

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**ESTUDO DE ANTENAS PARA ETIQUETAS DO SISTEMA
DE IDENTIFICAÇÃO POR RADIOFREQUÊNCIA**

GUSTAVO DANTAS CARRIJO

ORIENTADOR: Profº Dr. ANTONIO JOSÉ MARTINS SOARES

BRASÍLIA/DF: JUNHO de 2009

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ESTUDO DE ANTENAS PARA ETIQUETAS DO SISTEMA DE
IDENTIFICAÇÃO POR RADIOFREQUÊNCIA**

GUSTAVO DANTAS CARRIJO

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDA AO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE DE
BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.**

APROVADA POR:

Profº. Dr. Antônio José Martins Soares (Orientador)

Professor Adjunto da Faculdade de Tecnologia – Departamento de Engenharia Elétrica – UnB

Profº. Dr. Plínio Ricardo Ganime Alves (Examinador)

Professor Adjunto da Faculdade de Tecnologia – Departamento de Engenharia Elétrica – UnB

Profº. Dr. Franklin da Costa Silva (Examinador)

Professor Adjunto da Faculdade de Tecnologia – Departamento de Engenharia Elétrica – UnB

DATA: BRASÍLIA/DF, 5 de JUNHO de 2009

Agradecimento

Agradeço a Deus por tudo que me concedeu, me permitindo chegar até este momento.

Ao professor Martins, por ter me apoiado neste projeto e na urgência que se fez necessária, proporcionado, assim, a possibilidade de agarrar as grandes oportunidades que me apareceram.

À Lívia, minha namorada, que em todos os anos do curso sempre esteve ao meu lado, me fazendo feliz, me apoiando e estimulando sempre.

À minha família, pai, mãe e irmão, que sempre me apoiaram e servem de exemplo, força e amparo constante.

Agradeço também ao professor José Camargo e aos outros integrantes do LPCI, em especial ao Heider, que muito me ajudaram nos testes, me cedendo equipamentos, espaço, conhecimento, tempo e atenção.

Como não poderia esquecer, aos amigos e amigas da elétrica, que fizeram deste curso uma experiência fascinante.

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo teórico e prático sobre as antenas utilizadas nas etiquetas RFID (*Radio Frequency Identification*). Os sistemas de identificação por radiofrequência têm evoluído muito e se tornado de importância relevante à sociedade no aumento da segurança e eficiência para diversas aplicações. A presença no cotidiano das pessoas está cada vez mais comum, aparecendo em chaves de carros, crachás, rastreadores de mercadoria, cartões de crédito, entre outros. Ao longo do trabalho são discutidos os principais conceitos da tecnologia RFID e os aspectos teóricos das antenas utilizadas. A partir do entendimento proporcionado pelo estudo teórico, foram definidas características importantes para esta aplicação, como simplicidade, tamanho, impedância ideal de entrada, banda de operação, entre outras, e foram feitas simulações no programa FDTD Studio para a obtenção de antenas que apresentem essas características e como os aspectos construtivos da antena podem ser utilizados para a adaptação a cada aplicação específica. Por fim, duas antenas foram construídas e testadas, com os resultados destes testes confirmando as simulações.

Abstract

The present paper presents a theoretical and practical study on antennas used in RFID (Radio Frequency Identification) tags. The Radio Frequency Identification Systems have evolved to become very important and relevant to society, improving safety and efficiency for many applications. The presence in the daily lives of people is increasing, appearing in car keys, badges, tracking of goods, among others. In this paper, the main concepts of RFID technology and the theoretical aspects of antennas used in this technology are discussed. With the theoretical study, important features were defined for this application, such as simplicity, size, ideal input impedance, operational band, among others, and simulations were done using the software FDTD Studio to obtain antennas with those characteristics and how the antenna constructive aspects can be used to adapt to each specific application. Finally, two antennas were built and tested and the results of these tests were used to confirm the simulations.

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	A TECNOLOGIA RFID	2
2.1.	Características Gerais	2
2.1.1.	Padronização	2
2.1.2.	Etiquetas de RFID	2
2.1.3.	Frequência de Operação	4
2.2.	Acoplamento	6
2.2.1.	Acoplamento por Reflexão.....	6
2.2.2.	Acoplamento Indutivo.....	7
2.2.3.	Acoplamento Magnético	8
2.2.4.	Acoplamento Capacitivo	9
3.	ANTENAS PARA RFID	10
3.1.	Características Gerais das Antenas	10
3.2.	Modelos de Antena para RFID.....	11
3.2.1	Antenas Dipolo.....	11
3.2.2	Antenas Monopolo	12
3.2.3	Antenas Helicoidais.....	12
3.3.	Ganho, Diretividade e Diagrama de Radiação	13
3.4.	Reflexão	15
3.5.	Polarização	16
3.5.1	Polarização Linear.....	16
3.5.2	Polarização Circular	17
3.6.	Alcance do Sistema RFID	17
4.	PROJETO DE ANTENAS RFID.....	19
4.1.	Metodologia	19
4.2.	FDTD Studio.....	20
4.3.	Antena 1	22
4.4.	Antena 2	26

4.5.	Antena 3	29
4.6.	Antena 4	31
4.7.	Antena 5	34
5.	FABRICAÇÃO E TESTE DAS ANTENAS	41
5.1.	Metodologia	41
5.2.	Implementação da Antena 4	42
5.3.	Implementação da Antena 5	44
6.	Conclusões	47
	Referências Bibliográficas	48

Lista de Figuras

Fig. 2.1 Esquema básico do sistema RFID.....	2
Fig. 2.2 Exemplos de etiquetas RFID.	3
Fig. 2.3 Exemplo de etiqueta RFID com acoplamento por reflexão.....	7
Fig. 2.4. Acoplamento Indutivo.	7
Fig. 2.5. Acoplamento magnético.	9
Fig. 2.6. Acoplamento capacitivo.....	9
Fig. 4.1 A célula de Yee.....	21
Fig. 4.2 Representação do FDTD Studio de um dipolo simples.	22
Fig. 4.3 Impedância de entrada para o dipolo de $\lambda/2$	23
Fig. 4.4 Perda de retorno para o dipolo de $\lambda/2$	24
Fig. 4.5 Diagrama de radiação (plano XY) para o dipolo de $\lambda/2$, em 900 MHz	25
Fig. 4.6 Diagrama de radiação (plano ZX) para o dipolo de $\lambda/2$, em 900 MHz.....	25
Fig. 4.7 Diagrama de radiação (plano YZ), em 900 MHz.....	26
Fig. 4.8 Representação no FDTD Studio da antena 2.	27
Fig. 4.9 Impedância da antena 2.....	27
Fig. 4.10 Impedância versus comprimento para a antena 2	28
Fig. 4.11 Perda de retorno versus comprimento para a antena 2.....	29
Fig. 4.12 Representação da antena 3.....	30
Fig. 4.13 Impedância dos dipolos segmentados.....	30
Fig. 4.14 Perda de retorno da antena 3.....	31
Fig. 4.15 Representação da antena 4.....	32
Fig. 4.16 Impedância da antena 4.....	32
Fig. 4.17 Perda de retorno da antena 4.....	33
Fig. 4.18 Comparação da impedância da antena 4, variando L1.....	33
Fig. 4.19 Comparação da impedância da antena 4, variando L2.....	34
Fig. 4.20 Representação da antena 5.....	35
Fig. 4.21 Impedância da antena 5.....	35
Fig. 4.22 Resistência para Ms diferentes.....	36
Fig. 4.23 Reatância para Ms diferentes	36
Fig. 4.24 Resistência para diferentes impedâncias do loop.....	37
Fig. 4.25 Reatância para diferentes impedâncias do loop	37
Fig. 4.26 Perda de retorno da antena 5.....	38

Fig. 4.27 Diagrama de radiação da antena 5, em 900 MHz (Plano XY).....	38
Fig. 4.28 Diagrama de radiação da antena 5 em 900 MHz (Plano ZX).	39
Fig. 4.29 Diagrama de radiação da antena 5 em 900 MHz (Plano YZ).	39
Fig. 5.1 Antena 5 com conector N fêmea.....	42
Fig. 5.2 Implementação da antena 4.....	42
Fig. 5.3 Resistência medida para antena 4.	43
Fig. 5.4 Reatância medida para antena 4.....	43
Fig. 5.5 Coeficiente de reflexão medido para antena 4.	44
Fig. 5.6 Antena 5 implementada.	44
Fig. 5.7 Resistência medida para antena 5.	45
Fig. 5.8 Reatância medida para antena 5.....	45
Fig. 5.9 Perda de retorno medida para antena 5.	46

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Faixas de frequências no espectro	5
Tabela 2.2. Distância e aplicação em função da frequência	5

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia RFID (*Radio Frequency Identification*) vem se popularizando no cotidiano das pessoas, abrangendo novas áreas e aplicações. Hoje sistemas RFID são utilizados em diversas áreas como transporte, defesa, varejo, aplicações de logística, segurança de casas e carros etc. Essa tecnologia pode aumentar a produtividade e a eficiência de organizações e indivíduos, permitindo que informações de um objeto - a sua identidade – sejam enviadas a um leitor de RF.

O RFID está substituindo os códigos de barra, devido, principalmente, a vantagem de não precisar estar tão próximo do leitor, o que torna possível fazer a leitura a alguns metros de distância, além de armazenar maior quantidade de informação, é reprogramável e oferece maior segurança. Há a desvantagem do preço, no entanto, com o avanço das tecnologias de fabricação e a economia de escala, já é possível fazer uma etiqueta (ou *tag*) RFID a US\$ 0,25. Com este preço já se torna vantajosa a sua aplicação em produtos que tenham valor muito acima do mencionado, porém torna-se inviável para os mais baratos [1].

Este projeto visa estudar as antenas das etiquetas RFID, buscando um modelo simples, eficiente, pequeno e que tenha flexibilidade para ser colocado com diferentes *chips*. Para este estudo, será utilizado o FDTD Studio, *software* desenvolvido por Renato Picanço como tese de mestrado na Universidade de Brasília [7], já validado para caracterizar antenas de tamanho convencional, porém ainda não foi testado para a análise de antenas pequenas como as de RFID. Por este motivo, duas das antenas simuladas serão construídas e os resultados das medidas serão usados visando validar o *software*.

O desenvolvimento deste trabalho começa no capítulo 2 com um estudo geral da tecnologia RFID, buscando uma visão do sistema, suas aplicações e uma análise dos tipos de acoplamento magnético utilizáveis. O capítulo 3 visa o conhecimento específico sobre antenas dos sistemas RFID com as características necessárias, modelos comumente utilizados e o alcance proporcionado. No capítulo 4, utiliza-se o FDTD Studio para analisar cinco modelos diferentes de antenas. O capítulo 5 contém a análise de duas antenas implementadas, resultados dos testes e comparações.

2. A TECNOLOGIA RFID

RFID (*Radio Frequency Identification*) é um termo que descreve qualquer sistema de identificação no qual um dispositivo eletrônico utiliza sinal em radiofrequência, ou campo magnético variante, para rastrear um objeto. Os dois principais componentes de um sistema RFID são a etiqueta (*tag*, em inglês) e o leitor. O primeiro é colocado no objeto que se deseja rastrear; o segundo consegue reconhecer a presença de etiquetas RFID e ler suas informações. O leitor pode informar da presença do objeto etiquetado para outro sistema que, geralmente, tem um *middleware* para fazer a interface entre o leitor e a aplicação [2]. A figura 2.1 representa esses componentes.

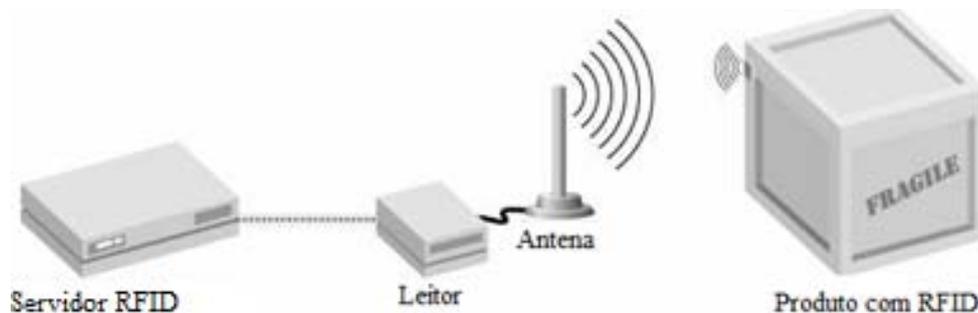


Fig. 2.1 Esquema básico do sistema RFID.

2.1. Características Gerais

2.1.1. Padronização

EPCglobal é um empreendimento conjunto entre o European Article Number International (EAN International, conhecido atualmente por GS1), o Uniform Code Council (UCC, conhecido atualmente por GS1 US) e a indústria. Seu objetivo é desenvolver padrões para descrever os componentes e a arquitetura do que é conhecido por EPCglobal network. Com essa padronização, pretende-se que uma rede constituída de *tags*, leitores e sistemas compatíveis permita a integração de cadeias inteiras de suprimentos. O foco do trabalho dessa instituição são os EPCs (*eletronic product code*) [1].

2.1.2. Etiquetas de RFID

O EPCglobal define quatro classes de etiquetas de RFID [1]:

- Classe 1: Etiquetas puramente passivas;

- Classe 2: Etiquetas puramente passivas com memória extra e suporte para protocolos de comando;
- Classe 3: Etiquetas semi-passivas;
- Classe 4: Etiquetas ativas.

Nas etiquetas passivas não existe nenhuma fonte de energia. Para a alimentação do circuito, é necessário que haja absorção do sinal transmitido pelo leitor. Esse sinal chega até a etiqueta sofrendo múltiplas reflexões. As etiquetas RFID podem mudar as características das ondas de rádio, por elas refletidas, ao mudar a conexão entre o *chip* e a antena, alterando o casamento de impedância.

Etiquetas semi-passivas têm fonte de energia interna e podem ter alguns sensores. O objetivo da energia é alimentar continuamente os sensores e o *chip*, sem necessidade de absorção de energia externa. Assim, etiquetas semi-passivas conseguem manter um histórico completo do objeto rastreado ou permitem uma distância maior de alcance, viabilizando a utilização do sistema em ambientes em que o sinal sofre grande atenuação.

Etiquetas ativas são muito mais desenvolvidas. Apresentam fonte de alimentação, receptor ativo, transmissor independente e ativo e podem se comunicar com diferentes etiquetas ativas, formando uma rede. Por causa do transmissor e do receptor ativos, podem alcançar distâncias de até centenas de metros de cobertura. Neste sistema, a bateria é crítica na vida útil da etiqueta, pois não é possível obter energia do leitor [1].

O objetivo da etiqueta RFID é conter e transmitir informações do objeto ao qual ela esteja fisicamente acoplada. Existem diversos mecanismos para guardar a informação e fazer a comunicação. Alguns exemplos de etiquetas são mostrados na figura 2.2 [2]:

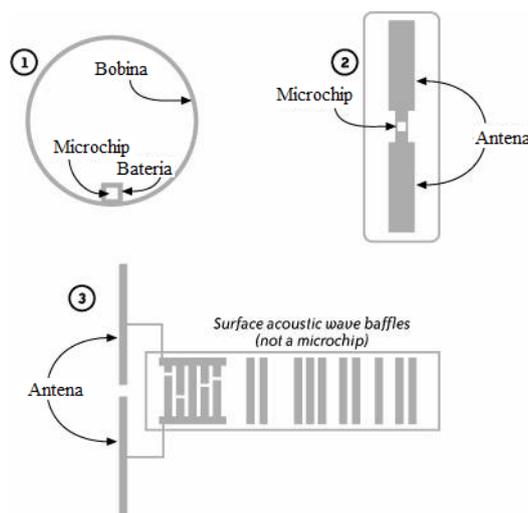


Fig. 2.2 Exemplos de etiquetas RFID.

Não existe um padrão para a arquitetura das etiquetas RFID, podendo apresentar diversas características que as diferenciam. Assim, os componentes presentes em cada etiqueta podem variar, contendo, ou não, um *microchip* ou fonte, por exemplo, mas todas, necessariamente, têm uma bobina ou antena com a função fundamental da tecnologia que é a transferência de informação. A seguir são apresentadas as principais características de uma etiqueta RFID.

- Anexável ao objeto: Qualquer etiqueta RFID precisa ser colocada no produto, o que implica em tamanho reduzido.
- Comunicar: É indispensável que haja transferência de informação entre a etiqueta e o leitor.
- Desabilitar: Algumas têm a opção de se desabilitar, inviabilizando sua reutilização após receber esse comando.
- Gravar: As informações do produto têm que ser gravadas na etiqueta. Ela pode ser fabricada de modo a ter apenas uma informação durante toda a vida ou ser regravável.
- Anti-colisão: Quando muitas etiquetas estão juntas, o leitor pode ter dificuldade em receber todas as informações. Assim, as etiquetas com essa propriedade conseguem transmitir alternadamente, sem colisão.
- Segurança: Em algumas aplicações é necessário que haja alguma codificação na informação.
- Diferentes Padrões: Algumas etiquetas conseguem se comunicar com leitores que contenham padrões diferentes, permitindo uma aplicação maior da etiqueta.

Dessas características, apenas as duas primeiras são fundamentais para qualquer RFID [2].

2.1.3. Frequência de Operação

A etiqueta utiliza uma frequência de operação para se comunicar ou obter energia. Na tabela 2.1 tem-se a definição tradicional das faixas de frequência no espectro. O RFID pode operar em diversas faixas de frequência; as mais comuns são LF, HF, UHF e SHF [2]. No entanto, nessas frequências existem diversos outros sistemas operando, como rádio, televisão, sistemas de segurança e outros. Para evitar interferência nesses sistemas, as frequências utilizadas para RFID são aquelas definidas para o ISM (*Industrial Scientific*

Medical). Frequências abaixo de 135 kHz não são do ISM, mas, como são utilizadas para pequenos alcances, não causam interferência significativa.

Existe grande diferença de operação entre esses espectros. É preciso definir a aplicação do sistema RFID para saber qual é a melhor frequência a ser utilizada. A Tabela 2.2 relaciona frequência, distância e possível aplicação [2].

Tabela 2.1. Faixas de frequências no espectro.

Sigla	Nome da faixa de frequência	Faixa de frequência	Frequência ISM
ELF	<i>Extremely Low Frequency</i>	300 – 3000 Hz	-
VLF	<i>Very Low Frequency</i>	3 – 30 kHz	-
LF	<i>Low Frequency</i>	30 – 300 kHz	< 135 kHz
MF	<i>Medium Frequency</i>	300 – 3000 kHz	-
HF	<i>High Frequency</i>	3 – 30 MHz	6,78 MHz, 13,56 MHz, 27,125 MHz,
VHF	<i>Very High Frequency</i>	30 – 300 MHz	40,680 MHz
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>	300 – 3000 MHz	433,92 MHz, 869 MHz, 915 MHz, 2,45 GHz
SHF	<i>Super High Frequency</i>	3 – 30 GHz	5,8 GHz, 24,125 GHz
EHF	<i>Extremely High Frequency</i>	30 – 300 GHz	-

Tabela 2.2. Distância e aplicação em função da frequência.

Frequência	Alcance máximo para RFID passivos	Aplicação
LF	50 cm	Identificação de animais e leitura próxima de itens com grande quantidade de água
HF	3 m	Controle de entrada em edifícios
UHF	9 m	Identificação de caixas
SHF	> 10 m	Identificação de veículos

2.2. Acoplamento

Acoplamento é o mecanismo que determina como o circuito da etiqueta e o circuito do leitor se influenciam para fazer a comunicação ou transferir energia. O tipo de acoplamento determina a distância de alcance do sistema RFID e a frequência que deve ser usada. Acoplamento indutivo é mais utilizado para LF ou HF. Acoplamento por reflexão funciona melhor para frequências mais altas. Acoplamento magnético é mais eficiente para 110 MHz e o acoplamento capacitivo costuma ser usado para frequências em torno de 10 MHz [2].

2.2.1. Acoplamento por Reflexão

Neste tipo de acoplamento, as ondas transmitidas pelo leitor são refletidas de volta pela etiqueta. O sinal refletido tem a mesma frequência do sinal enviado, mas com várias características modificadas para enviar informação. Alguns sistemas fazem isso através de propriedades físicas da etiqueta, outros chaveando uma carga conectada em paralelo com a antena, causando descasamento e, conseqüentemente, uma variação na eficiência da antena.

Como o leitor e a etiqueta transmitem na mesma frequência, eles não podem enviar informação simultaneamente, para não causar interferência. Deste modo, o sistema é *half-duplex* (HDX), ou seja, ambas as partes transmitem e recebem informação, mas a informação trafega em apenas um sentido de cada vez. Contudo, a leitora energiza a etiqueta continuamente, enviando energia tanto nos momentos em que o leitor transmite quanto naqueles em que a etiqueta está transmitindo.

Além de refletir a energia de volta ao leitor, a antena da etiqueta alimenta um *microchip*. Este *chip* controla um resistor que liga as duas metades da antena, colocando ou retirando o resistor do circuito, figura 2.3. Sem o resistor, com uma ligação de baixa impedância, a antena transmite um sinal com maior amplitude do que se tivesse com o resistor. Chaveando este resistor, o *chip* consegue criar uma modulação ASK (*Amplitude-Shift Keying*) no sinal para transmitir uma identificação única daquela etiqueta, que se encontra na memória do *chip* [2].

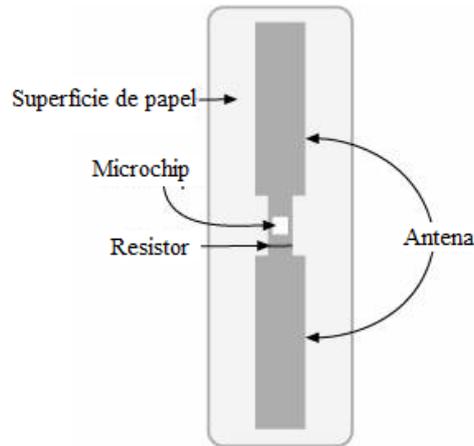


Fig. 2.3 Exemplo de etiqueta RFID com acoplamento por reflexão.

2.2.2. Acoplamento Indutivo

No acoplamento indutivo, o leitor tem uma antena do tipo bobina que gera um campo magnético que se acopla à bobina da etiqueta RFID, figura 2.4. Com a variação do campo magnético, é induzida uma tensão e, conseqüentemente, uma corrente na bobina da etiqueta, do mesmo modo que ocorre em um transformador.

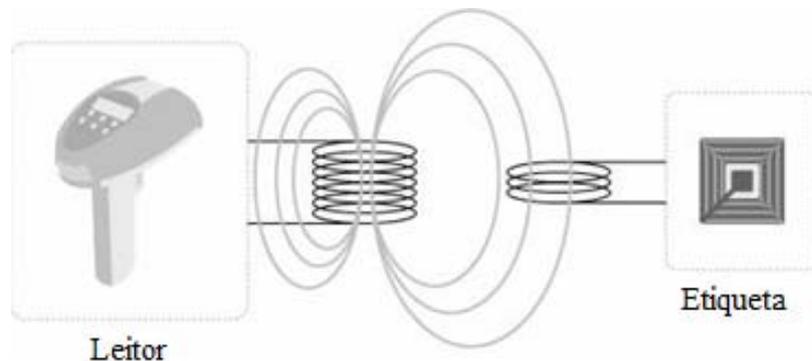


Fig. 2.4. Acoplamento Indutivo.

Com o *chip* estando energizado, pode haver comunicação por chaveamento de carga, de modo parecido com o do acoplamento por reflexão. Um resistor é chaveado, o que causa variações no campo magnético, criando uma variação de tensão na antena do receptor. No entanto, esta variação de tensão é muito pequena, sendo necessário utilizar outros métodos para gerar a resposta da etiqueta.

No método da subportadora, o resistor é chaveado muito rapidamente, gerando duas novas frequências: uma um pouco acima da frequência fundamental; outra um pouco abaixo. Estas novas frequências são chamadas de subportadoras, sendo reconhecidas facilmente pelo leitor, por operarem em frequências diferentes da fundamental.

O método subharmônico divide a frequência fundamental por um valor inteiro, geralmente por dois, para transmitir a resposta da etiqueta.

Nestes dois métodos é utilizada a transmissão *full duplex* (FDX), ou seja, as duas partes transmitem e recebem ao mesmo tempo. Vários tipos de chaveamento podem ser utilizados, sendo o ASK o mais comum.

O outro tipo de acoplamento indutivo é o sequencial (SEQ), que usa a modulação FSK (*Frequency Shift Keying*). Como no método de acoplamento por reflexão, a frequência utilizada para transmissão de dados é a mesma na etiqueta e no leitor. Na operação sequencial, o campo magnético do leitor carrega um capacitor na etiqueta e se desliga. A etiqueta, então, usa um oscilador para criar o próprio campo magnético na mesma frequência do leitor, detectando assim a informação, pois seu campo está desativado.

Os sistemas RFID que utilizam acoplamento indutivo são passivos, ou semi-passivos e têm capacidade para até 2 kb. As antenas utilizadas são bobinas, o que as tornam grandes, e o alcance pequeno, tipicamente 10 cm [2].

2.2.3. Acoplamento Magnético

O acoplamento magnético é semelhante ao indutivo, de pequeno alcance, onde o leitor e a etiqueta formam um par de bobinas acopladas. A maior diferença está na bobina do leitor, que é feita de um núcleo de ferrite em formato circular ou em U, com enrolamentos, como mostra a figura 2.5. A etiqueta precisa estar a 1 cm do leitor e apresenta um acoplamento muito forte, podendo usar modulação ASK diretamente. É o método ideal para o uso em *smart cards* [2].

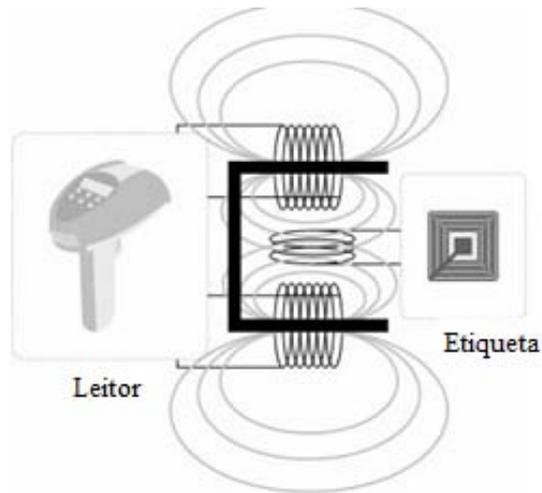


Fig. 2.5. Acoplamento magnético.

2.2.4. Acoplamento Capacitivo

O acoplamento capacitivo é outra forma de acoplamento de proximidade, que opera melhor com a etiqueta inserida no leitor, muito utilizado também para *smart cards*. Neste método, as antenas são dispensadas e substituídas por eletrodos. O leitor e a etiqueta têm condutores que, quando postos em paralelo, formam um capacitor, figura 2.6. O acoplamento magnético pode energizar *chips* complexos e usar a modulação ASK, com modulação de carga [2].

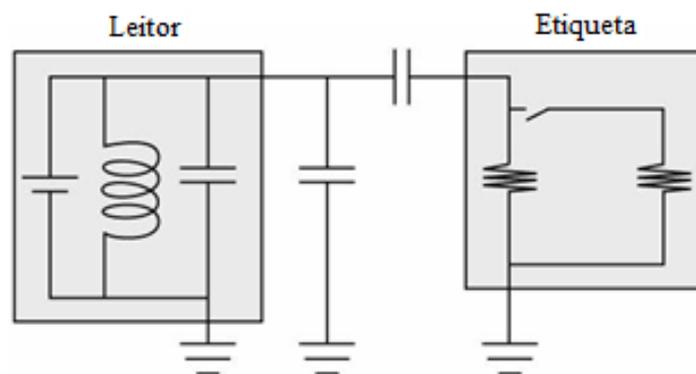


Fig. 2.6. Acoplamento capacitivo

3. ANTENAS PARA RFID

3.1. Características Gerais das Antenas

As etiquetas passivas contêm antenas que são usadas para obter energia do sinal do leitor e se comunicar com este. A quantidade de energia recebida pela etiqueta depende de vários fatores, mas os principais são: distância entre leitor e etiqueta, potência do sinal do leitor e eficiência das antenas do sistema RFID.

Para o projeto de uma antena eficiente para as etiquetas, que têm tamanho reduzido, diversos fatores precisam ser analisados, como a forma e o material do objeto em que ela será colocada e o tipo de antena – com a definição precisa de suas propriedades, tais como ganho, polarização, impedância etc.

O sistema RFID é usado na identificação de diferentes produtos, com diversas embalagens e, conseqüentemente, em materiais que apresentam propriedades eletromagnéticas diferentes. Essas características de cada produto podem afetar a impedância da antena devido à mudanças na frequência de ressonância e ao casamento de impedância entre a antena e o *chip*.

Para contornar esses efeitos negativos da proximidade do produto com a antena, vários modelos de antena são usados nas etiquetas, porém eles são dependentes da frequência. Na operação em HF, em que existe um número limitado de variações na geometria da antena, usa-se tipicamente indutores no formato de espiras. Ao projetista da etiqueta cabe decidir entre a forma (circular, quadrado, retângulo), número de voltas na espira e o espaçamento entre as linhas. No caso de antenas para funcionamento em UHF, existe uma ampla gama de modelos, que devem ser escolhidos de acordo com cada aplicação. Geralmente o projetista dessas antenas necessita de uma simulação tridimensional envolvendo a antenas e o objeto em que ela será colocada, fazendo uma análise eletromagnética do sistema como um todo. Este processo é crítico para o bom funcionamento do RFID em UHF devido, principalmente, ao pequeno comprimento de onda utilizado. Neste caso o alcance é maior, mas a onda sofre grande influência das propriedades eletromagnéticas do meio, ao contrário da situação em que são usados comprimentos de onda maiores, como em HF.

O material da antena é outro fator que afeta as tecnologias de HF e UHF diferentemente. Ambas as tecnologias precisam da menor resistência possível, mas as

antenas UHF são muito afetadas pelo efeito pelicular. A primeira implicação é a necessidade da superfície da antena ser extremamente lisa, para minimizar a perda da área da antena. Em segundo lugar, as antenas UHF são projetadas para uma indutância específica, que permita o casamento com o *chip*. No entanto, a proximidade de objetos, especialmente os feitos de metal ou materiais de alta permissividade, causa o descasamento das antenas [3]. Além disto, a tecnologia UHF é afetada pela formação de óxido na superfície ao longo do tempo, aumentando a resistência da antena e, assim, degradando o seu desempenho. Esse problema pode ser resolvido usando material que não seja metal, como polímeros condutores [4].

3.2. Modelos de Antena para RFID

Como visto anteriormente, a antena é uma parte fundamental do sistema RFID e deve ser projetada adequadamente. Alguns aspectos devem ser avaliados, especialmente em relação às antenas das etiquetas. Elas têm que ser pequenas, para ser possível anexá-las em objetos menores, precisam ser simples e baratas, para tornar viável a aplicação da tecnologia na maior quantidade de produtos possível, e eficientes, para aumentar o alcance do dispositivo. Com esse intuito, as antenas mais utilizadas nessa tecnologia são as apresentadas a seguir [5].

3.2.1 Antenas Dipolo

A antena dipolo é aquela em que a energia na recepção ou na transmissão é entregue por uma abertura no seu centro. É a antena fisicamente mais simples de ser feita. Consiste de um condutor elétrico reto, feito de material condutor como o cobre, interrompido no centro, formando, assim, dois pólos. Estes dispositivos podem ainda ser divididos em:

- Dipolo de meia onda: o comprimento total da antena é a metade do comprimento de onda da frequência utilizada. Ela otimiza a transferência de potência entre a etiqueta e o leitor.
- Dipolo de um quarto de onda: o comprimento total da antena é um quarto do comprimento da onda correspondente. Ela usa o plano da terra para refletir uma imagem da antena e completar o dipolo.

- Antena dipolo dupla: consiste em dois dipolos. Com esta configuração é reduzido o problema da orientação da antena em relação ao leitor.
- Dipolo dobrado: esta antena consiste em dois ou mais condutores retos que são conectados em paralelo. Cada condutor tem metade do comprimento de onda da frequência utilizada.

A figura 3.1 [5] apresenta os tipos de dipolos citados.

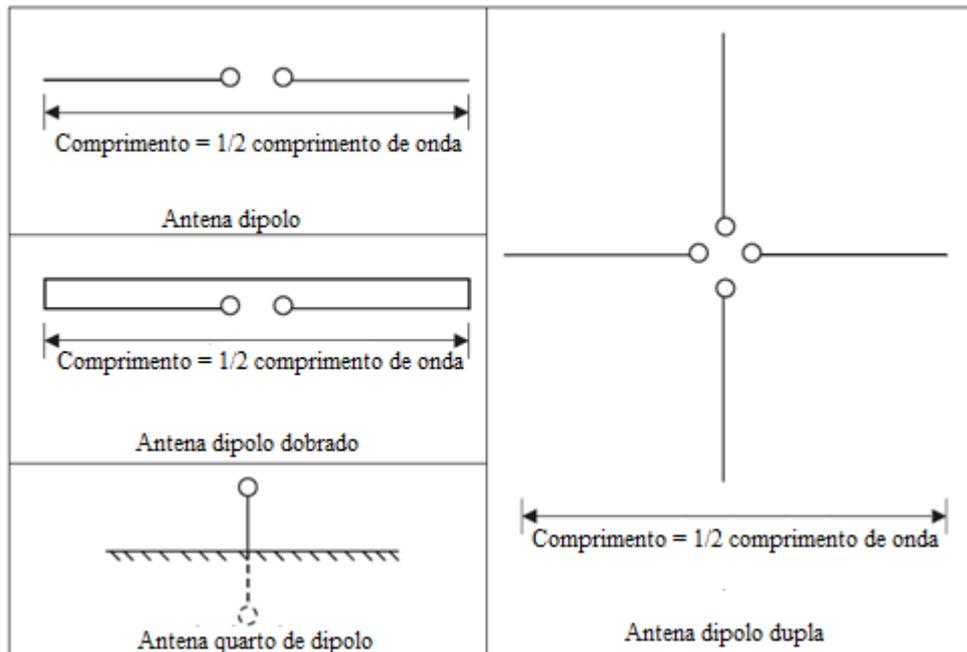


Fig. 3.1 Tipos de antena dipolo.

3.2.2 Antenas Monopolo

Uma antena monopolo é um tipo de antena dipolo formada pela substituição de metade do dipolo pelo plano terra, com certo ângulo em relação à metade que sobrou. Se o plano terra é grande o suficiente, a antena pode agir exatamente como um dipolo, porque a imagem refletida forma perfeitamente a metade retirada da antena [5].

3.2.3 Antenas Helicoidais

Uma antena helicoidal, figura 3.2 [6], consiste em um fio condutor retorcido em forma de hélice. Esse dispositivo é um exemplo de antena que produz uma onda polarizada circularmente. Elas apresentam as seguintes características:

- O comprimento da bobina da antena determina o ganho da antena;
- O diâmetro da antena é determinado pelo comprimento de onda.

Devido à polarização circular, ela consegue receber sinais com todos os tipos de polarização: linear vertical, linear horizontal ou circular.

Uma antena helicoidal pode ser polarizada no sentido horário ou no sentido anti-horário. A antena com uma destas polarizações terá um desempenho fraco ao receber sinais da outra polarização.

Estas antenas são muito utilizadas no leitor, para aplicações que sejam de difícil, ou mesmo impossível, previsão quanto à orientação do objeto em relação a este. A sua utilização nas etiquetas é rara, pois é uma estrutura mais complexa e muitas vezes é inviável a sua produção em tamanho e preço reduzidos [5].

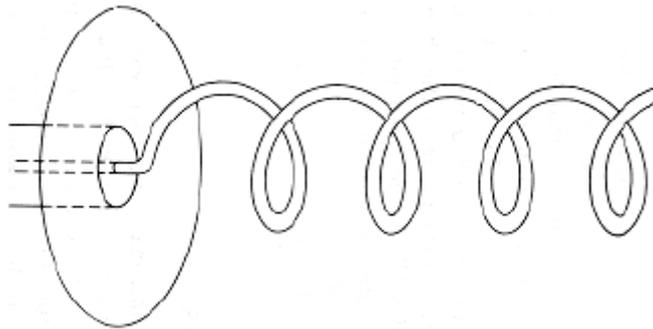


Fig. 3.2 Exemplo de antena helicoidal.

3.3. Ganho, Diretividade e Diagrama de Radiação

A diretividade de uma antena é definida como sendo a relação da densidade de potência radiada em certa direção e a densidade de potência radiada isotropicamente. Esta característica geralmente é expressa em decibel (dB).

Como a referência da diretividade é a potência de uma antena isotrópica, o ganho desta antena é igual a um, ou zero dB.

As antenas são alimentadas por fontes, e, em geral, nem toda a potência disponível no gerador será radiada. Estas perdas podem ser atribuídas a efeitos do descasamento, ou reflexão na conexão da antena com a fonte. Assim, a potência entregue à antena é igual à potência radiada mais as perdas ôhmicas.

O ganho é definido como a relação da densidade de potência radiada pela antena em certa direção e o total de potência radiada por uma antena isotrópica. Então, o ganho

representa a eficiência real da antena. Ganho e diretividade estão relacionados pelo fator de eficiência que é aplicado ao valor de diretividade para calcular o ganho da antena.

A representação gráfica da radiação da antena é feita utilizando diagramas de radiação, que são, geralmente, disponibilizados nos planos vertical e horizontal ou uma representação polar em três dimensões.

As antenas direcionais têm um alto ganho, mas um ângulo pequeno de cobertura, enquanto as antenas omnidirecionais, como o dipolo, têm um ganho pequeno, mas uma abrangência larga. O diagrama de radiação do dipolo é apresentado na figura 3.3 [1], em que os fios que formam esta antena estariam no eixo Y.

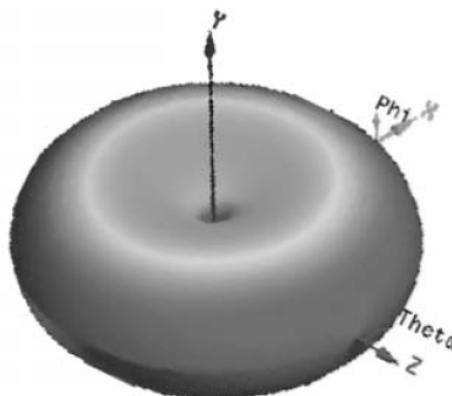


Fig. 3.3 Padrão de radiação de uma antena dipolo.

Em um sistema RFID, normalmente não se pode definir uma orientação para as etiquetas em relação ao leitor, pois os produtos podem ser manuseados e mudados de posição a qualquer momento. Para estes casos, o ideal é ter antenas com menor diretividade. A utilização de antenas omnidirecionais, como o dipolo ou, ainda melhor, um dipolo duplo para evitar o problema de nulos do padrão de radiação destas antenas, é a melhor solução para estes casos.

A utilização dessas antenas permite que a etiqueta receba o sinal incidente, independentemente da sua orientação com relação à antena do leitor, onde o ganho típico de uma antena dipolo é de 2,2 dBi.

A antena do leitor, por outro lado, costuma ser do tipo diretiva, focando o sinal por onde a etiqueta deve passar. Isto permite um ganho típico de 6 dBi para estas antenas, com polarização circular.

Assim, os ganhos são dependentes da orientação física das duas antenas, representadas em um sistema polar de variáveis θ e Φ . A máxima energia transferida ocorre normalmente quando as linhas centrais dos planos associados a cada antena são coincidentes. Com o ângulo mudando, saindo da melhor orientação, os ganhos vão diminuindo. Deste modo, para calcular a quantidade de energia que realmente está disponível para a etiqueta, é necessário saber a orientação física da antena da etiqueta e do leitor [1].

A figura 3.4 [1] representa a posição mais favorável para as duas antenas, enquanto a figura 3.5 [1] representa uma posição bem desfavorável.

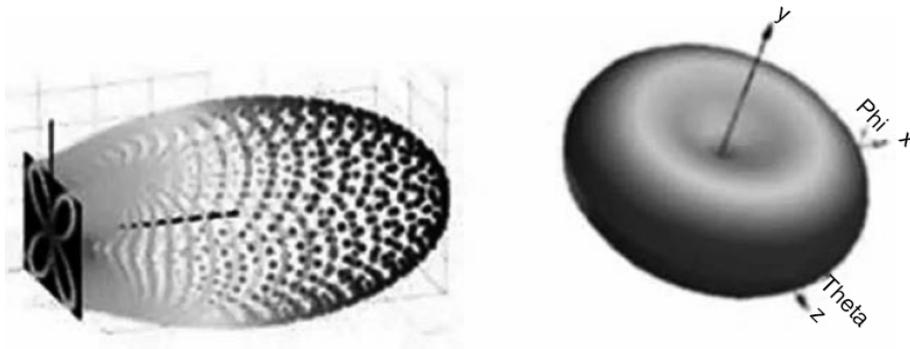


Fig. 3.4 Posição das antenas mais favorável à comunicação.

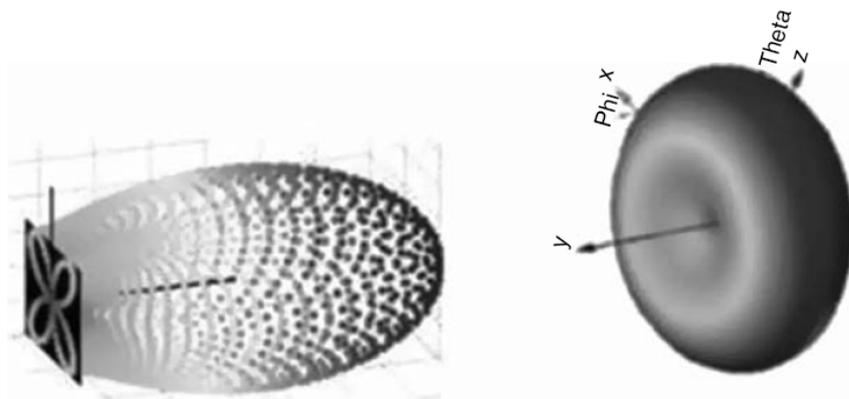


Fig. 3.5 Posição desfavorável das antenas.

3.4. Reflexão

Reflexão é uma propriedade relativa ao casamento da impedância da antena com a impedância da carga, no caso o *chip*, na etiqueta RFID.

O casamento de impedância determina a quantidade de energia que pode ser transferida entre a antena e o *chip*. A máxima transmissão de energia ocorre no casamento,

quando a parte imaginária da impedância complexa da antena se cancela com a do *chip*, e as resistências têm o mesmo valor numérico. O valor dessas resistências não costuma ser de 50 ohm, como em um sistema RF típico, visando à flexibilidade no projeto da antena.

Quando o casamento não é perfeito, existe uma parte imaginária na impedância que resulta em uma diminuição da potência. O processo de casar e descasar a impedância utilizando uma carga é muito utilizado na transmissão do RFID, permitindo fazer modulação ASK (*amplitude shift keying*) ou PSK (*phase shift keying*).

O coeficiente de reflexão é definido como [1]

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_A}{Z_L + Z_A} \quad (3.1)$$

onde Z_L representa a impedância da carga e Z_A , a impedância da antena.

Da equação (3.1) pode-se perceber que: se a carga estiver curto-circuitada, ou seja, impedância igual a zero, $\Gamma_{curto} = -1$; se a carga estiver aberta, ou seja, impedância da carga igual a infinito, $\Gamma_{aberto} = +1$; no caso das impedâncias estarem casadas, ou seja, as cargas sejam complexos conjugados, $\Gamma_{casado} = 0$. Estes são os três casos notáveis. Para quaisquer outros valores de impedância o coeficiente de reflexão estará entre +1 e -1.

3.5. Polarização

Polarização é o termo usado para descrever o movimento da direção do vetor campo elétrico quando a energia eletromagnética é transmitida da antena, neste caso, ondas de radiofrequência, para o RFID. Existem dois tipos de polarização: linear e circular.

3.5.1 Polarização Linear

Quando uma onda eletromagnética se propaga, há variações do campo elétrico e do campo magnético, que acontecem em um plano perpendicular à direção de propagação da onda. Se estas vibrações são tais que o vetor campo elétrico permanece paralelo a uma linha no espaço enquanto a onda se propaga, essa onda é dita polarizada linearmente. Como o campo magnético, perpendicular ao campo elétrico, também permanecerá paralelo a uma linha no espaço, isto fixa o plano dos vetores campo elétrico e magnético. Existem dois tipos de polarização linear:

- Polarização horizontal: Esta é a polarização linear em que o campo elétrico da onda viaja horizontalmente à superfície da terra.

- Polarização vertical: Nesta polarização linear, o campo elétrico da onda viaja perpendicular a superfície da terra.

Uma antena polarizada linearmente emite sua radiação com o campo elétrico em apenas um sentido, horizontal ou vertical, fazendo com que a potência recebida por outra antena na mesma polarização seja maximizada. Contudo, isto torna a antena sensível à orientação da etiqueta com respeito à polarização. Desse modo, esse tipo de antena é útil para aplicações em que a orientação da antena é previsível e fixa. Antenas dipolo são linearmente polarizadas [5].

3.5.2 Polarização Circular

Onda circularmente polarizada é aquela em que o vetor campo elétrico gira em um círculo, enquanto a onda se propaga. Um sinal desta natureza contém componentes horizontais e verticais, o que faz com que o receptor deste sinal o receba, mesmo tendo polarização linear de qualquer dos dois tipos. Assim, esta antena não é influenciada pela orientação da etiqueta, sendo a melhor solução para o leitor em aplicações onde a orientação do objeto é desconhecida ou imprevisível. Para aplicar esta configuração, é necessário uma alimentação dupla da antena, algo complexo para se fazer na pequena área disponível da etiqueta e obviamente mais oneroso, fazendo com que a polarização circular seja praticamente inviável em etiquetas RFID [5].

3.6. Alcance do Sistema RFID

A antena da etiqueta RFID passiva precisa obter a energia necessária para o dispositivo funcionar usando a energia de uma onda de RF continuamente enviada pelo leitor. A magnitude da potência recebida para determinada distância, e conseqüentemente o alcance do sistema, são determinados pela equação de Friis, dada por [3]:

$$P_R = M. p. EIRP. G_{tag} \frac{\lambda^2}{(4 \cdot \pi \cdot R)^2} \quad (3.2)$$

onde,

P_R é a potência recebida;

G_{tag} é o ganho da antena da etiqueta quando há casamento de polarização;

λ é o comprimento de onda;

R é a distância entre transmissor e receptor;

M é o fator de descasamento da impedância, dado por $(1 - |\Gamma_{tag}|^2)$;

p é o fator de descasamento da polarização;

EIRP (*Effective Isotropic Radiated Power*) equivale ao produto da potência transmitida pelo leitor, multiplicado pelo ganho da antena deste.

A potência recebida da equação (3.2) é definida pela sensibilidade do receptor, ou seja, a potência mínima que deve chegar até o dispositivo para que ele consiga funcionar (P_{ME}). Este valor pode ter grande variação, dependendo do *design* da etiqueta. Valores comuns para a sensibilidade da etiqueta estão entre -10 dBm e -15 dBm [3].

O alcance máximo do sistema também é limitado pela sensibilidade do leitor (P_{ML}) para o sinal irradiado da etiqueta. Considerando a etiqueta como transmissor e o leitor como receptor, tem-se como valores típicos de sensibilidade -60 dBm a -90 dBm [3].

A potência transmitida é definida no leitor e costuma ser fixado um valor máximo por regras governamentais. O objetivo é evitar interferência em outros sistemas e a absorção excessiva de radiação não-ionizante pelas pessoas na proximidade do transmissor, como é feito para qualquer sistema de comunicação.

O alcance máximo para satisfazer a sensibilidade da etiqueta é apresentado na equação (3.3) [3].

$$r_{tag} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{M \cdot p \cdot EIRP \cdot G_{tag}}{P_{ME}}} \quad (3.3)$$

Para garantir que a sensibilidade do leitor seja alcançada, a mesma equação pode ser usada, substituindo G_{tag} por G_{leitor} , P_{ME} por P_{ML} e a EIRP do leitor pela EIRP da etiqueta.

4. PROJETO DE ANTENAS RFID

4.1. Metodologia

Ao se elaborar um projeto de antenas, para se obter resultados precisos sobre a propagação da energia, diagrama de radiação, impedância de entrada, VSWR, entre outros, faz-se necessário a solução das equações de Maxwell. No entanto, a solução analítica para estas equações é extremamente complexa, sendo, em determinadas situações, conveniente o uso de métodos numéricos. Neste trabalho, utilizou-se o *software* FDTDStudio [7] que faz uso do Método das Diferenças Finitas do Tempo (*Finite Difference Time Domain* – FDTD) para a solução das equações de Maxwell no domínio do tempo.

O objetivo inicial deste trabalho é a simulação de modelos diferentes de antenas no *software* FDTD Studio para determinar a melhor estrutura, além de validar o *software* usado para estruturas de tamanho reduzido, como é o caso de antenas para etiquetas de RFID. Após a simulação computacional, foram construídas duas antenas que possibilitaram a execução dos testes e a comparação com os resultados do FDTD Studio.

A escolha da melhor antena está condicionada a cinco características necessárias para a utilização em etiquetas RFID:

- Ser simples, ou seja, com custo de implementação reduzido, para viabilizar a sua utilização;
- Ser pequena o suficiente para ser colocada em qualquer objeto a ser rastreado;
- O diagrama de radiação deve ser omnidirecional devido à aplicação das etiquetas em que, na maioria das vezes, não é possível determinar a posição exata do objeto;
- Devido ao custo e ao processo de fabricação, as antenas devem ter suas impedâncias diretamente casadas com a do *chip*, que pode ser diferente dos 50 Ω usuais. Altos valores de capacitância e baixa resistência são comumente observados, resultando em impedâncias da ordem de $Z_L = 10 - j120$ [8]. Assim, espera-se que a impedância da antena seja aproximadamente $Z_a = 10 + j120$ para a frequência de ressonância, que, no caso deste projeto, espera-se que seja em torno de 900 MHz, por ser uma frequência de utilização usual de dispositivos RFID.
- A banda de operação da antena deve ser reduzida para evitar interferir ou receber interferência de outros sistemas em frequências adjacentes.

4.2. FDTD Studio

O FDTD Studio é um *software* desenvolvido na Universidade de Brasília com o propósito de analisar a propagação das ondas eletromagnéticas através da solução direta no domínio do tempo das equações de Maxwell pelo Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (*Finite Difference Time Domain – FDTD*).

Este método foi proposto inicialmente por Yee em 1966 e vem sendo muito utilizado e aperfeiçoado desde então, apresentando aplicação em diferentes áreas como: análise e projeto de antenas e dispositivos de micro-ondas, fotônica, dispositivos eletrônicos de alta velocidade, estudo da interação de ondas eletromagnéticas em tecidos biológicos, entre outros [7].

O método utilizado no *software* tem vantagens como:

- Não utiliza álgebra linear, o que torna o número de incógnitas limitado apenas pelo tamanho da memória disponível para o processamento;
- As fontes de erro são conhecidas e podem ser limitadas, tornando a análise robusta e precisa;
- Os problemas transitórios e as não linearidades são tratados naturalmente, devido à sua característica de análise no tempo;
- A tarefa de especificar uma nova estrutura para ser analisada se reduz à tarefa de gerar uma nova malha;

Na abordagem de Kane Yee, as componentes \vec{E} e \vec{H} são espacialmente dispostas de modo que cada componente de campo \vec{E} é circundada por quatro componentes de campo \vec{H} e cada componente do campo magnético é circundada por quatro componentes do campo elétrico. Essas componentes dos campos são dispostas em células tridimensionais de tamanho $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$, como é apresentado na figura 4.1. As componentes de campo magnético são posicionadas no centro de cada face e as componentes de campo elétrico são dispostas nos pontos centrais das arestas da célula, de modo que todo o espaço tridimensional seja preenchido com componentes intercalados dos campos elétrico e magnético [7].

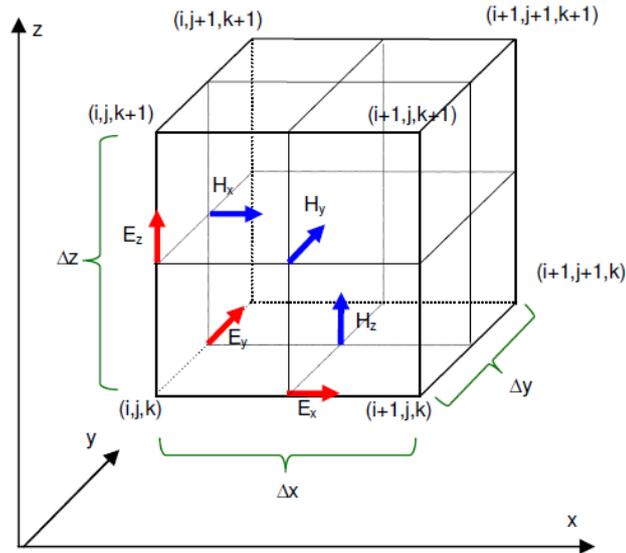


Fig. 4.1 A célula de Yee.

As características de propagação das ondas numéricas ao longo da malha formada por essas células depende dos valores utilizados para Δx , Δy , Δz e Δt . Esses valores influenciam na velocidade de propagação da onda na malha, que apresenta uma pequena diferença da velocidade da luz. O erro numérico do método aumenta com o aumento da diferença entre as velocidades. Deste modo, as dimensões das células devem ser escolhidas com base na maior frequência presente na onda de propagação. O mínimo necessário para garantir a estabilidade do método são quatro células por comprimento de onda, mas, para se obter resultados com erros numéricos baixos, recomenda-se o uso de pelo menos 10 células por comprimento de onda.

A estabilidade do método também necessita que se satisfaça o critério de estabilidade de Courant, que em malhas tridimensionais é definido por:

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}}} \quad (4.1)$$

Para o software FDTD Studio, é importante observar o critério de 10 células por comprimento de onda. O Δt que satisfaz o critério de Courant já é definido pelo programa de acordo com as outras características da malha, mas é necessário que os valores de Δx , Δy e Δz não sejam diferentes entre si em mais de um grau de magnitude para que a equação (4.1) seja válida.

Como características atualmente implementadas no software utilizado neste projeto, pode-se citar [7]:

- Interface Gráfica 3D (OpenGL);

- Importação de arquivos DXF - Permite que estruturas complexas sejam modeladas em um aplicativo de CAD e posteriormente transferidas para o FDTD STUDIO;
- Modelamento nativo de diversos objetos (cilindros, esferas, toróides, hélices, guias, fios etc.);
- Malhas uniformes e não-uniformes;
- Banco de dados de materiais;
- Diversos modelos de fontes: dipolo, monopolo, onda plana, entre outros;
- Modelagem de fios finos e planos condutores;
- Condições de contorno PML e MUR;
- Visualização animada dos campos;
- Cálculo e visualização dos diagramas de radiação, impedância de entrada, VSWR etc.

4.3. Antena 1

Considerando as três primeiras características almejadas neste projeto (simplicidade, tamanho e diagrama de radiação omnidirecional) a tentativa mais óbvia é um dipolo de meia onda. Essa antena, formada por dois condutores retos de aproximadamente $\lambda/4$ cada, apresenta, no software utilizado, a representação mostrada na figura 4.2 (as cores foram invertidas para facilitar a visualização).

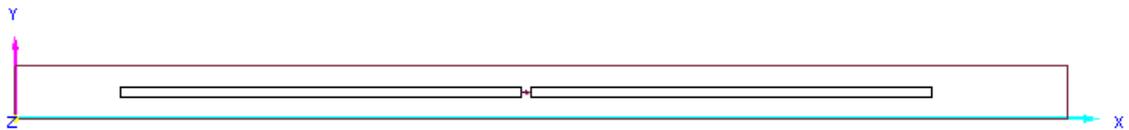


Fig. 4.2 Representação do FDTD Studio de um dipolo simples.

Esta antena apresenta 15,4 cm de comprimento no eixo x da figura 4.2 e uma área ocupada de 3,08 cm². Apesar de a área ser pequena, o comprimento é excessivamente grande para muitas aplicações de RFID.

As simulações geram, entre outros, gráficos da impedância real e imaginária, figura 4.3, a perda de retorno (coeficiente S11), figura 4.4, o coeficiente de onda estacionária

(VSWR), que não será analisado neste trabalho por conter as mesmas informações da perda de retorno, e os diagramas de radiação, figuras 4.5, 4.6 e 4.7.



Fig. 4.3 Impedância de entrada para o dipolo de $\lambda/2$

O resultado mais importante para o projeto é a impedância da antena, que permite projetá-la para um melhor casamento com o *chip* e é uma das características que podem ser testadas em laboratório para comparação com os resultados simulados. Por causa disso, será o parâmetro mais analisado neste trabalho.

Para esta antena especificamente, na frequência de interesse, 900 MHz, a impedância é de $70+j0$, diferente da impedância procurada para o casamento com o *chip*.

O coeficiente S11 define a perda de retorno, em dB, da antena, considerando que a fonte tenha impedância característica de 50Ω . Como foi dito anteriormente, este não é o caso, o *chip* utilizado apresentará impedância com valor real baixo e imaginário alto, mas o gráfico da perda de retorno é interessante para avaliar-se qual a banda de frequência que a antena irá operar eficientemente. A banda depende da impedância característica da linha, mas o coeficiente S11 para 50Ω pode viabilizar uma análise qualitativa para outras impedâncias. Além disso, a perda de retorno pode ser testada pelos equipamentos à disposição e a análise desse parâmetro permitirá a comparação entre os resultados simulados e testados para antenas reais.

Para a maioria das aplicações, é interessante que a banda de operação da antena seja pequena para filtrar sinais indesejados, evidentemente esta deve ser maior do que a banda do sinal transmitido.

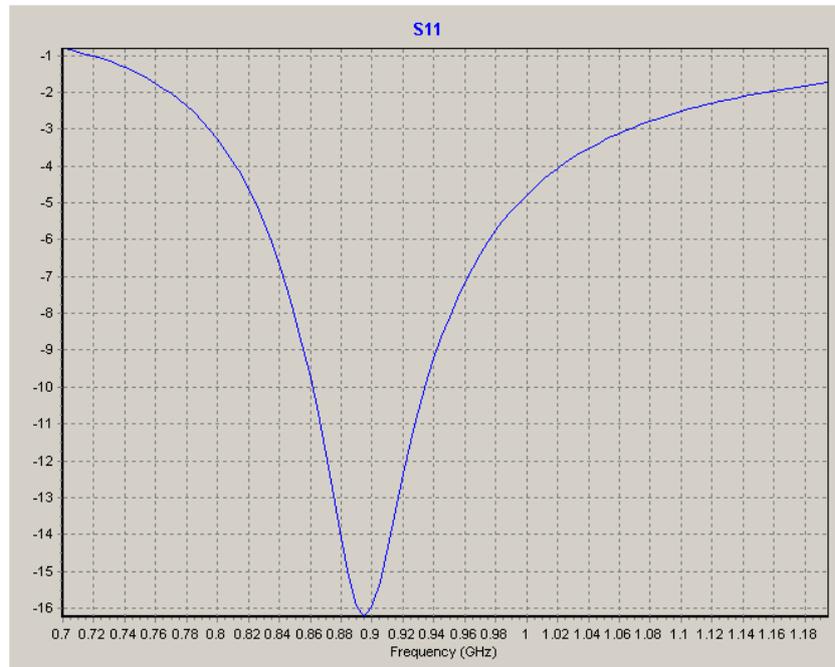


Fig. 4.4 Perda de retorno para o dipolo de $\lambda/2$

Os diagramas de radiação apresentados comprovam a característica de radiação desejada. As próximas antenas simuladas, por continuarem sendo dipolos, têm diagramas muito parecidos e, por isso, optou-se por apresentar apenas os diagramas de uma delas, a antena 5, visando mostrar esta similaridade. Além disto, os equipamentos disponíveis para o projeto não possibilitam a validação desta característica, sendo, portanto, sua análise considerada fora do escopo deste trabalho.

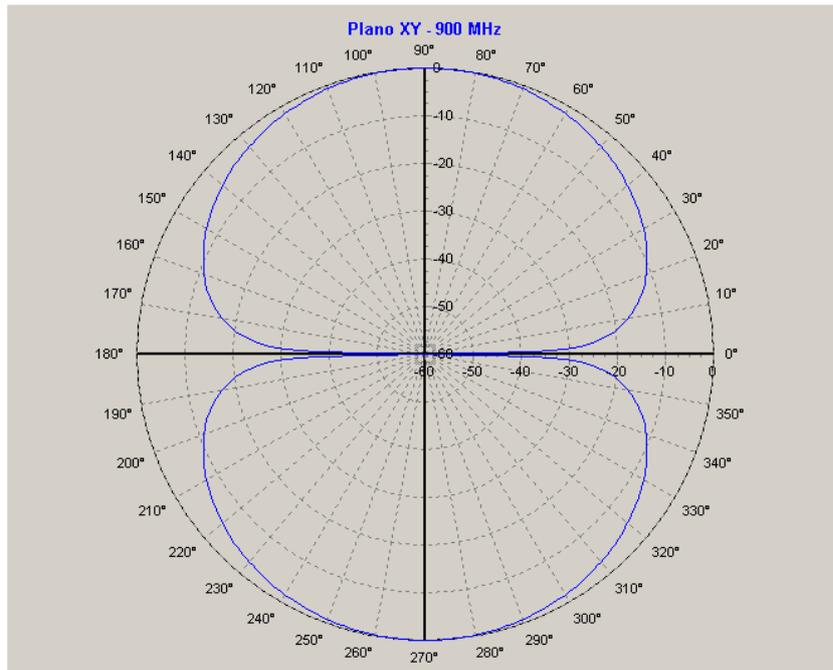


Fig. 4.5 Diagrama de radiação (plano XY) para o dipolo de $\lambda/2$, em 900 MHz

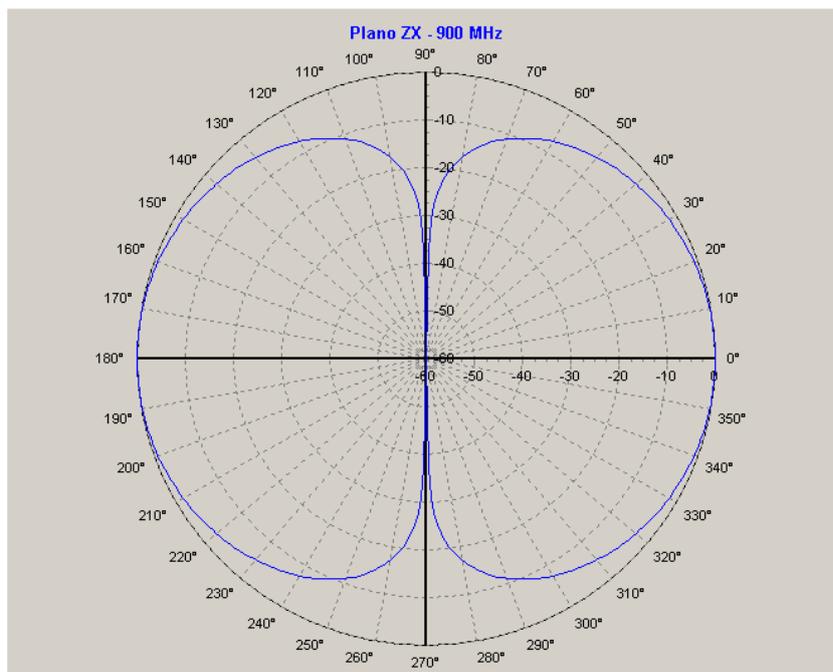


Fig. 4.6 Diagrama de radiação (plano ZX) para o dipolo de $\lambda/2$, em 900 MHz

Nas figuras 4.5 e 4.6 podemos verificar a diretividade característica dos dipolos, em que a emissão de radiação em certas direções é muito baixa, mas na maior parte do diagrama há radiação. A figura 4.7 ratifica a característica omnidirecional do dipolo.

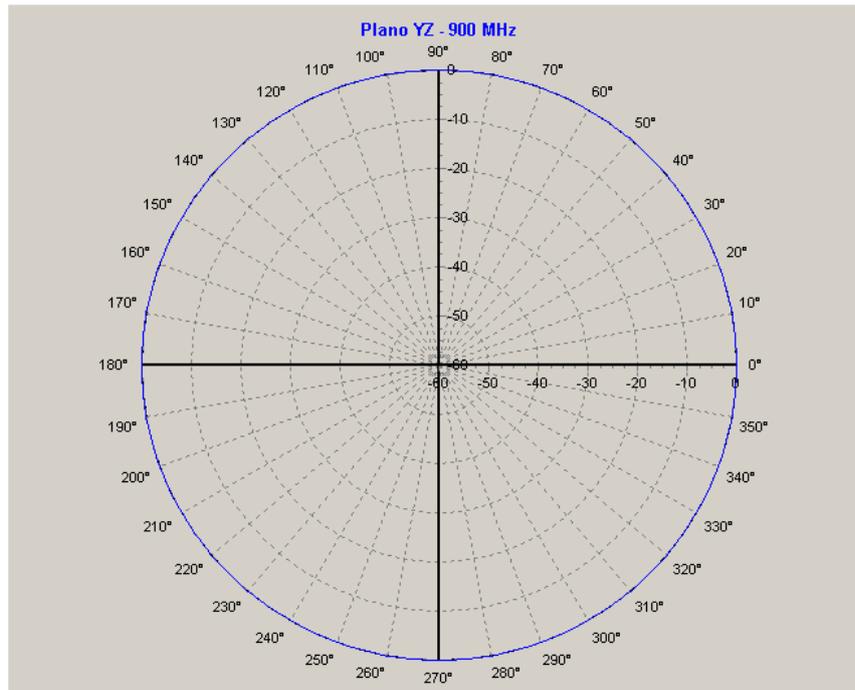


Fig. 4.7 Diagrama de radiação (plano YZ), em 900 MHz

Apesar desta antena ser simples e omnidirecional, seu comprimento extenso em uma direção pode tornar inviável a colocação desta etiqueta em objetos menores. Além disto, a impedância da antena é muito diferente da impedância do *chip*, o que tornaria essa antena ineficiente e imprópria para a aplicação.

4.4. Antena 2

Com o intuito de resolver o problema do comprimento excessivo em uma direção, pode-se segmentar os condutores do dipolo de modo que ele apresente comprimento mais apropriado. A representação desta antena no FDTD Studio é mostrada na figura 4.8.

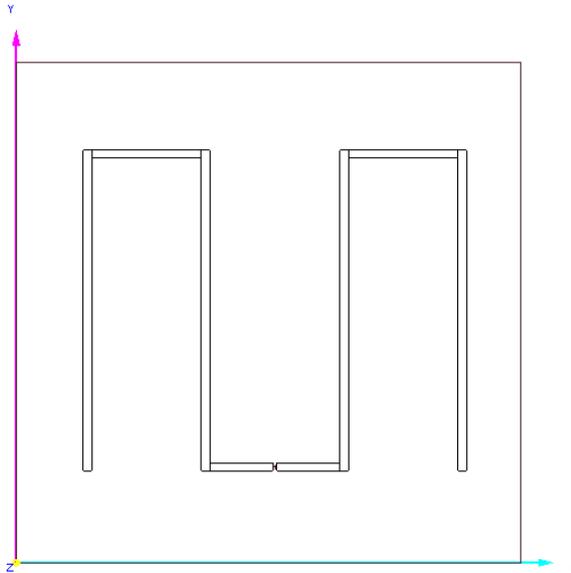


Fig. 4.8 Representação no FDTD Studio da antena 2.

Com esta configuração, a antena mede 4,55 cm x 3,85 cm, ocupando uma área de 17,52 cm². Deste modo, o maior comprimento desta antena vale menos que 30% do dipolo simples, ao custo de aumentar a área, o que costuma ser muito vantajoso.

A impedância desta antena, figura 4.9, para a frequência de 900 MHz, é da ordem de $Z_a=10+j10$, no entanto, pode-se observar que em 1.020 MHz esta antena apresenta a impedância almejada. Sabe-se que em um dipolo de meia onda o comprimento da antena é proporcional ao comprimento de onda e, conseqüentemente, inversamente proporcional à frequência.

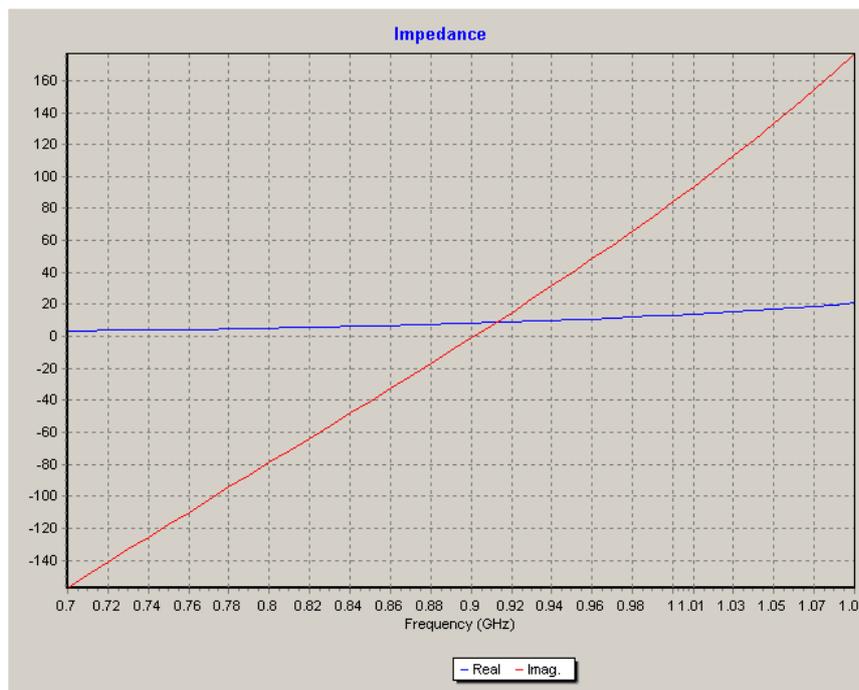


Fig. 4.9 Impedância da antena 2.

Deste modo, é possível modificar a frequência em que ocorre certa impedância, apenas modificando seu comprimento, sem causar alterações significativas nas características de radiação da antena. Utilizando o FDTD Studio, simulou-se outra antena com 1 cm a mais de comprimento em cada dipolo obtendo o resultado das figuras 4.10 e 4.11.

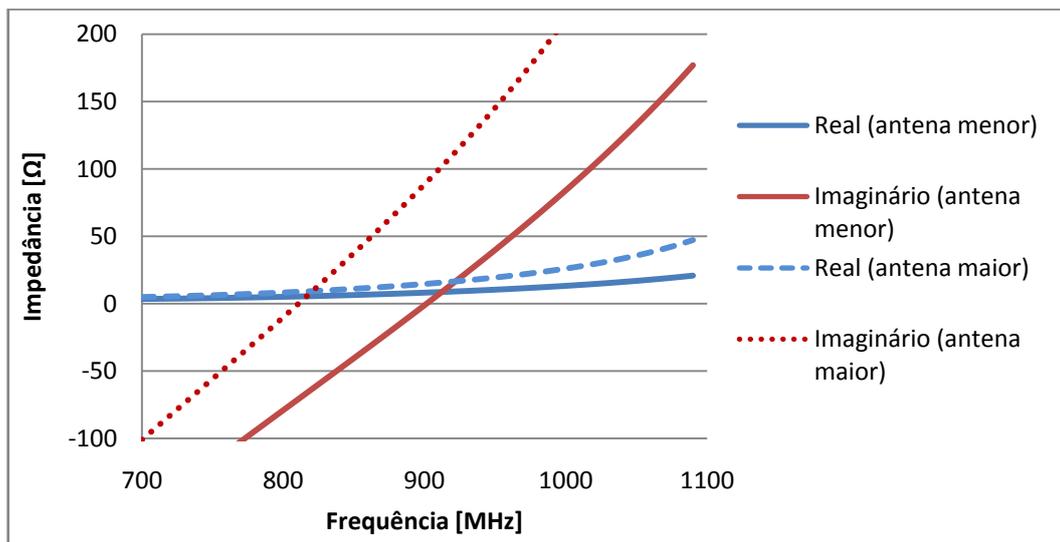


Fig. 4.10 Impedância versus comprimento para a antena 2

As curvas de impedância real e imaginária foram claramente deslocadas para a esquerda com o aumento do comprimento da antena.

Para efeito de comparação, o gráfico da perda de retorno, figura 4.11, apresenta o coeficiente S11 das duas antenas simuladas. Como era de se esperar, o deslocamento para a esquerda com o aumento do comprimento dos dipolos também ocorre para a perda de retorno sem modificações significativas na forma de onda.

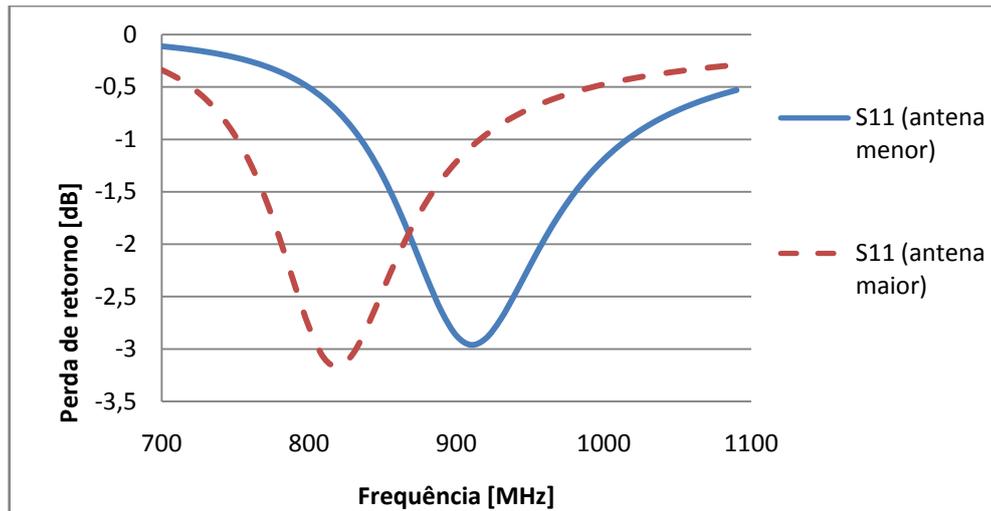


Fig. 4.11 Perda de retorno versus comprimento para a antena 2.

Esta estrutura da antena consegue satisfazer a exigência de casamento de impedância, apresentando $Z_a = 16 + j110$ em 920 MHz e também tem o comprimento reduzido ao se comparar com o dipolo simples. Contudo, ainda há problemas na estrutura. Como pode ser visto na figura 4-11, a banda desta configuração é muito elevada. Isto ocorre por que as curvas de impedância não apresentam uma maior variação na frequência de interesse que permita descascar rapidamente a antena para outras frequências adjacentes. Além disto, o controle da impedância é mínimo, sendo difícil modificar a forma do gráfico, podendo apenas deslocá-lo no eixo da frequência.

4.5. Antena 3

Os dipolos podem ser segmentados de inúmeras maneiras. Visando uma comparação, foram feitas simulações com base na configuração da antena mostrada na figura 4.12. Esta antena, de medidas 6,375 cm x 2,025 cm e área 12,09 cm², tem o seu comprimento principal um pouco maior do que o comprimento principal da antena anterior, mas a área ocupada por ela é bem reduzida.

Para tornar possível a comparação entre esta antena e a mostrada anteriormente, as impedâncias de ambas foram colocadas em um mesmo gráfico, figura 4.13. Neste gráfico o índice 1 se refere à antena analisada em 4.4 e o índice 2 se refere à antena analisada em 4.5 (ou seja, este tópico).

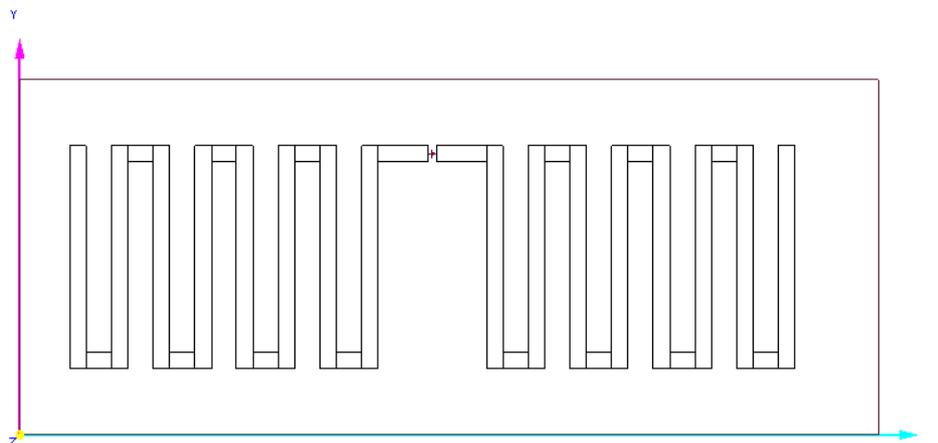


Fig. 4.12 Representação da antena 3.

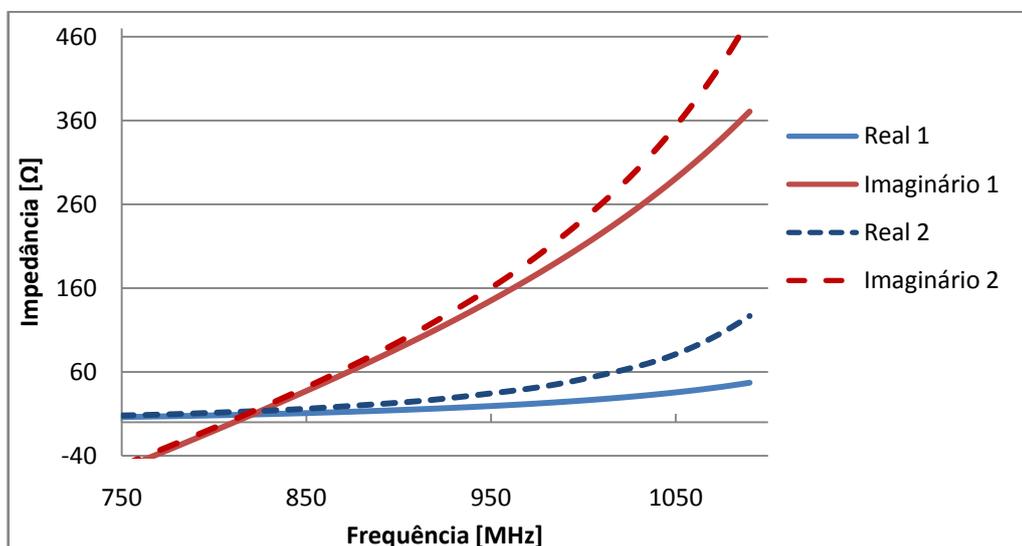


Fig. 4.13 Impedância dos dipolos segmentados.

Analisando o gráfico da figura 4-13 percebem-se duas formas de onda muito similares, sendo que a antena 2 apresenta um crescimento maior. Para a frequência de 920 MHz, escolhida por ser a que melhor proporciona o casamento de impedância para este comprimento de antena, $Z_a = 27 + j120$, que apesar de apresentar uma excelente reatância, tem uma resistência elevada.

A perda de retorno desta antena é mostrada na figura 4.14. Do mesmo modo que a impedância, o coeficiente S11 desta antena é muito similar ao mesmo coeficiente da antena anteriormente analisada, como era esperado.

As duas antenas apresentam características muito similares e para a escolha de uma delas, entre as duas, para uma aplicação específica, teria de se pautar pelo formato que melhor se adequasse à aplicação.

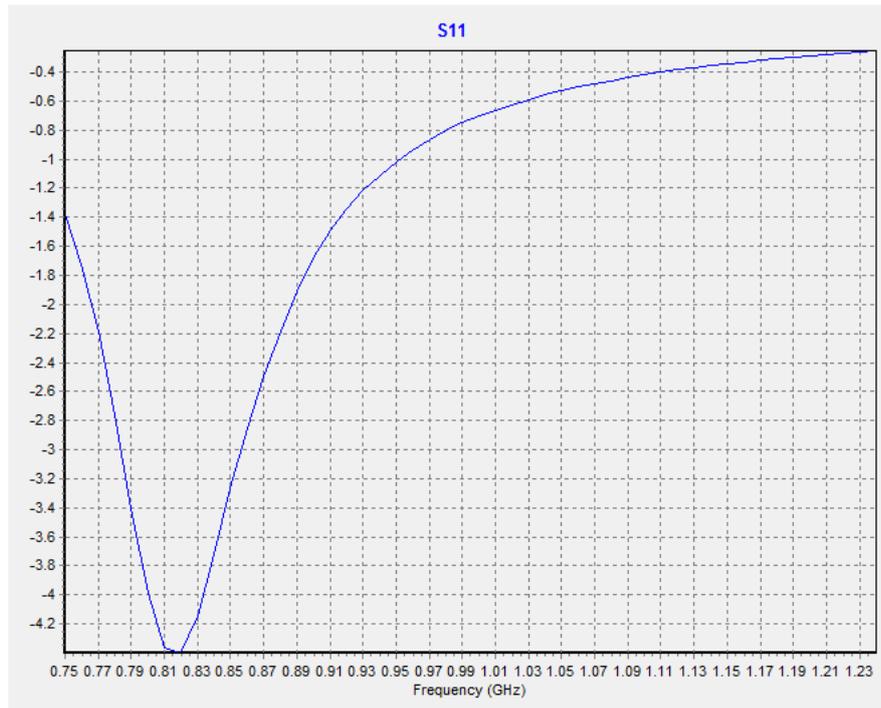


Fig. 4.14 Perda de retorno da antena 3.

4.6. Antena 4

Com o objetivo de desenvolver uma antena com elevado fator de qualidade, elevado valor de reatância positiva e com possibilidade de um controle mais apurado da impedância, faz-se a alimentação da antena por um *loop* central. A estrutura de alimentação está indutivamente acoplada com a estrutura de radiação para se obter valores positivos e elevados de reatância. O *design* da antena foi baseado em [3].

O acoplamento depende do tamanho e da posição do *loop* em relação à estrutura de radiação da antena. Essas características, que podem ser representadas por L1 e L2 na figura 4.15, são os fatores que permitem o ajuste da impedância da antena para o melhor valor de casamento.

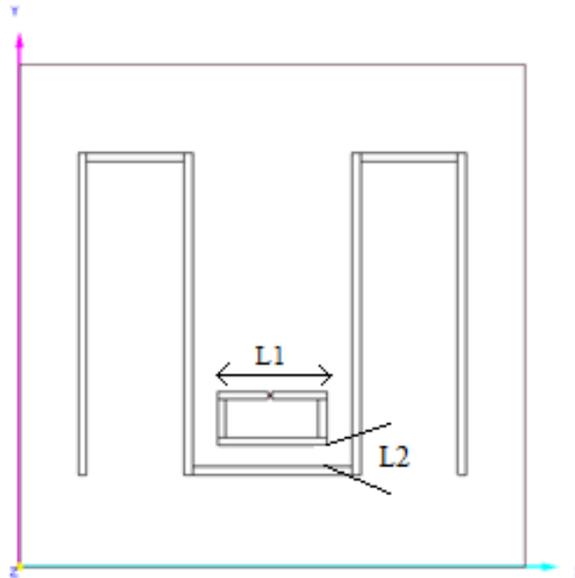


Fig. 4.15 Representação da antena 4.

A antena simulada tem 4,6 cm de altura, 3,85 cm de comprimento, *loop* com comprimento total de 3,5 cm e largura da fita de 1,0 mm.

O resultado desta mudança pode ser visto no gráfico de impedância, figura 4.16, em que as curvas de resistência e reatância mostram uma antena ressonante com valores de impedância, para a frequência de ressonância, próximos aos valores desejados.

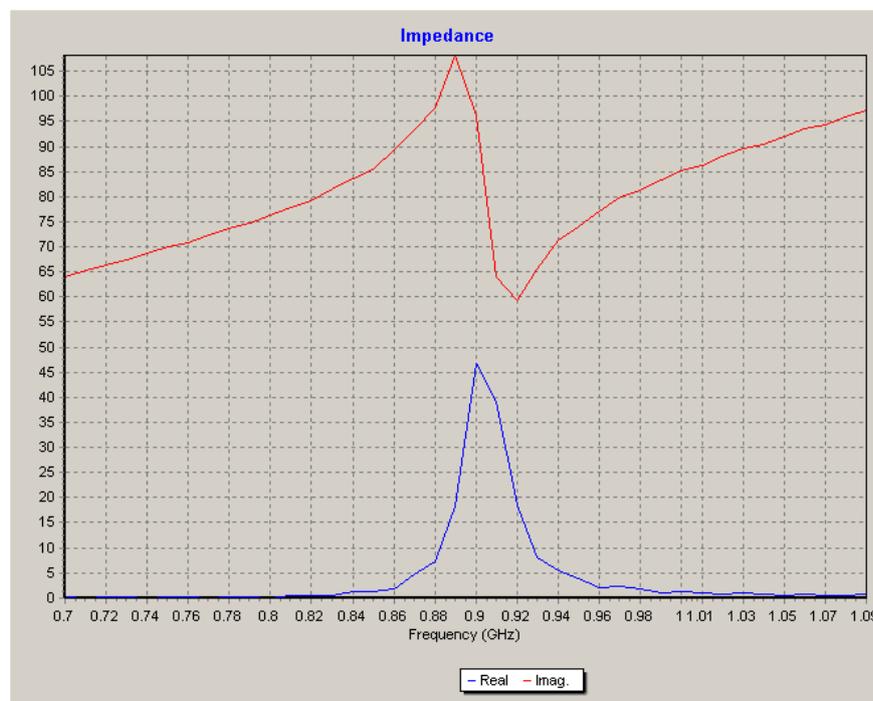


Fig. 4.16 Impedância da antena 4.

No gráfico do coeficiente S11, figura 4.17, percebe-se a diminuição da banda, resultado da melhora do fator de qualidade imposta pelo *loop* à antena.

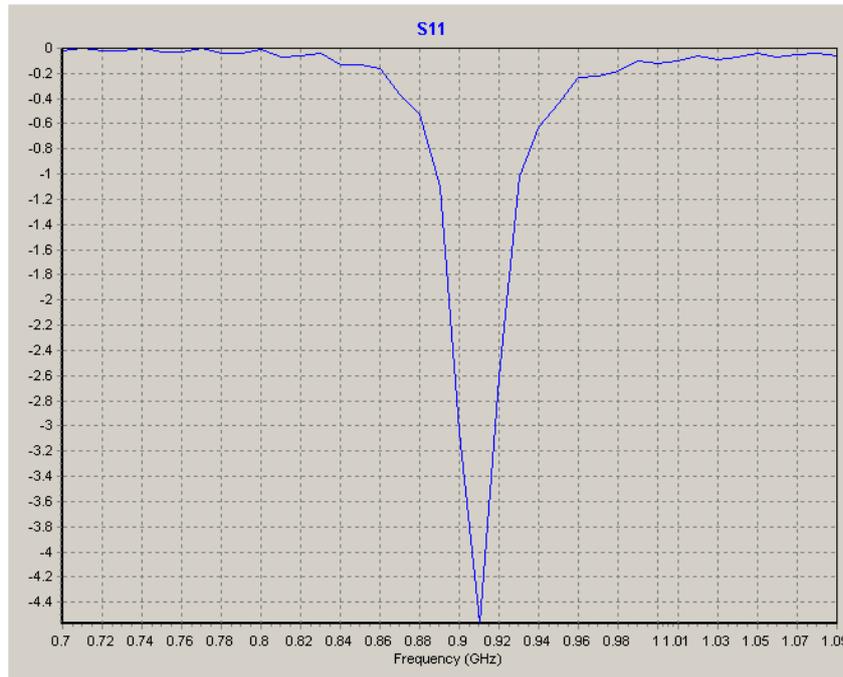


Fig. 4.17 Perda de retorno da antena 4.

A outra vantagem desta configuração é a possibilidade de alterar a impedância modificando as características do *loop*. Aumentando-se o comprimento deste, tornando L1 maior, é possível aumentar a reatância da antena. Por outro lado, aumentando o espaçamento inferior entre o *loop* e o dipolo consegue-se aumentar a resistência. Um exemplo claro disto aparece na figura 4.16, onde foram simulados duas antenas sendo que uma apresentava o *loop* com 2 mm a mais de comprimento no eixo x do que a outra.

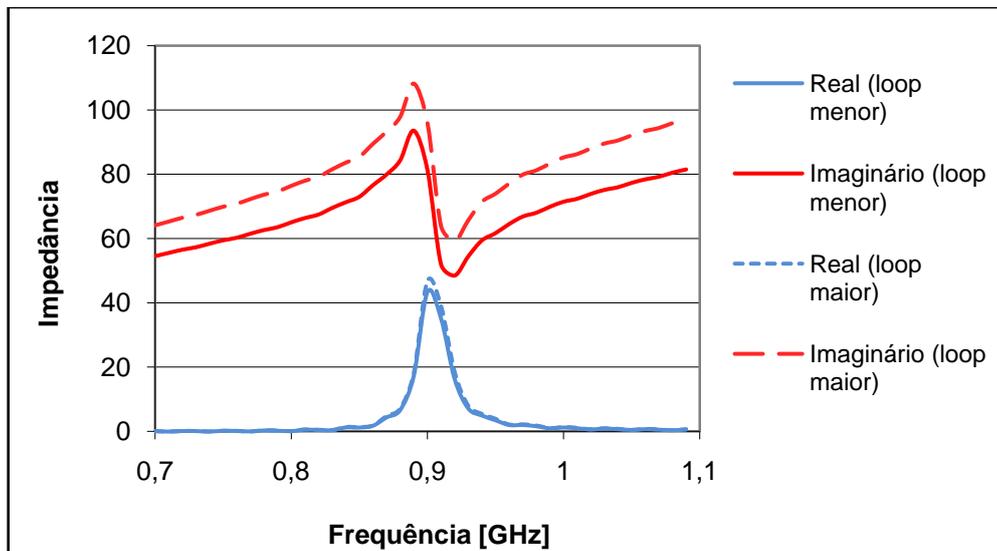


Fig. 4.18 Comparação da impedância da antena 4, variando L1.

A alteração na parte real foi mínima, enquanto houve uma variação razoável na parte imaginária, mostrando que o ajuste da reatância pode ser feito independente da resistência.

Modificando o valor de L2 na figura 4.15, pode-se obter uma mudança no valor da resistência, como mostrado na figura 4.19.

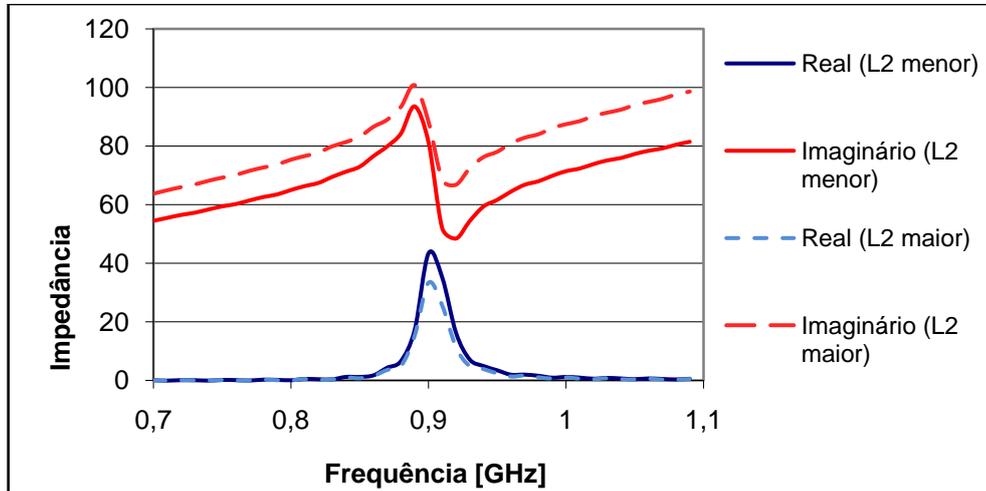


Fig. 4.19 Comparação da impedância da antena 4, variando L2.

Com o aumento da distância entre o *loop* e o corpo radiante, L2, é possível diminuir o valor da resistência. No entanto, este procedimento também ocasiona o aumento da reatância. Assim, para conseguir fazer o ajuste preciso da impedância como um todo, é preciso alterar tanto L1 quanto L2 de modo a obter o valor desejado.

4.7. Antena 5

Com o intuito de fazer uma comparação com a antena anterior, foi analisada outra estrutura de antena, também alimentada por *loop*. Esta configuração, baseada em [8], tem o mesmo objetivo da antena anterior: buscar uma antena com alto fator de qualidade, impedância reativa alta na frequência de ressonância e controle da impedância.

A representação no FDTD Studio é apresentada na figura 4.20, com altura de 1,725 cm, comprimento de 7,65 cm, espessura de 1,5 mm e *loop* com comprimento total de 4,35 cm.

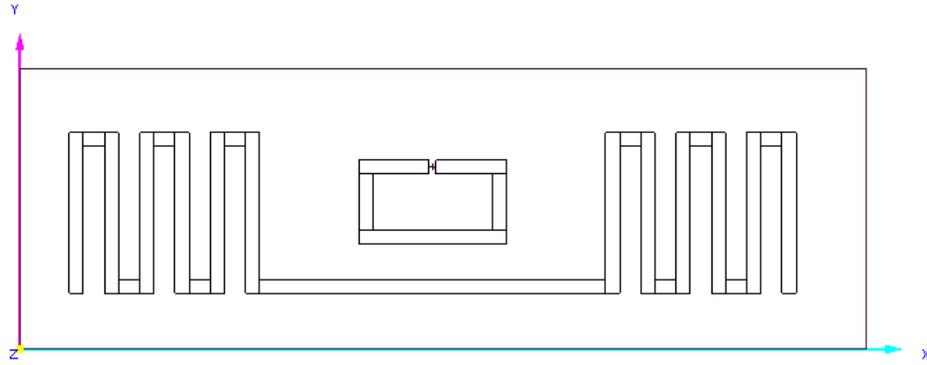


Fig. 4.20 Representação da antena 5.

A impedância desta antena é mostrada na figura 4.21, a qual mostra que o casamento com o *chip* proposto ($Z_c = 10-j120$) é praticamente perfeito para esta estrutura, na qual $Z_a = 8,8 + j117,3$. Vale ressaltar que, apesar da frequência de ressonância no gráfico estar em 1,0 GHz, deslocar a frequência é simples, sendo necessário apenas adaptar o comprimento da estrutura de radiação.



Fig. 4.21 Impedância da antena 5

Como demonstrado em [8], a resistência e a reatância desta antena podem ser facilmente adaptadas para o casamento com um *chip* qualquer, seguindo as seguintes equações:

$$R_{a,0} = \frac{(2\pi f_0 M)^2}{R_{rb,0}} \quad (4.2)$$

$$X_{a,0} = 2\pi f_0 L_{loop} \quad (4.3)$$

Em que os índices zero representam a frequência de oscilação, $R_{a,0}$ é a resistência da antena, $X_{a,0}$ é a reatância da antena, f_0 é a frequência de oscilação, M é a indutância mútua, $R_{rb,0}$ é a resistência do corpo ressonante (*radiating body*) e L_{loop} é a indutância própria do *loop*.

Para validar as equações (4.2) e (4.3) primeiramente aumentou-se a indutância mútua, aproximando o *loop* da estrutura de radiação, esperando que com isto apenas a resistência da antena tenha aumentado. Como pode ser observado nas figuras 4.22 e 4.23, aproximando o *loop* 1,5 mm do corpo radiante, que corresponde a 40% da distância inicial, a resistência aumentou 60%, enquanto a reatância permaneceu quase constante, confirmando a possibilidade de adequar a resistência independentemente da reatância.

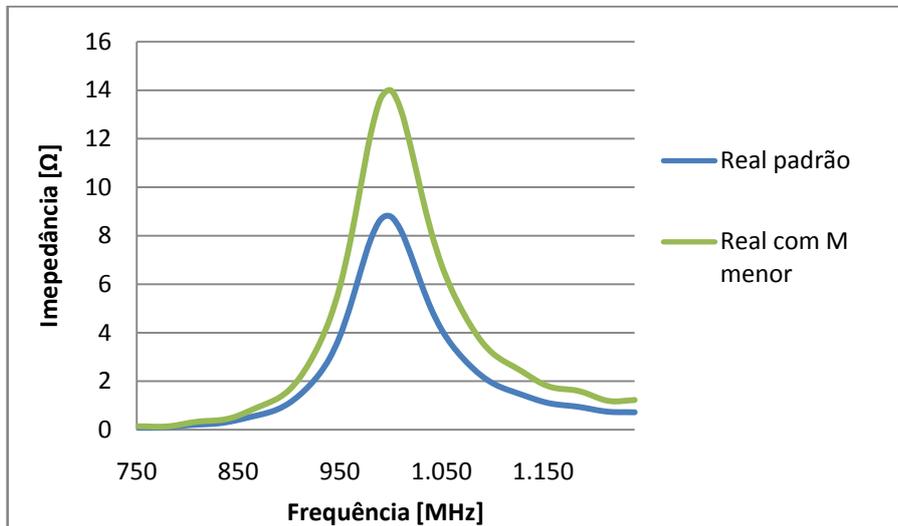


Fig. 4.22 Resistência para Ms diferentes

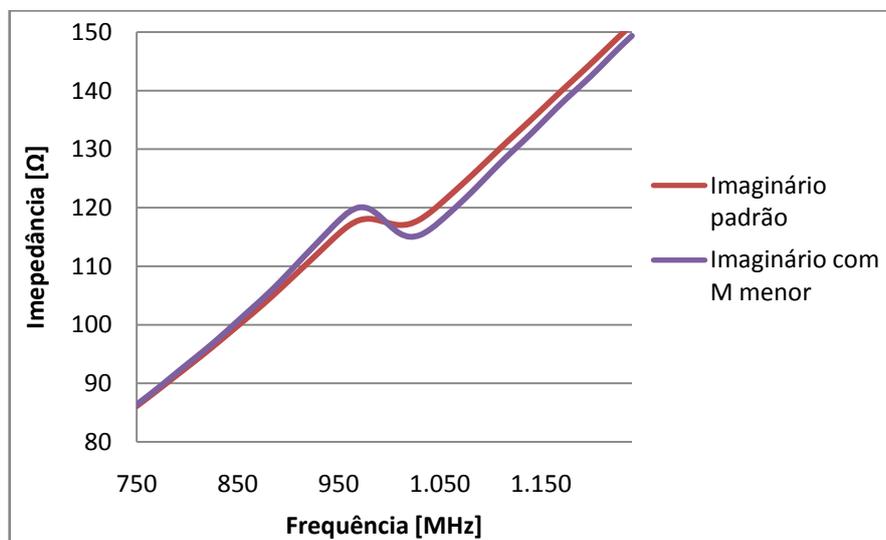


Fig. 4.23 Reatância para Ms diferentes

Para avaliar a equação (4.3), é necessário modificar a indutância própria do *loop*. Essa mudança pode ser feita aumentando a espessura da fita que forma o *loop*, diminuindo assim a resistência deste e conseqüentemente causando o aumento da indutância.

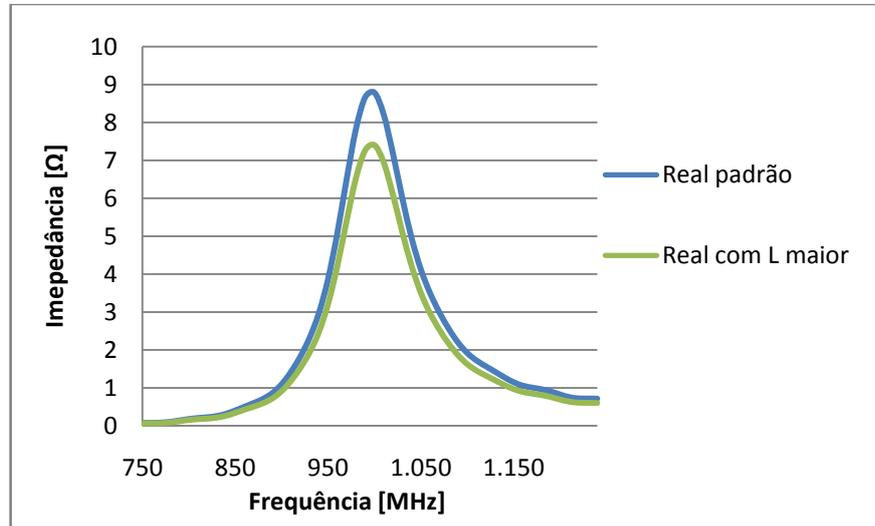


Fig. 4.24 Resistência para diferentes impedâncias do loop

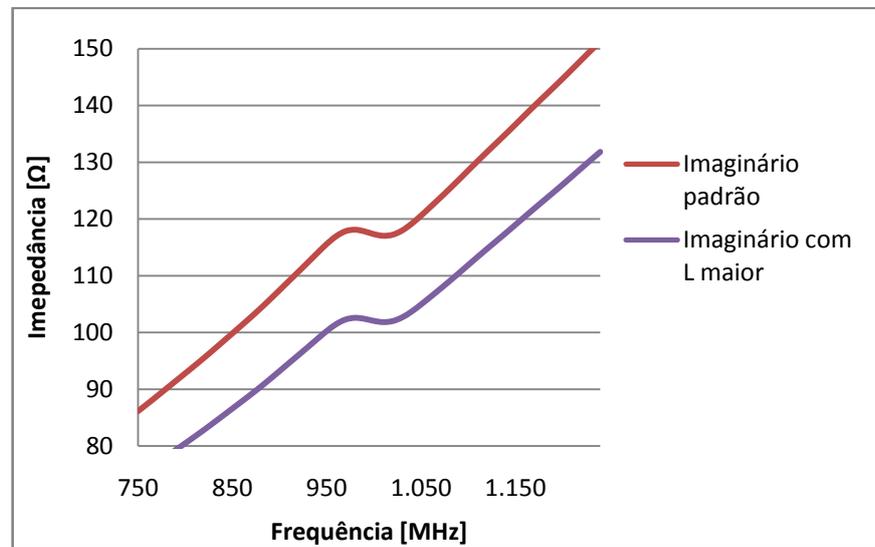


Fig. 4.25 Reatância para diferentes impedâncias do loop.

Ao contrário do que era esperado, observa-se na figura 4.25 que a reatância diminuiu com o aumento da espessura do *loop*. A explicação encontrada é que modificar a espessura altera outras características como o comprimento do *loop* ou a proximidade da estrutura radiante e, deste modo, não necessariamente aumenta a indutância.

De qualquer modo, a figura 4.24 mostra que é possível adaptar a reatância independentemente da resistência ao alterar-se a espessura do loop.

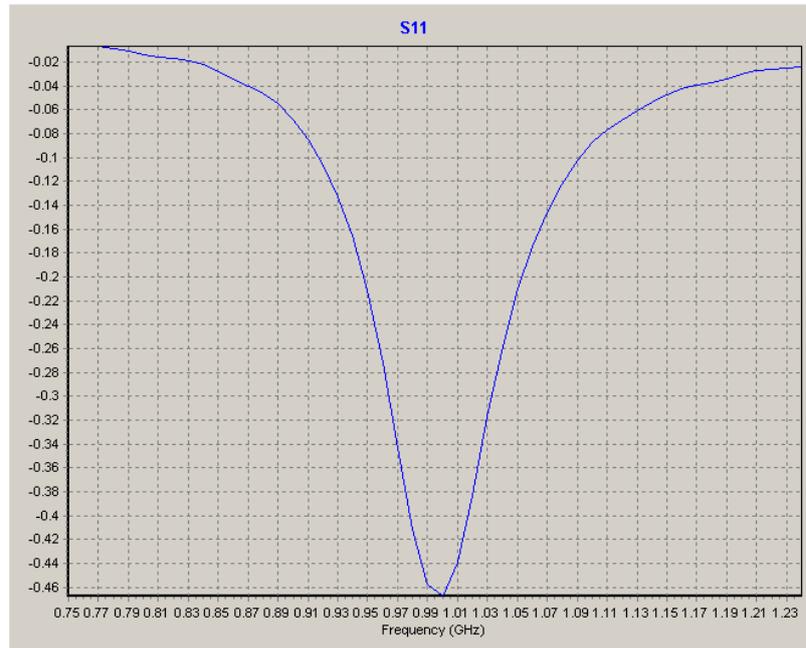


Fig. 4.26 Perda de retorno da antena 5.

Devido ao total descasamento desta antena com os 50 Ω da carga padrão, o gráfico do coeficiente S11, figura 4.26, neste caso é pouco significativo. Analisando as curvas de impedância desta antena, que são características de uma antena muito ressonante, com variações abruptas para a frequência de ressonância, é possível afirmar que a banda dela é pequena e provavelmente muito similar à banda da antena 4.

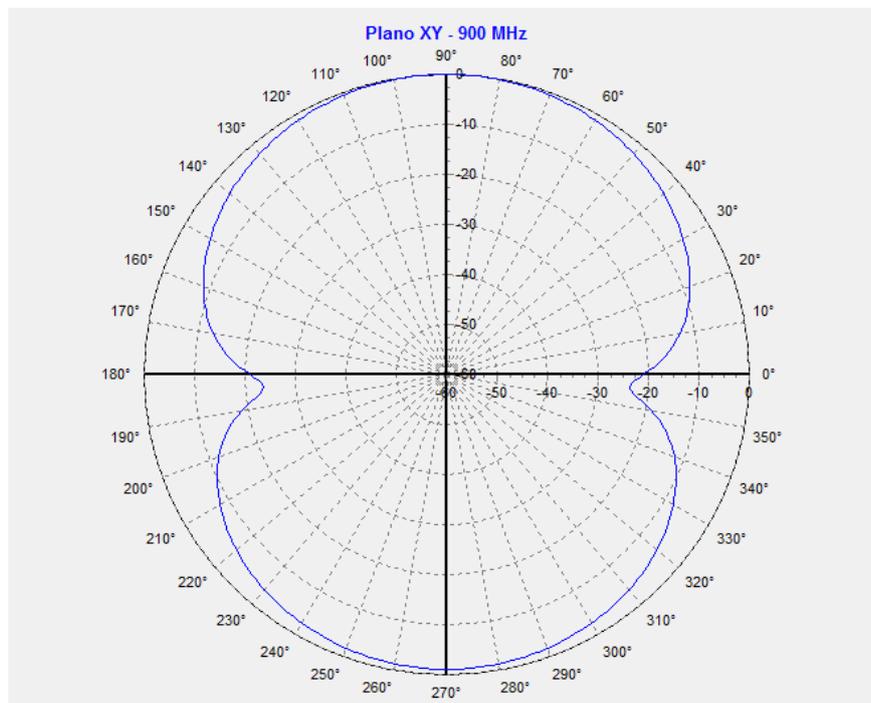


Fig. 4.27 Diagrama de radiação da antena 5, em 900 MHz (Plano XY).

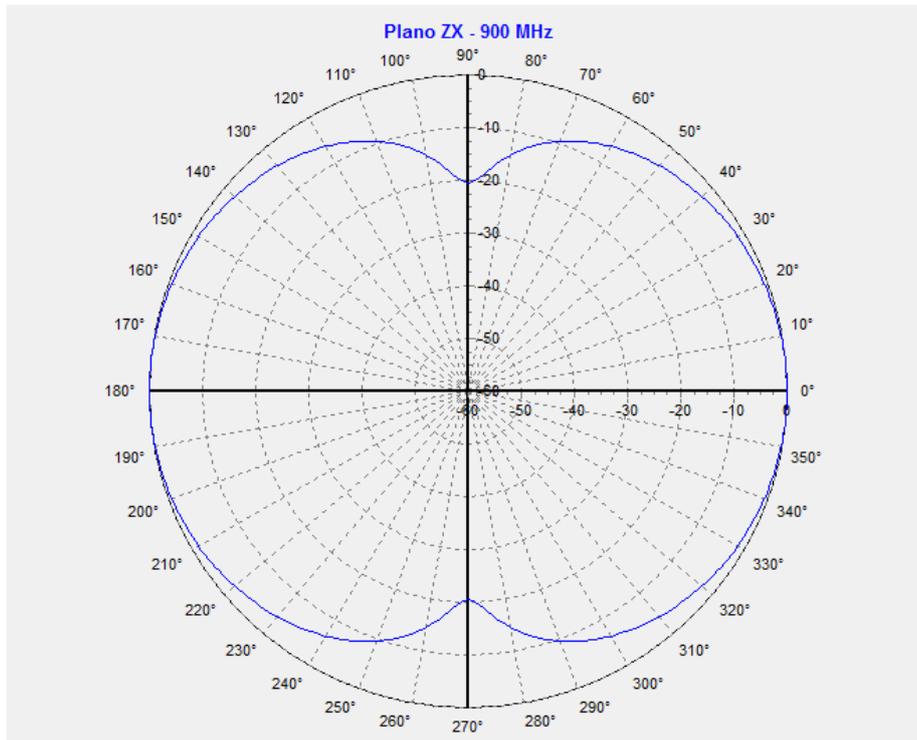


Fig. 4.28 Diagrama de radiação da antena 5 em 900 MHz (Plano ZX).

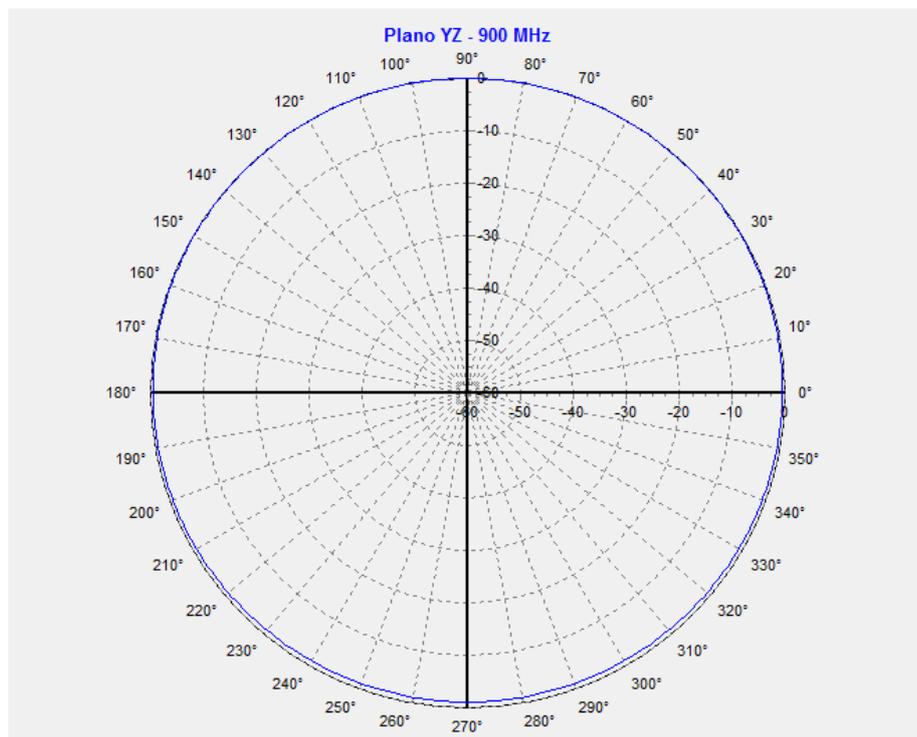


Fig. 4.29 Diagrama de radiação da antena 5 em 900 MHz (Plano YZ).

As figuras 4.27, 4.28 e 4.29 mostram os diagramas de radiação da antena 5. Pode-se observar que apesar das diversas alterações na forma deste dipolo, os diagramas são muito similares àqueles apresentados no tópico 4.3, sendo que a antena 5 apresenta a vantagem

de diminuir os nulos, característica muito positiva para sistemas RFID, nos quais a posição da antena, em relação ao leitor, não é conhecida.

As duas últimas antenas apresentadas, quatro e cinco, têm características muito semelhantes e foram as que se mostraram melhores para a aplicação em etiquetas RFID. A característica de ter sua impedância adaptada para diferentes valores por meio de ajustes na estrutura do *loop* fazem com que uma variedade imensa de *chips* possa ser casada perfeitamente com a antena, possibilitando o maior aproveitamento da energia absorvida e posteriormente irradiada. Esta qualidade está mais presente na antena 5 que permite ajustes independentes de resistência e reatância, possibilitando o casamento perfeito entre antena e *chip* com facilidade.

5. FABRICAÇÃO E TESTE DAS ANTENAS

5.1. Metodologia

Com o objetivo de validar o software FDTD Studio para antenas pequenas e confirmar os resultados obtidos nas simulações, as duas últimas antenas propostas, que se mostraram as mais interessantes para a aplicação em uma etiqueta RFID, foram implementadas na prática.

Para a montagem das antenas, utilizou-se uma placa fina de cobre que foi cortada com o formato desejado. Como não havia à disposição deste projeto equipamentos apropriados para um corte preciso no cobre, foi utilizado um simples estilete.

As antenas, em seguida, foram coladas em suportes para garantir o distanciamento correto do *loop* e a estabilidade mecânica da estrutura. O suporte utilizado foi uma fina camada de isopor, espessura de 4 mm, que apresenta propriedades dielétricas muito próximas da do ar e, assim, não causaria alteração nos parâmetros que foram simulados em espaço livre.

O equipamento utilizado para fazer as medidas foi um analisador de redes Agilent RF NETWORK ANALYZER 8714ES do Laboratório de Tratamento de Superfícies e Dispositivos – LTSD, localizado no SG11 da Universidade de Brasília.

O conector de entrada do sinal neste equipamento é um conector tipo N fêmea, característico de sistemas de RF. Para a execução das medições nas antenas, que não foram projetadas para ter um conector e sim um *chip*, foi necessário fazer uma adaptação, soldando dois fios com o menor tamanho possível entre os terminais do *loop* e os terminais de um conector N. Esse conector da antena foi escolhido fêmea devido ao seu formato, que permite a soldagem diretamente no conector, sem destruir o componente, o que certamente ocorreria se fosse utilizado o conector macho. Esta escolha implica em um erro experimental devido ao adaptador macho-fêmea necessário no teste da antena e que não permite a calibragem do analisador com ele incluso. Com os testes feitos no LTSD, provou-se haver erro causado pelo conector, mas era pequeno o suficiente para poder ser desprezado neste trabalho.

A figura 5.1 apresenta a forma como foi colocado o conector na antena 5 para possibilitar os testes.



Fig. 5.1 Antena 5 com conector N fêmea.

5.2. Implementação da Antena 4

A antena quatro implementada em uma fita de cobre é mostrada na figura 5.2. Esta antena foi feita à mão, com estilete e tem a espessura da fita aproximadamente igual a 1,0 mm, tornando extremamente difícil fazê-la sem irregularidades. No analisador de rede Agilent, foi possível obter a carta de Smith e o coeficiente S11 desta antena, colocados juntos aos resultados obtidos pelo FDTD Studio para comparação.

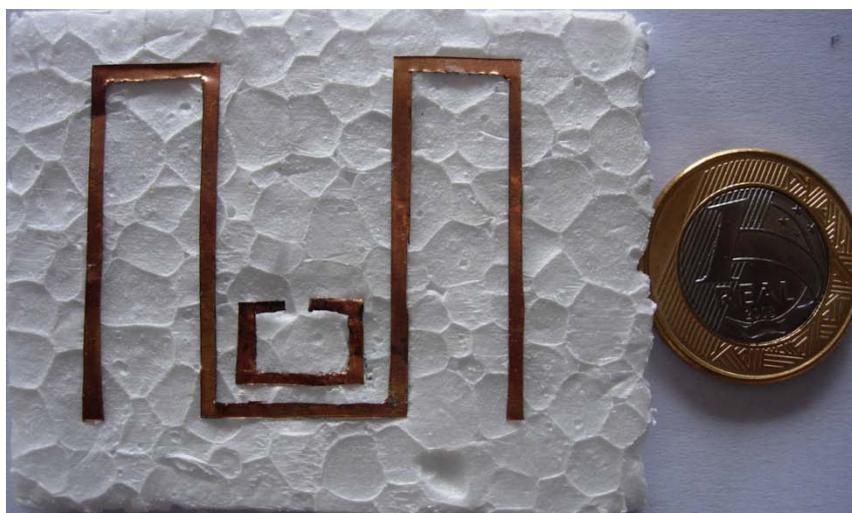


Fig. 5.2 Implementação da antena 4.

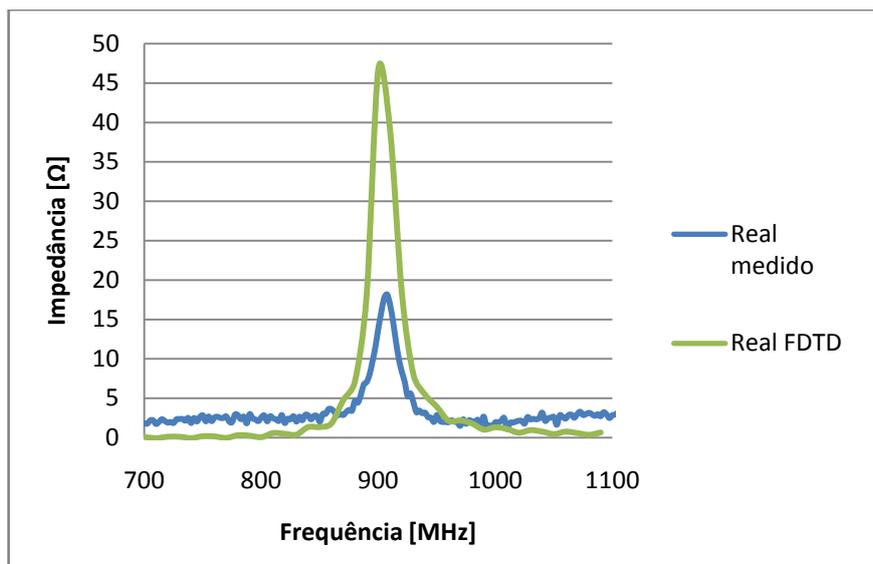


Fig. 5.3 Resistência medida para antena 4.

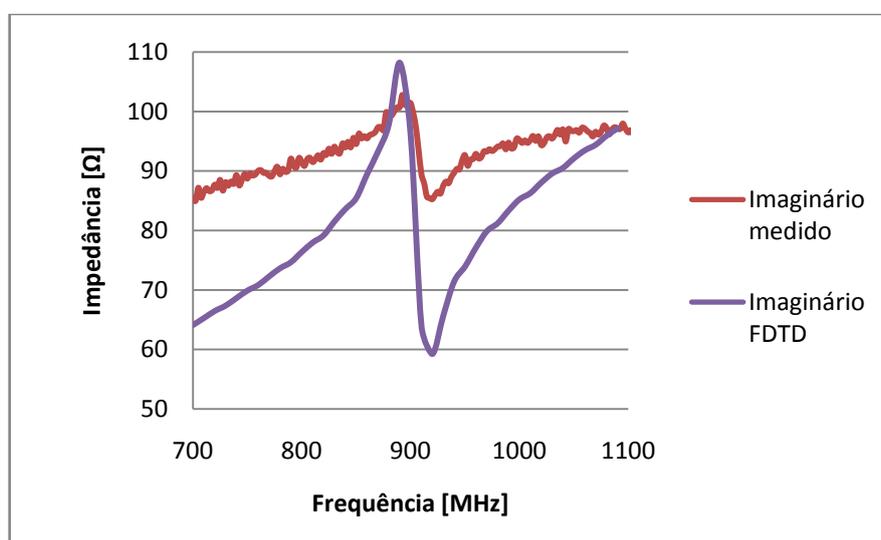


Fig. 5.4 Reatância medida para antena 4.

As figuras 5.3 e 5.4 mostram, respectivamente, as partes real e imaginária da impedância. As curvas referentes às medidas ficaram diferentes das curvas simuladas. No entanto, levando em conta o amadorismo da implementação e dos testes, estes resultados podem ser considerados muito bons.

É importante ressaltar que as variações vistas nas curvas têm diversas fontes possíveis. A primeira, e provavelmente a mais importante, é a impossibilidade de cortar a fita de cobre desta espessura com precisão e, como foi visto nas simulações, qualquer diferença no tamanho do *loop* ou na proximidade dele com o corpo de radiação causam grandes variações na impedância.

Além disto, a adaptação feita para se testar a antena utilizando soldagem amadora e fios sem isolamento eletromagnético, colocados sem um estudo detalhado do casamento de

impedância, são fontes claras de alteração do resultado. No entanto, tendo em vista os objetivos e recursos do projeto não seria viável fazer de outra forma.

Tendo tudo isto em vista, o modo como os resultados medidos acompanham a forma dos resultados simulados, apenas com uma variação de amplitude, mostram que a implementação e os testes foram bem sucedidos.

A diferença de amplitude no gráfico da perda de retorno, figura 5.5, é devido à diferença na amplitude entre resistência medida e a simulada, mas, novamente, o fato das curvas terem a mesma forma é um excelente resultado.

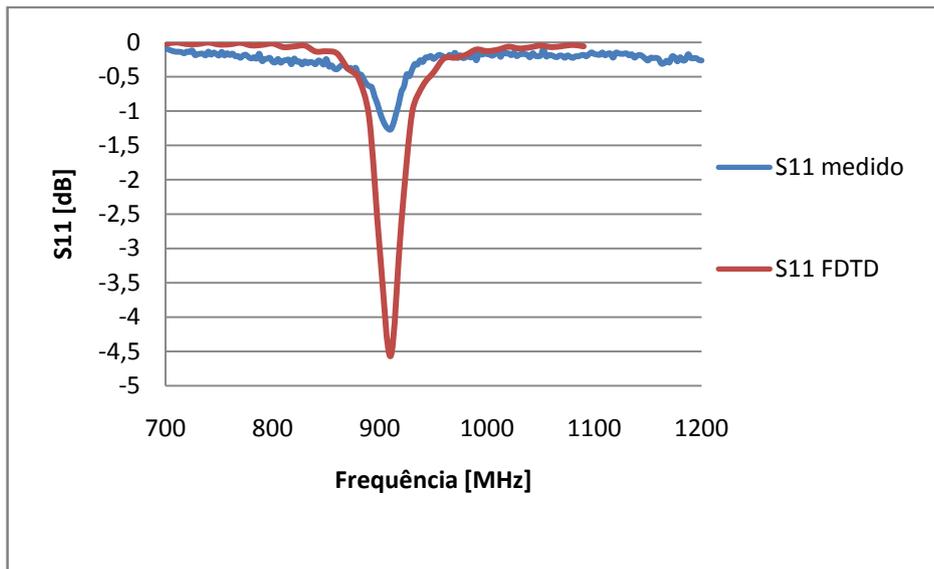


Fig. 5.5 Coeficiente de reflexão medido para antena 4.

5.3. Implementação da Antena 5

A antena 5 feita com uma placa de cobre é mostrada na figura 5.6.



Fig. 5.6 Antena 5 implementada.

Esta antena apresentou maior dificuldade para sua confecção devido às diversas voltas e aos pequenos espaços entre as fitas, o que ocasionou maior número de irregularidades na sua estrutura.

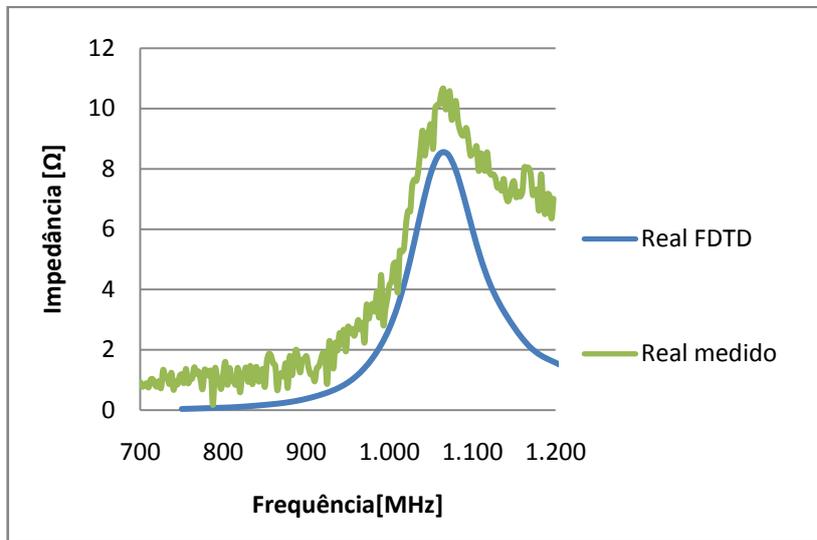


Fig. 5.7 Resistência medida para antena 5.

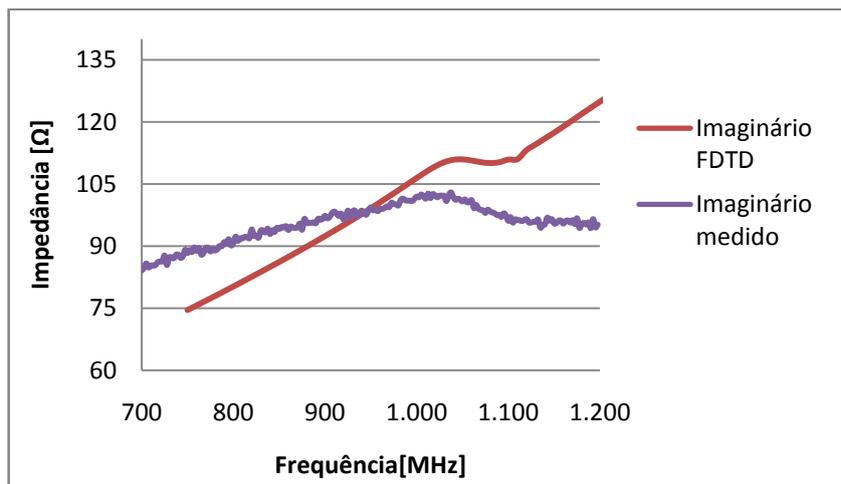


Fig. 5.8 Reatância medida para antena 5.

É necessário observar que nos gráficos de impedância, os resultados obtidos pelo FDTD Studio são diferentes dos mostrados no capítulo 4. A razão disto é que não foi possível implementar exatamente a antena simulada nos primeiros testes. Duas diferenças claras foram percebidas: maior espessura do *loop* e comprimento do corpo radiante menor. Como visto no capítulo anterior, estas duas mudanças acarretam diminuição da reatância e aumento da frequência de oscilação, respectivamente. Para uma melhor comparação entre o simulado e o medido, as simulações foram refeitas para valores mais próximos do que foi realmente implementado.

Os testes apresentaram resultados muito satisfatórios, com valores muito próximos do esperado, considerando todas as fontes de erro já mencionadas para a antena quatro.

O coeficiente de reflexão medido, figura 5.9, acompanhou muito bem a curva resultante da simulação.

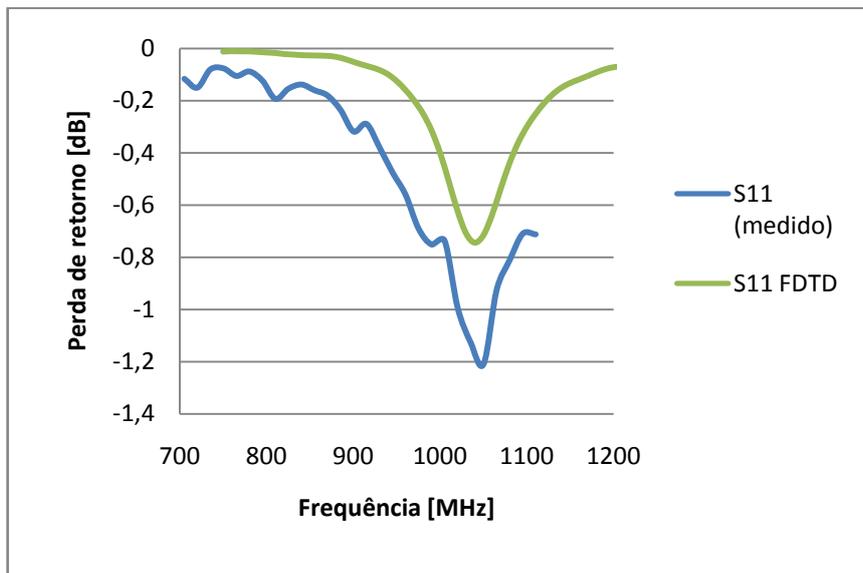


Fig. 5.9 Perda de retorno medida para antena 5.

6. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo o estudo de antenas para etiquetas RFID, o que foi realizado com êxito, visto que foi possível analisar diversas características de vários modelos diferentes e comprovar essa análise com testes feitos em duas antenas construídas para este projeto.

Foram simulados cinco modelos diferentes de antenas para esta aplicação e, dentre estes, dois se mostraram capazes de satisfazer as características almejadas e foram chamados neste trabalho de antena 4 e antena 5. As duas estruturas são muito parecidas, apresentando um modelo simples, basicamente um dipolo de meia onda segmentado, alimentado por um *loop* central que permitiu o aumento da reatância de entrada desta antena e, principalmente, a possibilidade de ajuste da impedância, configurando resistência e reatância de forma independente, até a obtenção do casamento perfeito com qualquer *chip*. Além disto, os dois modelos apresentaram banda de operação estreita, tamanho reduzido e diagrama de radiação omnidirecional, com características melhores do que a do próprio dipolo de meia onda, já que estas antenas atenuam o problema dos nulos de radiação.

Dentre as duas antenas, quatro e cinco, a última se mostrou um pouco melhor no quesito ajuste de impedância, apresentando maior independência entre resistência e reatância. A outra diferença significativa é o formato das antenas que pode proporcionar menor comprimento ou menor área, respectivamente. A vantagem neste caso depende da aplicação específica em que será utilizada a antena.

Com a construção de duas antenas, uma de cada um dos modelos considerados satisfatórios, foi possível validar o software FDTD Studio para impedância de entrada e coeficiente de reflexão, as duas características que os equipamentos disponíveis para o projeto permitiam testar.

Referências Bibliográficas

- [1] AHSON, S., ILYAS, M., RFID handbook: applications, technology, security and privacy. CRC Press, 2008.
- [2] BHATT, H., GLOVER, B., RFID Essencials. O'Reilly, 2006.
- [3] LEE, J. W., LEE, B., Design of high-Q UHF radio-frequency identification tag antennas for an increased read range. IET Microw. Antennas Propag., 2008, Vol. 2, No. 7, pp. 711–717.
- [4] MILES, S. B., SARMA, S. E., WILLIAMS, J. R., RFID Technology and Applications. Cambridge University Press, 2008
- [5] SANGHERA, P., RFID+ Study Guide and Practice Exam. Syngress, 2007
- [6] br.geocities.com/adbetiol/Ondas_Antenas/helicoidal.pdf, acessado em 17/02/2009 às 9 h e 30 min.
- [7] PICANÇO, R. P. Desenvolvimento de uma Interface Integrada para o Projeto e Análise de Antenas Utilizando o Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD). Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM-254/06, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 92p. 2006.
- [8] SON, H. W., PYO, C. S., Design of RFID tag antennas using an inductively coupled feed. ELECTRONICS LETTERS 1st September 2005 Vol. 41 No. 18