



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

**Melhoria do desempenho de sistemas
RFID UHF passivos utilizando códigos de
singularização**

Felipe Pereira Rodrigues

Campina Grande - PB, Brasil

Outubro - 2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Melhoria do desempenho de sistemas RFID UHF passivos utilizando códigos de singularização

Felipe Pereira Rodrigues

Dissertação de Mestrado apresentada 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 Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Informação.

Linha de Pesquisa: Eletrônica e Telecomunicações.

Prof. Francisco Marcos de Assis, Dr.

Orientador

Campina Grande - PB

Outubro - 2018

R696m Rodrigues, Felipe Pereira.
Melhoria do desempenho de sistemas RFID UHF passivos utilizando
códigos de singularização / Felipe Pereira Rodrigues. - Campina Grande,
2018.
48 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal
de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2018.
"Orientação: Prof. Dr. Francisco Marcos de Assis".
Referências.

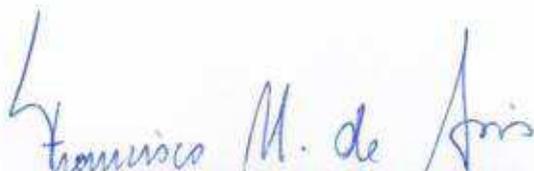
1. Códigos de Singularização. 2. Engenharia Elétrica - Identificação. 3.
Engenharia Elétrica - Colisões. 4. RFID. I. Assis, Francisco Marcos de. II.
Título.

CDU 621.396(043)

**MELHORIA DO DESEMPENHO DE SISTEMAS RFID UHF PASSIVOS
UTILIZANDO CÓDIGOS DE SINGULARIZAÇÃO**

FELIPE PEREIRA RODRIGUES

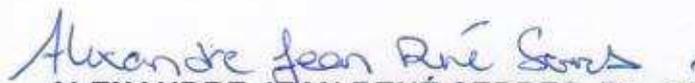
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 19/10/2018



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



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



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

Aos meus pais, José Roberto e Ednalva.

Agradecimentos

- Ao Deus da vida, por caminhar junto a mim durante todo o mestrado.
- Aos meus pais, José Roberto e Ednalva, por todo amor, educação, carinho, cuidado e paciência durante esta etapa de minha vida.
- À minha namorada, Evelynne Pontes, por ser o meu porto seguro e me ajudar a enxergar os caminhos com olhos de sabedoria.
- Ao meu orientador, professor Francisco Marcos de Assis, pelos ensinamentos relacionados à ciência e à vida em cada encontro semanal do IQuanta.
- Aos professores membros da banca, Alexandre Serres e Raimundo Freire, pelas valiosas correções fornecidas ao trabalho.
- Ao CNPq, pelo suporte financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

“Devemos nos tornar a mudança que desejamos ver no mundo.”

(Mahatma Gandhi)

Resumo

Com o aumento da quantidade de etiquetas RFID em aplicações práticas, diversos problemas, a exemplo da colisão - evento no qual duas ou mais etiquetas transmitem sinais de forma simultânea -, têm seus efeitos acentuados, resultando em aumento no tempo de identificação e perdas significativas de energia durante o processo de comunicação. Assim, a utilização de protocolos de identificação eficientes constitui um dos principais desafios para o projeto desses sistemas. Métodos clássicos são implementados assumindo que a informação presente no sinal de colisão deve ser descartada. Este trabalho utiliza uma abordagem distinta, em que as colisões constituem o fundamento de um método de recuperação da informação para as etiquetas RFID passivas na faixa de UHF. O conceito dos códigos de singularização é revisto e um protocolo de identificação que utiliza essas estruturas é investigado. Resultados obtidos por meio de simulações apresentaram uma diminuição no tempo total de identificação e um aumento da taxa de transferência para cenários com alta densidade de etiquetas em comparação a dois métodos baseados em ALOHA.

Palavras-Chave: Códigos de singularização, identificação, colisões, RFID.

Abstract

With the RFID tags quantity growth in practical applications, several issues, such as collisions - event in which two or more tags transmit signals simultaneously -, have their effects reinforced, what results in an increase of identification delays and significant energy losses during the communication process. Thus, the use of efficient identification protocols constitutes one of the main challenges for designing of these systems. Classical methods are implemented assuming that the information in the collision signal must be discarded. This work uses a different approach, in which collisions are the basis of a method of information recovery for passive RFID tags in the UHF range. The concept of singulation codes is reviewed and a identification protocol that uses these structures is investigated. Results obtained through simulations have been shown a decrease in the total time identification and an increase in the throughput for scenarios with high density of tags compared to two ALOHA-based methods.

Keywords: Singulation codes, identification, collisions, RFID.

Sumário

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	ix
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Organização do trabalho	4
2 Tecnologia RFID	5
2.1 Histórico da RFID	5
2.2 Componentes de um sistema RFID	7
2.2.1 Etiqueta	7
2.2.2 Leitor	9
2.2.3 Middleware	10
2.3 Princípio de funcionamento	11
2.3.1 Alimentação das etiquetas	11
2.3.2 Transferência dos dados	13
2.4 Aspectos Regulatórios	14
2.4.1 ISO	15
2.4.2 EPC	15
2.5 Aplicações	16
3 Algoritmos Anticolisão	20
3.1 Métodos baseados em Árvore	21
3.1.1 <i>Tree Splitting</i>	21
3.1.2 <i>Query Tree</i>	22
3.1.3 Busca binária	24
3.2 Métodos baseados em ALOHA	26
3.2.1 DFSA	26
3.2.2 Algoritmo Q	27

4	Métodos utilizados	32
4.1	Método da Seção Transversal de Radar	32
4.2	Códigos de singularização	35
4.3	Protocolo proposto	37
4.3.1	Código de Hamming dual	37
4.3.2	Código de Kroenecker	39
4.4	Resultados	41
5	Considerações Finais	44
	Referências Bibliográficas	45

Lista de Figuras

1.1	Tecnologias de Identificação Automática - AIDC.	2
2.1	Componentes básicos de um sistema RFID.	8
2.2	Representação de uma etiqueta genérica.	8
2.3	Diversos formatos de construção das etiquetas RFID.	9
2.4	Diversos tipos de leitores comerciais.	10
2.5	Representação do fluxo de potências durante o processo de comunicação em um sistema RFID baseado em retroespalhamento eletromagnético.	14
2.6	Exemplo de cartão de identificação inteligente.	16
2.7	Sistema RFID utilizado no transporte público.	17
2.8	Animal utilizando etiqueta RFID em foma de colar.	18
2.9	Conjunto de cargas atravessando uma estação de identificação.	18
3.1	Representação do método <i>Tree Splitting</i>	22
3.2	Representação do método <i>Query Tree</i>	23
3.3	Representação dos valores de bit para a codificação Manchester.	24
3.4	Exemplo de aplicação da codificação Manchester para dois sinais em colisão.	25
3.5	Representação do método da busca binária.	25
3.6	Fluxograma de execução dos métodos DFSA-b.	28
3.7	Diagrama de estados das etiquetas RFID durante a etapa Inventário do algoritmo-Q.	29
3.8	Fluxograma de execução do algoritmo-Q durante a etapa de Inventário.	31
4.1	Exemplo da formação da constelação no plano I/Q para a comunicação com duas etiquetas.	34
4.2	Representação gráfica das constelações formadas durante o evento de colisão entre (a) duas etiquetas e (b) três etiquetas.	35
4.3	Fluxograma de execução do protocolo proposto.	38
4.4	Variação da quantidade de <i>slots</i> em relação ao número de etiquetas.	42
4.5	Taxa de transferência média para os métodos utilizados como função do número de etiquetas.	43

Lista de Tabelas

2.1	Divisão das faixas de frequência utilizadas por sistemas RFID e suas características.	11
2.2	Classificação dos sistemas RFID quanto ao princípio de operação.	12
2.3	Valores das perdas no espaço livre α_{PL} para diversos valores de distância etiqueta-leitor e frequência de operação.	13
2.4	Documentos que fazem parte do padrão ISO/IEC 18000.	15
3.1	Representação dos estados dos <i>slots</i> e dos valores dos contadores das etiquetas para o protocolo <i>Tree Splitting</i>	22
3.2	Representação dos estados das Rodadas e da variação na pilha do leitor para o protocolo <i>Query Tree</i>	23
3.3	Regra geral para a obtenção dos identificadores de busca para o método da Busca Binária.	25
4.1	Ganhos percentuais dos códigos de singularização para um valor de 500 etiquetas em campo.	42

CAPÍTULO 1

Introdução

A identificação é um conceito central em áreas específicas do conhecimento humano [1]. No mundo moderno, pessoas são identificadas de forma automática; aplicações necessitam de algum tipo de identificação a fim de entregarem um conjunto de informações personalizadas ou restringir o acesso a dados e/ou procedimentos. Da mesma forma, temos vivenciado a materialidade do conceito da *Internet of Things* - Internet das Coisas - conforme previsto por Mark Weiser¹. A IoT é descrita como um ecossistema em que objetos e dispositivos inteligentes são interligados através da Internet com o objetivo de serem monitorados e fornecerem informações em tempo real, resultando em uma maior demanda por métodos de identificação confiáveis e seguros [2]. A partir dos anos 1980, tecnologias de identificação automática e captura de dados, AIDC ou Auto-ID, a exemplo dos códigos de barras, tiveram um impacto significativo na redução dos custos da distribuição de mercadorias e administração de estoques na cadeia de produção [3]. Esses métodos têm como fundamento a não-intervenção humana para promover uma maior eficiência de leitura e uma menor suscetibilidade a erros. A Figura 1.1 destaca os principais sistemas de identificação AIDC, com base em *Finkenzeller* [4].

Dentre os métodos de AIDC, a tecnologia RFID apresenta-se como uma alternativa viável, do ponto de vista econômico, para a identificação de objetos ou seres vivos nas mais diversas aplicações. Características como capacidade de memória, reprogramação, não intervenção humana, redução do custo dos dispositivos e a união ao paradigma da IoT possibilitaram a adoção dessa tecnologia em larga escala, em substituição aos tradicionais métodos de identificação. Estima-se que o mercado global de RFID alcance os US\$ 47 bilhões de dólares no final do período 2017-2027, uma diferença aproximada de US\$ 30 bilhões em relação ao seu valor atual [5]. Há uma grande variedade de sistemas de identificação por rádio frequência que podem ser utilizados atualmente a depender de requisitos tais como frequência de operação, raio de leitura e capacidade de processamento. No entanto, os sistemas RFID UHF passivos se destacam nesse cenário devido ao baixo custo de fabricação das etiquetas e distâncias de leitura

¹Mark D. Weiser (1952-1999) foi um cientista da computação e diretor de tecnologia da Xerox PARC, nos Estados Unidos. Em 1988 definiu o termo "computação ubíqua" para caracterizar uma geração da computação em que os dispositivos fazem parte do cotidiano das pessoas de modo transparente.

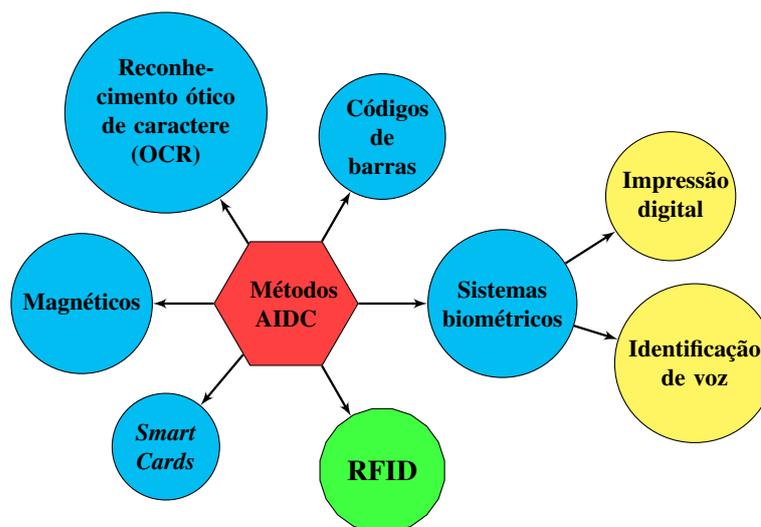


Figura 1.1 – Tecnologias de Identificação Automática - AIDC.

que podem ultrapassar os 10 metros [4].

Um sistema RFID passivo tradicional é composto por um leitor e uma ou mais etiquetas. Estas recebem a energia para o seu funcionamento e os comandos necessários à sua operação dos dispositivos leitores, os quais sempre iniciam o processo de identificação e possuem, em geral, grande capacidade de processamento e uma ampla memória. O objetivo do leitor consiste em identificar de forma unívoca todas as etiquetas presentes em sua região de leitura através de um canal compartilhado. Com o aumento da quantidade de etiquetas RFID nas mais diversas aplicações, alguns problemas têm seus efeitos acentuados, a exemplo das colisões - evento no qual duas ou mais etiquetas transmitem suas mensagens de forma simultânea. Como resultado, ocorre uma diminuição da taxa de leitura do sistema, perda significativa de energia e aumento no tempo total de identificação. Assim, um dos requisitos fundamentais a serem atendidos por esses sistemas em uma aplicação prática é a identificação rápida e confiável de todas as etiquetas, dadas as suas condições limitadas de alimentação e processamento.

Métodos de identificação clássicos utilizam protocolos anticolisão com o objetivo de diminuir a probabilidade de ocorrência das colisões. Esses protocolos são categorizados, em geral, de acordo com o recurso - tempo, frequência, espaço ou código - a ser compartilhado em TDMA, FDMA, SDMA e CDMA [6]. Contudo, os protocolos TDMA representam a grande maioria e subdividem-se em determinísticos e aleatórios, possuindo como representantes principais os protocolos baseados em árvore e ALOHA, respectivamente, ou protocolos híbridos, ao unir aspectos de ambos [7]. O padrão EPC Global [8], um documento que contém os requisitos físicos e lógicos que um sistema RFID passivo na faixa de UHF deve atender e que foi adotado pela Organização Internacional para Padronização, ISO, utiliza um protocolo anticolisão baseado em ALOHA como solução para o acesso ao canal. Apesar das diferenças entre si, esses métodos são implementados assumindo que a informação presente no sinal de colisão entre etiquetas deve ser descartada.

Por outro lado, alguns trabalhos abordam o evento de colisão de maneira distinta, utilizando-o para extrair informação útil para o processo de identificação das etiquetas envolvidas. *Benbaghdad e Tedjini* apresentam em [9] um modelo do sinal de colisão entre duas etiquetas RFID passivas na faixa de UHF e, com base em parâmetros físicos da transmissão, propõem um método de resolução de colisões. Em [10], *Carroccia e Maselli* utilizam um método para induzir colisões utilizando múltiplas antenas a fim de capturar os sinais das etiquetas envolvidas e demonstram ser possível estimar esses sinais através da resolução de sistemas algébricos. Em [11], *Tan et al.* apresentam um algoritmo anticolisão que é capaz de estimar a quantidade total de etiquetas em campo e a comunicação entre elas utilizando técnicas de recuperação dos sinais em colisão.

Outrossim, descobriu-se que o número de etiquetas ativas na região de atuação do leitor pode ser estimado com base no método de detecção da seção transversal de radar, RCS [12, 13]. Com base nesses resultados, *Mahdavifar e Vardy* [14] introduziram uma nova classe de códigos, denominados códigos de singularização, adaptada ao paradigma da RFID e demonstraram ser possível atingir, de forma assintótica, qualquer taxa de transferência positiva utilizando uma família de códigos adequada. Os autores apresentam limitantes para o tamanho dessas estruturas bem como duas construções específicas para a sua obtenção [14]. A propriedade básica desses códigos consiste no fato de que qualquer coleção de palavras-código, possivelmente com tamanho ilimitado, possui diferentes vetores-soma sobre o corpo dos números inteiros. Assim, um decodificador consegue identificar todas as palavras-código transmitidas com base, unicamente, em seu vetor-soma.

Neste trabalho, investiga-se a implementação de um método de recuperação de sinal das etiquetas RFID passivas na faixa de UHF que propõe a utilização dos códigos de singularização em comparação a dois algoritmos DFSA, representados pelo método de estimação de *backlog* e o algoritmo-Q. Buscou-se determinar, de forma objetiva, o ganho da aplicação desses códigos no processo de identificação em relação aos métodos adotados atualmente para o uso comercial desses dispositivos. Resultados obtidos por meio de simulações apresentaram uma diminuição no tempo total de identificação e um aumento na taxa de transferência média para cenários com alta densidade de etiquetas.

1.1 – Objetivos

O objetivo geral deste trabalho consiste em investigar o desempenho dos códigos de singularização em relação aos algoritmos anti-colisão tradicionais utilizados pelos sistemas RFID UHF passivos atualmente. Para tanto, faz-se necessário contemplar alguns objetivos específicos, a saber:

1. Revisar a literatura referente aos algoritmos baseados no protocolo ALOHA, utilizados no padrão EPC Global, e protocolos da busca binária em árvore;

2. Investigar o conceito teórico dos códigos de singularização;
3. Utilizar famílias de códigos de singularização para realizar simulações em diferentes cenários de análise;
4. Determinar a existência de ganhos do novo método em relação às contrapartidas utilizadas atualmente.

1.2 – Organização do trabalho

O restante do trabalho está organizado como segue. O capítulo 2 aborda as características e particularidades da tecnologia RFID, bem como a sua evolução histórica e os aspectos regulatórios da sua utilização. Os métodos anticolisão TDMA são apresentados no capítulo 3. O capítulo 4 apresenta o método da seção transversal de radar, RCS, e os fundamentos dos códigos de singularização, ambos ferramentas utilizadas para a definição do protocolo proposto, e exibe alguns resultados alcançados. As considerações finais do trabalho são apresentadas no capítulo 5.

CAPÍTULO 2

Tecnologia RFID

Ao longo do século XX, a humanidade presenciou um rápido crescimento comercial, tecnológico e científico em diversas áreas do conhecimento [3]. Com o avanço dos sistemas de fluxo de materiais, da indústria de serviços, logística, compras e distribuição, a busca por métodos de identificação automática e captura de dados (AIDC) tem se tornado bastante acentuada. Além disso, a necessidade de identificar cada vez mais produtos aliada a uma maior eficiência desses métodos exige pouca ou nenhuma intervenção humana no processo, tornando indispensáveis requisitos como segurança, tempo de resposta, distância de leitura, custos de operação e confiabilidade [4]. Podem ser citados como exemplos desses métodos o código de barras, os procedimentos biométricos e os sistemas de identificação por radio frequência, do inglês *Radio Frequency Identification*. Dentre esses, a identificação por radio frequência, ou simplesmente RFID, merece destaque por possuir vantagens em relação aos demais métodos, o que torna possível a sua adoção pelos mercados de massa nos próximos anos. Este capítulo aborda o surgimento, as características e especificidades dessa tecnologia.

2.1 – Histórico da RFID

A identificação por radio frequência tornou-se parte integrante do nosso cotidiano, embora a maioria da população não tenha conhecimento. O termo é aplicado com abrangência, caracterizando qualquer processo em que haja troca de informações utilizando-se ondas de rádio entre uma unidade estacionária e uma unidade móvel ou entre unidades móveis [15]. No entanto, a história da RFID compreende também o desenvolvimento de diversas áreas ao longo do século 20, tais como comunicações, eletrônica e propagação, pois sem elas não há como identificar o estado atual da tecnologia da mesma forma. Harry Stockman, que elaborou, em 1948, o primeiro trabalho relacionado ao tema da RFID tal como a conhecemos atualmente, enunciou em linhas gerais em sua conclusão: "Evidentemente, um trabalho considerável de pesquisa e desenvolvimento deve ser feito antes que problemas básicos remanescentes da reflexão de energia sejam resolvidos e antes que aplicações úteis sejam exploradas [...]" [16].

Existem controvérsias em relação ao surgimento da RFID, contudo, é notório que, com a descoberta da relação entre a eletricidade e o magnetismo introduzida por Faraday, muitos trabalhos posteriores contribuíram para consolidar o entendimento do eletromagnetismo, culminando no surgimento das primeiras aplicações. Pode-se citar o surgimento do radar como pioneiro e compatível com a ideia de identificação por rádio frequência, dando início, portanto, às raízes dessa tecnologia em meados da segunda guerra mundial [15].

Com base no trabalho de Landt [17], pode-se criar uma sequência cronológica dos eventos que marcaram a história da RFID durante o século XX desde a sua criação.

Anos 40

- Surgimento do radar e de técnicas de aplicação para a identificação de aeronaves inimigas durante a segunda guerra mundial. As aeronaves alemãs alteravam o sinal de rádio refletido e os aliados utilizavam transmissores em todos os seus aviões para enviar um sinal específico à base, confirmando a autenticidade da aeronave. Este último sistema ficou conhecido como *"Identify friend or foe"* - "Identificação amigo ou inimigo" em tradução livre.

Anos 50

- Exploração de técnicas de identificação baseadas no desenvolvimento do radar e da radiocomunicação dos anos anteriores.
- Intensificam-se as pesquisas e o interesse de diversos países no desenvolvimento da RFID.

Anos 60

- Primeiras atividades comerciais utilizando dispositivos RFID simples.
- Empresas como Knogo começam a desenvolver as primeiras tags de 1-bit para combater o roubo de mercadorias comerciais. Esse sistema ficou conhecido como *Electronic Article Surveillance*.
- A teoria da RFID começa a se estabelecer. São desenvolvidos artigos importantes sobre o tema.

Anos 70

- Desenvolvedores, empresas privadas, instituições acadêmicas e laboratórios de pesquisa dos governos dos EUA e Europa se envolvem com a pesquisa sobre RFID.
- São desenvolvidos vários sistemas com diferentes padrões, contribuindo para o crescimento da tecnologia e o seu uso.

Anos 80

- O desenvolvimento do computador pessoal possibilita uma rápida expansão das aplicações RFID devido a uma maior facilidade no gerenciamento dos dados desses sistemas.
- Etiquetas são construídas utilizando-se circuitos integrados na tecnologia CMOS combinados com componentes de microondas discretos.
- No final da década surgem as primeiras aplicações comerciais utilizando etiquetas robustas. Surgem os primeiros testes com sistemas de pedágio eletrônico em rodovias.

Anos 90

- O primeiro sistema eletrônico de pedágio do mundo é criado em uma rodovia nos EUA. Em seguida, sete agências regionais de pedágio formam o *E-Z Pass Interagency Group* para desenvolver, em conjunto, um sistema regional compatível entre si.
- Grandes empresas, a exemplo de Alcatel, Bosch e Philips, iniciam testes com a tecnologia.
- Começam a surgir os primeiros livros dedicados exclusivamente à RFID.

Século XXI

- O preço das etiquetas começa a diminuir, o que possibilita um maior alcance da tecnologia em comparação aos meios de identificação com maior alcance, como o código de barras.
- Empresas como WalMart, Proctor e Gamble e Gillette investem fortemente no desenvolvimento da RFID.
- Surge o primeiro padrão RFID do mundo, o EPC. Mais tarde esse padrão é adotado pela ISO, uma organização internacional para a aprovação de normas.

2.2 – Componentes de um sistema RFID

Embora existam variações na quantidade de elementos, um sistema RFID consiste, basicamente, de 3 objetos, a saber: etiquetas, leitor e aplicação (*middleware*) [18]. A Figura 2.1 apresenta um diagrama esquemático desses componentes.

2.2.1 – Etiqueta

São os elementos do sistema que se ligam aos dispositivos que serão identificados. São formadas por uma antena, um *chip* eletrônico e uma unidade de memória, podendo ser encontradas nos mais diversos formatos a depender da aplicação em que serão utilizadas [4].

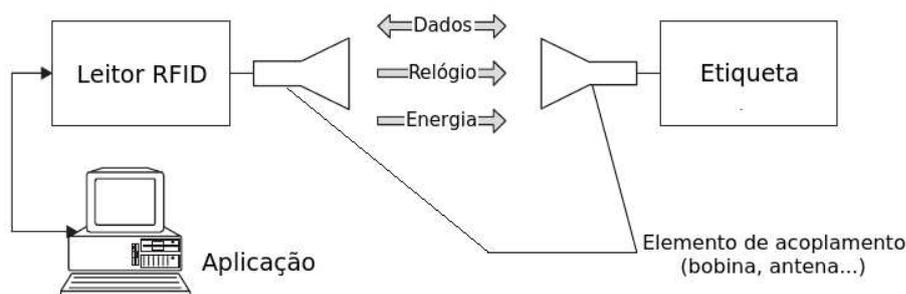


Figura 2.1 – Componentes básicos de um sistema RFID.

Existem diversos critérios para a classificação das etiquetas que se baseiam em características como a forma de alimentação, capacidade de memória e formato de construção. Essas características serão detalhadas com o objetivo de explicitar as possíveis aplicações para esses tipos de etiquetas. Como exemplo, o detalhe de uma etiqueta RFID passiva que atua na faixa de UHF é apresentado na Figura 2.2.

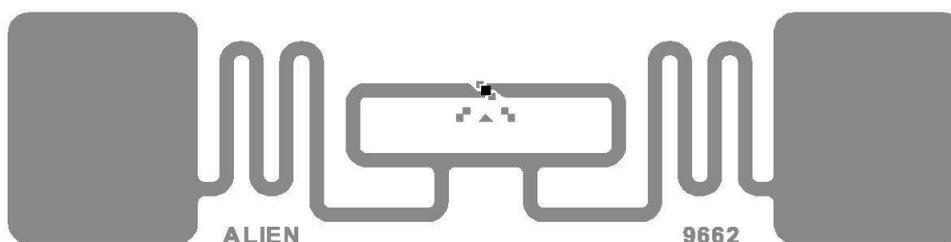


Figura 2.2 – Representação de uma etiqueta genérica.

• Etiquetas Ativas vs Etiquetas Passivas

As etiquetas ativas possuem uma bateria própria para o seu circuito bem como para o seu transmissor. Esse tipo de etiqueta pode se comunicar com leitores de menor potência de transmissão e pode enviar a sua informação por intervalos de distância maiores, da ordem de dezenas de metros [19]. Também podem iniciar um processo de comunicação, de modo contrário ao que acontece com a sua contrapartida passiva. Por possuírem mais dispositivos em sua construção, são mais complexas e mais caras se comparadas a etiquetas passivas.

As etiquetas passivas não possuem qualquer fonte de alimentação e, por isso, extraem a energia para o seu devido funcionamento do sinal enviado pelo leitor. Devido a isso, esses dispositivos possuem um intervalo de comunicação menor, com valores típicos da ordem de até 10 metros, e necessitam de leitores com maior potência de transmissão. São tipicamente menores e mais baratas que as etiquetas ativas [19].

Existem, também, etiquetas denominadas semipassivas. Esses dispositivos possuem uma fonte de alimentação apenas em seu módulo transmissor ou em seu circuito, o que os tornam dependentes da energia enviado pelo leitor para completar o seu funcionamento.

- **Capacidade de memória**

Em relação à capacidade de armazenamento de uma etiqueta RFID, é possível verificar uma grande variedade de valores, que vão de alguns *bytes* até vários *kilobytes* [4]. Os dispositivos com apenas 1-bit constituem uma exceção à regra e são utilizados em aplicações que necessitam apenas da sinalização da presença ou ausência de uma etiqueta em uma determinada região. Pode-se citar como exemplo de aplicação algumas lojas de vestuário do mercado varejista, em que esses dispositivos são utilizados para combater roubos e desvios de mercadorias.

A possibilidade de alterar os dados da memória do dispositivo determina uma outra forma de classificação. Aplicações simples necessitam de etiquetas que podem ser identificadas sem a possibilidade de terem os seus dados alterados. Por outro lado, existem etiquetas que possuem a capacidade de ter os seus dados alterados pelo leitor. Esses dispositivos são mais complexos e são ditos programáveis [4]. Com base nessa característica, as etiquetas podem ser classificadas em dispositivos apenas de leitura (*read-only*) ou de leitura e escrita (*read-write*).

- **Formatos de construção**

As etiquetas possuem diversos formatos de construção como, por exemplo, tubos de vidro, encapsulamento plástico, sob a forma de cartões de crédito, sobre materiais flexíveis, entre outros. A escolha da forma depende, prioritariamente, da aplicação a que se destina. Portanto, etiquetas RFID construídas dentro de pequenos tubos de vidro são utilizadas em identificação de bovinos e caprinos por proporcionar uma maior facilidade de implantação na pele desses animais. A identificação de bagagens, pacotes e bens em geral é favorecida pela aplicação de etiquetas inteligentes, que são construídas sobre um fino filme de plástico e podem ser facilmente inseridas ou fixadas sobre esses materiais. A Figura 2.3 exibe alguns dos formatos utilizados para a construção desses dispositivos.



Figura 2.3 – Diversos formatos de construção das etiquetas RFID.

2.2.2 – Leitor

O leitor constitui-se como elemento intermediário entre as etiquetas e a aplicação durante a troca de informações. Ele é responsável por exercer funções básicas como, no caso

de dispositivos passivos, fornecer a energia necessária ao seu devido funcionamento, ler a informação das etiquetas, sincronizar os dados da aplicação com os demais dispositivos do sistema e alterar os dados das etiquetas programáveis. Constitui-se, em geral, por uma antena, um módulo RF e uma unidade de controle. Ao contrário das etiquetas, o leitor possui uma maior capacidade de processamento, o que o torna capaz de realizar tarefas adicionais a depender do projeto do sistema RFID. Algumas dessas tarefas são a implementação de métodos anticóllisão para a comunicação com múltiplas etiquetas, protocolos de autenticação das etiquetas para prevenir o acesso não autorizado ao sistema e a garantia da integridade dos dados por meio da criptografia [20].

Um das características mais importantes de um sistema RFID é a sua frequência de operação e a conseqüente área de leitura. A frequência de operação do sistema é definida pela frequência em que o leitor opera, pois a frequência de transmissão das etiquetas é a mesma do leitor. Isso acontece devido à forma como as etiquetas transmitem a informação: modulação de carga em sua antena, uso de harmônicos e retroespalhamento ou reflexão [4]. A escolha da frequência de operação afeta diversas características do sistema. Distância de leitura, interferência entre sistemas, taxa de transmissão, tamanho da antena e o preço das etiquetas são alguns dos fatores diretamente afetados pela frequência. Logo, o que definirá a frequência de operação é o contexto de aplicação.



Figura 2.4 – Diversos tipos de leitores comerciais.

Por fim, uma outra característica determinante de um sistema RFID consiste no método de acoplamento entre leitor e etiqueta, o qual pode se dar através de um campo elétrico, magnético ou eletromagnético. A Tabela 2.1 exibe as faixas de frequência utilizadas por sistemas RFID com algumas de suas características e aplicações.

2.2.3 – Middleware

O middleware é um software que faz parte do sistema computacional utilizado para transformar os dados obtidos pelo leitor em informações relevantes para o contexto de uso em que estão inseridos [21]. Sua principal função é coletar, filtrar e agregar os dados relacionados

Tabela 2.1 – Divisão das faixas de frequência utilizadas por sistemas RFID e suas características.

Banda	Acoplamento	Distância*	Aplicações
LF (125-134 <i>kHz</i>)	elétrico ou magnético	<0,5 m	Sistemas de segurança e cartões inteligentes;
HF (13,56 <i>MHz</i>)	magnético	<1,5 m	Identificação animal e automação industrial
UHF (860-960 <i>MHz</i>)	eletromagnético	3-20 m	Rastreamento e localização em ambientes logísticos
Micro-ondas (2,45 <i>GHz</i>)	eletromagnético	<10 m	Controle de estoque

* - Distância de leitura média a partir do leitor.

às etiquetas RFID e que foram processados por um leitor. É utilizado, em geral, em sistemas RFID em que haja um tráfego intenso no canal de comunicação leitores-etiquetas e quando a disponibilidade dos serviços que interagem com esses dispositivos constituir um requisito primordial. Tendo por base o paradigma da IoT, por exemplo, temos que os dados coletados dos diversos dispositivos em uma rede genérica são transformados, por meio do middleware, em informações de alto nível para os usuários do sistema, a exemplo da localização e estado desses objetos.

2.3 – Princípio de funcionamento

Atualmente, os dispositivos RFID são aplicados em uma gama diversa de aplicações, o que contribui para a existência de uma grande quantidade de tipos de funcionamento desses sistemas. Na seção 2.2.2 falou-se da importância da escolha da frequência de operação e do método de acoplamento para atender aos requisitos da aplicação a que se destina um sistema RFID e, a partir dessas duas características, é possível citar algumas categorias de dispositivos, os quais possuem como característica comum a sua capacidade de memória. A tabela 2.2 exibe uma classificação adotada em [4]. Para fins desse trabalho, será apresentado o princípio de funcionamento dos sistemas que utilizam etiquetas passivas e se baseiam em retroespalhamento eletromagnético, pois esse é o método adotado para os dispositivos na faixa de UHF.

2.3.1 – Alimentação das etiquetas

Os dispositivos que operam a distâncias do leitor maiores que 1 metro pertencem aos denominados sistemas RFID de longo alcance. Esses dispositivos operam nas faixas de frequência de UHF e de micro-ondas do espectro eletromagnético e, devido ao menor comprimento de onda empregado nesse tipo de comunicação, possibilitam a utilização de antenas com dimensões menores e de maior eficiência em relação aos sistemas que operam nas frequências mais baixas [4]. O método de acoplamento utilizado é o retroespalhamento eletromagnético e todos esses sistemas operam recebendo a energia necessária para o seu

Tabela 2.2 – Classificação dos sistemas RFID quanto ao princípio de operação.

Memória	Operação	Tipo
1-bit		Circuito Ressonante Micro-ondas Divisor de frequência Saturação Magnética Acustomagnético
n-bits	Full Duplex/Half Duplex	Acoplamento indutivo Retoespalhamento Acoplamento próximo Acoplamento elétrico
	Sequencial	Acoplamento indutivo Superfície de onda acústica

funcionamento do dispositivo leitor.

Com base nisso, faz-se necessário avaliar, inicialmente, a potência disponível na antena de cada etiqueta para determinar as condições mínimas para o seu adequado funcionamento. Isso é resolvido utilizando a fórmula de Friis para estimar o cálculo das perdas no espaço livre,

$$\alpha_{PL} = 20\log(d) + 20\log(f) - 10\log(G_e) - 10\log(G_l) - 147.6dB, \quad (2.1)$$

em que α_{PL} corresponde às perdas em dB, d é a distância entre as antenas da etiqueta e do leitor, G_e e G_l são os ganhos das antenas da etiqueta e do leitor, respectivamente, e f corresponde à frequência de operação do sistema. Essa equação representa uma medida, da relação entre a potência RF emitida pelo leitor no espaço livre e a potência RF recebida pela etiqueta [22].

Atualmente, a tecnologia de fabricação de circuitos integrados tem possibilitado a confecção de *chips* RFID com um consumo de potência da ordem de $2 \mu W$ [23]. A eficiência típica de um retificador integrado pode assumir valores entre 5–25% na faixa de UHF e micro-ondas [4]. Portanto, adotando uma eficiência de retificação de 10%, a potência requerida nos terminais de entrada da antena da etiqueta P_e deve ser igual a $20 \mu W$. Como exemplo, assumindo uma potência de transmissão máxima para o dispositivo leitor, P_l , da ordem de $0,5 W$, temos que as perdas não podem exceder $44 dB$ para que o circuito da etiqueta funcione adequadamente. Como exemplo, a Tabela 2.3 exibe os valores das perdas α_{PL} para valores de distância e frequência variáveis. Assumiu-se um ganho de 1,64 para as antenas da etiqueta e do leitor, o qual corresponde ao dipolo.

Observa-se, portanto, que os dispositivos que operam na frequência de 2,45 GHz possuem uma distância de leitura confiável da ordem de 3 metros. Para alcançar maiores distâncias, faz-se necessário utilizar etiquetas semipassivas com uma fonte de alimentação reserva para o seu circuito interno. Com o objetivo de evitar a utilização indevida da fonte de energia da etiqueta enquanto ela estiver fora do raio de leitura do leitor, esse tipo de dispositivo deve possuir um modo *stand-by*, no qual, ao receber um sinal suficientemente forte em torno da região de leitura,

Tabela 2.3 – Valores das perdas no espaço livre α_{PL} para diversos valores de distância etiqueta-leitor e frequência de operação.

Distância (m)	865 MHz(dB)	915 MHz(dB)	2,45 GHz(dB)
0,5	20,82	21,31	29,86
1	26,84	27,33	35,87
2	32,86	33,35	41,91
5	40,82	41,31	49,86
10	46,86	47,33	55,87

a etiqueta retorna ao modo de operação normal.

2.3.2 – Transferência dos dados

O processo de troca da informação entre etiqueta e leitor se baseia no princípio do radar, o qual estabelece que uma onda eletromagnética, ao encontrar um obstáculo, tem parte de sua energia "espalhada" em várias direções. A medida da eficiência com que determinado objeto reflete a energia eletromagnética de uma onda é denominada *radar cross section*, ou seção transversal radar em tradução livre, sendo representada pela letra grega σ . Essa medida é dada em unidades de área e depende de vários fatores, tais como tamanho, forma e composição química do objeto, bem como do comprimento e polarização da onda incidente [22].

Supondo que o leitor emite uma quantidade de potência P_l , a quantidade de potência por unidade de área que incide na antena da etiqueta é dada por

$$S_e = \frac{P_l}{4\pi d^2}. \quad (2.2)$$

Uma parcela dessa energia é utilizada para o seu circuito interno e, portanto, deve ser suficientemente forte dentro da região de leitura do sistema. Por outro lado, pode-se alterar a seção transversal de radar da etiqueta variando a carga conectada nos terminais da sua antena. Dessa forma, é possível modular a potência refletida pela etiqueta no tempo de acordo com os dados a serem transmitidos. Isso é feito utilizando-se uma impedância variável conectada em paralelo com a sua antena [4]. A potência refletida pela etiqueta $P_{e_{mod}}$, portanto, é função de σ e é proporcional à densidade de potência incidente em (2.2), como segue:

$$P_{e_{mod}}(t) = S_e \cdot \sigma(t). \quad (2.3)$$

O sinal refletido é espalhado em todas as direções a partir do ponto de reflexão e, então, decai de forma proporcional ao quadrado da distância entre etiqueta e leitor, retornando ao leitor com uma densidade de potência, S_l , dada por

$$S_l(t) = \frac{P_{e_{mod}}}{4\pi d^2} = S_e \cdot \frac{\sigma(t)}{4\pi d^2} = \frac{P_l \cdot \sigma(t)}{16\pi^2 \cdot r^4}. \quad (2.4)$$

Com base na análise do sinal refletido, o leitor pode estimar a informação enviada pela

etiqueta. A Figura 2.5 apresenta um diagrama do fluxo de potências associado ao processo de comunicação abordado. A impedância variável é representada por Z_{mod} e a modulação do coeficiente de reflexão da antena é gerada a partir do seu chaveamento, de acordo com a sequência de bits a ser transmitida.

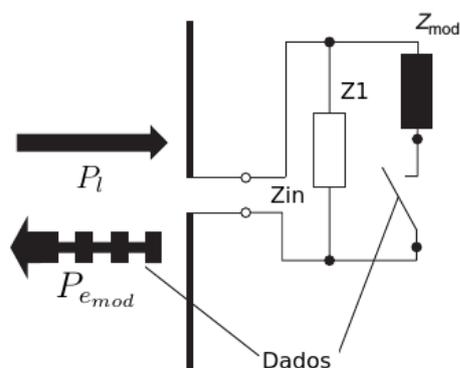


Figura 2.5 – Representação do fluxo de potências durante o processo de comunicação em um sistema RFID baseado em retroespalhamento eletromagnético.

2.4 – Aspectos Regulatórios

No início da RFID, os atores envolvidos no processo de criação da tecnologia deram início aos primeiros sistemas, os quais se desenvolviam de forma independente entre si. Isso contribuiu para a difusão e utilização dos primeiros dispositivos, tendo um impacto positivo nos resultados obtidos em pesquisas sobre a RFID em vários laboratórios e instituições acadêmicas pelo mundo. Contudo, ao final do século XX a maioria dos sistemas presentes no mercado eram proprietários, constituindo verdadeira barreira para a adoção da tecnologia em larga escala e para o crescimento da indústria. Havia a necessidade de criar aplicações compatíveis com padrões de identificação utilizados por fornecedores distintos, bem como aplicações compatíveis entre sistemas de países diferentes. Assim, têm início os esforços para criar padrões mundiais para os sistemas RFID, resultando, inicialmente, na criação de organismos de regulação nos Estados Unidos, Japão e em vários países da Europa, principais desenvolvedores da tecnologia [19]. Serão apresentados os aspectos referentes a dois organismos de padronização internacional, os quais são *International Organization for Standardization* - ISO -, e o EPC Global.

Em relação ao espectro eletromagnético, cada país possui normas específicas para o seu uso concorrente e estabelece as divisões para as diversas aplicações, de forma única. Para a RFID são utilizadas, em diversos países, as faixas de frequências mostradas na Tabela 2.1, e os sistemas devem respeitar, também, regras adicionais sobre limites de potência irradiada e interferência. Os dispositivos de um sistema RFID devem passar por testes durante o seu processo de fabricação, para garantir o atendimento dessas regras, entretanto, para a sua

implementação não há necessidade de licença prévia por parte do Estado.

2.4.1 – ISO

A Organização Internacional de Normalização, ISO, é uma entidade não governamental composta por 161 organismos de regulação nacionais com a finalidade de compartilhar conhecimento, desenvolver, em conjunto e de forma voluntária, padrões internacionais relevantes ao mercado e buscar soluções para os desafios globais. Em relação à RFID, foram desenvolvidos padrões para diversas aplicações, a saber: identificação animal (ISO's 11784, 11785); cartões de identificação na faixa de HF (ISO's 10536, 14443, 15693); gerenciamento de materiais e identificação automática (ISO's 15961, 15962, 15963, 18000, 18001), dentre outros. Cabe destacar a importância do padrão ISO 18000, o qual fornece uma estrutura para a elaboração de protocolos de comunicação comuns para o uso da RFID entre países. As especificações ISO 18000 encontram-se divididas em sete partes, como exibido na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Documentos que fazem parte do padrão ISO/IEC 18000.

Parte 1	Parâmetros Genéricos para a interface de comunicação aérea
Parte 2	Parâmetros para a interface de comunicação aérea abaixo de 125 kHz
Parte 3	Parâmetros para a interface de comunicação aérea em 13,56 MHz
Parte 4	Parâmetros para a interface de comunicação aérea em 2,45 GHz
Parte 5	Parâmetros para a interface de comunicação aérea em 5,8 GHz
Parte 6	Parâmetros para a interface de comunicação aérea na faixa 860-930 MHz
Parte 7	Parâmetros para a interface de comunicação aérea em 433 MHz

2.4.2 – EPC

O EPC, que vem do inglês *Electronic Product Code*, diz respeito a um sistema de identificação para a RFID adotado inicialmente por representantes de grandes instituições do varejo internacional, a exemplo de WalMart, Target e Metro AG. No entanto, esse padrão teve o seu início, em 1999, por meio de um centro de pesquisas denominado *Auto-ID Center* no Instituto Tecnológico de Massachussets, nos Estados Unidos, devido a uma parceria entre aproximadamente cem empresas e cinco universidade ao redor do mundo [19]. O objetivo do projeto era criar uma "Internet das Coisas", uma infraestrutura de rede em que fosse possível identificar um objeto marcado com um código eletrônico de forma unívoca em qualquer parte do mundo, bastando apenas ter acesso à internet a partir de um computador. Para tanto, seria necessário desenvolver um conjunto de equipamentos e esquemas de identificação utilizando os conceitos já consolidados dos códigos de barras e a identificação por radiofrequência.

Seu fluxo de execução consiste em identificar o código da etiqueta RFID presente em um objeto, solicitar a um servidor o endereço IP associado à etiqueta através de um serviço de mapeamento e acessar os dados em uma aplicação escrita em uma linguagem baseada em XML [24]. O serviço de mapeamento é denominado ONS, do inglês *Object Name Service*,

e é inteiramente baseado no protocolo DNS, que é utilizado pela Internet para mapear nomes de domínio a endereços IP. Esse processo de identificação é denominado *EPC Global Network*, pois consiste em uma rede que utiliza serviços sobre a internet.

A aplicação do EPC em sistemas RFID deve atender às especificidades de cada faixa de frequências e, em particular, a versão para a faixa de UHF foi adotada pelo padrão ISO 18000 em sua parte 6. Para essa faixa de frequências, o EPC possui um documento que exhibe os requisitos físicos e lógicos que os sistemas RFID passivos devem atender [8].

2.5 – Aplicações

A RFID se estabeleceu como participante da revolução tecnológica atual e, cada vez mais, se incorpora ao cotidiano das pessoas. Nesta seção são listadas algumas aplicações da RFID em ambientes diversos, levando em consideração as características definidas ao longo deste capítulo.

- **Smart Cards**

São utilizados em transações eletrônicas e possuem regulamentações específicas sob os documentos ISO/IEC 10536, ISO/IEC 15693 e ISO/IEC 14443. Possuem acoplamento indutivo ou eletromagnético e atuam, principalmente, nas faixas de LF e UHF com distâncias de leitura que vão de alguns centímetros até 5 metros, aproximadamente.



Figura 2.6 – Exemplo de cartão de identificação inteligente.

- **Transporte Público**

Atualmente, uma das aplicações mais próximas do grande público. São utilizadas etiquetas no formato ID-1, as quais são utilizadas para os *Smart Cards*, e requerem alto grau de resistência contra água, variações de temperatura e sujeira. Também constituem requisitos

importantes para esses sistemas a segurança e o tempo de leitura. São utilizadas etiquetas nas faixas de LF e HF, com distâncias de leitura pequenas, da ordem de 5 cm. A Figura 2.7 exibe um sistema RFID utilizado no transporte coletivo.



Figura 2.7 – Sistema RFID utilizado no transporte público.

- **Controle de Acesso**

Esses sistemas são divididos em dois tipos: *online* e *offline*. Os sistemas *online* são utilizados em locais em que é necessário verificar a entrada/saída de uma grande quantidade de pessoas. Para isso, as informações dos usuários são concentradas em um servidor, o qual está ligado a uma rede que contém os leitores. Pode-se utilizar etiquetas apenas de leitura, contendo apenas uma identificação do usuário, e as modificações dos níveis de acesso são feitas no servidor. Por outro lado, sistemas *offline* são utilizados em locais onde um pequeno número de pessoas têm acesso a muitos cômodos individuais. Nesse caso, cada terminal de controle possui uma lista de chaves de identificação para cada usuário que possui o acesso. Assim, não há nenhuma ligação com um computador central ou com outros terminais. O nível de acesso de cada usuário é alterado diretamente na etiqueta, modificando as suas chaves de identificação. Esses sistemas podem utilizar frequências de operações em qualquer faixa disponível para a RFID, dependendo da aplicação a que se destinam.

- **Implante Animal**

Exemplos de utilização de sistemas RFID em animais podem ser encontrados em fazendas que produzam leite bovino, na identificação de animais para controle de qualidade e de zoonoses. As etiquetas utilizadas nessas aplicações podem ser de diversos tipos e podem ser acopladas aos animais nas formas de colares, como ilustra a Figura 2.8, brincos ou até mesmo implantadas sob a sua pele, utilizando, para tanto, encapsulamentos diversos. Os padrões ISO/IEC 11784 e ISO/IEC 11785 foram desenvolvidos especificamente para esse tipo de aplicação e as frequências de operação desses sistemas estão na faixa de LF, compreendendo distâncias de leitura da ordem de alguns centímetros.



Figura 2.8 – Animal utilizando etiqueta RFID em forma de colar.

- **Logística**

Empresas de transporte de cargas utilizam a RFID para efetuarem a identificação, inventário, localização e monitoramento dos bens sob sua responsabilidade. Assim, os processos de gerenciamento dos estoques e entrega dos produtos são otimizados. Grandes empresas do setor de supermercados e distribuição, a exemplo do grupo WalMart, investiram expressivas somas de capital no desenvolvimento e utilização de sistemas RFID, impulsionando o crescimento da tecnologia. Um exemplo da utilização desses sistemas em um ambiente logístico é ilustrado na Figura 2.9.



Figura 2.9 – Conjunto de cargas atravessando uma estação de identificação.

- **Aplicações hospitalares**

No meio hospitalar, a tecnologia pode ser aplicada para melhorar a eficiência dos cuidados médicos e operacional. Existem algumas experiências com o uso da RFID em relação à identificação, triagem e controle de fluxo dos pacientes, histórico dos atendimentos, controle

da medicação utilizada, procedimentos realizados, entre outras. Um fator negativo para a sua aceitação nesse tipo de ambiente diz respeito à incerteza quanto aos efeitos dos campos eletromagnéticos sobre a saúde humana e em relação à interferência que pode ser causada nos equipamentos médico-hospitalares [25].

CAPÍTULO 3

Algoritmos Anticolisão

Em uma rede de dispositivos RFID UHF passivos, faz-se necessário utilizar mecanismos para gerenciar o acesso ao canal de comunicação. Esses mecanismos devem atender a critérios de implementação com base nas características do sistema, tais como, em relação às etiquetas, recursos de hardware limitados e pouca capacidade computacional [4]. Com o aumento do número de etiquetas que se encontram sobre a região de atuação de um dispositivo leitor, há um aumento da probabilidade de ocorrência de colisões. Para os fins desse trabalho, colisão denota a comunicação simultânea entre duas ou mais etiquetas e um único leitor. Como resultado das colisões durante o processo de comunicação, há um aumento no tempo total de identificação das etiquetas, desperdício de energia e banda devido às retransmissões geradas.

Diversos protocolos anticolisão são utilizados com o objetivo de diminuir a probabilidade de ocorrência de colisões. Esses protocolos são categorizados, em geral, de acordo com o recurso - tempo, frequência, espaço ou código - a ser compartilhado em TDMA, FDMA, SDMA e CDMA [6]. Contudo, os protocolos TDMA representam a grande maioria devido a uma menor complexidade de implementação e subdividem-se em determinísticos e aleatórios, possuindo como representantes principais os protocolos baseados em árvore e ALOHA, respectivamente, ou protocolos híbridos, ao unir aspectos de ambos [7]. Os protocolos baseados em árvore surgiram, inicialmente, para gerenciar o conflito no acesso ao canal de sistemas sem fio. Devido a sua simplicidade de execução, o protocolo ALOHA foi introduzido por professores da universidade do Havaí, sendo considerado um dos precursores do padrão Ethernet atual. Atualmente, o padrão EPC Global [8] utiliza um protocolo baseado em ALOHA como solução para o acesso ao canal e define todos os requisitos físicos e lógicos para a comunicação de forma objetiva.

Este capítulo apresenta as características dos métodos TDMA mais utilizados na literatura e em aplicações comerciais para o controle de colisões em um sistema RFID passivo na faixa de UHF. No próximo capítulo serão apresentados os resultados obtidos com a simulação de alguns desses métodos em comparação aos códigos de singularização.

3.1 – Métodos baseados em Árvore

Os protocolos baseados em árvore foram inicialmente propostos, em 1979, por J. Capetanakis [26] para a resolução de problemas de múltiplo acesso a um canal sem fio. O método se baseia na observação de que o gerenciamento eficiente do acesso ao canal por diversas fontes de informação pode ser implementado quando existe um esquema de divisão de todas as fontes em subgrupos contendo, exclusivamente, uma fonte ativa [26]. Desde então, diversos métodos foram propostos para a divisão das fontes ativas e, sendo assim, faz-se necessário apresentar os aspectos referentes aos principais representantes dessa classe de algoritmos.

3.1.1 – *Tree Splitting*

O método *Tree Splitting*, ou divisão em árvore, tem como objetivo dividir um conjunto de etiquetas em colisão em múltiplos subconjuntos utilizando um gerador de números aleatórios. Trata-se de uma adaptação do método definido por Capetanakis para o problema da RFID e tem como principal representante o algoritmo proposto por Hush e Wood [27]. O processo de identificação consiste de uma série de intervalos de tempo, ou *slots*, em que cada etiqueta recebe um *feedback*, por parte do leitor, sobre o estado do intervalo atual. Existem três estados possíveis para um *slot*, a saber: sucesso, quando apenas uma etiqueta responde à requisição do leitor; colisão, quando duas ou mais etiquetas respondem simultaneamente em um mesmo *slot*; vazio, quando nenhuma etiqueta responde.

Além disso, cada etiqueta possui um gerador de números aleatórios binário e um contador para armazenar a sua posição na árvore. Com base no valor do contador, é possível determinar o estado das etiquetas durante a execução do protocolo. As etiquetas que possuem os seus contadores com o valor zero estão no estado de transmissão, caso contrário se encontram em espera ou *standby*. Quando há uma colisão, as etiquetas que se encontram no estado de transmissão geram um valor binário aleatório e o acrescentam ao valor do seu contador atual. Da mesma forma, as etiquetas que estão em espera somam 1 aos seus contadores. No caso de um *slot* vazio ou quando há sucesso na identificação, as etiquetas que estão no modo espera decrementam os seus contadores em uma unidade. As etiquetas identificadas entram no modo *standby*.

Como exemplo, sejam 4 etiquetas e seus respectivos identificadores denotados por $A = 100$, $B = 001$, $C = 101$ e $D = 010$. A Figura 3.1 exibe a configuração da árvore resultante da aplicação do método para esse cenário e a Tabela 3.1 apresenta os valores dos contadores de cada etiqueta durante o processo de identificação. No início do primeiro *slot* de tempo, os contadores de todas as etiquetas são inicializados com o valor zero, fazendo com que todas passem para o modo de transmissão e, portanto, resultando em colisão. O leitor informa a ocorrência da colisão e as etiquetas que estão no modo transmissão geram um número aleatório no conjunto $\{0, 1\}$, dividindo-as em dois grupos. A , B e D selecionam o valor zero no início do

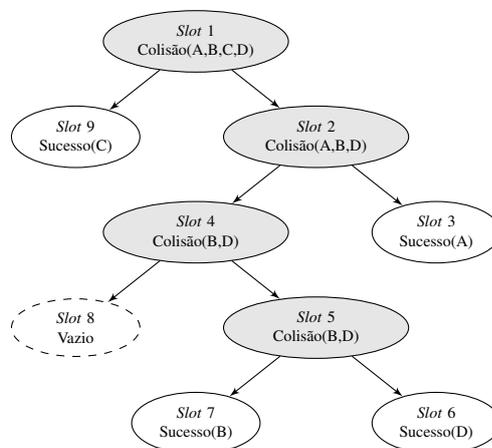
Tabela 3.1 – Representação dos estados dos *slots* e dos valores dos contadores das etiquetas para o protocolo *Tree Splitting*.

Slot	Resultado	Contador / Estado			
		A	B	C	D
1	Colisão	0 / Transmissão	0 / Transmissão	0 / Transmissão	0 / Transmissão
2	Colisão	0 / Transmissão	0 / Transmissão	1 / Espera	0 / Transmissão
3	Sucesso	0 / Transmissão	1 / Espera	2 / Espera*	1 / Espera
4	Colisão	-	0 / Transmissão	1 / Espera**	0 / Transmissão
5	Colisão	-	0 / Transmissão	2 / Espera	0 / Transmissão
6	Sucesso	-	1 / Espera	3 / Espera	0 / Transmissão
7	Sucesso	-	0 / Transmissão	2 / Espera	-
8	Vazio	-	-	1 / Espera	-
9	Sucesso	-	-	0 / Transmissão***	-

* Etiquetas no estado de espera incrementam seu contador em 1 devido a colisão.

** Etiquetas no estado de espera decrementam seu contador em 1 devido a um sucesso.

*** Etiquetas no estado de espera decrementam seu contador em 1 devido a um vazio.

**Figura 3.1** – Representação do método *Tree Splitting*.

slot 2 e se mantém no estado de transmissão e *C* entra no modo espera após incrementar o seu contador. O leitor, mais uma vez, informa a ocorrência da colisão. Para o *slot 3*, apenas *A* se mantém no estado de transmissão e consegue obter sucesso na transmissão do seu identificador. Os *slots 4* e *5* resultam em colisão, pois *B* e *D* tentam acessar o canal de forma simultânea. Em seguida, os *slots 6* e *7* são identificados com sucesso pelo leitor, o *slot 8* é vazio devido à permanência de *C* no modo espera nos últimos *slots*, a qual, por fim, é identificada no último *slot*.

3.1.2 – Query Tree

O algoritmo *Query Tree* [28] constitui-se como uma simplificação do método anterior. Todo o trabalho de gerenciamento do processo de identificação é feito de forma exclusiva pelo dispositivo leitor em uma série de rodadas, tornando possível a sua implementação em sistemas RFID que possuam etiquetas com menor poder computacional. No entanto, a única exigência do método é que todos os dispositivos devem possuir um circuito de comparação de sequências binárias. As colisões, nesse caso, ocorrem quando múltiplas etiquetas possuem uma mesma

sequência, ou prefixo. Neste caso, o leitor acrescenta um novo bit ao prefixo enviado no *slot* anterior para reenviar uma nova requisição a fim de subdividir as etiquetas em colisão em grupos menores. A apresentação do método será feita através de um exemplo de aplicação adotando-se os identificadores das etiquetas da seção anterior, como segue.

No início do processo, o leitor envia uma requisição com um prefixo q tal que todas as etiquetas em sua região de atuação devem responder simultaneamente. Caso haja resposta, o leitor dá início ao protocolo adicionando os prefixos $q = 0$ e $q = 1$ em uma pilha de controle da árvore. Na segunda rodada, escolhe-se o prefixo 0, o qual está no topo da pilha, e, após enviá-lo, o leitor verifica uma colisão entre as etiquetas A e D devido aos seus identificadores 001 e 010. Por sua vez, o leitor adiciona os prefixos 00 e 01 na pilha, resultando em sucesso na identificação das etiquetas A e D , respectivamente, durante as rodadas 3 e 4. Devido aos seus identificadores, as etiquetas B e C colidem ao responder ao envio dos prefixos 1 e 10 nas rodadas 5 e 6 e, portanto, só após acrescentar mais um bit à sequência é possível identificá-las corretamente. Durante a última rodada não há respostas ao envio do leitor. A Figura 3.2 exibe a árvore resultante da aplicação do protocolo para este exemplo e a Tabela 3.2 apresenta a dinâmica dos valores dos prefixos e da pilha do leitor em cada rodada.

Tabela 3.2 – Representação dos estados das Rodadas e da variação na pilha do leitor para o protocolo *Query Tree*.

Rodada	Prefixo q	Resposta	Pilha do leitor
1	—	Colisão	(0, 1)
2	0	Colisão	(00, 01, 1)
3	00	Sucesso	(01, 1)
4	01	Sucesso	(1)
5	1	Colisão	(10, 11)
6	10	Colisão	(100, 101, 11)
7	100	Sucesso	(101, 11)
8	101	Sucesso	(11)
9	11	Vazio	—

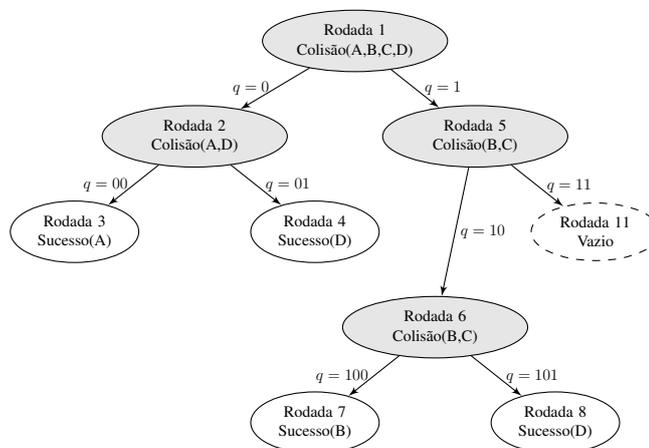


Figura 3.2 – Representação do método *Query Tree*.

3.1.3 – Busca binária

Na seção anterior foi apresentado um método de identificação no qual as etiquetas recebem um prefixo do leitor e, caso possuam exatamente o mesmo prefixo, respondem à requisição imediatamente. A busca binária utiliza a mesma abordagem, no entanto, a comparação é realizada sobre uma faixa de valores em relação a um identificador de busca. Dessa forma, a verificação de possíveis colisões deve avaliar cada bit individual enviado pelas etiquetas utilizando a codificação Manchester [4]. Nesse tipo de codificação da informação os bits são representados por uma mudança do nível do sinal dentro de um intervalo de tempo t_{BIT} , sendo os valores 0 e 1 referentes a transições positiva e negativa, respectivamente. A Figura 3.3 ilustra a representação dos valores binários na codificação Manchester.

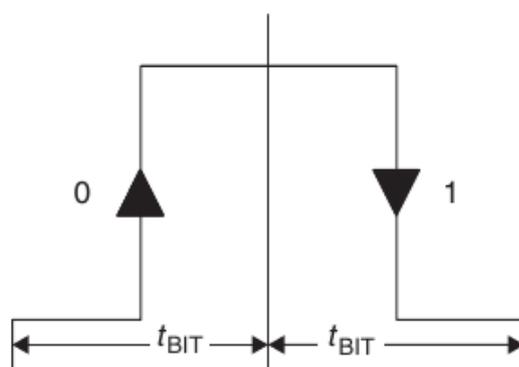


Figura 3.3 – Representação dos valores de bit para a codificação Manchester.

Bits individuais de valores diferentes terão os seus efeitos cancelados devido às suas transições distintas, resultando em um símbolo inválido, que será visto como um erro e não poderá ser decodificado pelo leitor. No caso dos dispositivos RFID, os bits serão representados por uma transição entre estados de recepção de um sinal de portadora e ausência desse sinal e, portanto, valores de bits distintos resultarão em cancelamento dessa transição dentro de um intervalo de tempo t_{BIT} . Assim, será possível determinar as colisões entre bits individuais dos sinais envolvidos a fim de subdividir as etiquetas de acordo com as posições dessas colisões no sinal resultante do lado do leitor. Como exemplo, a Figura 3.4 exibe o resultado do envio de sinais de etiquetas distintas a um dispositivo leitor utilizando a codificação Manchester.

O algoritmo da busca binária utiliza uma série de iterações entre etiquetas e leitor com o objetivo de selecionar, de forma unívoca, qualquer dispositivo em um conjunto de tamanho indefinido. Essas iterações ocorrem sob a forma de comandos, através dos quais as etiquetas devem ser capazes de executar algumas operações de comparação, envio e alteração de seus identificadores. Com base no envio de um valor de busca pelo leitor, o critério de divisão pode ser realizado de duas formas: as etiquetas que possuem um valor menor ou igual respondem; as etiquetas que possuem um valor maior ou igual respondem. A Tabela 3.3 apresenta a regra geral para a utilização dos valores de busca para o método da busca binária.

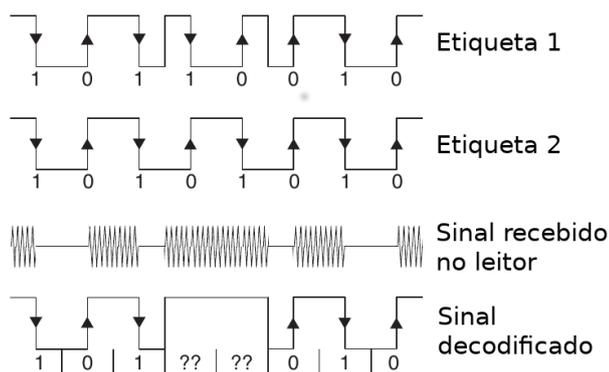


Figura 3.4 – Exemplo de aplicação da codificação Manchester para dois sinais em colisão.

Tabela 3.3 – Regra geral para a obtenção dos identificadores de busca para o método da Busca Binária.

Comando de busca	1ª iteração	n-ésima iteração
≥ Identificador	0	bit(X)* = 1, bit(0 até X - 1) = 0
≤ Identificador	MAX**	bit(X)* = 0, bit(0 até X - 1) = 1

* Bit mais significativo em colisão

** Máximo valor possível para o intervalo de identificação

Com base no exemplo apresentado na seção 3.1.1, o algoritmo da busca binária é apresentado na Figura 3.5. Para a nossa configuração, a busca é realizada sobre um conjunto de valores menores do que o identificador. O início do protocolo se dá com o envio do identificador 111 e, portanto, todas as etiquetas respondem simultaneamente, fazendo com que todos os bits individuais estejam em colisão. Na segunda rodada, aplica-se o critério da segunda linha da Tabela 3.3, em que o bit mais significativo em colisão é trocado por zero e o restante é trocado por 1, formando, assim, a requisição com o identificador 011. As etiquetas que possuem um valor menor ou igual respondem imediatamente. Mais uma vez, alguns bits colidem e o leitor dá início à terceira rodada, em que apenas a etiqueta B responde. O método é reiniciado com uma nova requisição com o identificador 111 e continua até que todas as etiquetas sejam identificadas.

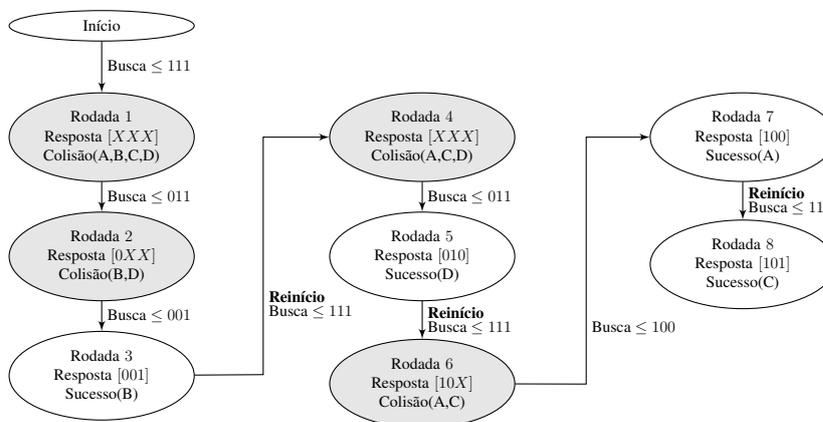


Figura 3.5 – Representação do método da busca binária.

3.2 – Métodos baseados em ALOHA

O protocolo ALOHA foi introduzido por Norman Abramson, da Universidade do Havaí, como uma solução para o problema da alocação de um canal de acesso múltiplo [29]. O seu diferencial consiste na simplicidade: usuários descoordenados tentam acessar o canal quando tiverem a necessidade de enviar informação. Assim, quando há uma disputa simultânea pelo canal temos uma falha na comunicação. A esse evento denomina-se colisão e, para fins deste trabalho, a sua ocorrência se dá apenas quando duas ou mais etiquetas disputam o uso do canal de forma concorrente. O tratamento das colisões constitui um fator relevante, a princípio, quando há um aumento na densidade de etiquetas na região de atuação de um dispositivo leitor. Diversos protocolos anticolisão foram propostos a partir de variações do ALOHA inicial, no entanto, iremos abordar apenas os algoritmos mais utilizados na literatura recente sobre RFID.

3.2.1 – DFSA

Para o método DFSA, sigla para *Dynamic Framed Slotted ALOHA*, o tempo é dividido em intervalos, denominados *slots*, os quais, por sua vez, compõem os quadros. O tamanho de cada quadro é alterado de forma dinâmica com base no valor de *slots* em colisão do quadro anterior. O cálculo para o tamanho dos quadros leva em consideração um valor de *backlog*, o qual representa uma estimativa para o número de etiquetas ativas e sem identificação durante um quadro, e, nesse sentido, diversos trabalhos propõem algoritmos para a realização dessa tarefa. Para diferenciar esse método do algoritmo-Q, em relação à sua semântica, será utilizado um sufixo *b* em cada notação posterior. Isso se deve ao fato de que o algoritmo-Q também constitui-se como um método derivado do DFSA.

O método mais simples para o cálculo do *backlog* é chamado de limite inferior - *Lower Bound* - e é dado pela equação

$$backlog = 2 \times col, \quad (3.1)$$

em que *col* é a quantidade de *slots* em colisão do quadro anterior. Esse método é utilizado com base no princípio de que para cada colisão ocorrida no quadro anterior existem, no mínimo, duas etiquetas envolvidas e, assim, adota-se o valor inferior para essa estimativa. Um refinamento desse método foi proposto por Schoute [30] ao inserir uma modificação no valor do coeficiente da equação 3.1 com base em análises probabilísticas, resultando em

$$backlog = 2,39 \times col. \quad (3.2)$$

Para atingir resultados mais eficientes a fim de melhorar o desempenho do processo de identificação, o cálculo do valor de *backlog* pode ser estimado considerando-se também número de *slots* vazios e com sucesso. [31], [32] e [1] utilizam um método de estimação que considera a probabilidade de ocorrência de *slots* vazios, em colisão em com sucesso do quadro anterior.

Assim, há um maior refinamento na escolha do tamanho dos próximos quadros, no entanto, a aplicação desses algoritmos necessita de um maior poder de processamento em comparação aos métodos do limite inferior e Schoute.

Eom e Lee [33] propuseram um método iterativo para o cálculo do tamanho do quadro que possui implementação simples com menor custo computacional e, além disso, maior acurácia na estimação do *backlog* e menor quantidade de *slots* durante todo o processo de identificação em relação aos demais métodos. Para esse protocolo, define-se o tamanho do quadro inicial como a multiplicação do número estimado de etiquetas n multiplicado por um fator de proporcionalidade β , da forma

$$L = \beta n. \quad (3.3)$$

Quando é detectado um *slot* em colisão, assume-se que o valor esperado do número de etiquetas que colidiram é γ . Assim, o valor do *backlog* - tamanho do próximo quadro - é encontrado através de

$$\text{backlog} = n - s = \gamma \cdot c, \quad (3.4)$$

em que s e c representam o número de *slots* com sucesso e em colisão do quadro anterior, respectivamente. As equações de iteração são dadas por

$$\beta_k = \frac{\text{backlog}}{\gamma_0 \cdot c + s}, \quad (3.5)$$

$$\gamma_k = \frac{1 - e^{-\frac{1}{\beta_k}}}{\gamma_k \cdot \left(1 - \left(1 + \frac{1}{\beta_k}\right) \cdot e^{-\frac{1}{\beta_k}}\right)}, \quad (3.6)$$

em que γ_0 possui valor 2 [33]. O tamanho do próximo quadro é, então, $L_k = \gamma_k \cdot c$. De modo geral, as etapas da execução de todos os métodos DFSA-b obedecem ao fluxograma ilustrado na Figura 3.6. O leitor inicializa o tamanho L do primeiro quadro para dar início à execução do método e transmite um sinal de requisição em *broadcast* para as etiquetas em sua região de leitura. Em seguida, as etiquetas geram um número aleatório entre $\{1, L\}$ relacionado ao *slot* escolhido para a transmissão. Todos os *slots* são lidos de forma sequencial pelo leitor e, ao final do quadro, se existirem *slots* em colisão, o tamanho de um novo quadro é estimado com base no valor do *backlog*. O algoritmo é finalizado quando todas as etiquetas são identificadas.

3.2.2 – Algoritmo Q

O algoritmo-Q consiste em uma variação do protocolo DFSA e, atualmente, é o método empregado para o acesso ao canal RFID adotado pelo padrão EPC Global [8], que o define como protocolo classe 1 da segunda geração 2 - C1G2. Esse documento define os requisitos físicos e lógicos que um sistema RFID passivo na faixa de UHF deve atender e foi adotado

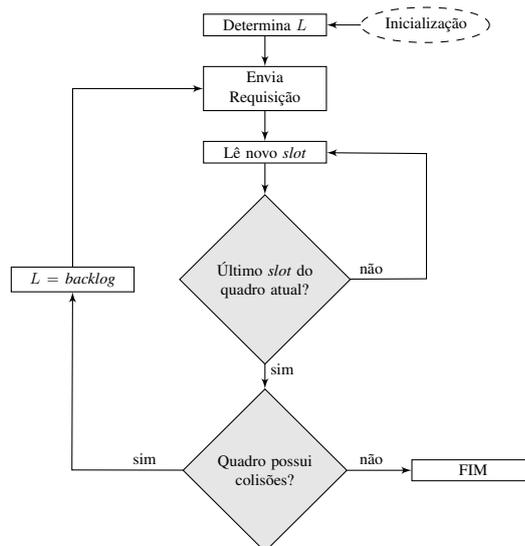


Figura 3.6 – Fluxograma de execução dos métodos DFSA-b.

pela Organização Internacional para Padronização, ISO. Em contrapartida aos métodos DFSA-b da seção anterior, o algoritmo-Q utiliza uma estratégia de alteração do tamanho do quadro de forma iterativa a cada *slot* com base em um valor constante, o que garante uma melhoria da taxa de transferência, pois o ajuste pode ser realizado antes do término do quadro [34]. Outra característica importante desse método é referente ao tamanho dos quadros, o qual sempre tem um valor múltiplo de 2.

As operações necessárias à implementação do método podem ser divididas sob o ponto de vista do leitor e das etiquetas. Para o dispositivo leitor, o processo de identificação pode ser dividido em 3 etapas, as quais compreendem uma série de comandos. Essas etapas são divididas de acordo com a seguinte classificação:

- **Seleção** - Delimita um subconjunto de etiquetas para o início das etapas de inventário e acesso. Caso as etiquetas utilizem mecanismos de criptografia, é nessa etapa que ocorre a fase de autenticação.
- **Inventário** - Processo pelo qual o leitor busca e identifica as etiquetas. Compreende múltiplos comandos, a exemplo de *Query*, *QueryRep*, *Query Adjust*, *ACK* e *NAK*.
- **Acesso** - Compreende os comandos utilizados para a comunicação individual com as etiquetas - leitura, escrita, bloqueio e desativação. O leitor deve identificar de forma unívoca cada etiqueta antes de iniciar essa etapa.

Devido à característica passiva das etiquetas, para cada etapa listada acima existe uma série de estados em que esses dispositivos podem se encontrar durante a execução do algoritmo. Além disso, todas as etiquetas que atendem ao padrão EPC Global devem ser capazes de implementar um contador de *slots*. Em [8] são listados cada um desses estados, no entanto,

serão apresentados apenas os estados referentes à etapa de Inventário, pois a execução das outras etapas não se insere no escopo deste trabalho. A Figura 3.7 apresenta um diagrama de estados para a etapa de Inventário.

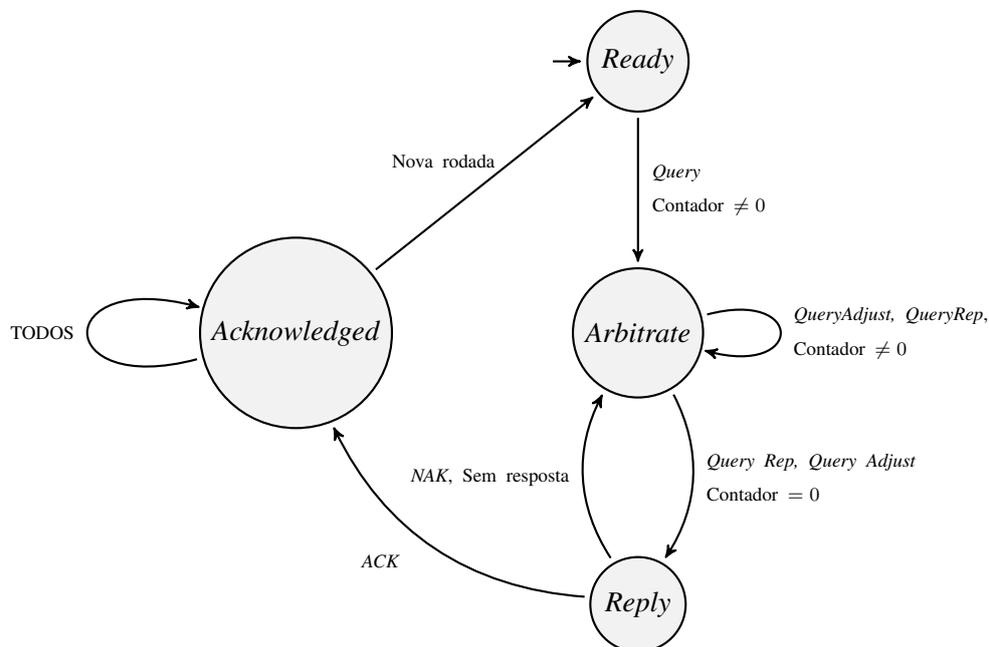


Figura 3.7 – Diagrama de estados das etiquetas RFID durante a etapa Inventário do algoritmo-Q.

- **Ready** - Corresponde ao estado inicial das etiquetas ao serem energizadas quando não estão desativadas e nem participando de um Inventário. Os dispositivos permanecem nesse estado até receberem um comando *Query*.
- **Arbitrate** - Estado em que as etiquetas se encontram após receberem um comando *Query*. É nesse estado que o leitor mantém as etiquetas enquanto executa uma rodada de Inventário, caso os seus contadores de *slots* sejam diferentes de zero.
- **Reply** - Ao terem os seus contadores de *slots* zerados, as etiquetas entram no estado *Reply* e enviam imediatamente um identificador aleatório com 16 bits, denominado RN16. Caso recebam um comando *ACK*, por parte do leitor, reconhecendo o envio, alteram o seu estado para *Acknowledged*. Caso contrário, retornam ao estado *Arbitrate* para aguardar uma nova rodada de identificação.
- **Acknowledged** - Corresponde ao estado em que uma etiqueta está devidamente reconhecida pelo dispositivo leitor e pode transitar para qualquer outro estado, a depender dos comandos recebidos posteriormente.

O início do protocolo é descrito, de forma sucinta, como segue. Ao serem energizadas pelo leitor, as etiquetas selecionadas entram no estado *Ready* e permanecem aguardando

comandos posteriores. Após isso, o leitor envia um comando *Query*, contendo um parâmetro $Q \in \{0, 1, 2, \dots, 15\}$, para dar início a uma nova rodada de Inventário. Ao receberem esse comando, as etiquetas carregam em seus contadores um valor aleatório entre 0 e $2^Q - 1$ referente ao *slot* escolhido para a transmissão e transitam para o estado *Arbitrate*. As etiquetas que escolherem o valor 0 enviam imediatamente um outro número aleatório, o RN16, que corresponde ao seu identificador para a rodada atual, e alteram o seu estado para *Reply*; as etiquetas que possuírem um valor diferente de zero em seus contadores, ao receberem um comando *QueryRep*, os decrementam em uma unidade e, quando têm os seus contadores zerados, transitam para o estado *Reply*. Com base no estado de cada *slot* - colisão, vazio ou sucesso -, o leitor pode alterar o valor do parâmetro Q enviando um comando *QueryAdjust*. Esse processo continua até que todas as etiquetas sejam identificadas.

Assumindo o caso em que as etiquetas enviam o seu RN16 e transitam para o estado *Reply*, temos que o leitor deve confirmar a identificação para que esses dispositivos possam alterar o seu estado para *Acknowledged*. Essa confirmação ocorre quando o leitor envia um comando *ACK* associado ao RN16 da etiqueta que ele deseja reconhecer. Após isso, a etiqueta responde, mais uma vez, com o seu código EPC seguido de redundâncias e pode ser acessada diretamente ao final do processo de identificação. Caso as etiquetas recebam um *ACK* com um RN16 diferente, um *NAK* ou não recebam comando algum, o seu contador continua com um valor 0 e após a recepção do próximo comando *QueryRep* alteram esse valor para o máximo possível, retornando ao estado *Arbitrate*. Isso garante que a etiqueta não responderá novamente até que receba um novo comando *Query* ou *QueryAdjust*.

O processo de ajuste do tamanho dos quadros L é realizado com base no estado de cada *slot* individual e obedece a 3 hipóteses simples: quando há colisão, o número de etiquetas ativas é maior que L e o valor de Q deve ser incrementado; no caso de um *slot* vazio, o número de etiquetas ativas é menor que L e o valor de Q deve ser decrementado; caso o leitor receba apenas uma resposta assume-se que o tamanho do quadro é ideal. A escolha do tamanho do quadro inicial é aleatória, visto que *a priori* o leitor não possui informações sobre a quantidade de etiquetas em sua região de leitura. Este fato constitui um problema de otimização para os métodos anticolisão existentes e diversos trabalhos na literatura propõem melhorias para o desempenho desses métodos através de estimativas mais exatas [35-39]. A forma de implementação do algoritmo-Q bem como o ajuste dinâmico do tamanho de cada quadro é ilustrado na Figura 3.8.

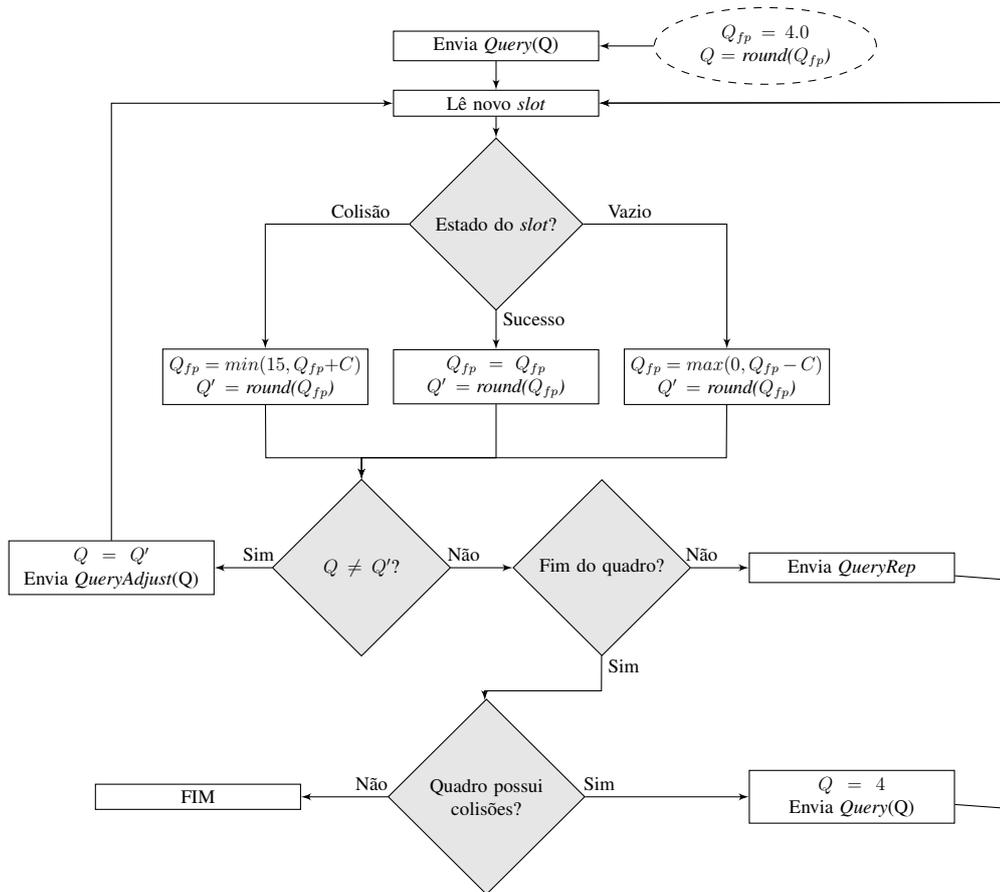


Figura 3.8 – Fluxograma de execução do algoritmo-Q durante a etapa de Inventário.

CAPÍTULO 4

Métodos utilizados

No capítulo anterior foram apresentados alguns métodos anticolisão para gerenciar o acesso ao canal compartilhado entre etiquetas e leitores RFID. Apesar das diferenças entre si, esses métodos são implementados assumindo-se que a informação presente no sinal de colisão entre etiquetas deve ser descartada. Contudo, alguns trabalhos abordam o evento de colisão de maneira distinta, utilizando-o para extrair informação útil para o processo de identificação das etiquetas envolvidas. *Benbaghdad e Tedjini* apresentam em [9] um modelo do sinal de colisão entre duas etiquetas RFID passivas na faixa de UHF e, com base em parâmetros físicos da transmissão, propõem um método de resolução de colisões. Em [10], *Carroccia e Maselli* utilizam um método para induzir colisões utilizando múltiplas antenas a fim de capturar os sinais das etiquetas envolvidas e demonstram ser possível estimar esses sinais através da resolução de sistemas algébricos. Em [11], *Tan et al.* apresentam um algoritmo anticolisão que é capaz de estimar a quantidade total de etiquetas em campo e a comunicação entre elas utilizando técnicas de recuperação dos sinais em colisão. Esses resultados indicam que é possível utilizar-se das colisões para melhorar o desempenho de sistemas RFID UHF passivos. Neste capítulo, serão apresentadas as ferramentas utilizadas para a implementação de um método de recuperação do sinal RFID adotando-se uma abordagem em que as colisões constituem o seu fundamento.

4.1 – Método da Seção Transversal de Radar

O acoplamento entre os dispositivos em um sistema RFID UHF passivo ocorre através de retroespalhamento eletromagnético e o processo de troca de informações se baseia no princípio do radar, em que a energia transmitida pelo leitor é refletida pelas etiquetas. Nesses sistemas, a velocidade com que os dispositivos são identificados constitui um requisito de máxima importância. Aplicações práticas, como a identificação de veículos em alta velocidade ou a leitura simultânea de grandes quantidades de dispositivos em um armazém, podem ser vistas como exemplos em que a utilização de sistemas passivos pode sofrer com a variação da taxa de leitura. Em [30], Schoute mostrou que a aplicação dos métodos DFSA possui um valor

esperado para a taxa de transferência - *throughput* - de 0.368, o qual é gerado por conta de um conhecimento impreciso do conjunto de etiquetas ativas na região de atuação do leitor.

Diversos trabalhos buscam aumentar o desempenho desses sistemas utilizando técnicas de estimação da quantidade de etiquetas ativas, a exemplo da recuperação do sinal de colisão utilizando protocolos de camada física, maior refinamento dos estimadores com base no rastreamento de bits e adoção de rodadas de identificação em que todas as etiquetas são forçadas a transmitir simultaneamente a fim de estimar a quantidade de etiquetas envolvidadas em um evento de colisão [13, 40-42]. Além disso, métodos de processamento de sinais podem ser adotados para auxiliar os algoritmos anticolisão clássicos, melhorando a sua efetividade. Nesse contexto, a seção transversal de radar, RCS, pode ser utilizada como um método de análise criteriosa do sinal recebido a fim de determinar a quantidade de etiquetas que transmitem simultaneamente durante um determinado intervalo de tempo [12].

O leitor deve garantir a energia necessária ao funcionamento das etiquetas durante todo o processo de identificação através de um sinal de portadora contínuo. A representação equivalente passa-baixas do sinal recebido pelo dispositivo leitor $r(t)$ é dada por

$$r(t) = \sum_{i=1}^n a_i s_i(t) e^{j\theta_i} + n(t), \quad (4.1)$$

em que $s_i(t)$ é o sinal da i -ésima etiqueta em banda base, a_i e θ_i são os coeficientes de atenuação e defasagem, respectivamente, impostos pelo canal e $n(t)$ é o ruído do canal. Durante a troca de informações entre os dispositivos, as etiquetas devem alterar o seu coeficiente de reflexão variando a carga conectada nos terminais das suas antenas. Isso pode ser feito utilizando-se um dispositivo de chaveamento, tal como um transistor, e tem como objetivo modular a potência refletida pela etiqueta no tempo de acordo com os dados que serão transmitidos [4]. Essa modulação ocorre de forma binária e o sinal resultante obedece a um chaveamento do tipo *ON-OFF*, o qual inclui a alteração da sua amplitude e da sua fase. Após a conversão do sinal em base base e da remoção da sua componente DC, o sinal das etiquetas se assemelha a um sinal BPSK, o qual é representado por

$$s_i(t) = \sum_k d_k p(t - kT) e^{j\theta_i}, \quad (4.2)$$

em que k é um índice de tempo discreto, $d_k \in \{-1, 1\}$ constitui uma série de valores correspondente aos dados da i -ésima etiqueta, $p(t)$ é um pulso quadrado de valor unitário no intervalo $0 < t < T$ e nulo para todos os outros valores de t e θ_i representa a fase inicial do sinal.

O sinal $r(t)$ possui componentes em fase e quadratura e deve ser demodulado pelo leitor utilizando-se um plano I/Q, em que o eixo horizontal indica a componente em fase e o eixo vertical a componente em quadratura do sinal. Valores distintos de magnitude da potência recebida nos terminais da antena do leitor podem ser observados após a demodulação, em

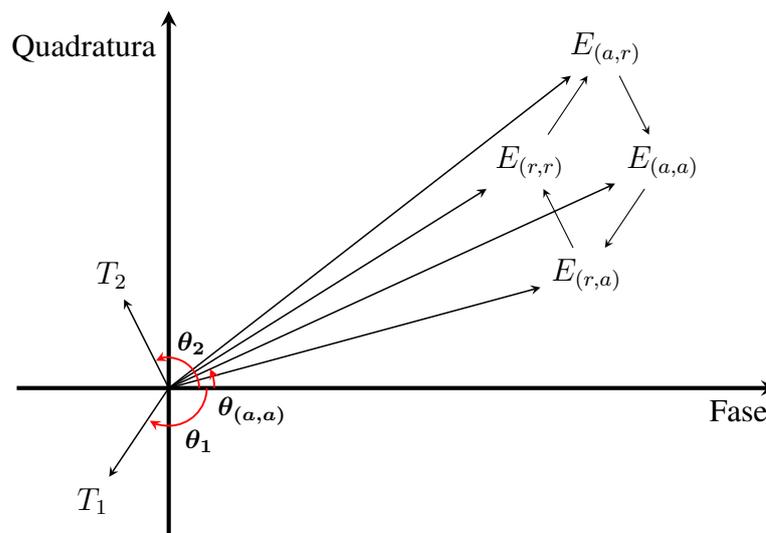


Figura 4.1 – Exemplo da formação da constelação no plano I/Q para a comunicação com duas etiquetas.

relação aos estados das chaves eletrônicas utilizadas pelas etiquetas. Nota-se, da mesma forma, uma dependência da fase dos sinais no momento da modulação. A combinação dos valores de fase e amplitude da potência refletida são, então, combinados para formar um único vetor RCS no plano I/Q. Para uma única etiqueta são associados dois pontos distintos, em que um deles corresponde ao nível alto do sinal digital e o outro ao seu nível baixo. Para ilustrar a representação dos sinais gerados pelas etiquetas, a Figura 4.1 exibe um diagrama em que são exibidos os vetores correspondentes aos sinais de duas etiquetas distintas, T_1 e T_2 , bem como os vetores resultantes da superposição desses sinais. Os índices r e a dos vetores E representam os estados binários de reflexão ou absorção, respectivamente, das etiquetas em um determinado intervalo de tempo em relação ao sinal de portadora contínuo transmitido pelo leitor. O estado $E_{a,a}$ representa um nível de sinal detectado pelo leitor em que as etiquetas T_1 e T_2 absorvem a energia enviada no sinal de portadora, contudo, apesar da absorção do sinal, existe um nível de sinal residual que é refletido.

Como resultado da recepção dos componentes dos sinais por parte das etiquetas ativas, o gráfico I/Q gerado deve possuir uma constelação de múltiplos pontos [11]. Esses pontos tendem a se agrupar em torno de um ponto central, formando *clusters*, os quais correspondem ao estado das diversas etiquetas ativas que transmitiram em um determinado intervalo de tempo. Para obter a quantidade de etiquetas deve-se aplicar um algoritmo de processamento de sinais capaz de contar a quantidade desses *clusters*, resultando em uma determinação indireta do número desses dispositivos. Como uma etiqueta gera dois estados RCS, então o número s de etiquetas é determinado como $s = \log_2(c)$, em que c representa a quantidade total de *clusters*. A Figura 4.2 exibe duas constelações no plano I/Q obtidas a partir da colisão entre sinais de etiquetas RFID.

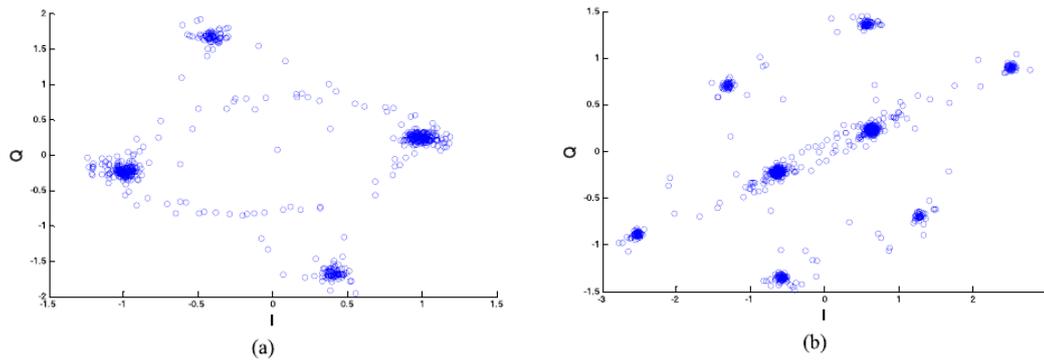


Figura 4.2 – Representação gráfica das constelações formadas durante o evento de colisão entre (a) duas etiquetas e (b) três etiquetas.

4.2 – Códigos de singularização

Os códigos de singularização consistem em estruturas algébricas com características que tornam possível a sua adaptação ao paradigma da RFID. Foram introduzidos inicialmente por *Vardy e Mahdaviifar* [14], os quais demonstraram ser possível atingir, de forma assintótica, qualquer taxa de transferência positiva com a utilização de uma família de códigos adequada. A principal propriedade desses códigos consiste no fato de que qualquer coleção de palavras, possivelmente com tamanho ilimitado, possui diferentes vetores-soma sobre o corpo dos números inteiros. A definição formal desses códigos é apresentada a seguir.

Definição 4.1. *Seja $C \subset \{0, 1\}^n$ um conjunto de vetores binários de comprimento n com $|C| = M \leq 2^n$. Então, C é um código de singularização (n, M, s) se, para duas coleções não vazias A e B de elementos de C , possivelmente com repetição e tamanho máximo s ,*

$$\sum_{x \in A} x \neq \sum_{y \in B} y,$$

em que a soma é realizada sobre \mathbb{Z} .

Portanto, um código de singularização C é um subconjunto das n -uplas binárias e deve ser representado por 3 medidas, a saber: n como o tamanho das palavras-código; cardinalidade M desse conjunto; s como o maior tamanho de uma coleção de elementos de C . Da definição, temos que é possível recuperar de forma unívoca uma coleção A , com tamanho máximo s , de elementos do código conhecendo apenas o seu vetor-soma. Com base na sua definição, temos que essas estruturas devem ser essencialmente não lineares, pois o vetor nulo não pode fazer parte do conjunto de palavras do código. Em [14] são encontrados limitantes para a quantidade de palavras do código M com base nos valores de n e s . O Teorema 4.1 fortalece a condição de singularização e simplifica a construção dessas estruturas. Ao fazer $s \rightarrow \infty$, é possível utilizar uma condição algébrica para encontrar famílias de códigos de singularização.

Teorema 4.1. *Um código C é um código de singularização com $s \rightarrow \infty$ se, e somente se, os elementos de C são linearmente independentes sobre o conjunto dos números racionais \mathbb{Q} .*

Demonstração. Para a primeira parte, assume-se que C é um código de singularização mas as suas palavras $\{c_1, c_2, \dots, c_M\}$ formam um conjunto linearmente dependente sobre \mathbb{Q} . Portanto, existem escalares $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M \in \mathbb{Q}$, para os quais temos

$$\sum_{i=1}^M \alpha_i c_i = 0,$$

em que nem todos os α_i são nulos. Existe um inteiro N para o qual o produto $N\alpha_i \in \mathbb{Z}$, para qualquer i . Por simplicidade, N será o produto dos denominadores de todos os α_i . Seja $\beta_i = N\alpha_i$. Assim, temos que

$$\sum_{i=1}^M \beta_i c_i = 0.$$

Sem perda de generalidade, assumindo que $\beta_i \geq 0$ para $i = 1, 2, \dots, i_0$ e $\beta_j < 0$ para $j = i_0 + 1, i_0 + 2, \dots, M$. Então,

$$\sum_{i=1}^{i_0} \beta_i c_i = \sum_{j=i_0+1}^M \beta_j c_j.$$

Seja A a coleção de palavras $c_i \in C$ para as quais exista um quantidade β_i dessas palavras, para $1 \leq i \leq i_0$. Da mesma forma, seja B a coleção de palavras $c_j \in C$ para as quais exista uma quantidade β_j dessas palavras, para $i_0 < j \leq M$. Percebe-se que A e B são não-vazias. Portanto, isso implica que C não é um código de singularização, gerando uma contradição da premissa inicial.

Para a segunda parte, assume-se que as palavras-código c_i são linearmente independentes sobre \mathbb{Q} mas C não é um código de singularização. Portanto, existe uma combinação linear dos c_i 's sobre \mathbb{Z} , e consequentemente sobre \mathbb{Q} , que resulte em zero, contradizendo a hipótese de independência linear. \square

Como resultado do Teorema 4.1, a quantidade de palavras-código M é limitada pelo seu tamanho n , de acordo com o Corolário 4.1. Esse fato torna os códigos de singularização estruturas invariavelmente curtas. Contudo, os resultados obtidos por meio de simulações apresentam uma melhoria significativa do desempenho do método de identificação utilizando essas estruturas em relação aos métodos clássicos que são largamente utilizados atualmente.

Corolário 4.1. *Para um código de singularização (n, M, ∞) , $M \leq n$.*

4.3 – Protocolo proposto

Para o início do processo de singularização, o dispositivo leitor envia um comando *Query* para que todas as etiquetas gerem uma sequência binária aleatória contendo 32 bits e transmitam de forma simultânea. Esse valor foi definido com base no tamanho de duas sequências RN16, as quais são utilizadas pelos métodos *Frame Slotted ALOHA* [12]. Dessa forma, utilizando-se o método RCS é possível estimar a quantidade de etiquetas ativas t presentes na região de leitura para determinar o código de singularização C com parâmetros (n, M, s) , para o qual $t \leq s$, que será utilizado na primeira rodada de identificação. Após isso, o leitor envia um comando *Request* com os parâmetros do código escolhido para que cada etiqueta selecione uma palavra de forma aleatória, armazene e transmita ao leitor em n intervalos de tempo. Assumindo que a palavra-código a ser transmitida seja $(c_1, c_2, c_3, \dots, c_n) \in C$, então, para $1 \leq i \leq n$, se $c_i = 0$, a etiqueta permanece em silêncio. Caso contrário, $c_i = 1$ e a etiqueta transmite ao leitor um determinado sinal no i -ésimo intervalo de tempo.

O leitor, por sua vez, analisa o sinal recebido e utiliza o método RCS para determinar a quantidade de etiquetas que transmitem simultaneamente no i -ésimo intervalo, convertendo essa informação na quantidade de palavras-código que possuem 1 na i -ésima posição. Ao final de n intervalos de tempo o leitor terá a soma de todas as palavras transmitidas pelas etiquetas. Se todas as palavras-código forem distintas, então o processo é encerrado. Caso contrário, o leitor dará início a uma nova rodada de identificação para as etiquetas que selecionaram palavras repetidas. Um novo código C' com parâmetros (n', M', s') é escolhido com base na quantidade de etiquetas $t' \leq s'$ que não foram identificadas e um novo comando *Request* é enviado. Conclui-se, de forma direta, que, caso o tamanho M do código C seja suficientemente grande, então a probabilidade das etiquetas selecionarem palavras distintas é alta. O processo de singularização é encerrado quando todas as etiquetas são identificadas. A escolha dos códigos foi feita com base na possibilidade de implementação futura do protocolo em um ambiente real. A Figura 4.3 exibe o fluxograma da execução do protocolo.

4.3.1 – Código de Hamming dual

Seja uma matriz de verificação de paridade H , com dimensão $d \times (2^d - 1)$, em que a k -ésima coluna é a representação binária de k . Como exemplo, para $d = 4$, tem-se a matriz

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.3)$$

Essa matriz representa um código de Hamming dual no contexto dos códigos de bloco clássicos e, devido ao seu formato de construção, pode ser facilmente adaptada para o nosso problema. Com base no Teorema 4.1 e na definição 4.1, temos que o código C_H , formado

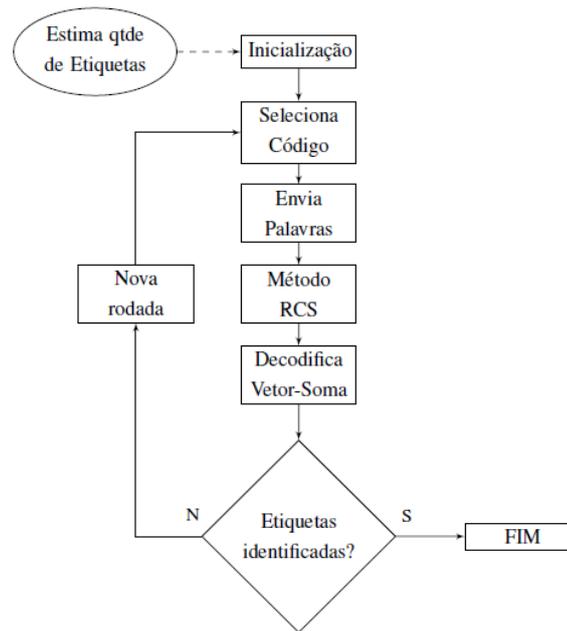


Figura 4.3 – Fluxograma de execução do protocolo proposto.

pelas combinações lineares das linhas de H , excluindo a palavra nula, é também um código de singularização. A formalização dessa afirmação é realizada por meio do Teorema 4.2.

Teorema 4.2. *O código C_H é um código de singularização.*

Demonstração. Com base no Teorema 4.1, é suficiente mostrar que as palavras de C_H são linearmente independentes sobre o corpo \mathbb{Q} . Seja a matriz M_H , com dimensão $(2^d - 1) \times (2^d - 1)$, a qual contém todas as palavras do código C_H . Adicionando a matriz M_H uma coluna de zeros e uma linha com o elemento 1, obtemos uma matriz aumentada $M_{H_{aum}}$ com dimensão $(2^d) \times (2^d)$. Ao trocar todos os elementos da i -ésima linha \mathbf{l} por $2\mathbf{l} - \mathbf{1}$, em que $\mathbf{1}$ corresponde a um vetor unitário com dimensão idêntica às linhas de $M_{H_{aum}}$, obtemos como resultado uma matriz com elementos 1 e -1 . Após algumas manipulações, temos que essa matriz é uma matriz de Hadamard, a qual é, conseqüentemente, inversível. \square

Para implementar o protocolo de transmissão, as etiquetas devem ser capazes de realizar duas operações básicas sobre o corpo $GF(2) = \{0, 1\}$: seleção de uma sequência aleatória de comprimento d ; manipulações numéricas sobre a sequência escolhida. Essas operações são realizáveis de acordo com o padrão EPC Global, o qual as inclui entre os requisitos obrigatórios para tais dispositivos. O algoritmo utilizado durante o processo de codificação para as etiquetas é descrito como segue, de acordo com o Algoritmo 1.

Nota-se, portanto, que não é necessário armazenar a matriz H na memória das etiquetas. A partir do contador i obtêm-se uma palavra do código C_H gerada pela multiplicação tH . O leitor, por sua vez, deve determinar a quantidade de etiquetas que transmitem um sinal no i -ésimo intervalo de tempo. Para tanto, seja c_i a palavra-código gerada pela i -ésima etiqueta,

Algoritmo 1 Codificação das Etiquetas para o código C_H

```

1: Espera até receber requisição do leitor
2: se Comando = Query então
3:   Faça  $d \leftarrow 32$ 
4:   Atualize o contador  $i = (i_1, i_2, \dots, i_d)$  para um valor aleatório. Transmita imediatamente
5: fim se
6: se Comando = Request então
7:   Ajuste o valor de  $d$ .
8:   Faça  $i = (i_1, i_2, \dots, i_d) = (0, 0, \dots, 1)$ .
9:   Gere uma sequência aleatória  $t$  de comprimento  $d$  diferente da sequência nula.
10:  enquanto  $i < 2^d$  faça
11:     $result = 0$ 
12:    para  $j = 1$  até  $d$  faça
13:       $result = result \oplus (i_j \wedge t_j)$ 
14:    fim para
15:    se  $result = 0$  então
16:      Permaneça em silêncio no  $i$ -ésimo slot
17:    senão
18:      Transmita um sinal no  $i$ -ésimo slot
19:    fim se
20:     $i = i + 1$ 
21:  fim enquanto
22: fim se

```

s a quantidade de etiquetas ainda não identificadas e x_i a quantidade de etiquetas que geraram a palavra c_i . Portanto, o leitor deve resolver o sistema de equações

$$(r_1, r_2, \dots, r_n) = \sum_{i=1}^s x_i c_i, \quad (4.4)$$

em que o vetor \mathbf{r} e x são tomados sobre \mathbb{Z} . Para que o processo de identificação seja finalizado, o decodificador deve recuperar os valores x_i , dado que \mathbf{r} é conhecido. Com base na maior capacidade de processamento do dispositivo leitor, é possível realizar essa tarefa de forma direta através da multiplicação do vetor \mathbf{r} pela inversa da matriz quadrada com dimensão $2^d - 1$ que contém todas as palavras do código C_H sobre os reais.

4.3.2 – Código de Kroenecker

Seja G uma matriz binária quadrada com dimensão 2 representada por

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.5)$$

As potências de Kronecker da matriz G são definidas por indução, com $G^{\otimes 1} = G$, por

$$G^{\otimes i} = \begin{bmatrix} G^{\otimes(i-1)} & \mathbf{0} \\ G^{\otimes(i-1)} & G^{\otimes(i-1)} \end{bmatrix}, \quad (4.6)$$

para $i > 1$. A matriz $G^{\otimes i}$ possui dimensão $2^i \times 2^i$. As linhas da matriz $G^{\otimes i}$ formam um código de singularização, o que é garantido com base no que segue.

Teorema 4.3. *Para qualquer n , as linhas da matriz $G^{\otimes i}$ são linearmente independentes sobre \mathbb{Q} .*

Demonstração. Da definição, temos que $G^{\otimes i}$ é uma matriz triangular inferior com os elementos da diagonal não-nulos. Logo, $G^{\otimes i}$ é uma matriz inversível sobre qualquer corpo. \square

Corolário 4.2. *As linhas de $G^{\otimes i}$ formam um código de singularização.*

Demonstração. Segue dos resultados dos Teoremas 4.3 e 4.1. \square

Dado um inteiro d , o segundo código de singularização C_G é definido como o espaço linha da matriz $G^{\otimes d}$, o qual possui cardinalidade 2^d . Nota-se que C_G é um código não-linear, no entanto, suas palavras são linearmente independentes sobre o corpo $GF(2)$. Logo, o processo de codificação realizado nas etiquetas não pode ser feito de forma similar ao Algoritmo 1. Por outro lado, é inviável armazenar na memória das etiquetas uma matriz contendo todas as palavras do código disponíveis. O Lema a seguir traz uma solução para esse problema, com base na estrutura da matriz $G^{\otimes d}$, para que as etiquetas possam reconstruir qualquer palavra-código de C_G .

Lema 4.1. *Sejam as linhas e colunas da matriz $G^{\otimes d}$ identificadas com início a partir de 0 pelos índices i e j , respectivamente. Então, a coordenada (i, j) de $G^{\otimes d}$ é 1 se $i \succ j$. Caso contrário, é 0.*

Assim, as etiquetas devem escolher, de forma aleatória, um número correspondente à linha de $G^{\otimes d}$ e, com base no Lema 4.1, é possível reconstruir a palavra do código C_G através do procedimento apresentado no Algoritmo 2. A instrução na linha 11 é realizada componente a componente.

Suponha que $\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_n)$ seja o vetor recebido pelo leitor, o qual representa a soma de todas as palavras-código enviadas pelas etiquetas. Assim, temos que $\mathbf{r} = \mathbf{x}G^{\otimes d}$, em que $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_M)$ é o vetor que contém a quantidade de palavras $c_i \in C_G$ escolhidas pelas etiquetas representadas pelas suas componentes x_i , com $x_i \geq 0$ para $1 \leq i \leq M$. De forma similar ao adotado para o primeiro código de singularização, o vetor \mathbf{x} é obtido de forma direta através do produto entre o vetor recebido \mathbf{r} e a inversa da matriz $G^{\otimes d}$, assumindo que o dispositivo leitor possui grande capacidade computacional.

Algoritmo 2 Codificação das Etiquetas para o código C_G .

```

1: Espera até receber requisição do leitor
2: se Comando = Query então
3:   Faça  $d \leftarrow 32$ 
4:   Atualize o contador  $i = (i_1, i_2, \dots, i_d)$  para um valor aleatório. Transmita imediatamente
5: fim se
6: se Comando = Request então
7:   Ajuste o valor de  $d$ .
8:   Faça  $i = (i_1, i_2, \dots, i_d) = (0, 0, \dots, 0)$ .
9:   Gere uma sequência aleatória  $t$  de comprimento  $d$ .
10:  enquanto  $i < 2^d$  faça
11:     $result = t \vee i$ 
12:    se  $result = t$  então
13:      Transmita um sinal no  $i$ -ésimo slot
14:    senão
15:      Permaneça em silêncio no  $i$ -ésimo slot
16:    fim se
17:     $i = i + 1$ 
18:  fim enquanto
19: fim se

```

4.4 – Resultados

Um ambiente de simulação utilizando a linguagem Python foi construído para executar os protocolos abordados no trabalho. Os resultados obtidos para os códigos de singularização foram comparados aos métodos DFSA-b e algoritmo-Q em relação a duas métricas de desempenho: quantidade total de *slots* utilizados e taxa de transferência média, ou *throughput*. Foram utilizados cenários com uma quantidade significativa de etiquetas, variando no intervalo (1, 1000), a fim de avaliar o desempenho dos métodos em ambientes com alta densidade de etiquetas. A Figura 4.4 apresenta as curvas obtidas em simulação para a variação da quantidade de *slots* como função da quantidade de etiquetas em campo. Todas as curvas representam o valor médio dos resultados obtidos em um conjunto de 200 rodadas.

Para a taxa de transferência, a utilização dos códigos de singularização apresentou uma melhoria significativa em comparação aos outros métodos, o que representa um uso mais eficiente do canal de comunicação. A Figura 4.5 exibe o valor médio dos resultados obtidos para todos os protocolos em condições análogas de simulação. A título de comparação, temos que o valor esperado para o protocolo DFSA, o qual é obtido sob condições de igualdade entre o número de etiquetas sem identificação e a quantidade de *slots* por quadro, corresponde a $1/e$. Para todos os cenários, assumiu-se uma condição em que não há ruído no canal de comunicação. Isso se deve ao fato de que o objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho dos códigos de singularização em relação aos métodos implementados na utilização da RFID em cenários reais.

A Tabela 4.1 descreve os ganhos percentuais da utilização dos códigos de singularização

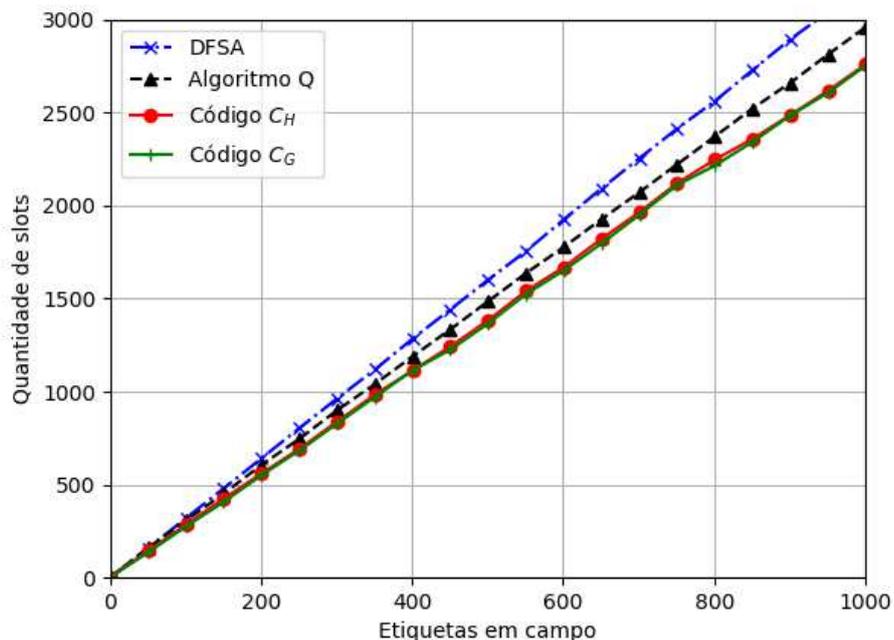


Figura 4.4 – Variação da quantidade de *slots* em relação ao número de etiquetas.

com base nas Figuras 4.4 e 4.5, para um cenário com 500 etiquetas. Para ambos os códigos utilizados, o número de *slots* utilizados em função da quantidade de etiquetas em campo se manteve equivalente, com uma pequena variação positiva em relação aos outros métodos. No entanto, a medida da taxa de transferência apresentou uma melhoria significativa e, quando comparada entre os códigos de singularização, verifica-se que o código C_G é mais eficiente.

Tabela 4.1 – Ganhos percentuais dos códigos de singularização para um valor de 500 etiquetas em campo.

		DFSA-b	Algoritmo-Q
Código C _H	Qtde <i>slots</i>	≈ -15,38%	≈ -7,41%
	<i>Throughput</i>	≈ 21,14%	≈ 16,42%
Código C _G	Qtde <i>slots</i>	≈ -15,41%	≈ -7,45%
	<i>Throughput</i>	≈ 25,76%	≈ 21,31%

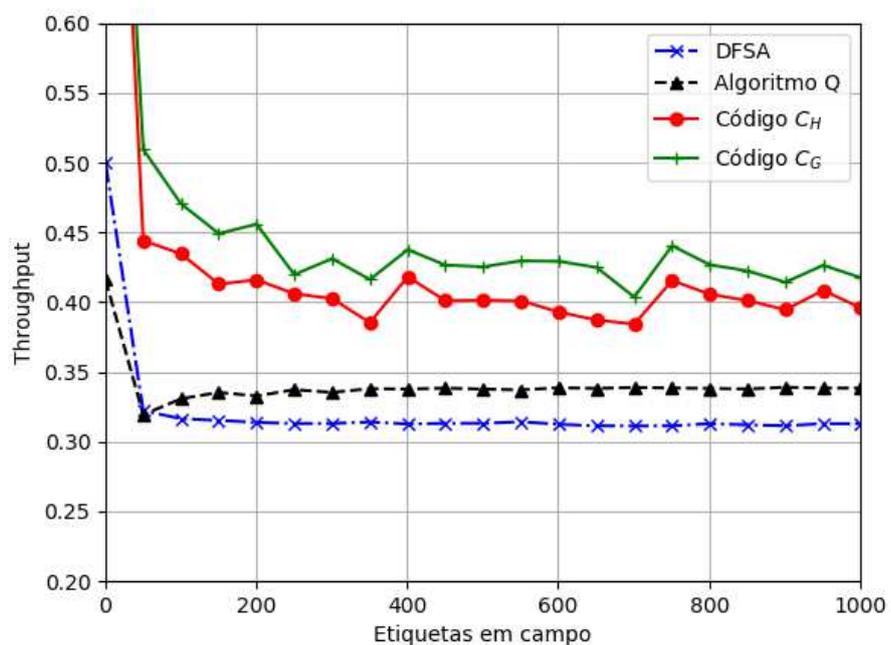


Figura 4.5 – Taxa de transferência média para os métodos utilizados como função do número de etiquetas.

CAPÍTULO 5

Considerações Finais

Este trabalho investigou a utilização de um método alternativo para a identificação de etiquetas RFID passivas na faixa de UHF que se utiliza dos códigos de singularização. Com base no método da seção transversal de radar, apresentou-se um protocolo para a comunicação das etiquetas compatível com o padrão EPC Global. Os resultados obtidos por meio de simulações mostraram uma redução na quantidade de *slots* utilizados no processo de identificação e uma maior taxa de transferência em cenários com a mesma quantidade de etiquetas, em comparação aos resultados obtidos para os protocolos DFSA-b e algoritmo-Q. Portanto, há uma redução no tempo total de identificação e melhoria da eficiência na utilização do canal, resultando em menores perdas de energia para alimentar as etiquetas por parte do leitor.

Trabalhos futuros podem abordar o emprego de outros códigos algébricos bem como novos algoritmos de decodificação que possuam uma menor complexidade computacional. O emprego do protocolo proposto em um ambiente controlado, utilizando etiquetas passivas comerciais, pode ser realizado de modo experimental a fim de validar os resultados obtidos em simulação.

Referências Bibliográficas

- [1] H. Vogt, “Efficient object identification with passive rfid tags,” in *International Conference on Pervasive Computing*. Springer, 2002, pp. 98–113.
- [2] O. M. Vedhekar, A. S. Sairam, and A. Kumari, “Binary countdown anti-collision protocol for rfid tag collision problem,” in *Accessibility to Digital World (ICADW), 2016 International Conference on*. IEEE, 2016, pp. 107–111.
- [3] M. V. C. Rodrigues, “Segurança de sistemas rfid com modulação aleatória,” Master’s thesis, Universidade Federal de Campina Grande, 2010.
- [4] K. Finkenzeller, *RFID handbook: fundamentals and applications in contactless smart cards, radio frequency identification and near-field communication*. John Wiley & Sons, 2010.
- [5] Rfid market: Global industry analysis and opportunity assessment 2017-2027. <https://www.futuremarketinsights.com/reports/rfid-market>.
- [6] D. K. Klair, K.-W. Chin, and R. Raad, “A survey and tutorial of rfid anti-collision protocols,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 12, no. 3, pp. 400–421, 2010.
- [7] L. Sanchez and V. Ramos, “An epc class-1 generation-2 anti-collision protocol for rfid tag identification in augmented systems,” in *RFID Technology (EURFID), 2015 International EURASIP Workshop on*. IEEE, 2015, pp. 36–43.
- [8] G. EPCglobal, “EPCTM radio-frequency identity protocol class-1 generation-2 uhf rfid protocol for communications at 860mhz-960mhz version 2.0.1,” Tech. Rep., 2015.
- [9] M. Benbaghdad, B. Fergani, S. Tedjini, and E. Perret, “Simulation and measurement of collision signal in passive uhf rfid system and edge transition anti-collision algorithm,” in *RFID Technology and Applications Conference (RFID-TA), 2014 IEEE*. IEEE, 2014, pp. 277–282.
- [10] G. Carroccia and G. Maselli, “Inducing collisions for fast rfid tag identification,” *IEEE Communications Letters*, vol. 19, no. 10, pp. 1838–1841, 2015.

- [11] X. Tan, H. Wang, L. Fu, J. Wang, H. Min, and D. W. Engels, "Collision detection and signal recovery for uhf rfid systems," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 15, no. 1, pp. 239–250, Jan 2017.
- [12] P. Nikitin and V. S. Kodukula, "Method and apparatus to estimate the number of transponders in a field," Oct. 22 2013, uS Patent 8,564,412.
- [13] R. S. Khasgiwale, R. U. Adyanthaya, and D. W. Engels, "Extracting information from tag collisions," in *RFID, 2009 IEEE International Conference on*. IEEE, 2009, pp. 131–138.
- [14] H. MahdaviFar and A. Vardy, "Coding for tag collision recovery," in *RFID (RFID), 2015 IEEE International Conference on*. IEEE, 2015, pp. 9–16.
- [15] P. C. Crepaldi and T. C. Pimenta, "Introductory chapter: Rfid: A successful history," in *Radio Frequency Identification*. InTech, 2017.
- [16] H. Stockman, "Communication by means of reflected power," *Proceedings of the IRE*, vol. 36, no. 10, pp. 1196–1204, 1948.
- [17] J. Landt, "The history of rfid," *IEEE potentials*, vol. 24, no. 4, pp. 8–11, 2005.
- [18] R. P. B. Mota, "Mecanismos para a melhoria do desempenho de sistemas rfid passivos," Ph.D. dissertation, Universidade de São Paulo, 2015.
- [19] V. D. Hunt, A. Puglia, and M. Puglia, *RFID: a guide to radio frequency identification*. John Wiley & Sons, 2007.
- [20] S. A. Ahson and M. Ilyas, *RFID handbook: applications, technology, security, and privacy*. CRC press, 2017.
- [21] E. Welbourne, L. Battle, G. Cole, K. Gould, K. Rector, S. Raymer, M. Balazinska, and G. Borriello, "Building the internet of things using rfid: the rfid ecosystem experience," *IEEE Internet computing*, vol. 13, no. 3, 2009.
- [22] C. A. Balanis, *Teoria de Antenas: Análise e Síntese*. Grupo Gen, Rio de Janeiro, LTC, 2009, vol. 1.
- [23] Y.-S. Lin, Z.-Y. Guo, Y.-S. Huang, and C.-H. Yeh, "A low-power uhf passive rfid transponder chip in 0.18 μm cmos," in *Wireless Power Transfer Conference (WPTC), 2017 IEEE*. IEEE, 2017, pp. 1–5.
- [24] S. Sarma, D. Brock, and D. Engels, "Radio frequency identification and the electronic product code," *IEEE micro*, vol. 21, no. 6, pp. 50–54, 2001.
- [25] I. S. G. Pedro, "Estudo do potencial de aplicabilidade da tecnologia rfid em meio hospitalar," Ph.D. dissertation, 2012.

- [26] J. Capetanakis, "Tree algorithms for packet broadcast channels," *IEEE transactions on information theory*, vol. 25, no. 5, pp. 505–515, 1979.
- [27] D. R. Hush and C. Wood, "Analysis of tree algorithms for rfid arbitration," in *Information Theory, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Symposium on*. IEEE, 1998, p. 107.
- [28] C. Law, K. Lee, and K.-Y. Siu, "Efficient memoryless protocol for tag identification," in *Proceedings of the 4th international workshop on Discrete algorithms and methods for mobile computing and communications*. ACM, 2000, pp. 75–84.
- [29] A. S. Tanenbaum, *Redes de Computadores*, Campus, Ed., 2003.
- [30] F. Schoute, "Dynamic frame length aloha," *IEEE Transactions on communications*, vol. 31, no. 4, pp. 565–568, 1983.
- [31] W.-T. Chen and G.-H. Lin, "An efficient anti-collision method for tag identification in a rfid system," *IEICE transactions on communications*, vol. 89, no. 12, pp. 3386–3392, 2006.
- [32] J.-R. Cha and J.-H. Kim, "Novel anti-collision algorithms for fast object identification in rfid system," in *Parallel and Distributed Systems, 2005. Proceedings. 11th International Conference on*, vol. 2. IEEE, 2005, pp. 63–67.
- [33] J.-B. Eom and T.-J. Lee, "Accurate tag estimation for dynamic framed-slotted aloha in rfid systems," *IEEE Communications Letters*, vol. 14, no. 1, 2010.
- [34] E. Cerciello, G. Massei, and L. Paura, "Optimization of tag anti-collision algorithm for epc gen2 rfid," in *Euro Med Telco Conference (EMTC), 2014*. IEEE, 2014, pp. 1–6.
- [35] C. Wang, M. Daneshmand, and K. Sohraby, "Optimization of tag reading performance in generation-2 rfid protocol," *Computer Communications*, vol. 32, no. 11, pp. 1346–1352, 2009.
- [36] S. Wang, W. Hong, L. Yin, and S. Li, "A novel fast tag estimate method for dynamic frame length aloha anti-collision algorithms in rfid system," in *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2012 IEEE*. IEEE, 2012, pp. 1–5.
- [37] W.-T. Chen, "A feasible and easy-to-implement anticollision algorithm for the epcglobal uhf class-1 generation-2 rfid protocol," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 485–491, 2014.
- [38] —, "Optimal frame length analysis and an efficient anti-collision algorithm with early adjustment of frame length for rfid systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 5, pp. 3342–3348, 2016.

- [39] M. Shakiba, M. J. Singh, E. Sundararajan, A. Zavvari, and M. T. Islam, “Extending birthday paradox theory to estimate the number of tags in rfid systems,” *PloS one*, vol. 9, no. 4, p. e95425, 2014.
- [40] M. Benbaghdad, B. Fergani, and S. Tedjini, “Toward a new phy layer scheme for decoding tags collision signal in uhf rfid system,” *IEEE Communications Letters*, vol. 20, no. 11, pp. 2233–2236, 2016.
- [41] Y. Zheng and M. Li, “Towards more efficient cardinality estimation for large-scale rfid systems,” *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, vol. 22, no. 6, pp. 1886–1896, 2014.
- [42] Y.-C. Lai, L.-Y. Hsiao, and B.-S. Lin, “Optimal slot assignment for binary tracking tree protocol in rfid tag identification,” *IEEE/ACM transactions on networking*, vol. 23, no. 1, pp. 255–268, 2015.