

Maurício Henrique Bezerra Cardoso
Matrícula: 108110257

Projeto de Antenas e Setup para Medições de Tags RFID sem Chip

Campina Grande – PB

Outubro, 2013

Maurício Henrique Bezerra Cardoso
Matrícula: 108110257

Projeto de Antenas e Setup para Medições de Tags RFID sem Chip

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Antenas e Propagação

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica

Orientador: Alexandre Jean René Serres

Campina Grande – PB

Outubro, 2013

Maurício Henrique Bezerra Cardoso
Matrícula: 108110257

Projeto de Antenas e Setup para Medições de Tags RFID sem Chip

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Antenas e Propagação

Trabalho aprovado em ___/___/___

Alexandre Jean René Serres
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador

Professor Convidado
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Campina Grande – PB

Outubro, 2013

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais. Toda e qualquer vitória ou conquista na minha vida eu devo ao dois. Muito obrigado pelo apoio dado durante toda minha vida. Agradeço também a minhas avós, ao meu irmão e a todos meus familiares, pelo ambiente familiar de carinho e suporte.

A Thayane, pela atenção e afeto, mas principalmente pelo apoio durante os momentos em que este trabalho não progredia como esperado. Obrigado por me ajudar nos momentos difíceis e nunca duvidar da minha capacidade de me superar, mesmo quando até eu duvido.

Aos colegas de curso, com quem divido todas as (poucas) alegrias e (diversos) momentos difíceis que nosso curso nos proporciona.

A todos meus amigos, por entenderem a minha ausência, especialmente durante este último período acadêmico.

Ao professor Alexandre Serres, por ter me orientado no TCC e me ajudado quando minha moral de estudante não era suficiente para o bom progresso deste trabalho.

Ao professor Glauco Fontgalland, por ceder o substrato usado para desenvolver o *tag* deste trabalho.

Aos demais professores que contribuíram para minha formação acadêmica e pessoal.

Aos doutorandos do LEMA, a quem eu recorria sempre que tinha dúvidas, especialmente a Paulo, que ajudou nas medições do *tag* desenvolvido neste trabalho.

Ao amigo Felipe Fideles, que também teve um período letivo bastante atarefado, mas sempre teve uma palavra de motivação e se disponibilizou a ajudar no desenvolvimento deste trabalho, mesmo sem ser sua obrigação.

"No fim tudo dá certo, e se não deu certo é porque ainda não chegou ao fim."

Fernando Sabino

Resumo

A tecnologia RFID (*Radio Frequency Identification* - Identificação por Rádio Frequency) é uma forte candidata a substituir a tecnologia de código de barras, porém não consegue se expandir devido ao alto custo associado ao *chip* dos *tags*. No sentido de baretear a tecnologia, muita atenção está sendo dada ao RFID sem *chip*. Na literatura, diferentes tipos de topologias são estudadas e a validação dos *tags* sem *chip* geralmente se dá com teste em câmaras anecoicas, porém existem outros testes de validação. Este trabalho propõe um *tag* simples, com ressoadores em fenda de anel, com fendas extras para melhorar a codificação espectral do *tag*.

Palavras-chaves: RFID sem *chip*, estruturas ressoantes, *setup* de medição

Abstract

RFID (*Radio Frequency Identification*) is a technology that can replace bar code, however, its use is limited by the high price associated with the chip of the tag. In order to make it cheaper, a lot of attention is given to the chipless RFID. Lot of topologies are studied and chipless tag validation often takes place in a anechoic chamber, although there are other types of validation. This work proposes a simple tag, with resonant slot rings, with extra slots to ensure a better spectral codification of the tag.

Key-words: Chipless RFID, resonant structures, validation *setup*

Lista de ilustrações

Figura 1 – Diagrama de um sistema RFID típico. Fonte: [2]	1
Figura 2 – (a) Três iterações da curva de Peano; (b) Seis iterações da curva de Hilbert.	5
Figura 3 – RCS de um elemento de forma da curva de Peano de ordem 2. Fonte: [3]	6
Figura 4 – RCS de um elemento de forma da curva de Hilbert de ordem 3. Fonte: [3]	6
Figura 5 – Assinatura eletromagnética do vetor formado por cinco elementos de forma da curva de Hilbert de ordem 3. Fonte: [3]	7
Figura 6 – Assinatura eletromagnética de um <i>tag</i> , cuja sensibilidade à polarização do campo incidente é menor, formado por elementos baseado na curva de Hilbert de ordem 3. Fonte: [3]	8
Figura 7 – (a) Antena <i>patch</i> circular carregada de uma fenda ressonante em formato de anel. Fonte: [1]; (b) Estrutura dual à (a). Fonte: [5]	9
Figura 8 – Resposta da onda retroespalhada pela estrutura da figura 7(a). Fonte: [1]	9
Figura 9 – Projeto de <i>tags</i> referentes a diferentes números binários. (a) 11111111; (b) 00000000; (c) 10101010 e (d) 01010101. Fonte: [1]	9
Figura 10 – Resultado das simulações dos diferentes <i>tags</i> da figura 9. (a) <i>Tags</i> 11111111 e 00000000; (b) <i>Tags</i> 10101010 e 01010101. Fonte: [1]	10
Figura 11 – Diagrama de bloco do <i>tag</i> RFID sem <i>chip</i> proposto em [2]	11
Figura 12 – Circuito multi-ressoante de 3-bits em uma linha de transmissão CPW. Fonte: [2]	11
Figura 13 – Perdas de inserção e fase de transmissão do multi-ressoador de 3 bits da figura 12. Fonte: [2]	12
Figura 14 – Remoção da ressonância do espiral através de curto-circuito. Fonte: [2]	13
Figura 15 – Remoção da ressonância do espiral através de curto-circuito. Fonte: [2]	13
Figura 16 – <i>Tag</i> RFID sem <i>chip</i> de 23 bits com Ressonadores em Espira e Antenas Monopolo. Fonte: [2]	14
Figura 17 – Resposta do <i>tag</i> da figura 16. Fonte: [2]	14
Figura 18 – Esquema do <i>setup</i> típico para medição de <i>tags</i> RFID sem <i>chip</i> em uma câmara anecoica. Fonte: [2]	16
Figura 19 – Fotografia do <i>setup</i> experimental feito por Preradovic e Karmakar para medição do <i>tag</i> da figura 16. Fonte: [2]	16
Figura 20 – <i>Setup</i> com guias de onda. (a) Por aproximação; (b) Por inserção. Fonte: [1]	17
Figura 21 – Primeira estrutura do <i>tag</i> a ser proposto.	19
Figura 22 – Condições de contorno da simulação da figura 21.	20
Figura 23 – Resultado da simulação dos <i>tags</i> propostos - parâmetro S_{11}	21

Figura 24 – Resultado da simulação dos <i>tags</i> propostos - parâmetro S_{21}	22
Figura 25 – Nova estrutura do <i>tag</i> a ser proposto.	23
Figura 26 – Resultado da simulação dos novos <i>tags</i> propostos - parâmetro S_{11}	23
Figura 27 – Resultado da simulação dos novos <i>tags</i> propostos - parâmetro S_{21}	24
Figura 28 – (a) Arquivo .dxf do <i>tag</i> da figura 25 gerado pelo CST; (b) Arquivo .dxf editado (área metálica indicada).	25
Figura 29 – <i>Tag</i> desenvolvido neste TCC.	25
Figura 30 – <i>Setup</i> da medição do <i>tag</i> da figura 29	27
Figura 31 – S_{11} com e sem o <i>tag</i>	27
Figura 32 – Subtração dos resultados do ensaio com e sem <i>tag</i> para comparação com a simulação.	28

Lista de abreviaturas e siglas

- ASIC *Application Specific Integrated Circuit* – Circuito Integrado de Aplicação Específica
- CPW *Coplanar Waveguide* – Guia de Onda Coplanar
- CST *Computer Simulation Technology*
- HF *High Frequency* – Alta Frequência
- LEMA Laboratório de Eletromagnetismo e Micro-ondas Aplicados
- LEMCAD Laboratório de Ensaio, Manutenção, Calibração, Aferição e Desenvolvimento
- PEC *Perfect Electric Conductor* – Condutor Elétrico Perfeito
- PPM *Pulse Position Modulation* – Modulação por Posição de Pulso
- RCS *Radar Cross Section* – Seção Reta Radar
- RF Radio Frequência
- RFID *Radio Frequency Identification* – Identificação por Rádio Frequência
- SAW *Surface Acoustic Wave* – Onda Acústica de Superfície
- TCC Trabalho de Conclusão de Curso
- TEM *Transverse Electromagnetic* – Eletromagnético Transverso
- UFMG Universidade Federal Campina Grande
- UHF *Ultra High Frequency* – Ultra Alta Frequência
- VNA *Vector Network Analyser* – Analisador Vetorial de Redes

Sumário

1	Introdução	1
1.1	A Tecnologia RFID	1
1.2	RFID sem <i>chip</i>	3
1.3	Objetivos	4
1.4	Estrutura do texto	4
2	Topologias de <i>tags</i> RFID sem <i>chip</i>	5
2.1	Curvas de Preenchimento Espacial de Peano e Hilbert	5
2.2	Ressonadores com fendas em anel (<i>Slot rings</i>)	8
2.3	Ressonadores em Espira com Antenas Monopolo	10
2.3.1	O circuito multi-ressoante	11
2.3.2	Codificação de Informação	12
2.3.3	O <i>Tag</i> Completo	12
3	Setup para Medições	15
3.1	Teste na Câmara Anecoica	15
3.2	Teste fora da Câmara Anecoica	15
3.3	Testes com Guias de Onda	17
4	Desenvolvimento do <i>Tag</i> Proposto	18
4.1	Simulação	18
4.2	Fabricação	24
5	Resultados	26
5.1	<i>Setup</i>	26
5.2	Medições	26
	Conclusão	29
	Bibliografia	30

1 Introdução

1.1 A Tecnologia RFID

RFID (*Radio Frequency Identification* – Identificação por Rádio Frequência) é uma tecnologia usada em sistema de comunicação sem fio (*wireless*) de extração de informação que usa rádio frequência (RF) para capturar dados armazenados em *tags* (etiquetas especiais que contam com uma antena e um *chip*) remotamente localizados [1]. Hoje em dia, o RFID é amplamente utilizado em bilhetes de transporte ou ingressos de shows, cobrança de pedágio, controle de estoque, inventário, identificação militar, entre outros usos. É a tecnologia candidata a substituir o código de barras para rastreabilidade, pois apresenta grandes vantagens, como leitura concomitante de múltiplos produtos, maior alcance e possibilidade de leitura mesmo que não haja linha de visão (*line-of-sight*) entre o objeto e o leitor.

Um sistema típico de RFID consiste de três componentes principais: um leitor, que envia o sinal de pergunta ao *tag* RFID, o qual será identificado, um *tag*, que contém o código de identificação e que reflete o sinal recebido com a informação de identificação escrita nele e um *software*, que mantém a interface e o protocolo para codificação e decodificação da informação do leitor para um computador [2]. Este computador, por sua vez, pode ter acesso à internet para estender a conectividade do sistema. A figura 1 mostra um típico sistema RFID.

Nos *tags* clássicos, encontram-se dois componentes: um *chip* e uma antena. O *chip* contém informações do produto a ele associado (número de série ou outro tipo de dado). O *chip* pode ser programado para ser *read-only* (apenas leitura), *write-once* (apenas uma escrita possível) ou *read/write* (permite leituras e escritas). Já a função da antena depende do tipo de *tag*. Segundo [3], existem três tipos de *tags* com *chip*:

- a Passivo: sem nenhuma fonte interna de energia. A corrente induzida na antena pela onda de radio frequência provê energia suficiente para excitar o circuito integrado e transmitir

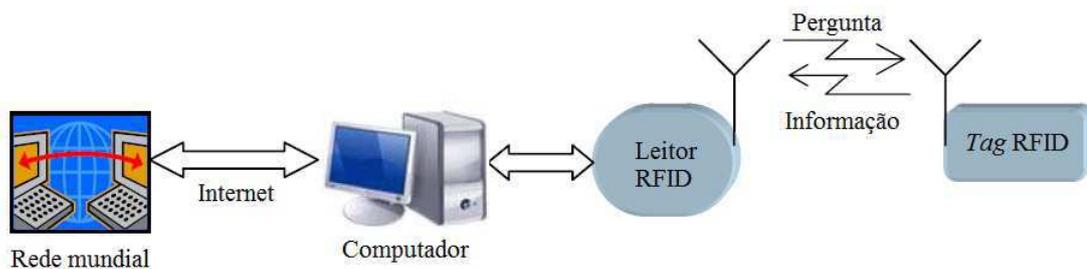


Figura 1 – Diagrama de um sistema RFID típico. Fonte: [2]

sua resposta. O *tag* envia sua resposta pelo retroespalhamento (*backscattering*) da portadora do leitor, que é modulada por variação de carga no chip. Desta maneira, a antena tem que ser concebida tanto para captação de energia da onda enviada como para transmissão da onda refletida. A ausência de bateria permite o desenvolvimento de *tags* bastante pequenos, de vida útil muito longa e de baixo custo. Por causa disso, a maioria dos *tags* RFID produzidos se enquadra nesta categoria. O alcance de leitura destes *tags* varia de alguns milímetros para alguns metros, dependendo da aplicação.

- b Semipassivo: Similar aos passivos, porém com uma pequena bateria, que permite que o *chip* esteja sempre excitado. Desta maneira as antenas são usadas exclusivamente para a retransmissão da onda refletida. Este tipo de *tag* também é conhecido como *passivo assistido por bateria*.
- c Ativo: contém uma bateria que além de excitar o *chip* gera o sinal que é emitido. Constitui uma classe particular de *tags*, pois emite seu sinal permanentemente, diferenciado do protocolo comum, no qual o envio do sinal ocorre mediante uma solicitação.

A tecnologia RFID foi primeiramente proposta por Stockman em seu artigo *Communication by Means of Reflected Power* (Comunicação por Potência Refletida). Neste artigo, Stockman defende que alternando a carga da antena do *tag*, é possível variar a potência refletida e portanto conseguir um tipo de modulação conhecida como modulação por variação de carga [2].

Alguns sistemas RFID operam nas seguintes faixas de frequência: 125 kHz – 134 kHz, 13,56 MHz, 860 MHz – 930 MHz, 2,45 GHz e 5,8 GHz. As duas frequências principais são 13,56 MHz, referenciada como HF (*High Frequency* – Alta Frequência) e 860 MHz – 930 MHz, referenciada como UHF (*Ultra High Frequency* – Ultra Alta Frequência). A frequência de 13.56 MHz foi estabelecida mundialmente para a RFID. No entanto, as frequências UHF variam de acordo com a região. Por exemplo, na Europa, a banda RFID UHF é 868 MHz – 870 MHz. Nos Estados Unidos, é de 902 MHz – 928 MHz. Essas diferenças de frequência impõem aos engenheiros de micro-ondas que os *tags* apresentem uma resposta pouco variável na banda de 860 MHz a 930 MHz para utilização mundial. Caso contrário, uma concepção diferente pode ser feita para cada região.

Apesar de seu potencial em relação ao código de barras, ainda existe um amplo mercado de trilhões de itens vendidos anualmente em aplicações de baixo custo que ainda são rastreado opticamente por código de barras [4]. O grande entrave para uma ampla difusão do RFID é seu alto custo em relação ao código de barras. O motivo pelo qual o preço de um *tag* é elevado é a introdução do *chip*. Uma investigação profunda deste alto custo é feita em [2].

O preço de um *tag* é em torno de 10 centavos de dólar, enquanto a implementação de código de barra em um item custa menos de 0,1 centavo de dólar. O alto custo de manufatura

de um *tag* é basicamente devido ao projeto e ao teste do ASIC (*Application Specific Integrated Circuit* – Circuito Integrado de Aplicação Específica). Sabe-se que o custo de um ASIC é diretamente proporcional a sua área. Apesar de grandes estudos para aumentar a densidade de transistores por unidade de área e reduzir o projeto de um *chip* RFID para um número pequeno de transistores, a redução da área do *chip*, mesmo barateando seu custo de fabricação, traz limitações e problemas extras, como custos adicionais de manipulação. Esses são os motivos pelos quais é muito difícil baratear o preço de um *tag* com *chip*.

1.2 RFID sem *chip*

Numa tentativa de baratear a tecnologia e promover sua expansão, recentemente, muita atenção é dada a versão sem *chip* do RFID (*chipless* RFID). Neste caso, a codificação de informação é feita na assinatura eletromagnética do *tag*. Como não existe *chip*, não há protocolo de comunicação.

Uma boa revisão dos métodos de codificação de informação e dos aspectos práticos que precisam ser levados em consideração sobre o RFID sem *chip* é feita em [5]. As técnicas de codificação podem ser no domínio do tempo, da frequência ou ser híbridas. No primeiro caso, um pequeno pulso é enviado para o *tag*, que é projetado com algumas descontinuidades de modo que o sinal refletido contém alguns pulsos. A informação é modulada então pela posição dos pulsos (PPM – *pulse position modulation*). Já existe um *tag* com esta tecnologia no comércio, cujo substrato é do tipo SAW (SAW – *Surface Acoustic Wave* – Onda Acústica de Superfície), que é um material piezoelétrico. A escolha do material se justifica pela grande capacidade de codificação em área bastante pequena, porém este material é muito caro, então o custo unitário de cada *tag* não é reduzido.

Para a técnica de codificação no domínio da frequência, utiliza-se o método de codificação espectral. O formato da antena do *tag* é desenhado de tal maneira que as frequências de ressonâncias armazenam os dados a serem transmitidos. Por praticidade, é interessante que o *tag* possa ser diretamente impresso no produto, de tal maneira que a inserção ocorra ainda na produção do item.

Em relação a tecnologia do RFID sem *chip*, algumas considerações devem ser levadas em conta. Primeiramente, é a capacidade de codificação, seja por área ou por banda espectral. É interessante que o *tag* possa transmitir o maior número de bits possível ocupando uma área pequena e utilizando uma baixa faixa de frequência. O máximo já reportado foi 35 bits em uma área equivalente a de um cartão de crédito [6]. Uma outra questão é a faixa de frequência na qual o *tag* é lido, pois esta não pode desrespeitar as normas regulamentadoras (apesar de ainda não existir nenhuma norma específica para o RFID sem *chip*). Desta maneira, vale a pena concentrar esforços no método de leitura da informação dos *tags*. Recentemente, muita atenção é dada a métodos baseados em guias de ondas. Os efeitos do ambiente na resposta do *tag* sem

chip também é outro problema. Ainda não existem tantos estudos neste tema em relação ao RFID clássico.

Outras questões a serem estudadas envolvem a resposta do *tag* em presença de outros e sua dependência à polarização do campo incidente. Intrinsecamente, a tecnologia do RFID sem *chip* não é adequada para múltiplas leituras simultâneas. No entanto, estudos feitos neste tema sugerem que técnicas de separação temporal e espacial podem ser aplicadas para efetuar leitura simultânea de diversos *tags*. Além disso, os estudos mais recentes propõem *tags* cuja resposta não dependa da polarização, para que não seja necessário implementar no leitor a diversidade de polarização, simplificando assim este dispositivo.

1.3 Objetivos

Diante de todos os tópicos expostos, é notável que este tema é bastante amplo e permite diversas pesquisas com diferentes focos. Este trabalho de conclusão de curso (TCC) concentrou-se nas técnicas de codificação e nos *setup* de medição para validação dos *tags*. O objetivo deste trabalho é conceber um *tag* RFID sem *chip* e elaborar um *setup* de medição para testes com este *tag*. O produto final deste TCC foi um *tag* simples, que codifica três bits em uma banda passante de em torno de 1,4 GHz (vide figura 29). O projeto do *setup* e do teste das antenas foi prejudicado devido a problemas técnicos, que são mais bem explicados no capítulo 5.

1.4 Estrutura do texto

A continuação deste texto é dividida da seguinte maneira: o capítulo 2 descreve diferentes topologias de *tags* RFID sem *chip*. O capítulo 3 descreve os *setups* que são utilizados para as medições dos *tags* RFID sem *chip*. O capítulo 4 descreve o processo de concepção do *tag* proposto por este trabalho. Por fim, o capítulo 5 resume os resultados obtidos das medições da resposta do *tag* desenvolvido por este projeto.

2 Topologias de *tags* RFID sem *chip*

Antes de começar as simulações para concepção do *tag*, uma ampla pesquisa literária foi feita para avaliar o estado da arte da concepção de *tags* RFID sem *chip*. Todos os artigos apresentam um ponto em comum: o estudo de alguma estrutura com múltiplas ressonâncias. Essa estrutura ressonante é a base do *tag*, pois o desenho deste é feito de tal maneira que as ressonâncias ocorram em frequências determinadas, modificando assim a assinatura eletromagnética da estrutura, possibilitando a codificação de bits.

Três tipos de estruturas diferentes são descritas neste relatório. A escolha dessas estruturas se justificam pela alta recorrência nos artigos ou pela importância dos artigos que a citam.

2.1 Curvas de Preenchimento Espacial de Peano e Hilbert

O uso das curvas de preenchimento espacial de Peano e de Hilbert para elaboração de *tags* RFID sem *chip* foi inicialmente proposto em [3]. São aproveitadas as propriedades eletromagnéticas de tais curvas, que são apresentadas na figura 2. Uma propriedade interessante é que as versões de alta ordem destas curvas podem ser interpretadas como longas linhas de condutor compactadas em uma pequena área. De um ponto de vista eletromagnético, isto significa que a estrutura ressoa em uma frequência cujo comprimento de onda é maior.

A figura 3 mostra a simulação da Seção Reta Radar (RCS – *Radar Cross Section*) de um elemento de forma da curva de Peano de ordem 2, de dimensão 30 mm x 30 mm, no espaço livre, quando excitado por uma onda uniforme incidente perpendicularmente com frequência variável. A figura 4 mostra a mesma simulação, porém para um elemento de forma da curva

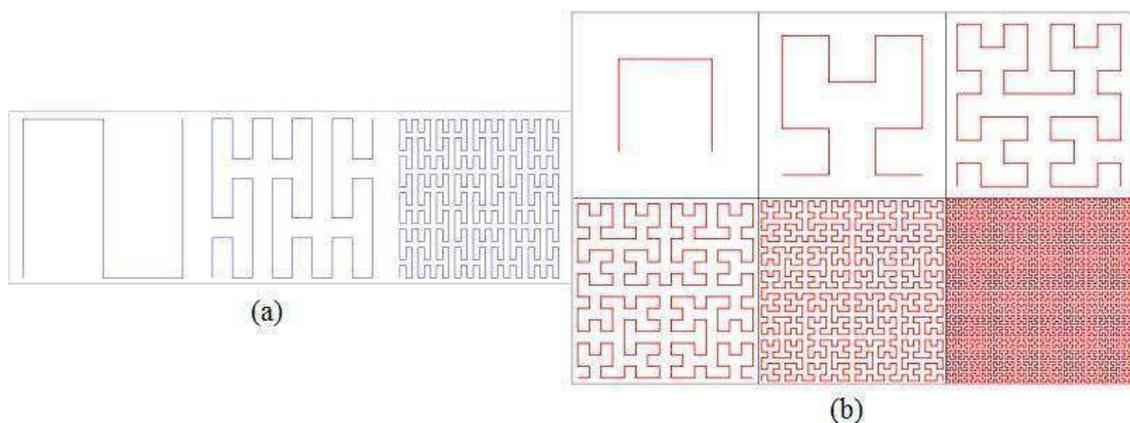


Figura 2 – (a) Três iterações da curva de Peano; (b) Seis iterações da curva de Hilbert.

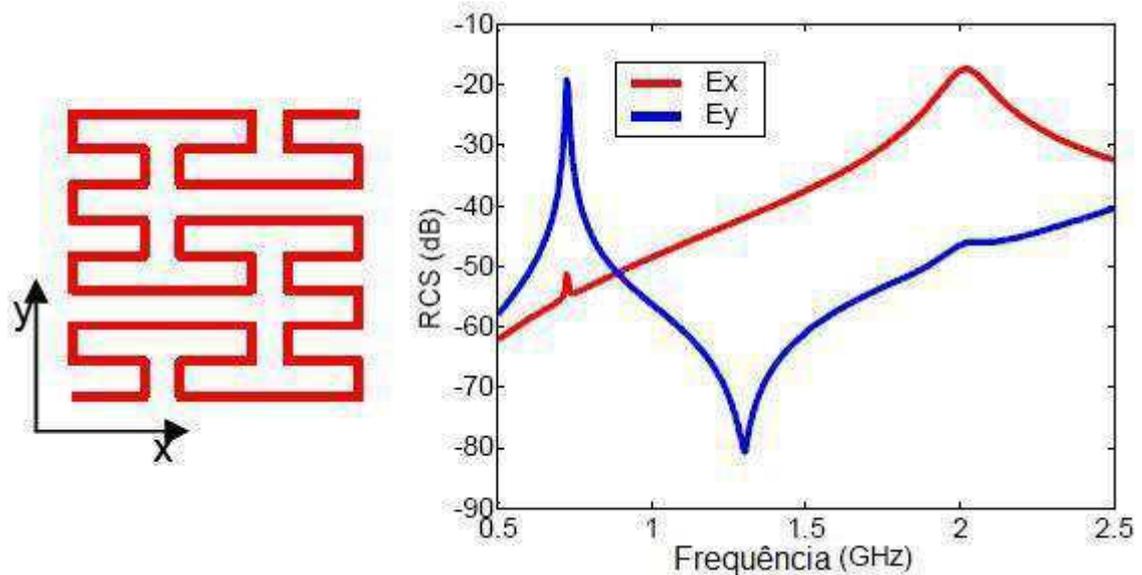


Figura 3 – RCS de um elemento de forma da curva de Peano de ordem 2. Fonte: [3]

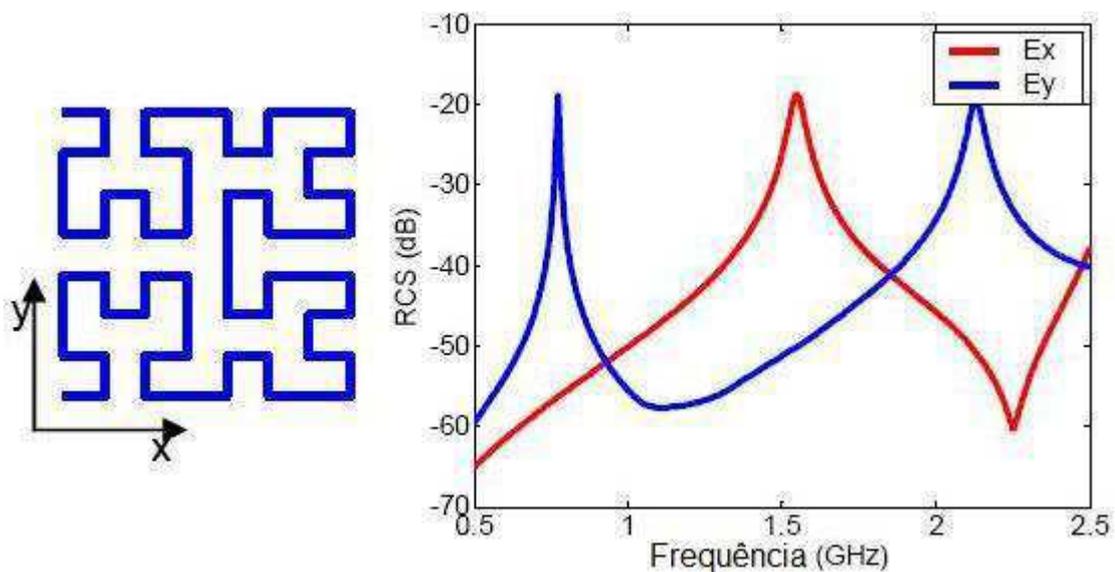


Figura 4 – RCS de um elemento de forma da curva de Hilbert de ordem 3. Fonte: [3]

de Hilbert de ordem 3, de mesma dimensão. É perceptível que a resposta dessas estruturas são dependentes da polarização.

A figura 5 ilustra o potencial das curvas de preenchimento espacial para o RFID sem *chip*. Nesta figura, é mostrada a resposta de um vetor de elementos de forma da curva de Hilbert de ordem 3. A dimensão de cada elemento do vetor é igual a 95% da dimensão do elemento anterior. Quando excitado por uma onda plana incidente perpendicularmente, aparecem múltiplos picos de RCS. Se um pico for considerado o bit 1, então este vetor representaria o número binário 11111.

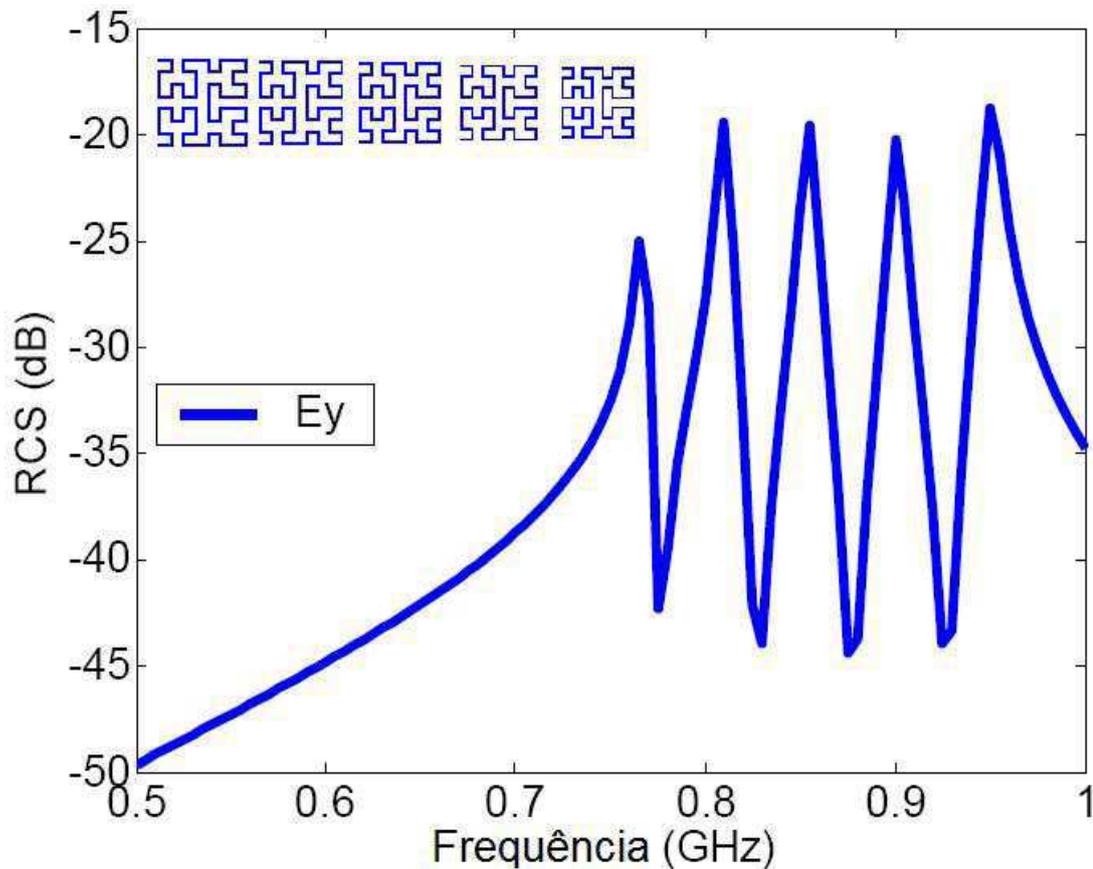


Figura 5 – Assinatura eletromagnética do vetor formado por cinco elementos de forma da curva de Hilbert de ordem 3. Fonte: [3]

É importante ressaltar que a resposta mostrada na figura 5 é obtida quando a excitação apresenta polarização E_y . Se a polarização for trocada, a resposta é completamente diferente. Para reduzir esta dependência da polarização, é proposta a geometria da figura 6, na qual cada elemento do vetor inicialmente proposto é substituído por quatro elementos, dos quais 2 são rotacionados em 90° em relação ao original, formando um "super-elemento". Desta maneira, cada elemento do vetor original é substituído por um "super-elemento", de dimensão igual a 95% da dimensão do anterior. Neste caso, o vetor considerado também apresenta cinco "super-elementos", porém, o segundo e o quarto foram retirados, para produzir a assinatura eletromagnética do número binário 10101. Devido ao acoplamento, que neste caso é mais forte, a dependência da polarização é menor, apesar de não ser completamente eliminada.

Esta técnica possui a grande vantagem de ser compacta em banda espectral. Em uma banda de aproximadamente 250 MHz, é possível codificar 5 bits (0,05 GHz/bit). A grande desvantagem é a área ocupada pelo *tag* (45 cm^2), o que reduz a densidade de codificação por área ($0,111 \text{ bits/cm}^2$).

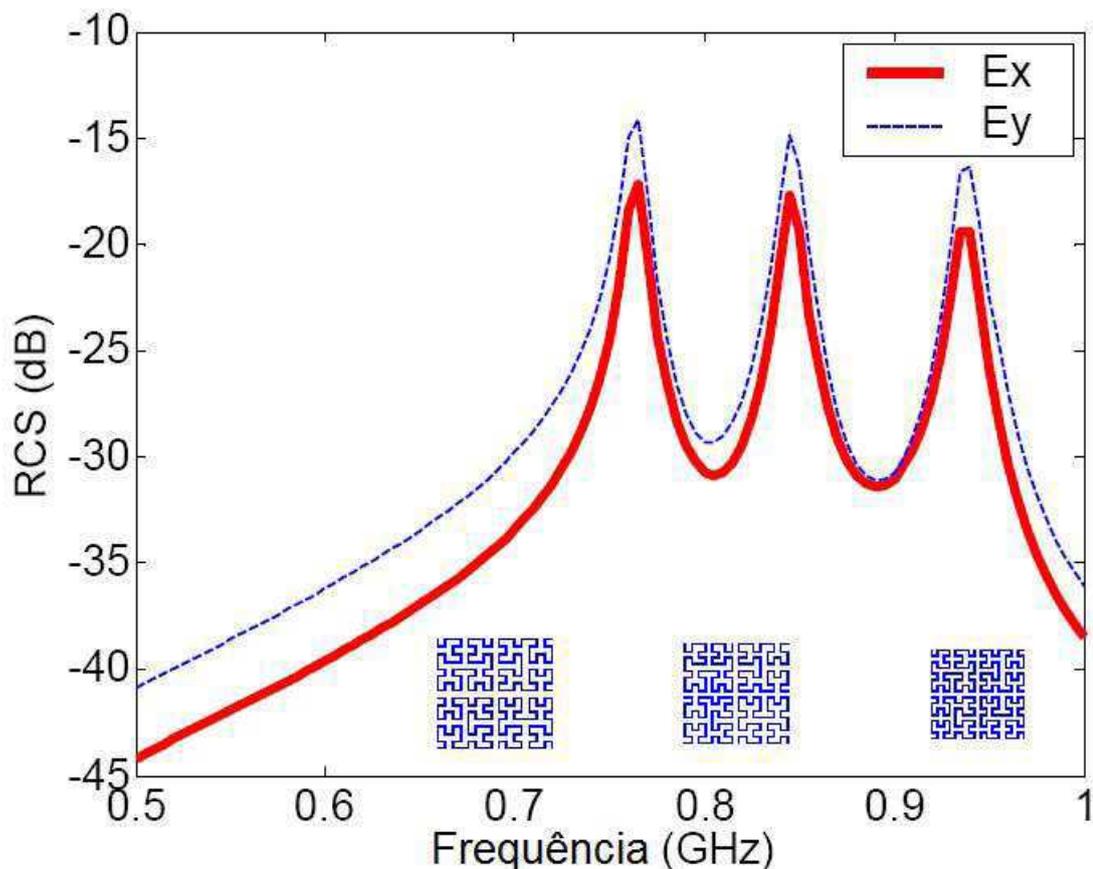


Figura 6 – Assinatura eletromagnética de um *tag*, cuja sensibilidade à polarização do campo incidente é menor, formado por elementos baseado na curva de Hilbert de ordem 3. Fonte: [3]

2.2 Ressonadores com fendas em anel (*Slot rings*)

Outra técnica bastante encontrada nos artigos é a utilização de ressoadores com fendas em anel. Consiste, basicamente, de uma antena *patch* carregada com fendas ressonantes em formato de anel (figura 7(a)). Um dos artigos mais citados na literatura sobre esta topologia é [1]. O dual desta estrutura, ou seja, pistas circulares de condutores em formato de anel (figura 7(b)), também é bastante investigada, como em [5]

Em [1], duas vantagens básicas desta topologia são discutidas. A primeira é que as ressonâncias de ordem igual ou superior à segunda ordem desta estrutura não estão presentes no sinal retroespalhado, como pode ser visto na figura 8, que mostra a resposta da estrutura da figura 7(a). Percebe-se a ausência total de harmônicas. A segunda vantagem é que, devido à simetria da estrutura, a assinatura eletromagnética é a mesma independente da polarização da onda incidente. No entanto, quando comparada à técnica de curva de preenchimento espacial, esta técnica apresenta outra vantagem importante: o tamanho da estrutura não cresce linearmente com o aumento de bits, visto que o aumento de bits acarreta apenas o aumento de fendas, não necessariamente aumento da superfície do *tag*, como visto na figura 9.

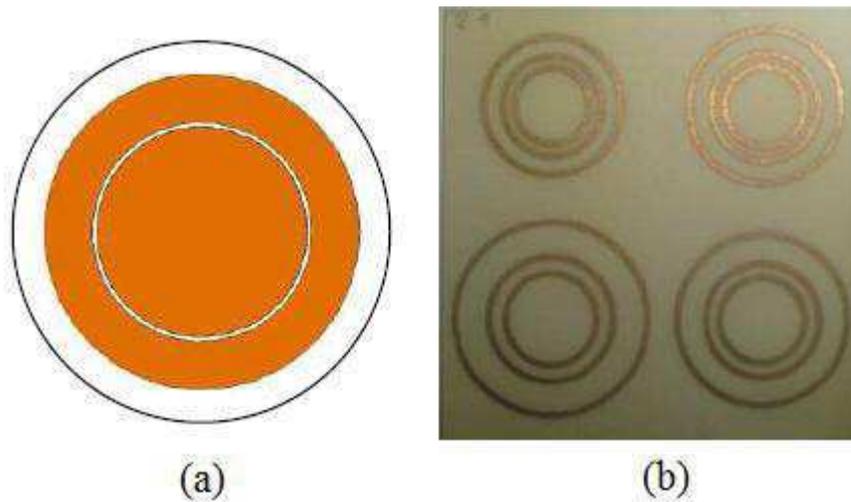


Figura 7 – (a) Antena *patch* circular carregada de uma fenda ressonante em formato de anel. Fonte: [1]; (b) Estrutura dual à (a). Fonte: [5]

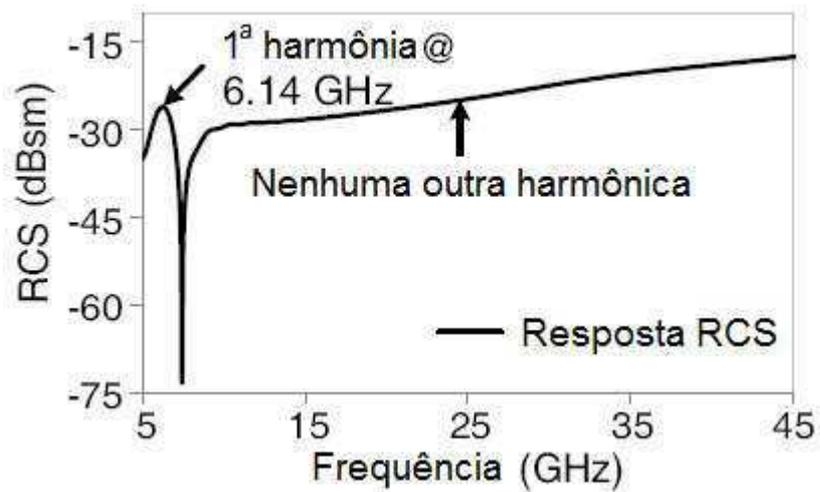


Figura 8 – Resposta da onda retroespalhada pela estrutura da figura 7(a). Fonte: [1]

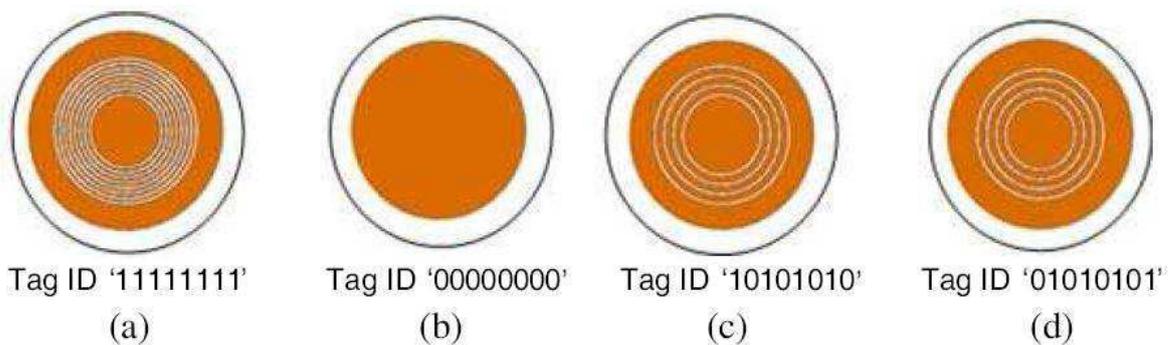


Figura 9 – Projeto de *tags* referentes a diferentes números binários. (a) 11111111; (b) 00000000; (c) 10101010 e (d) 01010101. Fonte: [1]

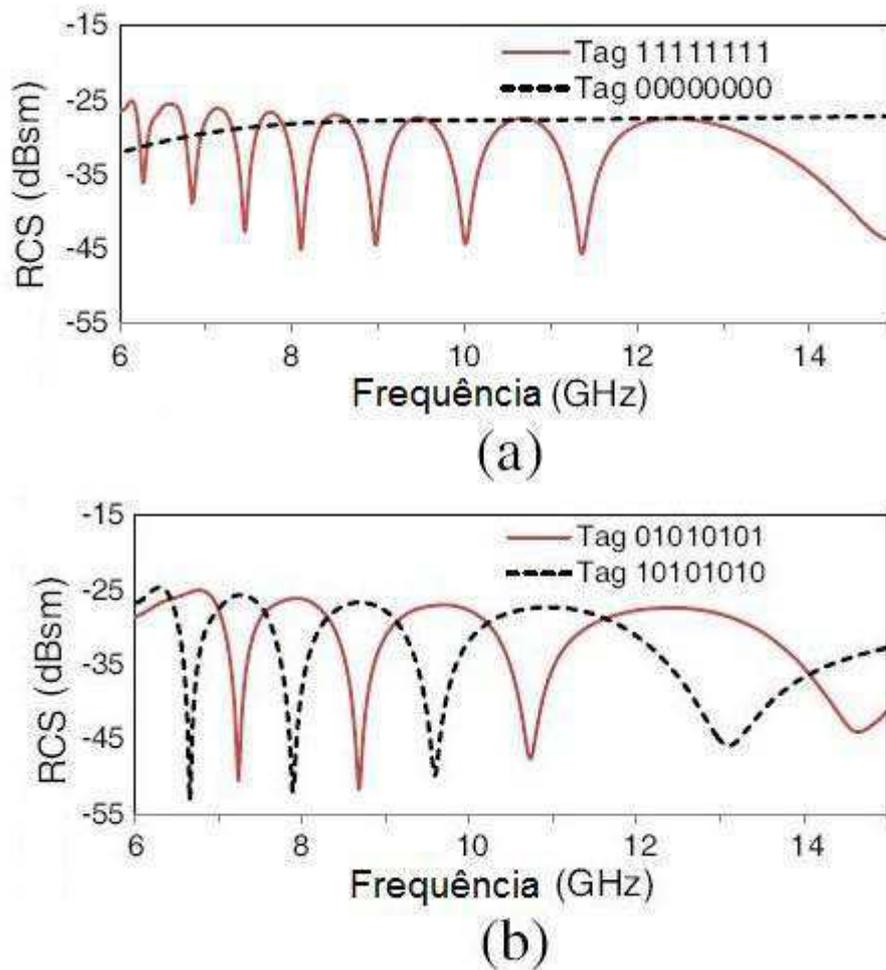


Figura 10 – Resultado das simulações dos diferentes tags da figura 9. (a) Tags 11111111 e 00000000; (b) Tags 10101010 e 01010101. Fonte: [1]

As respostas dos tags da figura 9 são mostradas na figura 10. A análise da resposta destes tags torna explícita uma das desvantagens deste método: a assinatura eletromagnética dos tags ocupa uma banda passante significativamente maior. Para codificar 8 bits, é necessário 9 GHz (1,125 GHz/bit).

2.3 Ressonadores em Espira com Antenas Monopolo

Esta última topologia descrita neste trabalho é, atualmente, a estrutura mais referenciada nos trabalhos científicos sobre RFID sem chip. Trata-se dos Ressonadores em Espira com Antenas Monopolo apresentados em [2] e [6]. Utilizando esta técnica, os autores conseguiram codificar 35 bits em uma área equivalente a de um cartão de crédito (8.6 cm x 5.4 cm). O princípio de funcionamento desta estrutura é esboçado na figura 11. As antenas são usadas para receber o sinal do leitor e retransmitir o sinal de volta para o mesmo depois de ter sido modulado pelo circuito multi-ressoante. O multi-ressoador é a combinação de diversas seções

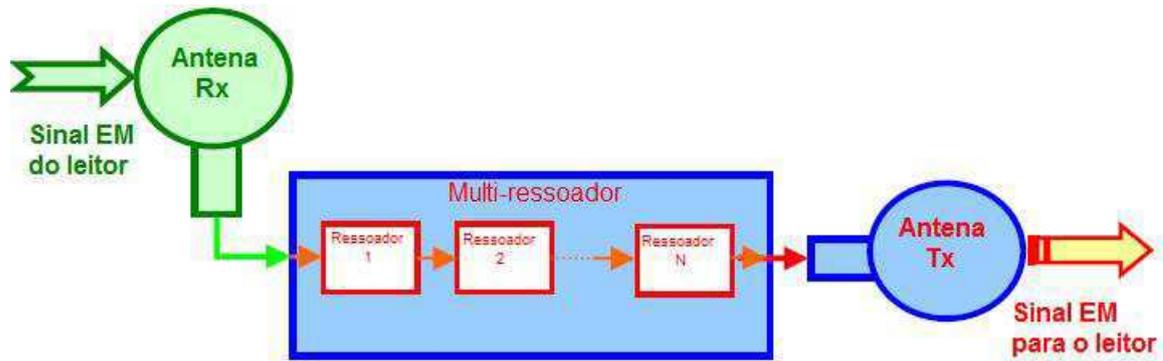


Figura 11 – Diagrama de bloco do tag RFID sem chip proposto em [2]

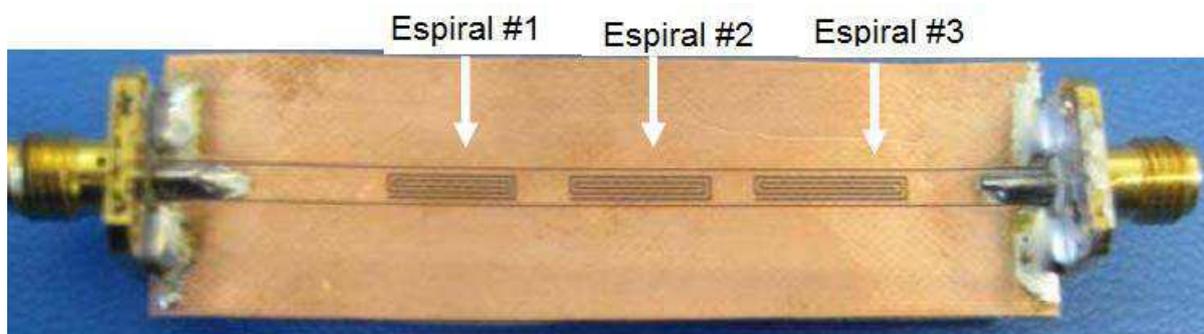


Figura 12 – Circuito multi-ressoador de 3-bits em uma linha de transmissão CPW. Fonte: [2]

que filtram o sinal, provendo uma modulação tanto em magnitude quanto em fase.

2.3.1 O circuito multi-ressoador

A figura 12 mostra um exemplo de um circuito de três bits utilizando espiras ressoantes em uma linha de transmissão do tipo CPW (*Coplanar Waveguide* – Guia de Onda Coplanar). Cada espira funciona como um filtro rejeita-faixa projetado para ressoar em uma frequência específica. A frequência em que a ressonância ocorre depende do tamanho total da espira. A ressonância introduzida pelo filtro rejeita-faixa introduz uma atenuação de magnitude e um salto de fase no sinal que passa pela linha de transmissão. Ao chegar no leitor, o bit que se refere a esta ressonância é identificado pela mudança abrupta de amplitude e fase.

A simulação da resposta do circuito da figura 12 é mostrada na figura 13. É notável que cada espira provê uma ressonância clara entre 2,0 GHz e 2,5 GHz. As ressonâncias estão separadas em frequência em aproximadamente 200 MHz. Também são claros na figura 13 os saltos em fase causados por cada espira. Cada pico mínimo de magnitude e salto em fase são associados a um bit enquanto a ausência dos dois é associado a outro bit.

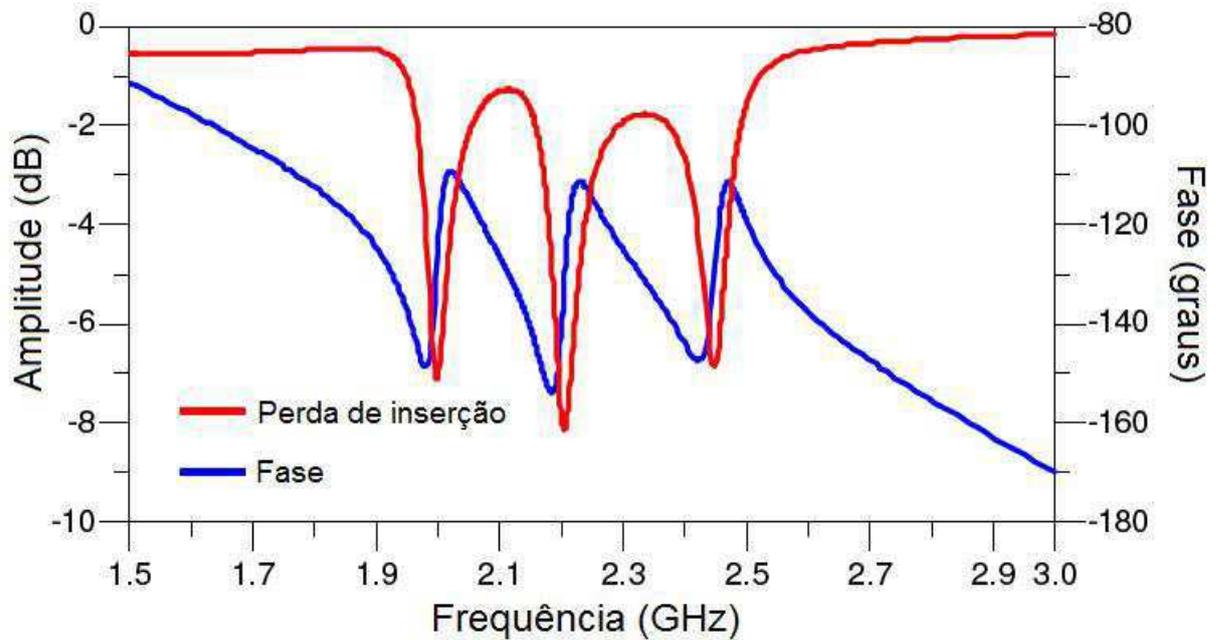


Figura 13 – Perdas de inserção e fase de transmissão do multi-ressoador de 3 bits da figura 12. Fonte: [2]

2.3.2 Codificação de Informação

Uma maneira de codificar informação é a presença ou a ausência de espiras, o que significa a presença ou ausência de ressonância em uma determinada frequência, alterando assim o bit a ser lido. No entanto, curto-circuitando as voltas de uma espira, como mostra a figura 14, provoca-se uma alteração da frequência de ressonância, que passa a ocorrer fora da banda de leitura. Essa alteração é ilustrada na figura 15. A vantagem de curto-circuitar as espiras em vez de eliminá-las por completo é a possibilidade de permitir a impressão do projeto com todas as espiras curto-circuitadas e, apenas na fase de codificação, os curto-circuitos são eliminados por um laser ou outra tecnologia similar.

2.3.3 O Tag Completo

O tag proposto em [2] é mostrado na figura 16. O tag foi impresso em Taconic TF-290, cuja permissividade relativa é de 2,9, espessura de $90 \mu\text{m}$ e tangente de perdas 0,0028. A resposta do tag é mostrada na figura 17. Constata-se que este tag codifica $0,333 \text{ bits/cm}^2$ e apresenta banda de $0,26 \text{ GHz/bit}$.

Numa comparação das topologias apresentadas, as curvas de preenchimento espacial apresentam a banda espectral mais compacta, porém o tamanho do tag é muito grande. Os ressoadores com fendas em anel conseguem codificar uma grande quantidade de bits em uma área relativamente pequena, porém apresenta uma banda espectral muito grande ($1,125 \text{ GHz/bit}$). A topologia com ressoadores em espira apresenta resultados intermediários em relação a quantidade de bits codificados por área e banda espectral ocupada, porém esta é a topologia que

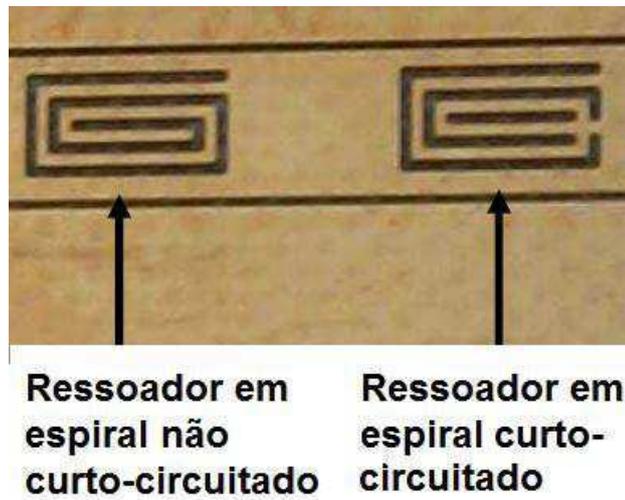


Figura 14 – Remoção da ressonância do espiral através de curto-circuito. Fonte: [2]

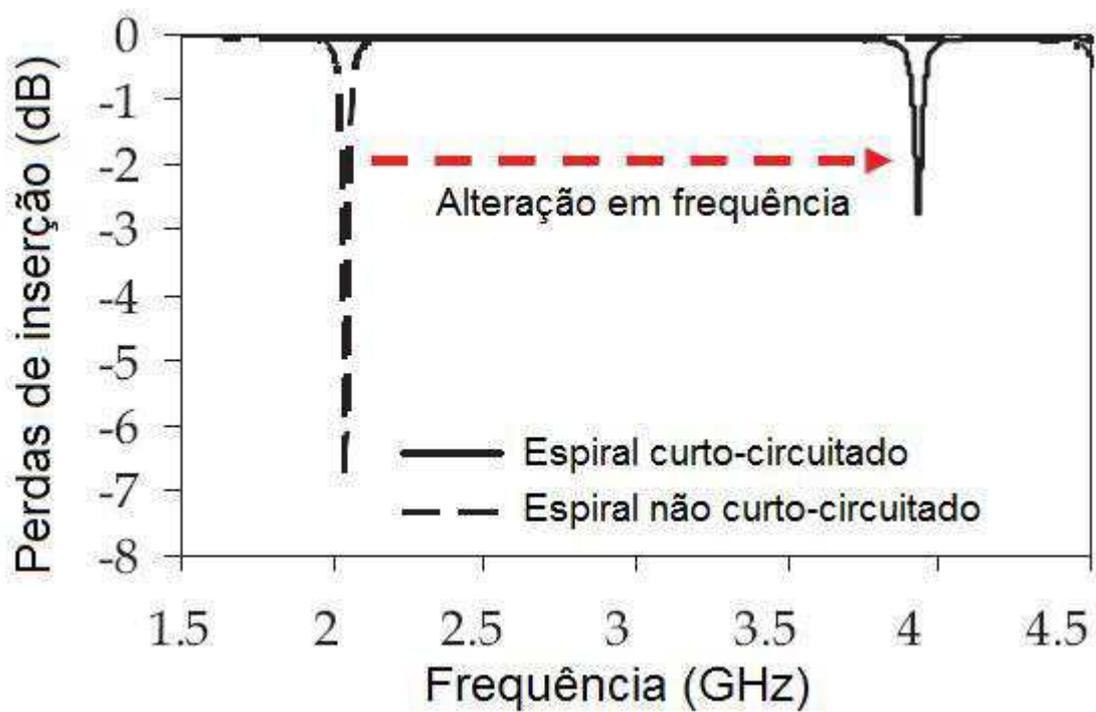


Figura 15 – Remoção da ressonância do espiral através de curto-circuito. Fonte: [2]

3 *Setup* para Medições

3.1 Teste na Câmara Anecoica

Apesar de existir pequenas variações nos *setups* propostos por cada autor, a maioria das medições é feita no interior de uma câmara anecoica. As medidas são em geral feitas usando a configuração biestática, como mostra a figura 18. As antenas usadas para transmissão e recepção são em geral idênticas e a maioria dos autores prefere a antena corneta, uma vez que esta possui uma alta diretividade (lóbulo primário bastante fechado), ganho elevado (em geral, entre 10 dBi a 20 dBi, porém podendo atingir valores maiores, como 30 dBi) e grande banda de operação. O sinal de entrada é gerado em um VNA (*Vector Network Analyser* – Analisador Vetorial de Redes). A potência de entrada pode variar a depender do experimento, porém muitos autores usam 0 dBm em toda faixa de operação. Para este *setup*, é muito importante que o VNA seja bem calibrado e é necessário que uma medida seja feita sem nenhum *tag*, para que a resposta do ambiente de fundo possa ser usado como referência. A resposta do ambiente de fundo pode ser subtraída diretamente no VNA se essa funcionalidade estiver disponível ou em pós-tratamento.

No início deste TCC, previa-se que as medições seriam feitas na câmara anecoica localizada na UFCG. Porém, por falta de equipamentos para boa utilização da câmara anecoica, ela não pôde ser usada para medições.

3.2 Teste fora da Câmara Anecoica

Quando se deseja levar em consideração os efeitos do ambiente ao redor do *tag*, então o *setup* é feito fora da câmara anecoica. As demais configurações, no entanto, permanecem as mesmas: o gerador do VNA, devidamente calibrado, é utilizado para o sinal de entrada, duas antenas estão ligadas a ele, uma de transmissão, outra de recepção, geralmente idênticas e de preferência corneta. A figura 19 mostra o *setup* adotado em [2] para medir a resposta do *tag* da figura 16.

Devido à impossibilidade de utilização da câmara anecóica, o *setup* das medições realizadas neste trabalho é parecido com o da figura 19. No entanto, as antenas não foram cornetas. Apesar de haver antenas cornetas disponíveis no LEMA (Laboratório de Eletromagnetismo e Micro-ondas Aplicados da UFCG), não havia adaptador da antena corneta para o VNA, de tal maneira que as antenas não puderam ser utilizadas. Foram utilizadas duas antenas log-periódicas não-idênticas, o que prejudica as medições. Porém, estes não foram os únicos problemas encontrados durante as medições (para mais detalhes, vide seção 5.2).

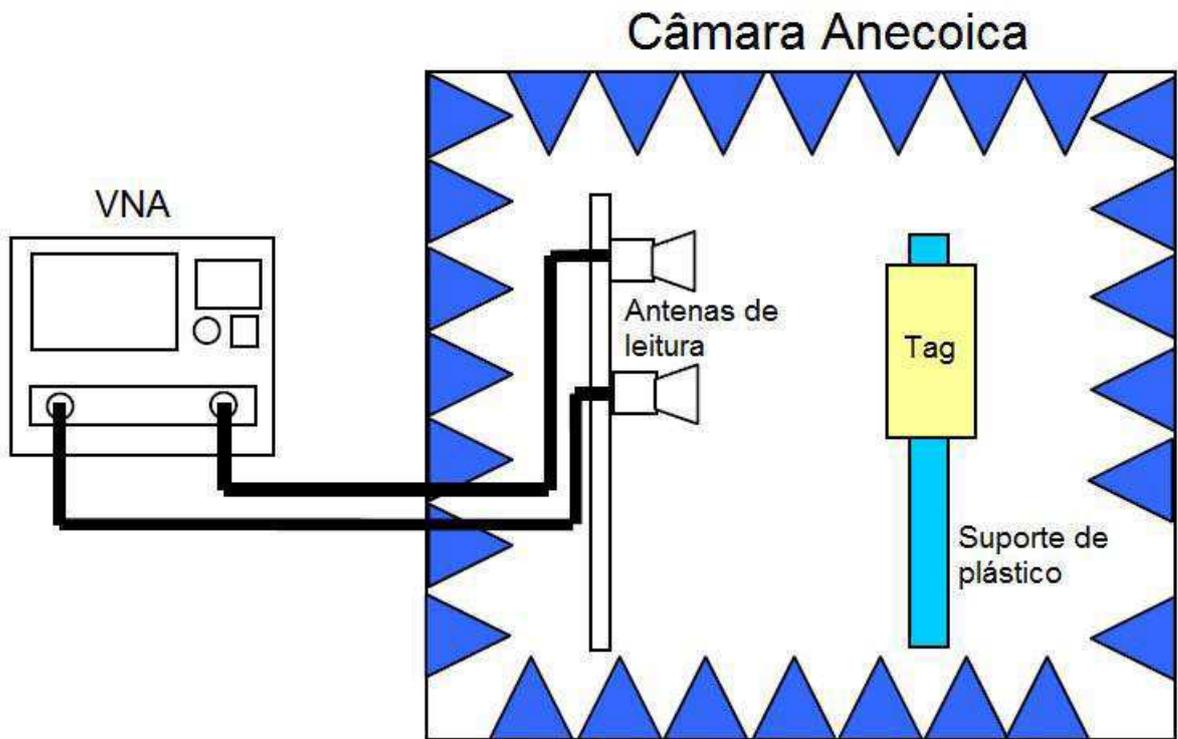


Figura 18 – Esquema do *setup* típico para medição de *tags* RFID sem *chip* em uma câmara anecoica. Fonte: [2]

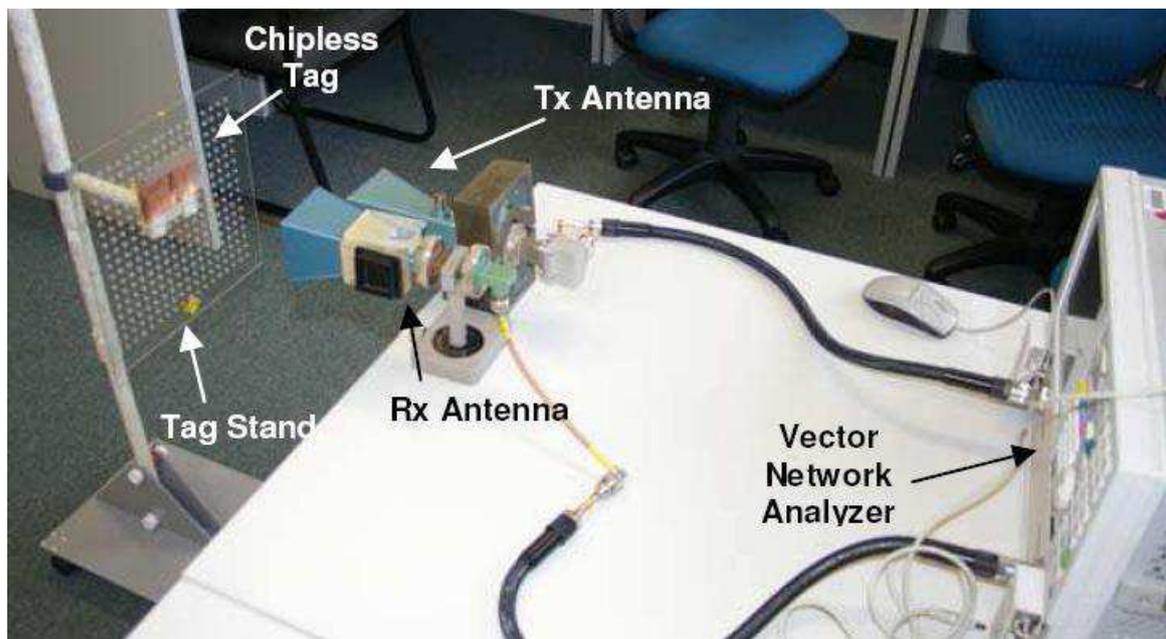


Figura 19 – Fotografia do *setup* experimental feito por Preradovic e Karmakar para medição do *tag* da figura 16. Fonte: [2]

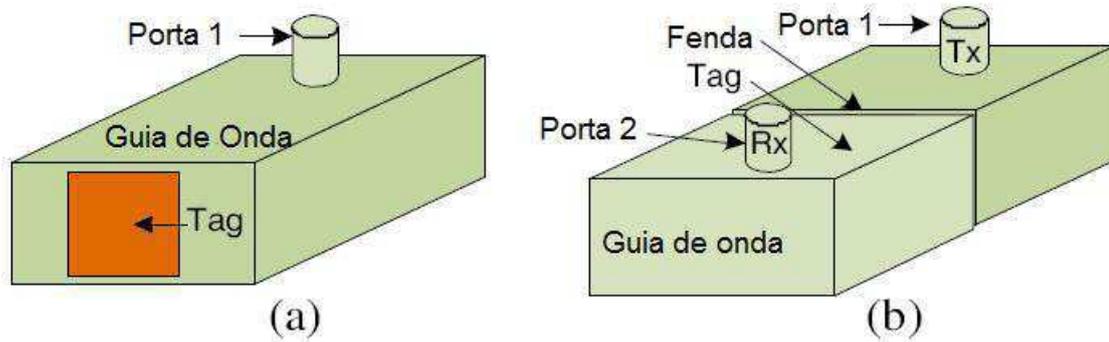


Figura 20 – Setup com guias de onda. (a) Por aproximação; (b) Por inserção. Fonte: [1]

3.3 Testes com Guias de Onda

Alguns tags são projetados para leitura em campo próximo, tais como cartões de controle de acesso, bilhetes de transporte público ou ingressos de show. Esses tags podem ser lidos aproximando-os em frente a um guia de onda e medindo o valor das perdas de retorno (*return loss* – parâmetro S_{11}), conforme a figura 20(a). Já tags feitos para cartões de crédito ou notas bancárias podem ser lidos ao ser inseridos em uma fenda dentro de um guia de onda e medir-se as perdas de inserção (*insertion loss* – parâmetro S_{21}), conforme a figura 20(b).

4 Desenvolvimento do *Tag* Proposto

Inicialmente, o *tag* desenvolvido neste trabalho seria utilizado no TCC *Sistema de Identificação por Rádio Frequência sem Chip em Rádio Definido por Software*, do aluno Felipe Fideles. Este trabalho visa elaborar o projeto de um leitor para um sistema RFID. No entanto, o *hardware* utilizado pelo discente em seu TCC impõe uma grande limitação de banda passante (12.5 MHz). Como mostrado no capítulo 2, um dos métodos mais compactos em termos de banda espectral necessita de, no mínimo, 50 MHz para codificação de um bit. Então, o projeto de desenvolver um *tag* para o TCC de Fideles foi descartado.

Na maioria dos trabalhos em *RFID* sem *chip*, o *tag* é desenhado para ser impresso diretamente no produto. Porém, na fase de teste, sempre são utilizados bons dielétricos, com baixas perdas. Apesar de alguns artigos proporem *tags* fabricados em FR4, um dos dielétricos mais conhecidos, de baixo custo, facilmente manipulável, porém com perdas significativas, a maioria dos protótipos são desenvolvidos em materiais mais elaborados. O substrato utilizado neste trabalho foi o Rogers TMM3, cuja permissividade relativa é de 3,27 e a tangente de perdas é da ordem de 10^{-3} para frequências até 10 GHz. A espessura do substrato é de 1,6 mm. Uma vez que a placa de substrato disponível para fabricação do *tag* era de apenas 15 cm x 15 cm, e considerando que no processo de fabricação existe perda de material, os *tags* a serem desenvolvidos não poderiam ter dimensões muito grandes. Desta maneira, a topologia de curvas de preenchimento espacial foi eliminada.

Por questões de simplicidade de produção e simulação, foi escolhida a topologia de ressoadores com fendas em anel. A frequência de trabalho foi imposta pelas antenas de transmissão e recepção do *setup* de medição. Como explicado na seção 3.1, inicialmente os testes seriam realizados na câmara anecoica localizada na UFCG. As antenas desta câmara funcionam na banda de 1 GHz a 6 GHz. Estabeleceu-se como objetivo então a codificação de 3 bits nesta banda, ocupando o menor espectro de frequência possível.

A frequência de operação do *tag* sofreu alterações durante o desenvolvimento deste TCC, devido às constantes mudanças no *setup* das medições e da faixa de operação em frequência das antenas a serem utilizadas. Por fim, coincidentemente, a faixa de frequência das antenas de medição foi a mesma das inicialmente previstas, de tal maneira que o projeto desenvolvido inicialmente foi utilizado, apesar de outros projetos de *tags* terem sido desenvolvidos.

4.1 Simulação

As simulações feitas neste TCC foram realizadas em CST (*Computer Simulation Technology*), no ambiente *CST Microwave Studio*. Essa é uma das ferramentas mais poderosas para

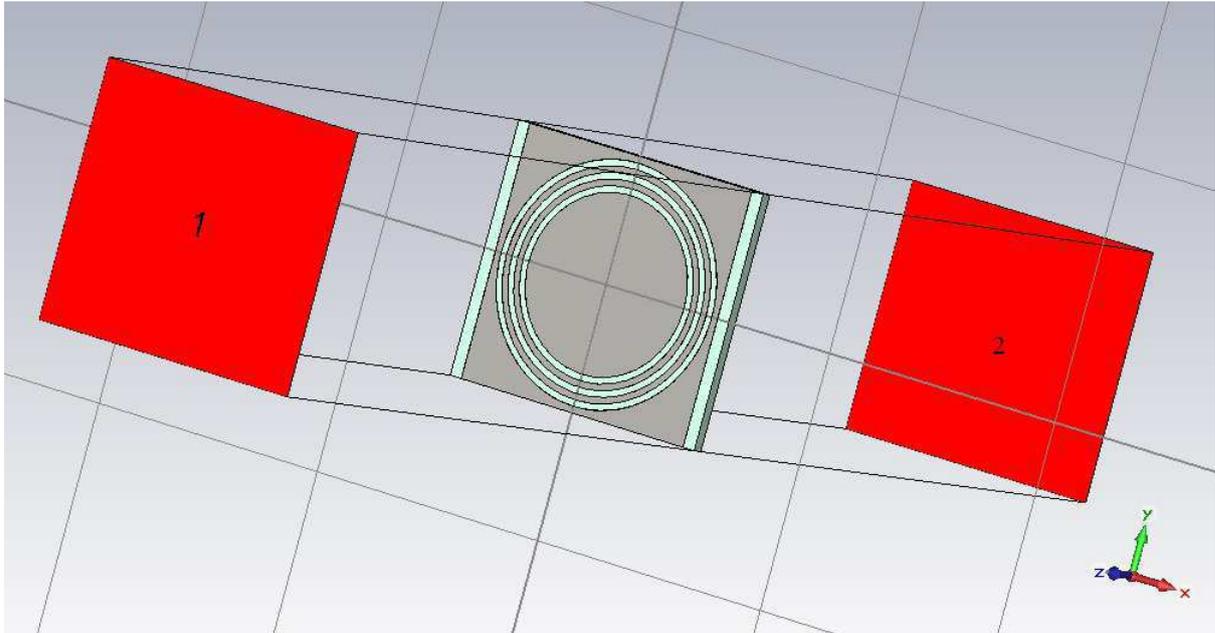


Figura 21 – Primeira estrutura do tag a ser proposto.

simulações 3D rápidas e precisas de dispositivos que operam em alta frequência. As simulações em CST, diferentemente das dos seus concorrentes, é baseada em método no domínio do tempo, o que torna a simulação muito mais rápida. No entanto, simulações com método no domínio da frequência também são possíveis. Diversas estruturas podem ser simuladas no CST *Microwave Studio*, como antenas, filtros, acopladores, estruturas planares ou de múltiplas camadas, entre outros. Além disso, simulações de Compatibilidade Eletromagnética também podem ser feitas com esta ferramenta.

A primeira estrutura simulada é mostrada na figura 21. Todos os elementos deste projeto são parametrizados, de tal maneira a facilitar a alteração de dimensões, sem a necessidade de refazer o desenho. Como nesta etapa do projeto o substrato ainda não tinha sido escolhido, para as primeiras simulações, foi utilizado o substrato RO4003, cuja permissividade relativa é 3,55, simulado sem perdas, com espessura 1,0 mm. Este substrato foi escolhido porque é o mesmo utilizado em [5], que usa ressoadores em formato de anel. Além disso, foi considerado um condutor elétrico perfeito (PEC – *Perfect Electric Conductor*). Nesta simulação, foram adotadas as seguintes dimensões: 22 mm x 20 mm de substrato, antena *patch* de 20 mm de lado, raios externos dos anéis de 9 mm, 8 mm e 7 mm e fenda de 0,5 mm.

Alguns aspectos importantes desta simulação são a excitação e as condições de contorno. A excitação é feita por portas de ondas guiadas (*waveguide ports*). Essas portas (numeradas na figura 21) supõem que a excitação provém de um guia de onda retangular infinitamente extenso. Como o tag projetado será medido em campo distante, é preciso garantir que a onda que o excita seja TEM (*Transverse Electromagnetic* – Eletromagnética Transversa, ou seja, apenas com componentes transversais ao sentido propagação). Para garantir que a onda incidente

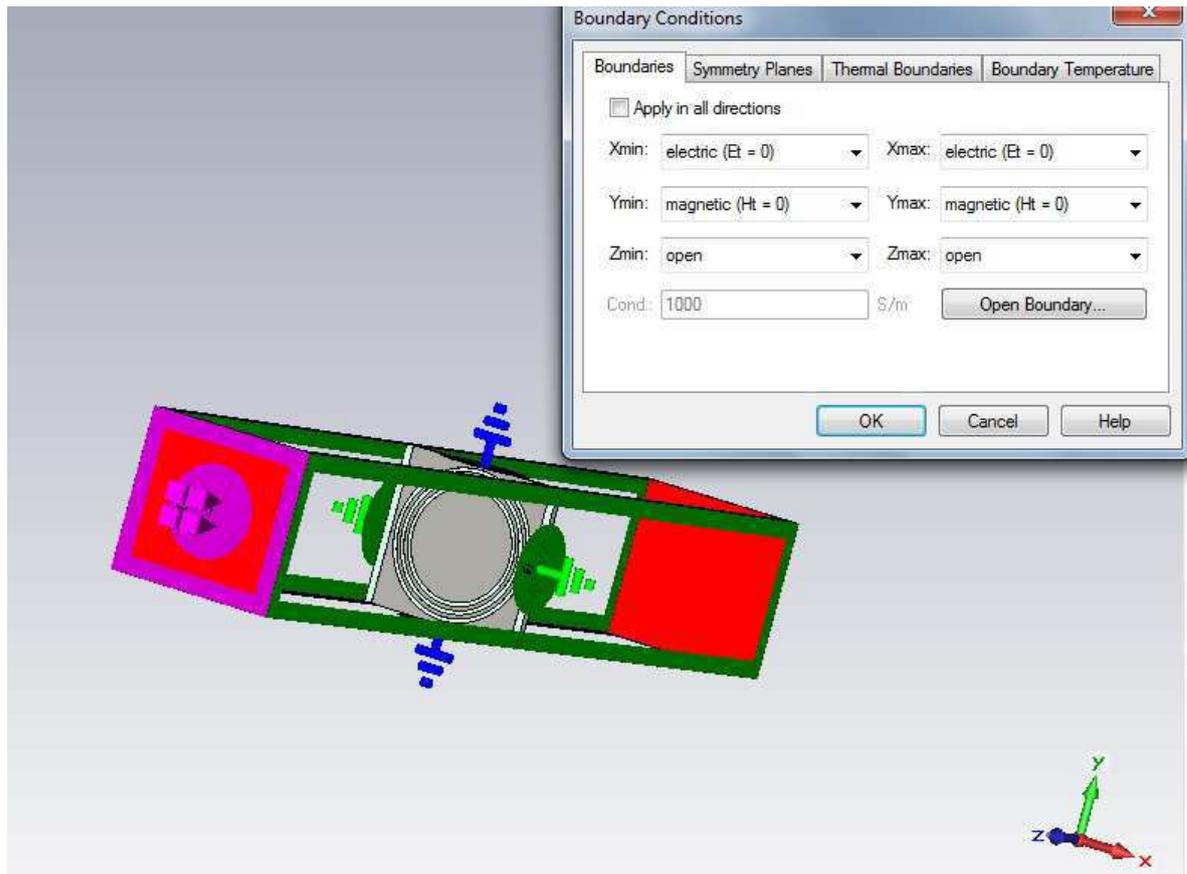


Figura 22 – Condições de contorno da simulação da figura 21.

seja desta natureza, é preciso estabelecer condições de contorno adequadas. Assim, no retângulo de cálculo, em duas paredes opostas, é preciso estabelecer a condição de parede elétrica perfeita (campo elétrico tangencial nulo) e nas outras duas paredes opostas, a condição de parede magnética perfeita (campo magnético tangencial nulo). Desta maneira, apenas uma onda TEM pode se propagar. Para as paredes que coincidem com as portas de excitação, escolhe-se uma condição de contorno aberta. A figura 22 mostra a escolha das condições de contorno.

As condições de contorno explicam porque o substrato não apresenta o mesmo tamanho da antena *patch*. É necessário que a antena não esteja em contato com a parede com condição de parede elétrica perfeita, pois senão haveria um curto-circuito. Isso explica a introdução de uma pequena quantidade de substrato na direção das paredes elétricas perfeitas.

A figura 21 ilustra o *tag* de número binário 111. Ou seja, para o *tag* proposto por este trabalho, a presença de uma ressonância indica o bit 1. É fácil perceber que os *tags* de outros números binários diferem-se do da figura 21 apenas pela presença ou ausência de alguma(s) fenda(s). Por exemplo, no *tag* 101, a fenda do meio é suprimida, enquanto no *tag* 000, todas as fendas são suprimidas, reduzindo a estrutura a uma antena *patch*.

A figura 23 mostra o parâmetro S_{11} dos *tags* simulados. Percebe-se que a frequência

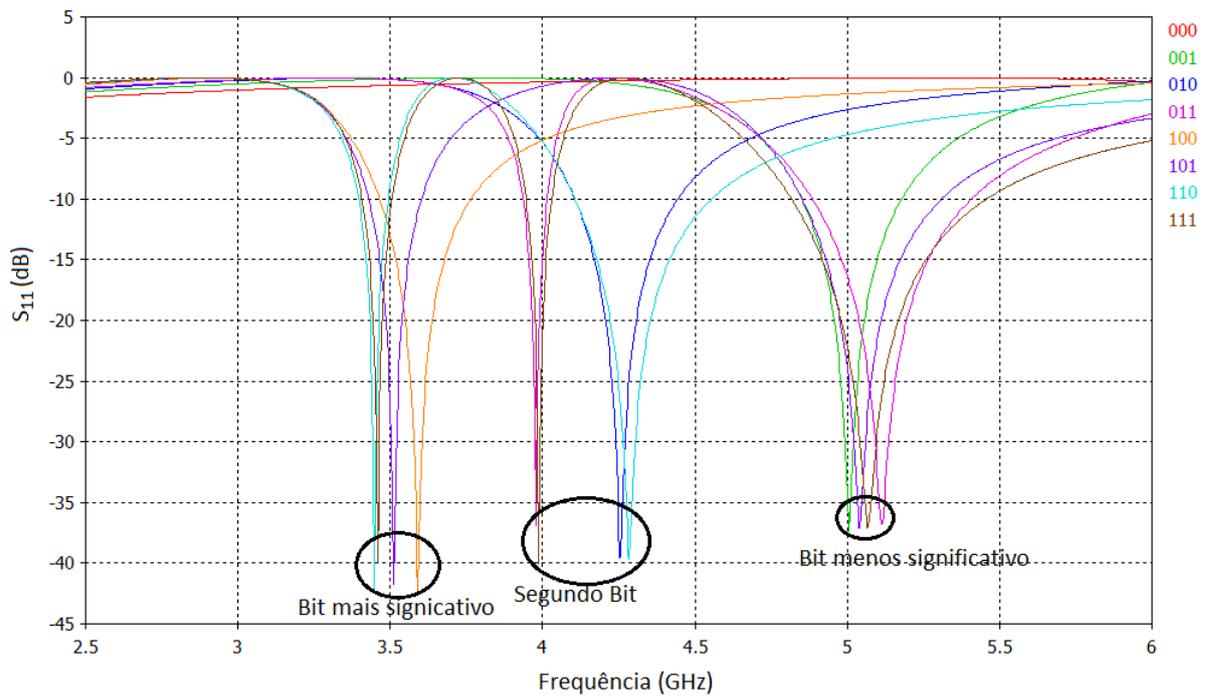


Figura 23 – Resultado da simulação dos tags propostos - parâmetro S_{11} .

de ressonância do bit mais significativo e o do menos significativo não varia muito, porém a frequência de ressonância do segundo bit apresenta uma boa variação. No entanto, a leitura não é prejudicada, pois é facilmente perceptível a boa codificação dos bits. Contudo, ao fazer a análise do parâmetro S_{21} , mostrado na figura 24, percebe-se que a codificação não é tão bem feita neste parâmetro, havendo apenas uma boa coincidência de frequência de ressonâncias para o bit mais significativo (como explicitado na figura 24). Percebe-se que a ressonância do bit menos significativo do tag 001 ocorre muito próximo da ressonância do segundo bit dos tags 110 e 111. Além disso, as ressonâncias referentes ao segundo bit apresentam uma variação mais importante neste parâmetro. É interessante notar que a ressonância da antena *patch* do tag 000 está presente na figura 24, porém esta ressonância não atrapalha a codificação, uma vez que ela ocorre em uma frequência mais elevada quando comparada à frequência das demais ressonâncias. Conclui-se que um novo projeto deve ser feito se a codificação for desejada em ambos os parâmetros S_{11} e S_{21} .

Uma análise mais atenta das figuras 23 e 24 permite concluir que a frequência de ressonância do bit do meio é maior quando o bit mais significativo é igual a 1 (ou seja, quando existe ressonância para o bit mais significativo). Da mesma forma, se o bit menos significativo for 1 (e houver ressonância para este bit), a ressonância do segundo bit cai em frequência. Percebe-se que as ressonâncias tendem a se afastar uma da outra em frequência. Uma maneira de tentar evitar este comportamento é colocar duas fendas em anel extras para criar uma ressonância em uma frequência inferior à do bit mais significativo e superior à do bit menos significativo. Como as ressonâncias tendem a se afastar uma da outra, a introdução de uma ressonância em

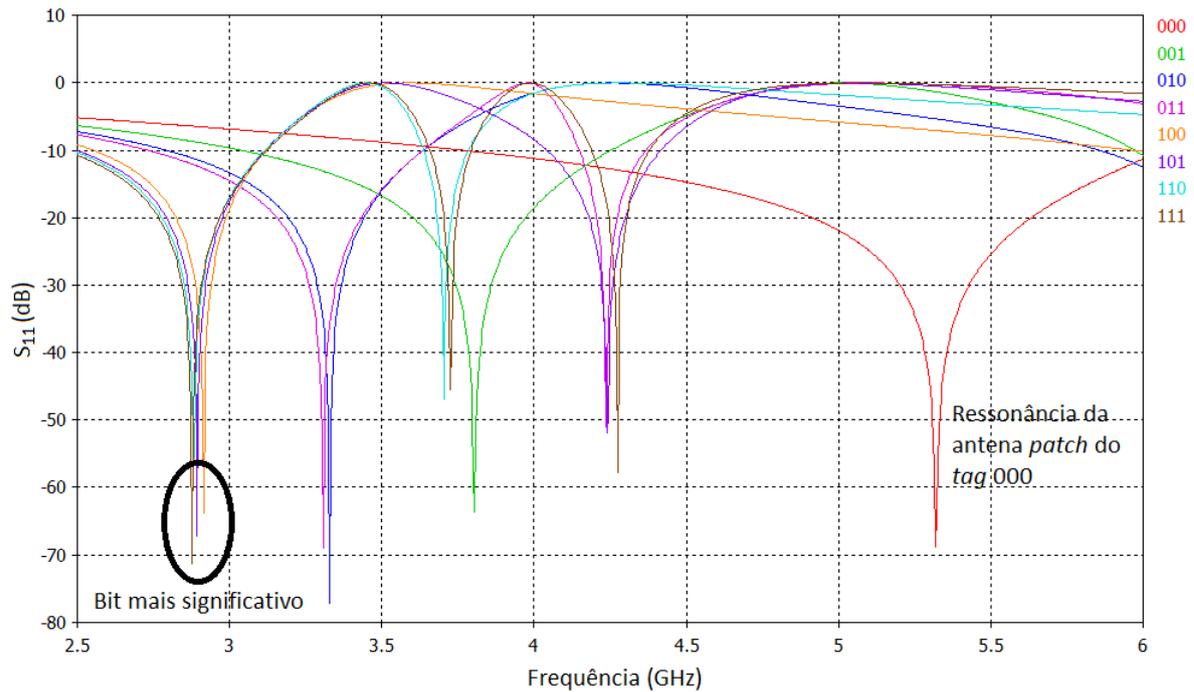


Figura 24 – Resultado da simulação dos tags propostos - parâmetro S_{21} .

uma frequência mais baixa e outra em uma frequência mais alta tende a cancelar este efeito.

Além da introdução das novas fendas, é interessante afastar um pouco mais as fendas entre si para que o acoplamento entre elas seja menor. Como uma fenda de raio maior é inclusa, a área total do tag aumenta. O tag com as novas alterações é mostrado na figura 25. Quando estas simulações começaram a ser feitas, o substrato a ser utilizado já tinha sido confirmado e adquirido, de tal maneira que a simulação foi feita já com o RO TMM3. Com a troca de substrato, é de se esperar uma diferença entre frequências de ressonâncias, porém como a diferença de permissividade relativa é pequena, a alteração em frequência não é tão forte. Além disso, o condutor foi trocado para cobre. Neste novo tag, as dimensões são as seguintes: 31 mm x 30 mm de substrato, antena patch de 30 mm de lado, fendas de raios exteriores 12 mm, 10,5 mm, 9 mm, 7,5 mm e 6 mm e fenda de 0,5 mm.

Nesta nova estrutura do tag, as fendas das extremidades estão presentes em todos os tags. São as fendas dos meio e, portanto, a presença ou ausência de ressonância referentes a elas, que promovem a codificação de bits. Portanto, para esta nova estrutura, o tag referente a 000 não é mais uma antena patch simples, mas sim a antena carregada com dois ressoadores com fendas em anel. As ressonâncias causadas pelas fendas das extremidades devem ser desprezadas.

As figuras 26 e 27 mostram os parâmetros S_{11} e S_{21} da simulação. A simulação foi feita em uma banda de frequência maior para que as cinco ressonâncias (três de cada bit mais as duas introduzidas) possam ser vistas. É notável que a codificação se dá de maneira mais clara, principalmente em relação ao parâmetro S_{21} . Este é, então, o protótipo do tag a ser fabricado.

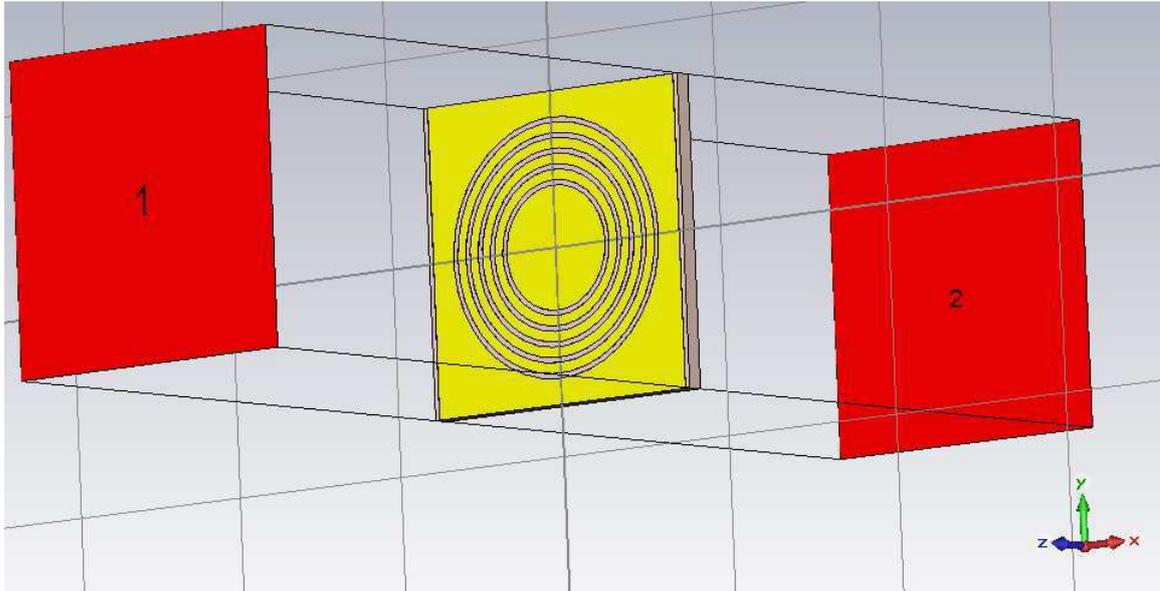


Figura 25 – Nova estrutura do tag a ser proposto.

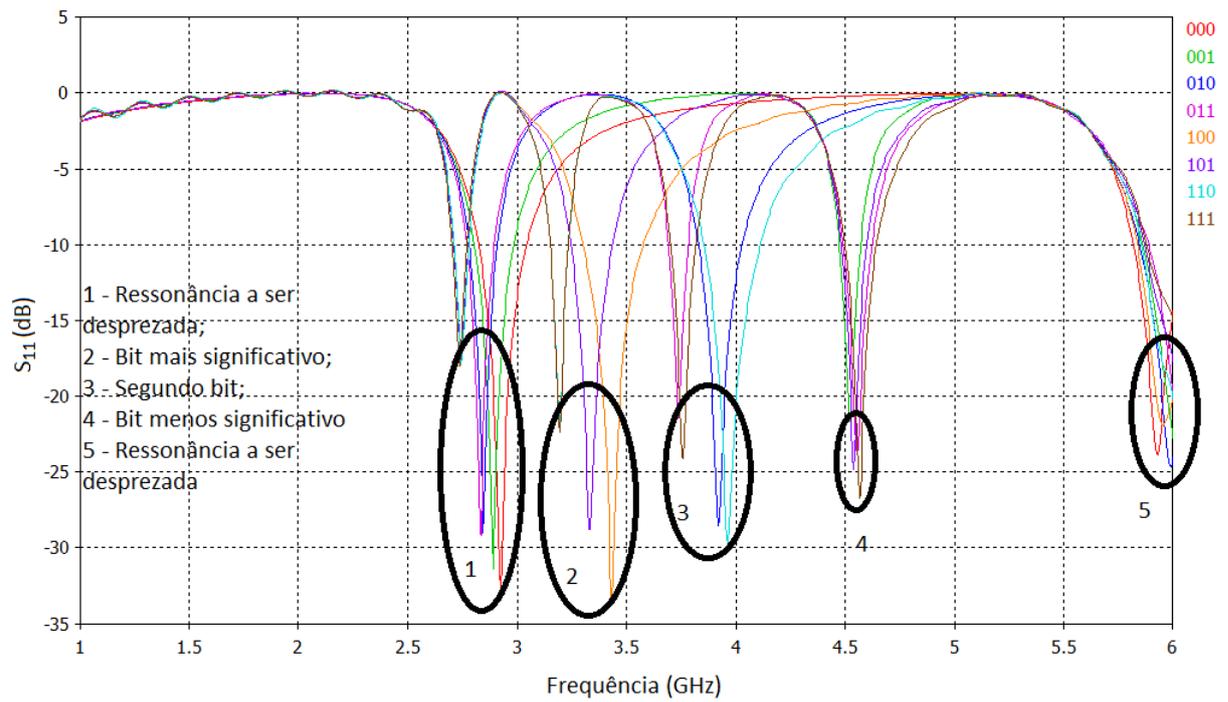


Figura 26 – Resultado da simulação dos novos tags propostos - parâmetro S_{11} .

Nas simulações, vê-se que são codificados 0,333 bits/cm² e é necessário uma banda de 0,467 GHz/bit.

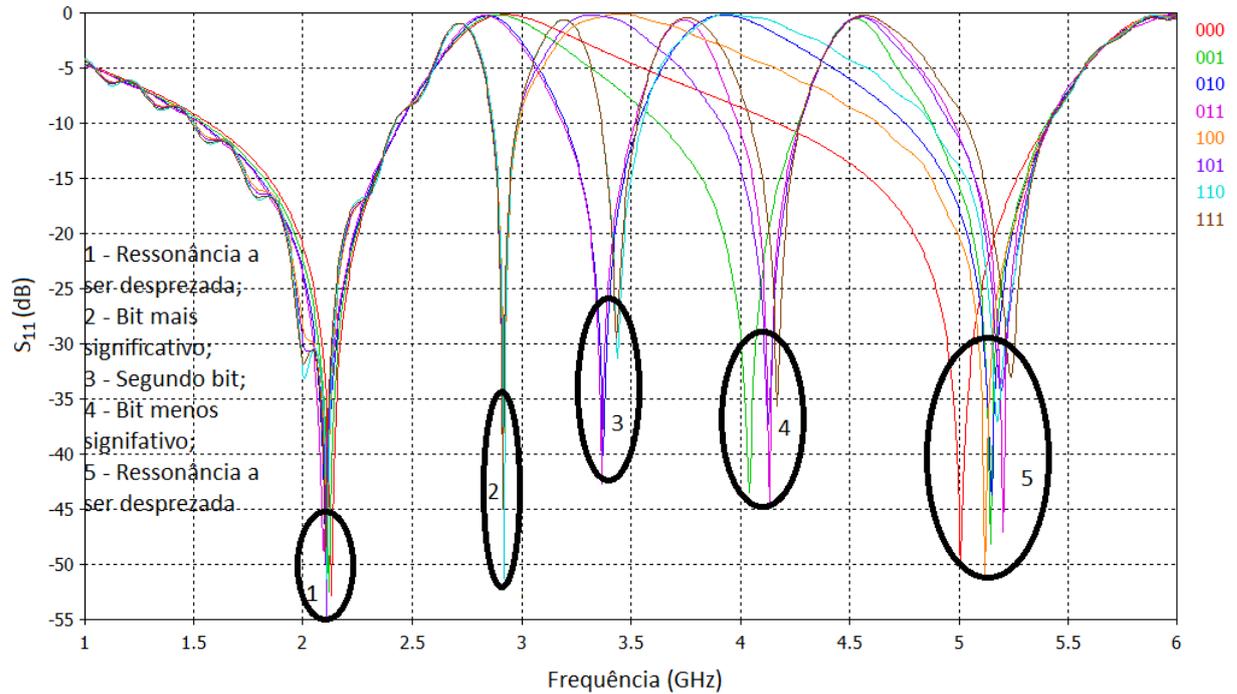


Figura 27 – Resultado da simulação dos novos tags propostos - parâmetro S_{21} .

4.2 Fabricação

O tag referente ao número binário 111 foi produzido com sucesso na UFCG. O tag foi fabricado na estação para confecção de circuitos impressos ProtoMat 62, da LPKF, do LEM-CAD (Laboratório de Ensaio, Manutenção, Calibração, Aferição e Desenvolvimento).

Para confeccionar o tag, é necessário importar o projeto para o CircuitCAM, software auxiliar das estações LPKF. O CircuitCAM aceita vários tipos de formatos, entre eles o .dxf. O CST exporta os projetos neste formato, porém, o arquivo .dxf produzido pelo CST não explicita quais partes do circuito são preenchidas de metal. Desta maneira, é necessário editar no AutoCAD o arquivo .dxf gerado pelo CST. A figura 28 mostra o arquivo .dxf gerado pelo CST para o tag 111 e o arquivo .dxf editado, pronto para o CircuitCAM e a confecção do tag.

A figura 29 mostra o tag já fabricado.

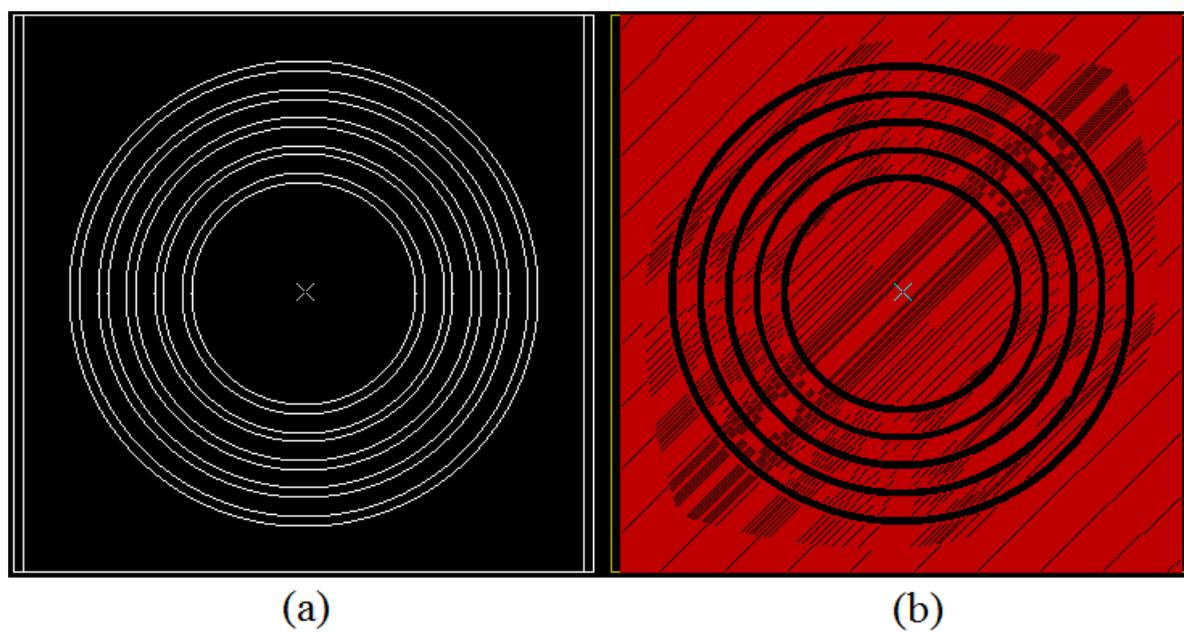


Figura 28 – (a) Arquivo .dxf do *tag* da figura 25 gerado pelo CST; (b) Arquivo .dxf editado (área metálica indicada).

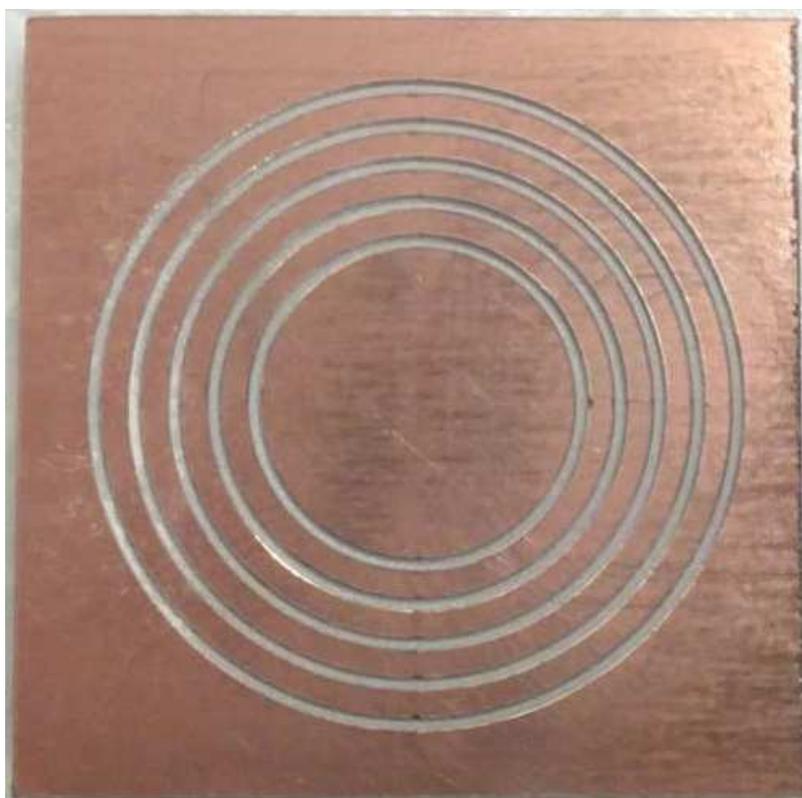


Figura 29 – *Tag* desenvolvido neste TCC.

5 Resultados

5.1 Setup

Como explicado no capítulo 3, os planos de *setup* foram constantemente alterados devido à falta de equipamento que impossibilitava a execução do *setup* anteriormente pensado. Ao final, os testes com o *tag* da figura 29 foram feitos com antenas log-periódicas diferentes para transmissão e recepção. O sinal de entrada era gerado no VNA (Rohde & Schwarz ZVA), que calculava os parâmetros de espalhamento S_{11} e S_{21} .

Um procedimento importante antes da realização dos testes é a calibração, que consiste em indicar para o VNA o plano de referência para o cálculo dos parâmetros de espalhamento. Também é uma maneira de desconsiderar os efeitos dos fios que são usados para ligar as antenas ao VNA. Existem vários tipos de calibração para o VNA ZVA da Rohde & Schwarzs. A calibração usada neste teste foi a TOSM. Para realizá-la, altera-se a impedância do final do fio com conectores específicos (um com um curto-circuito, um com um circuito aberto e outro com a impedância casada) e faz-se uma medição para cada conector em cada fio. Em seguida, ambos os fios são conectados para uma última medição. Uma vez terminado este procedimento, o VNA está calibrado e as medições podem ser feitas.

A figura 30 mostra o *setup* usado para fazer as medições, que foram realizadas no LEMA.

5.2 Medições

A figura 31 mostra o resultado das medições. É possível notar que a medição não foi boa, uma vez que o parâmetro S_{11} apresenta valores maiores que 0 dB. Além disso, teoricamente, as medições com o *tag* deveriam ser menores que as medições sem o *tag*, porém isso não é verdade para todos os pontos da curva. Estes resultados incoerentes podem ser resultados de uma calibração mal feita. De fato, um dos conectores para calibração com ambos os fios conectados está quebrado, de tal modo que a calibração feita pode não ter sido bem sucedida.

Fazendo a subtração do resultado do ensaio da resposta do *tag* com o sem *tag*, obtém-se da figura 32. Os picos positivos de S_{11} confirmam que as medições feitas não foram satisfatórias. Porém, nota-se que todos os picos negativos de S_{11} simulados são acompanhados de picos negativos de S_{11} medidos.

Novas medições devem ser feitas para realmente comprovar que a simulação foi bem realizada, porém a UFCG não conta com recursos suficientes, uma vez que a câmara anecoica

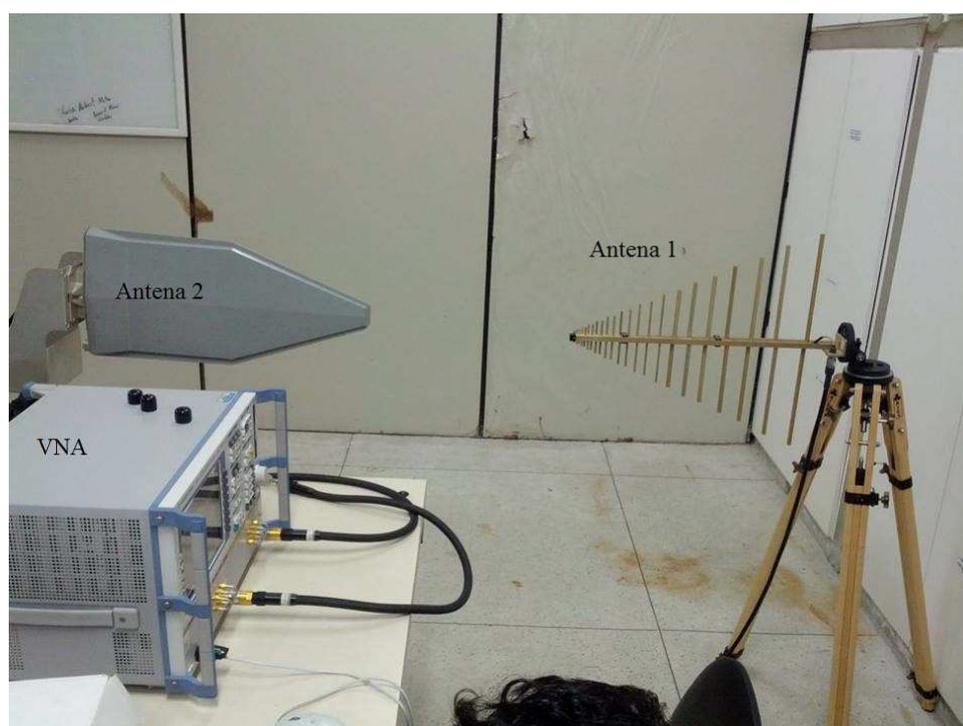


Figura 30 – Setup da medição do tag da figura 29

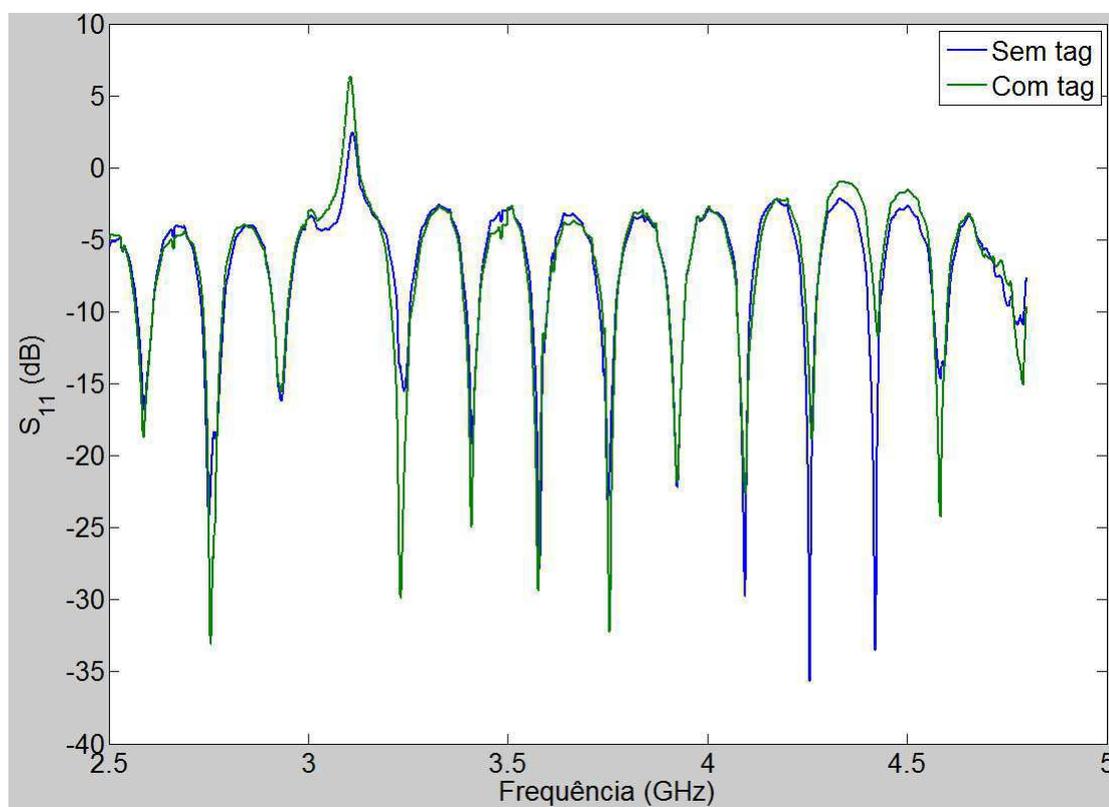


Figura 31 – S_{11} com e sem o tag.

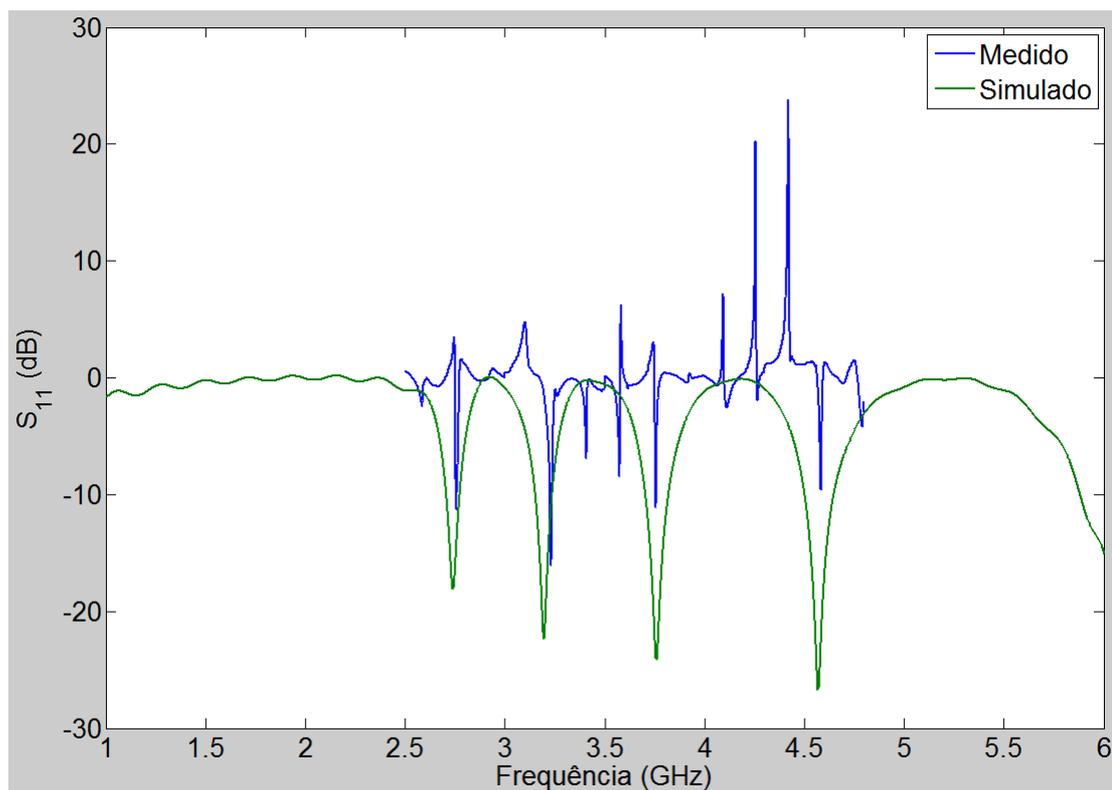


Figura 32 – Subtração dos resultados do ensaio com e sem *tag* para comparação com a simulação.

ainda está impossibilitada de ser usada e os recursos do LEMA são insuficientes.

Conclusão

O RFID é a tecnologia candidata a substituir o código de barra devido a suas grandes vantagens, como leitura fora da linha de visão e maior alcance. No entanto, ainda existe um amplo mercado de itens que ainda são rastreados pela tecnologia óptica do código de barra. Isso se deve principalmente ao custo da tecnologia, que torna-se bastante cara devido à presença de *chip* nos *tags* clássico. Visando baratear esta tecnologia, muita pesquisa está sendo desenvolvida em RFID sem *chip*.

Existem várias topologias de *tags* RFID sem *chip*. A estrutura que consegue codificar mais bits em menos banda é a baseada em curvas de preenchimentos espacial, porém o *tag* cresce linearmente com o número de bits. A topologia com ressoadores com fendas em anel consegue resolver o problema do tamanho do *tag*, codificando vários bits em uma pequena superfície. No entanto, a eficiência espectral é menor. Contudo, foi utilizando ressoadores em espira que se conseguiu até hoje o maior número de bits codificados em um *tag* RFID sem *chip*.

Os testes para verificação do bom funcionamento do *tag* geralmente são feitos em câmara anecoicas. Todavia, se for desejado incluir os efeitos do ambiente, ou até mesmo na ausência de uma, medições com VNA e duas antenas na configuração bestática podem ser feitas fora da câmara. A depender do projeto, os *tags* também podem ser medidos em guias de onda.

O *tag* realizado neste TCC utiliza a topologia de ressoadores com fendas em anel. Adotou-se a estratégia da inclusão de mais duas fendas em anel nas extremidades na tentativa de controlar a frequência de ressonância de cada fenda intermediária, para melhor codificação dos bits. Esta estratégia mostrou-se eficiente nas simulações, porém não pôde ser comprovada com as medições, uma vez que estas não foram satisfatórias, pois provavelmente o VNA não foi bem calibrado. No entanto, foram vistas ressonâncias nas frequências previstas pela simulação.

Existiram muitas dificuldades durante a realização deste TCC. A primeira foi o tempo necessário para obtenção e familiarização com o CST. Embora sejam realizadas algumas pesquisas na universidade utilizando esta ferramenta, nunca nenhum aluno ou professor havia tentando simular uma antena puramente passiva. Encontrar boas diretrizes para excitação e simulação foi uma tarefa árdua. As outras dificuldades envolvem aspectos deficientes da universidade, como a lentidão da fabricação do *tag* e a falta de recursos para executar uma boa medição.

Bibliografia

[1] ISLAM, M. A. et al. Compact Printable Orientation Independent Chipless RFID Tag. **Progress In Electromagnetics Research C**, Vol. 33, 55-66, 2012.

[2] PRERADOVIC, S.; KARMAKAR, N. Fully Printable Chipless RFID. In: PRERADOVIC, S. (Ed.) **Advanced Radio Frequency Identification Design and Applications**. Intech, 2011

[3] MCVAY, J.; HOORFAR, A.; ENGHETA, N. Theory and Experiments on Peano and Hilbert Curve RFID Tags. In: SPIE WIRELESS SENSING AND PROCESSING, 2006. **Anais...** 2006.

[4] VENA, A.; PERRET, E.; TEDJINI, S. Novel Compact RFID Chipless Tag. In: PROGRESS IN ELECTROMAGNETICS RESEARCH SYMPOSIUM, 2011. Marrakesh. **Anais...** Marrakesh, 2011. p. 1062 - 1066.

[5] _____. High-Capacity Chipless RFID Tag Insensitive to the Polarization. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Vol. 60, No. 10, Oct. 2012.

[6] PRERADOVIC, S.; KARMAKAR, N. Design of Fully Printable Planar Chipless RFID Transponder with 35-bit Data Capacity. In: EUROPEAN MICROWAVE CONFERENCE, 39., 2009. Roma. **Anais...** Roma, 2009. p. 13-16.

[7] BALBIN, I.; KARMAKAR, N. Novel Chipless RFID Tag for Conveyor Belt Tracking using Multi-Resonant Dipole Antenna. In: EUROPEAN MICROWAVE CONFERENCE, 39., 2009. Roma. **Anais...** Roma, 2009. p. 1109-1112.

[8] GIRBAU, D. et al. Frequency-Coded Chipless RFID Tag Based on Dual-Band Resonators. In: **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**. Vol. 11, 2012.

[9] ISLAM, M. A.; BHUIYAN, M. S.; KARMAKAR, N. A Novel Compact Chipless RFID Tag and Near-Field Reader. In: ASIA-PACIFIC MICROWAVE CONFERENCE 2011.

Anais... 2011.

[10] MUKHERJEE, s; CHAKRABORTY, G. **Chipless RFID using Stacked Multi-layer Patches**. IEEE: 2009.

[11] PRERADOVIC, S.; KARMAKAR, N. Low Cost Chipless RFID Systems. In: .____. **Multiresonator-Based Chipless RFID: Barcode of the Future**. Springer Science + Business Media. 2012.