



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Dissertação de Mestrado

**Tratamento de Colisões na Leitura de
Etiquetas RFID sem Chip**

Camila Duarte Rodrigues Lopes

Francisco Marcos de Assis
Orientador

Edmar Candeia Gurjão
Orientador

Campina Grande
Março de 2014

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Tratamento de Colisões na Leitura de Etiquetas RFID sem Chip

Camila Duarte Rodrigues Lopes

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Informação/Comunicações.

Francisco Marcos de Assis
Orientador

Edmar Candeia Gurjão
Orientador

Campina Grande
©Camila Duarte Rodrigues Lopes

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

L864t Lopes, Camila Duarte Rodrigues.
Tratamento de colisões na leitura de etiquetas RFID sem chip/Camila Duarte Rodrigues Lopes. – Campina Grande, 2014.
81f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2014.

“Orientação: Prof. Dr. Francisco Marcos de Assis, Prof. Dr. Edmar Candeia Gurjão”.

Referências.

1. Identificação por Rádio Frequência (RFID). 2. Etiquetas sem Chip. 3. Tratamento de Colisões. 4. Transformada Fracionário de Fourier. I. Assis, Francisco Marcos de. II. Gurjão, Edmar Candeia. III. Título.

CDU 621.396(043)


" TRATAMENTO DE COLISÕES NA LEITURA DE ETIQUETAS RFID SEM CHIP"

CAMILA DUARTE RODRIGUES LOPES

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 14/03/2014


FRANCISCO MARCOS DE ASSIS, Dr., UFCG
Orientador(a)


EDMAR CANDEIA GURJAO, D.Sc., UFCG
Orientador(a)


ALEXANDRE JEAN RENÉ SERRES, Dr., UFCG
Examinador(a)


HELDER ALVES PEREIRA, Dr., UFCG
Examinador(a)


RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

Aos meus grandes amores: minha família.

Agradecimentos

Sempre achei que uma das melhores sensações que alguém pode experimentar na vida é a de uma tarefa realizada com êxito. Mais uma vez confirmo essa sensação. E a melhor parte é perceber que existem pessoas sempre me apoiando nos caminhos escolhidos por mim.

Minha eterna gratidão aos meus pais, Nelma e Cícero, pela educação e ensinamentos acerca da vida, pelo carinho e amor incondicionais e aos exemplos de pessoas nos quais sempre me espelho ao trilhar meu próprio caminho. Agradeço ao meu irmão Bruno, pela amizade e carinho, que mesmo à distância nunca muda e sempre me faz lembrar o quanto é confortável saber que existe no mundo um amor tão especial.

Agradeço a todo apoio dos meus amigos em Campina Grande, por sempre me lembrarem o quanto é incrível a oportunidade que a vida nos oferece de conhecer pessoas diferentes e maravilhosas. Meu agradecimento especial à minha amiga-irmã Ísis, pelas incontáveis horas de companheirismo, pelo suporte em todo e qualquer momento e pela oportunidade de conhecer sua família incrível. Ítalo, Falconi, Felipe, Sara, Bobby, Ricardo, Janaína, Talita, Laís e várias outras pessoas lindas que Campina me deu de presente, muito obrigada. Agradeço à Larissa, por ser essa pessoa maravilhosa e pelo suporte nessa caminhada, é difícil expressar o quanto me sinto feliz por conhecer e poder contar com alguém tão especial.

Expresso minha admiração e agradecimento aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, com quem tanto aprendi e que me transmitiram conhecimentos essenciais para minha formação não só no âmbito acadêmico, mas também para outras áreas da minha vida. Meus mais sinceros agradecimentos ao Prof. Edmar, pela confiança, orientação, palavras de incentivo e por sempre se mostrar como uma pessoa extremamente prestativa e disposta a ajudar em qualquer área da minha vida. Agradeço ao Prof. Francisco pela confiança depositada em mim e pela orientação no meu trabalho de Mestrado.

Divido o mérito desta conquista com todos que me ajudaram de alguma forma, desejando ter a sorte de contar sempre com todo esse apoio durante as etapas da minha vida que ainda estão por vir.

Comovo-me em excesso, por natureza e por ofício.

Acho medonho alguém viver sem paixões.

—GRACILIANO RAMOS (Memórias do Cárcere, 1953)

Resumo

O constante avanço tecnológico de áreas como a de identificação, rastreamento e sensoriamento de processos e elementos busca sempre alternativas para aumentar a velocidade e facilitar a troca de informações. A identificação por rádio frequência, conhecida pela sua sigla do inglês – RFID, apesar de não ser uma tecnologia recente, vem se destacando nesse sentido por possuir alguns atrativos que sistemas mais consolidados no mercado não possuem. Neste sentido, esforços vêm sendo feitos para que ocorra o barateamento dos custos de produção da RFID. Do resultado desses esforços, uma nova vertente de pesquisa relacionada à RFID surgiu nos últimos anos, o uso de sistemas com etiquetas sem circuito integrado. Como estes elementos são os mais numerosos desse sistema, essa retirada ajudaria a baratear substancialmente a fabricação. Porém, ao mudar dessa forma a arquitetura das etiquetas, outras questões começam a surgir, com a principal delas relacionando-se à comunicação dos elementos e seus problemas, como a colisão de leitura em ambientes com mais de uma etiqueta. Tendo isso em vista, o trabalho apresentado foca-se no tratamento de colisões de leitura para RFID sem chip com etiquetas que utilizam a assinatura espectral como forma de codificação da informação. Como ferramenta no processamento dos sinais envolvidos na comunicação do sistema, utilizou-se a Transformada Fracionária de Fourier e suas propriedades matemáticas na separação dos sinais colidentes e os conceitos de detecção de distância mínima para recuperação da informação binária a partir dos sinais separados previamente. O método utilizado foi simulado e produziu os resultados esperados, com a separação efetiva dos sinais e índices satisfatórios na identificação da informação binária das etiquetas.

Palavras-chave: RFID, Etiquetas sem chip, Tratamento de colisões, Transformada Fracionário de Fourier.

Abstract

The constant technological advancement in areas such as identification, tracking and sensing of processes and elements always looks for alternatives to increase speed and facilitate the exchange of information. The radio frequency identification, known by its acronym in English – RFID, although it's not a new technology, has been pointed as a important alternative in these areas, because of some attractive characteristics that other systems on the market do not have. In this regard, efforts have been made in order to reduce production costs of the RFID elements. As a result, a new strand of research related to RFID has emerged in recent years, the use of tags that do not have integrated circuit. As these elements are the most numerous of the system, this change would help to reduce the production costs substantially. However, changing the tag's architecture in this way, brings other issues to discussion, with the main one relating to the communication signals between the elements and their problems, such as the reading collisions in environments with more than one tag. From these issues, the main objective of this work is to focus on the treatment of reading collisions for RFID systems with tags which do not have chip and uses the spectral signature as a mean of encoding binary information. As a tool for processing the signals involved in the communication system, its used the Fractional Fourier Transform and its mathematical properties on the separation of colliding signals and the concepts of minimum distance detection for recovery the binary information from the previously separated signals. The method was simulated and produced the expected results, with the effective separation of signals and satisfactory performance identifying tag's binary information.

Keywords: RFID, Chipless Tag, Collisions Treatment, Fractional Fourier Transform.

Lista de Figuras

2.1	Sistema RFID mostrado de maneira simplificada com seus principais componentes. Fonte: [12] modificado.	20
2.2	Tipos de acoplamento entre leitor e etiqueta de acordo com a faixa de frequências utilizada. Fonte: [13] modificado.	21
2.3	Etiquetas RFID com chip de uso comercial. Fonte: [15], [16].	22
2.4	Etiqueta RFID sem chip baseada no princípio de <i>Delay-Line</i> . Fonte: [7] modificado.	22
2.5	Vários tipos de leitores RFID. Fonte: [20], [15].	24
2.6	Representação esquemática das relações entre os elementos de um sistema RFID.	25
2.7	Espectro de rádio frequência. Fonte: [13].	25
2.8	Projeção e visão geral do mercado global de RFID para a década entre 2009 – 2019 em relação as tecnologias sem e com chip. Fonte: [22].	27
2.9	Esquema para a classificação de sistemas RFID sem chip segundo a forma de resposta das etiquetas e codificação de informação.	28
2.10	Esquema de funcionamento para etiquetas RFID SAW. Essas etiquetas não precisam de alimentação nem circuito integrado para funcionar. Fonte: [25] modificada.	29
2.11	TFTC orgânico impresso em plástico flexível. Fonte: [7] e www.aist.go.jp	29
2.12	Projeto de etiqueta com <i>delay-line</i> . Fonte: [26].	30
2.13	Exemplo de etiqueta sem chip operando com princípio de modulação de fase e amplitude do sinal refletido com a tecnologia <i>LH Delay-Line</i> . Fonte: [28] modificada.	30
2.14	Estrutura de uma etiqueta que utiliza multiressonadores para assinatura espectral. Fonte: [10] modificada.	32
2.15	Foto de uma etiqueta que utiliza multiressonadores para assinatura espectral com 35 bits codificados. Fonte: [7] modificada.	32
2.16	Ilustração de um ambiente de leitura com alta densidade de etiquetas, situação propícia à colisão de leitura.	34
2.17	Denominação dos protocolos anti-colisão para sistemas RFID.	35

2.18	Ilustração do FSA utilizado no <i>EPC Gen-2 standard</i> . As siglas dentro dos quadrados são parâmetros do protocolo e dizem respeito a dados trocados entre leitor e etiquetas. Fonte: [3] modificada.	36
3.1	Plano de tempo-frequência e os novos eixos resultantes da rotação por um ângulo α	39
3.2	Exemplo de um sinal chirp linear que varia a frequência de 0 a 50 Hz em um intervalo de 2 s. Na figura são mostradas ambas as partes reais e imaginárias do sinal.	41
3.3	Interpretação geométrica para a ordem ótima da FrFT em relação ao sinal chirp linear com taxa de variação r	42
3.4	Sinal no tempo no formato de janela retangular.	45
3.5	Transformada Fracionária de Fourier de várias ordens para a janela retangular no tempo. Observa-se que a medida que $a \rightarrow 1$, a função transformada tende ao formato da função $\text{sinc}(t)$	45
3.6	Função cosseno no tempo.	46
3.7	Perfil de magnitude da Transformada Fracionária de Fourier da função $x(t) = \cos(t)$ para cinco valores de a	46
3.8	Superfície obtida a partir das magnitudes da FrFT com ordens $0 \leq a \leq 1$ da função janela retangular no tempo.	47
3.9	Superfície obtida a partir das magnitudes da FrFT com ordens $0 \leq a \leq 1$ da função chirp. É possível localizar o valor ótimo da ordem fracionária a partir do pico na magnitude.	47
3.10	Na figura é mostrado que a FrFT do sinal chirp evolui para o espectro plano no domínio da frequência.	48
4.1	Esquema mostrando o cenário estudado. O leitor envia o sinal de interrogação e recebe uma sobreposição das respostas de cada uma das etiquetas.	50
4.2	Exemplo de um espectro com assinatura impressa. As frequências de ressonância são definidas pelas características dos ressonadores nas etiquetas, que irão inserir ou não os nulos no espectro do sinal de interrogação.	53
4.3	Sinais utilizados para comparação com para detecção dos bits 0 e 1. Uma janela retangular (o bit 0) ou uma janela retangular com um "vale" aproximadamente do seu ponto central (bit 1).	54
4.4	Diagrama de blocos resumindo o trabalho realizado.	55
5.1	Gráfico no tempo do sinal utilizado como interrogação para as etiquetas.	57
5.2	Espectro do sinal utilizado como interrogação para as etiquetas.	57
5.3	Espectro dos sinais individuais logo após terem recebido a impressão da assinatura que codifica a informação binária.	58

5.4	Sinal recebido pelo leitor, que é uma sobreposição das respostas das etiquetas no domínio do tempo. Apesar dos diferentes atrasos na chegada ao leitor, as características individuais dos sinais são mascaradas no domínio do tempo. . .	59
5.5	Espectro do sinal recebido pelo leitor. Percebe-se que mesmo a característica plana é perdida com a sobreposição da recepção.	59
5.6	Transformada Fracionária de ordem ótima do sinal recebido pelo leitor. Cada um dos picos apontados com as setas representa uma das respostas das etiquetas.	60
5.7	Sinais individuais após janelamento no domínio fracionário.	61
5.8	Espectros individuais após a transformação direta do domínio fracionário para o domínio da frequência.	62
5.9	Espectro com os subcanais marcados para representar a divisão utilizada. . . .	63
5.10	Espectro com banda de 1 GHz dividido em somente dois subcanais para codificação dos 2 bits.	64
5.11	Espectro com banda de 1 GHz dividido em quatro subcanais para codificação dos 4 bits.	65

Lista de Tabelas

3.1	Algumas propriedades da FrFT	44
5.1	Resultados dos acertos na recuperação das assinaturas para 6 bits.	62
5.2	Resultados dos acertos na recuperação das assinaturas para 2 bits.	64
5.3	Resultados dos acertos na recuperação das assinaturas para 4 bits.	65

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Motivação	15
1.2	Objetivos	16
1.3	Metodologia	16
1.4	Organização da Dissertação	17
2	RFID Tradicional e Sem Chip	19
2.1	Princípios de Funcionamento	20
2.2	Elementos do Sistema	21
2.2.1	Etiqueta	21
2.2.2	Leitor	23
2.2.3	Controle e Aplicações	24
2.3	RFID e as Possíveis Faixas em Frequência de Trabalho	25
2.4	Sistemas RFID com Etiquetas sem Chip	26
2.4.1	Operação do RFID sem Chip	27
2.5	Colisões em RFID	33
2.5.1	Tratamento de Colisões em RFID Tradicional	34
2.5.2	Tratamento de Colisões em RFID sem Chip	36
3	Transformada Fracionária de Fourier	38
3.1	Definição	38
3.2	A função chirp	40
3.3	Propriedades da Transformada Fracionária de Fourier	43
3.4	Exemplos	45
4	Trabalho Realizado	49
4.1	Esquematização do Cenário Estudado	49
4.2	Separação dos Sinais com Assinatura Espectral	50
4.3	Detecção dos Bits Codificados nas Assinaturas Espectrais	53

5	Resultados	56
5.1	Identificação de Colisão e Separação dos Sinais Colidentes	58
5.2	Extração da Informação Binária	61
6	Considerações Finais	66
6.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	68
	Referências Bibliográficas	69
	Códigos para Simulação do Sistema	73

CAPÍTULO 1

Introdução

A constante modernização dos processos tecnológicos, seja na indústria, seja no dia a dia da população, requer incessantemente novas soluções. No bojo destes novos requisitos encontram-se as técnicas para troca de dados sobre objetos, seu rastreamento e identificação. Os sistemas de identificação por rádio frequência (RFID, do inglês *Radio Frequency Identification*), compostos basicamente por um leitor que interroga uma etiqueta e recupera o número de identificação nela gravada, cada vez mais presentes em diversas áreas, se apresentam com potencial para tornar reais cada uma das três tarefas acima mencionadas.

Os sistemas RFID contribuem para tornar real o conceito de Internet das Coisas, tradução livre do inglês *Internet of Things* cuja origem remete ao MIT (*Massachusetts Institute of Technology*)¹. Por conta de projetos como o do MIT e outros tipos de aplicações (sensoriamento, por exemplo) a evolução da RFID no que diz respeito à **eficiência, confiabilidade e custos de produção** ainda necessita de grande volume de pesquisas, pois estes ainda são considerados pontos frágeis da tecnologia [1, 2], e acabam dificultando o uso quando a aplicação exige um alto grau de eficiência e segurança e/ou uma quantidade elevada de elementos.

Seguindo esse raciocínio, é notável o número de pesquisas buscando a melhora da robustez deste sistema frente as mais variadas condições do ambiente no qual ele opera. Por esse motivo, uma das áreas que vem se destacando é a pesquisa relacionada ao tratamento de transmissões simultâneas por duas ou mais etiquetas, denominadas de colisões, em cenários onde a densidade de etiquetas é alta. Alguns trabalhos, como [3, 4], além de apresentarem novas técnicas anti-colisão, trazem uma visão acerca dos principais tipos de algoritmos e protocolos utilizados nos sistemas RFID com esse propósito.

Em comparação com outras tecnologias de identificação em larga escala, como o código de barras, a RFID ainda possui preços nada competitivos. Segundo [5], o custo para uma etiqueta passiva com capacidade de codificação de 96 bits no padrão *Electronic Product Code – EPCGlobal* [6] custa entre 7 e 15 centavos de dólar, o que é considerado elevado, principalmente

¹O termo foi cunhado por um grupo de pesquisa do MIT, o Auto-ID Labs, que utiliza, além da tecnologia RFID, premissas acerca da teoria de Redes de Sensores sem Fio para torná-la real.

considerando aplicações em larga escala. E boa parte do custo das etiquetas deve-se ao circuito integrado que faz parte de sua arquitetura.

Diante dessa barreira, uma das áreas que vem se destacando nas pesquisas é o desenvolvimento de etiquetas sem esse circuito, as chamadas etiquetas sem chip (*chiplless tags*), que utilizam propriedades eletromagnéticas dos materiais e/ou formatos de antenas e condutores para modificar um parâmetro da onda que será refletida e com isso codificar informação. A expectativa de custo para etiquetas sem chip é abaixo de 1 centavo de dólar [7], o que torna a tecnologia competitiva com outros sistemas.

Porém, outros problemas surgem com essa nova tendência da área de pesquisa em RFID, que tem um compromisso com a redução dos custos de produção. Essa mudança no padrão de produção das etiquetas acarreta algumas novas preocupações, principalmente porque os protocolos já consolidados e utilizados nos sistemas RFID tradicionais, como o EPCGlobal [6], não funcionam com a RFID sem chip justamente por não existir nenhum tipo de processamento de sinais nas etiquetas. Tendo em vista essa questão, as pesquisas relacionadas ao tratamento de colisões evoluem no sentido de tratar esse problema em sistemas RFID sem chip, já que os algoritmos citados anteriormente não podem ser utilizados.

O desenvolvimento de novas técnicas para a melhoria da comunicação nesses sistemas, os mecanismos para evitar e tratar colisões na leitura e novas formas de codificação e decodificação da informação são tópicos que vêm se mostrando essenciais no aperfeiçoamento da RFID sem chip.

Os principais pontos do trabalho de Mestrado realizado e descrito nesta Dissertação são justamente o estudo do estado da arte quanto às técnicas anti-colisão em sistemas RFID, e o desenvolvimento de uma técnica que trate colisões em sistemas RFID sem chip, separando os sinais colidentes e recuperando a informação binária contida em cada um. O mote principal da pesquisa foi o uso do processamento de sinais de comunicação.

A pesquisa cujo produto final é a Dissertação no programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Engenharia Elétrica e Informática (CEEI) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) foi desenvolvida no Laboratório de Processamento de Sinais e Informação (LAPSI) nesta mesma instituição e financiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES

1.1 Motivação

Como uma área nova dentro das pesquisas em RFID, o desenvolvimento da RFID sem chip é apontado como solução para a barreira que ainda se impõe no uso em larga escala devido aos custos de produção. Porém, apesar de muitos resultados apresentados em artigos e jornais especializados no que diz respeito a novos projetos e materiais para as etiquetas, pouca coisa é encontrada quanto ao processamento dos sinais e padronização das comunicações entre os elementos da RFID sem chip.

Com esse ensejo, a exploração de ferramentas conhecidas na área de processamento de sinais aplicada às comunicações sem fio mostra-se útil para o aperfeiçoamento na comunicação desses elementos. Tendo como foco a análise no plano tempo-frequência, a Transformada Fracionária de Fourier [8] foi escolhida, devido às publicações anteriores [9, 10], como ferramenta para a separação dos sinais colidentes na leitura de etiquetas sem chip.

Ainda no âmbito das dificuldades inerentes à RFID sem chip, a decodificação da informação contida nos sinais de resposta das etiquetas foi também considerada no trabalho realizado. Com o uso de técnicas conhecidas, como a detecção de distância mínima em relação a sinais de comparação, é apresentada uma solução para recuperação da informação binária.

1.2 Objetivos

Objetivo Geral

Propor um sistema que trate as colisões em leitura para o sistema RFID sem chip estudado e recupere a informação binária contida nas respostas individuais de cada etiqueta.

Objetivos Específicos

- Pesquisar o estado da arte quanto ao desenvolvimento da RFID sem chip;
- Relacionar os padrões da RFID tradicional e suas técnicas anti-colisões com a capacidade de processamento dentro da RFID sem chip;
- Investigar soluções que operem com eficácia para o tratamento de colisões em leitura para a RFID sem chip;
- Explorar a Transformada Fracionária de Fourier e aperfeiçoar seu uso para a solução proposta;
- Propor uma solução para a recuperação da informação binária nas respostas individuais de cada etiqueta;
- Simular o sistema proposto;
- Apresentar os resultados em concordância ao que foi estudado;

1.3 Metodologia

No que diz respeito a Metodologia empregada para atingir os objetivos expostos do trabalho, são relacionados os principais pontos:

- Realizar exaustiva pesquisas nas publicações de Congressos, Jornais e Revistas da área para estudar e entender o estado da arte quanto a sistemas RFID sem chip;
- Pesquisar na literatura a respeito de técnicas de tratamentos de colisões tanto em sistemas RFID tradicionais, como em sistemas RFID sem chip;
- Selecionar as principais e mais importantes fontes bibliográficas para reprodução de resultados e comparação com a solução proposta;
- Esquematizar o mecanismo utilizado para tratar o problema de colisão para o sistema RFID sem chip estudado – etiquetas com tecnologia da assinatura espectral;
- Simular utilizando o ambiente MatLab e sua linguagem a etapa de tratamento e separação dos sinais colidentes;
- Propor uma forma de recuperação da informação binária dos sinais previamente separados;
- Simular em MatLab o sistema completo, separando os sinais e recuperando a informação binária, e expor os resultados em forma de gráficos e tabelas;
- Redigir o documento de Dissertação expondo a fundamentação teórica, a descrição do trabalho e os resultados obtidos em simulação.

1.4 Organização da Dissertação

Este documento de Dissertação possui a fundamentação teórica necessária para a compreensão do trabalho desenvolvido e que é descrito detalhadamente. A sua estrutura encontra-se organizada da seguinte forma: o Capítulo 1 apresenta a introdução aos assuntos abordados relacionando-os à problemática do trabalho, bem como são apresentados as motivações e os objetivos da pesquisa.

No Capítulo 2 são expostos os pontos importantes relacionadas à tecnologia RFID, tradicional e sem chip, que ajudarão na compreensão do trabalho e situar o problema no contexto de uso da tecnologia RFID e o que já é praticado em termos de aplicações.

O Capítulo 3 é dedicado à explanação da ferramenta matemática utilizada no processamento dos sinais no sistema simulado, a Transformada Fracionária de Fourier, onde são abordados desde definições mais comumente encontradas na literatura às propriedades exploradas no trabalho. São expostos exemplos de maneira didática para familiarização com a técnica.

No Capítulo 4 é feita a descrição dos experimentos realizados, com os detalhamentos das simulações para cada um dos pontos que o trabalho se propôs a resolver.

Os resultados são expostos no Capítulo 5 na forma de gráficos dos sinais de comunicação do sistema simulado e também é mostrada a eficácia na etapa de recuperação dos dados binários, completando o sistema proposto.

As conclusões são expostas no Capítulo 6, onde é feita uma análise da pesquisa realizada e dos resultados obtidos, bem como são consideradas as linhas de pesquisa para continuidade do trabalho. Por fim, têm-se as Referências Bibliográficas e o Apêndice com os códigos referentes às simulações.

CAPÍTULO 2

RFID Tradicional e Sem Chip

Inúmeras são as tecnologias que utilizam ondas eletromagnéticas em nosso dia a dia. Desde os primeiros trabalhos realizados por James C. Maxwell e vários outros notáveis cientistas, já era perceptível a grande área de aplicação que surgia junto com a teoria das ondas eletromagnéticas. Transmissão de áudio e vídeo (rádio e televisão) e radar são apenas algumas das importantes aplicações que podem ser citadas.

A tecnologia de Identificação por Rádio Frequência – RFID, abreviação do inglês *Radio Frequency IDentification*, como seu próprio nome já explicita, utiliza sinais de rádio frequência para identificação de objetos. Sistemas RFID são constituídos basicamente das etiquetas (traduzido do termo inglês *tags*) e um equipamento leitor, como é mostrado na Figura 2.1, de tal forma que dentro da área de alcance deste leitor, a informação contida nas etiquetas poderá ser acessada sem que se precise de contato visual, como é necessário no caso do código de barras [11].

Com o barateamento da tecnologia usada em sistemas RFID e o surgimento de novos materiais, as vantagens destes sistemas sobre outras tecnologias de identificação mais comuns (Códigos de Barra, Identificação Infravermelho, dentre outros) se mostram mais atraentes. Maior capacidade de armazenamento, possibilidade de se ter uma interação de leitura/escrita entre etiqueta e leitor, leitura realizada sem necessidade de contato visual e leitura simultânea de várias etiquetas são características que, atualmente, só os sistemas RFID oferecem. Além disso, a utilização dos princípios desta tecnologia em outras áreas, como a de sensoriamento, tem tomado cada vez mais destaque, fazendo com que as pesquisas nesse propósito venham aumentando substancialmente.

Os sistemas RFID utilizam vários conceitos das áreas de Eletrônica e Telecomunicações para garantia de seu funcionamento. Neste Capítulo são abordados alguns temas essenciais para estes sistemas, principalmente em relação à comunicação e processamento dos sinais, fundamentando assim o trabalho realizado.

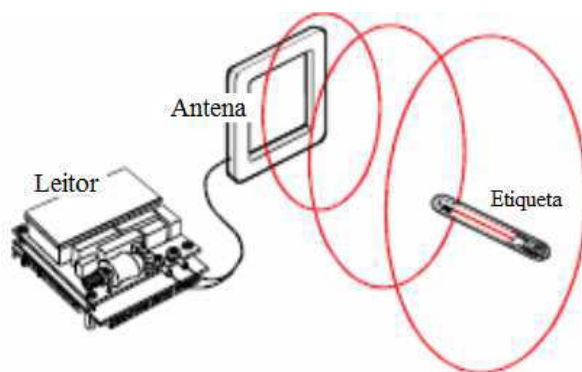


Figura 2.1 Sistema RFID mostrado de maneira simplificada com seus principais componentes. Fonte: [12] modificado.

No caso da RFID sem chip, a maior diferença, em termos de funcionamento, será em relação aos sinais utilizados na comunicação, como é abordado na Seção 2.4. Porém, em termos gerais, a fundamentação teórica pode ser generalista.

2.1 Princípios de Funcionamento

Um sistema de identificação por rádio frequência utiliza o envio e recebimento de ondas eletromagnéticas para obter e/ou inserir informações em um dado elemento. Por trabalhar com propagação e rádio frequência, um ponto importante desses sistemas é a escolha das faixas de frequências de operação.

Dependendo da faixa, a comunicação entre etiqueta e leitor é feita por acoplamento indutivo (*Inductive Coupling*) ou pelo retroespalhamento das ondas eletromagnéticas (*Electromagnetic Backscatter Coupling*) (ver Figura 2.2). As faixas de frequências mais baixas, até alguns MHz, costumam utilizar o acoplamento indutivo. Já para as frequências mais altas, com cerca de centenas de MHz e alguns GHz, tem-se os componentes RFID comunicando-se principalmente através da reflexão das ondas eletromagnéticas [13].

Pela necessidade de proximidade no caso do acoplamento indutivo, normalmente, os sistemas RFID que operam em frequências mais baixas não têm um raio de alcance muito grande, muitas vezes não ultrapassando 1 m. Nas frequências mais altas, que utilizam o retroespalhamento eletromagnético, o alcance pode atingir alguns metros. Tal característica pode ser explicada pela distância de campo da antena: se uma etiqueta RFID está fora de um comprimento de onda completa do leitor, diz-se estar no "campo distante"; se estiver dentro de um comprimento de onda completa, diz-se estar no "campo próximo". O sinal do campo distante decai o quadrado da distância da antena, enquanto o sinal de campo próximo decai o cubo da distância da antena. Então, sistemas passivos (O termo "passivo" e seu significado para os sistemas RFID dizem respeito à energização das etiquetas) de RFID que dependem de comunicação de campo distante (tipicamente micro-ondas, com destaque para o intervalo de *Ultra High Frequency* – UHF) tem um alcance de leitura maior do que aqueles que usam comunicação de campo pró-

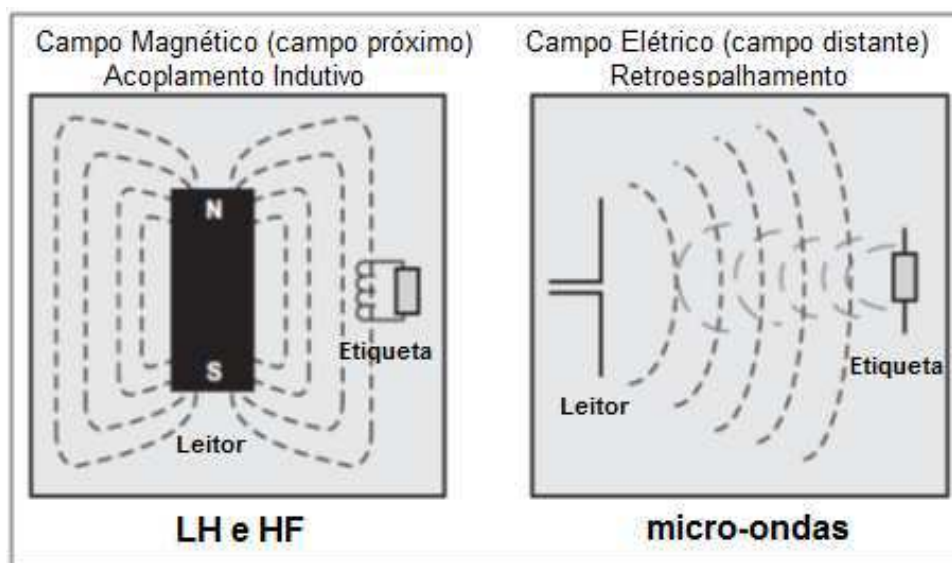


Figura 2.2 Tipos de acoplamento entre leitor e etiqueta de acordo com a faixa de frequências utilizada. Fonte: [13] modificado.

ximo (normalmente sistemas de baixa e alta frequência, respectivamente *Low frequency* – LF e *High Frequency* – HF) [14].

Outras características importantes do sistema são a natureza das etiquetas quanto ao tipo de energização, a presença de circuito integrado ou outras funções adicionais. Quanto à característica de energização para comunicação, elas podem ser passivas ou ativas. Esta classificação, que é melhor detalhada na Seção 2.2, diz respeito à alimentação. Etiquetas ativas têm alimentação *on board*, ou seja, possuem uma pequena fonte embutida na sua própria arquitetura. Já as etiquetas passivas não têm alimentação própria e derivam a energia necessária do sinal enviado pelo leitor.

Em suma, podemos dizer que o princípio de funcionamento de um sistema RFID consiste no envio de sinal pelo leitor; se uma etiqueta que possua tecnologia compatível com o tipo de sinal enviado estiver no raio de alcance, irá responder com um sinal para que o leitor consiga extrair as informações requeridas.

2.2 Elementos do Sistema

2.2.1 Etiqueta

Um dos componentes básicos do sistema é a etiqueta. A função básica deste dispositivo é armazenar dados a respeito do processo ou produto ao qual ele foi incorporado e enviar esses dados quando solicitado. A evolução tecnológica na área da engenharia de materiais leva à produção de etiquetas cada dia menores, compactas e finas, onde muitas vezes se assemelham a pequenas cápsulas ou adesivos.



Figura 2.3 Etiquetas RFID com chip de uso comercial. Fonte: [15, 16].

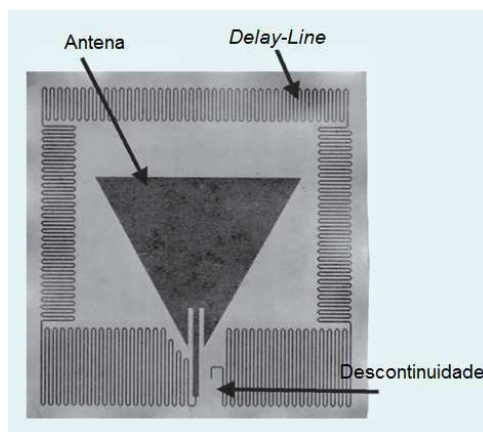


Figura 2.4 Etiqueta RFID sem chip baseada no princípio de *Delay-Line*. Fonte: [7] modificado.

Em sua maioria, essas etiquetas são compostas por uma antena e um circuito integrado, que possui a parte eletrônica (componentes e processador), como as fotos de etiquetas passivas de uso comercial na Figura 2.3. Porém, já existem vários projetos de pesquisa para a utilização de etiquetas sem esse circuito, que em inglês são comumente chamadas de *tags chipless*. Na Figura 2.4 é mostrada um desses tipos de etiquetas sem chip. Esse tipo de etiqueta barateia o custo desses sistemas, tornando-os aptos a concorrer com o sistema de código de barra, pois já é possível obter etiquetas que podem ser impressas no material a ser identificado, rastreado ou do qual se deseja obter alguma informação [17]. Na Seção 2.4 pode ser encontrado um maior detalhamento acerca dos sistemas que utilizam etiquetas sem chip.

Etiquetas passivas e ativas

Uma das principais características de uma etiqueta RFID é quanto à sua alimentação. Uma etiqueta passiva não apresenta qualquer fonte de energia em sua arquitetura. Já as etiquetas ativas têm essa fonte em sua própria estrutura, característica referenciada como fonte *on board*, que poderá ser uma pequena bateria, por exemplo. As consequências dessa alimentação (ou falta dela) recaem sobre o raio de alcance para leitura, tamanho e custo das etiquetas.

Uma etiqueta ativa usa energia proveniente de sua própria fonte para realizar a comunicação e enviar sinais para os leitores quando requisitada. Por esse motivo, essas etiquetas podem se comunicar com leitores menos potentes e transmitir informações por distâncias maiores. A

capacidade de armazenamento também costuma ser maior do que nas etiquetas passivas, bem como a quantidade de processamento no circuito da etiqueta. As desvantagens se referem ao tamanho, custo de produção e ao fato de que baterias costumam ter um período de vida útil de 2 a 7 anos [13].

Em geral, o sinal proveniente do leitor serve como um sinalizador para que o sistema da etiqueta ativa comece a operar. Após cessar a troca de informações, a etiqueta retorna para um estado de hibernação e, desse modo, economiza bateria.

Etiquetas passivas derivam sua energia para transmissão do sinal enviado pelo leitor. Porém, essa energia é menor do que aquela obtida de uma bateria própria e, conseqüentemente, a potência do sinal na comunicação etiqueta/leitor será menor, diminuindo o alcance do sinal transmitido. Em compensação, o custo de produção e o tamanho dessas etiquetas são menores se comparadas com as ativas. As etiquetas sem chip se enquadram na classificação de etiquetas passivas, já que o princípio de operação consiste puramente na reflexão e/ou retransmissão da energia enviada após algum processo que modifique o sinal do leitor.

2.2.2 Leitor

O leitor RFID pode ser considerado o componente mais robusto, em termos de processamento, de um sistema RFID. Enquanto as etiquetas são inúmeras e possuem um custo relativamente baixo, os leitores são estruturas mais complexas e que aparecem em número bem mais reduzido.

Eles são basicamente compostos por uma antena, módulos de RF e circuitos eletrônicos. A sua antena poderá ou não estar acoplada à estrutura.

O leitor é o *hardware* responsável por fazer a ligação entre a etiqueta e o gerenciador de eventos ou aplicação, por meio de uma interface de rede. Essa comunicação entre etiqueta e leitor poderá ser feita para ler e/ou escrever dados e energizar (no caso de etiquetas passivas). Responsável pela verificação e avaliação dos dados recebidos, determina quando e como os mesmos deverão ser enviados pela interface de rede. E a interface de rede, que são os meios pelos quais os leitores enviam os dados, poderá ser Ethernet, Wireless, USB, Bluetooth ou Zigbee [18].

Com os avanços da tecnologia e a necessidade de se baratear cada vez mais os custos de fabricação das etiquetas, os leitores são obrigados a possuir cada vez mais funcionalidades, tomando para si o maior volume possível de processamento de dados. Algumas dessas funções mais complexas são: implementar algoritmos anti-colisão de leitura/escrita de várias etiquetas ao mesmo tempo, autenticar as etiquetas antes de realizar qualquer operação e desta forma evitar fraudes e acessos não autorizados, implementar criptografia dos dados para evitar vazamento de informações.

Da mesma forma que as etiquetas, existem hoje no mercado uma quantidade enorme de modelos e formatos para as mais variadas aplicações, de diversos fabricantes. Podendo ser

encontrados em tamanhos que variam desde meia polegada até o tamanho de um computador de mesa, possibilitando a sua instalação ou adaptação para as configurações do tipo portais, túneis, leitores em empilhadeiras ou prateleiras inteligentes [19]. Alguns desses formatos podem ser vistos na Figura 2.5.



Figura 2.5 Vários tipos de leitores RFID. Fonte: [15, 20].

2.2.3 Controle e Aplicações

Os controladores RFID podem ser considerados os cérebros desses sistemas. Eles podem ser usados para realizar a conexão em rede de vários leitores RFID e seus respectivos dados e, dessa forma, centralizar todo processamento das informações. Na maioria das vezes esse controle é realizado por um computador no qual está em funcionamento um *software* específico.

A partir do processamento dos dados recebidos, as decisões do que fazer com aquelas informações também devem ser tomadas pelo controlador, geralmente após consulta de um banco de dados. O simples armazenamento, manutenção de quantidades de produtos, rastreamento e direcionamento dentre de linhas de produção e verificação de identidade para acesso à área restrita são algumas das decisões que esses sistemas controladores podem tomar com base na aplicação da qual fazem parte.

Em resumo, esses três componentes funcionam conjuntamente da seguinte forma: o *software* aplicativo inicia todas as atividades dos leitores e etiquetas. O sistema RFID fornece uma maneira rápida, flexível e confiável para identificar, acompanhar e controlar uma variedade de tarefas. Os sistemas RFID usam transmissões de rádio para energizar uma etiqueta, enquanto

esta etiqueta emite um código de identificação único de volta para o leitor, que irá coletar os dados, enviando-os à um sistema de gerenciamento de informações. Os dados coletados a partir da etiqueta podem ser enviados diretamente à um computador, ou armazenados em um leitor portátil e descarregados posteriormente em um computador [3]. O esquema é mostrado na Figura 2.6.

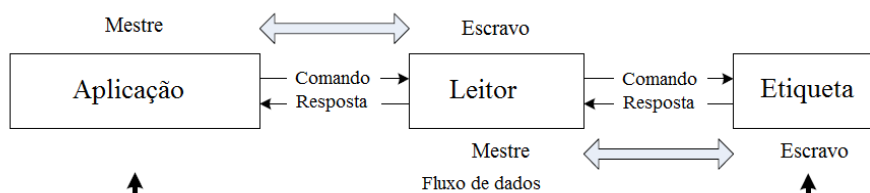


Figura 2.6 Representação esquemática das relações entre os elementos de um sistema RFID.

2.3 RFID e as Possíveis Faixas em Frequência de Trabalho

Por serem sistemas que geram e emitem ondas eletromagnéticas, os sistemas RFID são classificados como sistemas de rádio. A operação de outros sistemas de rádio não pode, de maneira alguma, sofrer interferência pela operação dos sistemas RFID e vice-versa.

Por essa razão, só é permitido o uso de faixas de frequências especialmente reservadas para uso industrial, científico e médico. São as chamadas *ISM Frequency Ranges (Industrial – Scientific – Medical)*, mostrado na Figura 2.7.

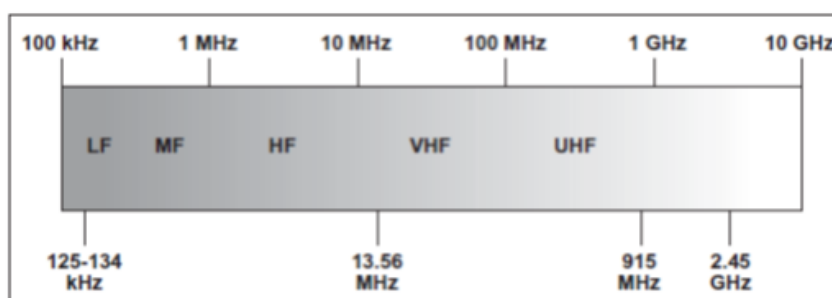


Figura 2.7 Espectro de rádio frequência. [13].

As frequências e intervalos de frequências mais importantes para RFID são: 125 – 135 kHz; 13,56 MHz; 27,125 MHz; 40,68 MHz; 433,92 MHz; 869 MHz; 915 MHz (não na Europa); 2,45 GHz; 5,8 GHz e 24,125 GHz [11]. No Brasil, as seguintes faixas são citadas por resolução da Agência Nacional de Telecomunicações – ANATEL [21]: 119 – 135 kHz; 13,11 – 13,36 MHz; 13,41 – 14,01 MHz; 433,5 – 434,5 MHz; 860 – 869 MHz; 894 – 898,5 MHz; 902 – 907,5 MHz; 915 – 928 MHz; 2,4 – 2,4835 GHz e 5,725 – 5,850 GHz, e devem atender os limites de intensidade de campo elétrico (em $\mu\text{V/m}$).

A escolha da frequência de operação de um sistema RFID afeta diretamente algumas de suas principais características. O alcance de leitura costuma ser menor para os sistemas que operam nas faixas de frequências mais baixas, bem como a taxa de transferência de dados é mais lenta, como é explicado na Seção 2.1. Nessas faixas é utilizado o acoplamento indutivo entre etiqueta e leitor, impossibilitando grandes distâncias entre esses dois elementos. Usualmente, são utilizadas etiquetas passivas nessas frequências.

Em frequências mais altas, esse alcance costuma aumentar, principalmente com o uso de etiquetas ativas. Porém, como ondas eletromagnéticas na faixa de micro-ondas podem causar danos à saúde, dependendo da potência utilizada, órgãos reguladores estabeleceram um limite para essa potência. Essa limitação reduz o alcance na prática.

Nos sistemas RFID sem chip verifica-se que a preferência é pela utilização das frequências mais altas, como a faixa de micro-ondas. Esse fato ocorre porque nesses sistemas a própria antena funciona, juntamente com alguma outra estrutura, como modificadora da onda incidente, inserindo uma espécie de assinatura no sinal. Por conta do comprimento de onda em frequências mais baixas ser bem maior, e lembrando que a antena deve ter um tamanho relacionado com o comprimento da onda a ser transmitida/recebida, opta-se pelas frequências mais altas.

2.4 Sistemas RFID com Etiquetas sem Chip

Apesar das vantagens dos sistemas RFID, em relação às tecnologias mais utilizadas de identificação e rastreamento, a barreira dos custos ainda impede o mesmo volume de uso dessa tecnologia em relação às outras já consolidadas.

Por conta desse fato, avanços recentes na tecnologia RFID prometem uma significativa redução no custo das etiquetas, o que tornaria essa tecnologia altamente competitiva. Inclusive, existem projeções de mercado que mostram como o RFID sem chip dominaria o mercado na próxima década, como é mostrado na Figura 2.8.

Esses novos produtos, conhecidos como etiquetas RFID sem chip na literatura [7], não possuem circuito integrado (chip) na sua arquitetura e são essencialmente refletores passivos ou absorvedores de energia eletromagnética [23].

RFID sem chip é um termo genérico empregado para sistemas que utilizam energia em RF para transmissão e recepção de dados, mas que não possuem dados gravados (binários) em um microchip de silício na etiqueta. Algumas etiquetas sem chip utilizam polímeros plásticos ou condutores em vez de microchips de silício. Outras etiquetas sem chip usam materiais que refletem uma porção das ondas de rádio direcionada a elas. É comum ainda que uma aplicação analise as ondas refletidas de tal forma a reconhecer uma "impressão digital" para identificar a etiqueta e retirar informações sobre o processo [14].

Por apresentar algumas diferenças em relação aos princípios de funcionamento, principalmente no que diz respeito ao uso de codificação e modulação, os sistemas RFID sem chip precisam de uma maior atenção para métodos de tratamento dos sinais refletidos/retransmiti-

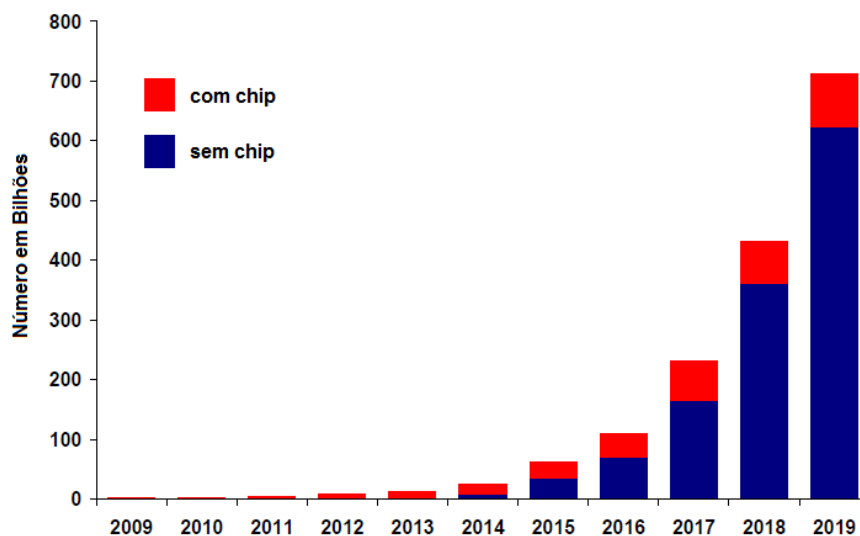


Figura 2.8 Projeção e visão geral do mercado global de RFID para a década entre 2009-2019 em relação às tecnologias sem e com chip. Fonte: [22].

dos pelas etiquetas. Novos métodos de separação dos sinais refletidos simultaneamente por várias etiquetas e algoritmos para evitar e tratar colisões são alguns dos tópicos ainda pouco explorados no que diz respeito aos sistemas sem chip.

2.4.1 Operação do RFID sem Chip

Para analisar o modo de operação de sistemas sem chip, observa-se que é feita na literatura uma classificação em três categorias principais [7]:

- *Time Domain Reflectometry* – TDR: esse princípio de operação é baseado no envio de um pulso pelo leitor e na análise dos "ecos" refletidos pelas etiquetas;
- Modulação de Amplitude/Fase por Retroespalhamento: a codificação de dados é realizada através da variação da amplitude ou da fase do sinal retroespalhado com base na mudança da impedância de entrada da antena na etiqueta;
- Assinatura Espectral: etiquetas operando desse modo retransmitem o sinal recebido, codificando informação no espectro com a utilização de estruturas ressonantes.

A forma como a etiqueta irá se comportar dependerá das propriedades e estrutura do material utilizado na sua construção. Essas características irão ditar como acontecerá a codificação da informação, podendo ser uma assinatura em frequência, uma mudança de fase/amplitude ou ainda um atraso nos tempos de chegada [24].

RFID sem chip baseado em TDR

Nos sistemas sem chip baseados em TDR, o leitor transmite um pulso como sinal interrogador, que será um sinal de ultra banda larga (*Ultra Wide Band – UWB*)¹, e aguarda as reflexões e ecos provindos das etiquetas. O tempo de chegada desses ecos pode ser controlado através de mudanças na estrutura da etiqueta, permitindo a codificação de dados nessas diferenças [23].

Sistemas baseados em TDR apresentam uma análise detalhada do sinal no domínio do tempo para detecção dos bits codificados. Na literatura existe uma variedade de projetos de etiquetas que se baseiam em TDR. Estas podem ser classificadas em dois grupos: imprimíveis e não imprimíveis (ver Figura 2.9).

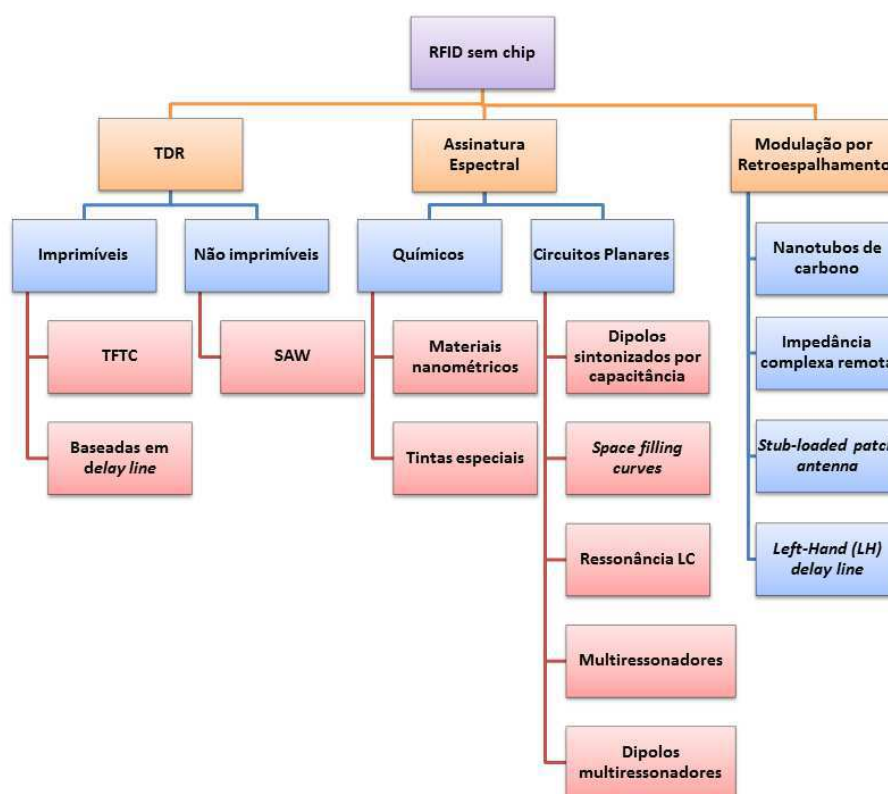


Figura 2.9 Esquema para a classificação de sistemas RFID sem chip segundo a forma de resposta das etiquetas e codificação de informação.

Um exemplo de etiqueta não imprimível² é a *Surface Acoustic Wave – SAW*, que opera segundo o seguinte princípio: o leitor emite um pulso em RF que será convertido em uma onda acústica de superfície em escala nanométrica na superfície da etiqueta SAW pelo transdutor interdigital (*Interdigital Transducer – IDT*). Essa onda acústica passa por um conjunto de refletores de ondas para produzir pulsos de ondas acústicas codificados de maneira única, que viajam

¹O sinal UWB é definido como um sinal de rádio que possui um espectro que ocupa uma largura de banda maior do que 20% da frequência central, ou uma largura de banda de pelo menos 500 MHz.

²A característica da etiqueta ser imprimível ou não diz respeito a questão de implementação física e a possibilidade de impressão da estrutura em algum substrato.

de volta para o IDT. O IDT converte os pulsos em um sinal de resposta em RF codificado, que é enviado de volta ao leitor [25]. O esquema é mostrado na Figura 2.10.

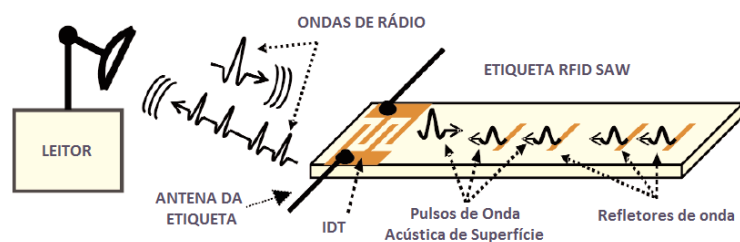


Figura 2.10 Esquema de funcionamento para etiquetas RFID SAW. Essas etiquetas não precisam de alimentação nem circuito integrado para funcionar. Fonte: [25] modificada.

Já para as etiquetas baseadas em TDR que podem ser consideradas imprimíveis, podem ser citadas as etiquetas *Thin-Film-Transistor Circuit* – TFTC e as etiquetas baseadas no princípio de *Delay-line*, que consiste na inserção de elementos que impõem um atraso à onda incidente.

Etiquetas TFTC apresentam vantagens sobre as etiquetas tradicionais com chip principalmente graças ao seu tamanho e ao baixo consumo de energia, uma foto é mostrada na Figura 2.11. Entretanto, o processo de fabricação desse tipo de etiqueta ainda é custoso se comparado com outras soluções [7].



Figura 2.11 TFTC orgânico impresso em plástico flexível. Fonte: [7] e www.aist.go.jp.

Quanto às etiquetas baseadas em *Delay-Line*, o mesmo princípio das etiquetas SAW é utilizado, só que em uma versão imprimível. Nesse caso, uma descontinuidade é utilizada depois de uma seção de *delay-line*. Ao ser excitada por um pulso de curta duração, a etiqueta reflete em vários pontos ao longo da sua linha, criando um trem de pulsos com os vários ecos. Um desenho esquemático é mostrado na Figura 2.12.

Embora algumas pesquisas e produtos iniciais sobre esta tecnologia sem chip sejam relatados na literatura, um máximo de apenas 4 bits de dados foram codificados com sucesso, o que demonstra o potencial limitado desta tecnologia [7].

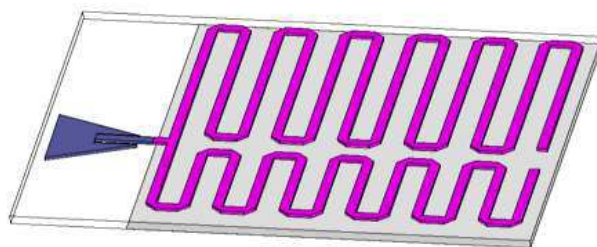


Figura 2.12 Projeto de etiqueta com *delay-line*. Fonte: [26].

RFID sem chip baseado em Modulação de Amplitude/Fase por Retroespalhamento

Etiquetas sem chip que operam com esse princípio conseguem a codificação de dados através da variação da amplitude e/ou fase do sinal de retroespalhamento com mudanças na impedância de entrada da antena na etiqueta. Uma das vantagens dessa tecnologia em relação as duas outras citadas neste texto é a necessidade de uma menor largura de banda para comunicação entre os elementos do sistema. A figura 2.13 apresenta um esquema de uma etiqueta do tipo.

A variação da impedância não é controlada por uma chave liga-desliga entre dois estados. Em vez disso, ela é controlada pela parte reativa da antena da etiqueta. A impedância da antena influencia o seu RCS³ em amplitude ou fase [27]. A partir disso, um leitor de RFID dedicado poderá fazer a leitura. A parte reativa da impedância da antena pode variar devido a mudanças na estrutura da etiqueta, o que irá classificar a tecnologia utilizada (ver as classificações na Figura 2.9) [7].

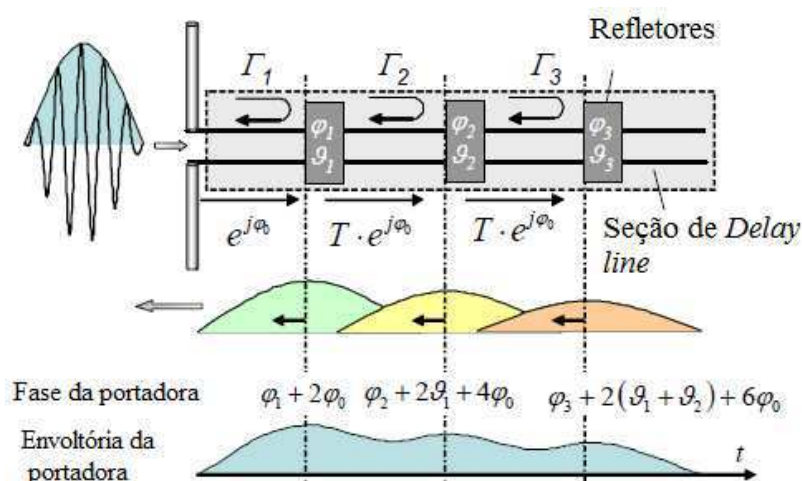


Figura 2.13 Exemplo de etiqueta sem chip operando com princípio de modulação de fase e amplitude do sinal refletido com a tecnologia *LH Delay-Line*. Fonte: [28] modificada.

³Radar cross section – RCS, da teoria de Radares, é uma medida referente ao grau de detectabilidade de um objeto por um radar. Um grande RCS indica que um objeto é mais facilmente detectável.

RFID sem chip baseado em Assinatura Espectral

Etiquetas sem chip que se baseiam na técnica de assinatura espectral costumam transformar o espectro do sinal provindo do leitor, "imprimindo" um padrão que irá codificar os dados binários. Esse padrão individual de cada etiqueta é obtido com o uso de estruturas ressonantes que, de acordo com o projeto, fazem com que ocorram ou não picos de ressonância em frequências pré-determinadas. É essa ausência ou presença de ressonância que indicará o bit codificado.

Esse tipo de tecnologia vem se destacando no campo de RFID sem chip devido ao fato de serem totalmente imprimíveis, apresentarem maior capacidade de armazenamento de informação (número de bits codificados), robustez e pelo baixo custo de produção [7]. As desvantagens das etiquetas que utilizam a assinatura espectral dizem respeito à necessidade de utilização de uma maior largura de banda na comunicação, a preocupação com a orientação das etiquetas no momento de leitura e também quanto aos equipamentos para geração de um pulso UWB no leitor.

O trabalho de mestrado realizado tem como base os princípios das etiquetas sem chip que utilizam esta tecnologia, devido às facilidades de simulação e uma possível futura implementação, bem como a utilização de técnicas conhecidas do processamento digital para o tratamento do sinal.

As estruturas ressonantes podem ser obtidas por meio do uso de componentes químicos que possuam diferentes padrões de reflexão da onda recebida, bem como materiais nanométricos e tintas especiais. Elas também podem ser obtidas com circuitos coplanares, como multiressonadores e dipolos controlados por capacitância [7].

A utilização desses tipos de materiais requer um conhecimento detalhado das características químicas que possam vir a afetar o funcionamento dessas etiquetas. Atualmente, algumas empresas já trabalham com nanomateriais (como a CrossID – innovya.com/CrossID e a Tapemark – www.tapemark.com) e tintas especiais (Somark Innovations – www.somarkinnovations.com). Como a maioria das pesquisas divulgadas nessa linha diz respeito à empresas e aplicações comerciais, pouca informação está disponível, dificultando análises mais específicas acerca do desempenho desses sistemas.

Etiquetas que utilizem circuitos coplanares para obter esses picos de ressonância podem ser construídas a partir de algumas estruturas conhecidas, como a microfita, guias de onda coplanares e estruturas ressonantes com *stripline*. A partir dessas, podem ser fabricadas antenas, filtros e fractais com características singulares. Eles são impressos em substratos laminados e flexíveis de espessura fina, bem como em polímeros apropriados.

Como existem inúmeros projetos que utilizam esses princípios, existem tabelas que fazem um resumo quanto às características consideradas importantes, como imprimibilidade e número de bits por cm^2 . Em [29] pode ser encontrado uma tabela citando vários projetos de RFID sem chip e suas respectivas referências de pesquisa.

Para entendimento do sistema proposto e do trabalho realizado (Capítulo 4 e compreensão dos resultados no Capítulo 5), na Figura 2.14 é mostrado um esquema de um projeto em particular de uma etiqueta com assinatura espectral. Tal etiqueta utiliza multiressonadores em espiral.

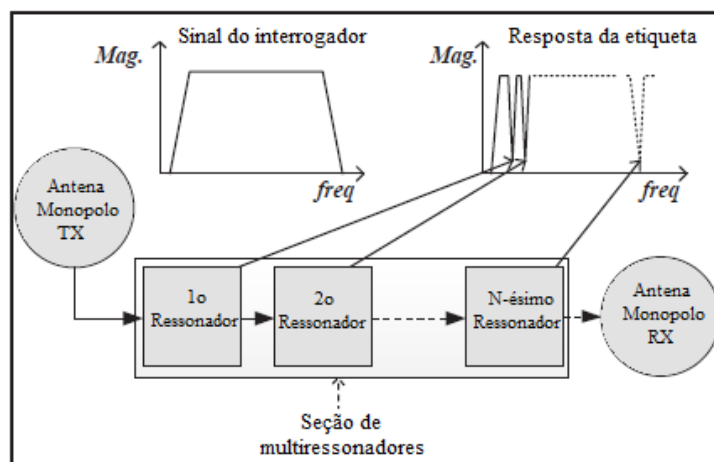


Figura 2.14 Estrutura de uma etiqueta que utiliza multiressonadores para assinatura espectral. Fonte: [10] modificada.

Como pode ser visto na Figura 2.15, essas etiquetas possuem duas antenas (normalmente antenas monopolo em forma de disco, com polarizações cruzadas entre si) e uma sequência de multiressonadores, onde cada uma das estruturas correspondem a uma frequência de ressonância e, conseqüentemente, a um bit codificado.



Figura 2.15 Foto de uma etiqueta que utiliza multiressonadores para assinatura espectral com 35 bits codificados. Fonte: [7] modificada.

O funcionamento consiste nos seguintes passos: o sinal de interrogação do leitor é recebido pela antena monopolo RX da etiqueta, que tem uma dada polarização (horizontal, por exemplo) que coincide com a polarização da antena de transmissão do leitor. Esse sinal apresenta um espectro plano dentro de uma dada banda e os multiressonadores podem ser enxergados como filtros *notch* que irão inserir (ou não) os nulos em frequências pré-determinadas

dentro da banda do sinal. Após imprimir o padrão no espectro, o sinal é retransmitido para o leitor pela antena monopolo TX da etiqueta, que irá apresentar polarização cruzada em relação à RX (vertical, no exemplo citado) e mesma polarização da antena de recepção do leitor. Deste modo, o processamento do sinal para recuperação dos dados binários acontece no elemento leitor do sistema.

2.5 Colisões em RFID

Em uma rede baseada em RFID, costuma-se ter um número considerável de etiquetas, enquanto o número de elementos leitores é bem menor. Essa rede que utiliza tecnologia RFID poderá ser utilizada em aplicações de identificação, rastreamento, sensoriamento, dentre outras [1].

Nesse cenário, é interessante lembrar que uma etiqueta não "enxerga" a outra em termos de sinal em RF. Ou seja, existe a probabilidade de que ocorram colisões entre os sinais refletidos que serão captados pelo leitor.

Pode-se dizer que existem comumente dois tipos de colisões: colisões entre leitores e colisões entre as etiquetas. A colisão de leitores indica que vários leitores mandam o sinal de interrogação a uma mesma etiqueta ao mesmo tempo, por isso é complicado para a etiqueta distinguir os sinais. No caso das colisões entre etiquetas, a configuração é contrária, existem várias etiquetas respondendo ao pedido de um leitor simultaneamente e, por consequência, pode acontecer do leitor não conseguir identificar todas as etiquetas corretamente [3].

Por conta do grande número de etiquetas nos sistemas, a colisão entre esses elementos é muito mais provável e complicada de tratar, situação exemplificada na Figura 2.16. Existem diferentes protocolos (e diferentes sistemas patenteados) que utilizam técnicas variadas basicamente para fazer com que as etiquetas respondam ao leitor uma de cada vez. Estes envolvem o uso de algoritmos para tornar as etiquetas "únicas" sob a visão do leitor. Uma vez que cada etiqueta pode ser lida em milissegundos, o que se tem como resultado é a impressão de que todas as etiquetas estão sendo lidas simultaneamente [14].

Nos sistemas RFID tradicionais, podemos citar alguns métodos e algoritmos utilizados para tal fim: baseados em Slotted ALOHA e baseados em Árvore (*Query Tree*, *Binary Tree*) [3, 30].

Para o caso onde as etiquetas não possuam chip, a implementação de um dos protocolos citados, ou outro de complexidade comparável, torna-se inviável, porque não existe uma forma de controle das reflexões nos nós. Deste modo, o estudo das colisões em sistemas sem chip vem buscando alternativas para evitar e combater esse problema, como por exemplo a utilização de *Space Division Multiple Access* – SDMA juntamente com a técnica *Frequency Modulated Continuous Wave* – FMCW e o *Time Difference of Arrival* – TDOA utilizadas em sistemas de Radar [4].

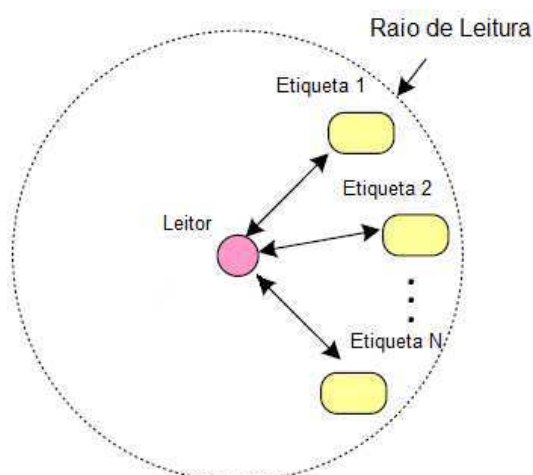


Figura 2.16 Ilustração de um ambiente de leitura com alta densidade de etiquetas, situação propícia à colisão de leitura.

2.5.1 Tratamento de Colisões em RFID Tradicional

Os sistemas RFID tradicionais são aqueles onde as etiquetas possuem um circuito integrado, independentemente da forma de alimentação. Ou seja, elas podem ser ativas ou passivas. Apesar desta última característica citada influenciar diretamente na capacidade de processamento de dados, a separação que é feita aqui é quanto a capacidade da etiqueta em realizar algum processamento e utilizar algum protocolo que coordene a comunicação com os leitores, o que não existe no caso de etiquetas sem chip.

Como é citado na introdução da Seção 2.5, as colisões entre etiquetas são mais preocupantes em termos da frequência de ocorrência e complexidade de tratamento, visto que existe uma diferença de capacidade de processamento entre os leitores e as etiquetas. É nesse tipo de tratamento (colisões entre etiquetas) que foi desenvolvido o trabalho aqui apresentado.

Por conta deste fato, os protocolos anti-colisão mais utilizados atualmente foram desenvolvidos para sistemas tradicionais, concentrando-se na identificação e validação simultânea das etiquetas. Eles podem ser divididos em duas grandes categorias [3]:

- Métodos determinísticos;
- Métodos probabilísticos.

Esses protocolos têm que lidar com algumas restrições típicas do RFID, como por exemplo: falta de fonte de energia (no caso de etiquetas passivas); o número de etiquetas ser desconhecido; as etiquetas não enxergam umas as outras e limitações computacionais. São essas características que buscam o barateamento do sistema e por isso não podem ser alteradas.

Protocolos Anti-Colisão Existentes para RFID

Como foi citado anteriormente no texto, os protocolos existentes para prevenção/tratamento de colisões em RFID podem ser divididos em dois grandes grupos: métodos probabilísticos e métodos determinísticos (ver Figura 2.17).

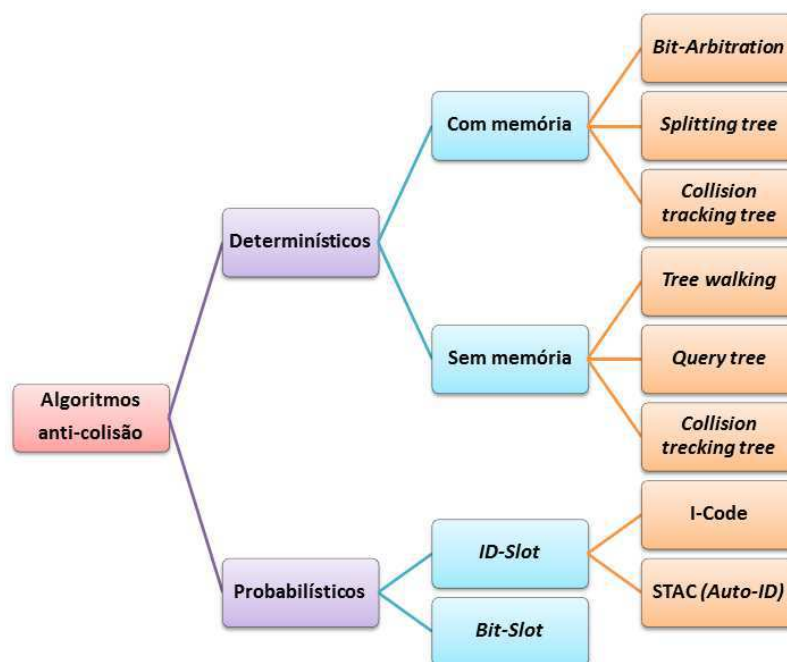


Figura 2.17 Denominação dos protocolos anti-colisão para sistemas RFID.

Além disso, esses protocolos têm algo em comum, todos são baseados em *Time Division Multiple Access* – TDMA, ou seja, na tecnologia de acesso múltiplo no tempo. Isto acontece porque os outros procedimentos (como o *Space Division Multiple Access* – SDMA, o *Code Division Multiple Access* – CDMA e o *Frequency Division Multiple Access* – FDMA) adicionariam custo e complexidade computacional ao sistema.

Sistemas RFID costumam utilizar os protocolos ALOHA⁴ e também uma outra variação, o *Frame Slotted Aloha* – FSA, que usa o intervalo de tempo do ciclo de leitura discretamente (*Frame*) e cada um desses intervalos é subdividido (em *slots*) em um mesmo número de intervalos total. Desta forma, irão existir vários subintervalos em um único ciclo de leitura e o tamanho do intervalo é decidido pelo leitor. Existe ainda uma restrição de que as etiquetas podem transmitir dados somente uma vez em cada intervalo. Isto pode reduzir o número de su-

⁴Os protocolos ALOHA (Aloha puro e Slotted Aloha) são protocolos de acesso aleatório. Nesse tipo de protocolo, o nó transmite sempre à taxa total R bps do canal. Quando há colisão, cada um dos nós envolvidos aguarda um período de tempo aleatório para a retransmissão. Esses atrasos são aleatórios e independentes.

bintervalos que colidiram. Protocolos de comunicação RFID, como o *EPC Gen-2 standard* [6], utilizam o FSA. Os parâmetros do protocolo de comunicação são mostrados na Figura 2.18.

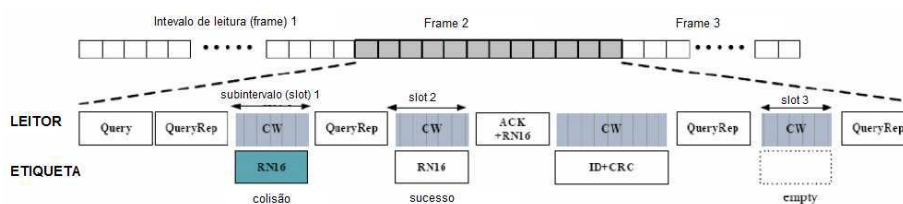


Figura 2.18 Ilustração do FSA utilizado no *EPC Gen-2 standard*. As siglas dentro dos quadrados são parâmetros do protocolo e dizem respeito a dados trocados entre leitor e etiquetas. Fonte: [3] modificada.

Apesar da variedade de protocolos e algoritmos que melhoram cada dia mais o tratamento das colisões em sistemas RFID tradicionais⁵, nem sempre esses avanços servem para sistemas RFID sem chip. E é por conta disso que a pesquisa nesta área específica torna-se desafiadora.

2.5.2 Tratamento de Colisões em RFID sem Chip

Como é enfatizado durante este texto, a necessidade de redução de custos e consequente uso em larga escala da tecnologia RFID, tem levado ao desenvolvimento de etiquetas que não possuem circuito integrado. Porém, esse tipo específico de etiqueta ainda apresenta muitas restrições, como por exemplo a forma de codificação da informação. Por conta disso, recentemente as pesquisas na área de RFID têm focado no desenvolvimento de novas etiquetas sem chip, que além de serem mais compactas, podem ser capazes de representar mais bits de dados. Porém, o que se observa é que não existem muitos trabalhos com intuito de desenvolvimento de algoritmos para a detecção e decodificação de dados codificados [24].

Dentro dessa observação também cabem os algoritmos de detecção e tratamento de colisões. Os algoritmos anti-colisão que são frequentemente utilizados em etiquetas RFID tradicionais não são adequados para as etiquetas sem chip, uma vez que não existe qualquer elemento de controle *on board* [10].

Pelo atual estado da arte das pesquisas na área de prevenção e tratamento de colisões ainda estar em processo de amadurecimento, foi escolhido um trabalho como ponto de partida para a pesquisa desenvolvida, "A Collision Avoidance Methodology for Chipless RFID Tags" [10]. Vale salientar que tanto o trabalho utilizado como base, bem como o trabalho realizado, visa a utilização de etiquetas sem chip que operam com a assinatura espectral como forma de codificação de bits.

Como é explanado no Capítulo 3, a técnica empregada para a detecção do número de etiquetas respondendo a um sinal interrogador e a separação destes sinais é a Transformada

⁵No relatório "Efficient Novel Anti-Collision Protocols for Passive RFID Tags" [3] é feito um apanhado acerca dos protocolos comumente utilizados.

Fracionária de Fourier. As suas propriedades matemáticas foram exploradas de tal modo a melhorar o sistema que foi previamente proposto no trabalho citado.

CAPÍTULO 3

Transformada Fracionária de Fourier

A transformada Wavelet, a transformada rápida de Fourier e a distribuição de Wigner são exemplos conhecidos de ferramentas para a análise conjunta em tempo-frequência [31]. A própria transformada tradicional de Fourier pode ser definida como a representação de uma função g no eixo da frequência. Deste modo, se existir $g(t)$ representada ao longo do eixo do tempo, a transformada de Fourier $\mathcal{F}[g(t)]$ será resultado da rotação de $g(t)$ por um ângulo de $\frac{\pi}{2}$ radianos no sentido anti-horário no plano tempo-frequência, onde o eixo das abscissas se refere ao tempo e o das ordenadas, à frequência.

A Transformada Fracionária de Fourier é uma transformada linear também utilizada como ferramenta de análise de sinais no plano tempo-frequência. A FrFT, do inglês *Fractional Fourier Transform*, foi um conceito introduzido de maneira mais detalhada por V. Namias¹ em 1980, que traz a ideia da ordem fracionária para a Transformada de Fourier, na qual a Transformada de Fourier tradicional é considerada como o caso onde a FrFT tem ordem unitária [32].

3.1 Definição

A Transformada Fracionária de Fourier pode ser relacionada ao operador \mathcal{F}^a , no qual a é um número real e representa a ordem fracionária da transformação. Deste modo, dada uma função g , a transformada $G_a = \mathcal{F}^a \{g\}$ pode ser definida pela seguinte integral

$$G_a(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} K_a(u, t)g(t)dt, \quad (3.1)$$

na qual a variável u representa o domínio fracionário e a função de núcleo $K_a(u, t)$ é dada por

$$K_a(u, t) = C_\alpha \exp \left\{ -j\pi \left(2 \frac{ut}{\sin \alpha} - (t^2 + u^2) \cot \alpha \right) \right\}, \quad (3.2)$$

¹O trabalho foi publicado em 1980 com título "The Fractional Order Fourier Transform and its Application to Quantum Mechanics".

e C_α é uma constante de normalização

$$C_\alpha = \frac{\exp \{-j [\pi \operatorname{sgn}(\sin \alpha)/4 - \alpha/2]\}}{\sqrt{2\pi} |\sin \alpha|}. \quad (3.3)$$

A ordem da FrFT é relacionada ao ângulo de rotação α pela seguinte expressão (ver Figura 3.1)

$$\alpha = a \frac{\pi}{2}. \quad (3.4)$$

Para $a \in 2\mathbb{Z}$, ou seja, $\alpha \in \pi\mathbb{Z}$, os limites devem ser tomados.

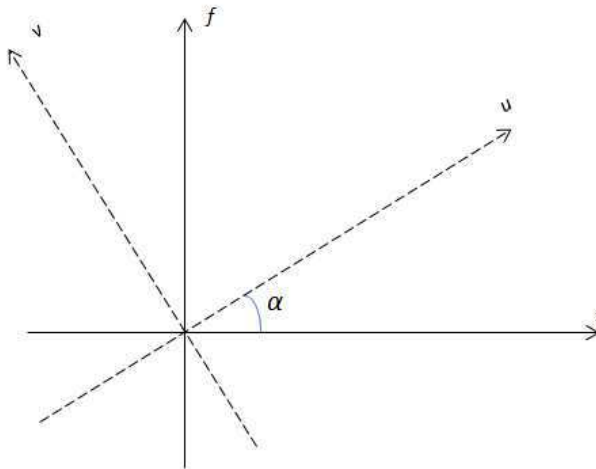


Figura 3.1 Plano de tempo-frequência e os novos eixos resultantes da rotação por um ângulo α .

Deste modo, se a ordem da transformada for $a = 1$, o ângulo de rotação será $\alpha = \frac{\pi}{2}$. Realizando tais substituições nas expressões apresentadas, temos as expressões da transformada tradicional de Fourier:

$$C_{\frac{\pi}{2}} = \frac{\exp \{-j [\pi \operatorname{sgn}(\sin \frac{\pi}{2})/4 - \frac{\pi}{2}/2]\}}{\sqrt{2\pi} |\sin \frac{\pi}{2}|} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}},$$

$$K_1(u, t) = C_{\frac{\pi}{2}} \exp \left\{ -j\pi \left(2 \frac{ut}{\sin \frac{\pi}{2}} - (t^2 + u^2) \cot \frac{\pi}{2} \right) \right\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \{-j\pi 2ut\}$$

$$G_1(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) \exp \{-j\pi 2ut\} dt, \quad (3.5)$$

na qual u agora representa o domínio da frequência.

Como a transformada apresenta uma periodicidade de 4 em relação à a e sabendo que \mathcal{F}^1 é a transformada de Fourier tradicional e \mathcal{F}^{-1} é a transformada de Fourier inversa, e ainda

de forma mais genérica $\mathcal{F}^{-a} = (\mathcal{F}^a)^{-1}$, é possível calcular qualquer \mathcal{F}^a reduzindo o intervalo de valores de a para o $0, 5 \leq a \leq 1, 5$ [33].

Para que o cálculo da integral em 3.1 possa ser facilitado, algumas manipulações matemáticas podem ser feitas na função de núcleo $K_a(u, t)$, que possui um termo no expoente que pode ser completado com relação ao quadrado da diferença

$$(-2ut \csc \alpha + (t^2 + u^2) \cot \alpha) = t^2(\cot \alpha - \csc \alpha) + (t - u)^2 \csc \alpha + u^2(\cot \alpha - \csc \alpha),$$

pode-se reescrever a expressão da Transformada em 3.1 como

$$G_a(u) = C_\alpha e^{\{j\pi(\cot \alpha - \csc \alpha)u^2\}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{\{j\pi \csc \alpha(u-t)^2\}} \left[e^{\{j\pi(\cot \alpha - \csc \alpha)t^2\}} g(t) \right] dt. \quad (3.6)$$

As exponenciais da Equação 3.6 são *funções chirp lineares* e, de uma forma geral, podem ser definidas da seguinte maneira:

$$s_r(t) = \exp \{ -j\pi (rt^2 + bt + c) \}. \quad (3.7)$$

Na Seção 3.2 são detalhadas algumas propriedades das funções chirp, bem como a importância destas para o cálculo da FrFT e a implementação de algoritmos para este fim.

3.2 A função chirp

A função chirp pode ser definida como um sinal que possui todas as frequências em um dado intervalo, no qual sua frequência instantânea varia no tempo. Essa variação pode ocorrer de várias formas, por exemplo: linear, quadrática e logarítmica [34]. No caso da aplicação estudada, é utilizada a função chirp com variação linear de frequência, caso que é exemplificado na Figura 3.2, onde é apresentado um sinal chirp que varia a frequência de 0 a 50 Hz em um intervalo de 2 s.

Esse tipo de função mostra-se importante para o trabalho com a FrFT, não só por ser o tipo de sinal enviado pelo leitor como interrogação para as etiquetas sem chip no sistema RFID estudado, mas também porque a Transformada Fracionária de Fourier pode ser descrita da seguinte forma, segundo [31] (vide a Equação 3.6):

1. Uma pré-multiplicação por uma função chirp no domínio do tempo;
2. Cálculo da Transformada de Fourier tradicional com argumento escalado por um fator $\csc \alpha$;
3. Uma pós-multiplicação pela função chirp no domínio da transformada;
4. Multiplicação por um fator de amplitude complexo.

O algoritmo utilizado para a aplicação descrita neste trabalho segue os passos citados em [33,35] e é mostrado no Apêndice do trabalho.

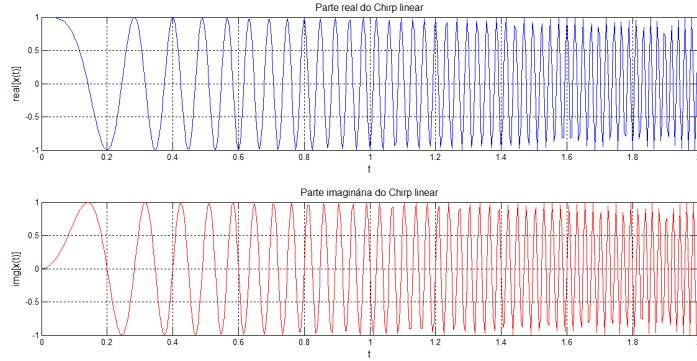


Figura 3.2 Exemplo de um sinal chirp linear que varia a frequência de 0 a 50 Hz em um intervalo de 2 s. Na figura são mostradas ambas as partes reais e imaginárias do sinal.

Para a aplicação estudada, o sinal chirp utilizado como interrogação do leitor para as etiquetas possui a seguinte expressão

$$s_r(t) = \begin{cases} e^{j2\pi\left(\left(\frac{B}{2T}\right)t^2 + \left(f_c - \frac{B}{2}\right)t\right)} & , \text{ para } 0 \leq t \leq T; \\ 0 & , \text{ caso contrário.} \end{cases} \quad (3.8)$$

Na qual B é a largura de banda do sinal, T é a sua duração, f_c a frequência central e r é a taxa de chirp, que no caso é $\frac{B}{T}$. Na Seção 3.2 é justificada a escolha desse tipo de sinal UWB em detrimento de outros sinais, bem como é abordada a técnica de escolha para a ordem fracionária ótima da transformação.

Valor ótimo para a ordem de uma FrFT

O sinal chirp é escolhido de acordo com o critério dado em [35,36], em que se demonstra que uma ordem específica α_{opt} pode ser otimizada para que a FrFT tenha o domínio fracionário onde a magnitude atinge o valor máximo para essa categoria específica de sinais.

Essa otimização leva em consideração características do sinal, como a largura de banda e sua duração. São esses parâmetros que definem a taxa de variação da frequência e podem ser representados geometricamente pela frequência instantânea do sinal. No caso da Expressão 3.8, a fase é dada por

$$\phi(t) = 2\pi \left(\left(\frac{B}{2T} \right) t^2 + \left(f_c - \frac{B}{2} \right) t \right)$$

e a frequência instantânea por

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \phi(t) = \frac{B}{T} t + \left(f_c - \frac{B}{2} \right),$$

na qual podem ser identificados a *taxa de variação de frequência*, também chamada de *taxa de chirp*, $r = \frac{B}{T}$ e a *frequência inicial*, $f_0 = f_c - \frac{B}{2}$.

A ordem otimizada da transformação será aquela na qual a integração resultará no domínio fracionário representada pelo eixo $u_{a_{opt}}$ que forma junto à reta da frequência instantânea um novo par de eixos perpendiculares (Figura 3.3).

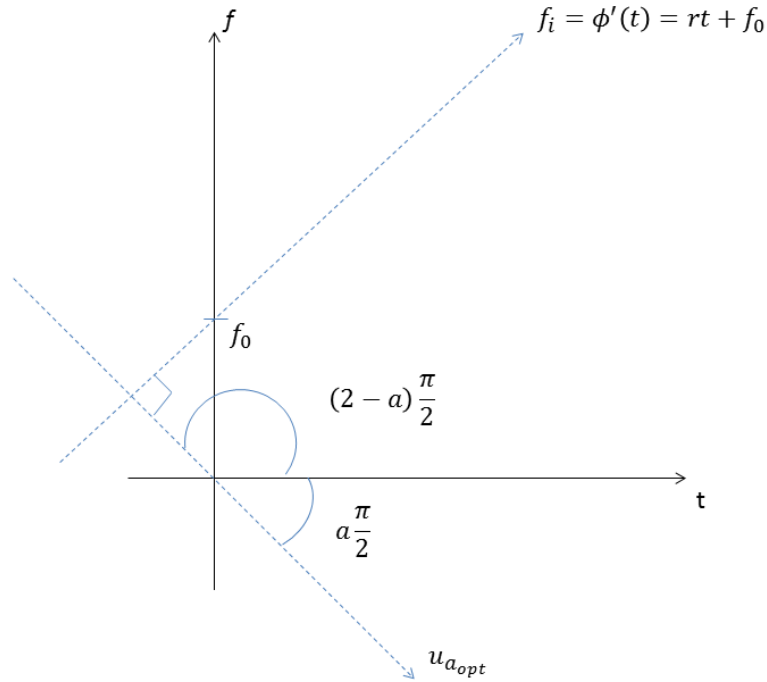


Figura 3.3 Interpretação geométrica para a ordem ótima da FrFT em relação ao sinal chirp linear com taxa de variação r .

Como existem duas transformadas possíveis com essa mesma saída, as duas que correspondem à rotações $(2 - a) \frac{\pi}{2}$ e $a \frac{\pi}{2}$, a ordem ótima pode ser calculada escolhendo o caso mais simples e utilizando relações geométricas [35]

$$a_{opt} = -\frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{1}{2r} \right), \quad (3.9)$$

e no caso do sinal discreto, com N amostras e frequência de amostragem f_s [35]

$$a_{opt} = -\frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{f_s^2/N}{2r} \right). \quad (3.10)$$

3.3 Propriedades da Transformada Fracionária de Fourier

Por ser uma operação de rotação, a FrFT possui propriedades importantes relacionadas à periodicidade, como é citado no texto da Seção 3.1. Considerando o operador \mathcal{F}^a e a ordem fracionária, alguns casos específicos podem ser enumerados:

1. Ordem zero, nenhuma rotação:

$$\mathcal{F}^0 = \mathcal{I}, \quad \text{operador identidade} \quad (3.11)$$

2. Ordem unitária, rotação de 90° :

$$\mathcal{F}^1 = \mathcal{F}, \quad \text{Transformada de Fourier} \quad (3.12)$$

3. Ordem múltipla de 4, rotações múltiplas de 360° :

$$\mathcal{F}^{4n} = \mathcal{I}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (3.13)$$

Essas propriedades influenciam diretamente o formato da função de núcleo $K_a(u, t)$, definindo a integral que representa a operação de transformada:

$$\begin{aligned} G_a(u) &= \int_{-\infty}^{+\infty} K_a(u, t)g(t)dt \\ &= \begin{cases} C_\alpha e^{\{j\pi(\cot \alpha - \csc \alpha)u^2\}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{\{j\pi \csc \alpha(u-t)^2\}} \left[e^{\{j\pi(\cot \alpha - \csc \alpha)t^2\}} g(t) \right] dt & \text{se } \alpha \text{ não é múltiplo de } \pi \\ g(t), & \text{se } \alpha \text{ é múltiplo de } 2\pi \\ g(-t), & \text{se } \alpha + \pi \text{ é múltiplo de } 2\pi \end{cases} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Além da periodicidade, a transformada fracionária também possui outras propriedades que auxiliam nos cálculos e análise das funções, algumas delas são mostradas na Tabela 3.1. Para o trabalho feito, duas propriedades em particular devem ser destacadas, a propriedade de deslocamento no tempo e a da aditividade das ordens em transformações sucessivas.

Propriedade de Deslocamento no Tempo

Em [31] é apresentada a propriedade de deslocamento no tempo como segue:

$$g(t - \tau) \leftrightarrow G_a(u - \tau \cos \alpha) e^{j\frac{\tau^2}{2} \sin \alpha \cos \alpha - j\omega\tau \sin \alpha}, \quad (3.15)$$

Tabela 3.1 Algumas propriedades da FrFT

	Sinal	FrFT para o ângulo α
1	$g(t - \tau)$	$G_a(u - \tau \cos \alpha) e^{j \frac{\tau^2}{2} \sin \alpha \cos \alpha - j u \tau \sin \alpha}$
2	$g(t) e^{j \lambda t}$	$G_a(u - \lambda \sin \alpha) e^{-j \frac{\lambda^2}{2} \sin \alpha \cos \alpha + j u \lambda \cos \alpha}$
3	$\frac{d^m g(t)}{dt^m}$	$(-j t \sin \alpha + \cos \alpha \frac{d}{dt})^m \mathcal{F}^a(g)$
4	$\int_b^c g(t) dt$	$\sec t \exp\left(-\frac{j t^2}{a} \tan \alpha\right) \int_b^c \exp\left(\frac{j t^2}{2} \tan \alpha\right) \mathcal{F}^a(g) dt$
5	$g(-t)$	$\mathcal{F}^{(a-2)}(g(t))$

calculando a magnitude da transformada, e sabendo que a magnitude da função exponencial é sempre unitária, se obtém

$$|\mathcal{F}^a \{g(t - \tau)\}| = |G_a(u - \tau \cos \alpha)|. \quad (3.16)$$

Observando a expressão anterior, pode-se ver que de acordo com os valores de α e τ é possível separar os perfis de magnitude no domínio fracionário, mesmo que as funções sejam similares, apenas possuindo um atraso no tempo entre elas.

Propriedade da Aditividade das Ordens em Transformações Sucessivas

A ordem a da transformada fracionária é relacionada com o ângulo de rotação α (equação 3.4), e pode-se demonstrar que realizar transformações sucessivas é equivalente à somar todos os correspondentes ângulos de rotação. Deste modo, fazendo as operações

$$1 \quad \mathcal{F}^{a_1} \{g\} = G_{a_1},$$

e

$$2 \quad \mathcal{F}^{a_2} \{G_{a_1}\} = G_{a_2},$$

pode-se otimizar o processo de duas rotações realizando a soma das duas ordens fracionárias:

$$\begin{aligned} \alpha &= \alpha_1 + \alpha_2 = a_1 \frac{\pi}{2} + a_2 \frac{\pi}{2} \\ &= (a_1 + a_2) \frac{\pi}{2}. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Essas duas propriedades detalhadas foram importantes para a realização da etapa de identificação e separação dos sinais, como é mostrado no Capítulo 4.

3.4 Exemplos

Para ilustrar a operação da Transformada Fracionária de Fourier, são mostradas algumas transformadas de diferentes ordens para dois tipos de sinais conhecidos, a janela retangular e o cosseno, e também para um sinal chirp.

A Figura 3.4 é uma janela retangular representada como um sinal no tempo e a Figura 3.5 mostra as várias representações da magnitude da FrFT em diferentes domínios fracionários para cinco valores de ordem a . É possível identificar que à medida que a se aproxima do valor 1, o perfil de magnitude da função transformada se aproxima da magnitude de uma função sinc, que é de fato a transformada de Fourier tradicional de uma janela retangular.

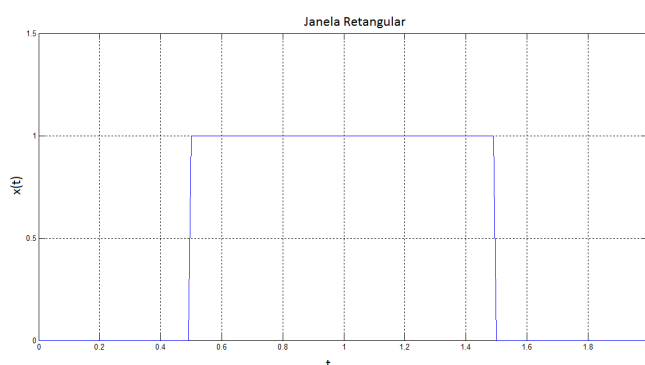


Figura 3.4 Sinal no tempo no formato de janela retangular.

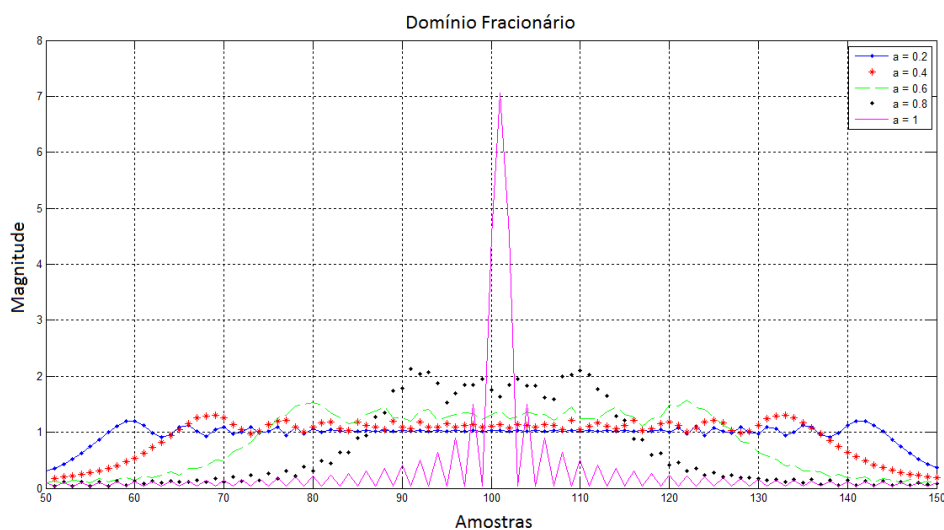


Figura 3.5 Transformada Fracionária de Fourier de várias ordens para a janela retangular no tempo. Observa-se que a medida que $a \rightarrow 1$, a função transformada tende ao formato da função $\text{sinc}(t)$

Já a Figura 3.6 é o gráfico de uma função cosseno no tempo, enquanto a Figura 3.7 mostra as várias transformadas fracionárias também para cinco valores de ordem fracionária a . Como a magnitude da transformada tradicional de Fourier para uma função cosseno consiste

em dois impulsos, pode-se perceber que é para esse perfil que a FrFT tende à medida que o valor de a tende à 1.

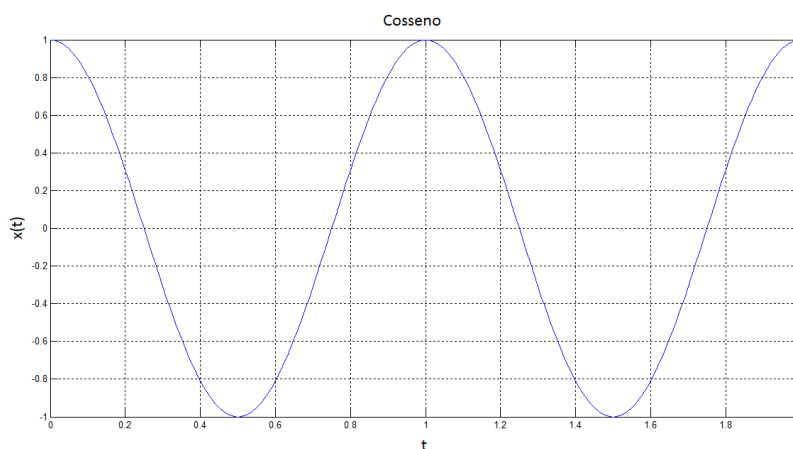


Figura 3.6 Função cosseno no tempo.

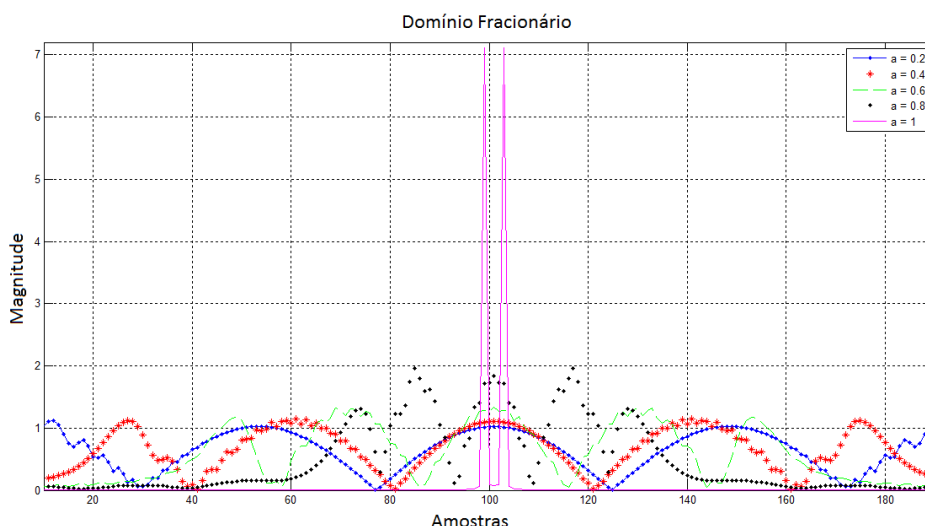


Figura 3.7 Perfil de magnitude da Transformada Fracionária de Fourier da função $x(t) = \cos(t)$ para cinco valores de a .

Para ilustrar a variação da FrFT para os diferentes valores de a , a Figura 3.8 mostra a superfície formada pelas magnitudes das diferentes transformadas fracionárias no caso da função janela retangular, com a variando no intervalo de 0 a 1. Pode-se observar que a janela retangular no domínio do tempo vai se modificando com a variação de a até que o módulo da sinc seja obtido, indicando o que o domínio é a frequência.

Também é feita a mesma análise de superfície para um sinal chirp. No caso das Figuras 3.9 e 3.4, é possível ver que para um dado valor de a , a superfície apresenta um pico que, segundo análise feita na Seção 3.2, seria o valor ótimo da ordem a_{opt} e resulta na representação mais compacta desse sinal, considerando os domínios fracionários. É possível ainda ver a magnitude da transformada de Fourier tradicional do sinal chirp, que consiste no espectro plano.

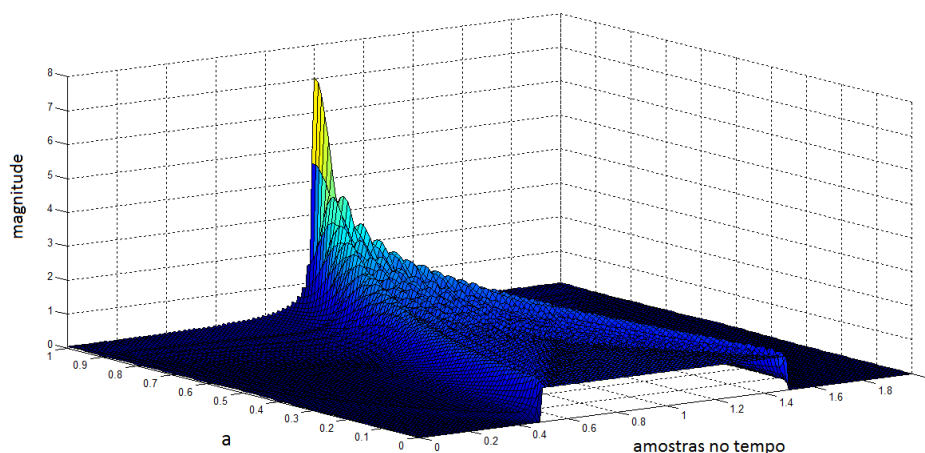


Figura 3.8 Superfície obtida a partir das magnitudes da FrFT com ordens $0 \leq a \leq 1$ da função janela retangular no tempo.

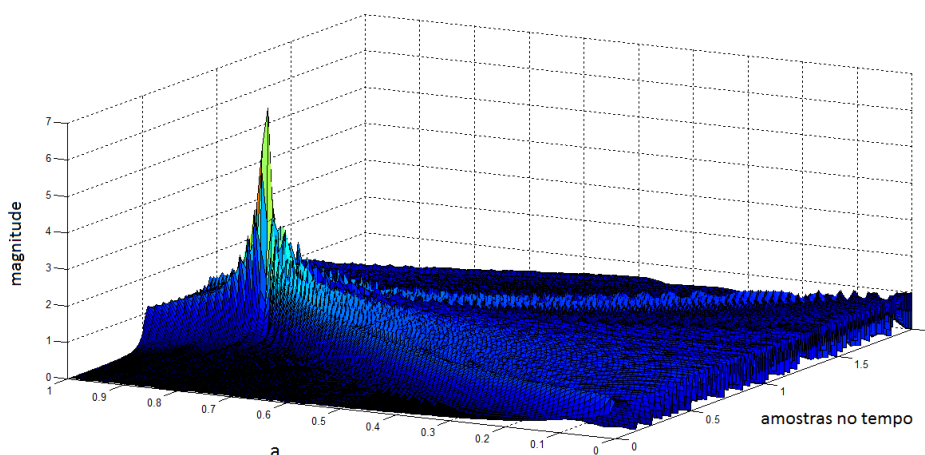


Figura 3.9 Superfície obtida a partir das magnitudes da FrFT com ordens $0 \leq a \leq 1$ da função chirp. É possível localizar o valor ótimo da ordem fracionária a partir do pico na magnitude.

Neste Capítulo são expostas as definições matemáticas e algumas propriedades importantes para o trabalho realizado. Destaca-se o potencial da Transformada Fracionária de Fourier como ferramenta para a análise de sinais e a importância dos sinais chirp na pesquisa desenvolvida. No Capítulo 4 o trabalho realizado é esquematizado e detalhado, mostrando a aplicação da FrFT, bem como o método utilizado na detecção dos bits impressos no espectro dos sinais retransmitidos pelas etiquetas sem chip.

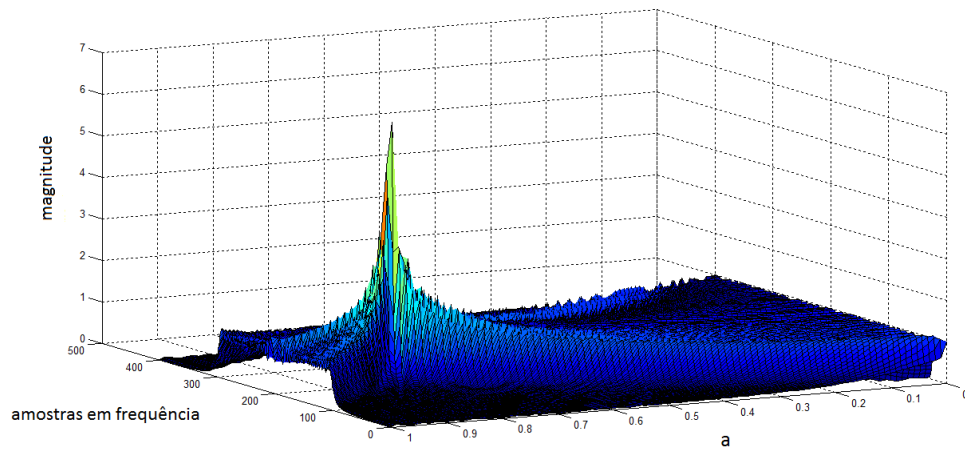


Figura 3.10 Na figura é mostrado que a FrFT do sinal chirp evolui para o espectro plano no domínio da frequência.

CAPÍTULO 4

Trabalho Realizado

Neste Capítulo são expostas as etapas realizadas no trabalho, que consistem na detecção de colisão e do número de etiquetas que colidiram, separação dos sinais de cada uma dessas etiquetas e identificação da informação binária impressa nos espectros individuais e chamada de ID da etiqueta.

4.1 Esquematização do Cenário Estudado

Para aplicação dos conceitos abordados nos Capítulos 2 e 3, e conseqüente realização do trabalho proposto, o seguinte cenário foi simulado em ambiente MatLAB: um leitor com duas antenas polarizadas ortogonalmente [37], que gera e emite um sinal chirp com $B = 1$ GHz de largura de banda, frequência central $f_c = 1,5$ GHz e duração $T = 100$ ns¹. Como é mostrado na Equação 3.8,

$$s(t) = e^{j2\pi\left(\left(\frac{B}{2T}\right)t^2 + \left(f_c - \frac{B}{2}\right)t\right)}, \text{ para } 0 \leq t \leq T.$$

Ao ser emitido, o sinal chegará às etiquetas dentro do alcance do leitor, onde será recebido pela antena de mesma polarização da antena TX do leitor, será modificado pela seção de multirressonadores e retransmitido pela antena TX da etiqueta (com mesma polarização da RX do leitor). Na Figura 4.1 é mostrado o esquema de resposta das etiquetas e o sinal de sobreposição na chegada ao leitor.

Caso existam n etiquetas no ambiente de leitura, o leitor receberá uma superposição desses n sinais

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) + \dots + x_n(t), \quad (4.1)$$

¹Como é citado no Capítulo 3, a duração do sinal chirp é o tempo no qual a frequência irá variar linearmente entre a frequência inicial f_0 e final f_1 .

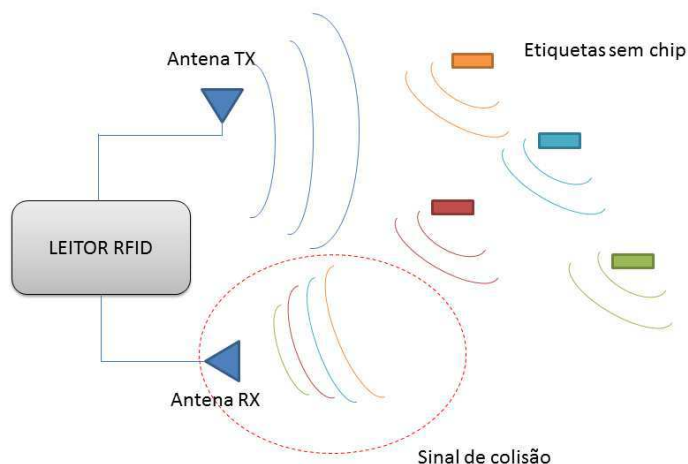


Figura 4.1 Esquema mostrando o cenário estudado. O leitor envia o sinal de interrogação e recebe uma sobreposição das respostas de cada uma das etiquetas.

na qual cada um dos $x_i(t)$ é uma versão modificada do sinal enviado $s(t)$. Essas modificações se referem às mudanças no espectro e aos atrasos por conta das diferentes distâncias entre etiquetas e leitor.

4.2 Separação dos Sinais com Assinatura Espectral

Nesta Seção é explicado como foi realizada a separação dos sinais no domínio fracionário. A FrFT foi utilizada em [10] como uma ferramenta para separação dos sinais chirps retransmitidos pelas etiquetas sem chip, pela transformação e janelamento no domínio fracionário de ordem a_{opt} . Com essa representação no domínio fracionário é possível indicar o número de sinais sobrepostos observando os picos na magnitude, cada um deles representa um dos sinais. Após a identificação dos picos, é realizado um janelamento em torno de cada um para obtenção das transformadas fracionárias individuais.

No trabalho citado, após o janelamento ser realizado a FrFT inversa, de ordem $-a_{opt}$, é aplicada individualmente, retornando assim para o domínio do tempo. Finalmente, é calculada a Transformada de Fourier tradicional para posterior análise do espectro.

O trabalho realizado expande a ideia descrita, explorando as propriedades matemáticas da FrFT e eliminando o passo intermediário de retorno para o domínio do tempo com a aplicação da Transformada tradicional de Fourier. A sequência dessas etapas são descritas a seguir.

Primeiro Passo: calcular a_{opt} e cálculo da FrFT

Como é visto na Seção 3.2, o uso do sinal chirp como interrogação para as etiquetas é justificado também pela possível otimização da FrFT com o cálculo da ordem ótima a_{opt} .

$$a_{opt} = -\frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{f_s^2 / N}{2r} \right).$$

Com o valor da ordem definido, calcula-se a transformada fracionária do sinal recebido pelo leitor, Equação 4.1, que é a sobreposição das respostas das etiquetas.

Segundo Passo: separação no domínio fracionário

Para separar as componentes chirp no domínio fracionário, a propriedade de deslocamento no tempo é explorada de acordo com os valores da ordem α_{opt} e dos atrasos τ . No caso estudado, foram consideradas três etiquetas que retransmitem o sinal recebido com diferentes atrasos. Deste modo, existirão diferentes valores de amostras dos sinais separados pelo fator $\tau_i \cos \alpha_{opt}$, o que possibilita o janelamento no domínio fracionário e a separação.

Terceiro Passo: transformação do domínio fracionário para o domínio da frequência

O passo final desta etapa consiste no uso da propriedade da aditividade das ordens em transformações sucessivas para converter os sinais janelados diretamente do domínio fracionário para a frequência, onde ocorre a análise das respostas das etiquetas com assinatura espectral. Assim, sabendo que a transformada de Fourier é um caso particular da FrFT com $a = 1$, pode ser feito

$$\mathcal{F}_{opt}^a \{g\} = G_{a_{opt}},$$

que é o sinal transformado do tempo para o domínio de ordem a_{opt} .

Após o janelamento, obtêm-se $X_{a_{opt}}^1, X_{a_{opt}}^2, \dots, X_{a_{opt}}^i$, com i sendo o número total de componentes chirp janeladas e separadas.

O próximo passo é a obtenção dos espectros individuais, o que pode ser feito com o cálculo da FrFT de ordem b , dada por

$$\mathcal{F}^b \{X_{a_{opt}}^i\} = \mathcal{F}^1 \{ \mathcal{F}^{-a_{opt}} \{X_{a_{opt}}^i\} \},$$

e o valor de b pode ser calculado como

$$\begin{aligned} b &= 1 + (-a_{opt}), \\ &= 1 - a_{opt}. \end{aligned} \tag{4.2}$$

Assim, o método utilizado propõe uma otimização em relação àquele utilizado em [10] com a exploração das propriedades matemáticas da FrFT, melhorando a performance computacional com a redução do número de operações realizadas.

O algoritmo utilizado para o cálculo da FrFT é o proposto em [33]. Este algoritmo computa a transformada fracionária com tempo de processamento $O(N \log N)$ para sinais com produto tempo-largura de banda igual a N . Pela redução de um passo no processo, o esforço computacional é diminuído pelo mesmo fator $O(N \log N)$.

Representação das etapas para separação dos sinais

Seja \mathcal{F}^a o operador que representa a transformada fracionária de Fourier de ordem a e quando $a = 1$, tem-se a transformada de Fourier tradicional, representada por \mathcal{F} .

Assim, a aplicação das transformadas fracionária e tradicional de Fourier a um sinal $x(t)$, dentro do contexto estudado, pode ser representada no diagrama abaixo

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{F}[x(t)] & \xrightarrow{\mathcal{F}^a} & X^a(u) \\ \mathcal{F} \downarrow & \swarrow \mathcal{F}^{1-a} & \\ & & X(\omega) \end{array}$$

O método proposto originalmente em [10], pode ser esquematizado pelo diagrama seguinte, levando em consideração que o sinal recebido no leitor é a sobreposição das respostas de duas etiquetas

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{F}[x_1(t) + x_2(t - \tau)] & \xrightarrow{\mathcal{F}^a} & X_1^a(u) + X_2^a(u - \tau \cos \alpha) \\ \mathcal{F} \downarrow & & \downarrow \text{janelamento} \\ X_1(\omega) + X_2(\omega) & & X_1^a(u) \text{ e } X_2^a(u) \\ \Downarrow \nexists & & \Downarrow \mathcal{F}^{-a} \\ X_1(\omega) \text{ e } X_2(\omega) & \xleftarrow{\mathcal{F}} & x_1(t) \text{ e } x_2(t) \end{array}$$

O método empregado no trabalho realizado é ilustrado com o diagrama a seguir, onde a seta dupla representa o passo de otimização, com a diminuição do número de operações em relação ao trabalho anterior:

$$\begin{array}{ccc}
 \mathcal{F}[x_1(t) + x_2(t - \tau)] & \xrightarrow{\mathcal{F}^a} & X_1^a(u) + X_2^a(u - \tau \cos \alpha) \\
 \downarrow \mathcal{F} & & \downarrow \text{janelamento} \\
 X_1(\omega) + X_2(\omega) & & X_1^a(u) \text{ e } X_2^a(u) \\
 \downarrow \# & \swarrow \mathcal{F}^{1-a} & \\
 X_1(\omega) \text{ e } X_2(\omega) & &
 \end{array}$$

4.3 Detecção dos Bits Codificados nas Assinaturas Espectrais

Os dados resultantes da identificação e separação das componentes chirp consistem nos espectros correspondentes à cada uma das respostas das etiquetas. Como é explicado na Seção 2.4.1, as etiquetas que operam com o princípio de assinatura espectral imprimem na magnitude do espectro do sinal recebido a sequência de bits do seu ID com o uso de estruturas ressonantes (Figura 4.2). É justamente esse ID que deve ser a leitura final do processo estudado.

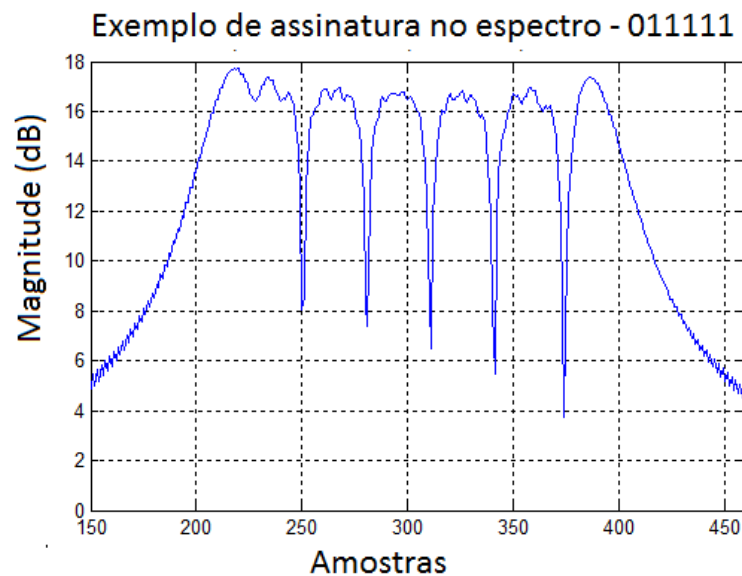


Figura 4.2 Exemplo de um espectro com assinatura impressa. As frequências de ressonância são definidas pelas características dos ressonadores nas etiquetas, que irão inserir ou não os nulos no espectro do sinal de interrogação.

O método utilizado no trabalho consiste na divisão do espectro em n canais, onde n é o número de bits que cada etiqueta possui no seu ID. Cada um desses canais pode ser enxergado como um sinal em separado, que terá como referência a frequência de ressonância correspondente ao ressonador responsável por imprimir o bit 1 ou 0. Por exemplo, nas simulações feitas foram utilizados 6 bits impressos em uma banda de 1 GHz, no intervalo 1 – 2 GHz, levando

em consideração as bandas de guarda (75 MHz no início e fim do espectro e 50 MHz entre os canais), com cada canal possuindo 100 MHz de largura, as frequências de ressonância foram $f_{r1} = 1,125$ GHz; $f_{r2} = 1,275$ GHz; $f_{r3} = 1,425$ GHz; $f_{r4} = 1,575$ GHz; $f_{r5} = 1,725$ GHz e $f_{r6} = 1,875$ GHz.

Após o janelamento feito em torno dessas frequências de ressonância, têm-se subcanais que se aproximam, em formato, de uma janela retangular (o bit 0) ou uma janela retangular com um "vale" aproximadamente do seu ponto central (bit 1), como é mostrado na Figura 4.3.

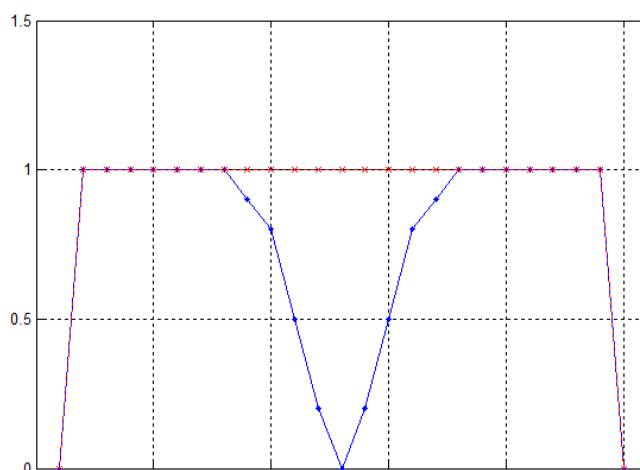


Figura 4.3 Sinais utilizados para comparação com para detecção dos bits 0 e 1. Uma janela retangular (o bit 0) ou uma janela retangular com um "vale" aproximadamente do seu ponto central (bit 1).

É feita então uma detecção de distância mínima com sinais de comparação que imitam o bit 1 e o bit 0. Deste modo, a menor distância irá indicar qual bit é codificado em cada canal. A expressão utilizada para esta detecção tem como princípio a distância euclidiana entre os sinais [38]:

$$\hat{b} = \arg \left(\min_{b_j} \{ \|\mathbf{x} - \mathbf{b}_j\|^2 \} \right). \quad (4.3)$$

Na Figura 4.4 é mostrado um diagrama de blocos contendo as etapas do trabalho realizado. Como é dito no início deste Capítulo, todo o processo é feito para que ocorra a detecção de colisão, a identificação de quantas etiquetas responderam, a separação dos sinais individuais e a decodificação de suas respectivas informações binárias. No Capítulo 5 são exibidos todos os resultados obtidos com a simulação do processo aqui descrito.

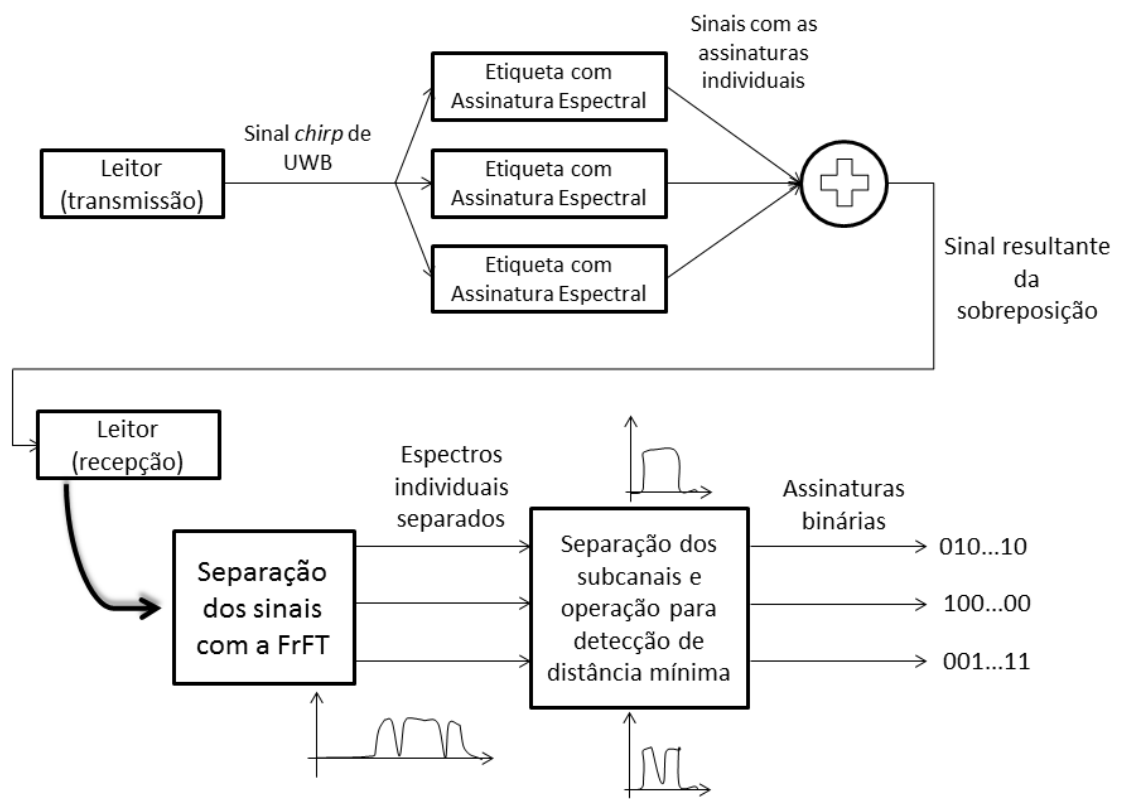


Figura 4.4 Diagrama de blocos resumindo o trabalho realizado.

CAPÍTULO 5

Resultados

Para a verificação de toda a teoria exposta nos outros capítulos e validação do trabalho de mestrado, foram realizadas **simulações** no ambiente do MatLab e sua respectiva linguagem de programação.

Os resultados esperados consistem na detecção de colisão, separação dos sinais colidentes e extração da informação binária dos sinais individuais anteriormente separados.

A eficácia do sistema pôde ser comprovada com as simulações realizadas e os resultados são mostrados neste Capítulo com a ajuda dos gráficos obtidos a partir dos sinais de comunicação do sistema e também com as simulações realizadas para uma variada combinação de etiquetas em três situações: (i) etiquetas que possuíam 6 bits codificados na assinatura espectral; (ii) etiquetas com 2 bits codificados; e (iii) etiquetas com 4 bits codificados. Essas duas últimas situações foram inseridas na análise para realizar testes comprovando que quanto maior a separação entre as frequências de ressonância, melhor a resposta do sistema, como é explicado na Seção 5.2.

As simulações foram realizadas com o intuito de reproduzir os sinais de comunicação para o cenário que é descrito a seguir:

- Ambiente com três etiquetas RFID sem chip baseada na tecnologia de multiressonadores que possuem a assinatura espectral como forma de codificação da informação binária;
- Para os testes principais, cada uma destas etiquetas codifica uma palavra binária com 6 bits;
- Leitor RFID que emite um sinal UWB como interrogação;
- O sinal emitido pelo leitor é um chirp linear, com 1 GHz de largura de banda e frequência central 1,5 GHz e duração de 100 ns, como é mostrado na Figura 5.1;
- Supondo as diferentes distâncias das etiquetas em relação ao leitor, são inseridos atrasos τ_i nos sinais retransmitidos pelas etiquetas;

- O sinal recebido pelo leitor consiste na sobreposição dos três sinais chirp retransmitidos pelas etiquetas (já com a impressão das assinaturas no espectro), com duração total de 200 ns.

Os parâmetros de simulação foram definidos a partir do número de amostras para o sinal chirp, $N = 512$ e frequência de amostragem $f_s = 5,11$ GHz.

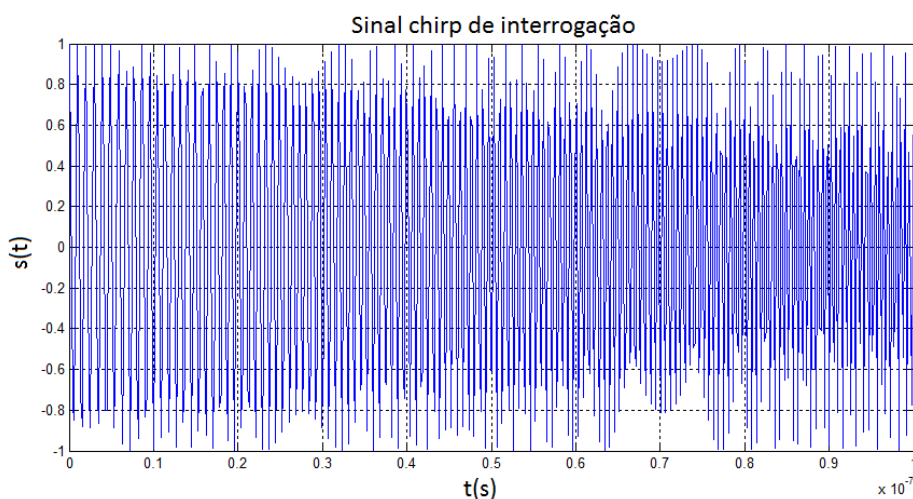


Figura 5.1 Gráfico no tempo do sinal utilizado como interrogação para as etiquetas.

Como o sinal chirp possui componentes em todas as frequências dentro de uma determinada banda, a magnitude de seu espectro possui um perfil aproximadamente plano, característica necessária para a aplicação em questão. A magnitude do espectro do sinal chirp enviado pelo leitor é mostrada na Figura 5.2.

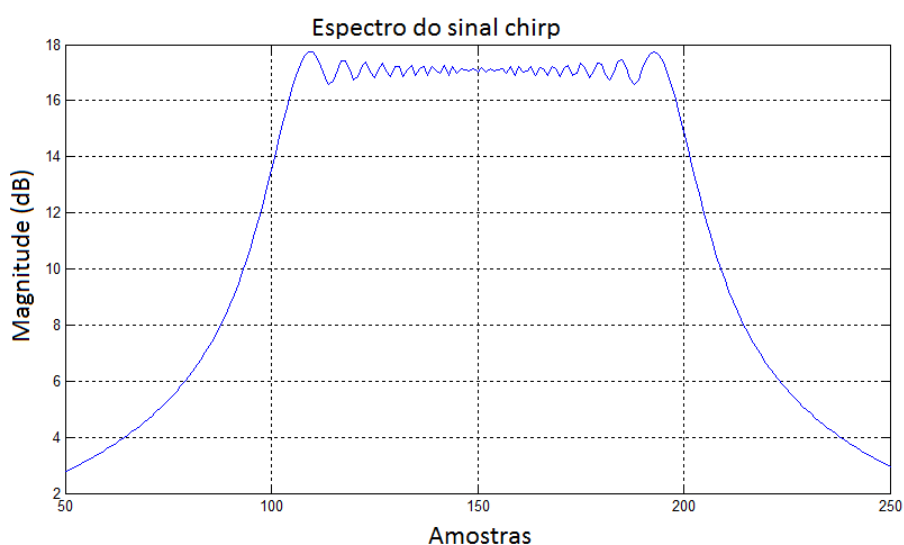


Figura 5.2 Espectro do sinal utilizado como interrogação para as etiquetas.

Com o link de comunicação leitor-etiquetas definido, o próximo passo consistiu em simular as respostas de cada etiqueta e os sinais retransmitidos e recebidos pelo leitor.

5.1 Identificação de Colisão e Separação dos Sinais Colidentes

Nesta etapa das simulações o interesse foi de identificar a colisão, o número de etiquetas colidentes e realizar a separação dos seus respectivos sinais.

As etiquetas tem o papel receber o sinal de interrogação enviado pelo leitor, imprimir a sua assinatura no espectro e realizar a retransmissão deste sinal modificado. Para emular a tecnologia dos multiressonadores, foram utilizados filtros digitais do tipo *notch*, que rejeitam uma frequência indicada. Os sinais de cada etiqueta são mostrados na Figura 5.3, onde apresentam codificação para as palavras: 011111 (triângulo), 001010 (quadrado) e 110111 (círculo).

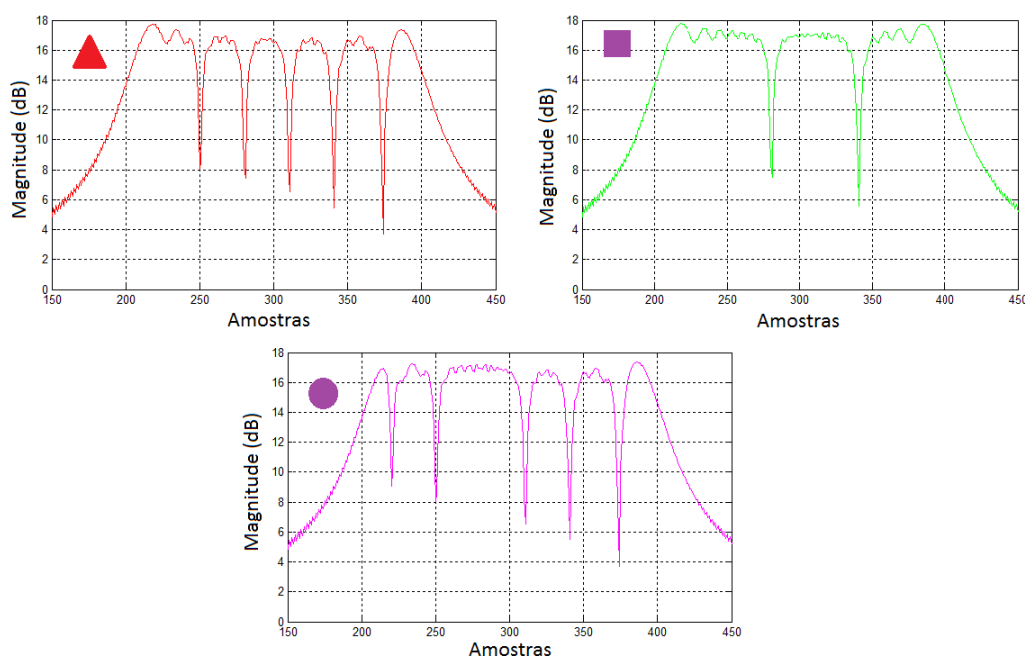


Figura 5.3 Espectro dos sinais individuais logo após terem recebido a impressão da assinatura que codifica a informação binária.

O sinal recebido pelo leitor tem o formato no tempo mostrado na Figura 5.4 e a partir dele não é possível tirar conclusões acerca das respostas das etiquetas, pois os sinais apresentam sobreposição total em alguns intervalos, mascarando as características individuais. Mesmo os atrasos que os sinais de resposta apresentam em relação uns aos outros não ajudam no processamento do sinal no domínio do tempo. Esses atrasos foram definidos para os três sinais como $\tau_1 = 0$, $\tau_2 = 30$ ns e $\tau_3 = 70$ ns.

Na Figura 5.5, é visto o espectro do sinal recebido. Do mesmo jeito que acontece com o sinal no tempo, não é possível identificar as informações individuais desejadas. Mesmo a característica plana de cada um dos espectros é perdida quando a sobreposição acontece.

Neste momento da simulação, o link de comunicação na resposta etiquetas-leitor também já foi concluído e pode-se então passar para os passos de processamento do sinal recebido.

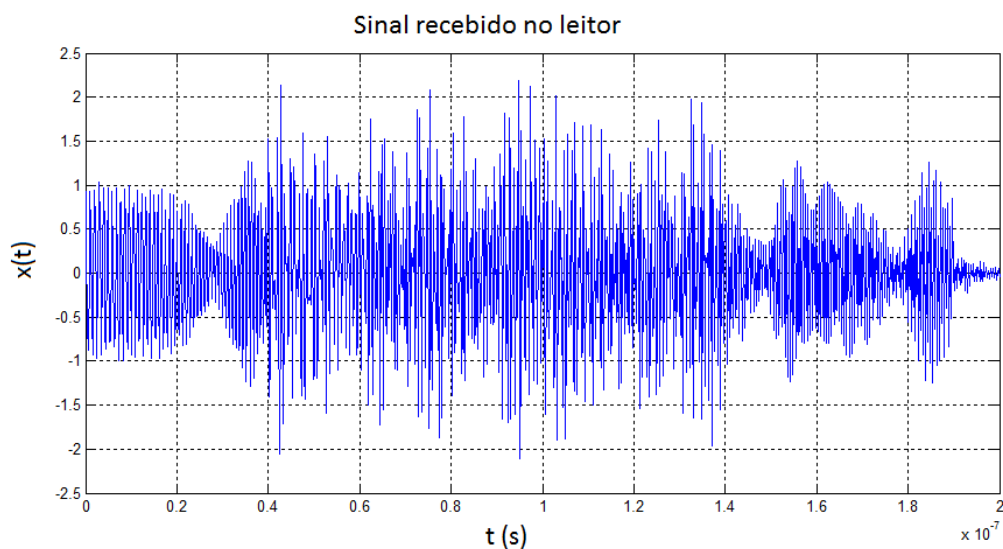


Figura 5.4 Sinal recebido pelo leitor, que é uma sobreposição das respostas das etiquetas no domínio do tempo. Apesar dos diferentes atrasos na chegada ao leitor, as características individuais dos sinais são mascaradas no domínio do tempo.

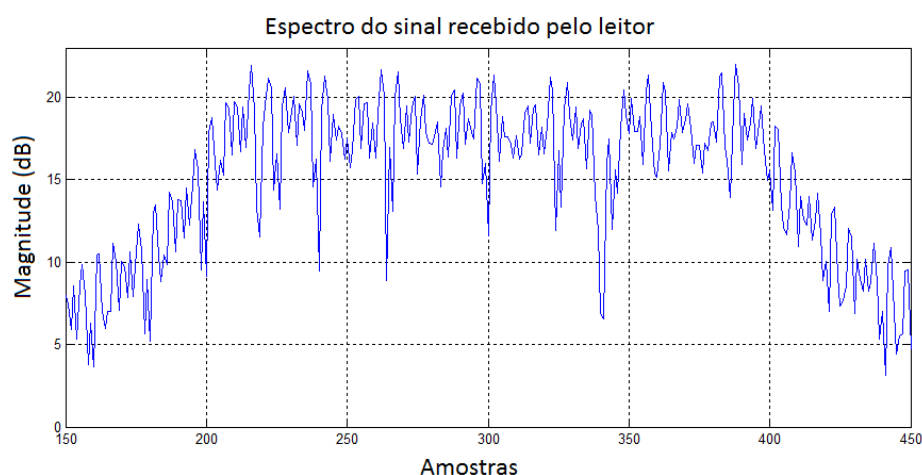


Figura 5.5 Espectro do sinal recebido pelo leitor. Percebe-se que mesmo a característica plana é perdida com a sobreposição da recepção.

Deste modo, é aplicada a Transformada Fracionária de Fourier no sinal recebido, que é a sobreposição das três respostas das etiquetas.

Como é visto no Capítulo 3, para que a aplicação da operação da FrFT seja eficaz, é necessário que a ordem fracionária seja a ideal para aquele sinal específico. O valor da ordem ótima de transformação é definido a partir dos parâmetros de $x(t)$ – o sinal recebido no leitor, que resultou em $a_{opt} = -0,7621$. Como é visto no Capítulo 3 e em [33], esse valor de a é recalculado para que pertença ao intervalo $0,5 \leq a \leq 1,5$ utilizando as propriedades da FrFT, o que resulta em $a_{opt} = 1,2379$. Esse novo cálculo para o valor de a leva principalmente as propriedades referentes à periodicidade explicadas na Seção 3.3.

Na figura 5.6 é mostrada a magnitude do sinal transformado para o domínio fracionário ótimo. Ao contrário da transformada de Fourier tradicional, nele é possível identificar três picos bem diferenciados espacialmente uns dos outros, que equivalem justamente a cada um dos sinais de resposta das três etiquetas. A separação dos picos deve-se ao fator $\tau \cos \alpha$, como é explicado na Seção 3.3. Pela simples detecção de valores máximos na magnitude do sinal no domínio fracionário é possível dizer que:

- 1 Sim, houve colisão;
- 2 O número de etiquetas colidentes é 3.

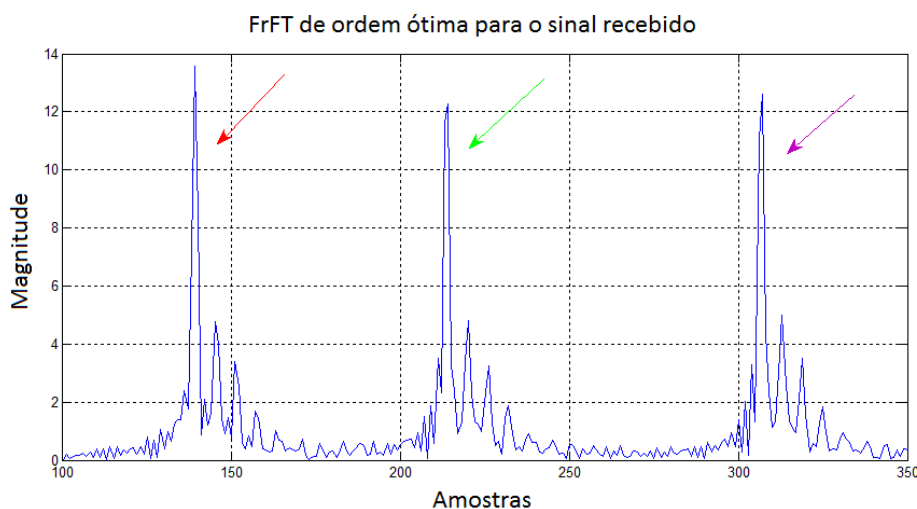


Figura 5.6 Transformada Fracionária de ordem ótima do sinal recebido pelo leitor. Cada um dos picos apontados com as setas representa uma das respostas das etiquetas.

Para a separação dos sinais, foi feito um janelamento no domínio fracionário utilizando janelas retangulares alocadas de acordo com a localização dos valores máximos do sinal.

Pode-se ver na Figura 5.7 cada um dos sinais janelados no domínio fracionário. São esses três sinais que serão transformados para o domínio da frequência, domínio no qual será possível a análise das assinaturas espectrais.

Na transformação direta para o domínio da frequência, é utilizada a propriedade da aditividade das ordens em transformações sucessivas – que é explicada na Seção 3.3, para que se possa obter a ordem necessária para a transformação fracionária. No caso, a nova ordem é obtida a partir da expressão $b = 1 - a_{opt}$.

Essa etapa da simulação é importante, pois diferentemente do que já havia sido proposto em trabalhos anteriores, [9, 10], uma operação de transformação torna-se desnecessária, a que traria o sinal de volta ao domínio do tempo, economizando assim processamento computacional (ver Seção 4.2). Na Figura 5.8 é mostrado cada um dos espectros recuperados.

Com o passo final da obtenção dos sinais individuais no domínio da frequência, é encerrada esta primeira etapa das simulações. A próxima etapa consiste na extração da informação binária, obtida a partir dos espectros.

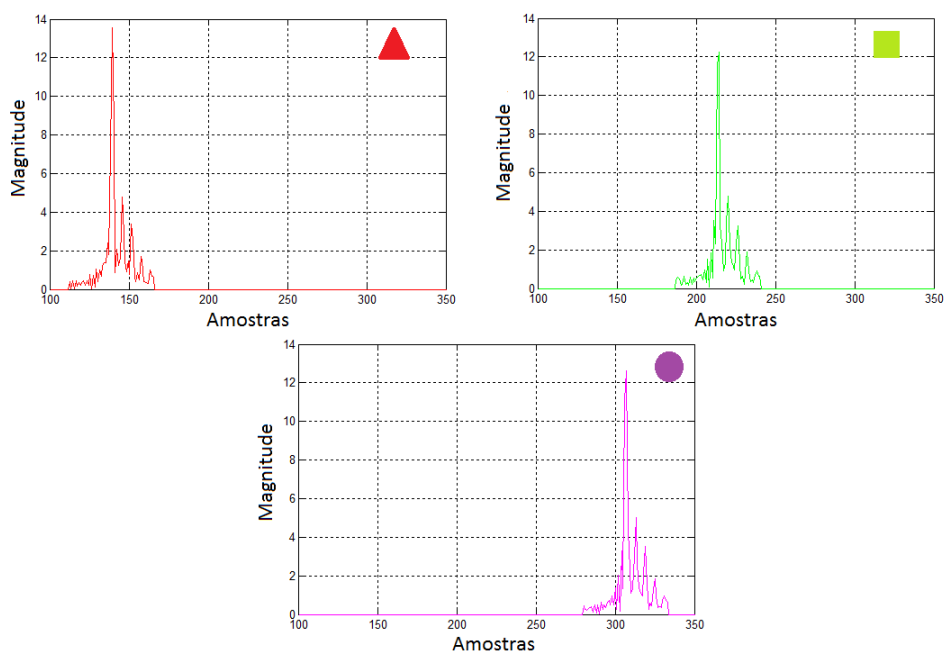


Figura 5.7 Sinais individuais após janelamento no domínio fracionário.

5.2 Extração da Informação Binária

Como é descrito na Seção 4.3, a etapa de extração da informação é feita baseada na detecção da distância mínima em relação à sinais de comparação que imitam os formatos de espectro que representam o bit 0 e o bit 1.

Para a comparação, a banda total de 1 GHz é dividida em seis subcanais, que possuem as frequências de ressonância como frequência central. Essas amostras resultantes da divisão são consideradas seis diferentes sinais, como é mostrado na Figura 5.9.

A Equação 4.3 é utilizada tendo como entrada cada um dos sinais que representam os subcanais e os dois sinais de comparação.

Ou seja, para cada subcanal são obtidos dois valores, o referente à distância ao sinal do bit 0 e ao sinal do bit 1, o menor destes indicará a qual dos sinais de comparação o subcanal mais se assemelha e, conseqüentemente, qual bit está codificado naquela porção do espectro.

Para a verificação da eficácia do método desenvolvido, inicialmente foram utilizadas sequências de seis dígitos binários gerados de forma pseudo-aleatória (utilizando a função do MatLab `rand()`) e então foram comparadas as saídas das assinaturas recuperadas com essas geradas.

A avaliação foi pela leitura correta da assinatura de cada etiqueta e também foi feita bit a bit, ou seja, para as cem vezes que a simulação foi feita, foram avaliados quais os bits tinham sido recuperados corretamente e quais foram trocados. Deste modo pôde-se construir a Tabela 5.1, que apresenta o número de vezes que a leitura foi correta e quantos foram os erros de cada bit quando da leitura incorreta.

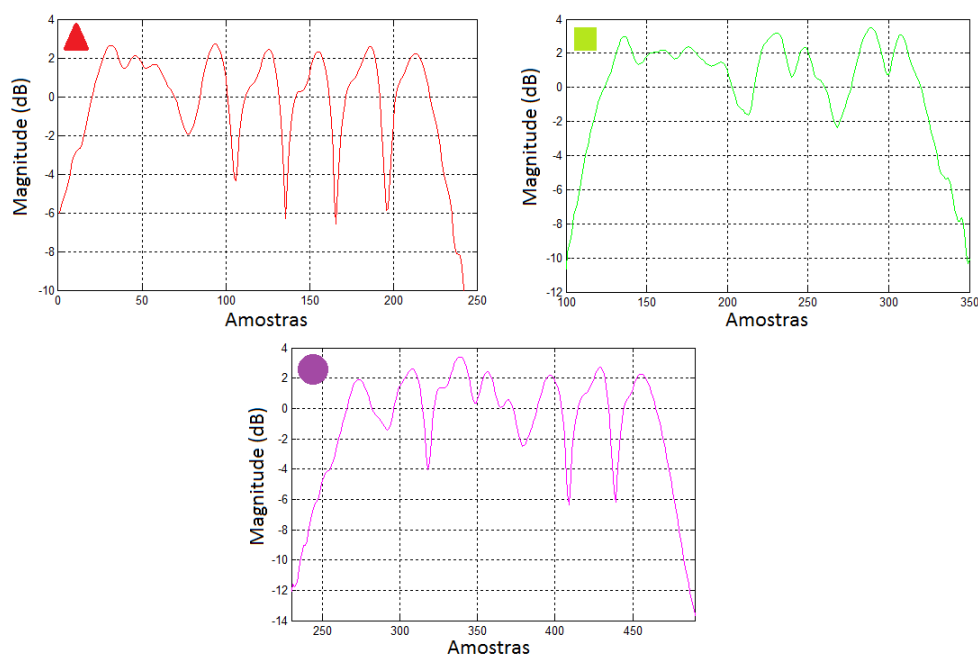


Figura 5.8 Espectros individuais após a transformação direta do domínio fracionário para o domínio da frequência.

Tabela 5.1 Resultados dos acertos na recuperação das assinaturas para 6 bits.

	Sinal após separação		
	Etiqueta 1 (x_1)	Etiqueta 2 (x_2)	Etiqueta 3 (x_2)
Leitura correta	91%	77%	86%
Erro 1° bit	2%	4%	4%
Erro 2° bit	4%	12%	11%
Erro 3° bit	1%	3%	4%
Erro 4° bit	0%	2%	1%
Erro 5° bit	0%	0%	0%
Erro 6° bit	5%	0%	1%

Como foi descrito no Capítulo 4, a simulação principal dividiu o espectro em seis canais para a codificação de 6 bits. Apesar da fase de separação dos sinais ter se apresentado eficaz ao que se propôs, a identificação dos bits obteve uma variação significativa, com a maior taxa de erro na leitura chegando à 23%, o que quer dizer que no pior dos casos, a cada 100 leituras, o leitor não conseguiria identificar o ID da etiqueta corretamente 23 vezes. Porém, nota-se que

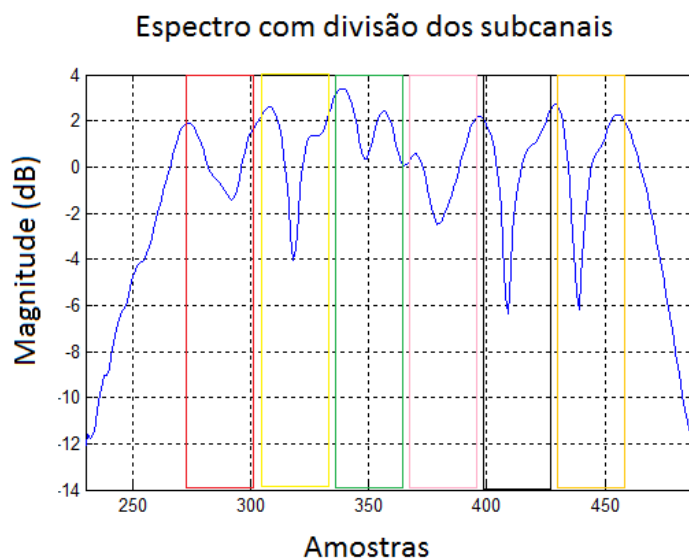


Figura 5.9 Espectro com os subcanais marcados para representar a divisão utilizada.

os resultados mostrados na tabela 5.1 apresentam os piores índices de acerto para os primeiros bits, levando a crer que a localização das frequências de ressonância influencia na identificação e que uma maior separação entre essas frequências elevaria a eficiência nessa leitura.

Diante dessa pergunta, surgem duas possibilidades para a realização de mais testes: aumentar a banda utilizada para que se possa separar mais as 6 frequências de ressonância ou diminuir o número de bits codificados para separar as frequências conservando a banda utilizada. Para que não houvessem maiores mudanças no sistema simulado e nos parâmetros já utilizados, optou-se pela segunda opção, a diminuição do número de bits.

Foram então realizados novamente o mesmo número de simulações, primeiramente para a codificação de 2 bits e posteriormente para a codificação de 4 bits. Nestas novas configurações, tem-se:

- 2 bits: 100 MHz no início e fim do espectro para guarda e cada uma das frequências situadas em 1,3 GHz e 1,7 GHz, ou seja, subcanais de 400 MHz para cada bit;
- 4 bits: 100 MHz no início e fim do espectro para guarda e cada uma das frequências situadas em 1,2 GHz, 1,4 GHz, 1,6 GHz e 1,8 GHz, com subcanais de 200 MHz.

No caso onde foram codificado apenas 2 bits em um canal de 1 GHz, o sistema simulado funcionou de maneira eficiente, demonstrando um índice de acerto de 100% das leituras, como é mostrado na Tabela 5.2. Porém, apesar dos resultados satisfatórios, o uso de 1 GHz de banda para codificação de apenas 2 bits, como é mostrado na Figura 5.10, não representa algo atrativo em termos práticos.

No terceiro caso proposto, onde foram inseridas assinaturas espectrais com 4 bits codificados, a porcentagem de acertos situou-se entre aqueles valores para as assinatura de 6 bits e

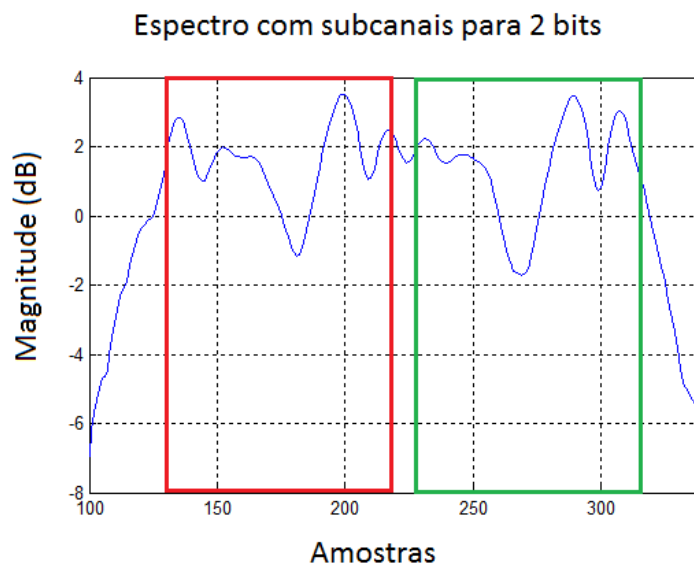


Figura 5.10 Espectro com banda de 1 GHz dividido em somente dois subcanais para codificação dos 2 bits.

Tabela 5.2 Resultados dos acertos na recuperação das assinaturas para 2 bits.

	Sinal após separação		
	Etiqueta 1 (x_1)	Etiqueta 2 (x_2)	Etiqueta 3 (x_2)
Leitura correta	100%	100%	100%
Erro 1° bit	0%	0%	0%
Erro 2° bit	0%	0%	0%

os valores de 100% de acerto para as assinaturas com 2 bits, como é mostrado na Tabela 5.3. A Figura 5.11 mostra a divisão da banda de 1 GHz nos quatro subcanais analisados.

Essas últimas simulações demonstraram que a separação das frequências de ressonância utilizadas para a marcação do espectro influencia a performance do método proposto, onde foi demonstrado que se fosse possível uma separação de 400 MHz, os índices de acertos chegam a 100%. Porém, considerando um nível prático de implementação e uso, a utilização de um canal de 1 GHz para codificação de poucos bits representa um número pequeno de possíveis etiquetas disponíveis, sabendo que as n possíveis combinações de b bits respeita a expressão $n = 2^b$.

De maneira geral, as simulações mostraram que o trabalho proposto apresentou resultados satisfatórios, principalmente no que diz respeito à separação dos sinais colidentes, pois os resultados foram sempre positivos para essa etapa do sistema independentemente do número de bits codificados no espectro. Nessa parte do trabalho, destaca-se principalmente o uso da transformada fracionária de Fourier como ferramenta na área de processamento de sinais.

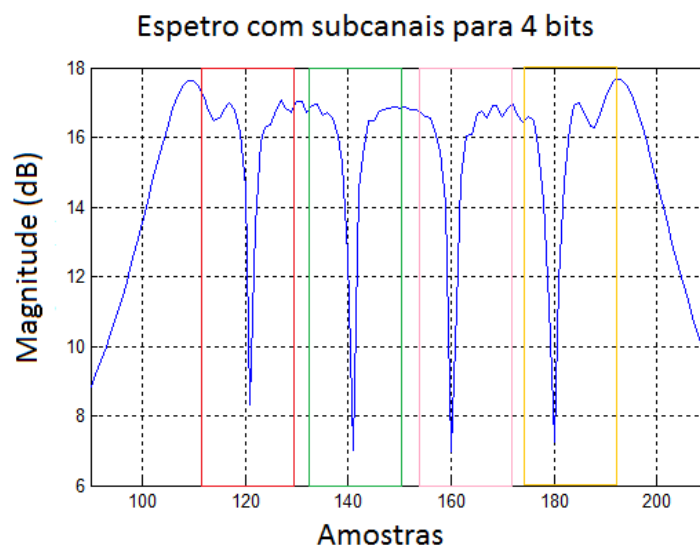


Figura 5.11 Espectro com banda de 1 GHz dividido em quatro subcanais para codificação dos 4 bits.

Tabela 5.3 Resultados dos acertos na recuperação das assinaturas para 4 bits.

	Sinal após separação		
	Etiqueta 1 (x_1)	Etiqueta 2 (x_2)	Etiqueta 3 (x_2)
Leitura correta	96%	95%	94%
Erro 1° bit	4%	4%	6%
Erro 2° bit	3%	0%	1%
Erro 3° bit	0%	5%	0%
Erro 4° bit	0%	0%	0%

Os resultados obtidos na parte de identificação das assinaturas binárias apontou para possíveis melhorias que podem ser objetivos de trabalhos futuros, tendo em vista um melhor aproveitamento da banda total do canal e mesmo a variação das técnicas utilizadas na identificação da presença dos nulos nas frequências de ressonância.

CAPÍTULO 6

Considerações Finais

A RFID se apresenta hoje como uma tecnologia alternativa para identificação e rastreamento que oferece características diferenciadas em relação aos sistemas mais tradicionais, como o código de barras e cartões magnéticos. Além dessas características mais conhecidas, a RFID permite a junção de outras funcionalidades, como o sensoriamento, por exemplo. Porém, para que a produção desses equipamentos (leitores e, principalmente, etiquetas) em larga escala torne-se algo viável, é necessário o barateamento dos custos. Como para as etiquetas boa parte dos custos de produção recai sobre os chips utilizados, muitas pesquisas na área evoluem para que o uso da tecnologia RFID sem chip se torne algo real.

Apesar da promissora vertente de aplicações, essa tecnologia sem chip enfrenta alguns problemas que já vinham sendo tratados há tempos nos sistemas tradicionais e que precisam de uma abordagem nova para o caso de etiquetas sem o circuito integrado. Por ser uma tecnologia que não necessita de uma linha de visada entre leitor e etiqueta, é recomendado que a comunicação nos sistemas RFID possua mecanismos de segurança e também que garantam a leitura de todos os elementos em um ambiente com muitas etiquetas, evitando e tratando as colisões de leitura.

É nesta área que a pesquisa de mestrado aqui detalhada se focou. Pois apesar de ser um tema já tratado nos protocolos de comunicação existentes para os sistemas RFID tradicionais, a questão das colisões de leitura para a RFID sem chip ainda se apresenta como algo pouco desenvolvido, graças também à variedade de tecnologias ainda sendo propostas e testadas para essas novas etiquetas e às diferentes formas de comunicações dessas tecnologias, que variam entre as mudanças de características dos sinais no tempo ou frequência (amplitude e fase).

Deste modo, foram escolhidas algumas pesquisas e trabalhos já publicados como ponto de partida para que houvesse um foco para o problema a ser tratado. As etiquetas sem chip que operam com a assinatura espectral como forma de codificação da informação, e possuem a análise no domínio da frequência como ferramenta de processamento dos sinais de comunicação, são a base para o desenvolvimento de um método já existente e melhorado neste trabalho. A

escolha foi feita levando em consideração o grau de facilidade de uma possível futura implementação física do sistema.

No Capítulo 3 foi feita uma abordagem acerca da transformada fracionária de Fourier e seu papel fundamental no método de separação para os sinais colidentes provindos das etiquetas no momento da leitura. Os resultados obtidos nesta etapa do trabalho foram relevantes, principalmente para a contribuição dada à área, onde a exploração das propriedades matemáticas da transformada levaram ao melhoramento do desempenho computacional do método já utilizado.

O uso desta ferramenta da análise no tempo-frequência é um dos pontos principais da dissertação de mestrado, mostrando-se também como um assunto a ser mais explorado, não só para as aplicações em RFID, mas também em sistemas que requerem tratamento de sinais em geral. Além das aplicações em separação de sinais, a FrFT também pode ser aplicada em outros problemas, como a filtragem e até mesmo a resolução de equações diferenciais [32].

Quanto à identificação da informação binária impressa nos espectros dos sinais retransmitidos pelas etiquetas com as estruturas ressonantes, algumas ressalvas devem ser feitas. Apesar do desempenho do sistema ter apresentado bons resultados quando as frequências de ressonância foram mais afastadas umas das outras, o caso onde 6 bits foram impressos apresentou uma taxa de erros considerável e que poderia causar problemas em uma aplicação prática. Os problemas são consequência do deslocamento das frequências de ressonância, devido principalmente às sucessivas transformações de domínio realizadas com os sinais. Deve-se lembrar que essas operações consistem de passos como interpolações e convoluções que são realizadas para os sinais na forma discreta, acarretando perda de informação. No caso de aplicações práticas, devem ainda ser considerados as questões inerentes à propagação de ondas de rádio frequência no espaço, que também podem causar modificações na localização das frequências de ressonância e consequentemente no formato dos espectros.

Os resultados parciais obtidos a partir da separação dos sinais com a análise no domínio fracionário resultaram em um artigo publicado no IEEE Latin-American Conference on Communications – LATINCOM 2013, com o título de "Application of Fractional Fourier Transform in Processing of Chipless Signal Collision". Um outro artigo que aborda os resultados do trabalho em sua totalidade está em processo de escrita para ser submetido ao IEEE RFID-TA 2014 Conference, onde são apresentados também os resultados do uso de detecção da distância mínima em relação a sinais de comparação para recuperação da informação binária.

O trabalho realizado se apresenta como continuidade na pesquisa relacionada à RFID em relação ao trabalho de conclusão de curso [39] e também se destaca por ser o primeiro nessa instituição de ensino (Universidade Federal de Campina Grande – UFCG) na área de processamento de sinais para aplicações com a RFID que possui etiquetas sem chip.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

A partir dos resultados apresentados e dos pontos considerados importantes e com potencial para a continuação da pesquisa, é feita uma lista com sugestões para possíveis trabalhos futuros.

- Explorar as possíveis modificações que a FrFT impõe à fase dos sinais, utilizando mais esta característica como parâmetro para observação;
- Verificar qual a implicação nas variações de atraso na chegada dos sinais ao leitor e a influência desses intervalos na separação dos sinais, o que levaria em conta a localização das etiquetas no momento da leitura, informação relevante em alguns tipos de aplicação da RFID;
- Explorar novas formas de identificação dos pontos de ressonância (local do *notch*);
- Otimização da separação das frequências de ressonância;
- Avaliar a possibilidade do uso de técnicas de códigos para que a capacidade de armazenamento de informação binária das etiquetas possa ser aumentada;
- Variar aleatoriamente o número de etiquetas na simulação, bem como inserir um fator de multiplicação para variação da amplitude nos sinais de resposta.

Referências Bibliográficas

- [1] WANG J.; HASSANIEH, H. K. D. e. I. P. Buzz: Efficient and reliable low-power backscatter networks. *ACM SIGCOMM*, August 2012.
- [2] AUTO-ID LABS. Abril 2013. <http://www.autoidlabs.org/>.
- [3] BANG O.; CHOI, J. L. D. e. L. H. *Efficient Novel Anti-collision Protocols for Passive RFID Tags*. [S.l.], March 2009.
- [4] ANEE R. E KARMAKAR, N. Efficient collision detection method in chipless rfid systems. In: *Electrical Computer Engineering (ICECE), 2012 7th International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 830–833.
- [5] RFID Journal. Janeiro 2014. <http://www.rfidjournal.com/>.
- [6] INC., E. *EPCglobal Class 1 Generation 2 V. 1.2.0*. [S.l.], 2012.
- [7] PRERADOVIC S. E KARMAKAR, N. Chipless rfid: Bar code of the future. *Microwave Magazine, IEEE*, v. 11, n. 7, p. 87–97, 2010.
- [8] NAMIAS, V. The fractional order fourier transform and its application to quantum mechanics. *J. Insr. Math. Appl.*, v. 25, p. 241–265, 1980.
- [9] COWELL D. M. J. E FREEAR, S. Separation of overlapping linear frequency modulated (lfm) signals using the fractional fourier transform. v. 57, n. 10, p. 2324–2333, 2010.
- [10] AZIM R.E. E KARMAKAR, N. A collision avoidance methodology for chipless rfid tags. In: *Microwave Conference Proceedings (APMC), 2011 Asia-Pacific*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1514–1517.
- [11] FINKENZELLER, K. *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification*. 2nd. ed. [S.l.]: Wiley, 2003.
- [12] SANTINI, A. *RFID (Radio Frequency Identification): Conceitos, Aplicabilidade e Impactos*. 1a. ed. [S.l.]: Ciência Moderna, 2008.

- [13] HUNT V.D.; PUGLIA, A. e. P. M. *RFID: A Guide to Radio Frequency Identification*. 1st. ed. [S.l.]: Wiley-Interscience, 2007.
- [14] RFID Journal. Abril 2013. <http://brasil.rfidjournal.com/>.
- [15] ALIEN Technology. Janeiro 2014. <http://www.alientechnology.com/>.
- [16] UPM Raflatac. Janeiro 2014. <http://www.upmraflatac.com/>.
- [17] PRERADOVIC S. E KARMAKAR, N. Advanced radio frequency identification design and applications. In: PRERADOVIC, D. S. (Ed.). [S.l.]: InTech, 2011. cap. Fully Printable Chipless RFID Tag.
- [18] BOLIC M.; SIMPLT-RYL, D. e. S. I. *RFID SYSTEMS: Research, trends and challenges*. 1st. ed. [S.l.]: Wiley, 2010.
- [19] GLOVER B. E BHAAT, H. *Fundamentos de RFID: Teoria e Prática*. Rio de Janeiro: Alta Books, 2007.
- [20] IMPINJ. Janeiro 2014. <http://www.impinj.com/>.
- [21] RAMPIM, R. Regulamentação do espectro de frequência para o sistema rfid. *RFID Journal Brazil*, Março 2013.
- [22] HARROP P. E DAS, R. *Printed and Chipless RFID Forecasts, Technologies and Players 2009-2029*. [S.l.], 2009.
- [23] KALANSURIYA P. E KARMAKAR, N. Time domain analysis of a backscattering frequency signature based chipless rfid tag. In: *Microwave Conference Proceedings (APMC), 2011 Asia-Pacific*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 183–186.
- [24] KALANSURIYA P.; KARMAKAR, N. e. V. E. Signal space representation of chipless rfid tag frequency signatures. In: *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011), 2011 IEEE*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–5.
- [25] RFSAW. Abril 2013. <http://www.rfsaw.com/>.
- [26] XU J. E CHEN, R. Meandered microstrip transmission line based id generation circuit for chipless rfid tag. In: *Electrical Design of Advanced Packaging and Systems Symposium (EDAPS), 2011 IEEE*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–4.
- [27] RAO K. V. S.; NIKITIN, P. e. L. S. Antenna design for uhf rfid tags: a review and a practical application. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, v. 53, n. 12, p. 3870–3876, 2005.

- [28] SCHULER M.; MANDEL, C. M. M. G. A. e. J. R. Phase modulation scheme for chipless rfid- and wireless sensor tags. In: *Microwave Conference, 2009. APMC 2009. Asia Pacific*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 229–232.
- [29] ISLAM M.A. E KARMAKAR, N. A novel compact printable dual-polarized chipless rfid system. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, v. 60, n. 7, p. 2142–2151, 2012.
- [30] JIA X.; FENG, Q. F. T. e. L. Q. Analysis of anti-collision protocols for rfid tag identification. In: *Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), 2012 2nd International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 877–880.
- [31] ALMEIDA, L. B. The fractional fourier transform and time-frequency representations. *IEEE Transactions on Signal Processing*, Ieee, v. 42, n. 11, p. 3084–3091, 1994.
- [32] ALMANASRAH A.M. E ABUSHAGUR, M. The transforms and applications handbook: Second edition. In: _____. [S.l.]: CRC Press LLC, 2000. cap. Fractional Order Fourier Transforms.
- [33] OZAKTAS H.M. E ARIKAN, O. Digital computation of the fractional fourier transform. *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 44, n. 9, p. 2141–2150, 1996.
- [34] BULTHEEL A. E MART, H. A shattered survey of the fractional fourier transform. n. April, 2002.
- [35] CAPUS C. E BROWN, K. Short-time fractional fourier methods for the time-frequency representation of chirp signals. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 113, n. 6, p. 3253, 2003. ISSN 00014966.
- [36] UNNIKRISHNAN A.; JACOB, R. e. T. T. Applications of fractional fourier transform in sonar signal processing. *IETE Journal of Research*, v. 55, n. 1, p. 16–27, 2009.
- [37] PRERADOVIC S. E KARMAKAR, N. *Multiresonator-Based Chipless RFID: Barcode of the Future*. [S.l.]: Springer, 2012.
- [38] PROAKIS, J. *Digital communications*. [S.l.]: McGraw-Hill, New York, 1995.
- [39] LOPES, C. D. R. *Implementação de um Sistema RFID Baseado em Rádio Definido Por Software*. [S.l.], Dezembro 2011.
- [40] DOBKIN, D. *The RF in RFID: Passive UHF RFID in Practice*. 1st. ed. [S.l.]: Elsevier, 2008.
- [41] KUROSE J.F. E ROSS, K. *Redes de Computadores e a Internet: Uma abordagem top-down*. 5 ed.. ed. [S.l.]: Pearson, 2010.

- [42] CAPDEVILA S.; JOFRE, L. R. J. e. B. J. Passive rfid based sensing. In: *RFID-Technologies and Applications (RFID-TA), 2011 IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2011.
- [43] BULTHEEL, A. A two-phase implementation of the fractional fourier transform. n. March, 2011.
- [44] SAXENA R. E SINGH, K. Fractional fourier transform : A novel tool for signal processing. *Journal of The Indian Institute of Science*, v. 85, p. 11–26, 2005.
- [45] PRERADOVIC S.; BALBIN, I. R. S. M. K. N. e. S. G. *Radio frequency transponder*. April 2008. Australian Provisional Patent Application P30228AUPI.

Códigos para Simulação do Sistema

Programa Principal

```
%Programa para simulação do sistema RFID leitor + etiquetas sem chip
e
%processamento dos sinais no que diz respeito à identificação e
tratamento
%de colisões e reconhecimento da assinatura espectral. O programa
%implementa o estudo teórico para pesquisa de Mestrado.
%
%Autora: Camila D. R. Lopes.
%Orientadores: Edmar C. Gurjão, Francisco M. de Assis.

tic
clear all
%% Parâmetros do sistema
T = 100e-9; %Duração de cada sinal
individualmente
T_total = 200e-9; %Duração total do sinal
B = 1000e6; %Largura de banda ocupada
fc = 1.5e9; %Frequência central
f0 = fc - B/2; f1 = fc + B/2; %Frequências inicial e final do chirp

N = 512; %Número de amostras de cada chirp

t = linspace(0, T, N); %Vetor de valores no tempo para o
chirp
t_amostragem = t(2)-t(1); %Tempo de amostragem
fs = 1/t_amostragem; %Frequência de amostragem

eixo_freq = fs*linspace(0, 1, 2*N); %Vetor de valores em
frequência
```

```

eixo_tempo = linspace(0, T_total, 2*N); %Vetor de valores no tempo
        para o sinal recebido

%% Sinais enviados
%Alocação para os sinais enviados
x1 = zeros(1,2*N);
x2 = zeros(1,2*N);
x3 = zeros(1,2*N);
%Atrasos de cada um dos sinais enviados
tau1 = 0;
tau2 = 30e-9;
tau3 = 70e-9;
%Expressão para o sinal chirp
aux = exp(1i*2*pi*((B./(2*T))*t.^2 + f0*t));

for i=1:length(aux)
    x1(i+fix(tau1/t_amostragem)) = aux(i);
    x2(i+fix(tau2/t_amostragem)) = aux(i);
    x3(i+fix(tau3/t_amostragem)) = aux(i);
end

%% Simulação das etiquetas
%Frequências para os nulos(notchs)
f_nulo = zeros(6,1);
f_nulo(1,1) = 0.73*fc;
f_nulo(2,1) = 0.83*fc;
f_nulo(3,1) = 0.93*fc;
f_nulo(4,1) = 1.03*fc;
f_nulo(5,1) = 1.13*fc;
f_nulo(6,1) = 1.24*fc;

%etiqueta1
etiql = round(rand(1,6)); %escolha de 6 bits para a assinatura
for h =1:6 %Se o dígito binário for 1, um dos ressonadores é
    simulado e o
        %notch é inserido no espectro
        if etiql(1,h) == 1
            x1 = filtro_etiq(x1, f_nulo(h), fs);
        end
end
end

```

```

%etiqueta2
eti2 = round(rand(1,6)); %escolha de 6 bits para a assinatura
for h =1:6
    if eti2(1,h) == 1
        x2 = filtro_etiq(x2, f_nulo(h), fs);
    end
end

%etiqueta3
eti3 = round(rand(1,6)); %escolha de 6 bits para a assinatura

for h =1:6
    if eti3(1,h) == 1
        x3 = filtro_etiq(x3, f_nulo(h), fs);
    end
end

%Soma para a simular a recepção dos sinais no leitor
x = x1+x2+x3;

%% Cálculo da transformada fracionária de Fourier
r = B/(T_total); %Taxa de chirp
a = (-2/pi)*atan((fs^2/(2*N))/(2*r)); %Ordem ótima da FrFT

%X1_frft = frft(x1, a);
%X2_frft = frft(x2, a);
%X3_frft = frft(x3, a);
X_frft = frft(x, a);

%Identifica o número de componentes chirp e consequentemente o número
de
%etiquetas que responderam à interrogação do leitor
n = num_componentes(X_frft);

%% Sinais enviados no tempo
figure(1),
subplot(2, 1, 1), plot(eixo_tempo,x1), xlabel('tempo'), ylabel('
    amplitude'), title('sinais enviados'), grid on, hold on
plot(eixo_tempo,x2,'r')
plot(eixo_tempo,x3,'k')
subplot(2, 1, 2)

```

```

plot(eixo_tempo,x), xlabel('tempo'), ylabel('amplitude'), title('
    sinal recebido no leitor'), grid on

%% Magnitude no domínio fracional para os sinais enviados
figure(2),
plot((abs(X_frft)), xlabel('Amostras'), ylabel('Amplitude'), title('
    Magnitude da FrFT'),grid on, hold on
% %plot((abs(X2_frft)), 'r')
% %plot((abs(X3_frft)), 'k')
% %plot((abs(X1_frft)), 'm')

%% Janelamento
%O janelamento é feito com o sinal no domínio fracionário e operado
    com o
%uso de janelar retangulares alocadas segundo os máximos encontrados
[X1_frft_, sem_comp] = janela_rect(X_frft);
[X2_frft_, sem_comp] = janela_rect(sem_comp');
[X3_frft_, sem_comp] = janela_rect(sem_comp');

%Após o janelamento é feita aplicada outra FrFT para a transformação
    direta
%para o domínio de frequência.
%Espectros individuais recuperados
X1_ = frft(X1_frft_, 1-a);
X2_ = frft(X2_frft_, 1-a);
X3_ = frft(X3_frft_, 1-a);

%% Sinais recuperados: Espectro
figure(3),
subplot(3, 1, 1), plot((abs(X1_)), xlabel('Amostras'), ylabel('
    Magnitude'), title('Espectro dos sinais recuperados'), grid on,
    hold on
subplot(3, 1, 2), plot((abs(X2_)), 'r'), xlabel('Amostras'), ylabel('
    Magnitude'), title('Espectro dos sinais recuperados'), grid on
subplot(3, 1, 3), plot((abs(X3_)), 'k'), xlabel('Amostras'), ylabel('
    Magnitude'), title('Espectro dos sinais recuperados'), grid on

%% Detecção das assinaturas no espectro
%Etapa final da simulação onde é recuperada a informação binária
    impressa
%nos espectros individuais dos sinais reposta das etiquetas.

```

```

assinaturas = rand(n, 6);
assinaturas(1, :) = detecta_assinatura(X1_);
assinaturas(2, :) = detecta_assinatura(X2_);
assinaturas(3, :) = detecta_assinatura(X3_);

```

toc

Funções implementadas

```

%Recebe um sinal x e devolve a quantidade de máximos maiores que um
valor estabelecido.

```

```

function n = num_componentes(x)
%Recebe um sinal x e devolve a quantidade de máximos maiores que um
valor estabelecido.

N = length(x);
jan = zeros(N);
flag = 0;
for i=1:N
    if abs(x(i)) <= 0.5*max(abs(x))
        jan(i) = 0;
    else
        jan(i) = 1;
        if jan(i-1) == 0
            flag = flag+1;
        end
    end
end
n = flag;

```

```

%Função que tem como função inserir os nulos no espectro dos sinais
quando chamada.

```

```

function f = filtro_etiq(x, freq_corte, f_amost)
%Função que tem como função inserir os nulos no espectro dos sinais
quando chamada.

wo = freq_corte/(f_amost/2);
bw = wo/35;
[b,a] = iirnotch(wo,bw);

f = filter(b,a,x);

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
function [sinal_jan , sem_comp] = janela_rect(X)
```

```
%Função destinada a realizar o janelamento de cada uma das  
componentes
```

```
%identificadas no sinal recebido pelo leitor. O janelamento é feito  
com
```

```
%janelas retangulares alocadas segundo a localização dos valores  
máximos.
```

```
%(N, 1) -> (1, N)
```

```
X = X';
```

```
N = length(X);
```

```
tam = 64;
```

```
X_ = zeros(1, N);
```

```
for d=1:N
```

```
    if abs(X(1, d)) >= 0.5*max(abs(X))
```

```
        X_(1, (d+1-tam/2):(d+tam/2)) = X(1, (d+1-tam/2):(d+tam/2))  
        );
```

```
        X(1,1:(d+tam/2)) = 0;
```

```
        break
```

```
    end
```

```
end
```

```
sinal_jan = X_;
```

```
sem_comp = X;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
function f = detecta_assinatura(x)
```

```
%Função que utiliza dois sinais de comparação para cálculo da  
distância
```

```
%mínima e decisão de qual bit determinado subcanal do espectro possui  
%impresso.
```

```
N = length(x);
```

```
X = abs(x);
```

```
X = 10*log10(X);
```

```
assinatura = rand(1, 6);
```

```
tam = 198;
```

```
X_ = zeros(1, tam);
```

```
for k = 1:N
```

```
    if X(k) >= 0
```



```

        X_(1,:) = X(k:k+tam-1);
        break
    end
end

limiar = max(X_) - min(X_);

if limiar <= 5, f = zeros(1, 6); return, end;
if limiar > 5
    for j = 1:tam
        if X_(j) > 0, X_(j) = 1; end;
        if X_(j) <= 0, X_(j) = 0; end;
    end
    canais = [X_(1, 8:37);
              X_(1, 39:68);
              X_(1, 70:99);
              X_(1, 101:130);
              X_(1, 132:161);
              X_(1, 163:192)];

    bit0 = [ones(1, length(canais(1,:, 1)))];
    bit1 = [ones(1, 8), 0.9, 0.8, 0.5, 0.4, 0.3, 0.1, 0, 0, 0.1,
            0.3, 0.4, 0.5, 0.8, 0.9, ones(1,8)];

    for m = 1:6
        temp0 = norm(canais(m, 1:length(bit0))-bit0)^2;
        temp1 = norm(canais(m, 1:length(bit0))-bit1)^2;
        if temp0 < temp1
            assinatura(1, (7-m)) = 0;
        else assinatura(1, (7-m)) = 1;
        end
    end
end

f = assinatura;

```

Algoritmo Utilizado para o Cálculo da FrFT

```

function Faf = frft(f, a)
% The fast Fractional Fourier Transform
% input: f = samples of the signal

```

```

%          a = fractional power
% output: Faf = fast Fractional Fourier transform

% H.M. Ozaktas , M.A. Kutay, and G. Bozdagi.
% [i]Digital computation of the fractional Fourier transform.[/i]
% IEEE Trans. Sig. Proc., 44:2141--2150, 1996.

error(nargchk(2, 2, nargin));
f = f(:);
N = length(f);
shft = rem((0:N-1)+fix(N/2),N)+1;
sN = sqrt(N);
a = mod(a,4);
% do special cases
if (a==0), Faf = f; return; end;
if (a==2), Faf = flipud(f); return; end;
if (a==1), Faf(shft,1) = fft(f(shft)); return; end %
if (a==3), Faf(shft,1) = ifft(f(shft)); return; end %
% reduce to interval 0.5 < a < 1.5
if (a>2.0), a = a-2; f = flipud(f); end
if (a>1.5), a = a-1; f(shft,1) = fft(f(shft))/sN; end %/sN
if (a<0.5), a = a+1; f(shft,1) = ifft(f(shft))*sN; end %*sN
%the general case for 0.5 < a < 1.5
alpha = a*pi/2;
tana2 = tan(alpha/2);
sina = sin(alpha);
f = [zeros(N-1,1) ; interp(f) ; zeros(N-1,1)];
% chirp premultiplication
chrp = exp(-1i*pi/N*tana2/4*(-2*N+2:2*N-2)'.^2);
f = chrp.*f;
% chirp convolution
c = pi/N/sina/4;
Faf = fconv(exp(1i*c*(-4*N-4):4*N-4)'.^2),f);
Faf = Faf(4*N-3:8*N-7)*sqrt(c/pi);
% chirp post multiplication
Faf = chrp.*Faf;
% normalizing constant
Faf = exp(-1i*(1-a)*pi/4)*Faf(N:2:end-N+1);

function xint=interp(x)
% sinc interpolation

```

```
N = length(x);  
y = zeros(2*N-1,1);  
y(1:2:2*N-1) = x;  
xint = fconv(y(1:2*N-1), sinc( (-(2*N-3):(2*N-3))'/2));  
xint = xint(2*N-2:end-2*N+3);
```

```
function z = fconv(x,y)  
% convolution by fft  
N = length([x(:);y(:)])-1;  
P = 2^nextpow2(N);  
z = ifft( fft(x,P) .* fft(y,P));  
z = z(1:N);
```