

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Etiqueta RFID Compacta Utilizando
Estrutura Metamaterial CSSR**

João Paulo Silva Dias

20 de Outubro de 2017



GAPTEM - Grupo de Antenas, Propagação e Teoria Eletromagnética
Departamento de Engenharia Eletrônica
Escola de Engenharia
Universidade Federal de Minas Gerais

Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Etiqueta RFID Compacta Utilizando Estrutura Metamaterial CSSR

João Paulo Silva Dias

Defesa de Dissertação de Mestrado

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando José da Silva Moreira

Coorientador: Prof. Dr. Glaucio Lopes Ramos

Belo Horizonte, setembro de 2017

Agradecimentos

Agradeço a Deus, por me abençoar sempre e ter me dado coragem e força nos momentos mais difíceis.

Um agradecimento especial a minha mãe e aos meus irmãos, por me apoiarem continuamente e por fazerem desta conquista um sonho compartilhado.

Uma palavra de agradecimento a minha namorada Adriana, por me amar e por me ajudar a ser um homem melhor.

Aos professores do PPGEE que contribuíram de forma direta na minha formação.

Um grande obrigado ao meu orientador, Professor Fernando José da Silva Moreira, pela confiança que depositou em mim, pela sua mentoria como professor e como grande profissional da área de antenas.

Um muitíssimo obrigado ao meu coorientador, Professor Glaucio Lopes Ramos, pela dedicação e sugestões essenciais à elaboração deste trabalho.

Um agradecimento a todos os meus amigos, pelo carinho, companheirismo e pelo prazer do convívio. Em especial a minha amiga Polyanna Mara Pereira.

Ao GAPEM por sua disponibilidade e colaboração com os recursos computacionais do projeto.

Ao Professor Alexandre Bessa da Universidade Federal de Juiz de Fora que contribuiu na construção dos protótipos.

Os agradecimentos estendem-se a CNPq pela bolsa de mestrado, sem a qual este projeto não teria sido possível.

RESUMO

Radio Frequency Identification (RFID) é uma tecnologia utilizada para rastreamento e identificação de objetos. As antenas impressas têm sido amplamente utilizadas nos sistemas RFID, devido às suas vantagens, por isso são propícias no projeto de etiquetas RFID. Este trabalho apresenta a análise, projeto e simulação no *software* CST Microwave Studio de uma etiqueta Passiva RFID para operar na frequência de 915 MHz. A etiqueta RFID é composta por um substrato RO3003 Rogers com permissividade elétrica relativa (ϵ_r) de 3,0. Além disso, uma técnica de miniaturização é aplicada, utilizando uma matriz de anéis ressoadores (*Complementary Split-Ring Resonator* - CSSR), inserida no plano terra da antena impressa. O desempenho da antena proposta foi analisado em termos de ganho de antena e perda de retorno. Os resultados mostram que o uso da estrutura metamaterial na etiqueta RFID reduz o tamanho da antena impressa em até 30%.

Palavras-chave: Antenas Impressas. *Complementary Split-Ring Resonator*. Etiqueta RFID. *Radio Frequency Identification* (RFID). Metamaterial.

Abstract

Radio Frequency Identification (RFID) is a technology used to track and identify objects. Microstrip antennas have been widely used in RFID systems because of their inherent advantages. This work presents the analysis, design and simulation in CST Microwave Studio software of an RFID Passive Tag to operate on the 915 MHz frequency. The RFID tag is composed by a RO3003 Rogers substrate with relative electric permittivity (ϵ_r) of 3.0. Additionally, a miniaturization technique is applied, using Complementary Split-Ring Resonators (CSSR), inserted in the ground plane of the microstrip antenna. The performance of the proposed antenna is analyzed in terms of antenna gain and return loss. The results show that the use of the metamaterial structure in the RFID tag reduces the size of the microstrip antenna by about 30%.

Keywords: Complementary Split-Ring Resonator. Metamaterial. Microstrip Antennas. Tag. Radio Frequency Identification (RFID).

Sumário

Sumário	v
Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	viii
Lista de Símbolos	viii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Revisão Bibliográfica	3
1.1.1 Etiqueta RFID	3
1.1.2 Leitora RFID	4
1.1.3 <i>Software</i> de Aplicação (<i>Middleware</i>)	5
1.1.4 Funcionamento do Sistema RFID	5
1.2 Objetivos	6
1.3 Contribuição desta Dissertação	6
1.4 Estrutura do Texto	7
2 ETIQUETA PASSIVA RFID	8
2.1 Antenas Impressas	9
2.2 Substrato	10
2.3 Frequência de Operação	11
2.4 <i>Chip</i>	11
2.5 Estudo de Caso: Etiqueta RFID Inicial	12
3 ETIQUETA PASSIVA RFID COM ESTRUTURA METAMATERIAL	21
3.1 Metamaterial	21
3.2 Split-Ring Resonator	22
3.3 Estudo de Caso: Etiqueta RFID Passiva com Metamaterial	26

3.4	Análise de Aplicabilidade	38
3.5	Análise da Eficiência com Novos Substratos	41
4	MEDIDAS	43
5	CONCLUSÕES	46
5.1	Considerações finais	46
5.2	Trabalhos Futuros	47
5.3	Trabalhos Publicados	48
	Referências Bibliográficas	49

Lista de Figuras

1.1	Sistema RFID [Embarcados, 2017].	3
1.2	Exemplo de etiqueta RFID.	3
1.3	Modelo de funcionamento do sistema RFID.	5
2.1	Antena impressa com alimentador coaxial: (a) vista de topo e (b) vista lateral.	9
2.2	Configuração da Etiqueta RFID na vista (a) de topo e (b) lateral.	12
2.3	Etiqueta RFID projetada no CST MWS.	13
2.4	Configuração da porta discreta.	14
2.5	Perda de retorno (S11) da antena com as variações da dimensão a	15
2.6	Perda de retorno (S11) da antena com as variações da dimensão b	16
2.7	Perda de retorno (S11) da antena com as variações da dimensão d	16
2.8	Perda de retorno (S11) da antena com as variações da dimensão e	17
2.9	Perda de retorno (S11) da antena com as variações da dimensão g	17
2.10	Perda de Retorno (S11) da etiqueta RFID passiva.	18
2.11	Impedância de entrada da Etiqueta RFID Inicial.	19
2.12	Diagrama de Radiação 3D da etiqueta RFID passiva.	20
2.13	Representação polar do diagrama de radiação da etiqueta RFID passiva no plano E e H.	20

3.1	Primeira demonstração experimental de LHM [Montalvão, 2016].	22
3.2	Geometrias de <i>Split-Ring Resonator</i> [Barros, 2012].	23
3.3	Modelo de circuito equivalente do SRR. (a) SRR configuração dupla, (b) SRR configuração simples [Silva et al., 2015].	24
3.4	Geometria da célula SRR.	25
3.5	Quatro antenas com n-SRR perfurando o plano terra.	26
3.6	Comparação da simulação da perda de retorno entre a antena inicial e as quatro antenas com a estrutura CSRR.	27
3.7	Perda de Retorno (S11) da antena com plano terra 02-SRR em função das dimensões a,b,d,e e g	28
3.8	Perda de Retorno (S11) da antena com plano terra 03-SRR em função das dimensões a,b,d,e e g	29
3.9	Perda de Retorno (S11) da antena com plano terra 04-SRR em função das dimensões a,b,d,e e g	30
3.10	Perda de Retorno (S11) da antena com plano terra 06-SRR em função das dimensões a,b,d,e e g	31
3.11	Estrutura etiqueta RFID final: duas faces metálicas (plaqueta e plano Terra) e um substrato dielétrico no meio.	34
3.12	Comparação da simulação da perda de retorno entre a etiqueta RFID final e a etiqueta RFID inicial.	35
3.13	Impedância de entrada da Etiqueta RFID Final.	36
3.14	Diagrama de Radiação 3D da etiqueta RFID final.	36
3.15	Representação polar do diagrama de radiação da etiqueta RFID final no plano E e H.	37
3.16	Perda de Retorno (S11) das etiqueta RFID inicial e a etiqueta RFID final no espaço livre e sobre a placa de alumínio ($\sigma = 3.56e7$) de 100 x 100 mm e com espessura de 0.35 mm.	39
3.17	Perda de Retorno (S11) das etiqueta RFID inicial e a etiqueta RFID final no espaço livre e sobre a placa de vidro ($\epsilon_r = 4,82$) de 100 x 100 mm e com espessura de 0.35 mm.	39
3.18	Perda de Retorno (S11) das etiqueta RFID inicial e a etiqueta RFID final no espaço livre e sobre a placa de papel ($\epsilon_r = 2,31$) de 100 x 100 mm e com espessura de 0.35 mm.	40
3.19	Perda de Retorno (S11) das etiqueta RFID inicial e a etiqueta RFID final no espaço livre e sobre a placa de plástico ($\epsilon_r = 3,6$) de 100 x 100 mm e com espessura de 0.35 mm.	40

3.20	Configuração da etiqueta RFID na vista (a) de topo e (b) lateral.	41
4.1	Protótipos das etiquetas RFID inicial e final, vista superior (plaqueta).	43
4.2	Protótipos das etiquetas RFID inicial e final, vista inferior (plano terra).	43
4.3	<i>Setup</i> de medições.	44
4.4	Comparação entre os resultados simulados e medidos da perda de retorno da etiqueta RFID inicial.	45
4.5	Comparação entre os resultados simulados e medidos da perda de retorno da etiqueta RFID final.	45

Lista de Tabelas

2.1	Especificações do substrato RO3003 [RO3003, 2017].	10
2.2	Especificações do <i>chip</i> [NXP Semiconductor, 2016].	11
2.3	Dimensão dos parâmetros geométricos da etiqueta RFID inicial	18
3.1	Dimensões da célula unitária SRR	25
3.2	Dimensão dos parâmetros geométricos e elétricos da etiqueta RFID com plano terra 02-SRR.	32
3.3	Dimensão dos parâmetros geométricos e elétricos da etiqueta RFID com plano terra 03-SRR.	32
3.4	Dimensão dos parâmetros geométricos e elétricos da etiqueta RFID com plano terra 04-SRR.	33
3.5	Dimensão dos parâmetros geométricos e elétricos da etiqueta RFID com plano terra 06-SRR (etiqueta RFID final).	34
3.6	Parâmetros elétricos das etiqueta RFID inicial e a etiqueta RFID final.	37
3.7	Dimensão dos parâmetros geométricos e elétricos das etiquetas RFID o Substrato RO3003.	42
3.8	Dimensão dos parâmetros geométricos e elétricos das etiquetas RFID com o Substrato RT5880.	42

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Nas últimas duas décadas, a tecnologia de ***R**adio **F**requency **I**Dentification (RFID)*, que no português significa “Identificação por Radiofrequência”, vem sendo rapidamente desenvolvida e utilizada em diversas aplicações que necessitam da captura automática de dados via radiofrequência. Os fatores primordiais para o incentivo à utilização do sistema RFID são: a dificuldade de capturar informações de produtos que estejam em movimento e em processos que impossibilitam o uso de código de barras [Sousa Neto, 2016, Ngai et al., 2008]. As principais aplicações da tecnologia RFID são em rastreamento e identificação de objetos, por exemplo, na gestão de cadeia de suprimentos e logística, rastreamento de pessoas e documentos, identificação e movimentação de bagagens, controle de entrada e saída de veículos, controle de acesso de pessoas, rastreamento de gado, controle e identificação de ativos em bibliotecas e autenticidade de produtos [Ngai et al., 2008, Montalvão, 2010]. No sistema RFID utilizam-se ondas eletromagnéticas para se obter as informações armazenadas no dispositivo eletrônico denominado como etiqueta RFID (etiqueta inteligente) através de outro dispositivo conhecido como leitora RFID [Montalvão, 2016].

A ideia utilizada nos sistemas RFID surgiu na II Guerra Mundial. Os britânicos desenvolveram o primeiro sistema identificador ativo de amigo ou inimigo (IFF - *Identify Friend or Foe*). Esse identificador consiste de um transmissor colocado em cada aeronave e, quando esses transmissores recebiam sinais das estações de radar situadas no solo, começavam a transmitir um sinal de resposta, que identificava o avião como *Friendly* (amigo). Os sistemas de RFID utilizam o mesmo princípio básico. Um sinal de interrogação é enviado a um transponder, o qual é ativado e reflete de volta o sinal ou transmite seu próprio sinal [Barbin et al., 2015].

O padrão ITU - *International Telecommunication Union* destina a faixa de frequência que está entre 860 a 960 MHz (UHF - *Ultra High Frequency*). Globalmente, os sistemas RFID UHF, operam em diferentes faixas de frequências, em distintas regiões do mundo. As faixas de frequências utilizadas são: 866-869 MHz na Europa, 902-928 MHz na América do Norte e América do Sul e 950-956 MHz na Ásia [Rao et al., 2005, Faudzi et al., 2014a]. Portanto, no Brasil a faixa de frequência alocada para o sistema está entre 902 a 928 MHz.

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

As antenas impressas têm sido amplamente utilizadas nos sistemas RFID, devido às suas vantagens, como, configuração fina, baixo peso e baixo custo de produção. Além disso, as antenas impressas possuem diversas geometrias de plaqueta (*Patch*), substrato e plano terra, fazendo-as propícias no desenvolvimento de etiquetas RFID em UHF.

Neste trabalho uma técnica de miniaturização é aplicada. A ideia é utilizar uma matriz de anéis ressoadores (*Complementary Split-Ring Resonator* - CSSR), definida como uma estrutura metamaterial. Metamateriais são materiais produzidos artificialmente resultando em propriedades físicas não encontradas na natureza. Os metamateriais podem ser definidos também como estruturas geométricas feitas a partir de materiais comuns, dielétricos e condutores, ou por combinação destes. Os estudos sobre metamateriais iniciaram-se através de um trabalho teórico do físico russo Victor G. Veselago em 1968 [Silva et al., 2015, Montalvão, 2016]. Muitos pesquisadores vêm realizando diversos estudos a respeito do uso desses metamateriais em antenas impressas. Os metamateriais permitem melhor controle dos parâmetros elétricos de antenas impressas, flexibilizando as aplicações destas em diferentes sistemas de comunicações [Colburn and Rahmat-Samii, 1999, Lee et al., 2007].

Nesta dissertação, uma antena impressa com geometria de plaqueta já existente é sintonizada para operar na frequência de 915 MHz, respeitando o Padrão ISO 1800-6. Posteriormente, é aplicada uma estrutura metamaterial no plano terra da antena, com

o objetivo de reduzir o tamanho físico da etiqueta RFID sem prejudicar os principais parâmetros elétricos da antena.

1.1 Revisão Bibliográfica

RFID é uma tecnologia utilizada para identificação, rastreamento e monitoramento automático de objetos. Um sistema típico de RFID é composto por etiquetas RFID (*Tag*, *Tag* RF e etiqueta eletrônica), leitoras RFID (*readers*) e *software* de aplicação (*Middleware*) [Ngai et al., 2008, Finkenzeller, 2010], conforme ilustrado na Figura 1.1.

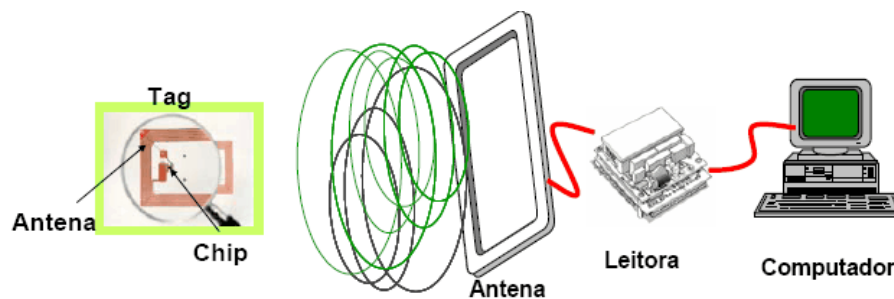


Figura 1.1: Sistema RFID [Embarcados, 2017].

1.1.1 Etiqueta RFID

A etiqueta RFID, conhecida também como *transponder*, é o componente mais importante do sistema. Existem quatro tipos de etiquetas RFID, que são:



Figura 1.2: Exemplo de etiqueta RFID.

- **Etiqueta passiva:** consiste em uma antena associada a um *microchip* com memória interna de leitura e gravação. Por ser passiva, a energia necessária para ativar o *microchip* vem do próprio sistema, um método de comunicação que utiliza a tecnologia de retroespalhamento (*backscattering modulation*), refletindo de volta as ondas eletromagnéticas da leitora RFID para a mesma [Barbin et al., 2015, Finkenzeller, 2010, Valmiro, 2015]. A etiqueta passiva é a escolhida para este trabalho e suas características serão melhor abordadas mais adiante;
- **Etiqueta ativa:** também possui uma antena associada a um circuito integrado, mas não necessita da energia do sinal proveniente da leitora RFID para energizar o *microchip* que possui bateria interna, o que permite à etiqueta gerar seu próprio sinal, e, por consequência, elevar o alcance de distâncias de leitura, amplificando o sinal recebido e transmitido para a leitora RFID [Souza et al., 2015, de Castro Alves et al., 2015];
- **Etiqueta semi-passiva ou semi-ativa:** nessas etiquetas o *microchip* é alimentado por uma bateria interna, mas toda comunicação com a leitora RFID é efetuada através da modulação por retro-espalhamento [Souza et al., 2015, de Castro Alves et al., 2015];
- **Etiqueta *chipless*:** é uma etiqueta passiva, mas que não possui *microchips*. Seu funcionamento é bem semelhante ao da etiqueta passiva, mas a codificação é realizada através do *hardware* da etiqueta [Souza et al., 2015, de Castro Alves et al., 2015].

1.1.2 Leitora RFID

É um dispositivo utilizado para a comunicação com as etiquetas RFID. O leitor RFID consiste em uma antena, um módulo transceptor de RF (transmissor e receptor) e um módulo de controle, responsáveis por transmitir, receber, gerar, recuperar e armazenar as informações [Souza et al., 2015, de Castro Alves et al., 2015, Rengifo et al., 2016]. O leitor RFID é chamado também interrogador [Rengifo et al., 2016].

1.1.3 *Software* de Aplicação (*Middleware*)

Responsável por estabelecer a interface e os protocolos de comunicação para codificar e decodificar os dados de identificação a partir da leitora RFID, para um computador. Realiza também a filtragem das informações identificadas, pois uma leitora RFID pode identificar uma mesma etiqueta por diversas vezes por segundo, a fim de não sobrecarregar todo o sistema com informações recíprocas. Para evitar perda de dados, possui algoritmos inteligentes de anti-colisão [Souza et al., 2015, Rengifo et al., 2016].

1.1.4 Funcionamento do Sistema RFID

O sistema RFID UHF passivo baseia-se em *backscattering modulation* (modulação por retroespalhamento), conforme ilustrado na Figura 1.3. O funcionamento ocorre em três etapas. Na primeira, a leitora RFID emite uma onda incidente (portadora modulada) sobre a etiqueta RFID durante a comunicação. A etiqueta recebe e retifica o sinal modulado transmitido pela leitora, gerando uma tensão contínua para a alimentação do *microchip*. Na segunda etapa, a leitora requisita informações da etiqueta, enviando um comando codificado e modulado. Por fim, a etiqueta responde ao pedido da leitora através do chaveamento da impedância do *chip*. A alteração do valor da impedância modula a onda espalhada pela etiqueta, que é recebida, demodulada e tem as informações decodificadas na leitora [Barbin et al., 2015, Rao et al., 2005, Finkenzeller and Müller, 2010].

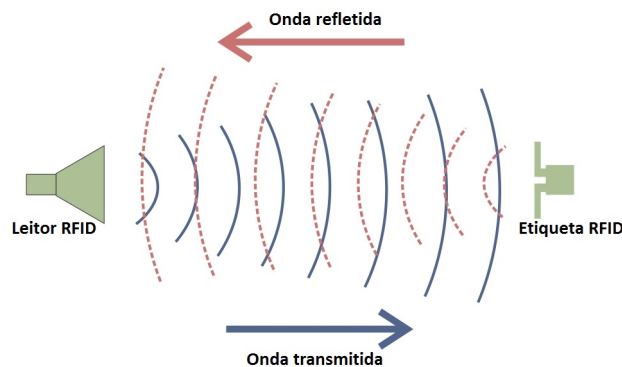


Figura 1.3: Modelo de funcionamento do sistema RFID.

O principal fator de avaliação de desempenho do sistema RFID é a distância máxima entre o leitor e a etiqueta. A potência do sinal transmitido da leitora para a etiqueta, a potência do sinal recebido pela leitora RFID através do retroespalhamento e a sensibilidade do *chip*, são os limitadores mais relevantes para fixar a distância máxima onde o sistema RFID possui um comportamento satisfatório [Rao et al., 2005].

As principais vantagens da tecnologia RFID são a eliminação de erros de escrita e leitura de dados, coleta de dados de forma rápida e automática, redução de processamento de dados, operação segura em ambientes severos, operação sem contato e sem necessidade de campo visual direto e grande variedade de formatos e tamanhos, aumento da segurança, redução de custos operacionais, diminuição de erros humanos, aumento na velocidade dos processos, controle em processos de qualidade e na redução de perdas e inventários [Sousa Neto, 2016].

1.2 Objetivos

Neste trabalho será tratada a utilização de uma configuração de dois anéis concêntricos ressoadores complementares (*Complementary Split-Ring Resonator* - CSRR), classificados como um tipo de estrutura metamaterial, e suas influências nos parâmetros de uma antena impressa para aplicação em RFID, investigando o diagrama de radiação e a perda por retorno.

Os principais objetivos deste trabalho são:

- Projetar uma antena, com geometria encontrada na literatura, para operar na frequência de 915 MHz, através de simulações realizadas no *software* comercial CST MWS (*Computer Simulation Technology Microwave Studio*) [cstmws, 2017];
- Inserir uma estrutura metamaterial (CSRR) na antena simulada inicialmente, com intuito de melhorar as características elétricas da antena e, por consequência, diminuir o tamanho da mesma;
- Fazer a síntese e análise das simulações;
- Construir protótipos;
- Avaliar o desempenho da antena desenvolvida por meio da comparação de resultados experimentais e simulados.

1.3 Contribuição desta Dissertação

Na literatura, encontram-se variadas pesquisas sobre etiquetas RFID e as mais diversas aplicabilidades que esta tecnologia permite. Por se tratar de um dispositivo portátil,

as antenas impressas apresentam vantagens adequadas para este tipo de aplicação, como, configuração fina, facilidade de construção e compatibilidade com circuitos integrados. Para favorecer as aplicabilidades do sistema RFID, é interessante empregar técnicas de miniaturização de antenas, promovendo assim o desenvolvimento tecnológico para as etiquetas RFID. Neste trabalho será aplicada uma estrutura metamaterial (CSRR) no plano terra que compõe a etiqueta RFID, uma vez que a estrutura metamaterial possibilita frequências de ressonância menores que a frequência de operação atribuída de inicialmente (915 MHz), fazendo com que a antena tenha novas aplicabilidades em frequências inferiores. A diminuição do tamanho da antena ocorre com a posterior sintonia em frequência [Lee and Hao, 2008, Sousa Neto, 2014, Souza et al., 2015].

1.4 Estrutura do Texto

Este trabalho está organizado da seguinte forma. No Capítulo 2 são apresentados os desafios do projeto de uma etiqueta RFID e, conseqüentemente, a síntese de uma antena impressa. A estrutura da etiqueta RFID é detalhada e os resultados obtidos através de um *software* de simulação são apresentados e analisados.

No Capítulo 3 são feitas novas simulações e análises para compreender os efeitos da estrutura metamaterial inserida no plano terra da antena impressa e alcançar a melhor miniaturização da etiqueta RFID.

No Capítulo 4 é realizado um detalhamento sobre a construção dos protótipos e sobre a realização das medições em laboratório. Os resultados são apresentados e discutidos.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho, apontando as principais contribuições e perspectivas para futuros trabalhos.

Capítulo 2

ETIQUETA PASSIVA RFID

O objetivo da etiqueta RFID é armazenar e transmitir informações relacionadas ao objeto ao qual ela está anexada. Neste trabalho, as informações contidas na etiqueta RFID estão em um *microchip* e a transferência de informação é feita através da modulação por retroespalhamento (*backscattering modulation*), que compõe a chamada etiqueta passiva RFID.

A etiqueta passiva possui uma antena utilizada para obter a energia do sinal transmitido pelo leitor e se comunicar com este. Fatores como distância entre o leitor e a etiqueta, potência do sinal transmitido pelo leitor e a eficiência das antenas que compõem o sistema interferem diretamente na quantidade de energia recebida pela etiqueta [Ngai et al., 2008, Faudzi et al., 2014a, Rengifo et al., 2016].

O projeto dessas etiquetas utiliza inúmeros tipos de antena, como antenas dipolo, dipolos modificados, entre outras. Independente do tipo de etiqueta RFID, o projeto da antena é a primeira etapa para a sua concepção. O desempenho da etiqueta RFID depende diretamente do desempenho da antena e por isso um bom projeto deve ser executado [Valmiro, 2015, Marrocco, 2008].

A etiqueta pode ser instalada em diferentes objetos. Assim, em materiais com distintas propriedades elétricas, as características de cada objeto podem ocasionar mudança na frequência de ressonância e o casamento de impedância entre antena e o *microchip*.

2.1 Antenas Impressas

Antenas impressas (*Microstrip Antenna* - MSA) apresentam certas vantagens quando comparadas com antenas convencionais [Balanis, 2016, Kumar and Ray, 2003], tais como baixo peso e configuração fina, baixo custo de produção, facilidade de construção, compatibilidade com circuitos integrados.

Neste contexto, as antenas impressas se enquadram, satisfatoriamente, nas exigências para a elaboração de dispositivos móveis como, por exemplo, uma etiqueta RFID. Uma antena impressa, na sua forma mais simples, é constituída por um elemento radiador (Plaqueta ou *Patch*) sobre um substrato (dielétrico) e possui um plano terra na face oposta do substrato, [Kumar and Ray, 2003] como ilustrado na Figura 2.1. Os diferentes tipos de antenas impressas são distinguíveis principalmente pelos arranjos de diferentes geometrias do elemento irradiador, com diferentes características de radiação. Como exemplo de geometrias usualmente empregadas, podemos citar as formas retangular e circular. A radiação da antena impressa pode ser estabelecida por meio da distribuição de campo entre a plaqueta e o plano terra [Balanis, 2016, Kumar and Ray, 2003, Pozar and Schaubert, 1995].

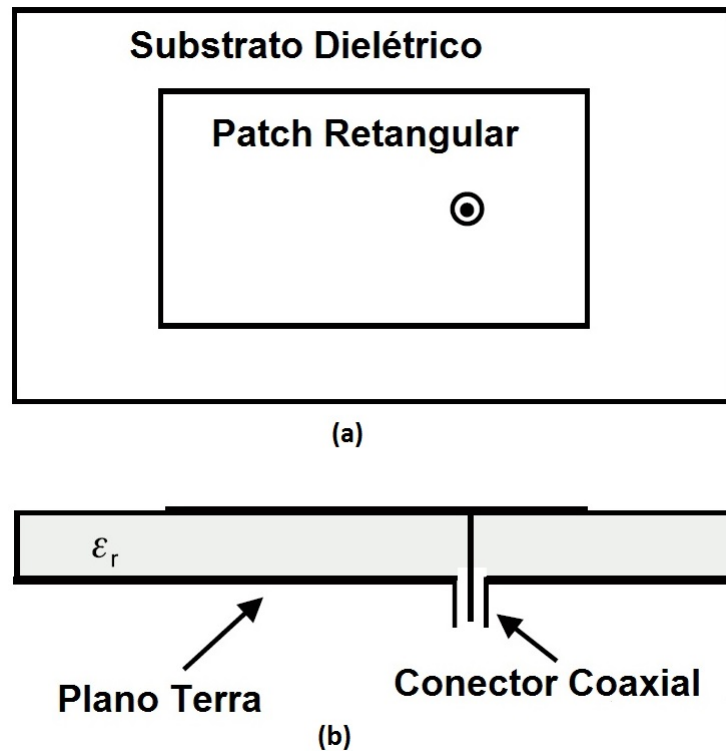


Figura 2.1: Antena impressa com alimentador coaxial: (a) vista de topo e (b) vista lateral.

No entanto, existem algumas desvantagens associadas às antenas impressas que incluem largura de banda estreita, baixo ganho ($\sim 6\text{dBi}$), possibilidade de excitação de ondas de superfície e consequente redução da eficiência [Balanis, 2016, Kumar and Ray, 2003, Pozar and Schaubert, 1995].

Para iniciar o projeto da etiqueta RFID é necessário definir a frequência de operação, o *microchip* e o substrato.

2.2 Substrato

No mercado existem diferentes opções de substratos que podem ser empregados para a composição da antena impressa. O substrato é caracterizado por seus parâmetros elétricos, que são a permissividade dielétrica relativa (ϵ_r) e suas perdas dielétricas (tangente de perda). Para projetos de antenas, os valores de ϵ_r utilizados estão entre 2.2 e 12 [Balanis, 2016].

Substratos mais espessos e com constantes dielétricas menores são mais desejáveis para antenas de alto desempenho, pois permitem maior eficiência, maior largura de banda e campos mais desprendidos, permitindo a sua propagação ao custo de elementos de maiores dimensões. Já os substratos mais finos e com constantes dielétricas mais altas são indicados para circuitos de microondas, pois garantem o melhor confinamento dos campos, minimizando radiação e acoplamento eletromagnético indesejáveis. No entanto, têm mais perdas e largura de banda estreita [Balanis, 2016].

O substrato disponível para este trabalho é o RO3003 da Rogers Substrates e as suas especificações seguem na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Especificações do substrato RO3003 [RO3003, 2017].

Descrição	Simbologia	Valores
Espessura do Substrato	h	0,76mm
Permissividade Elétrica Relativa	ϵ_r	3,0
Espessura do Cobre	t	0,0175mm
Tangente de Perda	$\tan\delta$	0,0010

2.3 Frequência de Operação

A antena impressa deve ser projetada para operar na faixa de frequências utilizada pelos dispositivos do sistemas RFID UHF, de 902 MHz a 928 MHz. A frequência de ressonância pretendida para esta antena é de 915 MHz, que é a frequência central da faixa de aplicação.

2.4 Chip

O circuito do *chip* consiste em um RF *front-end* (circuito de recepção), com alguns circuitos complementares de processamento do sinal, um circuito lógico para implementar os algoritmos, e uma memória para o armazenamento de dados [Sousa Neto, 2016]. O *chip* é um circuito integrado implementado em silício. O maior desafio do projeto da etiqueta RFID consiste em obter o melhor casamento de impedância entre a antena e o *chip* [Moya Baquero et al., 2016]. O *chip* tem uma impedância complexa resultante da soma de uma parcela resistiva e uma reatância altamente capacitiva. Logo, a impedância de entrada da antena deve ser projetada para ser altamente indutiva com o propósito de alcançar a máxima transferência de potência [Sousa Neto, 2016, Moya Baquero et al., 2016]. Os circuitos integrados disponíveis no mercado devem seguir as especificações padronizadas pela EPC (*Electronic Product Code*) Global e o *chip* escolhido para incorporar a etiqueta RFID foi o SL3S1204 da NXP Semiconductor [NXP Semiconductor, 2016].

O *chip* é caracterizado por sua frequência de operação, sensibilidade (que é a potência mínima para ativar o *chip*), e sua impedância complexa. As especificações do *chip* encontram-se na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Especificações do chip [NXP Semiconductor, 2016].

Descrição	Valores
Frequência de Operação	902-928 MHz
Sensibilidade	-21 dBm
Impedância (em 915 MHz)	12,8 -j248 Ω

Definidos os parâmetros iniciais de projeto, será dado início ao estudo de caso da etiqueta RFID inicial.

2.5 Estudo de Caso: Etiqueta RFID Inicial

A geometria da plaqueta proposta neste trabalho, ilustrada na Figura 2.2, tem a mesma geometria da antena desenvolvida no artigo de Y. Yu *et al.* [Yu *et al.*, 2015], que consiste em um *microstrip* dobrado (*Meander-Line Antennas* - MLA) e uma plaqueta retangular (*Microstrip patch*). Porém, no trabalho de Y. Yu *et al.* é analisado uma etiqueta RFID para operar na frequência de 2,45 GHz e a antena possui outro tipo de substrato (FR-4), impedindo, assim, uma comparação entre os resultados de [Yu *et al.*, 2015] com os deste trabalho.

A geometria MLA é utilizada para reduzir o tamanho das antenas dipolos, já que o dipolo linear é dobrado, reduzindo, assim, o comprimento da antena. Dessa forma, as frequências de ressonância são mais baixas em comparação com um dipolo reto de mesma espessura, à custa de uma largura de faixa e uma eficiência bem menores devido ao cancelamento das correntes que fluem opostas uma à outra. Consequentemente, o ganho da antena é reduzido [Marrocco, 2008, Faudzi *et al.*, 2014b, Marrocco, 2003].

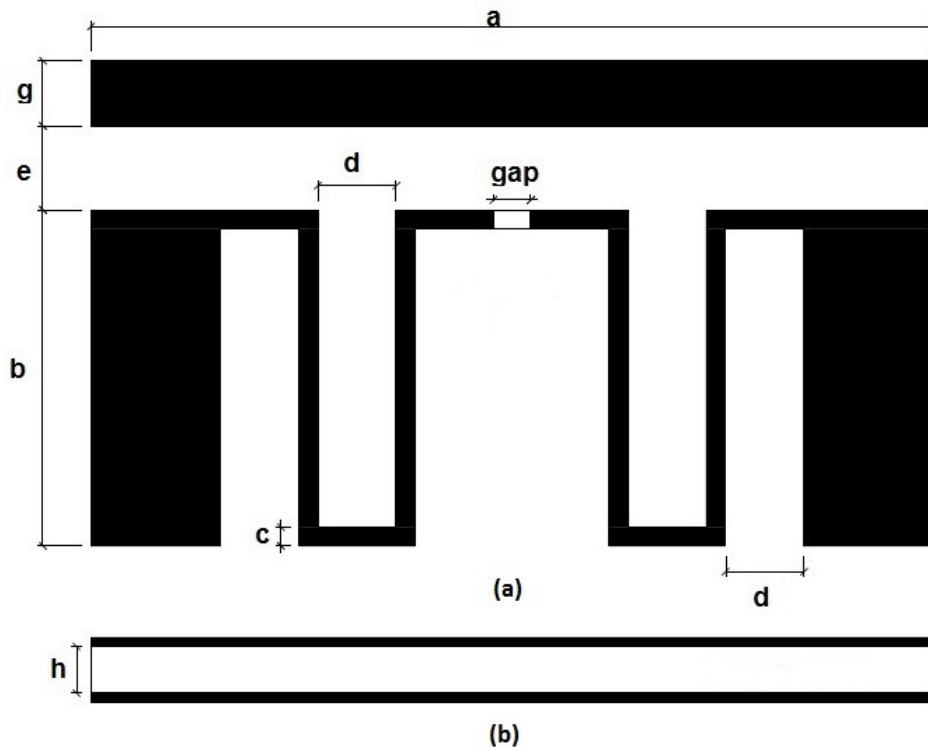


Figura 2.2: Configuração da Etiqueta RFID na vista (a) de topo e (b) lateral.

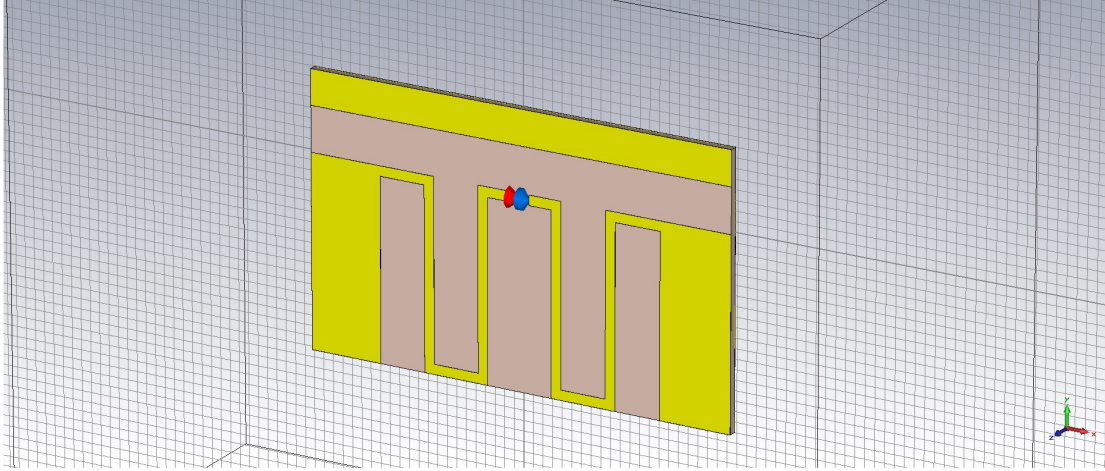


Figura 2.3: Etiqueta RFID projetada no CST MWS.

A geometria MLA produz reatâncias capacitivas e indutivas distribuídas, que podem afetar globalmente a impedância de entrada da antena [Marrocco, 2008]. Por isso, as MLAs são utilizadas também para casar, a impedância de entrada da antena à impedância do *chip*, para a obtenção da máxima transferência de potência.

Para avaliar o comportamento eletromagnético da antena de forma sistemática, optou-se por utilizar o *software* CST MWS com o intuito de reduzir o ciclo de otimização da geometria e auxiliar na tarefa da obtenção de um bom conjunto de parâmetros físicos para que a antena atinja o desempenho desejado. O *software* CST MWS é uma ferramenta de simulação comumente utilizada em projetos de antenas, utiliza o FIT (*Finite Integration Technique*) para resolver as Equações de Maxwell. O *software* CST MWS permite simulação, visualização e modelagem num ambiente de fácil utilização para resoluções de problemas eletromagnéticos (EM) 3D de forma precisa (ver Figura 2.3).

Dado que o CST MWS utiliza o FIT como método numérico de solução das Equações de Maxwell, o domínio físico da antena é discretizado em uma malha com elementos retangulares no plano. Para o correto dimensionamento dessa malha, dois parâmetros são utilizados. O primeiro, associado à malha global, define o número de linhas por comprimento de onda de toda estrutura. O segundo define uma malha local que, eventualmente, pode ser utilizada para um refinamento maior em partes específicas da antena que possuam dimensões menores e necessite de uma amostragem maior dos campos no seu interior. Com o intuito de obter simulações que gerem resultados satisfatórios e seguros, houve a preocupação de definir a malha de simulação de maneira adequada. Para isso, foram feitos dois tipos de refinamento dessa malha: o refinamento global, onde todo o

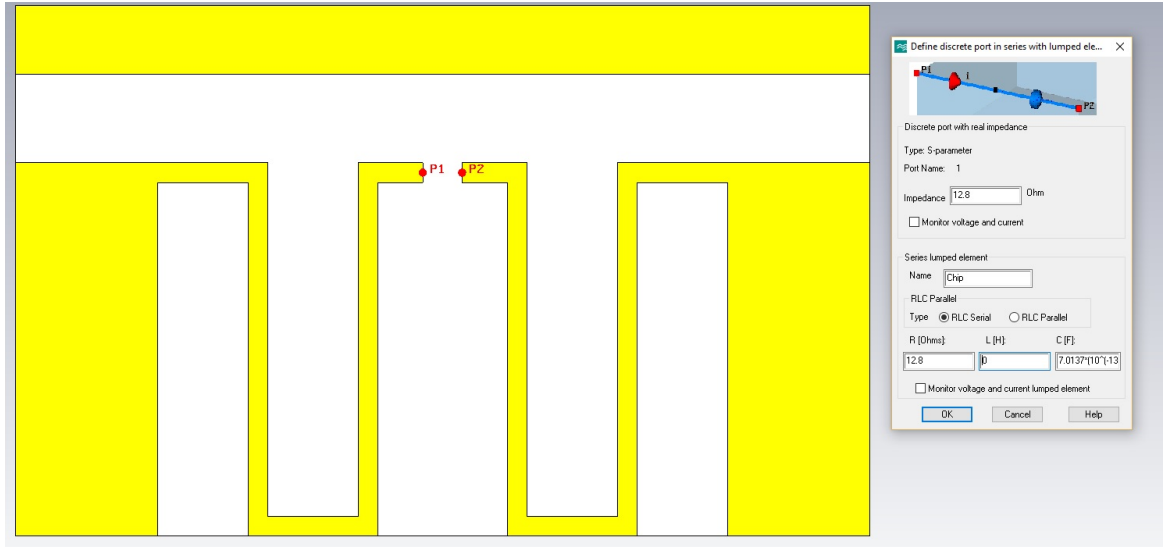


Figura 2.4: Configuração da porta discreta.

domínio de simulação foi discretizado com o número de 100 linhas por comprimento de onda; e o refinamento local 6 vezes maior que o global, sobre a plaqueta e o plano terra, fazendo com que os volumes do plano terra e da plaqueta fossem melhor representados, já que essas são as regiões de maior interesse e geram uma variação mais intensa dos campos.

No ambiente de simulação a antena impressa é excitada utilizando uma porta discreta (*Discret-Port*) puramente resistiva permitindo a análise dos parâmetros S. Além disso, como ilustrado na Figura 2.4, foi decidido inserir o *microchip* na antena utilizando a porta discreta em série com um *lumped-element* que faz às vezes da impedância característica do *microchip* (ver Tabela 2.2). É importante salientar que a resistência da porta discreta tem valor idêntico ao da parte real da impedância do *chip* ($12,8 \Omega$).

Para sintonizar a frequência de ressonância da antena impressa em 915 MHz, foi feita uma análise paramétrica através de pequenas variações discretas nas dimensões da antena. Tal análise tem também a finalidade de verificar a influência das dimensões **a**, **b**, **d**, **e** e **g** (ver Figura 2.2) no desvio da frequência de ressonância da antena. As Figuras 2.5, 2.6, 2.7, 2.8 e 2.9 ilustram graficamente as simulações realizadas para a análise paramétrica de cada dimensão citada anteriormente. As dimensões iniciais da antena impressa têm os seguintes valores **a** = 43 mm, **b** = 18,5 mm, **d** = 4,5 mm, **e** = 4,5 mm e **g** = 3 mm.

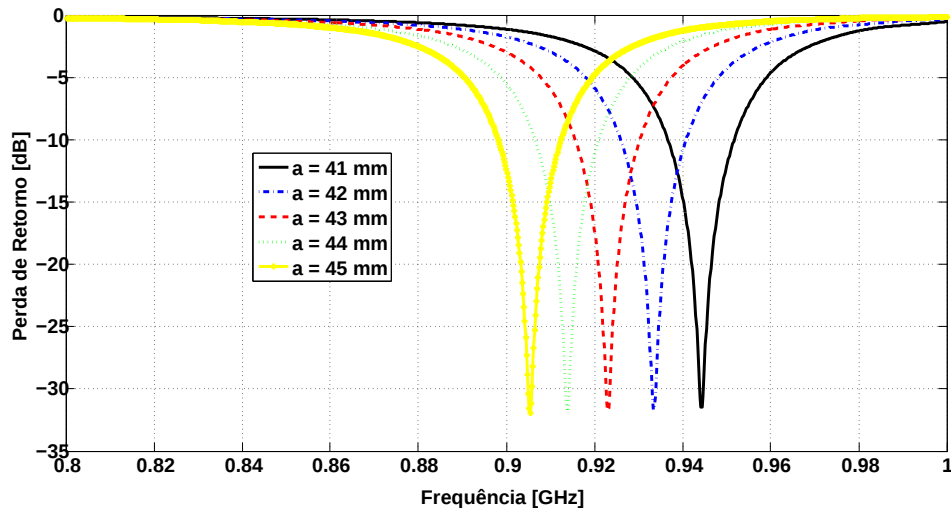


Figura 2.5: Perda de retorno (S_{11}) da antena com as variações da dimensão a .

A primeira dimensão da antena a ser investigada foi o comprimento do retângulo *Microstrip* (a) com as outras dimensões da antena permanecendo inalteradas. A dimensão a foi variada de 41 mm a 45 mm, com o incremento de 1 mm. Pode-se observar pela Figura 2.5, que a diminuição da frequências de ressonância pode ser obtida com o aumento do comprimento do retângulo *Microstrip*, porém sem alterar significativamente a magnitude de $|S_{11}|_{dB}$.

O efeito da variação da largura do MLA (b) de 17 mm a 19 mm, com o incremento de 0,5 mm foi avaliado, conforme ilustrados na Figura 2.6. É notório, que a diminuição da frequências de ressonância pode ser obtido com o aumento do largura do MLA. Traduz-se em um comportamento semelhante ao parâmetro a . Dado que a e b estão diretamente ligados ao comprimento e largura da antena, respectivamente.

A variação do espaço do MLA (d) de 4 mm a 5 mm, com o incremento de 0,25 mm foi analisado. Nota-se, através da Figura 2.7, que o aumento da frequência de ressonância pode ser obtida com o aumento da dimensão do parâmetro d , e na magnitude $|S_{11}|_{dB}$ não ocorreu uma alteração significativa.

A modificação da largura do intervalo (e) de 4 mm a 6 mm, com o incremento de 0,5 mm foi investigado. Nota-se, através da Figura 2.8, que aumentando a dimensão do parâmetro e , aumenta ligeiramente a frequência de ressonância, e a magnitude $|S_{11}|_{dB}$ a alteração foi insignificante.

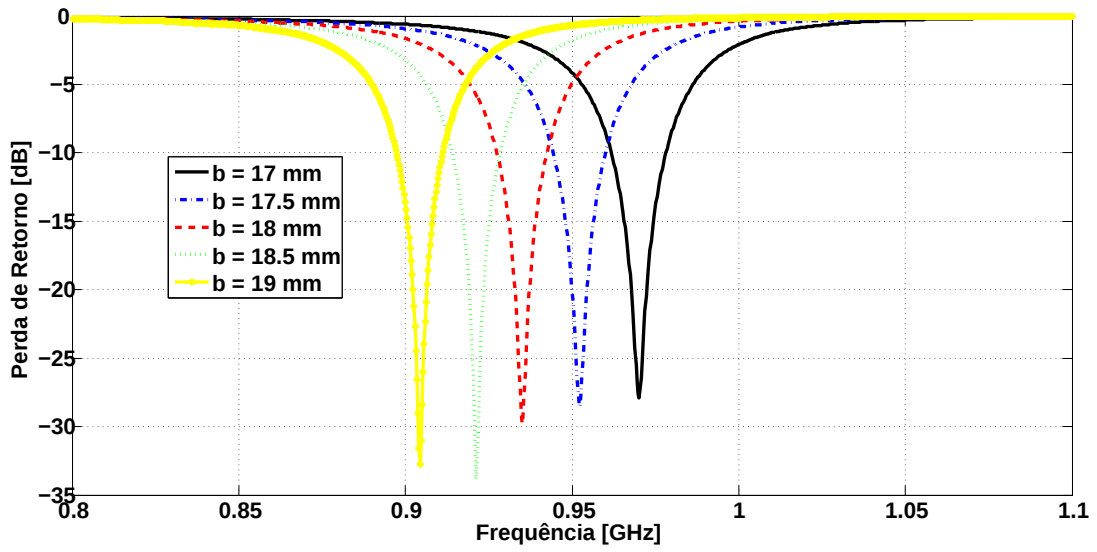


Figura 2.6: Perda de retorno (S11) da antena com as variações da dimensão b .

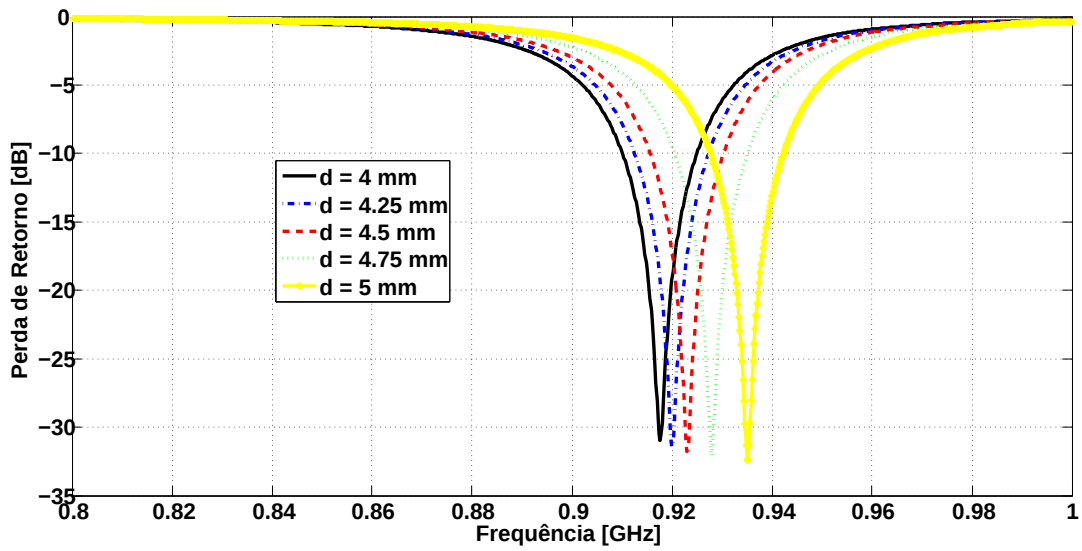


Figura 2.7: Perda de retorno (S11) da antena com as variações da dimensão d .

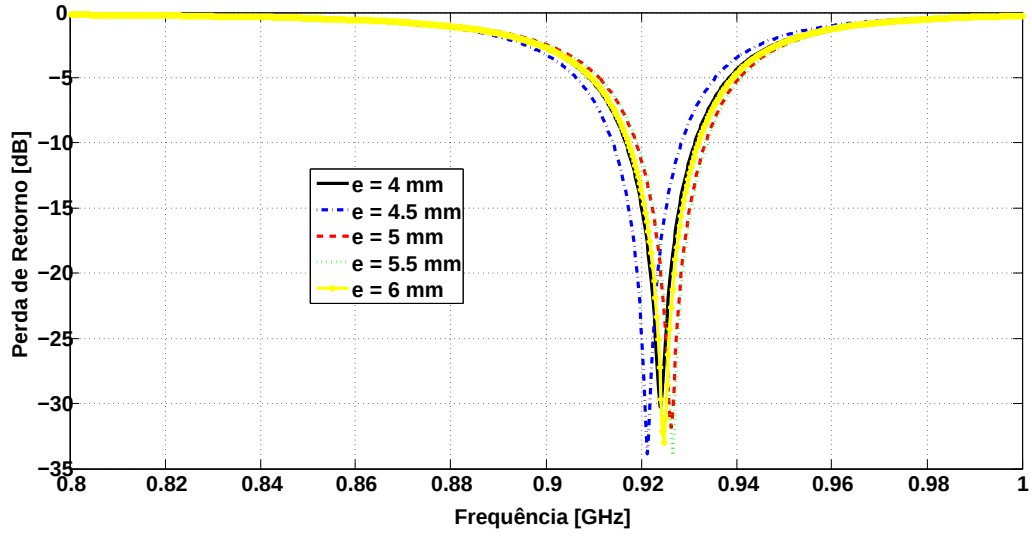


Figura 2.8: Perda de retorno (S_{11}) da antena com as variações da dimensão e .

A variação da largura do retângulo *Microstrip* (g) de 2 mm a 4,5 mm, com o incremento de 0,5 mm, Figura 2.9, traduz-se em um comportamento bem semelhante ao parâmetro e .

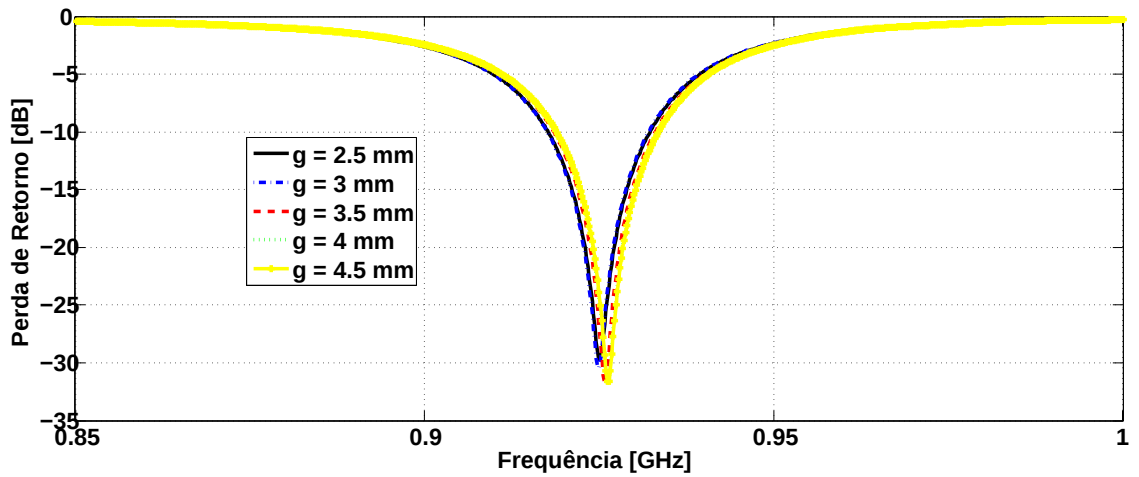


Figura 2.9: Perda de retorno (S_{11}) da antena com as variações da dimensão g .

Após a análise paramétrica, a melhor combinação destas dimensões (**a**,**b**,**d**,**e** e **g**) para sintonizar a antena na frequência de ressonância desejada (915 MHz) da etiqueta RFID, segue listada na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Dimensão dos parâmetros geométricos da etiqueta RFID inicial

Parâmetros	Descrição	Dimensões [mm]
a	Comprimento do retângulo Microstrip	43,5
b	Largura do MLA	19
c	Espessura da Linha do MLA	1
d	Espaço do MLA	4,6
e	Largura do Intervalo	4,5
g	Largura do retângulo Microstrip	3,5
h	Espessura do Substrato	0,76
gap	Intervalo de alocação para o Chip	2

A Figura 2.10 ilustra graficamente a perda de retorno da antena de referência (sem metamaterial) definida como etiqueta RFID inicial. Pode-se observar que o coeficiente de reflexão é mínimo em 915 MHz com o valor de -28,25 dB. A largura de faixa ($|S|$ inferior a -10 dB) é de cerca de 14,7 MHz.

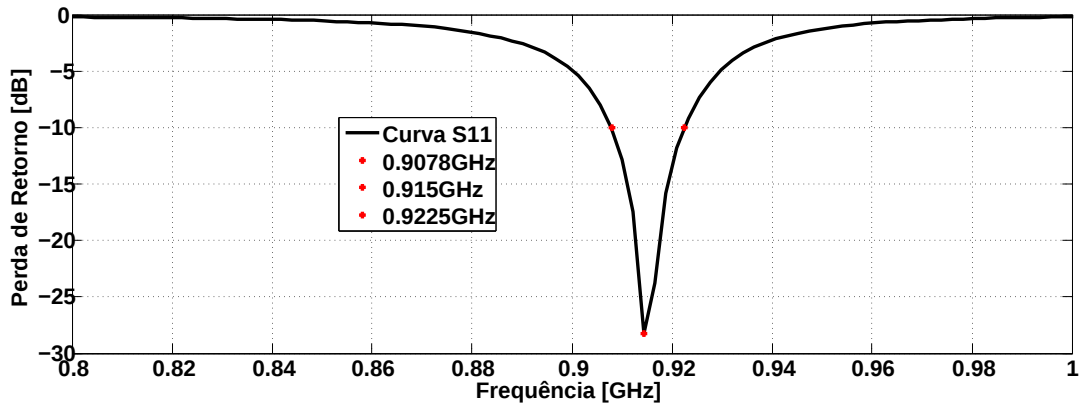


Figura 2.10: Perda de Retorno (S11) da etiqueta RFID passiva.

Um ótimo desempenho da etiqueta requer uma adaptação perfeita das cargas, ou seja, a impedância de entrada da antena impressa corresponde ao conjugado complexo da

impedância do *microchip*. A Figura 2.11 apresenta a carta de Smith. Na carta de Smith, em geral, são observados o ponto onde a curva intercepta o eixo real e, portanto, na qual a reatância vale zero (ressonância), o ponto mais próximo ao centro da carta (melhor casamento) e o ponto de máxima resistência. A etiqueta possui um ponto de ressonância em 915MHz, conforme observado, neste ponto, sua impedância de entrada é de $Z = 14.35 - j0.2417 \Omega$. Portanto, foi possível obter um bom casamento de impedâncias entre a antena impressa e o *chip*.

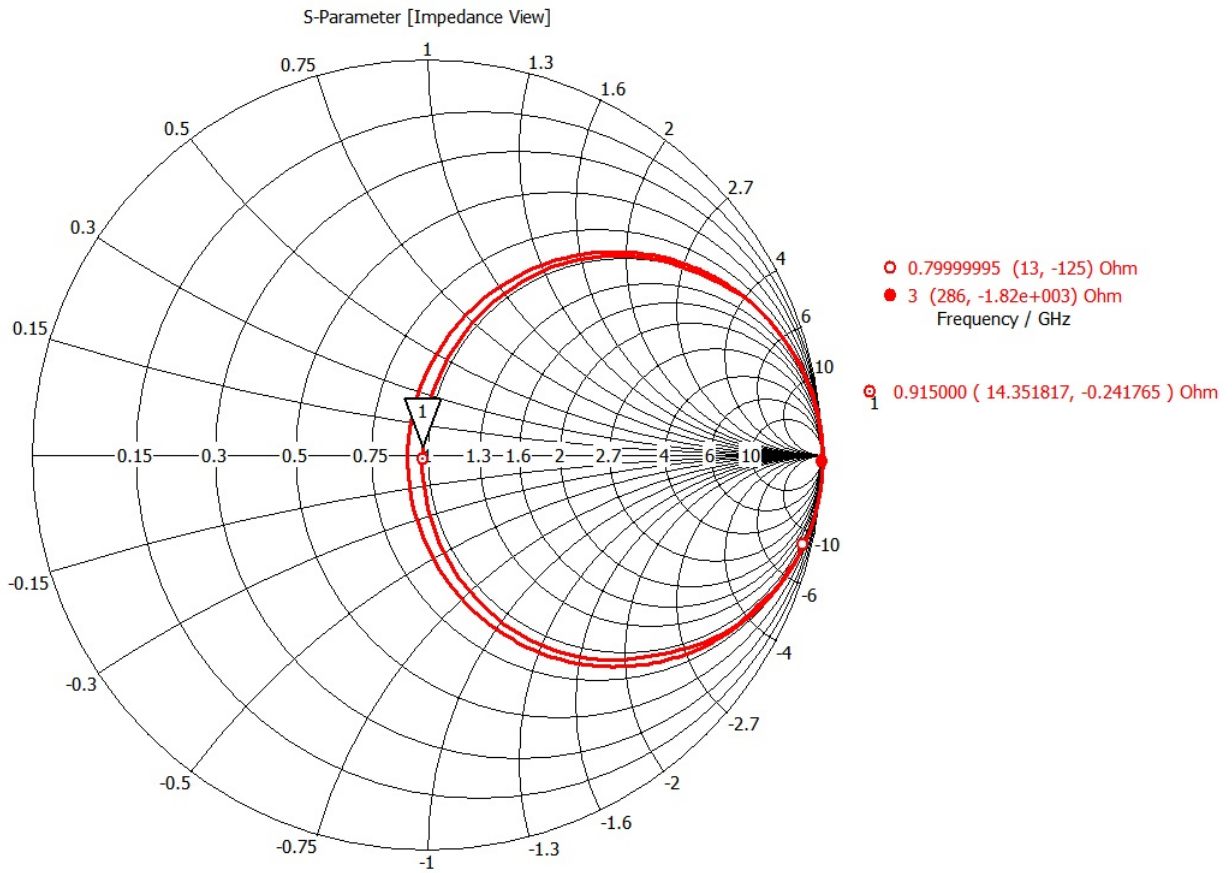


Figura 2.11: Impedância de entrada da Etiqueta RFID Inicial.

A Figura 2.12 mostra que a diretividade da etiqueta RFID inicial é de 2,19 dBi. As eficiências de radiação total, é a relação da potência total disponível com a potência radiada. O resultado da eficiência de radiação total simulada da antena nos 915 MHz, é de -22,06 dB.

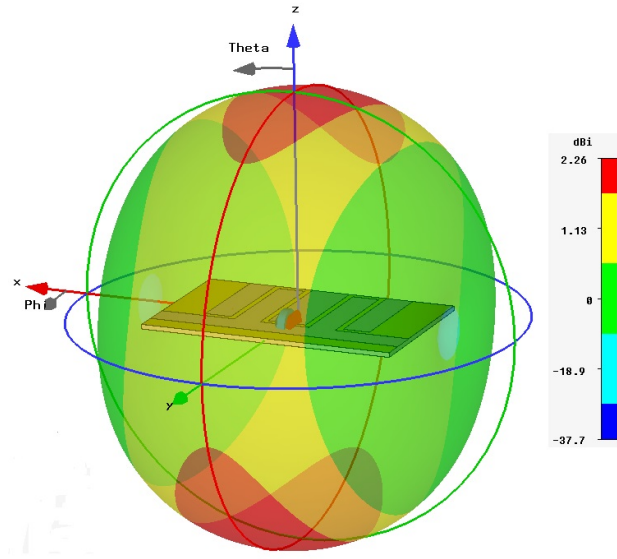


Figura 2.12: Diagrama de Radiação 3D da etiqueta RFID passiva.

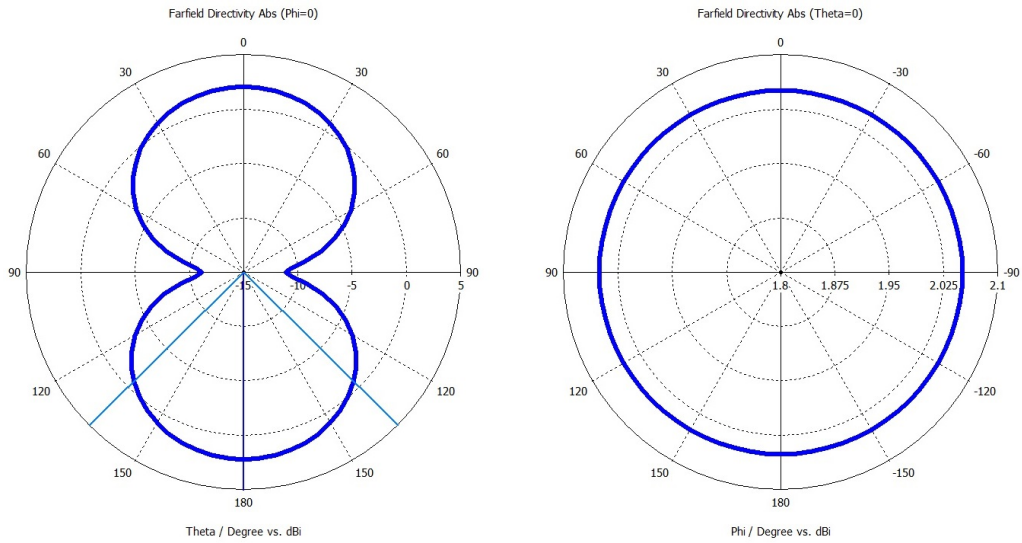


Figura 2.13: Representação polar do diagrama de radiação da etiqueta RFID passiva no plano E e H.

A etiqueta passiva RFID sintetizada neste capítulo será a antena de referência, definida como etiqueta RFID inicial, uma vez que uma modificação será aplicada ao plano terra da antena, com a inserção de uma estrutura metamaterial, com o objetivo de reduzir o tamanho físico da etiqueta RFID mas, sem prejudicar drasticamente os principais características elétricas da antena (diretividade, perda de retorno e largura de faixa). Esta análise é desenvolvida no capítulo seguinte.

Capítulo 3

ETIQUETA PASSIVA RFID COM ESTRUTURA METAMATERIAL

As etiquetas RFID devem possuir uma aparência exígua, pois podem ser fixadas em objetos pequenos. Precisam ser simples e baratas, para promover a viabilidade da aplicação desta tecnologia em vários produtos. Por esses motivos, técnicas de miniaturização em antenas impressas são relevantes no estudo de etiquetas RFID. Existem diferentes métodos e técnicas para reduzir o volume das antenas e, mais recentemente, a estrutura metamaterial tem mostrado ser um opção eficiente para alcançar a compacticidade de antenas impressas.

3.1 Metamaterial

Devido à gama de aplicações práticas que os materiais possibilitam, vêm ocorrendo avanços no desenvolvimento de materiais artificiais que possuam características dielétricas (permissividade elétrica ϵ) e magnéticas (permeabilidade magnética μ) alternativas, características que podem ser obtidas através de arranjos específicos de materiais [Barros, 2012, Silva et al., 2015].

Jagadis Chander Bose, em 1898, foi o primeiro a estudar a ideia de materiais artificiais, realizando o experimento de microondas em estruturas torcidas (meios quirais). Em 1945, Winston E. Kock criou lentes leves fazendo uso de microondas com arranjos de esferas condutoras, discos e fitas, dispostas periodicamente. O físico russo Victor Veselago, em 1968, propôs a existência de materiais com os parâmetros de permissividade efetiva e permeabilidade efetiva apresentando simultaneamente valores negativos, o que

define um material com índice de refração negativo, chamado de metamaterial. A teoria foi melhor definida em 1999 por John B. Pendry, que, introduzindo um arranjo periódico de uma estrutura, produziu uma permeabilidade magnética efetiva a partir de ressoadores em forma de anéis concêntricos com fendas opostas (*Split-Ring Resonator* - SRR). Com David R. Smith, em 2000, foi demonstrado experimentalmente a existência do primeiro *Left Handed Metamaterial* (LHM) com estruturas periódicas, ilustradas na Figura 3.1 [Barros, 2012, Silva et al., 2015].



Figura 3.1: Primeira demonstração experimental de LHM [Montalvão, 2016].

3.2 Split-Ring Resonator

O *Split-Ring Resonator* (SRR) é uma estrutura artificial usada para alcançar propriedades metamateriais e será aplicada ao plano terra da antena impressa deste trabalho. Para obter a permeabilidade negativa, John B. Pendry aumentou a resposta magnética dos materiais inserindo elementos capacitivos na estrutura. O SRR exibe resposta magnética ressonante às ondas eletromagnéticas quando o vetor campo magnético

for paralelo aos anéis. A SRR funciona como pequenos dipolos magnéticos, aumentando a resposta magnética de um material. A resposta magnética pode ser intensificada com o uso de uma matriz de SRR [Barros, 2012, Silva et al., 2015, Lee et al., 2007, Silva et al., 2014]. A SRR têm como configuração um par de *loops* que são feitos de metal não magnético, como o cobre, e possuem uma pequena distância entre eles (*gap*). Os laços podem ser concêntricos ou quadrados. A Figura 3.2 exemplifica algumas geometrias utilizadas nos meios magnéticos artificiais.

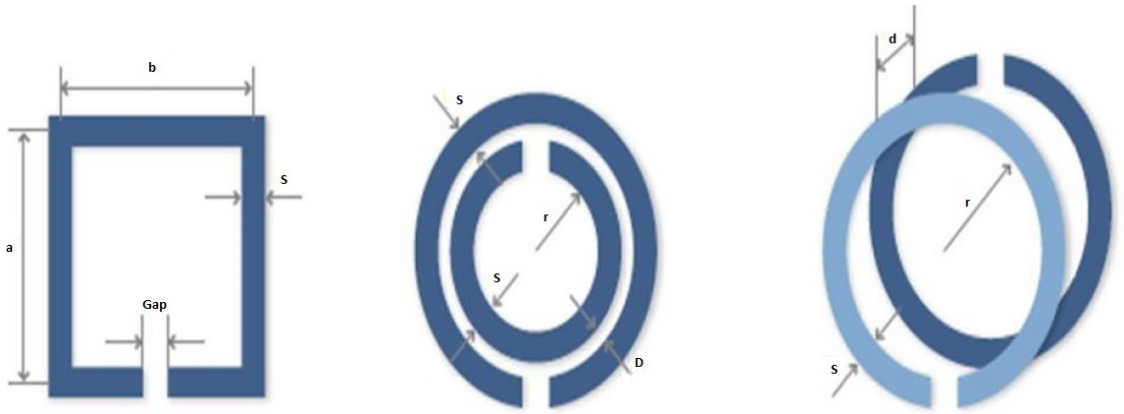


Figura 3.2: Geometrias de Split-Ring Resonator [Barros, 2012].

O fluxo magnético que penetra os anéis induz correntes nestes, as quais produzem o seu próprio fluxo, que adiciona-se ou opõe-se ao do campo incidente. Devido ao *gap*, os anéis podem suportar comprimentos de onda ressonantes muito maiores do que seu próprio diâmetro, fato que não aconteceria se os anéis fossem fechados. Os espaços entre os anéis produzem grandes valores de capacitância que diminuem a frequência de ressonância [Barros, 2012, Silva et al., 2015, Lee et al., 2007, Neto, 2014]. Assim, as dimensões da estrutura são bem menores em relação ao comprimento de onda de ressonância. Este conceito aplicado em antenas impressas permite a miniaturização de antenas, porque com a estrutura metamaterial podemos encontrar frequências de ressonâncias menores que a frequência de operação atribuída de início, fazendo com que a antena tenha novas aplicabilidades em frequências inferiores ou favorecendo a miniaturização da antena.

Existe um circuito equivalente ao SRR, mostrado na Figura 3.3. Na configuração de anel duplo, descrita na Figura 3.3(a), o acoplamento capacitivo indutivo entre os anéis é modelado por uma capacitância de acoplamento (C_m) e um transformador n . Já o modelo de anel simples, conforme a Figura 3.3(b), é modelado por um circuito RLC com frequência de ressonância dada por [Silva et al., 2015]:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.1)$$

O SRR duplo é basicamente equivalente ao SRR simples se o acoplamento mútuo é fraco, pois os tamanhos dos anéis são próximos. Assim $L_1 \cong L_2 \cong L$ e $C_1 \cong C_2 \cong C$, resultando em uma frequência ressonante combinada próxima a do SRR simples com as mesmas dimensões, porém com um maior momento magnético devido à maior densidade de corrente [Silva et al., 2015].

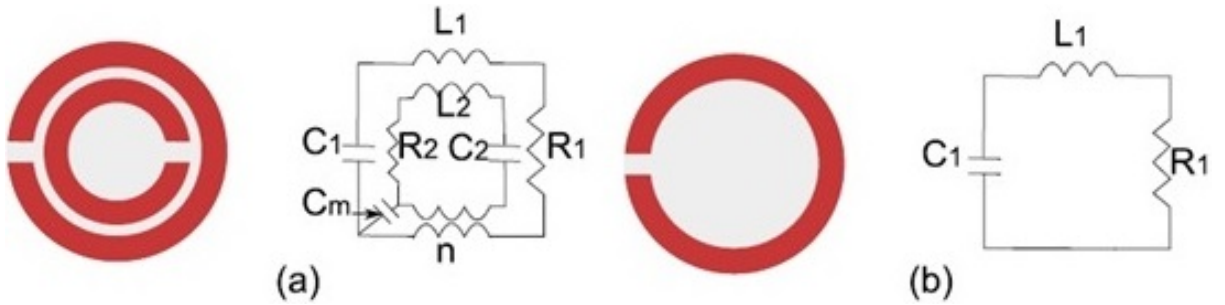


Figura 3.3: Modelo de circuito equivalente do SRR. (a) SRR configuração dupla, (b) SRR configuração simples [Silva et al., 2015].

O dimensionamento das estruturas SRR é obtido através dos parâmetros r (raio mais interno), S (espessura dos anéis interno e externo), D (a distância entre os anéis) e G (*gap*), conforme ilustrados na Figura 3.4. A modelagem da estrutura metamaterial CSRR foi baseada nos trabalhos publicados por Yoonjae *et al.* [Lee and Hao, 2008, Lee et al., 2007], onde é comprovado por simulação e experimentalmente que o uso da estrutura metamaterial permite a redução do tamanho de antenas impressas. Porém, nos trabalhos de Yoonjae *et al.* é analisada uma antena impressa convencional com *patch* retangular, impedindo, assim, uma comparação entre os resultados de [Lee and Hao, 2008, Lee et al., 2007] com os deste trabalho. As dimensões dos parâmetros da célula SRR foram otimizados para alterar as características de dispersão do substrato (permeabilidade efetiva) e estão listadas na Tabela 3.1.

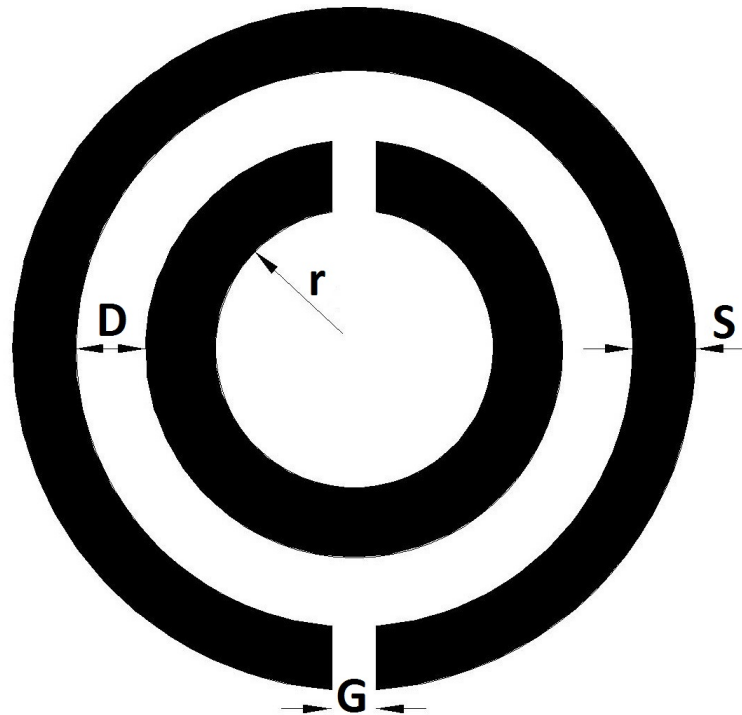


Figura 3.4: Geometria da célula SRR.

Tabela 3.1: Dimensões da célula unitária SRR

Parâmetro	Descrição	Dimensão [mm]
r	Raio interno	2,3
S	Espessura do anel interno e externo	1
G	Gap	0,7
D	Distancia entre os anéis	1,2

3.3 Estudo de Caso: Etiqueta RFID Passiva com Metamaterial

A etiqueta RFID analisada será a de dimensões listadas na Tabela 2.3. Entretanto, neste capítulo serão incluídas as estruturas metamateriais, ou seja, uma matriz SRR (Complementary Split-Ring Resonators) perfurando o plano terra da antena, como ilustrado na Figura 3.5. Para avaliar o desempenho da estrutura metamaterial (CSRRs) aplicada ao plano terra, utilizamos quatro configurações diferentes de matrizes SRRs, ilustradas na Figura 3.5.

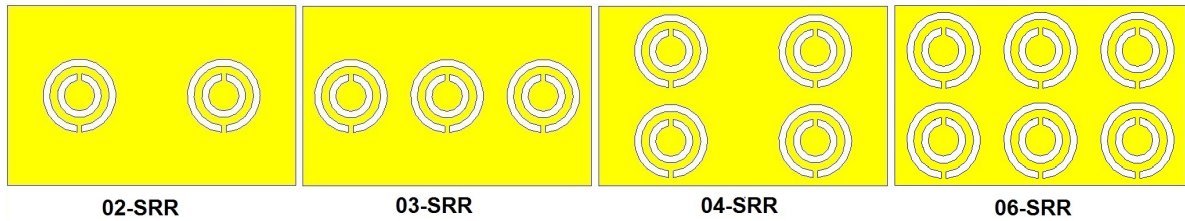


Figura 3.5: Quatro antenas com n-SRR perfurando o plano terra.

Na Figura 3.6 são apresentadas a perda de retorno das antenas, com e sem a estrutura SRR, em função da frequência. Deste resultado observa-se que, com a inserção da estrutura CSRR no plano terra, a frequência de ressonância da etiqueta RFID inicial diminui, conforme o previsto.

De acordo com os gráficos da Figura 3.6, na configuração de plano terra 02-SRR o deslocamento da frequência foi de 915 MHz para 856,6 MHz, porém sem alterar significativamente a magnitude $|S_{11}|_{dB}$. Mas verificou-se uma redução da largura de faixa para 10,8 MHz. Na configuração de plano terra 03-SRR o deslocamento da frequência foi de 915 MHz para 890,5 MHz, também sem alterar significativamente a magnitude $|S_{11}|_{dB}$. Porém, ocorreu uma redução da largura de faixa para 12,9 MHz. Já na configuração de plano terra 04-SRR o deslocamento da frequência foi de 915 MHz para 804,7 MHz, também sem alterar significativamente a magnitude $|S_{11}|_{dB}$. Porém, verificou-se uma redução da largura de faixa para 9 MHz. Por fim, na configuração de plano terra 06-SRR o deslocamento da frequência foi de 915 MHz para 868,9 MHz, sem alterar a magnitude $|S_{11}|_{dB}$, havendo uma pequena redução da largura de faixa para 12,3 MHz.

A próxima etapa foi o ajuste de alguns parâmetros geométricos da antena para sintonizá-la na frequência central da faixa do sistema RFID (915MHz), promovendo assim a miniaturização da antena, que é o objetivo principal deste trabalho.

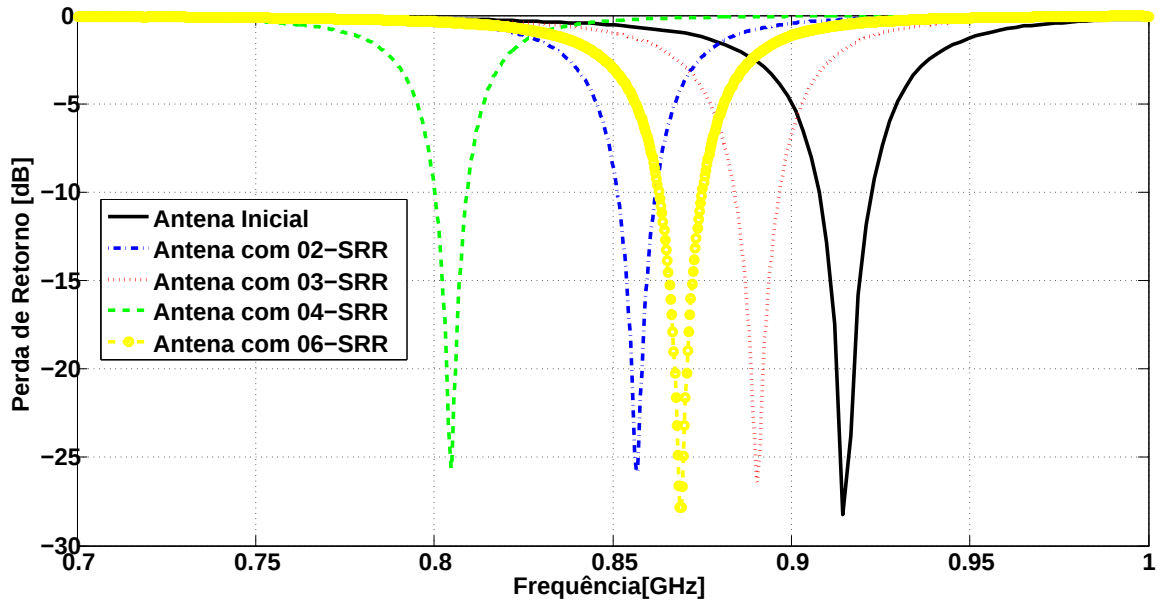


Figura 3.6: Comparação da simulação da perda de retorno entre a antena inicial e as quatro antenas com a estrutura CSRR.

Conforme observado nos gráficos das Figuras 2.5, 2.6, 2.7, 2.8 e 2.9, as dimensões da antena que mais influenciam sua frequência de ressonância são **a**, **b**, **d**, **e** e **g**, conforme ilustradas na Figura 2.2. Portanto, foi feito um novo estudo paramétrico com os parâmetros mais relevantes das antenas com as quatro configurações de plano terra 02-SRR, 03-SRR, 04-SRR e 06-SRR. Os resultados do estudo paramétrico são apresentados nas Figuras 3.7, 3.8, 3.9 e 3.10 para as configurações 02-SRR, 03-SRR, 04-SRR e 06-SRR, respectivamente. As dimensões finais da etiquetas RFID sintonizadas em 915 MHz são apresentadas nas Tabelas 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5, respectivamente.

3.3. Estudo de Caso: Etiqueta RFID Passiva com Metamaterial

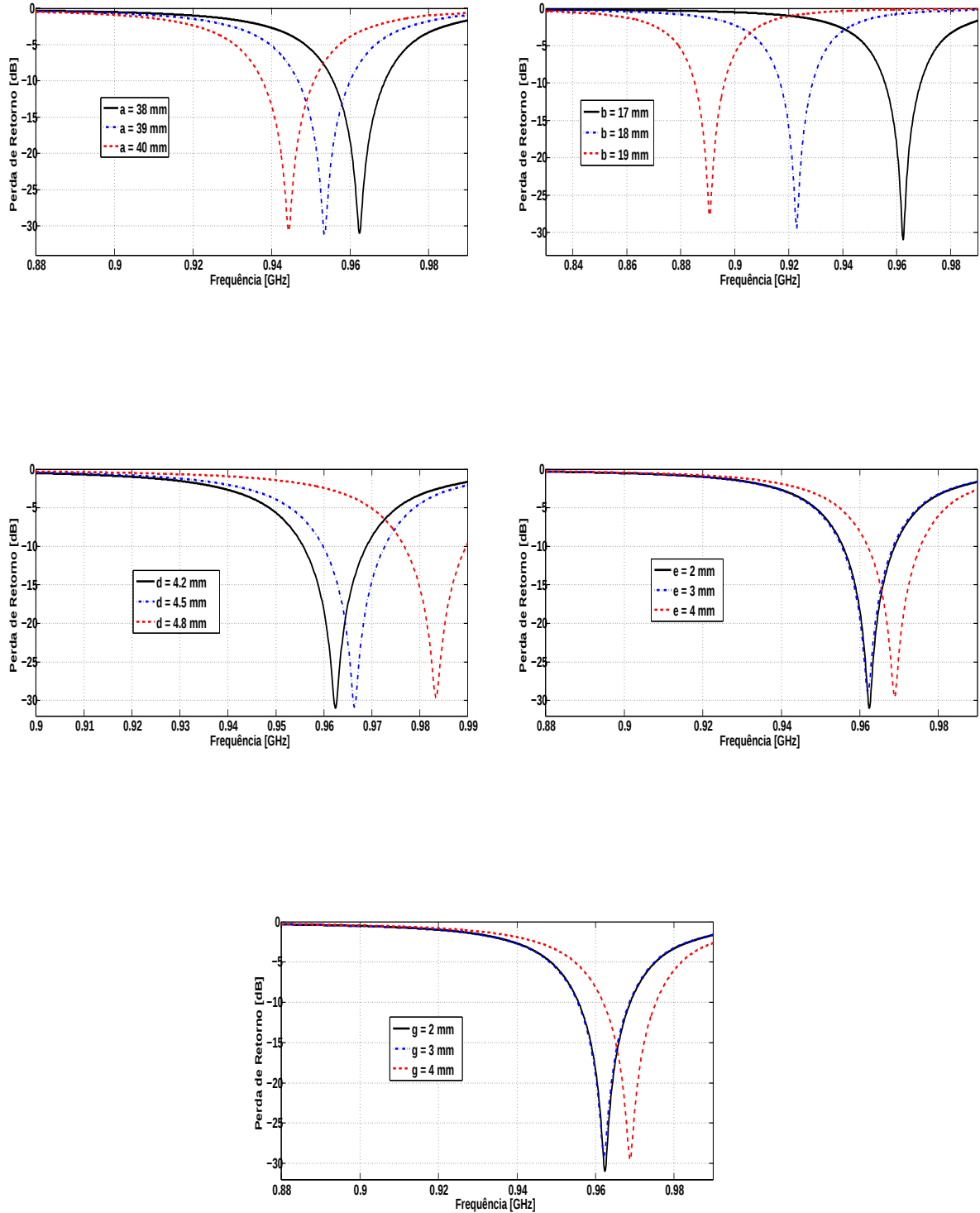


Figura 3.7: Perda de Retorno (S11) da antena com plano terra 02-SRR em função das dimensões a, b, d, e e g .

3.3. Estudo de Caso: Etiqueta RFID Passiva com Metamaterial

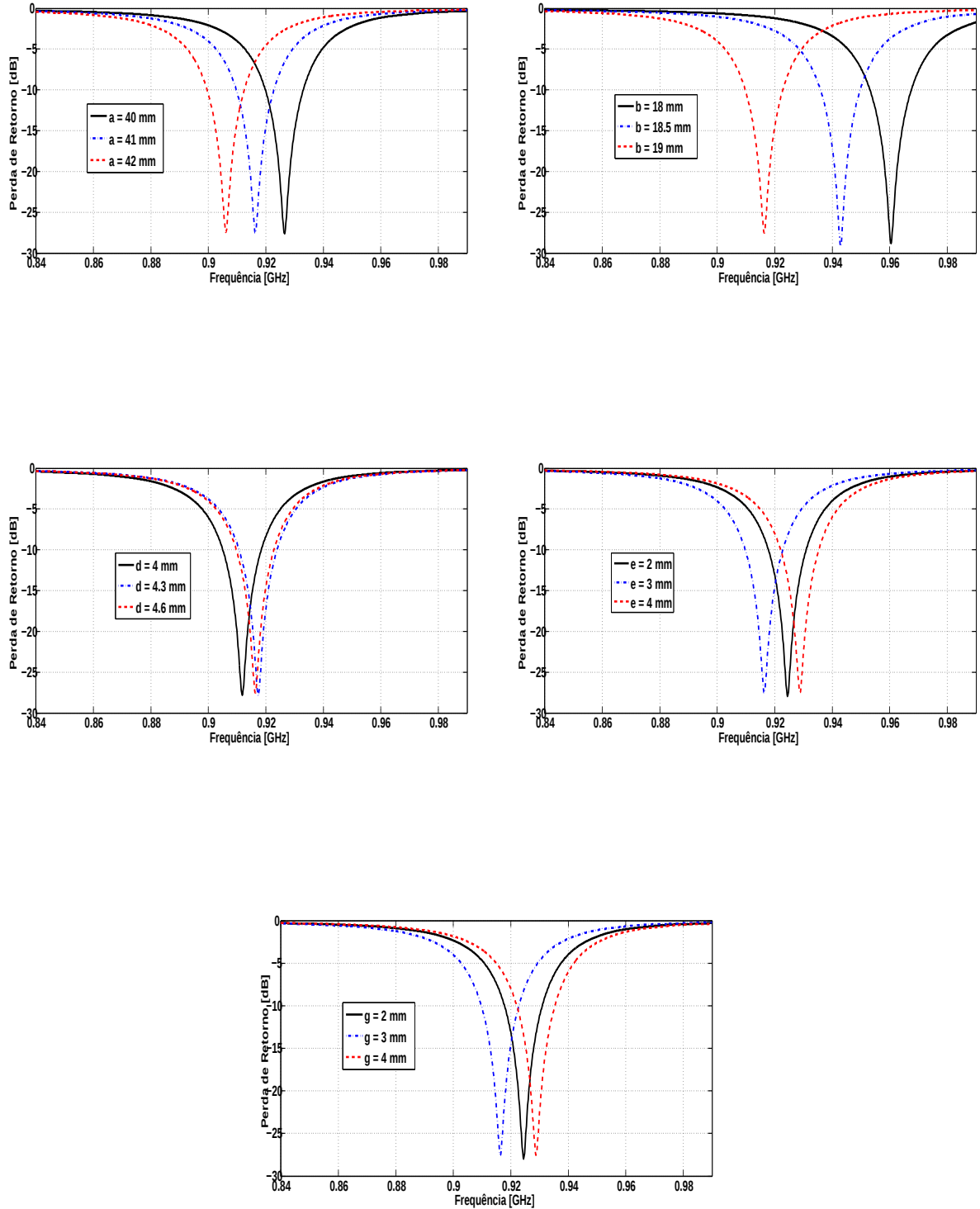


Figura 3.8: Perda de Retorno (S11) da antena com plano terra 03-SRR em função das dimensões a, b, d, e e g .

3.3. Estudo de Caso: Etiqueta RFID Passiva com Metamaterial

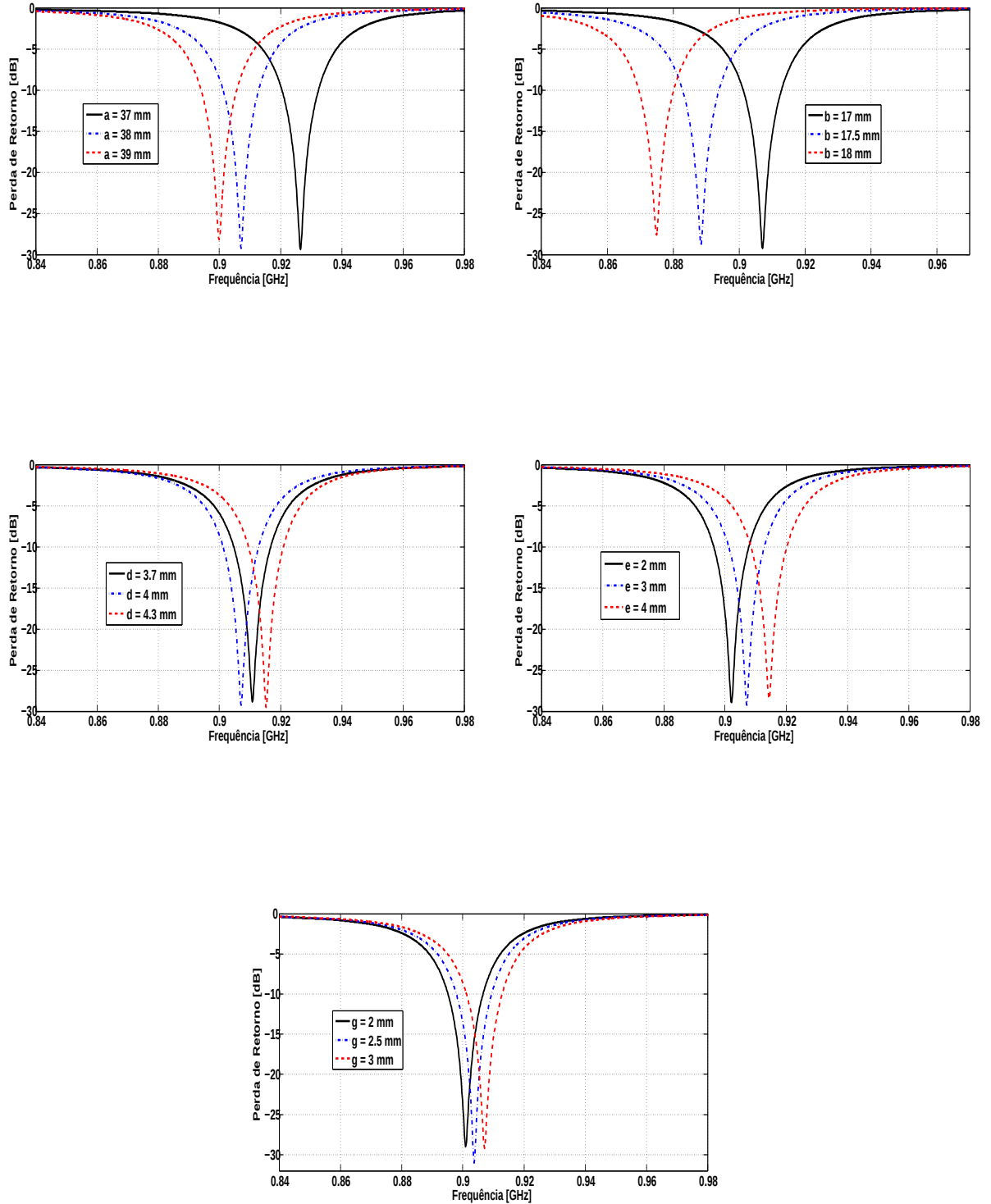


Figura 3.9: Perda de Retorno (S11) da antena com plano terra 04-SRR em função das dimensões a,b,d,e e g.

3.3. Estudo de Caso: Etiqueta RFID Passiva com Metamaterial

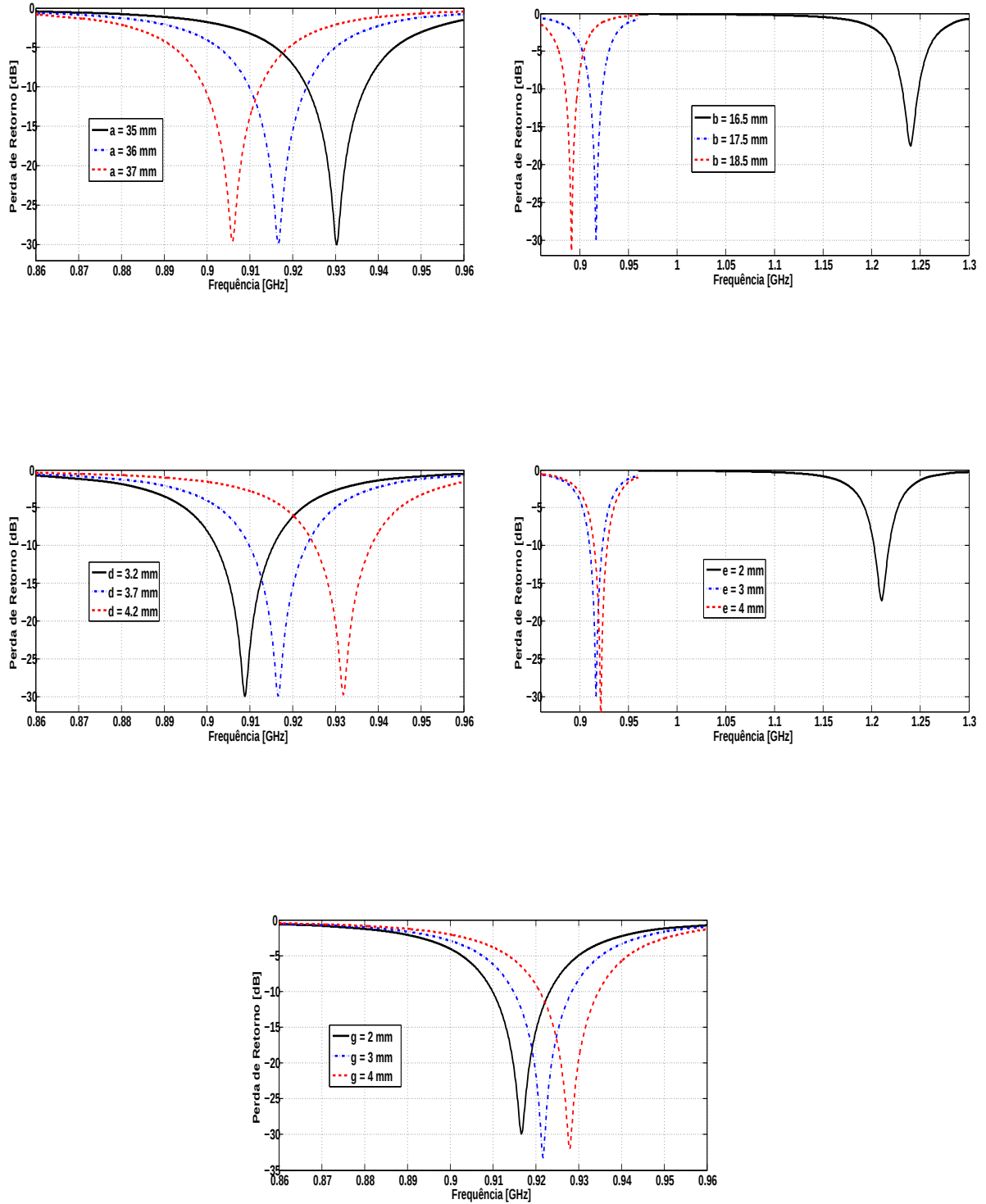


Figura 3.10: Perda de Retorno (S_{11}) da antena com plano terra 06-SRR em função das dimensões a, b, d, e e g .

3.3. Estudo de Caso: Etiqueta RFID Passiva com Metamaterial

Tabela 3.2: Dimensão dos parâmetros geométricos e elétricos da etiqueta RFID com plano terra 02-SRR.

Parâmetros	Antena 02-SRR
a	39,7 mm
b	18 mm
c	1 mm
d	4,2 mm
e	3 mm
g	2 mm
h	0,76 mm
gap	2 mm
Diretividade	1,96 dBi
Eficiência	-23,68 dB
Fator de Redução	22%
Perda de Retorno (em 915MHz)	-27 dB
Largura de Banda	12,24 MHz

Tabela 3.3: Dimensão dos parâmetros geométricos e elétricos da etiqueta RFID com plano terra 03-SRR.

Parâmetros	Antena 03-SRR
a	41,2 mm
b	19 mm
c	1 mm
d	4,6 mm
e	3 mm
g	3 mm
h	0,76 mm
gap	2 mm
Diretividade	1,93 dBi
Eficiência	-24,69 dB
Fator de Redução	12%
Perda de Retorno (em 915MHz)	-28,29 dB
Largura de Banda	13,31 MHz

Tabela 3.4: Dimensão dos parâmetros geométricos e elétricos da etiqueta RFID com plano terra 04-SRR.

Parâmetros	Antena 04-SRR
a	37,8 mm
b	17 mm
c	1 mm
d	4 mm
e	3 mm
g	3 mm
h	0,76 mm
gap	2 mm
Diretividade	2,01 dBi
Eficiência	-26,46 dB
Fator de Redução	26%
Perda de Retorno (915MHz)	-29,11 dB
Largura de Banda	11,84 MHz

A análise paramétrica das quatro antenas com CSRR demonstrou que em todos os casos estudados foi possível reduzir o tamanho da etiqueta RFID em 22%, 12% e 26% para as configurações 02-SRR, 03-SRR e 04-SRR, respectivamente. Porém, na antena com a matriz com seis SRR, a redução foi mais significativa (30% de redução). O fator de redução é calculado comparando o tamanho da etiqueta RFID com plano terra SRR com a etiqueta RFID inicial. Como os principais parâmetros elétricos (coeficiente de reflexão, eficiência e diretividade) de todas as etiquetas possuem valores bem próximos aos resultados obtidos na etiqueta inicial, optou-se por defini-la como a etiqueta RFID final (ver Figura 3.11) deste trabalho. As dimensões da etiqueta RFID final seguem listadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Dimensão dos parâmetros geométricos e elétricos da etiqueta RFID com plano terra 06-SRR (etiqueta RFID final).

Parâmetros	Antena 06-SRR
a	36,5 mm
b	17,5 mm
c	1 mm
d	3,7 mm
e	3 mm
g	2 mm
h	0,76 mm
gap	2 mm
Diretividade	1,92 dBi
Eficiência	-26,46 dB
Fator de Redução	30%
Perda de Retorno (915MHz)	-31,12 dB
Largura de Banda	13 MHz

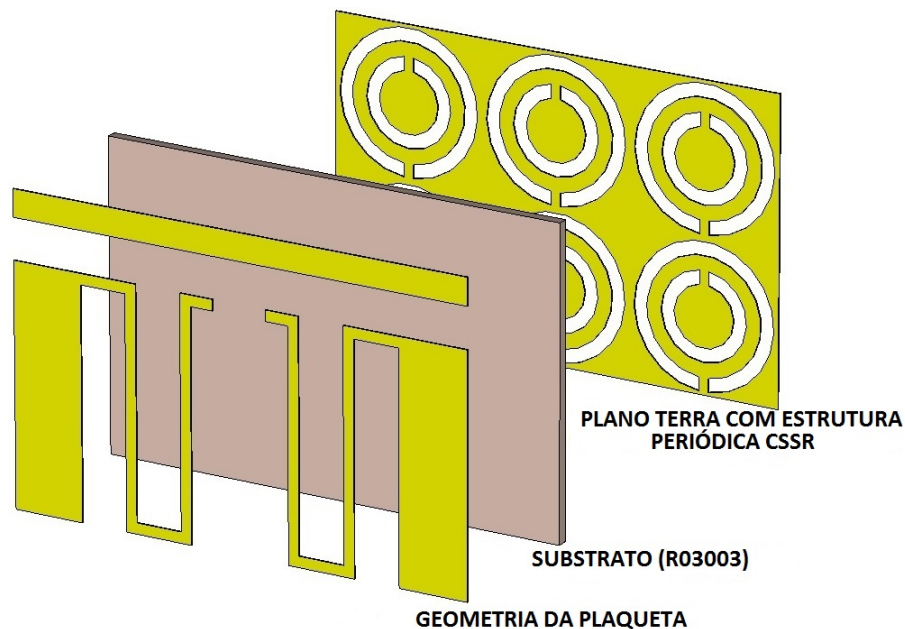


Figura 3.11: Estrutura etiqueta RFID final: duas faces metálicas (plaqueta e plano Terra) e um substrato dielétrico no meio.

A Figura 3.12 ilustra a perda de retorno da etiqueta RFID final (etiqueta RFID com plano terra 06-SRR). Pode-se observar que o coeficiente de reflexão é mínimo em 915 MHz com o valor de -26,58 dB. A largura de faixa ($|S_{11}|$ inferior a -10 dB) é de cerca de 13 MHz.

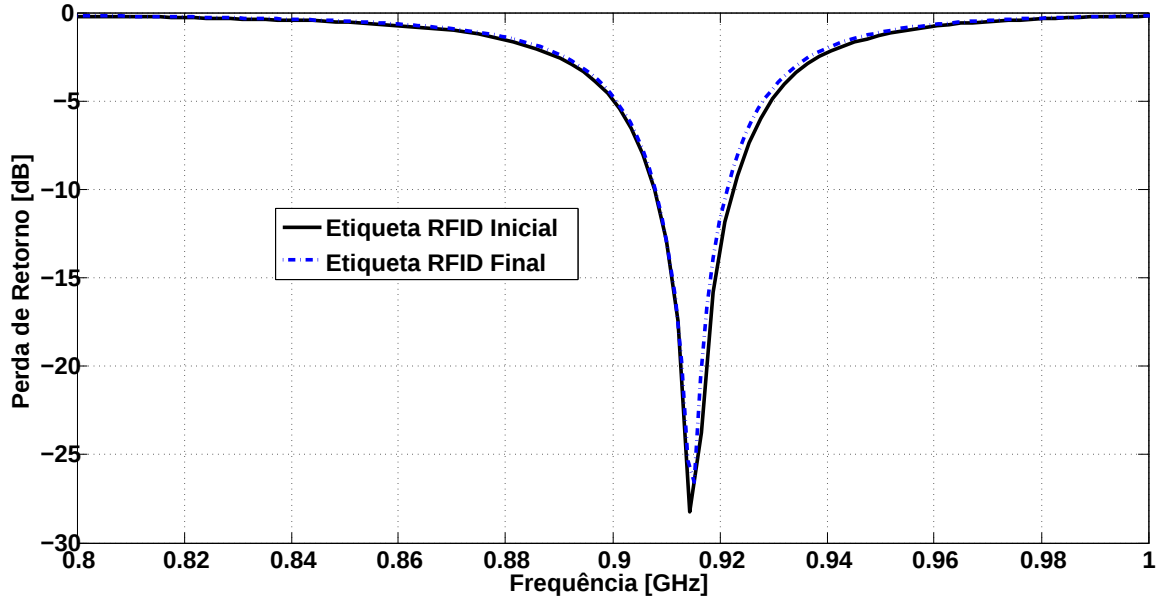


Figura 3.12: Comparação da simulação da perda de retorno entre a etiqueta RFID final e a etiqueta RFID inicial.

A Figura 3.13 ilustra que a impedância de entrada da etiqueta é de $Z = 13.89 + j0.614 \Omega$. Portanto, foi possível obter um bom casamento de impedâncias entre a antena impressa e *chip*.

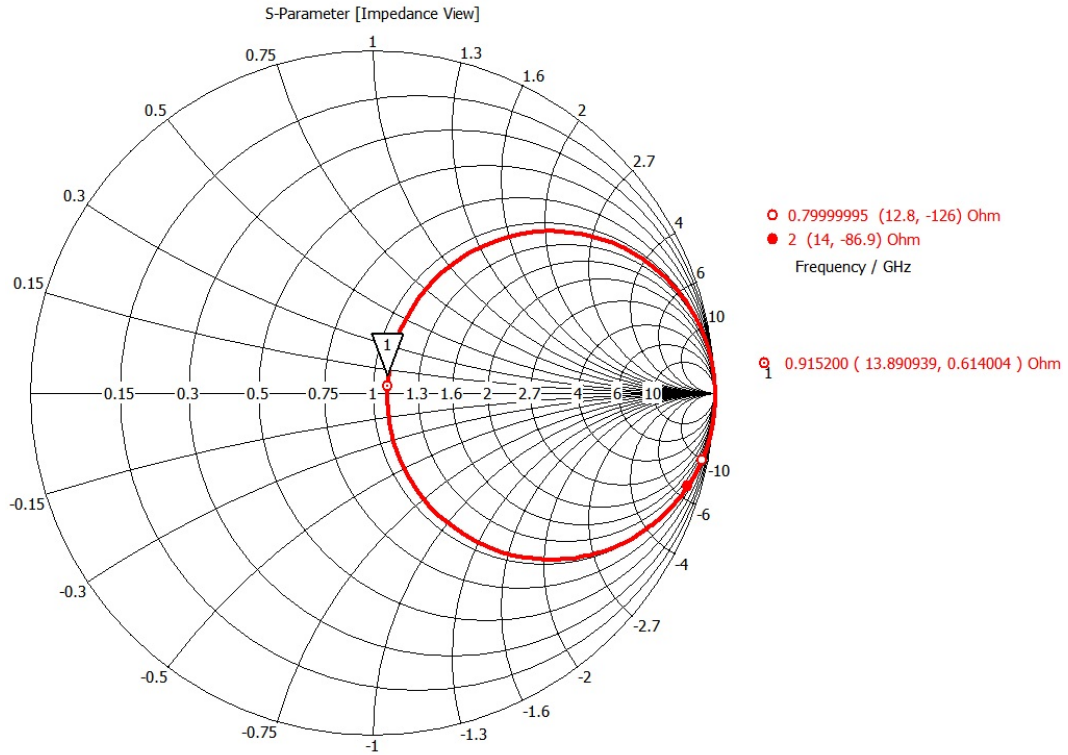


Figura 3.13: Impedância de entrada da Etiqueta RFID Final.

As Figuras 3.14 e 3.15 mostram que a diretividade da etiqueta RFID final é de 1,92 dBi. A eficiência de radiação total é de -31,12 dB. Lembrando que a diretividade da etiqueta RFID inicial foi de 2,19 dBi e a eficiência de radiação total foi de -22,06 dB.

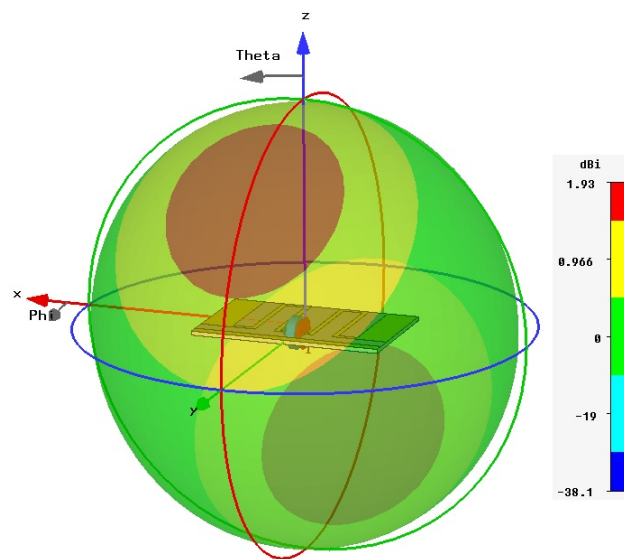


Figura 3.14: Diagrama de Radiação 3D da etiqueta RFID final.

3.3. Estudo de Caso: Etiqueta RFID Passiva com Metamaterial

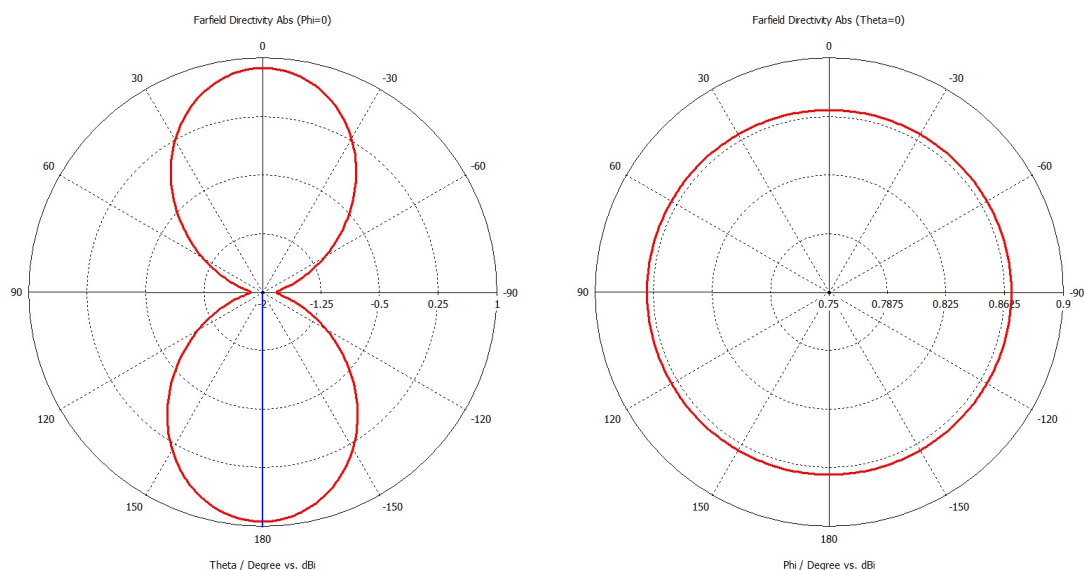


Figura 3.15: Representação polar do diagrama de radiação da etiqueta RFID final no plano E e H.

Após este estudo de caso, apenas para efeito de comparação, foi montada a Tabela 3.6 com os principais parâmetros elétricos das etiqueta RFID inicial e a etiqueta RFID final. Pode-se verificar que é a inserção da estrutura metamaterial não melhorou os principais parâmetros elétricos (perda de retorno, diretividade, eficiência e largura de faixa) da etiqueta RFID, influenciou significativamente apenas na redução do tamanho da etiqueta RFID.

Tabela 3.6: Parâmetros elétricos das etiqueta RFID inicial e a etiqueta RFID final.

Parâmetros elétricos	Etiqueta RFID inicial	Etiqueta RFID final
Diretividade	2,19 dBi	1,92 dBi
Eficiência	-22,06 dB	-26,46 dB
Fator de Redução	-	30%
Perda de Retorno (915MHz)	-28,25 dB	-31,12 dB
Largura de Banda	14,7 MHz	13 MHz

Ao final dos estudos de caso da etiqueta RFID passiva (Capítulo 2) e etiqueta RFID passiva com metamaterial optou-se por construir as chamadas etiqueta RFID inicial e etiqueta RFID final. Todo processo de construção e medição dos protótipos são descritos com detalhes no próximo capítulo.

3.4 Análise de Aplicabilidade

As etiquetas RFID podem ser fixadas sobre diferentes objetos e com materiais de diferentes características elétricas. Neste trabalho, houve o cuidado em se analisar, através de simulação, a etiqueta RFID inicial (sem estrutura metamaterial) e a etiqueta RFID final (plano terra com 06-SRR) ambas alocadas sobre quatro placas de diferentes materiais (plástico, metal, papel e vidro). Em todas essas análises as dimensões das placas possuem a mesma dimensão 100 x 100 mm e com espessura de 0.35 mm.

A Figura 3.16 mostra a simulação da perda de retorno entre as etiquetas RFID em espaço livre e etiquetas RFID montadas sobre uma placa de alumínio. Já a Figura 3.17 apresenta uma comparação da perda de retorno entre etiquetas RFID em espaço livre e etiquetas RFID montadas sobre uma placa de vidro. A Figura 3.18, por sua vez, mostra uma comparação da perda de retorno entre etiquetas RFID em espaço livre e montadas sobre uma placa de papel. Na Figura 3.19 uma comparação da perda de retorno entre etiquetas RFID em espaço livre e antenas montadas sobre uma placa de plástico é apresentada. Notou-se que quando as etiquetas RFID foram montadas sobre superfícies metálicas e de vidro, um deslocamento acima de 7 MHz na frequência de ressonância foi observado. No entanto, o deslocamento de frequência mais significativo, foi na etiqueta RFID montada sobre a placa de alumínio, conforme esperado. Nas etiquetas RFID sobre placa de plástico houve um deslocamento máximo de 4 MHz na frequência de ressonância. Por fim, quando as etiquetas RFID foram montadas na superfície de papel, o deslocamento da frequência de ressonância foi insignificante.

Desta análise observa-se que quando as etiquetas RFID são postas sobre as diferentes placas, a frequência de ressonância aumenta, mas ainda dentro da faixa de frequência de 902 a 928 MHz. Exceto pela etiqueta RFID final sobre a placa de metal, que a frequência de ressonância aumentou para 1,03 GHz, acima da faixa de interesse. Por isso recomenda-se que etiqueta RFID final não seja aplicada sobre objetos metálicos.

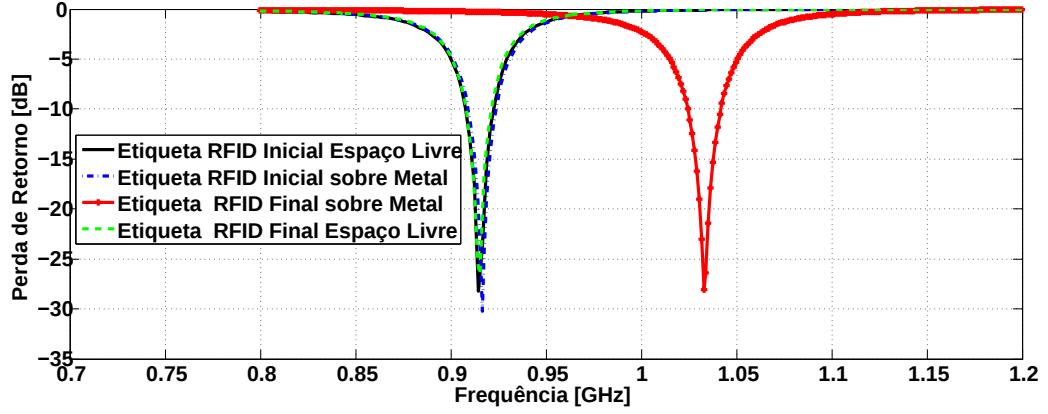


Figura 3.16: Perda de Retorno (S11) das etiqueta RFID inicial e a etiqueta RFID final no espaço livre e sobre a placa de alumínio ($\sigma = 3.56e7$) de 100 x 100 mm e com espessura de 0.35 mm.

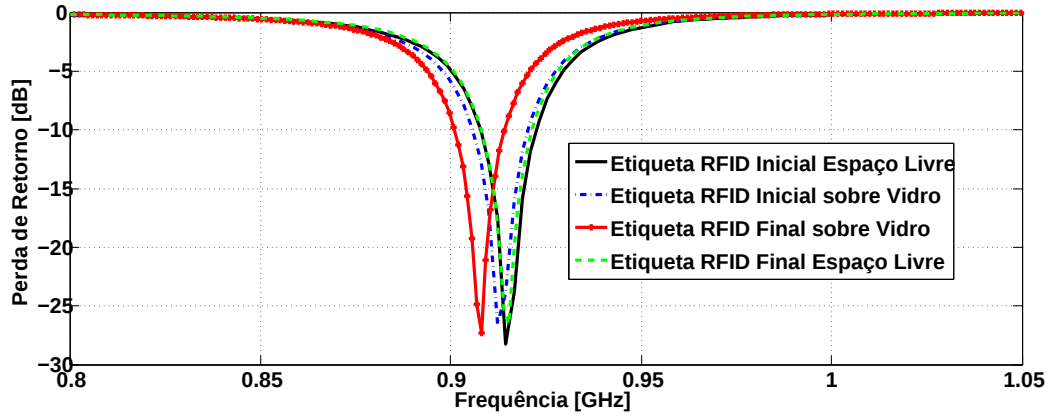


Figura 3.17: Perda de Retorno (S11) das etiqueta RFID inicial e a etiqueta RFID final no espaço livre e sobre a placa de vidro ($\epsilon_r = 4,82$) de 100 x 100 mm e com espessura de 0.35 mm.

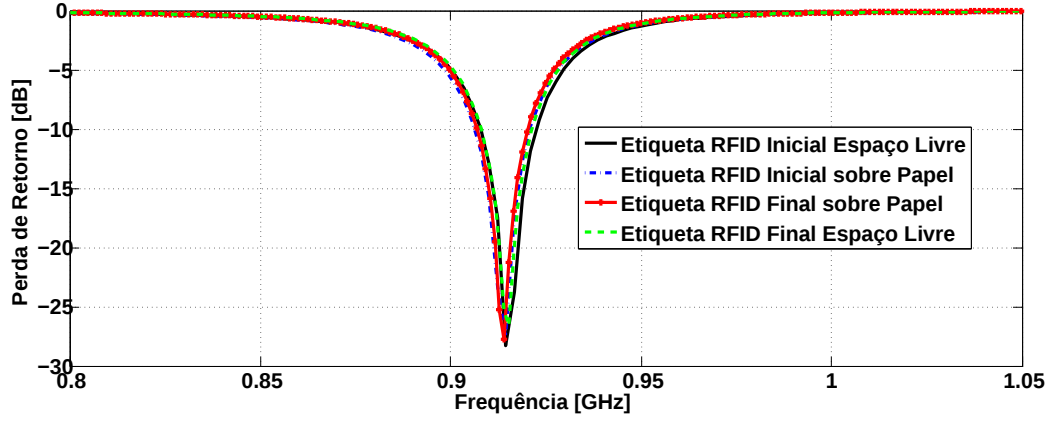


Figura 3.18: Perda de Retorno (S11) das etiqueta RFID inicial e a etiqueta RFID final no espaço livre e sobre a placa de papel ($\epsilon_r = 2,31$) de 100 x 100 mm e com espessura de 0.35 mm.

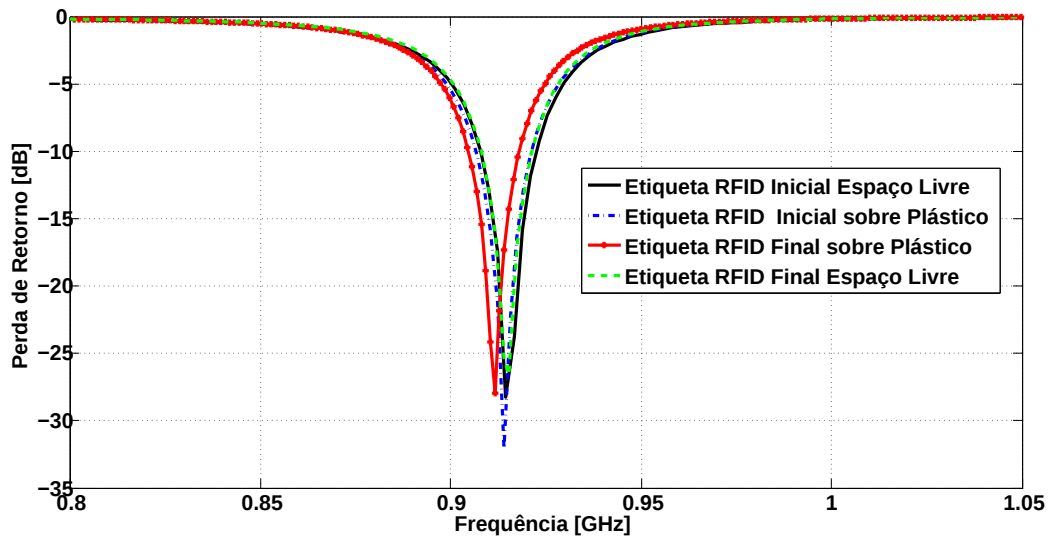


Figura 3.19: Perda de Retorno (S11) das etiqueta RFID inicial e a etiqueta RFID final no espaço livre e sobre a placa de plástico ($\epsilon_r = 3,6$) de 100 x 100 mm e com espessura de 0.35 mm.

3.5 Análise da Eficiência com Novos Substratos

Os resultados da simulação mostram que a etiqueta RFID inicial e a etiqueta RFID final possuem eficiência de -22,06 dB e -31,12 dB, respectivamente. Resultado esperado, devido a vários fatores como tamanho exíguo das antenas, impedância do chip, MLA e a inserção da estrutura metamaterial. Sabe-se que a eficiência da etiqueta RFID influencia no desempenho do sistema RFID e as etiquetas com valores maiores de eficiência irão atingir um alcance de leitura maior.

De acordo com a teoria sobre antenas impressas suas eficiências estão diretamente associadas ao substrato. Por isso, é possível aumentar a eficiência de uma antena impressa optando por um substrato com maior espessura do substrato (h) ou por um substrato com menor valor de permissividade elétrica relativa (ϵ_r).

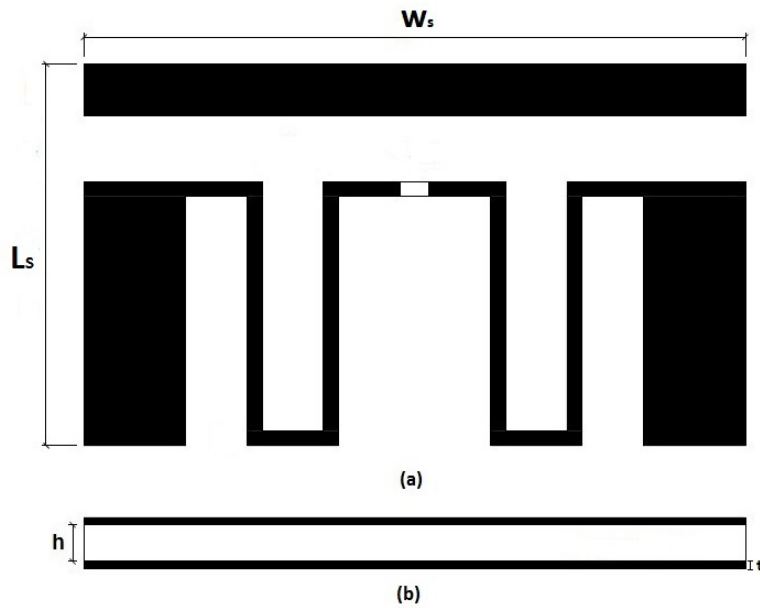


Figura 3.20: Configuração da etiqueta RFID na vista (a) de topo e (b) lateral.

Neste trabalho, optamos por construir os protótipos com o substrato RO3003, com as especificações descritas na Tabela 2.1. Os protótipos construídos são justamente a etiqueta RFID inicial e a etiqueta RFID final, definidas nos capítulos anteriores. Mas como o *software* de simulação (CST MWS) nos permite fazer outras análises com diferentes opções de substratos, fizemos outras simulações utilizando a mesma geometria da Figura 3.20, para duas outras etiquetas RFID, sendo uma com plano terra inteiro (etiqueta

convencional) e outra plano terra com 06-SRR, sobre dois novos substratos. Um deles é RO3003, porém agora com a espessura do substrato (h) de 1,52 mm e espessura do cobre (t) de 0.035 mm, tamanho padrão do fabricante. E o outro substrato é RT5880 ($\epsilon_r = 2,2$), com $h=0,787$ mm e $t = 0.0175$ mm. O objetivo desta análise é avaliar através de simulações se ocorre o aumento da eficiência das antenas impressas com os novos substratos.

Nesta análise os principais parâmetros elétricos das etiqueta RFID convencional e a etiqueta RFID com plano terra 06-SRR são verificados e comparados, e os resultados destas análises estão descritos nas Tabelas 3.7 e 3.8.

Tabela 3.7: Dimensão dos parâmetros geométricos e elétricos das etiquetas RFID o Substrato RO3003.

Etiquetas	Etiqueta convencional	Etiqueta com plano terra 06-SRR
Parâmetros	Ws x Ls x ($h+2*t$)	Ws x Ls x ($h+2*t$)
Dimensão final [mm]	46 x 27 x 1,555	40,9 x 24,5 x 1,555
Eficiência [dB]	-20,19	-22,79
Diretividade [dBi]	2,10	1,99
Perda de Retorno (915MHz) [dB]	-26,90	-30,63
Impedância de Entrada (915 MHz)	13,52 -j0,011 Ω	13,57 +j0,0038 Ω
Largura de Banda [MHz]	14,882	13,62
ϵ_r	3	3
Espessura do Substrato [mm]	1,52	1,52

Tabela 3.8: Dimensão dos parâmetros geométricos e elétricos das etiquetas RFID com o Substrato RT5880.

Etiquetas	Etiqueta convencional	Etiqueta com plano terra 06-SRR
Parâmetros	Ws x Ls x ($h+2*t$)	Ws x Ls x ($h+2*t$)
Dimensão final [mm]	46 x 27 x 0,857	42,5 x 25 x 0,857
Eficiência [dB]	-22,19	-25,82
Diretividade [dBi]	2,03	1,94
Perda de Retorno (915MHz) [dB]	-29,69	-32,48
Impedância de Entrada (915 MHz)	13,86 +j0,062 Ω	13,42 +j0,005 Ω
Largura de Banda [MHz]	15,327	14,12
ϵ_r	2,2	2,2
Espessura do Substrato [mm]	0,76	0,76

Diante dos resultados descritos nas Tabelas 3.7 e 3.8, pode-se concluir que foi possível aumentar a eficiência das etiquetas RFID com os novos substratos porém, verificou-se um aumento no tamanho físico das antenas.

Capítulo 4

MEDIDAS

O intuito das medições é validar resultados obtidos nas simulações. Para isso foi necessária a construção das etiquetas RFID com o substrato RO3003. Foi utilizada a prototipadora a Laser da marca LPKF, no laboratório de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora. As Figuras 4.1 e 4.2, ilustram os protótipos construídos.

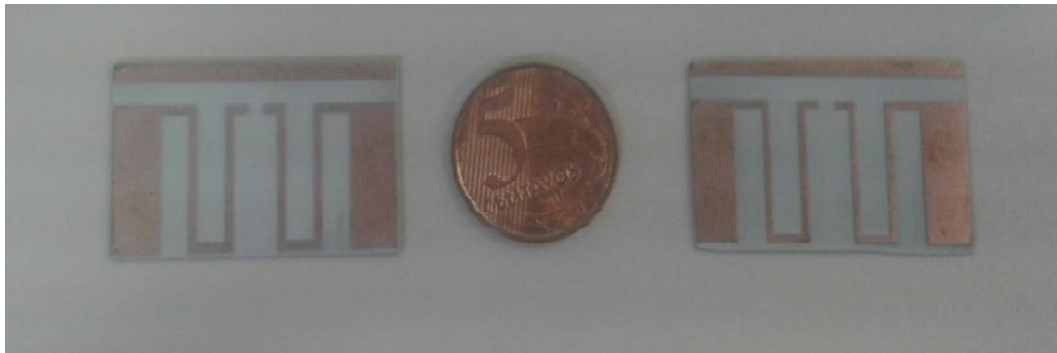


Figura 4.1: Protótipos das etiquetas RFID inicial e final, vista superior (plaqueta).



Figura 4.2: Protótipos das etiquetas RFID inicial e final, vista inferior (plano terra).

Obter os resultados do Parâmetros S com uma boa precisão não é trivial. As antenas impressas foram medidas em um sistema com impedância de referência de $50\ \Omega$, que não se aplica às etiquetas RFID, devido ao *chip* ter uma impedância de entrada altamente capacitiva.

A medição da perda de retorno foi realizada utilizando um VNA (*Vector Network Analyzer*) da Rohde Schwarz ZVL e um *Jig*, como ilustrado na Figura 4.3.

Devido à geometria simétrica, a etiqueta RFID não pôde ser medida diretamente no VNA. Isso ocorreu porque os pontos de alimentação da etiqueta RFID devem ser conduzidos por igual em ambos os lados. O *Jig* utilizado para a medição consiste em dois cabos coaxiais semi-rígidos cujos condutores externos são unidos entre si. Os condutores internos foram soldados aos pontos de alimentação da etiqueta RFID e às portas do *Jig* que foram conectadas ao VNA. O *Jig* foi terminado por dois conectores SMA (Subminiatura Versão A) Macho [Koskinen and Rahmat-Samii, 2009].

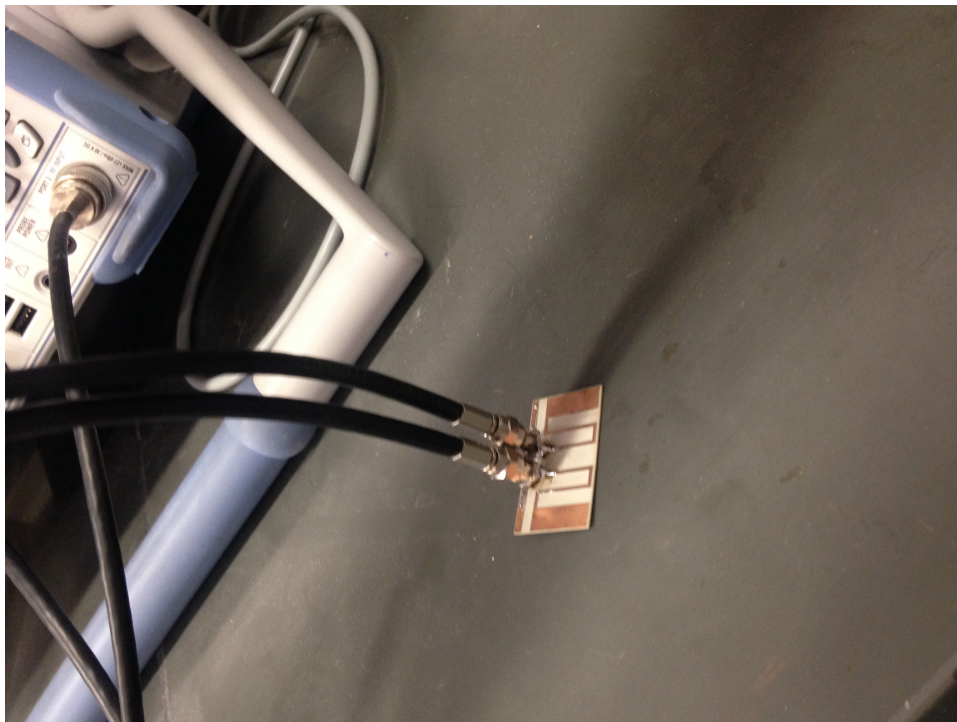


Figura 4.3: Setup de medições.

As Figuras 4.4 e 4.5 ilustram a perda de retorno das etiquetas RFID medidas em comparação com os resultados simulados e em função da frequência. Na comparação dos gráficos da perda de retorno, nota-se que ocorreu um deslocamento da frequência de ressonância, provavelmente devido ao processo de construção, que alterou as dimensões

dos protótipos, o *setup* de medições não ter sido em um ambiente eletromagneticamente controlado, um rigor maior na implementação do *jig* e as soldas nos conectores.

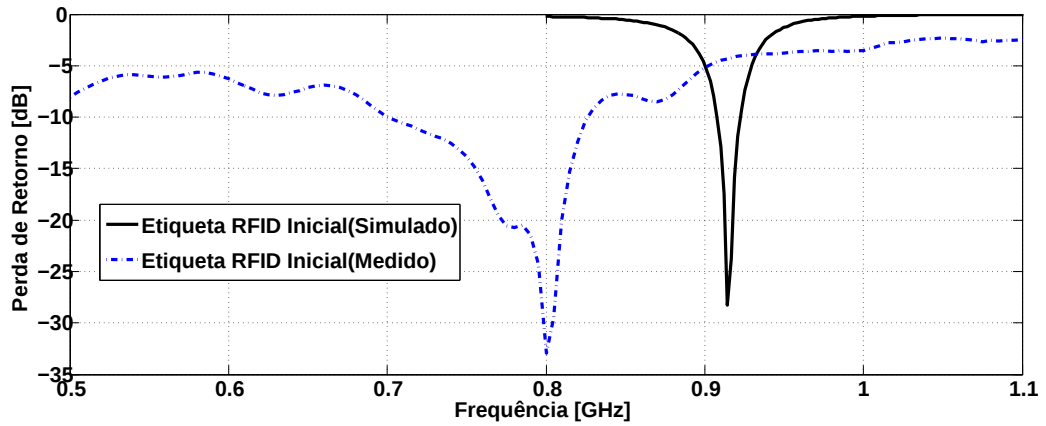


Figura 4.4: Comparação entre os resultados simulados e medidos da perda de retorno da etiqueta RFID inicial.

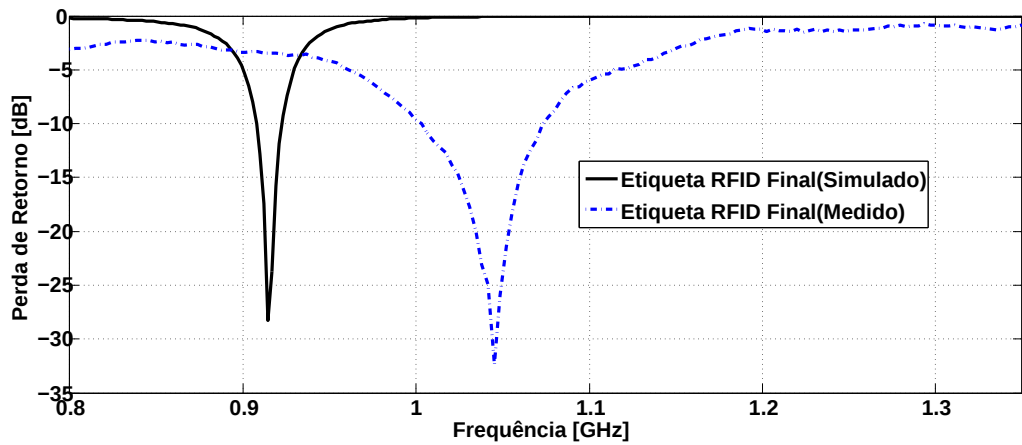


Figura 4.5: Comparação entre os resultados simulados e medidos da perda de retorno da etiqueta RFID final.

Capítulo 5

CONCLUSÕES

5.1 Considerações finais

Inicialmente neste trabalho, foi realizada uma análise do comportamento eletromagnético de uma etiqueta passiva RFID com geometria da plaqueta (*patch*) que consiste de uma microstrip dobrado (*Meander-Line Antennas* - MLA) e uma plaqueta retangular (*Microstrip patch*).

Em todas as simulações, o *layout* da antena e os parâmetros eletromagnéticos (perda de retorno e diagrama de radiação) foram simulados no *software* CST MWS. As simulações das antenas foram feitas com uma análise de convergência da malha, onde a malha de simulação foi discretizada. E ainda foi necessária a síntese dos parâmetros da antena, para que a antena ficasse em sintonia com a frequência de ressonância pretendida (915 MHz).

Em seguida a estrutura metamaterial, formada por uma matriz *Split-Ring Resonators* (SRR) foi incluída, perfurando o plano terra da antena e seu comportamento eletromagnético foi avaliado. Para avaliar o desempenho da estrutura metamaterial aplicada ao plano terra de forma mais completa, utilizamos quatro configurações diferentes de matrizes SRRs. O intuito foi determinar que a aplicabilidade da estrutura metamaterial em antenas impressas permite a compacticidade da mesma, favorecendo o desenvolvimento de antenas de baixo custo, exíguas e intensificando a compatibilidade com circuitos integrados, características pertinentes para o projeto de uma etiqueta RFID. Comprovou-se que a inserção da estrutura metamaterial *Split-Ring Resonators*, permite a minituarização da antena, visto que surgiram frequências de ressonância inferiores à frequência de operação.

Em seguida, foram ajustadas as dimensões da antena, para sintonizá-la a antena na frequência pretendida (915 MHz), promovendo assim a miniaturização da antena. Em todos os casos de etiquetas RFID com configuração de plano terra (02-SRR, 03-SRR, 04-SRR e 06-SRR), foi possível reduzir o tamanho da etiqueta RFID em 22%, 12%, 26% e 30%, respectivamente. Como na antena impressa com a matriz com 06-SRR, a redução foi mais significativa (30%), definiu-se esta como a etiqueta RFID final.

Uma análise de aplicabilidade foi verificada, através de simulação, com intuito de examinar as características eletromagnéticas das etiqueta RFID inicial e a etiqueta RFID final, alocadas sobre quatro placas de diferentes materiais (plástico, metal, papel e vidro). Observou-se que quando as etiquetas RFID são postas sobre as diferentes placas, a frequência de ressonância aumenta, mas ainda dentro da faixa de frequência de interesse. Exceto pela etiqueta RFID final sobre a placa de metal, que a frequência de ressonância aumentou para acima da faixa de interesse (902 a 928 MHz). Por isso recomenda-se que etiqueta RFID final não seja aplicada sobre objetos metálicos.

Como os resultados das simulações mostraram que as etiqueta RFID inicial e a etiqueta RFID final possuem baixa eficiência, e como a eficiência da antena está diretamente associada ao substrato, optou-se fazer simulações com dois outros substratos. Os resultados mostraram, que foi possível aumentar a eficiência das etiquetas com os novos substratos porém, verificou-se um aumento no tamanho físico das antenas.

A contribuição, portanto, deste trabalho foi desenvolvimento de uma etiqueta passiva RFID empregando uma técnica de miniaturização, onde foi possível reduzir o tamanho da antena, sem comprometer consideravelmente os principais parâmetros elétricos da antena (diretividade, perda de retorno e largura de faixa).

5.2 Trabalhos Futuros

Como propostas de continuidade deste trabalho, para novas investigações que podem ser realizadas com base nessa mesma geometria de plaqueta, podem ser citadas:

- Investigar o comportamento das etiquetas RFID com outras geometrias da célula SRR;
- Uma modelagem matemática através de uma análise equivalente de circuitos;

- Um trabalho de medição mais completo, podendo verificar experimentalmente toda análise de aplicabilidade e testes da etiqueta RFID em outros ambientes eletromagneticamente controlados;
- Estudo dos efeitos eletromagnéticos do uso de um encapsulamento dielétrico sobre a etiqueta RFID.

5.3 Trabalhos Publicados

João P.S. Dias and Fernando J.S. Moreira and Glaucio L. Ramos.” Compact Microstrip UHF-RFID Tag Antenna on Metamaterial Loaded with Complementary Split-Ring Resonators”. *2017 International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 2017)*, Aguas de Lindoia, São Paulo, Brazil

Referências Bibliográficas

- [Balanis, 2016] Balanis, C. A. (2016). Antenna theory: analysis and design. John Wiley & Sons.
- [Barbin et al., 2015] Barbin, M. V. et al. (2015). Etiqueta de rfid em uhf para objetos metálicos. Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas.
- [Barros, 2012] Barros, V. F. d. (2012). Estudo do efeito de substratos metamateriais em parâmetros de antenas de microfita. Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- [Colburn and Rahmat-Samii, 1999] Colburn, J. S. and Rahmat-Samii, Y. (1999). Patch antennas on externally perforated high dielectric constant substrates. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 47(12):1785–1794.
- [cstmws, 2017] cstmws (2017). cstmws. <https://www.cst.com/products/cstmws>.
- [de Castro Alves et al., 2015] de Castro Alves, A. A. et al. (2015). Concepção de uma nova etiqueta opticamente reconfigurável e projeto de um amplificador de baixo ruído para sistemas rfid= a new optically reconfigurable tag conception and a low noise amplifier design for rfid systems. Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas.
- [Embarcados, 2017] Embarcados (2017). Introducao a tecnologia de identificacao rfid. <https://www.embarcados.com.br/introducao-a-tecnologia-de-identificacao-rfid/>.
- [EPC, 2010] EPC (2010). Epcâ,, radio-frequency identity protocols generation-2 uhf rfid specification for rfid air interface protocol for communications at 860 mhz â“ 960 mhz, version 2.0.0 ratified, nov. 2013. <https://www.gs1.org/sites/default/files/docs/epc/uhfclg2120-standard-20080511.pdf>.

- [Faudzi et al., 2014a] Faudzi, N., Ali, M., Ismail, I., Jumaat, H., and Sukaimi, N. (2014a). Compact microstrip patch uhf-rfid tag antenna for metal object. In Wireless Technology and Applications (ISWTA), 2014 IEEE Symposium on, pages 160–164. IEEE.
- [Faudzi et al., 2014b] Faudzi, N., Ali, M., Ismail, I., Jumaat, H., and Sukaimi, N. (2014b). Metal mountable uhf-rfid tag antenna with meander feed line and double t-match. pages 33–38.
- [Finkenzeller, 2010] Finkenzeller, K. (2010). RFID handbook: fundamentals and applications in contactless smart cards, radio frequency identification and near-field communication. John Wiley & Sons.
- [Finkenzeller and Müller, 2010] Finkenzeller, K. and Müller, D. (2010). RFID handbook: fundamentals and applications in contactless smart cards, radio frequency identification and near-field communication. Wiley-Blackwell.
- [ISOIEC, 2010] ISOIEC (2010). Iso/iec 180006:2010 information technology radio frequency identification for item management“ part 6: Parameter for air interface communications at 860 mhz to 960 mhz. <https://www.iso.org/standard/46149.html>.
- [Koskinen and Rahmat-Samii, 2009] Koskinen, T. and Rahmat-Samii, Y. (2009). Metal-mountable microstrip rfid tag antenna for high impedance microchip. In Antennas and Propagation, 2009. EuCAP 2009. 3rd European Conference on, pages 2791–2795. IEEE.
- [Kumar and Ray, 2003] Kumar, G. and Ray, K. (2003). Broadband microstrip antennas. Artech House.
- [Lee and Hao, 2008] Lee, Y. and Hao, Y. (2008). Characterization of microstrip patch antennas on metamaterial substrates loaded with complementary split-ring resonators. Microwave and Optical Technology Letters, 50(8):2131–2135.
- [Lee et al., 2007] Lee, Y., Tse, S., Hao, Y., and Parini, C. G. (2007). A compact microstrip antenna with improved bandwidth using complementary split-ring resonator (csrr) loading. In Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007 IEEE, pages 5431–5434. IEEE.
- [Marrocco, 2003] Marrocco, G. (2003). Gain-optimized self-resonant meander line antennas for rfid applications. IEEE Antennas and Wireless propagation letters, 2(1):302–305.
- [Marrocco, 2008] Marrocco, G. (2008). The art of uhf rfid antenna design: Impedance-matching and size-reduction techniques. IEEE antennas and propagation magazine, 50(1).

- [Montalvão, 2010] Montalvão, A. C. P. d. S. (2010). Caracterização numérica de antenas para aplicações rfid utilizando o método das ondas-wcip. Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- [Montalvão, 2016] Montalvão, A. C. P. d. S. (2016). Estudo da conversão de polarização linear-circular em antenas dual-band para leitores RFID portáteis usando metasuperfícies miniaturizadas. PhD thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- [Moya Baquero et al., 2016] Moya Baquero, J. S. et al. (2016). Etiqueta RFID miniaturizada de baixa potência para identificação de objetos. PhD thesis, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [Neto, 2014] Neto, M. S. (2014). Um estudo de metamaterial em antenas de microfita. PhD thesis, Tese de Doutorado, UFRN, Natal-RN, Brasil.
- [Ngai et al., 2008] Ngai, E., Moon, K. K., Riggins, F. J., and Candace, Y. Y. (2008). Rfid research: An academic literature review (1995–2005) and future research directions. International Journal of Production Economics, 112(2):510–520.
- [NXP Semiconductor, 2016] NXP Semiconductor (2016). SL3S1204 nxp semiconductor. http://www.nxp.com/documents/data_sheet/SL3S1204.pdf.
- [Pozar and Schaubert, 1995] Pozar, D. M. and Schaubert, D. H. (1995). Microstrip antennas: the analysis and design of microstrip antennas and arrays. John Wiley & Sons.
- [Rao et al., 2005] Rao, K. S., Nikitin, P. V., and Lam, S. F. (2005). Antenna design for uhf rfid tags: A review and a practical application. IEEE Transactions on antennas and propagation, 53(12):3870–3876.
- [Rengifo et al., 2016] Rengifo, G. E. Z. et al. (2016). Miniaturização de antenas microstrip para aplicações rfid. Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas.
- [RO3003, 2017] RO3003 (2017). Ro3003. <https://www.rogerscorp.com/documents/722/acs/RO3000-Laminate-Data-Sheet-RO3003-RO3006-RO3010.pdf>.
- [Silva et al., 2014] Silva, I. B. T. d. et al. (2014). Projeto e análise de antena de microfita com utilização de metamaterial do tipo csrr. Master's thesis, Universidade Federal Rural do Semi-Árido.

- [Silva et al., 2015] Silva, J. L. d. et al. (2015). Estudo do comportamento de antena de microfitas com substrato metamaterial. Master's thesis, Universidade Federal Rural do Semi-Árido.
- [Sousa Neto, 2016] Sousa Neto, J. A. R. d. (2016). Teste, projeto e verificação funcional de uma tag de RFID de 13, 56 MHz. PhD thesis, Universidade de Brasília, Faculdade UnB Gama, Brasília.
- [Sousa Neto, 2014] Sousa Neto, M. P. d. (2014). Um estudo de metamaterial em antenas de microfitas. Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- [Souza et al., 2015] Souza, G. d. T. S. et al. (2015). Nova etiqueta chipless de rfid com comunicação redundante. Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas.
- [Valmiro, 2015] Valmiro, R. (2015). Antenas para sistemas rfid impressas em substrato flexível. Master's thesis, Universidade de São Paulo.
- [Yu et al., 2015] Yu, Y., Ni, J., and Xu, Z. (2015). Dual-band dipole antenna for 2.45 ghz and 5.8 ghz rfid tag application. Advanced Electromagnetics, 4(1):31–35.