da equação de seção reta radar de uma antena. Balanis (2014) define a seção reta radar (σ) de uma antena como “a área que intercepta uma quantidade de potência, que quando espalhada isotropicamente, produz no receptor uma densidade de potência igual àquela espalhada pelo alvo”. Ela é dada pela equação 3.24.

$$\sigma = \frac{4\pi r^2 S_s}{S_i} \quad (3.24)$$

Onde: S_s é a densidade de potência espalhada, R é a distância entre o leitor e a etiqueta e S_i é a densidade de potência incidente. A Figura 9 mostra uma antena que espalha energia após ser incidida por uma densidade de potência, gerando assim uma densidade de potência espalhada.

Figura 9 – Espalhamento de energia por uma antena



Fonte: (BARBIN, 2015)

Com isso, a potência recebida pelo leitor (P_{RL}) é dada pela equação 3.25.

$$P_{RL} = \sigma \frac{P_t G_{RL} G_t \lambda^2}{4\pi} \left(\frac{\lambda}{4\pi r^2} \right)^2 \quad (3.25)$$

Onde: G_{RL} é o ganho da antena de recepção do leitor, em geral, igual a G_t .

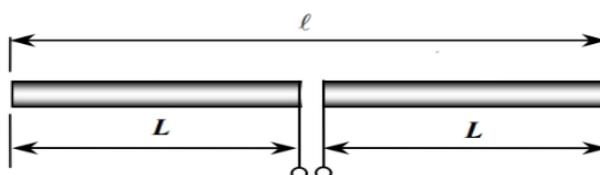
$$RL = -20\log |\Gamma| \quad (3.26)$$

A perda de retorno, também conhecida como Parâmetro S, relaciona a potência incidida e refletida numa determinada porta. Ela pode ser dada em função de coeficiente de reflexão e expressa em dB (equação 3.26). (YOUNG, 2006). Uma porta casada, ou seja, toda potência incidida é absorvida pela carga, tem uma RL infinita.

3.7 Antena dipolo

Uma das antenas mais utilizada nos sistemas de comunicação é a dipolo (Figura 10).

Figura 10 – Antena dipolo de meia onda



Fonte: (RIBEIRO, 2012).

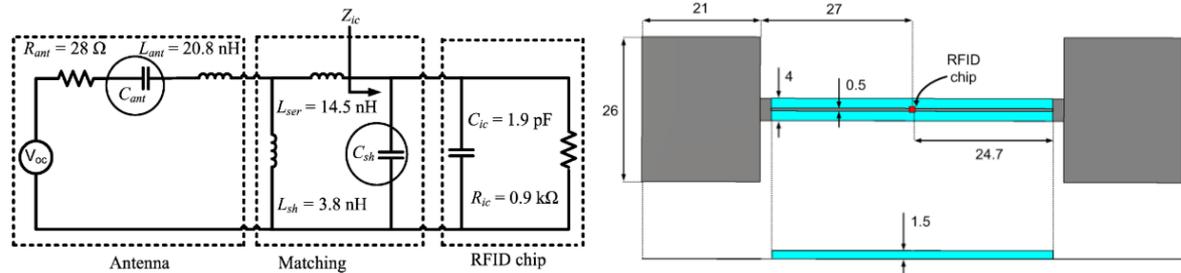
A antena dipolo é formada por dois condutores cilíndricos de dimensões iguais separados uma da outra, alimentado por uma fonte interna ou externa. As características de funcionamento de antena dipolo são dependentes de comprimento l . O comprimento l está relacionado com o comprimento de onda λ . Se $l = \lambda$, antena é denominada de dipolo de onda completa, onde $L = \lambda/2$. É dito antena dipolo de meia onda quando o l for $\lambda/2$. As antenas dipolos podem ser polarizadas de forma vertical ou horizontal. (RIBEIRO, 2012).

4 TRABALHOS CORRELACIONADOS

Nos capítulos anteriores foram abordados assuntos relacionados à sistema RFID de modo geral. Nesta seção, abordaremos alguns trabalhos relacionados ao assunto estudado neste trabalho.

Sohrab et al. (2016) trazem uma metodologia que consiste em aumentar a capacitância, nas extremidades e no corpo de uma antena dipolo, isto porque quanto maior for a capacitância, menor será as interferências causadas pelo metal, Figura 11. A antena foi desenhada e simulada no software CST (*Computer Simulation Technology*) da Empresa Dassault Systems, e ela deve operar na faixa de frequência de 860 - 960 MHz. A antena apresentou resultados satisfatórios quando usado em objeto metálico e garrafa contendo líquido.

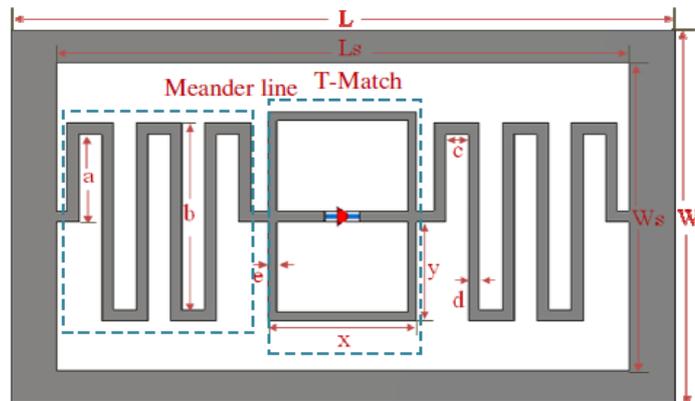
Figura 11 – Circuito e modelo equivalente da etiqueta



Fonte: (SOHRAB et al., 2016a).

Faudzi et al. (2016) trazem dois modelos de antenas dipolo para sistema RFID em UHF para operar nas frequências de 919 - 923 MHz. O primeiro modelo proposto é de uma antena do tipo dipolo de alimentação meander (curvas) de cobre, com as dimensões de $58 \times 34 \times 0.8 \text{ mm}^3$, implementado num substrato Rogers 5880 e excitado por um chip da NXP que possui uma impedância de $14.8 - j127.1 \Omega$. A Figura 12 mostra o primeiro modelo da antena proposta.

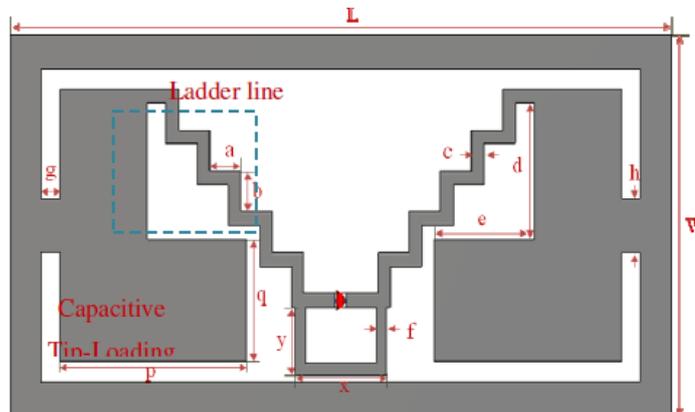
Figura 12 – Modelo 1 da antena proposta



Fonte: (FAUDZI et al., 2016).

O segundo modelo é de uma antena do tipo dipolo de alimentação por escada que traz algumas melhorias do primeiro modelo em termo de tamanho e faixa de frequência, e são acrescentadas estruturas capacitivas nas suas extremidades. A etiqueta apresenta dimensões menores em relação ao primeiro modelo. A Figura 13 mostra o segundo modelo da antena proposta.

Figura 13 – Modelo 2 da antena proposta



Fonte: (FAUDZI et al., 2016).

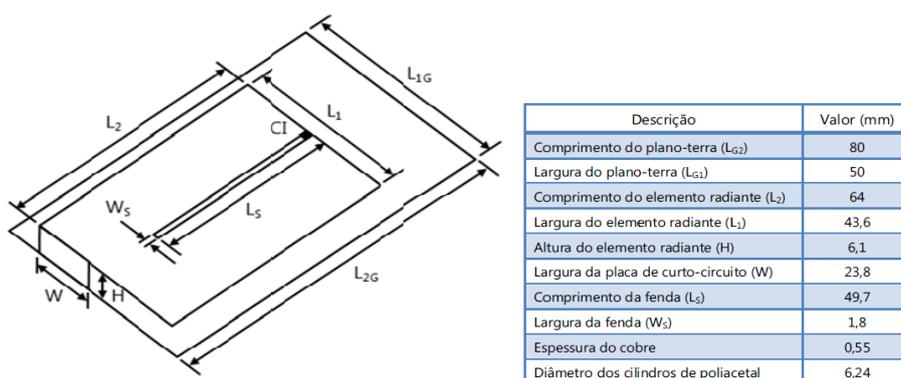
De acordo com os autores, foi colocado um plano de aterramento no entorno da antena nos dois modelos a fim de garantir melhores resultados quando colocados em materiais metálicos. Foi utilizado o software CST para realizar as simulações dos dois modelos. A antena do modelo 2 apresentou melhores resultados quando comparada com a do modelo 1, isso devido a adição da estrutura capacitiva nas extremidades que melhorou o seu desempenho em termos de faixa de leitura da

etiqueta e ganho. Conseguiu-se um alcance de 2,0 m e 2,2 m respectivamente quando a etiqueta é fixada num objeto metálico.

Os líquidos afetam o desempenho das etiquetas RFID em UHF, causando perdas de retorno e largura de banda mais estreita. O trabalho de Sohrab et al. (2016) trazem um modelo de antena dipolo para aumentar o desempenho das etiquetas. O trabalho consiste em adicionar um circuito RLC ressonante com menor resistência em paralelo ao corpo da antena para compensar o aumento de resistência no circuito da antena devido a presença de líquido. Placas capacitivas são colocadas nas extremidades da antena. A estrutura foi simulada usando o software CST. Para os testes, foi usada uma garrafa plástica cheia de água com permissividade relativa de 2,3, espessura de 1 mm, e dimensões de $80 \times 80 \times 20 \text{ mm}^3$. Os resultados obtidos mostraram uma melhoria com o uso deste modelo, e são válidos para qualquer líquido a base de água.

Barbin (2015) aborda sobre o projeto de etiqueta de RFID passiva em UHF para objetos metálicos, onde foi proposta uma estrutura de antena com objetivo de reduzir as interferências causadas pela presença de metal no objeto etiquetado. A antena proposta por Barbin é do tipo planar de F-invertido ou PIFA (*Planar Inverted-F Antenna*). A Figura 14 mostra a geometria e as dimensões da antena e as respectivas medições.

Figura 14 – Estrutura de antena e as suas respectivas medidas



Fonte: (BARBIN, 2015).

Tabela 2 – Tabela de valores utilizados nas simulações

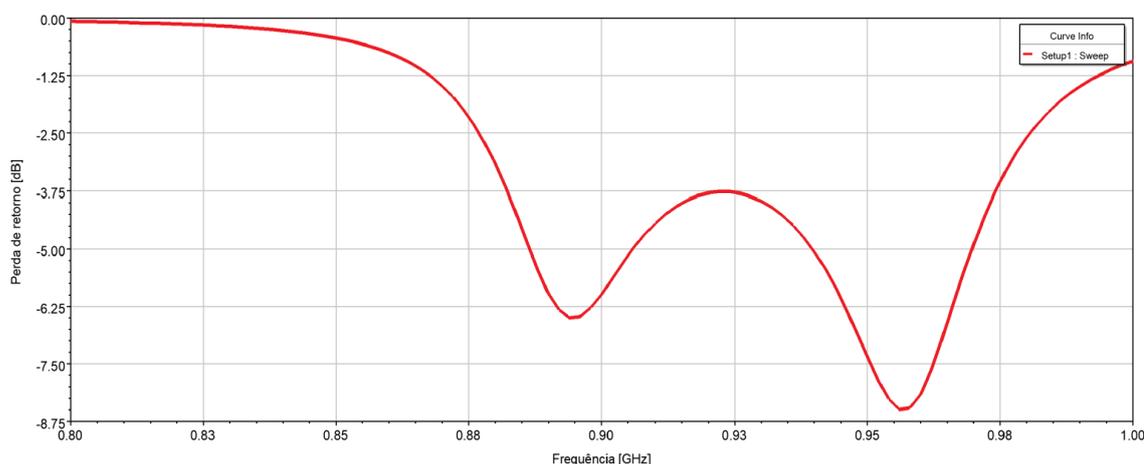
Parâmetro	Valores
P_{th}	-18,5 dBm
P_{TX}	30 dBm
G_{TX}	6 dBi

Fonte: (BARBIN, 2015).

A antena possui um plano-terra inerente a sua estrutura. Esta é uma das suas vantagens em relação as antenas do tipo dipolo, que são mais usadas nos sistemas RFID. Além disso, a antena proposta é construída sobre um substrato de ar que apresenta uma permissividade relativa de $\epsilon_r = 1$ e a tangente de perda de aproximadamente $\tan \delta = 0$.

A etiqueta foi desenvolvida para ser utilizada nos objetos como containers, chapas, canos, etc. A seguir, será mostrado os resultados obtidos por meio de simulações. A antena foi desenvolvida para funcionar na frequência de 910 MHz. Como pode ser observada na Figura 15, a antena possui menor perda de retorno na frequência de 960 MHz.

Figura 15 – Perda de retorno

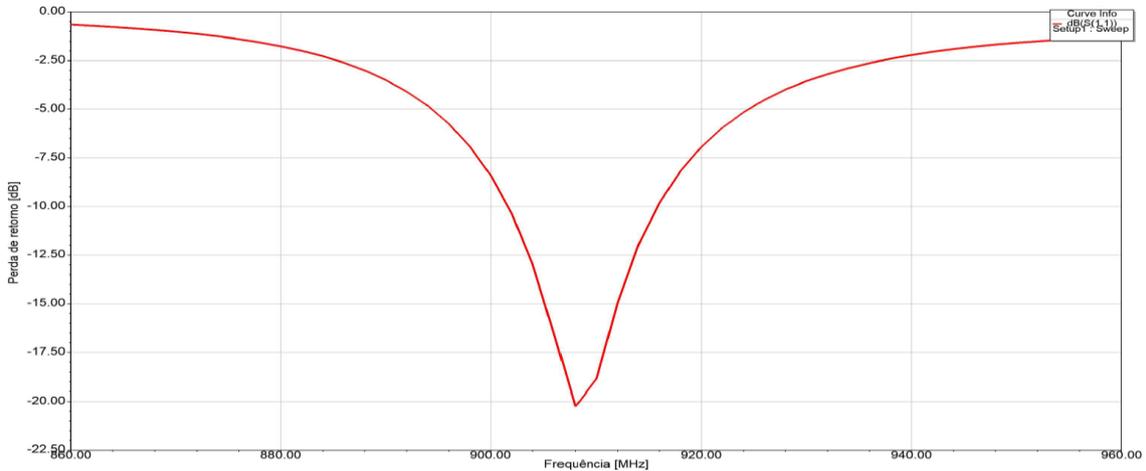


Fonte: Elaborado pelo autor.

Em contrapartida, a antena possui um alcance maior, de aproximadamente 19 m, quando submetida sobre um objeto metálico. Como o ar possui tangente de perda de aproximadamente $\tan \delta = 0$, a antena atinge um alcance bem maior comparado com o PET que possui um tangente de perda de aproximadamente $\tan \delta = 0,03$.

A antena proposta pela Ferreira et al. (2017) apresenta menor perda na frequência de 910 MHz, Figura 18, com uma perda de retorno de aproximadamente – 20 dB.

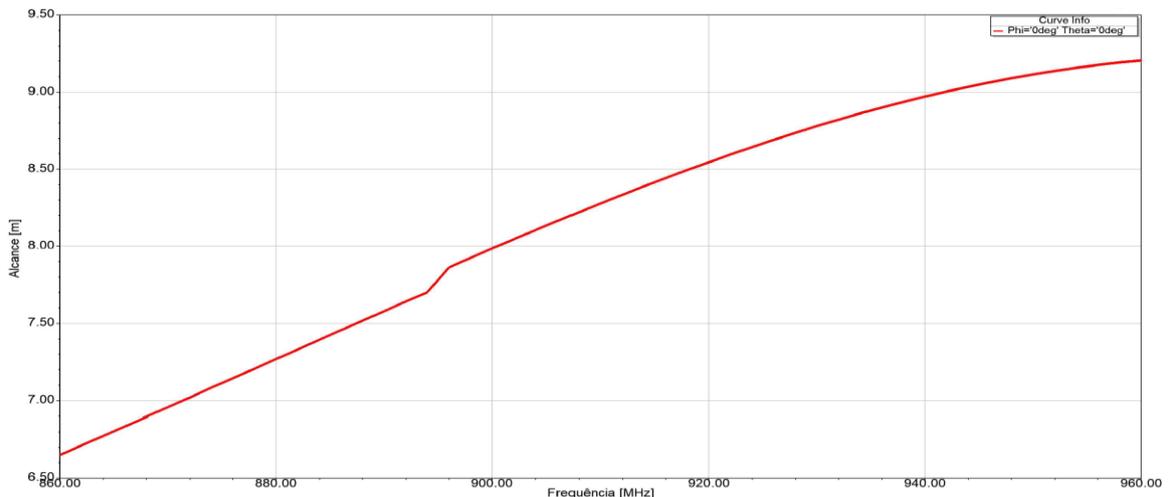
Figura 18 – Perda de retorno da antena



Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir, foram feitas simulações de alcance máximo no espaço livre utilizando um objeto metálico de dimensões $200 \times 200 \times 2 \text{ mm}^3$. Como pode se observar, Figura 19, o alcance máximo da antena na frequência de 930 MHz é de aproximadamente 8,7 m.

Figura 19 – Alcance máximo



Fonte: Elaborado pelo autor

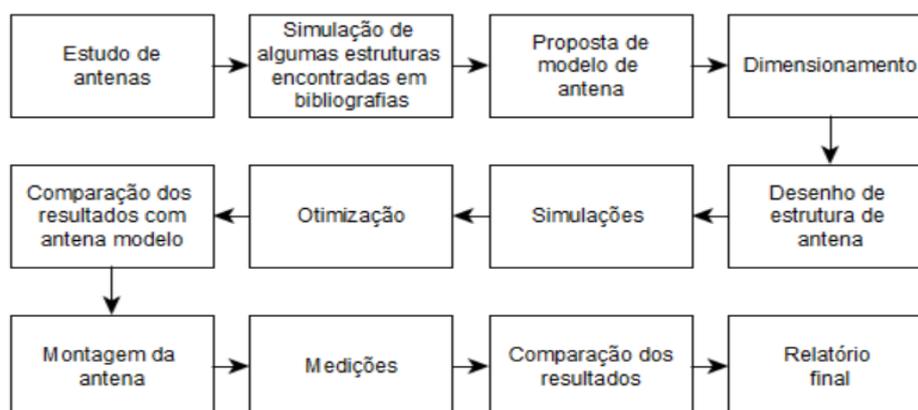
Partindo dos resultados e de alguns parâmetros das antenas descritas neste capítulo, será proposta uma estrutura de antena que atenda os objetivos propostos

para este trabalho. No capítulo a seguir, será demonstrado a metodologia para a realização do trabalho.

5 METODOLOGIA

Com base nos conhecimentos adquiridos ao longo do curso e nas referências bibliográficas, será proposta uma estrutura de antena que atenda os objetivos propostos. A construção da estrutura de antena e as respectivas simulações serão realizadas no Instituto Tecnológico de Semicondutores da Unisinos – ITT Chip utilizando o software HFSS (*High Frequency Structure Simulation*) da Empresa Ansys. O diagrama de bloco da Figura 20 mostra a metodologia proposta para a realização do projeto.

Figura 20 – Diagrama de bloco da metodologia proposta



Fonte: Autor

Como descrito no diagrama, primeiramente será feito um estudo sobre as antenas utilizadas nas etiquetas passivas nos sistemas RFID em UHF, analisando detalhadamente o seu funcionamento, as suas restrições e as suas particularidades. Utilizando antenas propostas em bibliografias, será levantado parâmetros como largura de banda, perda de retorno e alcance. Estes parâmetros obtidos serão essenciais para construção da antena.

O projeto apresenta alguns requisitos que devem ser atendidos, entre eles, dimensões menores e alcance maior comparado com algumas antenas propostas na literatura. A antena proposta será do tipo PIFA (*Planar Inverted-F Antenna*), que apresenta um bom funcionamento, dimensões menores e um bom alcance quando comparados com outros tipos. O seu dimensionamento inicial será feito utilizando as equações de uma antena *microfita*.

Com os dados obtidos, será construída uma estrutura de antena utilizando o software HFSS. Além de construção da antena, o software foi utilizado para efetuar a simulação do modelo proposto. A partir dos dados obtidos, será feita a otimização da antena.

Após a otimização, será montada a antena utilizando a impressora Zebra Designer da Zebra Technologies Corp existente no ITT-Chip. As medições funcionais se darão a partir de um leitor da marca INTERMEC, fabricado pela Intermec Technologies Corporation, que possui uma potência de transmissão de 15 a 30 dBm.

5.1 Software HFSS

Para levantamento dos parâmetros por meio das simulações e desenho de estrutura de antena, será utilizado um software voltado para simulações e análise de componentes eletromagnéticos denominado HFSS (*High Frequency Structure Simulator – Simulador de Estruturas de Alta Frequência*).

HFSS é um software de alto desempenho que nos fornece resultados preciso e rápido das estruturas irradiante. A impedância, o *VSWR*, parâmetros de espalhamento, diagrama de irradiação e a carta de Smith, são alguns dos resultados que o software fornece. Além disso, o software possibilita adição de equações.

Tal como muitos softwares de simulação, o HFSS também usa o método matemático denominado Método de Elementos Finitos (FEM). O método consiste em subdividir a estrutura a ser analisada em pequenas regiões chamadas de elementos. Estes elementos são conectados por pontos chamados de nós, e o conjunto destes nós são denominados de malhas. Cada subdivisão representa uma função a ser analisada. Como se trata de eletromagnetismo, estas funções serão as equações de Maxwell. (ANSOFT, 2009).

Existem basicamente 6 etapas principais para a criação e simulação de uma estrutura irradiante no HFSS, entre eles: geração de estrutura 3D, criação da condição de contorno, atribuir a excitação, configuração da solução, resolução e pós-processamento dos resultados. (ANSOFT, 2009). O diagrama de bloco da Figura 21 mostra a sequência de etapas de simulação:

Figura 21 – Diagrama de bloco da simulação em HFSS



Fonte: (ANSOFT, 2009).

Antes da geração da estrutura 3D, primeiramente deve se definir o tipo de solução do projeto, que define o tipo de resultado que o HFSS deve fornecer, e o material a ser utilizado. Existe três tipos de soluções: Driver Modal, Driver Terminal e Eigenmode. Para o presente trabalho foi concentrado em apenas no tipo Driver Modal, que efetua cálculos matemáticos dos parâmetros de espalhamento de uma estrutura, fornecendo resultados de matriz S em termos das potências incidente e refletido dos modos de guia de onda. (ANSOFT, 2009).

Após a definição do tipo de solução e do material, é iniciado a geração da estrutura 3D, ou seja, da criação do modelo físico que se deseja analisar. Em seguida, deve se definir a região de contorno. Esta região é bastante importante na solução de equações de Maxwell. Para as equações de Maxwell serem válidas, os vetores de campo devem ter um valor único. Ao longo do contorno, os campos são descontínuos (malhas). E a condição de contorno define o comportamento do campo através de limites descontínuos. Existem três tipos de condições a serem definidas, entre eles: excitações, representações de superfícies e propriedades de materiais. (ANSOFT, 2009).

A excitação de uma estrutura é feita por uma porta. Esta porta tem a função de orientar o fluxo de energia para dentro ou fora da estrutura. A excitação pode ser do tipo Wave Ports e Lumped Ports. (ANSOFT, 2009). Nos sistemas RFID é utilizado o tipo Lumped Ports, pois a excitação é definida internamente pelo chip da etiqueta.

Após a realização dos procedimentos anteriores, é necessário agora criar uma configuração para as soluções de modo a obter coerência nos resultados. Para isto, são configuradas uma frequência ou uma faixa de frequência para a análise, os

critérios de convergências, o número máximo de etapas adaptativas e a metodologia de varredura de frequência a ser usada.

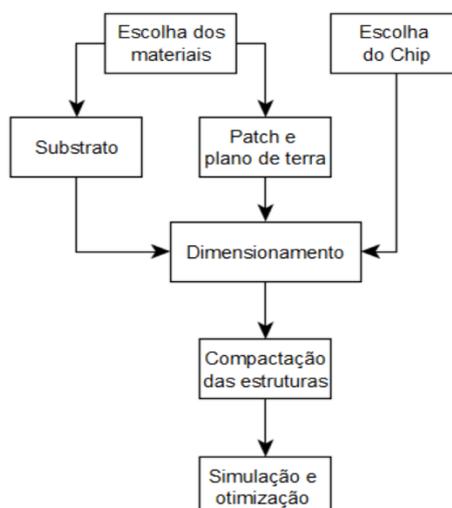
Depois de realizar toda configuração, a estrutura está pronta para ser analisada. O tempo de análise depende da complexidade da estrutura, da frequência da solução, do tipo de excitação e dos recursos disponíveis do computador. Após o término da análise, pode se efetuar o pós-processamento, que consiste em manipular os resultados para obter a solução desejada. Estas manipulações nos fornecem informações dos parâmetros S, Y, Z da estrutura, do diagrama de irradiação, da impedância da antena, do ganho, da carta de Smith, entre outras.

5.2 Metodologia de projeto da antena

O projeto da antena será baseado em alguns parâmetros essenciais obtidos nas referências bibliográficas. Os parâmetros como ganho, alcance, impedância, entre outros, serão fundamentais no desenvolvimento de um modelo novo de uma antena e na sua otimização.

Com o propósito de reduzir a dimensão de antena e aumentar o alcance comparando com algumas antenas propostas em referências bibliográficas, o projeto de antena se dará a partir de antena Planar Inverted F Antenna (PIFA) que apresenta um bom funcionamento e dimensões reduzidas quando usados para sistema RFID em UHF. O fluxograma da Figura 22 mostra a sequência do desenvolvimento da estrutura da antena que atende aos objetivos propostos.

Figura 22 – Fluxograma de desenvolvimento da etiqueta



Fonte: Elaborado pelo autor

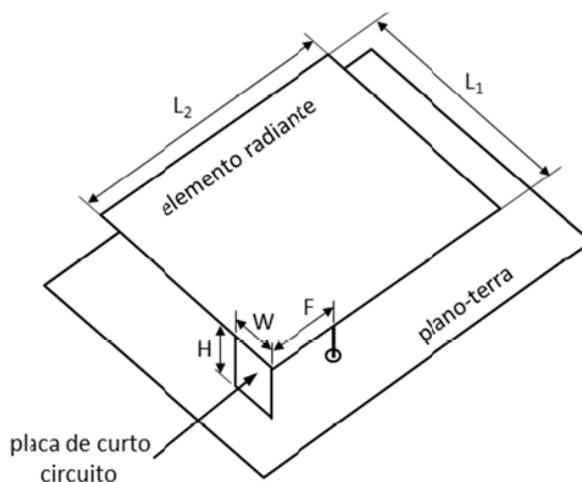
A escolha dos materiais será baseada na facilidade de aquisição, no custo de mercado e nas suas características eletromagnéticas. A construção da estrutura da antena será realizada a partir dos dados obtidos nos cálculos, e posteriormente otimizando utilizando o software HFSS. O software será utilizado não só para otimização da estrutura, mas também, para o desenho da estrutura e nas simulações.

6 PROJETO DE ANTENA PARA ETIQUETA RFID EM UHF

Com o propósito de trazer melhorias no sistema RFID em UHF apresentados em literaturas, foi proposta uma estrutura de antena alternativa capaz de reduzir as interferências causadas pela presença de objetos metálicos e líquidos. Além da redução das interferências, a estrutura traz melhorias na distância máxima de leitura comparando com algumas antenas existentes na literatura.

Antes de iniciar o dimensionamento e a construção da estrutura da antena, houve primeiramente a necessidade de definir o tipo de antena que atenderia as nossas necessidades, o tipo de material para o substrato, *patch* e plano-terra, e o tipo de chip. Foi escolhida a Planar Inverted F Antenna (*PIFA*) como o tipo de antena a ser usado para o projeto. A escolha do PIFA é devido as suas muitas vantagens tais como dimensões menores, melhor alcance, maior largura de banda, quando usado próximo ou sobre objetos metálicos comparando com os outros tipos. A Figura 23 mostra um modelo de uma antena PIFA.

Figura 23 – Modelo de uma antena PIFA



Fonte: (BARBIN, 2015).

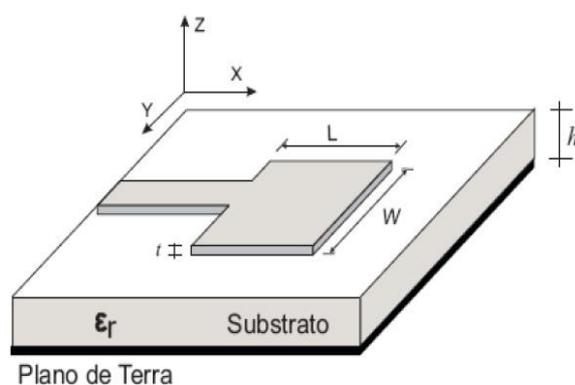
A PIFA é uma combinação de antena *microfita* (*microstrip*) de quarto de onda e F-invertida, contendo um plano-terra que reduz os efeitos indesejáveis que alteram as características da antena quando submetidas próximo ou sobre o material a ser etiquetado. Esta combinação ajuda a reduzir consideravelmente o tamanho da etiqueta. (BARBIN, 2015).

Para o substrato, foi escolhido o Polyethylene terephthalate (*PET*) que apresenta a permissividade relativa de $\epsilon_r = 3$ e a tangente de perda de $\text{tang } \delta = 0.03$. (FERREIRA et al., 2017). A camada profunda do elemento radiante onde a corrente elétrica flui é denominado de *skin deep*. Na frequência estabelecida (915 MHz), o *skin deep* para alumínio deve ser no mínimo $2,71 \mu\text{m}$. (ELECTRONICS, 2019). Para o *patch* e plano-terra, o material escolhido foi alumínio que apresenta a condutividade de $\sigma = 38 * 10^6 \text{S/m}$, utilizando uma espessura de $t = 10 \mu\text{m}$, acima de *skin deep* mínimo.

6.1 Dimensionamento da estrutura

Devido à pouca informação sobre equacionamento de antenas PIFA, inicialmente, o dimensionamento se deu com base nas equações de antena de *microfita* de quarto de onda, e posteriormente otimizando-a utilizando o software *HFSS*. As equações utilizadas foram extraídas no livro (BALANIS, 2014). A Figura 24 mostra a estruturação de uma antena *microfita*.

Figura 24 – Antena *microfita*



Fonte: (LACERDA; JUNIOR, 2008).

Antena *microfita* é constituída por um *patch*, substrato e o plano-terra. E como pode-se observar, antena *microfita* apresenta semelhanças com a PIFA. A diferença entre ambos está no componente que provê um curto-circuito entre o plano-terra e o elemento radiante (*patch*). Ao efetuar o dimensionamento, primeiramente determinou-se a largura do patch de *microfita* (*patch*) pela equação 6.1.

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (6.1)$$

Onde:

c – Velocidade da luz no espaço livre ($c = 3 * 10^8 m/s$);

W – Largura da plaqueta (cm);

f_r – Frequência de ressonância (Hz);

ϵ_r – Constante dielétrica do substrato;

Devido a existência de efeitos de borda, a parte radiante da antena de *microfita* parece maior que as dimensões físicas, eletricamente falando. (BALANIS, 2014). Devido a este fenômeno, o comprimento incremental de extensão ΔL da plaqueta é determinado pela equação 6.2.

$$\Delta L = 0,412 * \frac{(\epsilon_{ref} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{ref} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8\right)} \quad (6.2)$$

Onde:

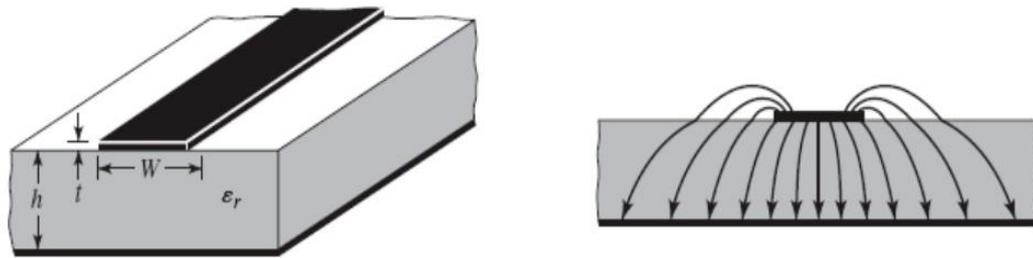
ϵ_{ref} – Constante dielétrica efetiva da plaqueta;

h – Espessura do substrato (cm);

Os campos nas bordas do *patch* sofrem franjamento devido a limitação das dimensões do *patch*. A quantidade de franjamento depende das dimensões da antena e da espessura do substrato, Figura 25. (BALANIS, 2014).

Segundo Balanis (2018), “Para o plano E principal (plano x - y) o franjamento é uma função da razão entre o comprimento L da plaqueta e a espessura h do substrato (L/h) e da constante dielétrica ϵ_r do substrato”. A Figura 25 mostra o franjamento de campo numa antena *microfita*.

Figura 25 – Franjamento de campo elétrico



Fonte: (BALANIS, 2014).

Como pode se observar na Figura 25, uma boa parte da linha de campo elétrico se encontra no substrato e outra espalhada no ar. Esta maior concentração de campo no substrato se dá devido a $W/h \gg 1$ e $\epsilon_r \gg 1$. O efeito de franjamento faz com que eletricamente as dimensões da linha de *microfita* pareçam maiores comparando com as suas dimensões físicas. Devido a isto, foi introduzida uma constante dielétrica efetiva ϵ_{ref} que leva em consideração o efeito de franjamento e a velocidade de propagação na linha de campo. (BALANIS, 2014). A constante dielétrica efetiva do *patch* é dada pela equação 6.3.

$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \left(\frac{h}{W} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (6.3)$$

Obtido o valor de constante dielétrica efetiva, o comprimento da plaqueta é calculado pela equação 6.4.

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{ref}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (6.4)$$

Onde: f_r é a frequência de ressonância da antena.

O comprimento efetivo da plaqueta considerando o franjamento é dado pela equação 6.5.

$$L_{ef} = L + 2\Delta L \quad (6.5)$$

Segundo Balanis (2014), a espessura do substrato usualmente é determinada pela relação $0,003\lambda_0 \leq h \leq 0,05\lambda_0$. Para substratos espessos, $h > 0,02\lambda_0$. Antenas com substrato espesso apresentam melhor desempenho e uma baixa constante dielétrica. Além disso, permitem maior eficiência, maior largura de banda e facilidades para irradiar ondas eletromagnéticas no espaço.

Com auxílio do software *HFSS*, construiu-se a estrutura de antena com os dados obtidos no dimensionamento, mas não se obteve resultados satisfatórios, como era de se esperar. Ainda com o uso do software, foi otimizando a estrutura da antena até chegar na estrutura que atendeu os nossos objetivos. Os resultados obtidos serão detalhados no Capítulo 7.

6.2 Circuito integrado utilizado

Para o funcionamento da antena, foi integrado o chip *Monza R6*, com uma impedância de $Z_c = 12,03 - 119,6 \Omega$ na frequência de 915 MHz. (IMPINJ, 2017). A impedância complexa do chip deve estar casada com a impedância da antena de modo a obter uma máxima transferência de potência.

O chip tem um formato retangular com as dimensões de $464.1 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$, que possui dois *pads* para RF+ e RF- que são ativados pela presença de sinal RF proveniente do leitor. Existe internamente no chip um bloco de Gerenciamento de Energia que tem a função de converter o campo eletromagnético induzido na tensão DC que o alimenta. (IMPINJ, 2017).

O chip pode demodular qualquer um dos três formatos de modulação de um leitor, DSB-ASK, SSB-ASK ou PR-ASK, mas ele modula apenas em ASK. A comunicação entre etiqueta e leitor é feito por retroespalhamento da forma de onda RF incidente, em que o estado refletido e absorvido é estabelecido pela alteração de coeficiente de reflexão do seu par de antenas. (IMPINJ, 2017).

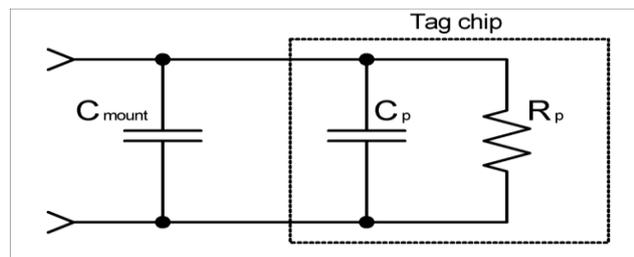
O chip oferece a memória EPC de até 96 bits, que utiliza a tecnologia de célula de memória não volátil. (IMPINJ, 2017). Na Tabela 3 pode se observar os valores de outros parâmetros da antena, e um modelo de circuito simplificado de chip numa tag é mostrado na Figura 26.

Tabela 3 – Características do Chip MONZA R6 da IMPINJ

Parâmetro	Faixa
Capacitância paralela (C_p)	1,23 pF
Resistência paralela (R_p)	1,2 kΩ
Capacitância de montagem (C_{mount})	0,21 pF
Sensibilidade de leitura	-20 dBm
Modulação	ASK
Frequência	860 a 960 MHz

Fonte: (IMPINJ, 2017)

Figura 26 – Modelo de circuito simplificado



Fonte: (IMPINJ, 2017).

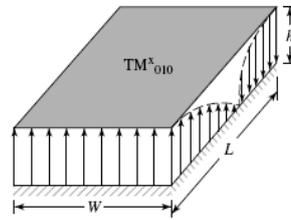
6.3 Configuração de campo elétrico

As antenas microfitas e PIFAs suportam várias configurações de campo elétrico (modos) na sua estrutura. Dependendo da configuração dimensional da antena, ela pode assumir diferentes modos. Para modos com $L > W > h$ é denominado de modo dominante TM_{010}^x . Normalmente este tipo de modo apresenta frequência de ressonância baixa comparado com outros modos de configuração de campo. (BALANIS, 2014). Para este modo, a frequência de ressonância é dada pela equação 6.6.

$$f_r = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (6.6)$$

A Figura 27 mostra a configuração do campo elétrico para o modo dominante TM_{010}^x .

Figura 27 – Configuração de campo elétrico



Fonte: (BALANIS, 2014).

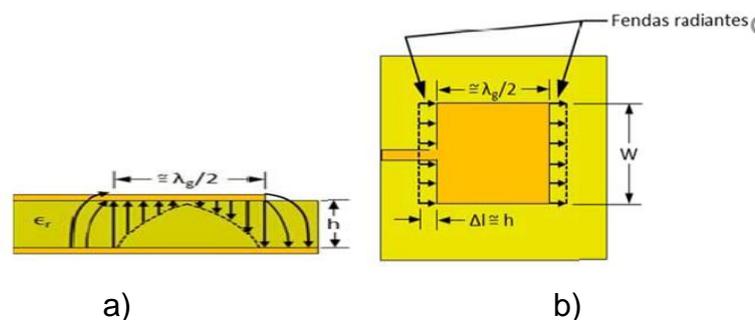
6.4 Polarização da antena

A PIFA é uma antena que apresenta dupla polarização, horizontal e vertical, isso devido a semelhança da distribuição das componentes E_x e E_y nas suas bordas (BARBIN, 2015).

6.5 Radiação de antena

Nas antenas microfitas e PIFAs, a radiação normalmente ocorre nas suas bordas devido ao franjamento do campo na sua estrutura radiante (*patch*). Como pode se observar na Figura 28(a), a componente normal do campo nas bordas não está em fase devido ao comprimento do patch. Com isso, as componentes normais cancelam-se entre si. Já os componentes tangenciais estão em fase, como mostra a Figura 28(b). Com isso, a radiação da antena em campo distante é dada somente por componentes tangenciais, já que os componentes normais se cancelam. (BARBIN, 2015).

Figura 28 – Distribuição de campo elétrico



Fonte: (BARBIN, 2015).

Os resultados do funcionamento da antena serão demonstrados no capítulo a seguir.

7 ANÁLISE DE RESULTADOS

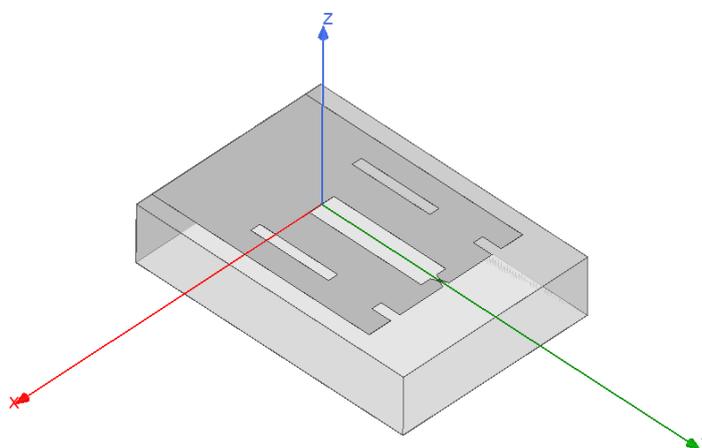
Nesta seção, serão demonstradas as análises e simulações feitas até chegar ao modelo proposto. As análises foram efetuadas na faixa de 800 MHz a 1000 MHz, na qual está inclusa a faixa de frequência de operação dos sistemas RFID em UHF (860 MHz a 960 MHz), considerando a frequência central do projeto de 915 MHz. O modelo proposto foi baseado numa antena PIFA, onde foram feitas as variações no substrato, patch e plano-terra, com objetivo de observar as suas influências na performance da antena utilizando a ferramenta computacional HFSS. Chegando ao modelo que atendesse os nossos objetivos, foi confeccionada a antena e soldada nela o chip a fim de transformá-lo em uma etiqueta (*tag*).

Inicialmente, serão mostrados os resultados das simulações efetuadas referentes as variações no substrato, patch e elemento de curto-circuito, do impacto do material metálico e líquido sobre a antena, e por fim, os resultados das simulações do modelo de antena proposta. As simulações dos parâmetros foram efetuadas de modo a obter resultados adequados na faixa de frequência de operação. Após os resultados obtidos por meio de simulações, serão mostrados os resultados obtidos na leitura de alcance da antena, utilizando um leitor comercial disponível no ITT-Chip.

7.1 Resultados das variações na antena

Utilizando uma antena não otimizada (Figura 29), foi realizada algumas variações de modo a observar a influência dessas variações.

Figura 29 – Proposta de antena não otimizada



Fonte: Elaborado pelo autor.

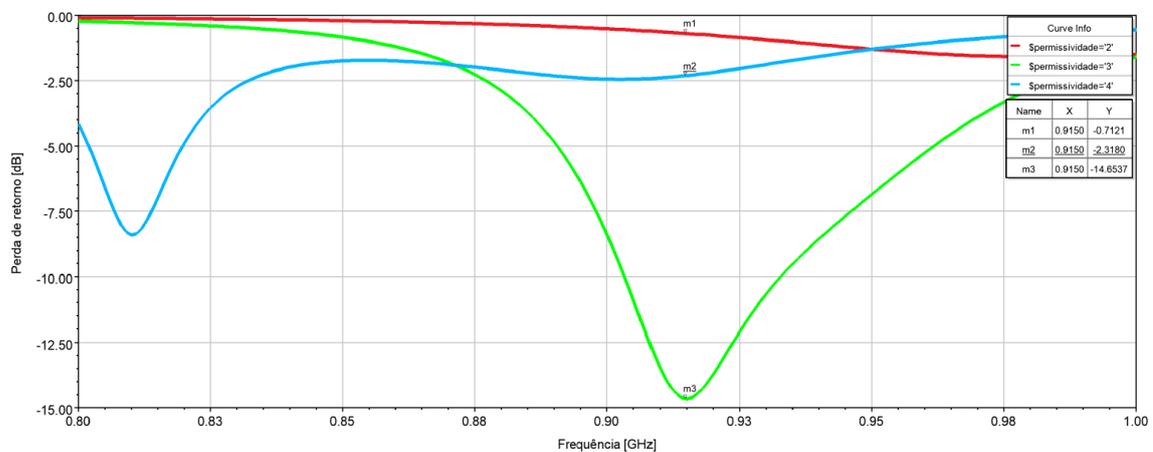
Dois parâmetros importantes foram analisados, a perda de retorno e o alcance, variados em três etapas. A equação 3.23 foi adicionada ao software de modo a fornecer resultados na forma de alcance. Foi utilizada $EIRP = 4 \text{ W}$ para o leitor. Este valor é padronizado pela (GS1, 2016).

7.1.1 Variações no substrato

O uso de um dielétrico entre o elemento radiante e plano-terra ajuda diminuir a frequência de operação e as dimensões da antena PIFA. Um valor baixo de permissividade relativa aumenta o campo de borda e a potência de radiação (LACERDA; JUNIOR, 2008).

A permissividade relativa apresenta um valor nominal de $\epsilon_r = 3$ (FERREIRA et al., 2017). Utilizando um range de $\epsilon_r = 2$ a $\epsilon_r = 4$, foi possível observar que a frequência de operação é inversamente proporcional ao aumento da permissividade relativa, Figura 30. Então, a utilização do valor nominal seria uma boa opção para a performance da antena, pois é o valor que apresenta melhores resultados.

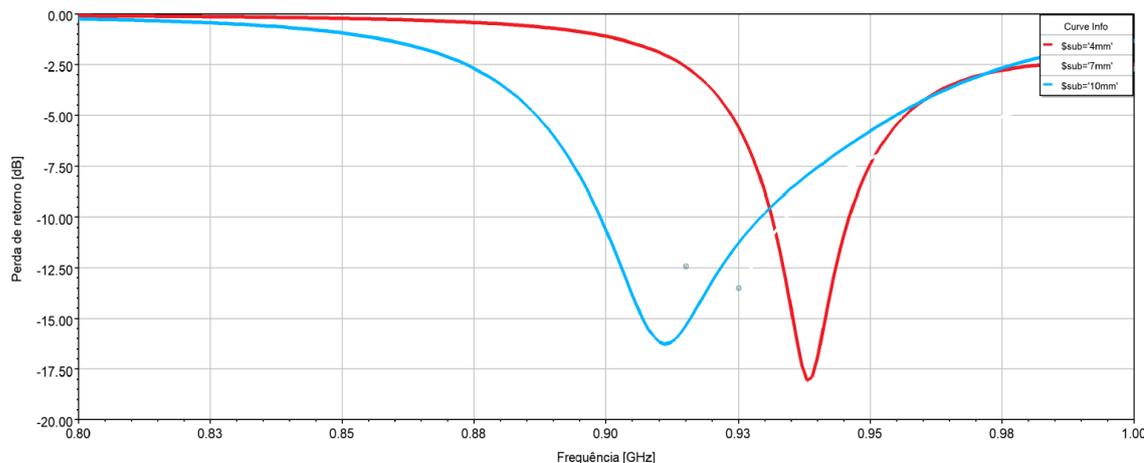
Figura 30 – Variação da permissividade relativa



Fonte: Elaborado pelo autor.

Balanis (2014) afirma que os substratos espessos apresentam desempenhos melhores. A fim de comprovar a influência da espessura do substrato na frequência de operação, foi variado o valor da espessura em 4mm e 10mm mantendo-se constante o valor da permissividade relativa.

Figura 31 - Variação na espessura do substrato



Fonte: Elaborado pelo autor.

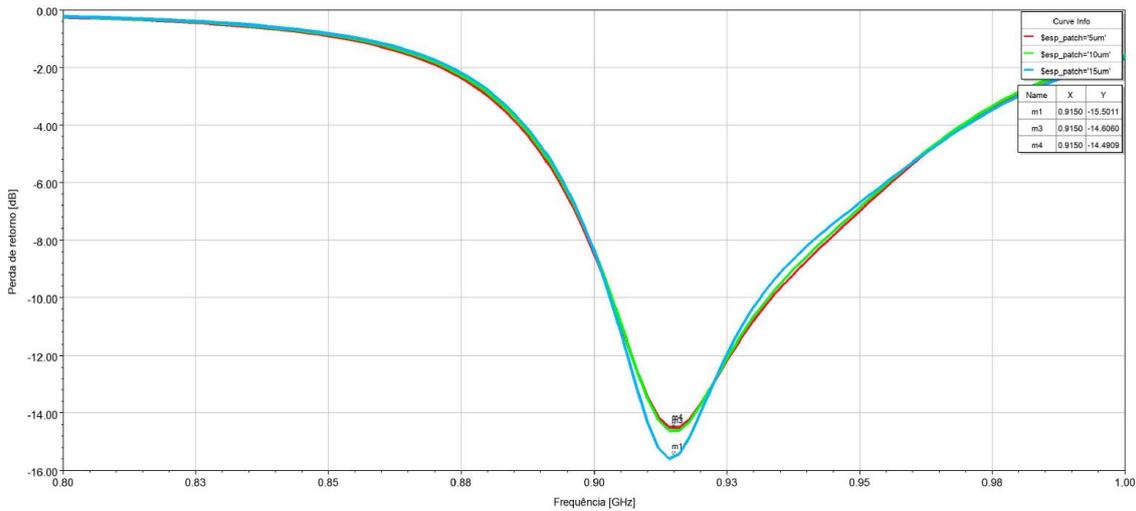
Aumentando o valor da espessura, pode se observar que a frequência de operação diminui com o aumento da espessura com uma maior largura de banda (Figura 31). O aumento da espessura permite que os campos se propagam com maior facilidade. (BALANIS, 2014).

Os resultados das variações dos parâmetros do substrato são muito importantes, pois nos possibilitaria efetuar alterações caso no futuro encontrássemos outros materiais que apresentem valores semelhantes.

7.1.2 Variações no elemento radiante (*patch*)

Para o elemento radiante, foram consideradas as variações na espessura e nas fendas central e laterais como parâmetros para a análise da sua influência na eficiência da antena. Variando a espessura do elemento radiante de $t = 5\mu m$ a $t = 15\mu m$, pode se observar que o parâmetro tem pouca influência na frequência de operação da antena, Figura 32.

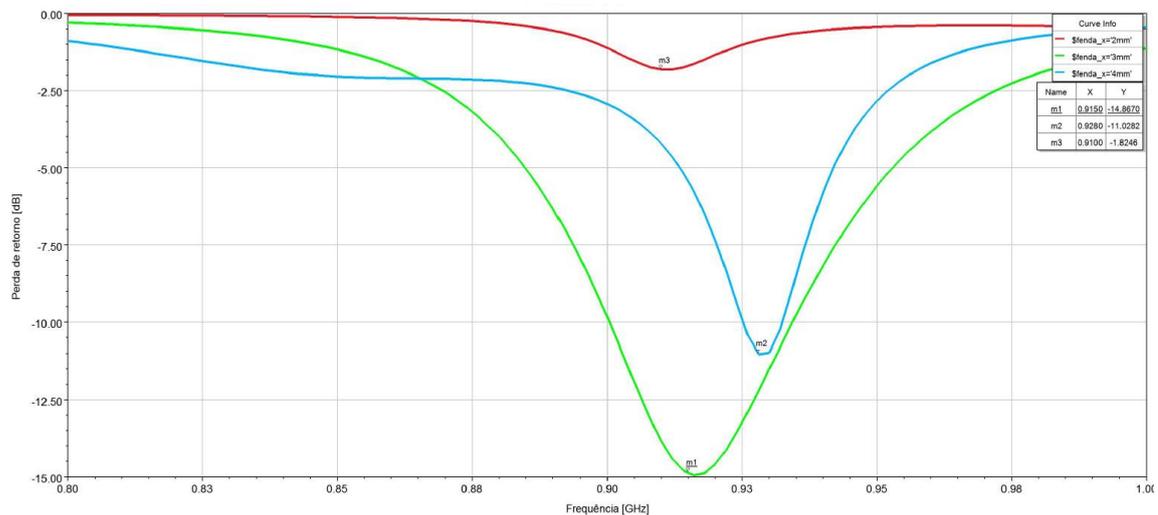
Figura 32 – Variação na espessura do elemento radiante



Fonte: Elaborado pelo autor.

As fendas representam a indutância da antena. O valor da indutância da antena é diretamente proporcional à variação da largura das fendas. Devido a existência de elemento capacitivo no chip, é necessário obter um valor de impedância da antena que conjugasse com o valor da impedância do chip. Para obter o valor da impedância, a largura da fenda central foi variada num intervalo de 2 mm a 4 mm (Figura 33).

Figura 33 – Variação na largura da fenda central



Fonte: Elaborado pelo autor.

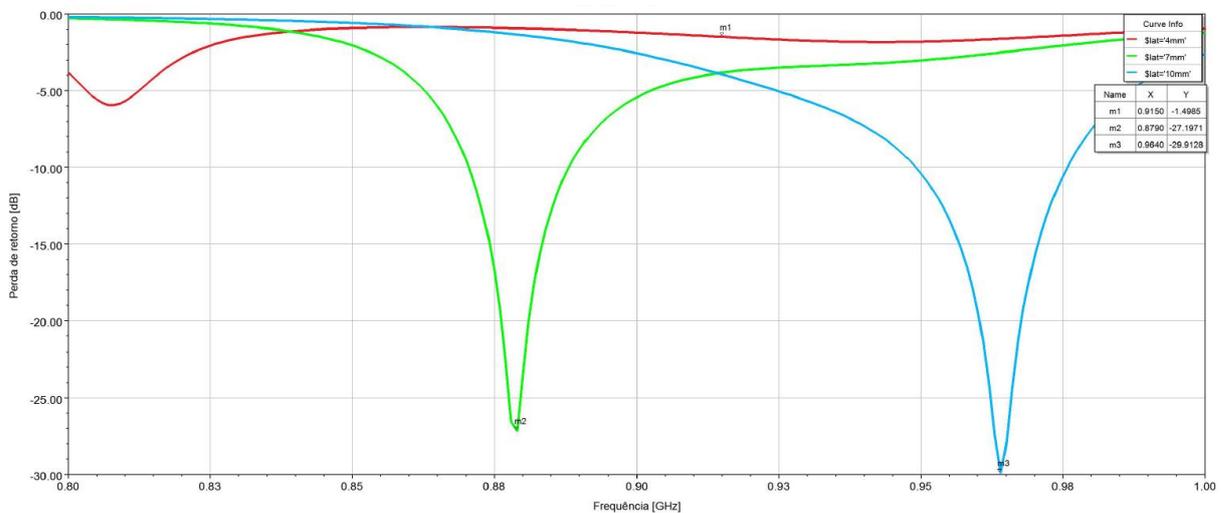
Como pode ser observado na Figura 33, existe casamento de impedância entre antena e chip quando o valor de largura de fenda central é fixado em torno de 3 mm. Na verdade, foi considerado o valor inicial da largura da fenda central de 1mm. Somando o valor da parametrização e da largura inicial, a largura da fenda central do

patch ficaria 4mm. As variações nas fendas laterais apresentam menores impactos na região de ressonância da antena.

7.1.3 Variações no componente do curto-circuito

Uma antena PIFA é obtida curto circuitando o elemento radiante com o plano-terra. Este curto circuito faz com que a antena ressona numa frequência fixa e conseqüentemente reduz a área da antena.

Figura 34 – Variação na placa de curto circuito



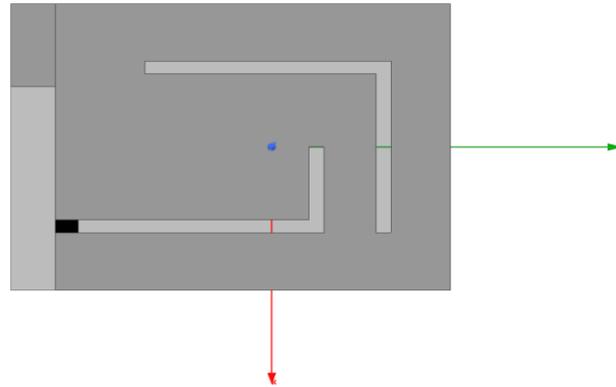
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 34 mostra que a placa influencia na impedância da antena, e conseqüentemente na sua frequência de ressonância. A placa gera um acoplamento capacitivo que determina a frequência de operação da antena, na qual atinge o seu valor mínimo quando estiver próximo a borda do elemento radiante. (LACERDA; JUNIOR, 2008).

7.2 Resultados do modelo proposto

Inicialmente, foi proposto um modelo de antena PIFA, utilizando alumínio para o patch, placa de curto circuito e plano-terra, e PET como substrato, Figura 35.

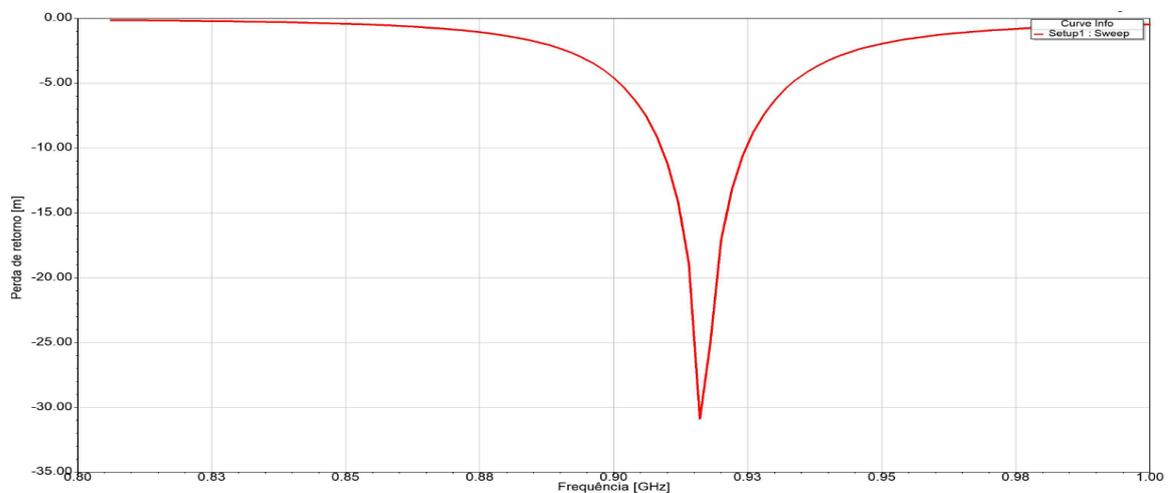
Figura 35 – Modelo inicial



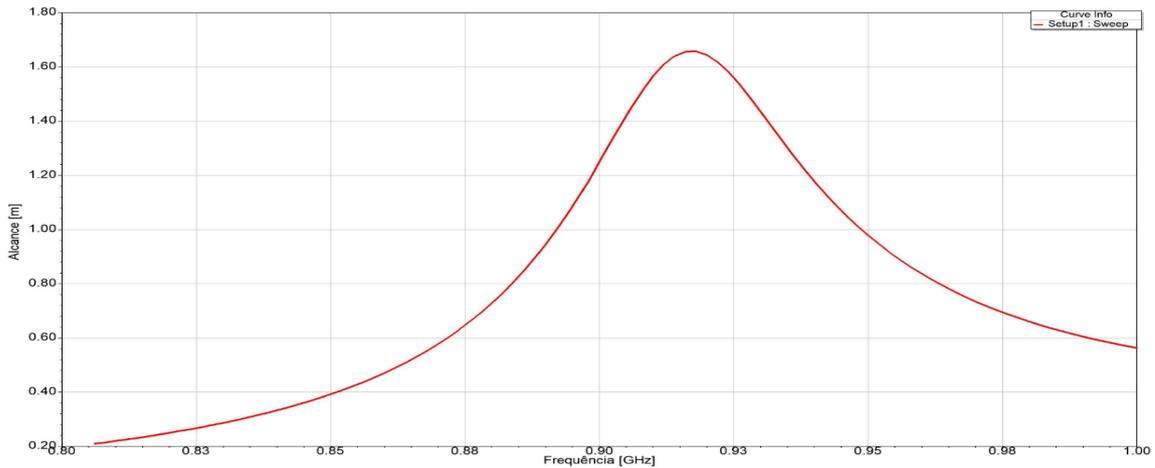
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos nas simulações para este modelo não atenderam os requisitos propostos. Apesar de alcançar um bom casamento de impedância entre a antena e o chip, Figura 36 (a), a antena apresentou um alcance baixo, em torno de 1,6 m na faixa de frequência de operação ($f = 915 \text{ MHz}$), Figura 36 (b).

Figura 36 – Perda de retorno (a); Alcance da antena (b)



(a)

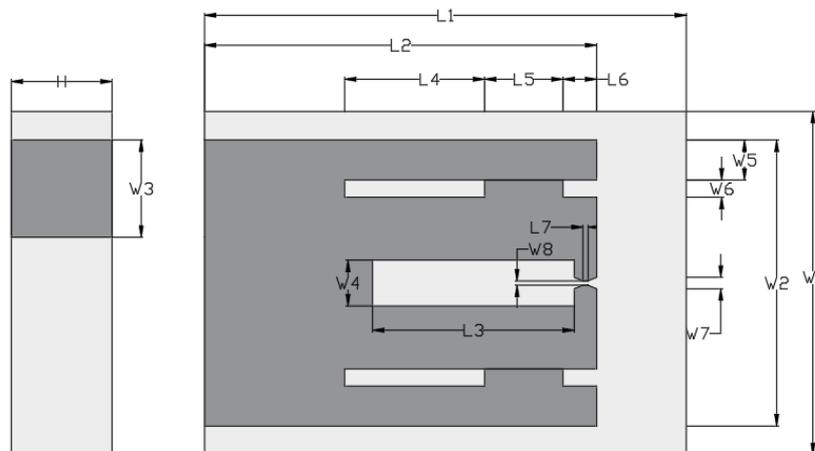


(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Otimizando a estrutura, chegou-se a um modelo que atendeu os requisitos estabelecidos. A Figura 37 mostra o modelo proposto otimizado com as suas respectivas dimensões, Tabela 4.

Figura 37 – Modelo de antena proposto



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 – Dimensões da etiqueta

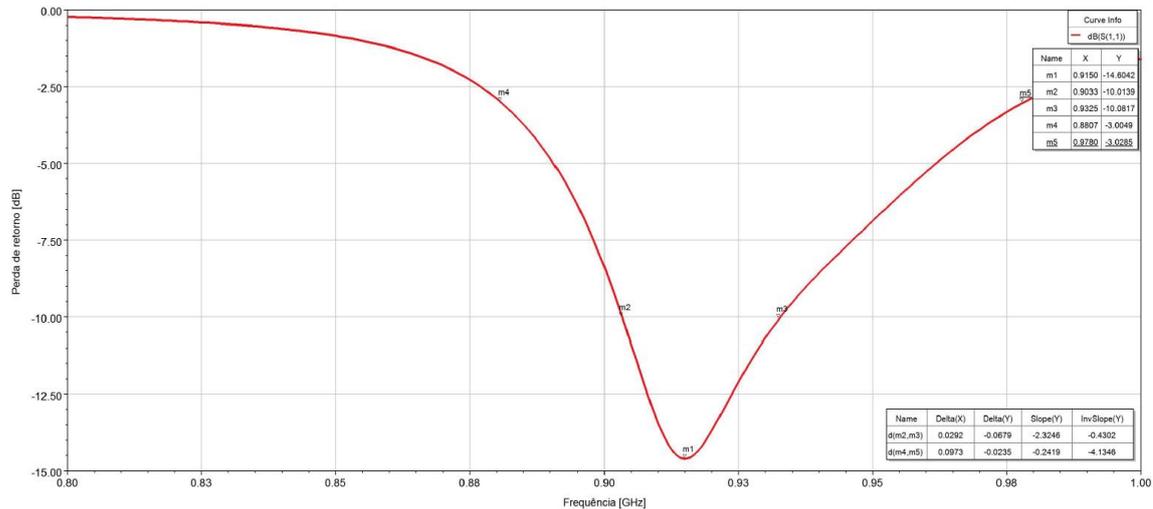
Parâmetros	Valor (mm)	Parâmetros	Valor (mm)
L1	43.00	W1	30.00
L2	35.00	W2	25.00
L3	18.00	W3	8.50
L4	12.50	W4	4.00
L5	7.00	W5	3.50
L6	3.00	W6	1.50

L7	0.47	W7	1.00
H	9,00	W8	0.37

Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir, serão mostrados os resultados obtidos por meio de simulações considerando a frequência de operação central de 915 MHz. A estrutura é composta por um patch, substrato e plano-terra. O patch é composto por fendas central e laterais que foram estabelecidas de modo a melhorar o casamento de impedância entre a antena e o chip. Largura de banda é obtida na faixa de -10 dB de perda de retorno. A banda de operação é controlada, principalmente, pela placa de curto circuito entre o patch e o plano-terra.

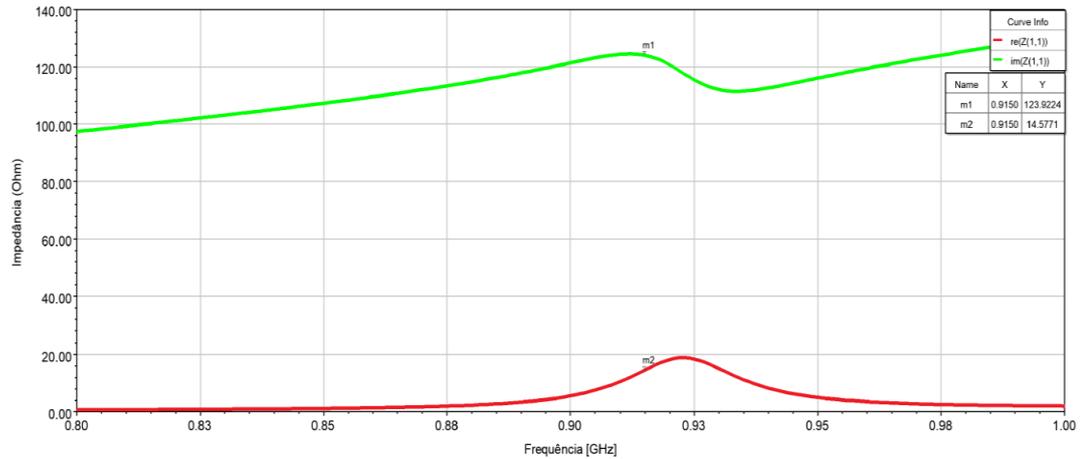
Figura 38 – Perda de retorno do modelo proposto



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode se observar na Figura 38, a largura de banda da antena para perda de retorno de -10 dB ficou entorno 29,2 MHz e 97,3 MHz para -3 dB. Antena apresentou uma impedância de $Z_A = 14,57 + j123,92$ na frequência de 915 MHz (Figura 39). Isto mostra que ocorre um melhor casamento de impedância entre a antena e o chip nesta faixa de frequência, e conseqüentemente uma maior transferência de potência entre ambos.

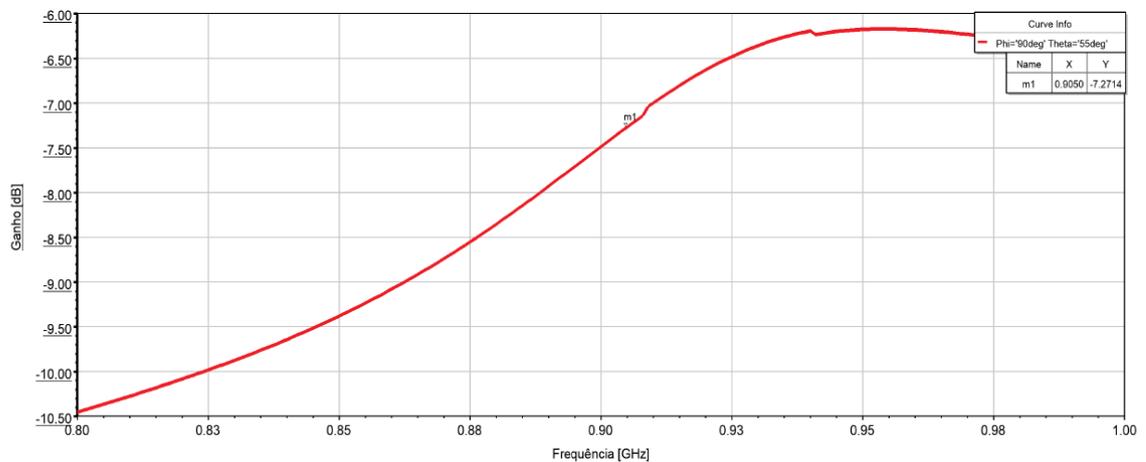
Figura 39 – Impedância da antena



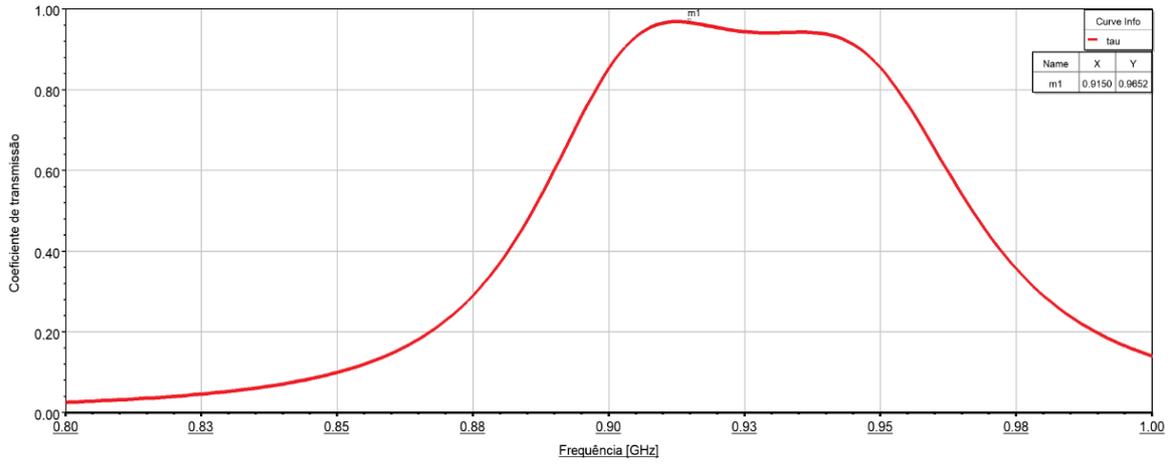
Fonte: Elaborado pelo autor.

Alguns outros resultados obtidos por meio de simulações são mostrados na Figura 40.

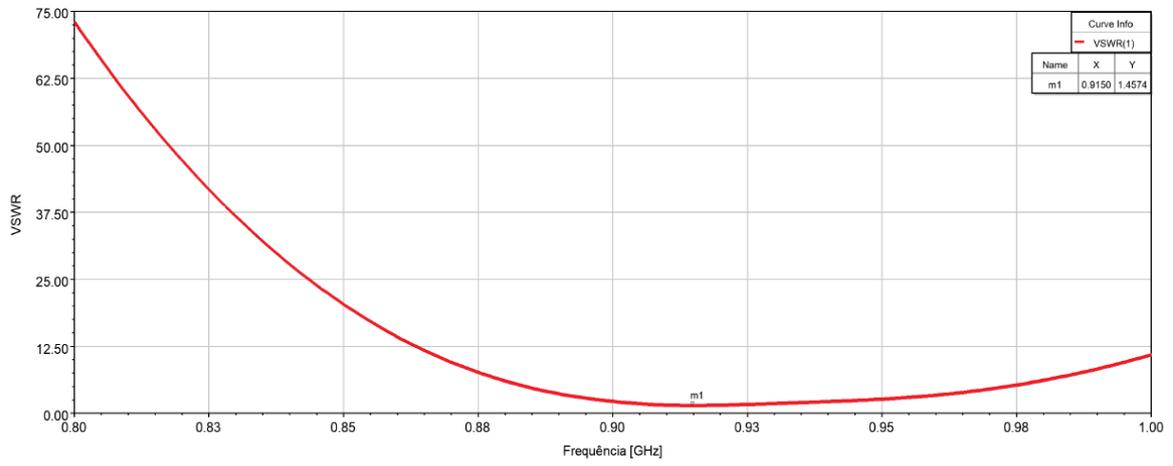
Figura 40 – Ganho da antena (a); Coeficiente de transmissão (b); Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) (c); Alcance máximo sem objeto metálico (d); Diagrama de irradiação de alcance máximo (e).



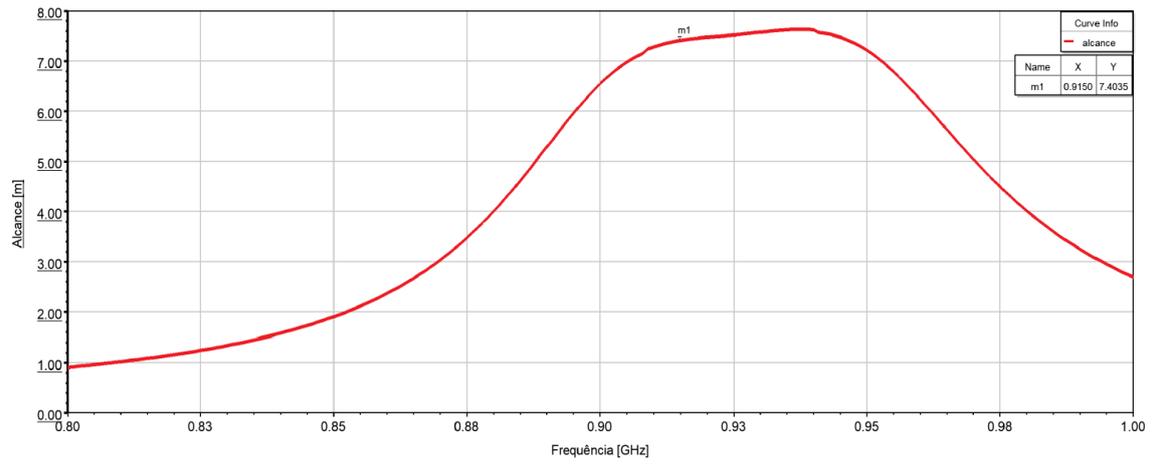
(a)



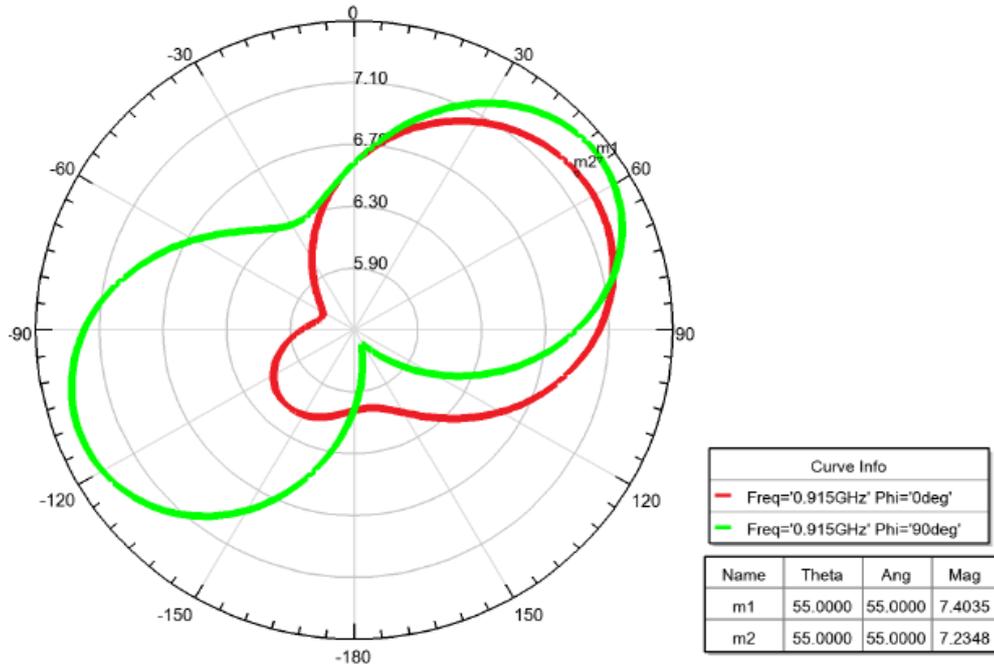
(b)



(c)



(d)



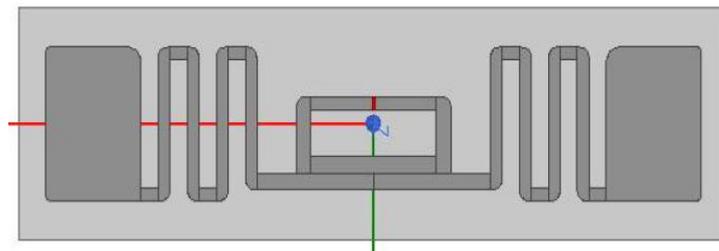
(e)

O alcance máximo da antenna da antenna ficou em torno de 7,4 m sem estar fixado sobre um material contendo líquido ou metal.

7.2.1 Impacto do objeto metálico sobre o *patch*

Com finalidade de observar o impacto de material metálico sobre estruturas da antenna, foram realizadas simulações utilizando uma etiqueta RFID em UHF fabricada no ITT-Chip, Figura 41. A etiqueta é composta por uma antenna meander dipolo, utilizando nanopartículas de prata como elemento condutivo para elemento radiante, substrato PET de $50\mu m$ espessura e um chip Monza R6, o mesmo utilizado para o presente projeto.

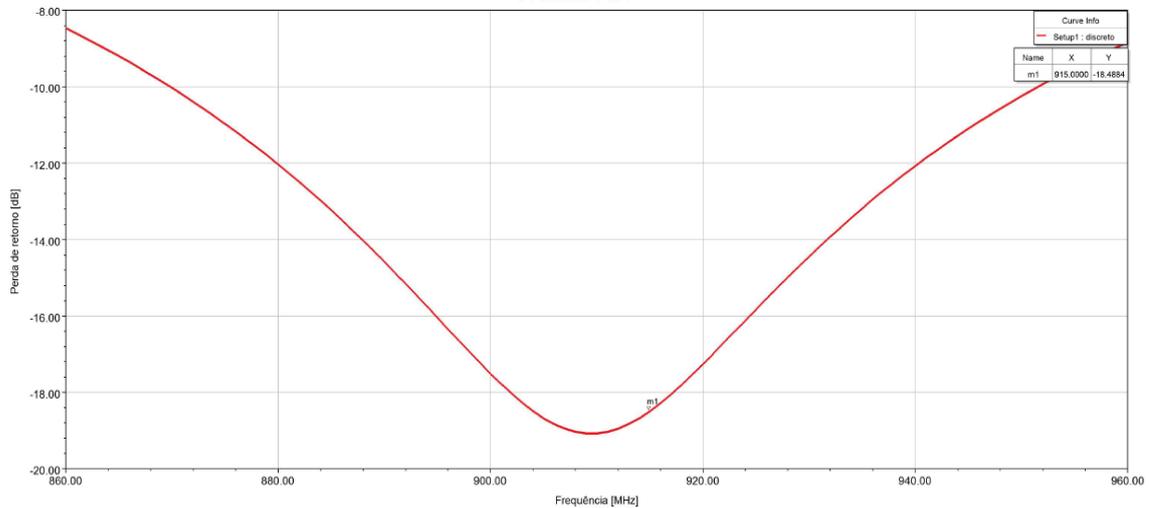
Figura 41 – Antenna meander dipolo



Fonte: ITT-Chip.

As simulações iniciais foram realizadas sem o uso de material metálico, e se obteve resultados satisfatórios na faixa de frequência de operação, Figura 42.

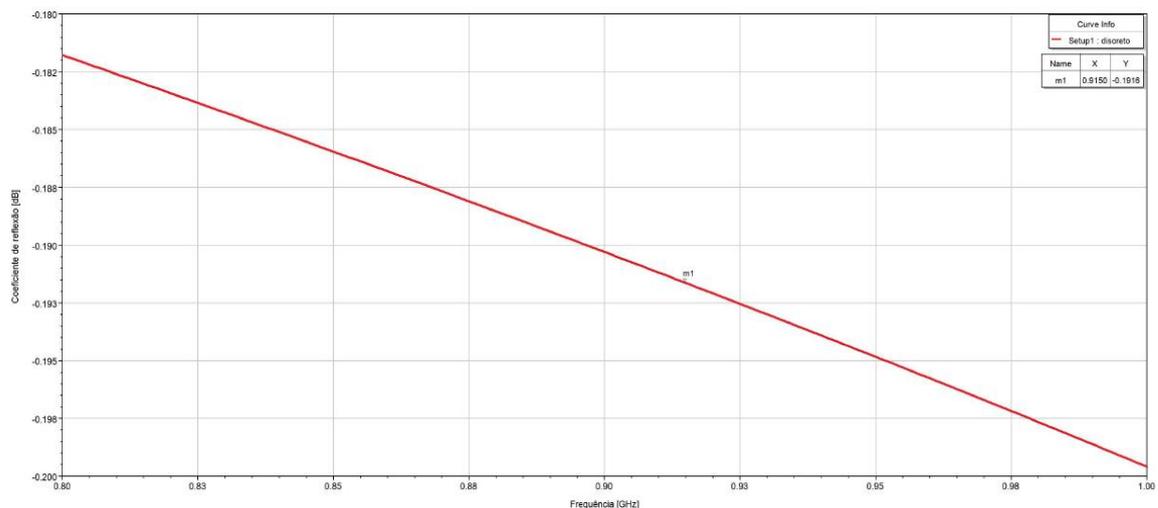
Figura 42 – Perda de retorno da antena meander dipolo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Posto a etiqueta sobre um material metálico de dimensão $400 \times 400 \times 2\text{mm}^3$, observou-se uma redução considerável da impedância da antena que originou um descasamento de impedância entre a antena e o chip, Figura 43. Com isso, a maior potência incidida é refletida de volta.

Figura 43 – Perda de retorno

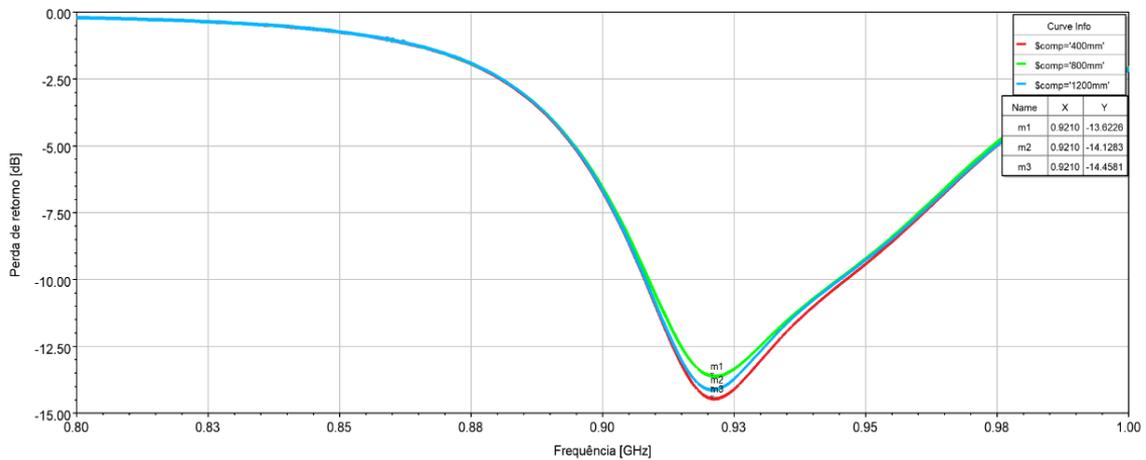


Fonte: Elaborado pelo autor

Utilizando a etiqueta proposta no projeto (Figura 37), foi anexada sobre um material metálico, variando a sua dimensão de $400 \times 400 \times 2\text{mm}^3$ a

$1200 \times 1200 \times 2 \text{ mm}^3$, observou-se uma pequena variação na frequência de ressonância, que foi para 922 MHz (Figura 44), mas que ainda está dentro da faixa de frequência estabelecida.

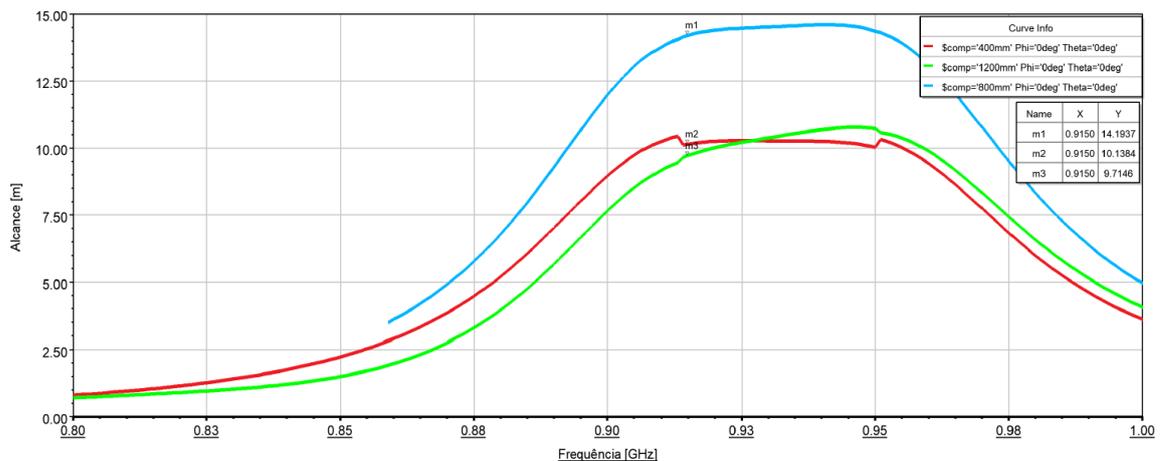
Figura 44 – Alcance máximo da antena com objeto metálico



Fonte: Elaborado pelo autor.

Um detalhe importante é sobre o valor do alcance. Com o uso de um material metálico, o alcance máximo da antena foi para 14,2 metros, utilizando um objeto metálico de $800 \times 800 \times 2 \text{ mm}^3$ de dimensão, Figura 45. Este aumento de alcance é devido ao aumento de campo elétrico nas bordas do *patch*, isto porque o plano metálico passa se comportar como um plano-terra.

Figura 45 – Alcance máximo da etiqueta com objeto metálico

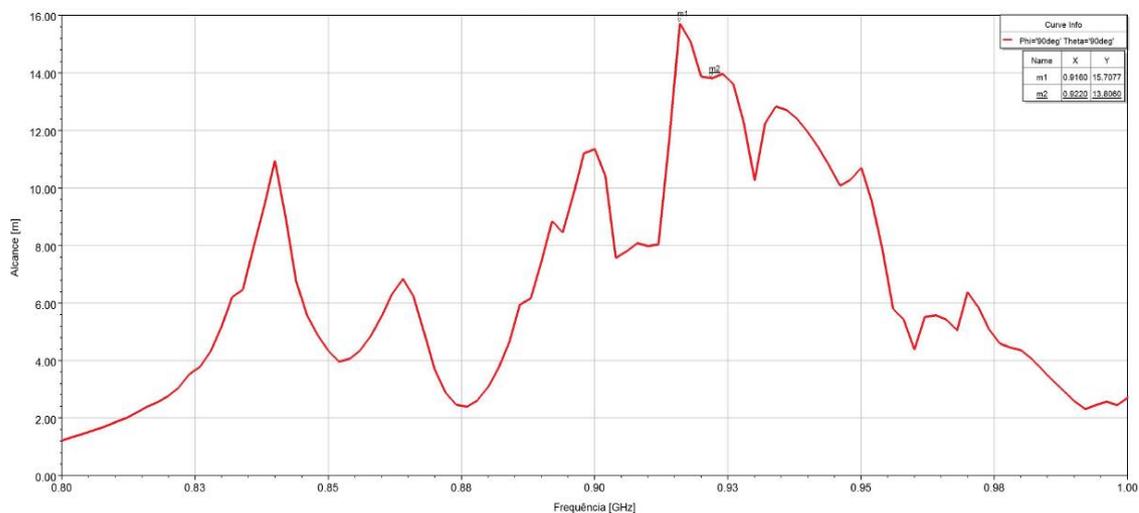


Fonte: Elaborado pelo autor.

O mesmo procedimento foi realizado utilizando uma caixinha de PET de $50 \times 30 \times 50 \text{ mm}^3$ contendo água gelada dentro. A água gelada possui uma

permissividade relativa de $\epsilon_r = 81$ e condutividade de $\sigma = 0,01 S/m$. (ANSOFT, 2009). O alcance máximo chegou a 15,7 m na frequência de 916 MHz, Figura 46.

Figura 46 – Alcance máximo da antena para objetos contendo líquido



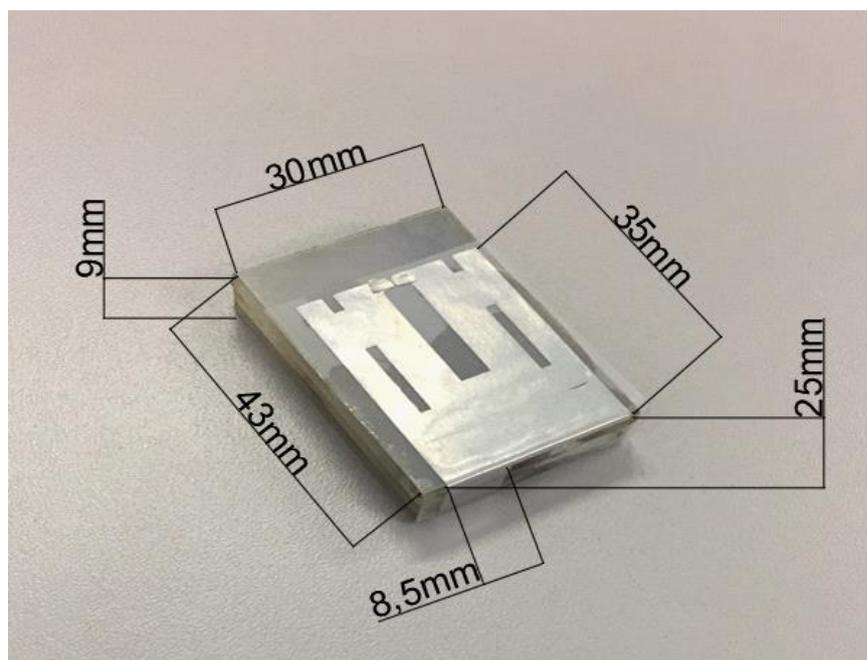
Fonte: Elaborado pelo autor.

7.2.2 Resultados das medidas com leitor

A antena foi construída utilizando o software HFSS. Após o término de desenho de layout da antena, o arquivo foi salvo como *.dxf*. Utilizando o *AutoCad*, o arquivo gerado pelo *HFSS* foi importado a fim de gerar um arquivo *.jpg*, que posteriormente seria útil para a impressão utilizando a impressora “Zebra” existente ITT-Chip.

Após a impressão, foi fixada o patch sobre substrato PET utilizando superbonder, e anexado chip de modo a prover a comunicação entre o leitor e a etiqueta. A Figura 47 mostra o resultado final da montagem da etiqueta.

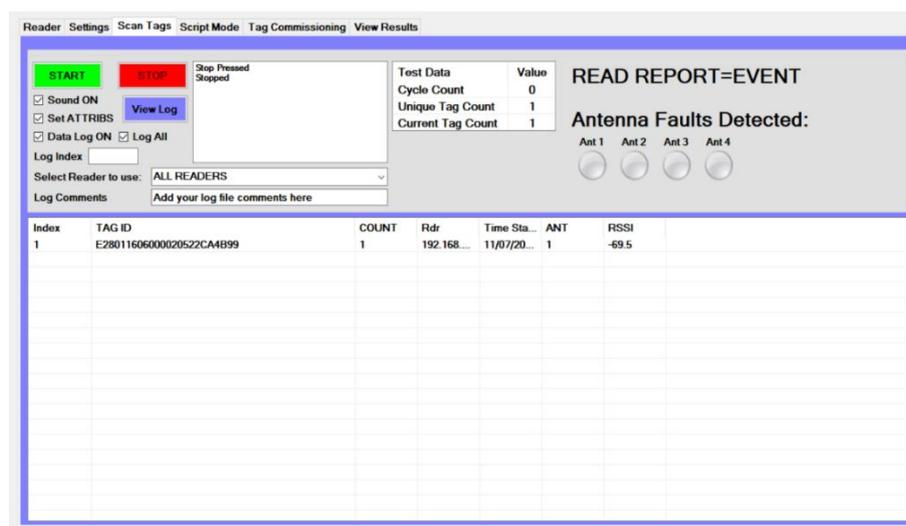
Figura 47 – Etiqueta montada



Fonte: Elaborado pelo autor.

As medições de alcance da antena se deram utilizando o reader (leitor) da INTERMEC com uma interface simples tal como mostrado na Figura 48. O reader possui 4 portas, com uma potência RF de 15 a 30 dBm em cada uma delas. Para as medições, foi utilizada a potência de $P_t = 30 \text{ dBm}$.

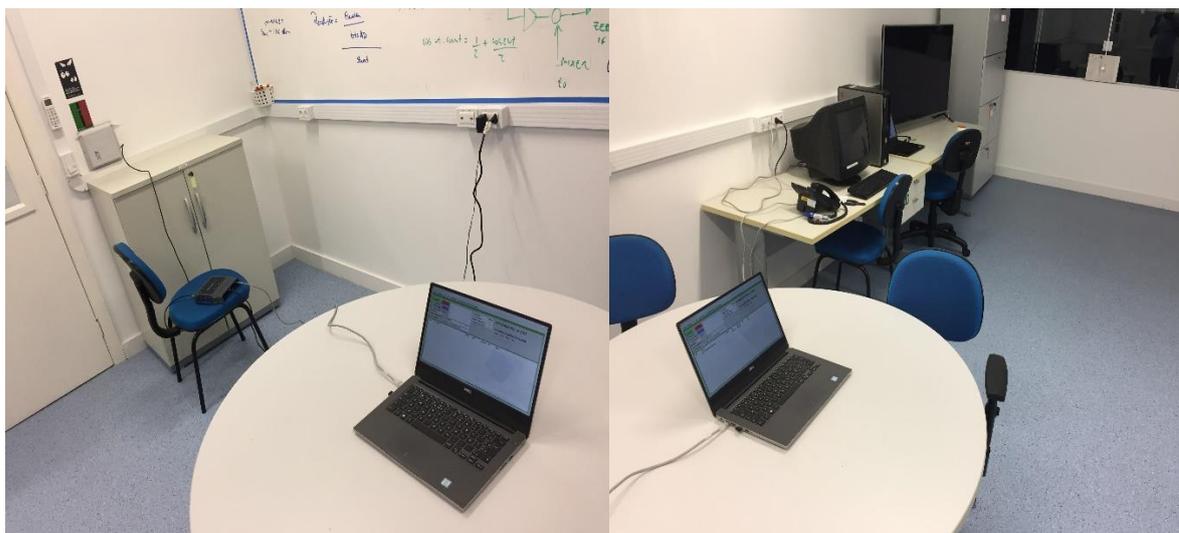
Figura 48 – Interface do leitor INTERMEC



Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente, foi medido o alcance da antena sem a mesma estar fixada em um objeto. Conseguiu-se obter um alcance de 6,8 metros.

Figura 49 – Medição do alcance da antena



Fonte: Elaborado pelo autor.

Utilizando um material metálico sobre a antena, Figura 49, conseguiu um alcance maior que 7,6 metros e 7,6 metros utilizando uma garrafa PET contendo água fresca. Devido as dimensões limitadas da sala onde foram feitas as medidas (7,6 metros), conseguiu-se efetuar as medidas somente até este ponto.

7.3 Comparação dos resultados

Por intermédio de simulações, os resultados indicaram um bom desempenho da antena na faixa de frequência de operação. Conseguiu-se um alcance acima de 6 metros sem uso de nenhum objeto sobre ela, e acima de 10 metros com uso de objeto contendo metal ou líquido.

As medições com uso de reader ficaram abaixo do esperado devido à muitos fatores. Primeiro devido as limitações da sala, a metodologia artesanal utilizada na fixação do *patch* sobre o substrato que pode ter causado um aumento da resistividade da antena e alguns vácuos entre substrato e *patch*.

8 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Os Sistemas de Identificação por Rádio Frequência têm se tornado cada vez mais difundidos no mercado atual. E ao longo dos anos, muitos pesquisadores vem trabalhando incansavelmente com o propósito de trazer melhorias no sistema e redução de custos de mercado. A identificação de objetos contendo metal e líquidos tem sido um dos desafios. As etiquetas mais difundidas nos sistemas RFID são do tipo antena dipolo, que além de possuir dimensões maiores, tem o seu desempenho diretamente afetado pela presença de um metal ou líquido. A fim de minimizar os efeitos adversos causados nestas condições, tem-se desenvolvido várias estruturas de antena utilizando técnicas diferentes e materiais de propriedades eletromagnéticas distintas.

Em busca de soluções alternativas, foram estudadas as antenas mais utilizadas nos sistemas RFID em UHF com o propósito de obter um bom embasamento teórico a fim de propor uma alternativa que melhorasse a identificação de objetos contendo metal e líquido. Entre as estruturas estudadas, as antenas que possuem o plano-terra (microfita e PIFA) apresentam melhores resultados quando submetidas sobre o material contendo metal ou líquido. Entre as duas, a antena PIFA apresenta dimensões menores em comparação com a antena microfita, sendo a dimensão um dos requisitos do projeto. Duas estruturas de antenas PIFAs propostas por autores diferentes foram avaliadas e apresentadas no presente trabalho.

As simulações efetuadas utilizando as antenas PIFAs estudadas neste trabalho, mostraram que elas são adequadas para o uso em materiais metálicos. Partindo nestes resultados, uma estrutura de antena PIFA foi proposta para este trabalho.

Dimensionamentos iniciais e simulações foram executados de modo a obter uma antena com melhor desempenho e dimensões menores. As simulações foram realizadas com auxílio do software HFSS, que já é utilizado com este propósito e está disponível no ITT-Chip. A estrutura proposta foi confeccionada de modo a validar os dados de alcance obtidos em simulações.

Com os resultados obtidos, concluiu-se que a antena é adequada para aplicação no sistema RFID em UHF, tanto para objetos contendo metal e líquido ou não. A antena apresentou dimensões semelhantes, $43 \times 30 \times 9 \text{ mm}^3$ comparando com as antenas descritas no trabalho. Além das dimensões menores, as simulações

apresentaram um alcance acima de 10 metros com metal e líquido, e acima de 6 metros sem. Devido às limitações do comprimento da sala onde foram feitas as medidas, o alcance máximo medido ficou abaixo do simulado. A sala tem um comprimento de 7,6 metros, que foi também o alcance máximo medido.

A fixação do elemento radiante sobre o substrato foi feita de forma artesanal, utilizando um Cianoacrilato (supercola). Como a fixação não foi de maneira linear, isso pode ter causado aumento da resistividade e conseqüentemente a redução no alcance da antena.

Existem algumas possibilidades de estudos futuros para dar continuidade a este trabalho, entre eles:

- Realização de testes da etiqueta em uma câmara anecóica.
- Medição de perda de retorno da antena utilizado probe station.
- Alteração de setup de medição.
- O desenvolvimento de etiquetas com a espessura do substrato reduzida.

REFERÊNCIAS

- AHSON, A.; ILYAS, M. **RFID Handbook Applications, Technology, Security, and Privacy**. 1. ed. New York: Press, CRC, 2008.
- ANSOFT, L. **An Introduction to HFSS: Fundamental Principles, Concepts, and Use**. 1. ed. Pittsburgh: Ansoft, 2009.
- BALANIS, C. A. **Teoria de antenas: análise e síntese**. 3. ed. Rio de Janeiro: Gen LTC, 2014.
- BARBIN, M. V. Etiqueta de RFID em UHF para objetos metálicos. **Repositório da Produção Científica e Intelectual da Unicamp**, p. 145, 2015.
- CHAWLA, V.; HA, D. S. An Overview of Passive RFID. **IEEE Communications Magazine**, v. 45, n. 9, p. 11–17, 2007.
- DE SOUZA, I. Q.; LOUREIRO, G. DA S. M.; LOPES, M. G. DE M. **RFID: Identificação por Rádio Frequência**. Disponível em: <https://www.gta.ufrj.br/grad/15_1/rfid/padronizacao.html>. Acesso em: 1 set. 2018.
- ELECTRONICS, C. **Skin Effect Depth Calculator**. Disponível em: <<https://chemandy.com/calculators/skin-effect-calculator.htm>>.
- FAUDZI, N. M. et al. Microstrip Dipole UHF-RFID Tag Antenna for Metal Object Tagging. **IEEE**, p. 6, 2016.
- FERREIRA, J. B. et al. A new structure of UHF RFID tag antenna mountable on metallic surface using double slits. **LATINCOM**, p. 3, 2017.
- FINKENZELLER, K. **RFID HANDBOOK**. 3. ed. West Sussex: Wiley, 2010.
- GLOVER, B.; BHATT, H. **Fundamentos de RFID**. 1. ed. Rio de Janeiro: Books, Alta, 2007.
- GODOY, B. **Descubra como as etiquetas RFID podem otimizar a logística da sua empresa**. Disponível em: <<https://www.mandae.com.br/blog/etiquetas-rfid-como-funcionam-e-quais-sao-as-suas-vantagens/>>. Acesso em: 9 set. 2018.

GOMES, A. T. G. **Telecomunicações: transmissão e recepção**. 21. ed. São Paulo: Érica, 2007.

GS1, B. **EPC/RFID**. Disponível em: <<https://www.gs1br.org/codigos-e-padros/epc-rfid/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 26 set. 2018.

IMPINJ, I. **Impinj Monza R6 Tag Chip Datasheet**. 5. ed. Seattle: Impinj, Inc., 2017.

ISO. International Standard Iso / Iec. v. 25021, 2004.

JUNIOR, L. F. L. A TECNOLOGIA DE RFID NO PADRÃO EPC E SOLUÇÕES PARA IMPLEMENTAÇÃO DESTA TECNOLOGIA EM EMPILHADEIRAS. p. 90, 2006.

LACERDA, D. C.; JUNIOR, A. C. DOS S. Projeto e Construção de Antena de Microfita para Sistema Móvel Celular. 2008.

POZAR, D. M. **Microwave Engineering**. 4. ed. United States of America: Wiley, John Sons Inc., 2012.

RIBEIRO, J. A. J. **Engenharia de Antenas: fundamentos, projetos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Érica Saraiva, 2012.

RIOS, L. G.; PERRI, E. B. **Engenharia de Antenas**. 2. ed. São Paulo: Blucher, Edgar, 2002.

SAUNDERS, S. R.; ZAVALA, A. A. **ANTENNAS AND PROPAGATION FOR WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS**. 2. ed. West Sussex: Wiley, 2007.

SOHRAB, A. P. et al. Label-type 3D RFID tag mountable on metallic and non-metallic objects. **IEEE**, p. 3, 2016a.

SOHRAB, A. P. et al. A UHF RFID Tag With Improved Performance on Liquid Bottles. **IEEE**, p. 4, 2016b.

TANENBAUM, A. S. **Redes de Computadores**. 4. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2003.

TELECO. **RFID**. Disponível em: <<http://www.teleco.com.br/rfid.asp>>.

TELECO. Redes Wi-Fi: Antenas. 2018.

WIKIWAND. **Radiação eletromagnética.** Disponível em:
<https://www.wikiwand.com/pt/Radiação_eletromagnética>.

YOUNG, P. H. **Técnicas de Comunicação Eletrônica.** 5. ed. São Paulo: Hall, Person Prentice, 2006.