



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

Tese de Doutorado

**Dupla-Aproximação: Um Novo Método para
Estimativas do *Backlog* em Sistemas RFID
UHF passivos**

Hillner de Paiva Almeida Ferreira

Campina Grande - PB, Brasil
Agosto/2019



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

Dupla-Aproximação: Um Novo Método para Estimativas do *Backlog* em Sistemas RFID UHF passivos

Hillner de Paiva Almeida Ferreira

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Francisco Marcos de Assis, Dr.
Orientador

Alexandre Jean René Serres, Dr.
Orientador

Campina Grande - PB, Brasil
Agosto/2019

F383d

Ferreira, Hillner de Paiva Almeida.

Dupla-aproximação: um novo método para estimativas do backlog em sistemas RFID UHF passivos / Hillner de Paiva Almeida Ferreira. – Campina Grande, 2019.

103 f.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. Francisco Marcos de Assis, Prof. Dr. Alexandre Jean René Serres".

Referências.


1. Sistemas RFID UHF Passivos. 2. DA-DFSA. 3. Dupla-Aproximação. I. Assis, Francisco Marcos de. II. Serres, Alexandre Jean René. III. Título.

CDU 621.396.44(043)

**"DUPLA-APROXIMAÇÃO: UM NOVO MÉTODO PARA ESTIMATIVAS DO BACKLOG
EM SISTEMAS RFID UHF PASSIVOS"**

HILLNER DE PAIVA ALMEIDA FERREIRA


TESE APROVADA EM 09/09/2019



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


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


ADAILDO GOMES D'ASSUNÇÃO, Dr., UFRN
Examinador(a)


ALFREDO GOMES NETO, D.Sc., IFPB
Examinador(a)


BRUNO BARBOSA ALBERT, D.Sc., UFCG
Examinador(a)


EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

*Tu, Senhor, guardarás em perfeita paz aquele cujo
propósito está firme, porque em ti confia.*

(Isaías 26:3)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força, sabedoria, saúde e resiliência para enfrentar os momentos mais difíceis da minha vida.

Aos meus pais, Francisco e Heize, por todo amor, dedicação e incentivo.

A minha esposa Luciane, pela paciência e companheirismo. Você é o grande amor da minha vida!

Aos meus filhos Miguel e Luísa, aos quais peço perdão pelos momentos de ausência dedicados a esse trabalho.

Ao professor Francisco Marcos de Assis e Alexandre Jean René Serres, meus orientadores, pelo tempo investido na transmissão dos ensinamentos.

Aos colegas do doutorado, pelas conversas motivadoras e pelo conhecimento compartilhado ao longo dessa jornada.

RESUMO

Este trabalho de tese apresenta um estudo sobre a temática dos algoritmos anticolisão *Dynamic Framed Slotted ALOHA* (DFSA) aplicados aos sistemas de Identificação por Radiofrequência (RFID) que operam na faixa de Ultra alta Frequência (UHF) e utilizam etiquetas com *microchip* e sem bateria (etiquetas passivas). Neste contexto, o autor desenvolve um novo método que opera sobre os algoritmos DFSA e acelera o desempenho dos estimadores de *backlog* empregados. Admitindo um cenário crítico onde a quantidade de etiquetas a serem lidas é muito maior do que o total de intervalos de transmissão inicialmente disponibilizado pelo leitor (denominado quadro inicial), o método de Dupla-Aproximação (DA) proposto realiza, além das estimativas em direção às quantidades de etiquetas transmitindo, uma segunda aproximação, que reduz sistematicamente as quantidades de etiquetas transmitindo em direção as estimativas calculadas. Ao final, uma estimativa mais precisa para o total de etiquetas ainda não identificadas é rapidamente obtida. Resultados simulados mostram que os algoritmos DFSA que utilizam o método DA (denominados algoritmos DA-DFSA) apresentam taxas de transferências maiores e mais estáveis (ganhos entre 3,5% e 12,24%) e menores quantidades de sinais RFID transmitidos (reduções entre 15% e 43%) em comparação aos algoritmos DFSA tradicionais.

Palavras-chaves: Sistemas RFID UHF passivos, DA-DFSA, Dupla-Aproximação.

ABSTRACT

This thesis presents a study about the Dynamic Framed Slotted ALOHA (DFSA) anti-collision algorithms applied to Radio Frequency Identification (RFID) systems that operate in Ultra High Frequency (UHF) and use microchip and non-battery tags (passive tags). In this context, the author develops a new method that operates on DFSA algorithms and accelerates the performance of backlog estimators. Assuming a critical scenario where the number of tags to be read is much larger than the total of transmission intervals initially provided by the reader (called the initial frame), the proposed Double-Approximation (DA) method performs, in addition to the tag estimates toward to the tags transmitting, a second approximation, which systematically reduces the tags transmitting toward to the tag estimates. In the end, a more accurate estimation for the total of unidentified tags is quickly obtained. Simulated results show that DFSA algorithms using the DA method (called DA-DFSA algorithms) have higher and more stable throughput (gains between 3.5% and 12.24%) and smaller amounts of transmitted RFID signals (reductions between 15% and 43%) compared to the traditional DFSA algorithms.

Keywords: Passive UHF RFID systems, DA-DFSA, Double-Approximation.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. Motivação	14
1.2. Objetivos da pesquisa	15
1.3. Organização da tese	15
CAPÍTULO 2. A TECNOLOGIA RFID	16
2.1. Arquitetura do sistema	18
2.1.1. Padronização da tecnologia	21
2.1.2. Aplicações	23
2.1.3. Vantagens e desvantagens do uso.....	25
2.2. Sistemas RFID UHF passivos	26
2.2.1. Operação em UHF	26
2.2.2. Etiquetas passivas	27
2.2.3. Princípio de funcionamento.....	28
2.2.4. Interferências sobre os sinais	32
CAPÍTULO 3. RESOLUÇÃO DAS COLISÕES	34
3.1. Algoritmos probabilísticos.....	35
3.1.1. DFSA baseados em potência de 2	42
3.1.2. DFSA baseados em estimativas.....	44
CAPÍTULO 4. PROPOSIÇÃO DO MÉTODO.....	60
4.1. Experimento prático.....	62
4.2. Um método com duas aproximações	67
4.2.1. Sorteio das etiquetas que irão transmitir.....	69
4.2.2. Estimação do total de etiquetas	70
4.3. Operação do método DA	75
CAPÍTULO 5. SIMULAÇÕES E RESULTADOS	77
5.1. Métricas de avaliação	77
5.2. Construção e validação do simulador	82
5.3. Parâmetros do método DA.....	86
5.4. Simulação da convergência	87
5.5. Comparação do desempenho	90
CAPÍTULO 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	102
6.1. Trabalhos futuros	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
LISTA DE ANEXOS	118
LISTA DE PUBLICAÇÕES DO DOUTORADO	121

LISTA DE FIGURAS

2.1: Sistema RFID típico: (a) subsistema computacional, (b) leitor e (c) etiquetas [12, 68]..	18
2.2: Exemplos de etiquetas RFID: (a) passiva e (b) ativa [31].....	19
2.3: Tipos de leitores RFID: (a) portal [77], (b) fixo [78] e (c) móvel [73].....	21
2.4: Identificação animal: (a) etiqueta afixada e (b) detalhe da etiqueta [6].....	23
2.5: Controle de inventário: (a) estoque e (b) biblioteca [76].	24
2.6: Controle de acesso: (a) pulseira [11] e (b) bagagens [76].....	24
2.7: Sensoriamento: (a) temperatura [82] e (b) monitoramento de carnes [83].	24
2.8: Exemplo de etiquetas RFID UHF passiva.	27
2.9: Enlace de comunicação leitor e etiquetas [94].....	28
2.10: Modulação DSB-ASK: (a) dados, (b) modulante e (c) modulado (Adaptado de [96]).	29
2.11: Modulação por retroespalhamento (Adaptado de [36]).	30
2.12: Modulação utilizando transistor (Adaptado de [36]).	31
3.1: Fluxo de sinais RFID: (a) <i>slot</i> lido e (b) <i>slot</i> colidido (Adaptado de [92, 112, 113]).	36
3.2: Taxa de transferência em função do tamanho do quadro.....	41
3.3: Fluxograma do Algoritmo Q: (a) processo e (b) atualização de Q e Q_{fp} [11].....	43
3.4: Fluxograma dos algoritmos DFSA baseados em estimativas [16].....	44
4.1: Simulação do algoritmo DFSA utilizando o estimador Limite Inferior.	62
4.2: Comparação dos sinais \overline{T}_{s_s} entre os cenários Q_{Fixo} e $Q_{Ajustado}$	63
4.3: Comparação dos sinais $\overline{T}_{s_s}/n(0)$ para os cenários Q_{Fixo} e $Q_{Ajustado}$	64
4.4: Caracterização do experimento: (a) <i>layout</i> , (b) <i>setup</i> , (c) leitor e (d) antena do leitor. ...	65
4.5: Etiqueta RFID passiva adotada no experimento.	65
4.6: Comparação do SNR_{dB} para os cenários Q_{Fixo} e $Q_{Ajustado}$	66
4.7: Exemplo de aplicação do método de Dupla-Aproximação.....	68
4.8: Etapas do método DA.	68
4.9: Pseudocódigo da rotina SSE.	70
4.10: Diagrama de transição de estados da etiqueta.....	71
4.11: Diagrama em treliças para as transições $T_j(i)$	71
4.12: Fluxograma do método DA.....	76

5.1: Interface do SimRFID: (a) tela de entrada e (b) parametrização do algoritmo.....	83
5.2: Validação dos resultados: (a) SimRFID e (b) Shakiba <i>et al.</i> (Adaptado de [110]).....	84
5.3: Validação dos resultados: (a) SimRFID e (b) Eom <i>et al.</i> (Adaptado [121]).....	85
5.4: Validação dos resultados: (a) SimRFID e (b) Chen <i>et al.</i> (Adaptado de [187]).....	86
5.5: Dupla-Aproximação entre $n(i)$ e $n_b(i)$ utilizando os estimadores (a) Limite Inferior, (b) Schoute, (c) Vogt, (d) Eom-Lee, (e) Aniversário e (f) DS-MAP.	89
5.6: Comparação \overline{Th}_s entre os algoritmos DFSA e DA-DFSA utilizando os estimadores (a) Limite Inferior, (b) Schoute, (c) Vogt, (d) Eom-Lee, (e) Aniversário e (f) DS-MAP.....	92
5.7: Comparação \overline{Th}_s entre os algoritmos DFSA e DA-DFSA utilizando o estimador Limite Inferior e os tamanhos $f(0)$ (a) 8, (b) 16, (c) 24 e (d) 48.....	94
5.8: Comparação \overline{Th}_s para o algoritmo DA-DFSA utilizando o estimador Limite Inferior e adotando os contadores bc com 1 bit, 2 bits, 3 bits e 4 bits.....	96
5.9: Comparação $\overline{Ts}_s/n(0)$ entre os algoritmos DFSA e DA-DFSA utilizando os estimadores (a) Limite Inferior, (b) Schoute, (c) Vogt, (d) Eom-Lee, (e) Aniversário e (f) DS-MAP.	99

LISTA DE TABELAS

2.1: Normas ISO/IEC em RFID	22
3.1: Valores estimados n_{sub} utilizando MAP modificado $f_{sub} = 8$	57
4.1: Simulação do algoritmo DFSA utilizando o estimador Limite Inferior	61
4.2: Parâmetros $Q(0)$ adotados para os cenários Fixo e Ajustado.....	63
5.1: Total de reinícios Tr_s para $k = 1.000$, $n(0) = 400$ e $f(0) = 16$	87
5.2: $Ee_s \pm \sigma(Ee_s)$ para n_e adotando o contador bc com 2 bits	95
5.3: $Ee_s\%$, Ti_s e Tr_s adotando contadores bc com 1, 2, 3 e 4 bits	96
5.4: Quantidade $T_{s \rightarrow l}$ algoritmos DFSA e DA-DFSA para $n(0) = 1.000$	100
5.5: Quantidade $T_{s \rightarrow e}$ algoritmos DFSA e DA-DFSA para $n(0) = 1.000$	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIDC	Identificação Automática e Captura de Dados
US DoD	<i>U.S. Department of Defense</i>
IFF	<i>Identification Friend-or-Foe</i>
EAS	<i>Electronic Article Surveillance</i>
CEPT	<i>European Conference of Postal and Telecommunications Administrations</i>
ISO	<i>International Organization of Standards</i>
UPCC	<i>Uniform Product Code Council</i>
EAN	<i>European Article Numbering International</i>
NFC	<i>Near Field Communication</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ITF	Interrogator-talks-first
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
UID	<i>Universal Identification</i>
EPC	<i>Electronic Product Code</i>
SCM	<i>Supply Chain Management</i>
QR Code	<i>Quick Response Code</i>
FSA	<i>Frame Slotted ALOHA</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Code</i>
DFSA	<i>Dynamic Frame Slotted ALOHA</i>
PIE	<i>Pulse-interval Encoding</i>
ASK	<i>Amplitude Shift Keying</i>
ACK	<i>Acknowledgment Message</i>
NACK	<i>Not Acknowledgment Message</i>
RN16	<i>Random number of 16 bits</i>
SSE	Sorteios Sucessivos de Etiquetas

NOTAÇÃO

c_0, c_1, c_k	Minúscula, latina, itálico e com indicador subscrito Variáveis c do tipo 0, 1 e k (ocioso, lido, colidido, respectivamente)
$b_k^{f(i),n(i)}$	Minúscula, latina, itálico, com indicador subscrito e variáveis sobrescritas Variável b do tipo k em função de $f(i)$ e $n(i)$
$n(i)$	Minúscula, latina, itálico e com variável entre parênteses Variável em função da posição/estado i
Ψ	Maiúscula e grega Experimento aleatório
γ	Minúscula e grega sem indicador subscrito Fator de proporção (variável)
θ_0	Minúscula e grega com indicador subscrito Valor constante preestabelecido
N	Maiúscula, latina e itálica Variável aleatória
\mathbf{N}	Maiúscula, latina e negrito Conjunto de elementos
<u>Query</u>	Inglês, itálico e sublinhado Comando transmitido pelo leitor ou pela etiqueta
Th_f	Maiúscula + minúscula, latinas, itálico e com indicador subscrito Medida de desempenho da variável Th tipo f (quadro)
\overline{Th}_s	Variável com sobrelinha Valor médio da variável Th tipo s (sistema)
$\left[\sum_{j=0}^i f(j) \right]_{n(i)}$	Operação entre colchetes com variável subscrita Somatório calculado em função de $n(i)$

Capítulo 1. INTRODUÇÃO

Durante as últimas décadas, a complexidade no mundo dos negócios cresceu substancialmente. Em particular, o aumento da competitividade, a globalização dos mercados e as novas formas de consumo, acabam por exigir uma maior agilidade e receptividade das organizações [1–3]. Para atender a esses desafios, a adoção de novas tecnologias capazes de disponibilizar informações que contribuam para a rápida tomada de decisões torna-se um diferencial competitivo a ser alcançado.

Sistemas de identificação e rastreamento automático de veículos, documentos, mercadorias, animais e até pessoas que transitam dentro da cadeia produtiva, alimentam em tempo real as bases de dados dos sistemas de informação [4]. Os dados armazenados são então processados gerando relatórios que orientam à organização sobre o desempenho de suas operações atuais, permitindo estimar suas operações futuras e elaborar estratégias em relação ao seu funcionamento [4–7]. A partir daí, decisões de como manter estoques menores, operar de forma mais eficiente e controlar o desempenho individual de cada processo podem ser tomadas.

Dentre as principais tecnologias de Identificação Automática e Captura de Dados (AIDC ou *Automatic Identification and Data Capture*) disponíveis no mercado atualmente, a Identificação por Radiofrequência (RFID ou *Radio Frequency Identification*) destaca-se como uma das soluções mais promissoras do século XXI [8]. Encontrada em um número crescente de aplicações, a tecnologia RFID oferece diversas vantagens às organizações, tais como maior segurança e velocidade dos processos, enquanto reduz as perdas de produtos e os erros humanos [9–15].

À medida que os custos de implantação são reduzidos, os sistemas RFID que operam na faixa de UHF e utilizam etiquetas passivas (não possuem bateria) tornam-se cada vez mais acessíveis e difundidos comercialmente, sendo observados principalmente em aplicações que demandam a identificação de grandes volumes de etiquetas. Como vantagens, esses sistemas possuem maior tolerância às interferências, bom alcance de leitura e permitem a fabricação de etiquetas com dimensões reduzidas [16–19].

Devido às limitações de energia e de capacidade de processamento das etiquetas RFID passivas, os protocolos de comunicação baseados no Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (*Time Division Multiple Access*, TDMA) são especificados para operar nos sistemas RFID UHF passivos [20–23]. Nestes protocolos, o leitor disponibiliza intervalos de tempo fixos (denominados *slots*) para captura dos sinais transmitidos pelas etiquetas. Com o intuito de mitigar a ocorrência de transmissões simultâneas entre duas ou mais etiquetas (denominado colisão entre sinais), algoritmos anticisão são empregados no gerenciamento do processo de identificação das etiquetas [24].

Os algoritmos anticisão *Dynamic Framed Slotted ALOHA* (DFSA) baseado em estimativas ajustam os conjuntos de *slots* disponibilizados (denominado tamanho dos quadros) em função de um estimador de *backlog* que calcula a quantidade de etiquetas que irão transmitir até o leitor [25–27]. Todavia, nos casos críticos onde a quantidade de etiquetas a serem lidas é muito maior do que o tamanho do quadro inicialmente preestabelecido, uma grande quantidade de colisões entre sinais é gerada resultando em estimativas imprecisas ao longo dos primeiros quadros lidos.

Com o propósito de mitigar a ocorrência dessas colisões, um novo método aplicável aos algoritmos DFSA e que acelera a aproximação entre quadros e etiquetas é proposto. Denominado como Dupla-Aproximação (DA), o método executa, além dos ajustes nos tamanhos dos quadros em função do *backlog* estimado, uma segunda aproximação, que reduz temporariamente e sistematicamente as quantidades de etiquetas transmitidas de modo a convergir mais rapidamente em direção aos tamanhos dos quadros ajustados. Desse modo, uma estimativa mais precisa para a quantidade de etiquetas ainda não identificadas pode ser obtidas com uma menor demanda de *slots* e de sinais RFID transmitidos.

1.1. Motivação

A carência de estudos relacionados à melhoria no desempenho dos algoritmos DFSA em sistemas RFID UHF passivos aplicados na identificação automática de várias quantidades de etiquetas (desde dezenas, centenas até milhares de etiquetas), motivou a exploração de uma nova abordagem que se mostrou encorajadora: reduzir temporariamente a quantidade de etiquetas que transmitem até o leitor com o propósito de alcançar uma convergência mais rápida em direção às estimativas calculadas pelo estimador de *backlog*.

1.2. Objetivos da pesquisa

O objetivo geral desse trabalho é propor um novo método baseado nos algoritmos DFSA com estimativa de *backlog* e aplicável aos sistemas RFID UHF passivos que seja capaz de aumentar a eficiência do processo de identificação em cenários com variadas quantidades de etiquetas a serem lidas.

Dentre os objetivos específicos, destacam-se:

- Analisar o desempenho de identificação dos algoritmos DFSA baseado em estimativas para um cenário onde o tamanho do quadro inicial é preestabelecido e a quantidade de etiquetas a serem lidas varia significativamente;
- Avaliar, por meio de experimento, o impacto da relação entre o tamanho do quadro inicial e a quantidade de etiqueta a serem lidas sobre o processo de identificação;
- Descrever um novo método capaz acelerar a aproximação entre etiquetas e quadros de modo a mitigar a quantidade de *slots* colididos e colisões entre etiquetas.

1.3. Organização da tese

Este documento encontra-se distribuído como a seguir. No Capítulo 2 é introduzida a temática da tecnologia RFID com ênfase na sua arquitetura, tipos, funcionamento e aplicações. No Capítulo 3 é detalhado o modo de operação dos algoritmos DFSA com destaque para os estimadores de *backlog*. No Capítulo 4 é apresentado o problema estudado, inclusive com experimento, e o método de Dupla-Aproximação proposto. No Capítulo 5 são descritas as métricas de desempenho adotadas, o simulador construído e as comparações entre os resultados obtidos com e sem o uso do método desenvolvido. No Capítulo 6 são exibidas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros. Ao final, encontram-se as referências bibliográficas, a lista de anexos e as publicações aceitas neste doutorado.

Capítulo 2. A TECNOLOGIA RFID

A Identificação por radiofrequência (ou RFID) é um tipo de tecnologia adotada no reconhecimento e na localização automática de objetos e seres vivos [8, 10, 28, 29]. Por meio da transmissão e captura de dados utilizando ondas eletromagnéticas de rádio, a tecnologia RFID coleta dados e identifica itens físicos e pessoas [30]. Em síntese, a tecnologia RFID é uma técnica de leitura sem fio que transmite e recupera energia e dados a partir de dispositivos anexados aos objetos monitorados [31].

Durante os últimos trinta anos, a tecnologia RFID evoluiu e passou a ter forte influência sobre uma ampla gama de segmentos tais como a manufatura, a logística e o varejo [1]. O reconhecimento em tempo real, a descoberta de itens dentro de armazéns, o controle na gestão do estoque de mercadorias e o monitoramento da entrada e saída de pessoas e bens, demonstram o grande potencial dessa tecnologia na redução dos custos, no aperfeiçoamento dos processos de negócios, na melhoria da cadeia de suprimentos e no suporte ao cliente local [1, 30–33].

As primeiras aplicações da tecnologia RFID datam de meados de 1937, pouco antes do início da Segunda Guerra Mundial, quando as forças armadas norte americanas desenvolveram um sistema que permitia distinguir entre aeronaves aliadas e inimigas. Esse sistema, denominado de Identificação Amigo ou Inimigo (*Identification Friend-or-Foe, IFF*), constituía-se essencialmente de um dispositivo interrogador (um radar em terra) e um *transponder* (implantado na aeronave) [13, 34, 35]. Quando a aeronave se aproximava da base aliada, o sinal interrogador do radar era captado pelo *transponder*, modulado e retransmitido para a base, que, por sua vez, identificava ou não o avião como aliado.

Devido aos altos custos de implantação, o uso da tecnologia RFID restringiu-se por vários anos apenas às aplicações militares, de laboratórios e a grandes empresas comerciais. Com os avanços da eletrônica e da fabricação de componentes em larga escala, os custos de produção das etiquetas iniciaram uma trajetória de redução gradativa que tornou possível a sua popularização em massa [36, 37].

Em 1960, o primeiro uso comercial da RFID foi o sistema de vigilância contra furto de artigos (*Electronic Article Surveillance*, EAS). Nesse sistema, etiquetas contendo apenas 1 bit de dados eram incorporadas aos produtos de modo a permitir sua detecção imediata por leitores instalados na saída de lojas e fábricas [11, 34].

As décadas de 70 e 80 marcaram a expansão mundial da RFID. Os sistemas em baixa frequência encontraram ampla aceitação em aplicações relacionadas ao rastreamento de gado. Com o passar dos anos, novos sistemas começaram a operar também em alta frequência. Nesta faixa, tornou-se possível obter um maior alcance de leitura e uma maior velocidade de transferência de dados. A cobrança de pedágio eletrônico foi a primeira grande área de aplicação em alta frequência neste período [13, 34, 38].

Após 1990, a identificação por rádio ganhou mais força e adeptos, fato que se deve, principalmente, à redução nos custos de implantação. Neste período, engenheiros da IBM desenvolveram e patentearam o sistema RFID em ultra alta frequência. Ainda nesta mesma década, várias organizações tais como a *European Conference of Postal and Telecommunications Administrations* e a Organização Internacional para Padronização (*International Organization for Standardization*, ISO) esforçaram-se para criar um padrão único da RFID. A Auto-ID Center foi fundada em 1999 com este propósito [5, 20, 39, 40].

No ano de 2003, a Walmart e US DoD exigiram de seus fornecedores o uso da RFID em todo seu processo produtivo até 2005 [41–43]. Em 2003, a Auto-ID Center foi incorporada à EPCglobal, uma *joint venture* entre a *Uniform Product Code Council*, fabricante do código de barras e a *European Article Numbering International*. Em 2006, os padrões EPCglobal foram adequados e aprovados pela ISO [11, 40].

A partir de 2007, o preço das etiquetas RFID passivas aproximou-se dos US\$ 0,05 para compras em grandes volumes [44]. Em 2008, vários países do mundo passaram a emitir passaportes contendo etiquetas RFID (“*e-passport*”) [31]. Em março de 2010, um laboratório coreano criou com sucesso um *microchip* impresso de baixo custo (cerca de US\$ 0,03) a partir de nanotubos de carbono [40, 44].

No ano de 2011, o uso da tecnologia de Comunicação por Campo de Proximidade (*Near-Field Communication*, NFC) ganhou notoriedade em *smartphones* e *tablets*. Alguns autores consideram o NFC como uma extensão da RFID, pois permite a identificação e o compartilhamento de dados entre dispositivos próximos utilizando ondas de rádio [11, 45].

Em abril de 2014, a Smartrac, Impinj, Google e Intel fundaram a Aliança RAIN com o objetivo de impulsionar a adoção global da tecnologia RFID. A Aliança RAIN pretende tornar-se o elo entre a tecnologia RFID e a nuvem, de modo que os dados baseados em RFID possam ser armazenados, gerenciados e compartilhados via internet [46, 47].

Com o aprimoramento e a redução nos custos de implantação, a tecnologia RFID aproxima-se do conceito de Internet das Coisas (*Internet of Things*, IoT). Considerada a terceira onda da indústria da informação, a IoT utiliza os sistemas RFID para coletar dados no mundo real e vincula-las às informações virtuais. A IoT planeja criar uma grande rede mundial entre produto, cliente, empresa e governo [27, 48–50].

No Brasil, com o propósito de incentivar o uso da tecnologia RFID, a Câmara de Comércio Exterior publicou a resolução nº 61 de 31 de agosto de 2018 que alterou para 0% (zero por cento) até 30 de junho de 2020 as alíquotas do imposto de importação sobre máquinas para produção, manuseio e rotulagem de etiquetas RFID [51].

Atualmente, o estado da arte da tecnologia RFID aponta para trabalhos científicos relacionados ao desenvolvimento de mecanismos mais precisos de localização [52–54], a projetos mais robustos de identificação e sensoriamento de objetos metálicos e líquidos [55–58], à construção de etiquetas sem *chips* de baixo custo [59–63] e a criação de algoritmos de identificação e de criptografia mais eficientes [24, 64–67].

2.1. Arquitetura do sistema

Um sistema RFID típico é organizado por três componentes principais: um leitor, múltiplas etiquetas e um subsistema computacional, conforme ilustrado na figura 2.1.

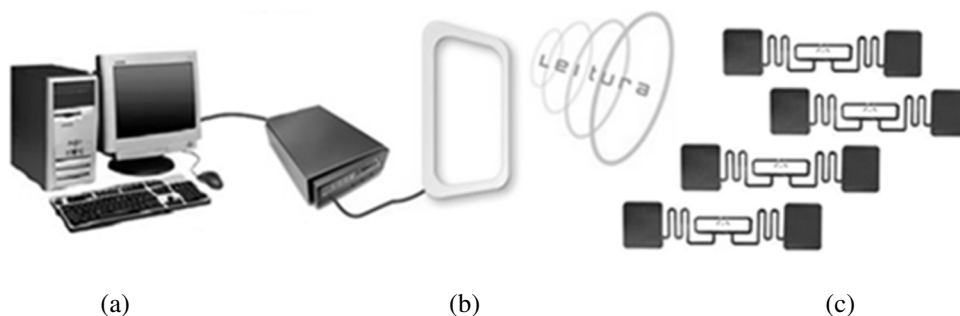


Figura 2.1: Sistema RFID típico: (a) subsistema computacional, (b) leitor e (c) etiquetas [12, 68].

a) Etiquetas

As etiquetas são estruturas comunicadoras afixadas aos elementos a serem identificados [34, 49, 69], exemplos ilustrados na figura 2.2. As etiquetas são responsáveis por armazenar e transmitir a identificação (ou ID) que discrimina o objeto ou pessoa. Normalmente, são classificadas conforme a fonte de alimentação utilizada.

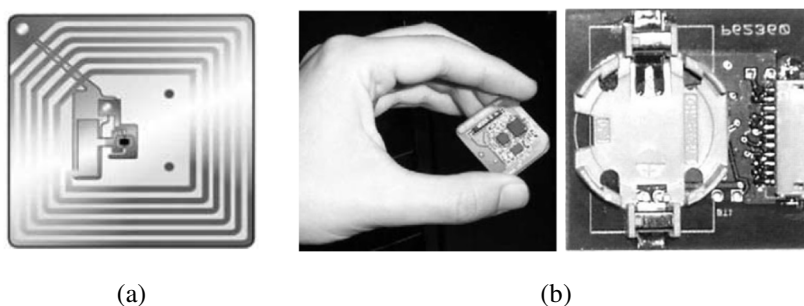


Figura 2.2: Exemplos de etiquetas RFID: (a) passiva e (b) ativa [31].

As etiquetas passivas não possuem fonte de alimentação própria, obtêm a energia que necessitam para seus circuitos, bem como para transmissão dos seus dados, a partir da potência transmitida pelo leitor [11, 69, 70]. Em geral, as etiquetas passivas podem operar em condições extremas de temperatura e pressão, possuem um longo tempo de vida e custos de produção mais baixos.

Dentre os diversos tipos de etiquetas passivas, é possível encontrar ainda um subgrupo constituído por etiquetas sem *chip* (conhecidas como *chipless tags*) que não possuem circuitos integrados responsáveis pelo armazenamento e processamento dos dados [5, 35]. Neste caso, as IDs são gravadas na própria resposta eletromagnética dos materiais que compõem as etiquetas. Como resultado, a remoção dos circuitos eletrônicos torna os custos de produção ainda mais baixos.

As etiquetas ativas possuem fonte de alimentação própria (ou bateria) que fornece energia para seus circuitos integrados e para transmissão dos seus dados [31, 71]. As etiquetas ativas possuem autonomia funcional e maior capacidade de armazenamento e alcance de leitura quando comparadas às etiquetas passivas. Todavia, as etiquetas ativas são genericamente maiores, mais caras, não suportam condições extremas de funcionamento (temperatura e pressão) e possuem tempo de vida condicionado à duração da bateria (cerca de 3 anos) [20, 23, 72].

As etiquetas semiativas dispõem de bateria interna para alimentar seus circuitos e realizar a transmissão dos dados (semelhante às etiquetas ativas), entretanto, permanecem em estado de baixo consumo, sem transmitir, até a detecção do sinal transmitido pelo leitor [11, 73, 74]. Este modo de funcionamento permite o prolongamento do tempo de vida da bateria, mas condiciona a comunicação dos dados ao sinal de ativação recebido. As etiquetas semiativas possuem maior capacidade de armazenamento e alcance de leitura quando comparadas às etiquetas passivas, todavia, também são maiores e mais caras, não suportando condições extremas de funcionamento.

As etiquetas semipassivas também dispõem de bateria interna e permanecem em estado de baixo consumo, sem transmitir, até a detecção do sinal de interrogação do leitor. Diferentemente das etiquetas semiativas, a transmissão dos dados ocorre de modo semelhante às etiquetas passivas, utilizando a própria energia transmitida pelo leitor. Da mesma forma que as etiquetas ativas e semiativas, as etiquetas semipassivas possuem maior capacidade de armazenamento em comparação às etiquetas passivas, contudo, também são maiores e mais caras, não suportando condições extremas de funcionamento. Como vantagem, possuem maior eficiência energética em relação às etiquetas ativas, todavia, devido ao seu modo de comunicação semelhante às etiquetas passivas, apresentam menor alcance de leitura e maior atraso de resposta em virtude do tempo necessário para “ativar” a etiqueta [11, 73, 74].

Em geral, os sistemas RFID são classificados de acordo com a frequência de operação e o tipo de etiquetas que utilizam. Nesta tese, os sistemas estudados nos próximos capítulos são designados como sistemas RFID UHF passivo com *chip*.

b) Leitor

Os leitores RFID são dispositivos responsáveis por estabelecer a comunicação (questionar, fornecer e capturar dados) entre as etiquetas e o subsistema computacional [73, 75]. Sua estrutura básica pode ser representada por um microcontrolador, que fornece a interface e administra os protocolos de comunicação, uma ou mais antenas transmissoras ou receptoras e um circuito de radiofrequência, necessário para gerar o campo eletromagnético que interage com as etiquetas.

Na figura 2.3 são ilustrados alguns exemplos de leitores. Construtivamente, os leitores podem ser montados como dispositivos fixos (na forma de portais automatizados), móveis (utilizados na leitura manual de etiquetas), ou ainda acoplados fisicamente a esteiras ou serem fixados a estruturas como prateleiras inteligentes [20, 76].

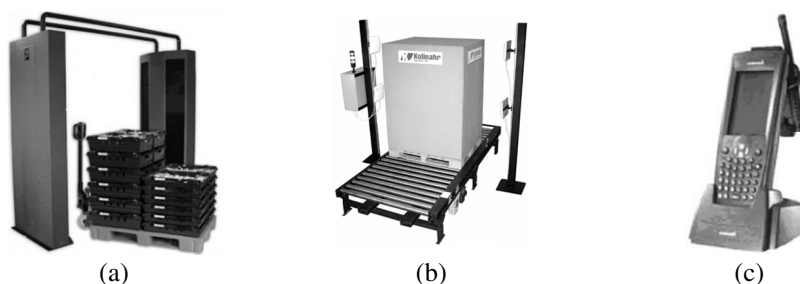


Figura 2.3: Tipos de leitores RFID: (a) portal [77], (b) fixo [78] e (c) móvel [73].

c) Subsistema computacional

O subsistema computacional é responsável por operacionalizar toda a comunicação do sistema RFID e sua relação com os demais sistemas empresariais. Sua complexidade pode variar desde um pequeno computador até um sistema servidor. Representam a infraestrutura que incorpora o sistema de controle, ou *Middleware* [73, 77].

Basicamente, o *Middleware* é o software responsável pela interface entre o sistema RFID e o sistema de gestão da empresa. É a interface que permite o registo das comunicações entre o leitor e as etiquetas, solicita informações necessárias à base de dados e fornece informações para comunicação com as etiquetas. Além disso, o *Middleware* recebe os dados identificados pelo leitor e atualiza as bases de dados, mantendo o sincronismo entre todos os intervenientes do processo [78].

2.1.1. Padronização da tecnologia

A padronização estabelece a plataforma mais eficiente na qual a indústria pode operar. Com a popularização da tecnologia RFID, duas principais organizações tornaram-se responsáveis por regulamentar o seu uso mundialmente: a ISO e a EPCglobal [79, 80].

Como mostrado na Tabela 2.1, a ISO é encarregada pela padronização das faixas de frequências de operação e dos protocolos de codificação [5, 73]. Trabalhando em parceria com a Comissão Eletrotécnica Internacional (*International Electrotechnical Commission, IEC*), a ISO/IEC elaboram as normas relacionadas à interface aérea, ao conteúdo de dados, à conformidade e ao desempenho dos sistemas RFID [31].

Tabela 2.1: Normas ISO/IEC em RFID

Padrão	Descrição
ISO/IEC 18000	Informações gerais sobre a forma de operação da tecnologia RFID
ISO/IEC 18000-1	Arquitetura e parâmetros gerais adotados mundialmente
ISO/IEC 18000-2	Parâmetros para comunicações de sistemas com frequência abaixo de 135 kHz
ISO/IEC 18000-3	Parâmetros para comunicações de sistemas com frequência de 13,56 MHz
ISO/IEC 18000-4	Parâmetros para comunicações de sistemas com frequência de 2,45 GHz
ISO/IEC 18000-5	Parâmetros para comunicações de sistemas com frequência de 5,8 GHz
ISO/IEC 18000-6	Parâmetros para comunicações de sistemas com frequência de 860 MHz até 960 MHz ISO/IEC 18000-6 subdivida em: ISO/IEC 18000-61 (ou 18000-6A) ISO/IEC 18000-62 (ou 18000-6B) ISO/IEC 18000-63 (ou 18000-6C) ISO/IEC 18000-64 (ou 18000-6D)
ISO/IEC 18000-7	Parâmetros para comunicações de sistemas com frequência de 433 MHz

A EPCglobal foi fundada com o propósito de auxiliar a padronização da RFID e controlar os números de identificação universal das etiquetas. Utilizando o Código Eletrônico do Produto (*Electronic Product Code, EPC*) – é possível identificar um item específico na cadeia de suprimento [73, 76]. No Brasil, a gestão do padrão e do código EPC é realizada pela GS1.

Os padrões ISO/IEC 18000-63 (ou 18000-6C) e EPCglobal C1 Gen2 versão 2.1 especificam os parâmetros de comunicação para os sistemas RFID UHF passivos que utilizam a codificação por intervalo de pulso (*Pulse Interval Encoding*, PIE) e que adotam os algoritmos anticollisão baseado em *slots* aleatórios. Ambos as normas são complementares entre si e serão adotadas como referência nos próximos capítulos.

2.1.2. Aplicações

Devido à sua versatilidade na identificação e localização de itens e pessoas, a tecnologia RFID vem sendo amplamente adotada em um crescente número de aplicações. A seguir, são apresentadas e comentadas as mais comuns.

a) Identificação animal

Na agropecuária, animais de abate são identificados por colares e brincos RFID, como ilustrado na figura 2.4. Etiquetados desde o nascimento, todo o histórico médico e de manejo podem ser acompanhados individualmente, permitindo um maior controle da qualidade e procedência dos animais [6, 11, 31].

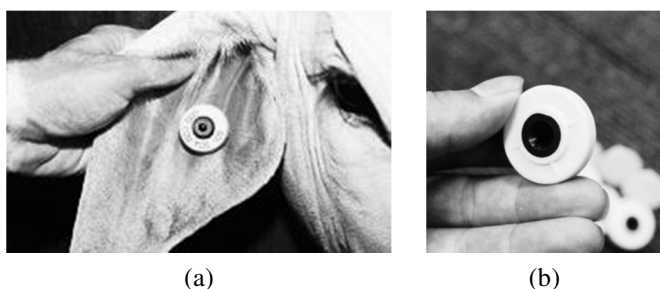


Figura 2.4: Identificação animal: (a) etiqueta afixada e (b) detalhe da etiqueta [6].

b) Controle de inventário

Um dos principais benefícios do uso da tecnologia RFID ocorre na gestão da cadeia suprimento (*Supply Chain Management*, SCM), figura 2.5. Por meio do rastreamento automático, é possível estabelecer uma varredura periódica dos produtos em prateleiras e estantes permitindo a atualização em tempo real do inventário [5, 34].



Figura 2.5: Controle de inventário: (a) estoque e (b) biblioteca [76].

c) Controle de acesso

Etiquetas RFID são anexadas às malas ou carregadas por pessoas, como na figura 2.6. Sua utilização proporciona o acesso controlado em áreas de segurança ou o controle de bagagens em aeroportos [5, 11, 76].

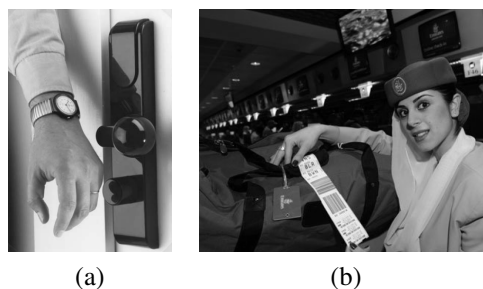


Figura 2.6: Controle de acesso: (a) pulseira [11] e (b) bagagens [76].

d) Sensoriamento de produtos

Etiquetas RFID podem captar dados específicos sobre o estado de conservação de produtos ou do ambiente, figura 2.7. Sensores são conectados às etiquetas de modo a transmitir informações sobre o estado de conservação dos itens monitorados [58, 81–83].



Figura 2.7: Sensoriamento: (a) temperatura [82] e (b) monitoramento de carnes [83].

2.1.3. Vantagens e desvantagens do uso

A Identificação Automática e Captura de Dados (*Automatic Identification and Data Capture*, AIDC) define um conjunto de tecnologias utilizadas na captura ou coleta de dados a partir de algum tipo de mecanismo automático, ou seja, sem a necessidade da entrada manual. Dentre as principais tecnologias AIDC destacam-se o código de barras, o *QR Code*, o reconhecimento óptico de caracteres (*Optical Character Recognition*, OCR), a biometria e a identificação por radiofrequência [11, 73].

Devido ao seu baixo custo de implantação, o código de barras é a principal tecnologia AIDC adotada no mundo atualmente. As etiquetas de código de barras são constituídas por uma sequência impressa de barras e lacunas, largas e estreitas, associadas a símbolos que podem ser interpretados numericamente ou alfanumericamente. Um leitor óptico identifica as etiquetas por meio da captura do feixe de laser refletido sobre as barras e lacunas [12, 20].

Uma vez que a propagação do feixe requer linha de visão direta entre o leitor e o código de barras, a presença de um operador durante o processo de identificação torna-se indispensável. Comparativamente à tecnologia RFID, observa-se que a identificação através de ondas de rádio não requer linha de visão e, portanto, a intervenção humana pode ser removida.

À medida que os custos de fabricação das etiquetas são reduzidos, a tecnologia RFID torna-se uma solução cada vez mais adotada no mercado de aplicações AIDC. Em relação ao código de barras, a tecnologia RFID apresenta inúmeras vantagens nas quais se destacam [20, 43, 70, 75, 84–86]:

- Permite o uso de códigos corretores de erro e criptografia oferecendo maior confiança e segurança na transmissão dos dados;
- Possui velocidade de resposta mais rápida entre leitor e etiquetas viabilizando a identificação de objetos em movimento;
- Ocorrência da detecção e identificação a distâncias maiores;
- Possibilidade de identificar etiquetas dentro de caixas ou no interior de líquidos;
- Maior capacidade de armazenamento de dados nas etiquetas;

- Função de leitura e escrita viabiliza a atualização dos dados nas etiquetas;
- Maior durabilidade e reutilização das etiquetas;
- Maior nível de dificuldade para falsificação das etiquetas;
- Maior robustez de identificação em ambientes agressivos;
- Proporciona o rastreamento de objetos e pessoas;
- Viabiliza o sensoriamento do ambiente, objetos e pessoas;

Entretanto, a tecnologia RFID também apresenta algumas desvantagens em relação ao código de barras, dentre elas destacam-se:

- Invasão de privacidade devido ao monitoramento indevido das etiquetas. Uma etiqueta próxima ao leitor denuncia sua localização, por exemplo;
- Metais e líquidos podem reduzir o alcance de leitura das etiquetas;
- Elevado investimento para implantação do sistema;
- Falta de padronização mundial das frequências de operação;
- Maior tamanho e volume ocupado pelas etiquetas;
- Etiquetas propensas a danos elétricos;
- Processo de identificação sujeito a interferências de rádio.

2.2. Sistemas RFID UHF passivos

2.2.1. Operação em UHF

O uso dos sistemas RFID UHF passivos como alternativa para automação da captura de dados tornou-se mais evidente no final dos anos 90, com a queda nos custos dos componentes eletrônicos e na intensificação das pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de etiquetas mais baratas para aplicações em larga-escala [36, 87].

Comparativamente aos sistemas RFID em LF e HF, a operação em UHF sofre menos interferências, possui maior alcance e velocidade de leitura além de viabilizar a construção de etiquetas mais finas, flexíveis e com antenas de tamanho reduzido [19, 88, 25].

No Brasil, as frequências de operação para os sistemas RFID foram inicialmente estabelecidas pela resolução nº 506 de 1 de julho de 2008 [89]. Todavia, esta mesma resolução acabou sendo revogada em 27 de junho de 2017 pela resolução nº 680 [90]. Para cobrir as especificações deixadas pela resolução nº 506, a ANATEL publicou o Ato de Requisitos Técnicos de Certificação nº 14.448 de 04 de dezembro de 2017 de modo a possibilitar a continuidade no processo de homologação dos produtos RFID [91]. Na faixa UHF, o Ato nº 14.448 determina os intervalos entre 860 – 869 MHz, 894 – 898,5 MHz, 902 – 907,5 MHz, 915 – 928 MHz e 2.400 – 2.483,5 MHz para validação da conformidade dos equipamentos de radiocomunicação RFID.

2.2.2. Etiquetas passivas

Conforme visto anteriormente, os sistemas RFID são geralmente classificados de acordo com o tipo de etiqueta e a frequência de operação que utilizam. Assim, os sistemas RFID UHF passivo são caracterizados pelo uso de etiquetas sem fonte de alimentação própria e que operam na faixa de frequência UHF. Construtivamente, as etiquetas RFID passivas com *chip* apresentam uma estrutura simples constituída basicamente por um microcircuito integrado (CI ou *microchip*) e uma antena sob um substrato (ou *inlay*) [17, 44, 45, 49]. Na figura 2.8 é ilustrado um exemplo de etiqueta RFID UHF passiva em microfita.

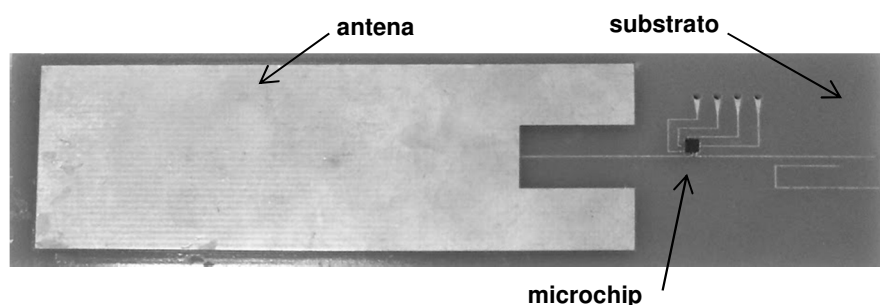


Figura 2.8: Exemplo de etiquetas RFID UHF passiva.

O *microchip* é o componente responsável pelo processamento, modulação e armazenamento da ID. Sua arquitetura interna permite decodificar comandos de leitura e escrita transmitidos pelo leitor e controlar a transmissão dos dados [17, 92]. As configurações de memória podem variar a depender das exigências de cada aplicação.

Por meio de suas antenas, as etiquetas captam energia e comandos contidos nos sinais de rádio ativando o *microchip* [20, 80]. Os microcircuitos internos processam os comandos recebidos e, posteriormente, utilizam as antenas para irradiar a ID até o leitor.

O substrato da etiqueta é a superfície na qual o *microchip* e a antena estão acoplados. Podem ser encontradas no formato de plásticos maleáveis ou dentro de estruturas encapsuladas para aplicações mais específicas da indústria [5, 17, 20].

2.2.3. Princípio de funcionamento

Conforme especificado nos padrões ISO/IEC 18000-6C e EPC UHF C1 Gen2 [107, 108], o leitor transmite comandos até a etiqueta modulando o sinal da portadora na faixa de frequência entre 860 – 960 MHz. A etiqueta captura os comandos e toda energia necessária para sua operação a partir do sinal transmitido pelo leitor [92].

O leitor identifica os dados da etiqueta transmitindo um sinal de portadora não-modulado, ou seja, no formato de onda contínua (*continuous wave*, CW). A etiqueta captura a energia transmitida e modula o coeficiente de reflexão da sua antena a fim de refletir sua identificação para o leitor [93].

Na figura 2.9 é ilustrado o enlace de comunicação entre leitor e etiqueta. O sinal da portadora encontra-se presente no canal e é modulado pelos comandos do leitor no enlace direto (ou *downlink*) e pelas respostas das etiquetas no enlace reverso (ou *uplink*) [94, 95].

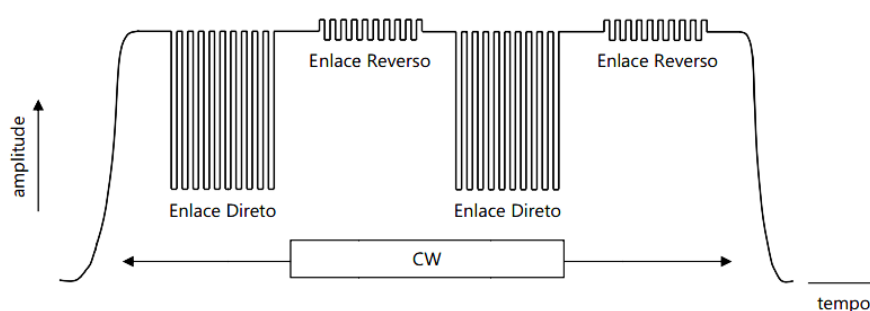


Figura 2.9: Enlace de comunicação leitor e etiquetas [94].

Os sistemas RFID UHF passivos são classificados como leitor-fala-primeiro (*interrogator-talks-first*, ITF), ou seja, a etiqueta somente irá transmitir após receber a solicitação do leitor. Outra característica é que o enlace de comunicação não ocorre de forma simultânea, ou seja, nenhum processo de demodulação ou decodificação dos dados ocorre na etiqueta enquanto a mesma estiver transmitindo (a comunicação é do tipo *half duplex*) [31, 92, 96].

a) Enlace direto

O leitor transmite comandos para uma ou mais etiquetas codificando os bits de dados no sinal da portadora. Essa codificação é realizada através da modulação por chaveamento de amplitude (*Amplitude Shift Keying*, ASK) dentre suas variantes *Double-Sideband Amplitude Shift Keying* (DSB-ASK), *Single-Sideband Amplitude Shift Keying* (SSB-ASK) e *Phase-Reversal Amplitude Shift Keying* (PR-ASK). A modulação ASK consiste na variação da amplitude do sinal da portadora em função do sinal modulante obtido a partir dos dados a serem transmitidos. O formato de codificação dos bits no sinal utiliza a codificação por intervalo de pulso (*Pulse Interval Encoding*, PIE). Na figura 2.10 é ilustrado um exemplo de modulação do tipo DSB-ASK com codificação PIE [92, 95, 96].

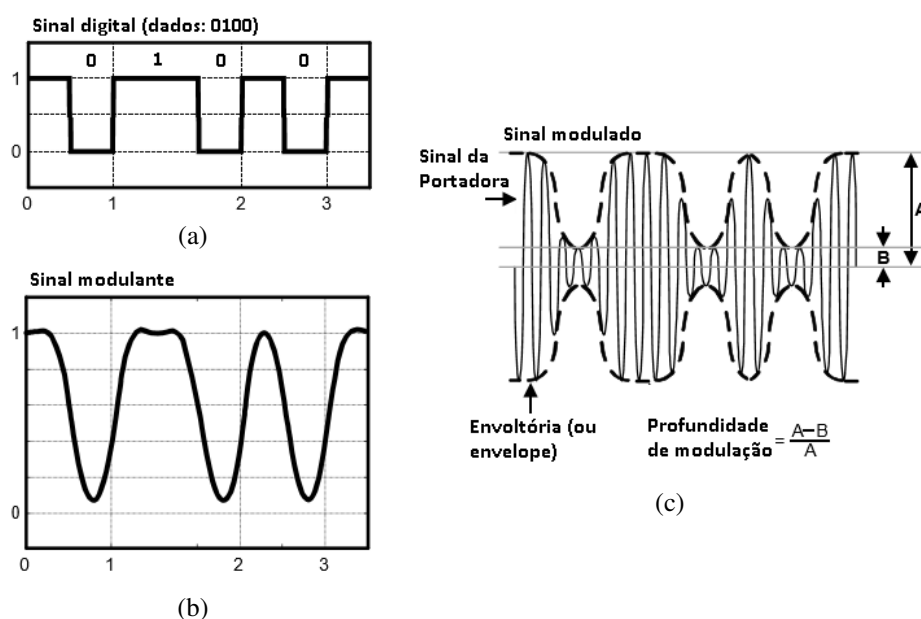


Figura 2.10: Modulação DSB-ASK: (a) dados, (b) modulante e (c) modulado (Adaptado de [96]).

b) Enlace reverso

Uma vez que as etiquetas passivas não possuem fonte de alimentação própria, suas respostas dependem, necessariamente, da onda contínua transmitida pelo leitor e da recepção e modulação dessa onda pela própria antena da etiqueta [36, 92]. Desse modo, a capacidade de resposta da etiqueta está condicionada a fatores como a distância entre o leitor e a etiqueta, o nível de potência transmitida pelo leitor e a eficiência e orientação das antenas da etiqueta [68].

Como ilustrado na figura 2.11, a potência irradiada pela antena transmissora do leitor propaga-se no espaço e induz uma tensão nos terminais da antena da etiqueta. Se nesses terminais for conectada uma carga, três situações podem ocorrer:

- Se a carga possuir baixa impedância: uma corrente induzida irá fluir na antena da etiqueta alimentando seus circuitos internos;
- Se a carga possuir uma impedância mínima (um curto-circuito): uma corrente induzida na antena da etiqueta irá irradiar. A onda irradiada se propagará pelo caminho de volta até a antena do leitor, induzindo uma tensão e produzindo um sinal que pode ser detectado (um sinal retroespalhado ou *backscattered*).
- Se a carga possuir grande impedância e for ligada ao terra: uma pequena ou nenhuma corrente será induzida e, conseqüentemente, não haverá sinal retroespalhado.

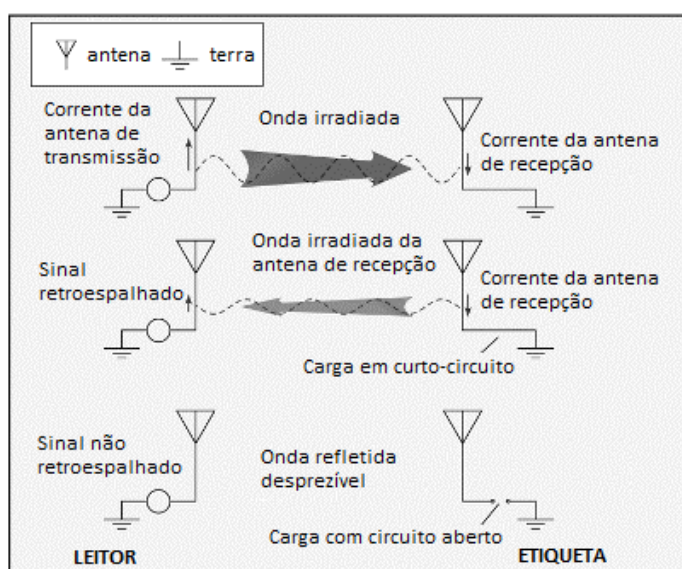


Figura 2.11: Modulação por retroespalhamento (Adaptado de [36]).

Pode-se concluir, portanto, que o sinal transmitido pela etiqueta é sensível à carga na qual a antena da etiqueta está conectada. A variação da sua impedância permite alterar o coeficiente de reflexão da antena de acordo com os dados a serem transmitidos.

Uma das formas de variar essa impedância é conectar um transistor aos terminais da antena da etiqueta de modo a permitir que o *microchip* seja capaz de modular o retroespalhamento, como ilustrado na figura 2.12.

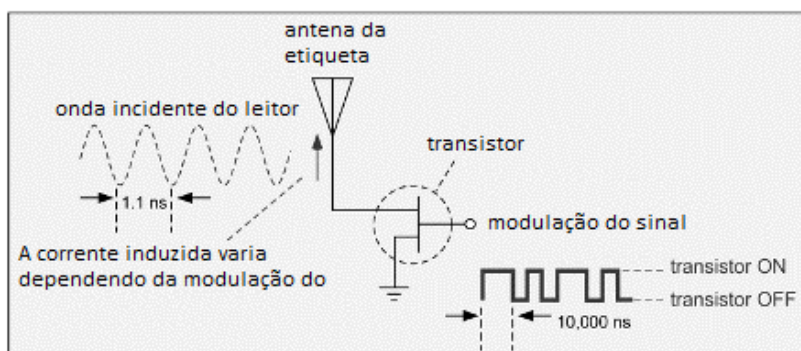


Figura 2.12: Modulação utilizando transistor (Adaptado de [36]).

Quando o contato do *gate* do transistor é mantido no potencial apropriado para ativá-lo, a corrente flui facilmente através do canal (semelhante a um curto-circuito) e a etiqueta irá retroespalhar o sinal que poderá ser identificado pelo leitor como o nível lógico “1”. Quando o *gate* está desativado, o canal torna-se praticamente um não condutor e nenhum sinal será transmitido pela etiqueta. Este comportamento poderá ser interpretado como o nível lógico “0”. Assim, desde que a corrente seja induzida nos terminais da antena da etiqueta, a onda retroespalhada poderá ser modulada pelo *microchip* e captada de volta pelo leitor (modulação por retroespalhamento).

No enlace reverso, as etiquetas devem retroespalhar seus sinais utilizando um formato fixo de modulação (ASK ou PSK), de codificação dos dados (FM0 ou Miller) e de taxa de transmissão dados. O leitor é responsável por especificar, enviando no sinal de consulta, o preâmbulo de inicialização que especifica o formato de transmissão a ser adotado pelas etiquetas [92, 95].

2.2.4. Interferências sobre os sinais

Um dos grandes desafios na operação dos sistemas RFID UHF passivos decorre da variedade de ambientes, materiais, componentes do próprio sistema e processos operacionais relacionados. Questões como o posicionamento e a orientação das etiquetas, o processo no qual o sistema irá operar, o alcance de leitura, o momento e o local de ativação das etiquetas, devem ser estritamente analisados durante a etapa de implantação [77, 87, 97].

Em geral, o mau funcionamento dos sistemas RFID UHF passivos está associado às interferências que podem degradar as formas de onda dos sinais captados e, conseqüentemente, causar perdas de dados, recebimentos incorretos ou a necessidade de retransmissão [98]. Dentre os principais fatores que influenciam a ocorrência de interferências sobre os sinais RFID UHF transmitidos, destacam-se:

- Múltiplos dispositivos transmitindo em UHF: como múltiplas tecnologias de radiofrequência podem coexistir próximas umas das outras, os dispositivos que operam na mesma faixa e que transmitem sinais simultaneamente através do mesmo meio podem interferir uns sob os outros [38];
- Sensibilidade à composição dos objetos: objetos constituídos por metais e fluídos tendem a refletir ou absorver os sinais transmitidos pelas etiquetas reduzindo a precisão e o alcance de leitura. Etiquetas utilizando encapsulamentos especiais podem contornar esse problema de modo que automóveis, vagões de trens e contêineres, por exemplo, possam ser identificados pelo leitor [18, 77];
- Obstáculos próximos ao leitor e etiquetas: os sinais UHF transmitidos em um ambiente real podem sofrer múltiplas reflexões, difrações, absorções e espalhamentos sobre vários obstáculos (como móveis, piso, parede, etc.) causando o efeito multipercurso [31, 99, 100]. Devido à variedade de percursos com vários comprimentos, essas ondas replicadas são capazes de alcançar a antena do leitor com menor potência e em diferentes intervalos de tempos. Como resultado, as ondas multipercurso podem interferir destrutivamente sobre os sinais captados.
- Ruído: sinais aleatórios e imprevisíveis provocados por motores, luzes fluorescentes e equipamentos digitais, por exemplo, que podem interferir sobre as características de um determinado sinal transmitido [77, 80, 101].

Outros fatores, inerentes à própria operação dos sistemas RFID UHF passivos, também podem influenciar a ocorrência de interferências. Os autores em [18, 30, 102–104] descrevem três tipos principais:

- Interferência entre etiquetas: ocorre quando o leitor transmite um comando para as etiquetas e, em seguida, duas ou mais etiquetas respondem simultaneamente no mesmo canal e ao mesmo tempo. A colisão entre sinais impede que o leitor decodifique os dados corretamente prejudicando o desempenho do processo de identificação;
- Interferência entre leitor e etiquetas: ocorre quando uma etiqueta está localizada na região de intersecção entre duas ou mais zonas de interrogação e os leitores tentam acessar a mesma etiqueta simultaneamente. Mesmo que os leitores operem em frequências diferentes, a etiqueta é incapaz de processar várias informações ao mesmo tempo. Conseqüentemente, a resposta da etiqueta tornar-se-á arbitrária e o processo de identificação resultará em erro;
- Interferência entre leitores: ocorre quando os sinais transmitidos por um leitor de maior potência mascara ou impede a comunicação de um leitor vizinho, de menor potência, que utiliza a mesma frequência de operação. Esse tipo de interferência afeta a capacidade do leitor de menor potência em decodificar os sinais captados e, portanto, degrada o desempenho do processo de identificação.

A utilização de algoritmos anticolisão tem o propósito de controlar o processo de identificação e mitigar a ocorrência de interferências entre etiquetas. Esse assunto será abordado com mais detalhes nos próximos Capítulos.

Capítulo 3. RESOLUÇÃO DAS COLISÕES

Um dos principais desafios em sistemas RFID UHF passivos é mitigar as colisões que ocorrem durante o processo de identificação. Mais precisamente, quando duas ou mais etiquetas transmitem simultaneamente em uma mesma frequência e no mesmo canal, os sinais transmitidos interferem-se uns sobre os outros e os dados captados não são corretamente decodificados pelo leitor. Nestes casos, protocolos de múltiplo acesso são adotados com objetivo de permitir que múltiplas comunicações coexistam em um mesmo canal com pouca interferência [105, 106].

Devido às limitações de energia e de capacidade de processamento das etiquetas passivas, os protocolos de acesso baseados em TDMA são especificados para o compartilhamento dos recursos de comunicação em sistemas RFID UHF passivos [107–109]. Dentre os protocolos TDMA existentes, os protocolos orientados pelo leitor são aplicados em sistemas RFID passivos em razão de suas operações síncronas de comunicação do tipo leitor-fala-primeiro. Nestes protocolos, o recurso de comunicação (no caso o leitor) tem a função de disponibilizar intervalos de tempo fixos (denominados *slots*) para captura das respostas transmitidas pelos inúmeros transmissores independentes (no caso as etiquetas) [23].

Os estados dos *slots* captados pelo leitor estão diretamente associados ao desempenho do processo de identificação. Atrasos de tempo causados pela ausência de resposta das etiquetas (*slots* ociosos) ou quando duas ou mais etiquetas ocupam simultaneamente o mesmo intervalo para transmitir (*slots* colididos) incrementam o tempo de identificação e o consumo de energia dispendido (maior quantidade de sinais RFID retransmitidos) [29, 76, 110].

A fim de aumentar o aproveitamento dos recursos disponíveis, algoritmos anticolisão são empregados com a função de gerenciar a comunicação entre leitor e etiquetas. De acordo com o modo de disponibilização dos *slots*, é possível dividir os algoritmos anticolisão TDMA em duas categoriais principais: os algoritmos determinísticos e os probabilísticos [107, 109]. Em razão do escopo definido nesta tese, os algoritmos probabilísticos serão tratados com maiores detalhes nas próximas seções.

3.1. Algoritmos probabilísticos

Os algoritmos probabilísticos baseados em ALOHA permitem o agendamento das respostas das etiquetas em tempos aleatórios ocasionando uma baixa probabilidade de colisões [20, 81]. Nestes algoritmos, cada etiqueta seleciona ocupar, de forma independente e aleatória, um determinado *slot* de tempo para transmitir. Ao final da leitura do *slot*, se não for detectada a ocorrência de uma colisão, o leitor decodificará a resposta da etiqueta, transmitirá o comando de reconhecimento de volta e identificará a ID transmitida. Caso contrário, o leitor transmitirá o comando de não reconhecimento causando a retransmissão das etiquetas colididas em novos *slots* aleatórios a serem selecionados.

A probabilidade de ocorrência de colisões pode torna-se relativamente alta se a quantidade de *slots* disponíveis for significativamente menor do que a quantidade de etiquetas a serem lidas. Por outro lado, o tempo de ociosidade do leitor pode torna-se demasiadamente alto se a quantidade de *slots* for expressivamente maior do que a quantidade de etiquetas. Na literatura, é possível encontrar uma grande variedade de algoritmos probabilísticos que gerenciam a quantidade de *slots* disponíveis. Dentre as versões mais comuns, destacam-se os algoritmos *Framed Slotted ALOHA* (FSA) [73, 77, 109].

A principal característica dos algoritmos FSA é adotar uma quantidade fixa de *slots* denominada quadro. A quantidade de *slots* disponíveis em cada quadro define o tamanho do quadro. Nestes algoritmos, a ocorrência de colisões é mitigada uma vez que somente é permitido à etiqueta ocupar apenas um dos *slots* contido em cada um dos quadros enviados pelo leitor.

Sendo assim, o processo de identificação utilizando o algoritmo FSA inicia quando o leitor energiza todas as etiquetas na zona de interrogação e, em seguida, transmite o comando de consulta *Query* contendo o tamanho do quadro inicial previamente configurado [92, 111]. Após capturar o sinal de consulta, as etiquetas entram em modo de resposta e geram um número aleatório de 16 bits (RN16) que será transmitido para o leitor. Cada etiqueta seleciona ocupar aleatoriamente um dos *slots* disponíveis e aguarda o momento de transmitir. As etiquetas que selecionam o *slot* 0 (zero) transmitem imediatamente. As etiquetas que selecionam *slots* diferente de 0 (zero) aguardam o envio do comando *QueryRep* que decreta o *slot* escolhido em uma unidade.

Se uma única etiqueta transmitir dentro do *slot*, ou seja, se o *slot* for ocupado por uma única etiqueta, então o leitor é capaz de decodificar o código RN16 transmitido e enviar de volta o sinal positivo de reconhecimento (*acknowledgment response*, ACK) anexado ao código RN16 decodificado. Após a etiqueta receber a mensagem ACK+RN16 destinada, o enlace de comunicação reverso é estabelecido e a etiqueta responde de volta ao leitor transmitindo o seu ponto de controle PC e identificação única ID; ambos protegidos por um código CRC de 16 bits [112]. Todavia, se a ID não for corretamente decodificada pelo leitor, então um sinal negativo de reconhecimento (*not acknowledgment response*, NACK) é enviado e a etiqueta deverá selecionar um novo *slot* para retransmitir. Na figura 3.1(a) é ilustrado o fluxo de sinais RFID transmitidos durante a leitura do *slot* lido com sucesso.

Uma vez identificada a etiqueta, o leitor pode decidir dá continuidade à leitura do próximo *slot*, transmitindo o comando *QueryRep* e sinalizando o fim da leitura do *slot* atual (a etiqueta identificada define seu marcador inventariado como verdadeiro) ou executar operações específicas de acesso à etiqueta como escrita, bloqueio, parametrização ou leitura do banco de memória do usuário, por exemplo.

Se duas ou mais etiquetas transmitirem dentro do mesmo *slot*, o leitor identificará uma colisão e transmitirá o sinal NACK. As etiquetas colididas deverão então retransmitir no próximo intervalo de consulta (também denominado rodada de inventário) no qual o leitor disponibilizará um novo quadro para novas seleções dos *slots*. Desse modo, o processo de identificação segue realizando sucessivas rodadas de inventários até que todas as etiquetas sejam identificadas. Na figura 3.1(b) é ilustrado o fluxo de sinais RFID transmitidos durante a leitura do *slot* colidido.

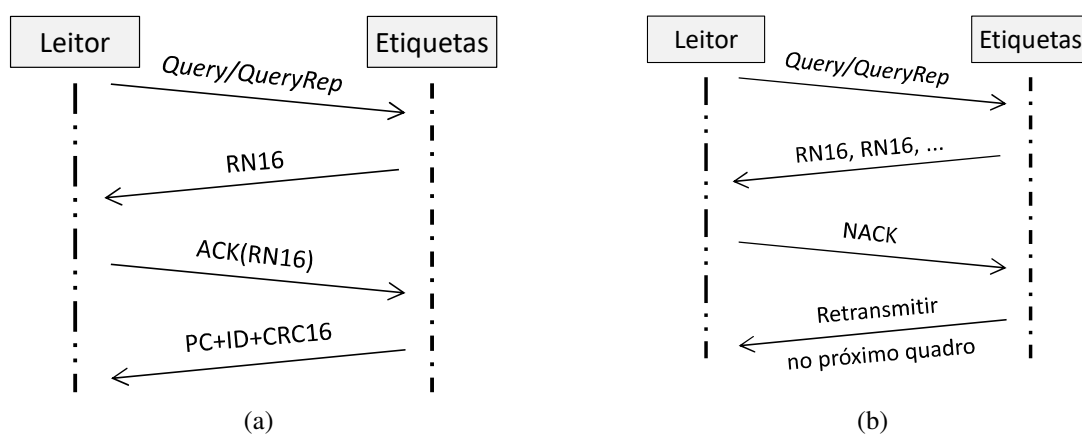


Figura 3.1: Fluxo de sinais RFID: (a) *slot* lido e (b) *slot* colidido (Adaptado de [92, 112, 113]).

Tendo em vista que os algoritmos FSA preestabelecem um tamanho fixo para todos os quadros, observa-se que o desempenho de identificação desses algoritmos está diretamente condicionado à quantidade de etiquetas a serem lidas. Assim, se a quantidade de etiquetas for menor que o tamanho do quadro, então ocorrerá uma grande quantidade de *slots* ociosos. Por outro lado, se a quantidade de etiquetas for maior do que o tamanho do quadro, então ocorrerá uma grande quantidade de *slots* colididos.

Com o propósito de aumentar o desempenho dos algoritmos FSA, os algoritmos *Dynamic Framed Slotted ALOHA* (DFSA) foram desenvolvidos com a função de ajustar dinamicamente a quantidade de *slots* disponíveis em cada quadro subsequente [27, 114]. Utilizando o comando *QueryAdjust*, o leitor transmite um novo tamanho de quadro e as etiquetas selecionam novos *slots* para ocupar. Logo, se existir uma grande quantidade de etiquetas a serem lidas, o tamanho do quadro irá aumentar, caso contrário, irá diminuir.

A fim de calcular o tamanho ótimo para o quadro, admite-se o seguinte modelo probabilístico baseado no sistema RFID UHF passivo estudado [111, 115, 116]. Seja um experimento aleatório Ψ que consiste em selecionar a ocupação ou não de um determinado *slot* por uma etiqueta, é possível atribuir um espaço amostral \mathbf{R} contendo os possíveis resultados de Ψ , ou seja, $\mathbf{R} = \{\textit{slot ocupado}, \textit{slot não ocupado}\}$. Considerando uma variável aleatória discreta I que assume o valor 1 para indicar a ocupação do *slot* e 0 caso contrário, representa-se a função probabilidade de I por uma distribuição de Bernoulli dada por

$$I = \begin{cases} 1, & \text{com } \Pr[I = 1] = p \text{ (sucesso)} \\ 0, & \text{com } \Pr[I = 0] = 1 - p \text{ (fracasso)} \end{cases} \quad (3.1)$$

Expandindo o experimento Ψ em n realizações independentes e identicamente distribuídas (i.i.d.) de I , ou seja, uma realização de ocupação ou não para cada uma das n etiquetas que irão transmitir, define-se então uma variável aleatória R para descrever a quantidade r de etiquetas que ocupam esse *slot* do quadro. Assim, a função probabilidade de R pode ser representada por uma distribuição Binomial do tipo

$$\Pr[R = r] = \binom{n}{r} p^r \cdot (1 - p)^{n-r}, \text{ com } r = 0, 1, \dots, n \quad (3.2)$$

Partindo da equação (3.2), é possível expressar a probabilidade de ocorrência para os três possíveis estados do *slot*: *slot* vazio (nenhuma etiqueta ocupa o *slot*), r_0 , *slot* lido com sucesso (uma etiqueta ocupa o *slot*), r_1 , ou *slot* colidido (duas ou mais etiquetas ocupam o *slot*), r_k , respectivamente, como

$$r_0 = \Pr[R = 0] = (1 - p)^n \quad (3.3)$$

$$r_1 = \Pr[R = 1] = n \cdot p(1 - p)^{n-1} \quad (3.4)$$

$$r_k = \Pr[R \geq 2] = 1 - (1 - p)^n - n \cdot p(1 - p)^{n-1} \quad (3.5)$$

Expandindo o modelo Binomial por um modelo de distribuição Multinomial onde as realizações de R sejam independentes e repetidas para uma quantidade f de *slots* contidos no quadro; é possível então considerar, como simplificação do modelo, que n é constante em todas as realizações de modo que os três possíveis resultados r_0 , r_1 e r_k possuam probabilidades $r_0, r_1, r_k \geq 0$ e $r_0 + r_1 + r_k = 1$.

Assumindo as variáveis aleatórias M_0, M_1 e M_k para representar a quantidade de vezes que os *slots* ociosos, lidos com sucesso e colididos, respectivamente, são observados dentro do quadro, então o vetor $\langle M_0 \ M_1 \ M_k \rangle$ segue uma distribuição Multinomial com parâmetros f e $\langle r_0 \ r_1 \ r_k \rangle$ tendo distribuição de probabilidade definida por

$$\Pr[M_0=c_0, M_1=c_1, M_k=c_k] = \frac{f!}{c_0!c_1!c_k!} r_0^{c_0} r_1^{c_1} r_k^{c_k} \quad (3.6)$$

onde c_0, c_1 e c_k representam, respectivamente, a quantidade de *slots* ociosos, lidos com sucesso e colididos observados no quadro.

Uma vez que M_1 quantifica o total de *slots* no quadro ocupados por uma única etiqueta, então é possível definir uma variável aleatória Z_1 que assume o valor 1 para indicar a ocupação do *slot* por uma única etiqueta com $\Pr[Z_1 = 1] = r_1$ e 0 com $\Pr[Z_1 = 0] = 1 - r_1$ para os demais casos. Assim, é possível representar M_1 como

$$M_1 = \sum_{j=1}^f Z_1(j) \quad (3.7)$$

e calcular o valor esperado de M_1 como

$$\mathbb{E}[M_1] = \mathbb{E} \left[\sum_{j=1}^f Z_1(j) \right] \quad (3.8)$$

Sendo $\mathbb{E}[\cdot]$ um operador linear, então

$$\mathbb{E}[M_1] = \sum_{j=1}^f \mathbb{E}[Z_1(j)] \quad (3.9)$$

$$\mathbb{E}[M_1] = \sum_{j=1}^f (1 \cdot \Pr[Z_1(j) = 1] + 0 \cdot \Pr[Z_1(j) = 0]) \quad (3.10)$$

$$\mathbb{E}[M_1] = \sum_{j=1}^f (\Pr[Z_1(j) = 1]) \quad (3.11)$$

$$\mathbb{E}[M_1] = f \cdot r_1 \quad (3.12)$$

Da equação (3.4) tem-se $r_1 = n \cdot p(1 - p)^{n-1}$, então

$$\mathbb{E}[M_1] = f \cdot [n \cdot p(1 - p)^{n-1}] \quad (3.13)$$

Assumindo que os *slots* são uniformemente selecionados pelas etiquetas, ou seja, $p = 1/f$, então

$$\mathbb{E}[M_1] = f \cdot \left[n \frac{1}{f} \left(1 - \frac{1}{f} \right)^{n-1} \right] \quad (3.14)$$

Simplificando f ,

$$\mathbb{E}[M_1] = n \left(1 - \frac{1}{f} \right)^{n-1} \quad (3.15)$$

e retornando novamente (3.15) em função de p ,

$$\mathbb{E}[M_1] = n \cdot (1 - p)^{n-1} \quad (3.16)$$

Define-se taxa de transferência do quadro (ou eficiência do quadro), Th_f , como a razão entre a quantidade de *slots* lidos com sucesso (ou seja, a quantidade de *slots* ocupados por uma única etiqueta), c_1 , e a quantidade f de *slots* no quadro,

$$Th_f = \frac{c_1}{f} \quad (3.17)$$

então o valor esperado de Th_f , $\mathbb{E}(Th_f)$, pode ser calculado assumindo a existência de uma quantidade suficientemente grande de etiquetas selecionando ocupar cada um dos *slots* de modo a aproximar $c_1 \approx \mathbb{E}(M_1)$. Assim, calcula-se $\mathbb{E}(Th_f)$ de (3.15) e (3.17) como

$$\mathbb{E}(Th_f) = \frac{1}{f} \cdot n \cdot \left(1 - \frac{1}{f} \right)^{n-1} \quad (3.18)$$

ou em função de p ,

$$\mathbb{E}(Th_f) = p \cdot n \cdot (1 - p)^{n-1} \quad (3.19)$$

Uma vez que a equação (3.18) relaciona as variáveis *slots* e etiquetas, é possível ilustrar na figura 3.2 as curvas de $\mathbb{E}(Th_f)$ para os tamanhos f fixos em 64, 128 e 256 *slots* e as quantidades de n entre 1 e 1.024 etiquetas.

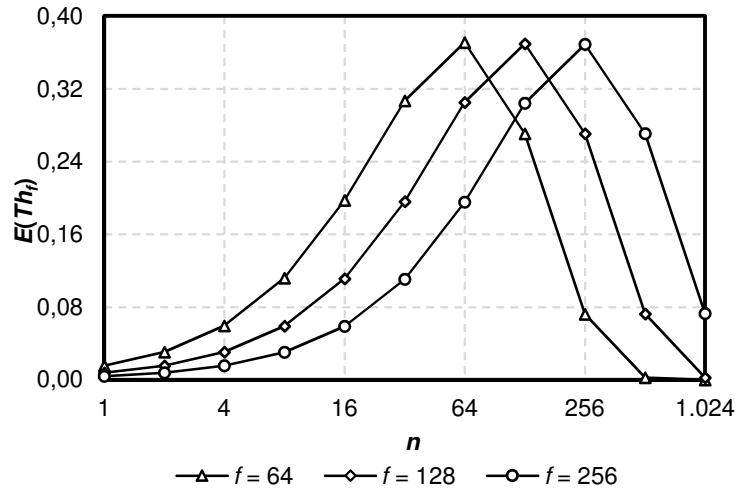


Figura 3.2: Taxa de transferência em função do tamanho do quadro.

Pode-se observar nas curvas que os valores esperados de Th_f crescem, atingem o seu valor máximo e decrescem à medida que a quantidade de etiquetas aumenta. Considerando o formato côncavo para baixo verificado nas três curvas, determina-se o valor $\mathbb{E}(Th_f)$ máximo teórico derivando a equação (3.19) em função de p e igualando seu resultado à zero, ou seja,

$$\frac{d\mathbb{E}(Th_f)}{dp} = n(1-p)^{n-1} - n(n-1)p(1-p)^{n-2} = 0 \quad (3.20)$$

$$-n(n-1)p(1-p)^{n-2} = -n(1-p)^{n-1} \quad (3.21)$$

$$(n-1)p = \frac{(1-p)^{n-1}}{(1-p)^{n-2}} \quad (3.22)$$

$$(n-1)p = (1-p)^1 \quad (3.23)$$

$$n \cdot p - p = 1 - p \quad (3.24)$$

$$n = \frac{1}{p} \quad (3.25)$$

uma vez que $p = 1/f$, tem-se

$$n = f \tag{3.26}$$

Portanto, resguardadas as devidas simplificações realizadas em (3.6) e (3.18), conclui-se que $\mathbb{E}(Th_f)$ será máximo quando o tamanho do quadro (ou seja, a quantidade de *slots* disponíveis) for igual à quantidade de etiquetas n que ocuparão esses *slots* para transmitir [50, 115, 117]. Logo, o valor esperado da taxa de transferência do sistema será máximo quando cada quadro i operar com sua máxima eficiência, ou seja, $n(i) = f(i)$.

De acordo com a forma de ajuste nos tamanhos dos quadros, os algoritmos DFSA podem ser classificados em duas grandes categorias: os algoritmos baseados em potência de 2 e os algoritmos baseados em estimativas.

3.1.1. DFSA baseados em potência de 2

Os algoritmos DFSA baseados em potência de 2 ajustam os tamanhos dos quadros subsequentes a partir de um expoente de valor inteiro na base 2. Nestes algoritmos, não há obrigatoriedade de leitura completa do quadro, ou seja, a leitura dos *slots* pode ser interrompida enviando um novo quadro com tamanho ajustado (leitura do tipo *slot by slot* [118]). Destaca-se o Algoritmo Q, especificado na norma EPC C1 Gen2 [92], como exemplo.

Funcionalmente, o Algoritmo Q adota uma variável flutuante Q_{fp} , calculada em função dos estados dos *slots* observados, e uma variável inteira $Q(i)$, ajustada para definir a quantidade de *slots* disponíveis no quadro i . Assim, o leitor inicia o processo de identificação com o valor inicial Q_{fp} preestabelecido e define $Q(0) = \text{round}(Q_{fp})$ calculando o tamanho do quadro inicial como $f(0) = 2^{Q(0)}$ (a operação $\text{round}()$ arredonda Q_{fp} para o valor mais próximo em \mathbb{Z}^+). Em seguida, cada etiqueta seleciona ocupar aleatoriamente um dos *slots* entre 0 e $2^{Q(0)} - 1$ e aguarda para transmitir. Ao final da leitura de cada *slot*, a variável Q_{fp} é incrementada por um valor c na ocorrência de um *slot* colidido e decrementada pelo mesmo valor sempre quando um *slot* vazio for detectado. Na ocorrência de *slots* lidos com sucesso, o valor Q_{fp} não modifica. Sempre que $Q(i) \neq \text{round}(Q_{fp})$, então a variável $Q(i)$ é atualizada e um novo quadro subsequente é imediatamente iniciado com tamanho $2^{Q(i)}$.

Atingida a leitura completa de todos os *slots* no quadro e não sendo observada a ocorrência de *slots* colididos (ou seja, não há retransmissões de etiquetas colididas, pois todas já foram identificadas), o processo de identificação é finalizado. Na figura 3.3 é ilustrado o fluxograma do Algoritmo Q e os ajustes das variáveis Q e Q_{fp} .

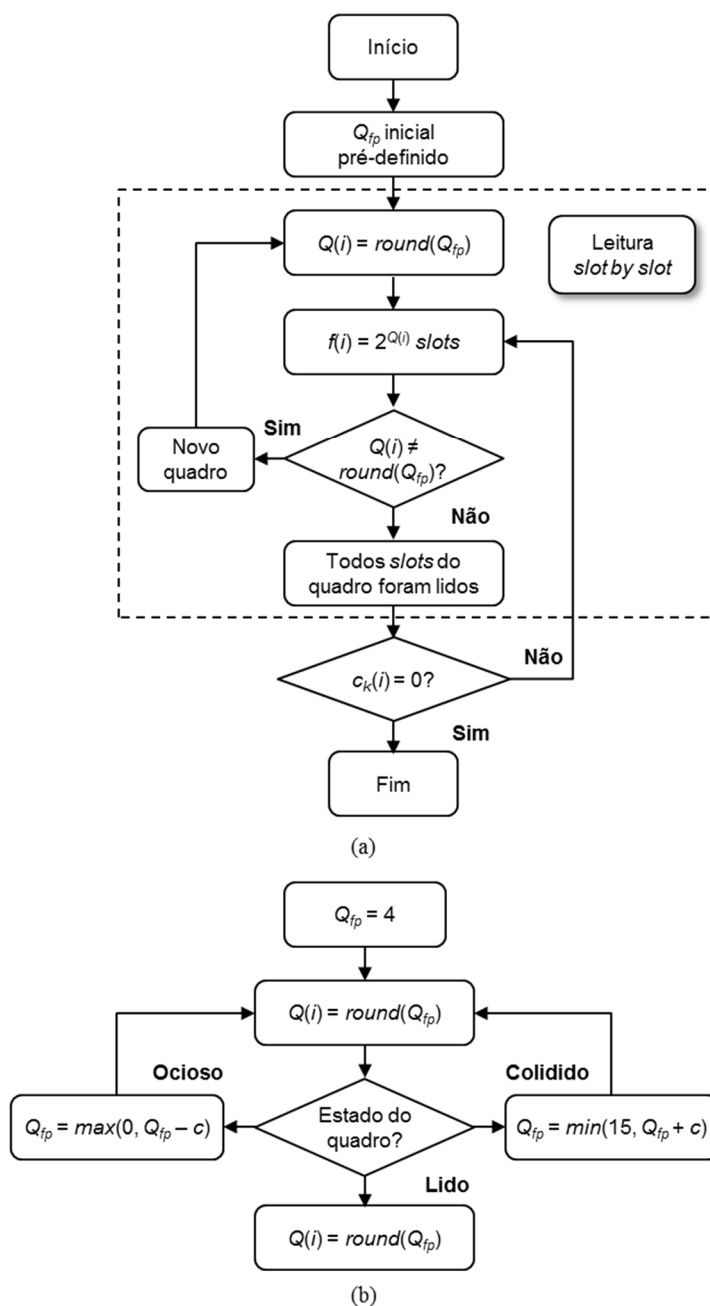


Figura 3.3: Fluxograma do Algoritmo Q: (a) processo e (b) atualização de Q e Q_{fp} [11].

O padrão EPC C1 Gen2 especifica o valor inicial $Q_{fp} = 4$ com variação limitada ao intervalo entre 0 e 15. No caso da variável c , a norma somente recomenda valores típicos entre 0,1 e 0,5. Neste sentido, para fins de simulação, adotam-se os valores propostos em [162]: se $0 \leq Q \leq 2$ então $c = 0,5$, se $Q \geq 10$ então $c = 0,1$ senão $c = 1/Q$.

3.1.2. DFSA baseados em estimativas

Diferentemente dos algoritmos baseados em potência de 2, os algoritmos DFSA baseados em estimativas ajustam os tamanhos dos quadros subsequentes a partir de um estimador que calcula a quantidade de etiquetas que irão transmitir até o leitor (denominado *backlog*, n_b).

Sendo assim, o leitor inicia o processo de identificação com o tamanho do quadro inicial $f(0)$ preestabelecido e, ao final da leitura completa do quadro, o algoritmo ajusta o tamanho do quadro subsequente, $f(i + 1)$, a partir de uma estimativa $n_b(i)$ calculada em função da quantidade de *slots* ociosos, lidos e colididos observados [114, 118]. Sucessivos quadros são dinamicamente ajustados e lidos até que não seja observada a ocorrência de *slots* colididos (ou seja, não há retransmissões de etiquetas colididas, pois todas foram identificadas). O fluxograma dos algoritmos DFSA baseados em estimativas é ilustrado na figura 3.4.

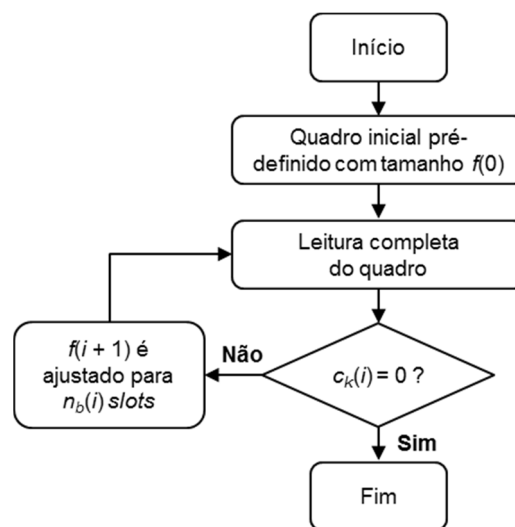


Figura 3.4: Fluxograma dos algoritmos DFSA baseados em estimativas [16].

Na literatura, é possível encontrar uma grande variedade de estimadores de *backlog* que se propõem a alcançar uma alta precisão no cálculo de $n_b(i)$ com o menor dispêndio dos recursos disponíveis. Nesta seção, será apresentado o estado da arte para os principais estimadores de *backlog* utilizados em algoritmos DFSA.

a) Schoute (1983)

Após uma extensa análise sobre a estabilidade dos algoritmos DFSA em sistemas de telecomunicações móveis, Schoute idealiza o modelo estudado igualando, *a priori*, o tamanho do quadro inicial à quantidade de etiquetas a serem lidas e aproximando o processo de ocupação do *slot* por uma distribuição de Poisson com intensidade $\lambda = 1$ (ocupação/*slot*) [16, 119].

Com o propósito calcular, *a posteriori*, a estimativa do *backlog* baseada nos estados dos *slots* captados, admite-se uma variável aleatória S para descrever a quantidade s de etiquetas que selecionam ocupar um determinado *slot* no quadro. A função probabilidade de S pode ser representada como

$$\Pr[S = s] = p_s = e^{-1} \cdot \frac{1}{s!} \quad (3.27)$$

Se o estado do *slot* observado for colidido, então é possível concluir que pelo menos duas ou mais etiquetas ocupam esse mesmo *slot*. Sendo assim, define-se uma variável aleatória C para representar a quantidade de etiquetas que ocupam um determinado *slot* colidido com função probabilidade p_s^c dada por

$$\Pr[C = s | \text{slot colidido}] = p_s^c = \begin{cases} 0 & \text{se } s = 0 \\ 0 & \text{se } s = 1 \\ \frac{p_s}{1 - p_0 - p_1} & \text{se } s \geq 2 \end{cases} \quad (3.28)$$

onde $p_0 = e^{-1} \cdot \frac{1}{0!} = e^{-1}$ e $p_1 = e^{-1} \cdot \frac{1}{1!} = e^{-1}$. O valor médio $\mathbb{E}[C]$ de etiquetas que selecionam ocupar um determinado *slot* colidido é calculado como

$$\mathbb{E}[C] = \sum_{j=0}^{\infty} s_j \cdot p_j^c = \frac{\sum_{j=2}^{\infty} e^{-1} \cdot \frac{1}{(j-1)!}}{1 - e^{-1} - e^{-1}} \quad (3.29)$$

Uma vez que $\sum_{j=2}^{\infty} \frac{1}{(j-1)!} = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j!} = e - 1$, então:

$$\mathbb{E}[C] = \frac{e^{-1} \cdot (e - 1)}{e^{-1}(e - 2)} = \frac{e - 1}{e - 2} \approx 2,39 \quad (3.30)$$

O valor 2,39 significa que se uma grande quantidade de etiquetas seleciona ocupar ou não um determinado *slot* colidido e, em seguida, for calculada a média aritmética de etiquetas que ocupam esse *slot*, então é esperado que essa média se aproxime de 2,39. A partir desse resultado, Schoute estima o *backlog* como

$$n_b(i) = 2,39 \cdot c_k(i) \quad (3.31)$$

onde $c_k(i)$ representa a quantidade de *slots* colididos no quadro i .

Como o tamanho do quadro deve ser um valor inteiro, então $n_b(i)$ deve ser arredondado para um valor próximo em \mathbb{Z}^+ . O estimador de Schoute é simples de implementar, possui boa precisão e baixo custo computacional [166]. Todavia, o máximo desempenho do estimador somente é alcançado se o modelo de ocupação dos *slots* realmente aproximar-se de uma distribuição de Poisson com intensidade próxima a $\lambda = 1$ [160, 165].

b) Vogt (2002)

Vogt propôs dois algoritmos estimadores de *backlog*. O primeiro, conhecido como estimador Limite Inferior (ou Vogt I) adota a premissa que, na ocorrência de uma colisão, pelo menos duas etiquetas transmitem simultaneamente dentro do mesmo *slot* [39, 120]. Sendo assim, é possível estimar a quantidade de etiquetas que transmitirão no quadro subsequente como

$$n_b(i) = 2 \cdot c_k(i) \quad (3.32)$$

O estimador Limite Inferior é considerado uma aproximação grosseira para o *backlog*, pois sempre aproxima a estimativa em direção à quantidade mínima possível de etiquetas dentro de uma gama de possibilidades.

O segundo estimador, denominado Vogt ou Vogt II, baseia-se na função estimativa $d(i)$ que minimiza recursivamente a norma Euclidiana entre os resultados observados para o quadro atual e os seus respectivos valores esperados,

$$d(i) = \min_{n_t(i)} \left\| \begin{pmatrix} c_0(i) \\ c_1(i) \\ c_k(i) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} a_0(i) \\ a_1(i) \\ a_k(i) \end{pmatrix} \right\| \quad (3.33)$$

onde $\|\cdot\|$ é a norma Euclidiana e os vetores $\langle c_0(i) \ c_1(i) \ c_k(i) \rangle$ e $\langle a_0(i) \ a_1(i) \ a_k(i) \rangle$ representam, respectivamente, a quantidade de *slots* vazios, lidos com sucesso e colididos observados e esperados para o quadro atual i . O vetor $\langle a_0(i) \ a_1(i) \ a_k(i) \rangle$ é calculado em função da quantidade estimada de etiquetas transmitidas, $n_t(i)$, considerando o modelo probabilístico apresentado a seguir.

Seja o processo de ocupação de um determinado *slot* do quadro i por $n(i)$ etiquetas caracterizado por uma distribuição Binomial, define-se uma variável aleatória R para representar a quantidade r de etiquetas que ocupam esse *slot* com função probabilidade

$$\Pr[R = r] = \binom{n(i)}{r} p^r \cdot (1 - p)^{n(i)-r}, \text{ com } r = 0, 1, \dots, n(i) \quad (3.34)$$

É possível expressar a probabilidade de ocorrência para os três possíveis estados do *slot* vazio (nenhuma etiqueta ocupa o *slot*), r_0 , lido com sucesso (uma etiqueta ocupa o *slot*), r_1 , e colidido (duas ou mais etiquetas ocupam o *slot*), r_k , respectivamente, como mostrado anteriormente nas equações (3.3), (3.4) e (3.5).

Aproximando o modelo de distribuição Binomial por um modelo Multinomial onde $n(i)$ é assumido constante para todas as realizações de R em cada um dos $f(i)$ slots do quadro i com probabilidade uniforme $p = 1 / f(i)$, define-se então um vetor de variáveis aleatórias $\langle M_0 \ M_1 \ M_k \rangle$ para representar a quantidade de vezes que cada estado do slot é observado dentro do quadro como apresentado anteriormente na equação (3.6).

Uma vez que M_0 , M_1 e M_k quantificam a soma de todos os slots ociosos, lidos com sucesso e colididos, respectivamente, definem-se três variáveis aleatórias Z_0 , Z_1 e Z_k que indicam os slots ocupados por nenhuma etiqueta com $\Pr[Z_0 = 1] = r_0$, os slots ocupados por apenas uma etiqueta com $\Pr[Z_1 = 1] = r_1$ e os slots ocupados por duas ou mais etiquetas com $\Pr[Z_k = 1] = r_k$. Desse modo, pode-se representar M_0 , M_1 e M_k como

$$M_0 = \sum_{j=1}^{f(i)} Z_0(j) \quad (3.35)$$

$$M_1 = \sum_{j=1}^{f(i)} Z_1(j) \quad (3.36)$$

$$M_k = \sum_{j=1}^{f(i)} Z_k(j) \quad (3.37)$$

e calcular seus respectivos valores esperados como

$$a_0(i) = \mathbb{E}[M_0] = f(i) \left(1 - \frac{1}{f(i)}\right)^{n(i)} \quad (3.38)$$

$$a_1(i) = \mathbb{E}[M_1] = n(i) \left(1 - \frac{1}{f(i)}\right)^{n(i)-1} \quad (3.39)$$

$$a_k(i) = \mathbb{E}[M_k] = f(i) \left[1 - \left(1 - \frac{1}{f(i)}\right)^{n(i)} - n(i) \frac{1}{f(i)} \left(1 - \frac{1}{f(i)}\right)^{n(i)-1} \right] \quad (3.40)$$

Haja vista que os valores médios das equações (3.38), (3.39) e (3.40) estão definidos em função de $f(i)$ (conhecido) e de $n(i)$ (desconhecido), incrementa-se recursivamente a estimativa de $n(i)$, denotado por $n_t(i)$, até obter o valor mínimo de $d(i)$. Ao final, o *backlog* é calculado como

$$n_b(i) = n_t(i) - c_1(i) \quad (3.41)$$

onde $n_t(i)$ representa a quantidade estimada de etiquetas transmitidas no quadro i .

Vogt declara ainda que a estimativa de $n_b(i)$ obtida a partir da minimização de $d(i)$ não deve ser realizada quando a quantidade de *slots* colididos é igual ao tamanho do quadro. Neste caso, Vogt recomenda utilizar o estimador Limite Inferior.

Para uma grande quantidade de etiquetas, o estimador Vogt é mais preciso que o Schoute e o Limite Inferior, todavia, é mais complexo e requer um maior custo computacional. Simulações numéricas apresentadas em [150] demonstram estimativas mais precisas quando a quantidade de etiquetas a serem lidas encontra-se no intervalo $[c_1(i) + 2c_k(i), 2c_1(i) + 4c_k(i)]$.

c) Eom e Lee (2010)

Os autores Eom e Lee [121] assumem que o tamanho do quadro $f(i)$ é definido pela quantidade de etiquetas que ocupam os *slots*, $n(i)$, multiplicado pelo fator proporcional β a ser determinado, ou seja,

$$f(i) = n(i) \cdot \beta \quad (3.42)$$

Quando uma colisão ocorre, assume-se que a quantidade de etiquetas transmitidas no *slot* colidido é γ . Assim, a estimativa do *backlog* para o quadro subsequente é dada por

$$n_b(i) = n(i) - c_1(i) = \gamma \cdot c_k(i) \quad (3.43)$$

Seja o modelo de ocupação de um determinado *slot* por r etiquetas representado por uma distribuição Binomial com probabilidade $p = 1 / f(i)$, define-se uma variável aleatória R para descrever a quantidade r de etiquetas que ocupam esse *slot* com função probabilidade

$$\Pr[R = r] = \binom{n(i)}{r} p^r \cdot (1 - p)^{n(i)-r}, \text{ com } r = 0, 1, \dots, n(i) \quad (3.44)$$

com $r = 0, 1, \dots, n(i)$. Assumindo $f(i)$ suficientemente grande, então o modelo Binomial pode ser aproximado por uma distribuição de Poisson com média $n(i) / f(i)$. Neste caso, a probabilidade de nenhuma etiqueta ocupar o *slot*, r_0 , de apenas uma etiqueta ocupar o *slot*, r_1 , e de duas ou mais etiquetas ocuparem o *slot*, r_k , pode ser representada, respectivamente, como

$$r_0 = \Pr[R = 0] = \left(1 - \frac{1}{f(i)}\right)^{n(i)} \approx e^{-\frac{n(i)}{f(i)}} \quad (3.45)$$

$$r_1 = \Pr[R = 1] = n(i) \frac{1}{f(i)} \left(1 - \frac{1}{f(i)}\right)^{n(i)-1} \approx n(i) \frac{1}{f(i)} \left(\frac{f(i)}{f(i)-1}\right) e^{-\frac{n(i)}{f(i)}} \quad (3.46)$$

$$r_k = 1 - r_0 - r_1 \quad (3.47)$$

Aproximando o modelo de Poisson por um modelo de distribuição Multinomial onde $n(i)$ é assumido constante para todas as realizações de R em cada um dos $f(i)$ *slots* do quadro i , então é possível calcular os valores esperados de *slots* não ocupados, ocupados por uma etiqueta e ocupado por duas ou mais etiquetas, respectivamente, $b_0^{f(i),n(i)}$, $b_1^{f(i),n(i)}$ e $b_k^{f(i),n(i)}$ de modo semelhante ao realizado em (3.38) a (3.40), obtendo

$$b_0^{f(i),n(i)} = f(i) e^{-\frac{n(i)}{f(i)}} \quad (3.48)$$

$$b_1^{f(i),n(i)} = n(i) \left(\frac{f(i)}{f(i)-1}\right) e^{-\frac{n(i)}{f(i)}} \quad (3.49)$$

$$b_k^{f(i),n(i)} = f(i) \left[1 - e^{-\frac{n(i)}{f(i)}} - n(i) \frac{1}{f(i)} \left(\frac{f(i)}{f(i)-1}\right) e^{-\frac{n(i)}{f(i)}}\right] \quad (3.50)$$

Substituindo $c_1(i) \approx b_1^{f(i),n(i)}$ no lado esquerdo de (3.43), tem-se

$$n(i) - c_1(i) \approx n(i) - n(i) \left(\frac{f(i)}{f(i)-1} \right) e^{-\frac{n(i)}{f(i)}} \quad (3.51)$$

como f foi definido suficientemente grande, então $\left(\frac{f(i)}{f(i)-1} \right) \approx 1$, ou seja

$$n(i) - c_1(i) \approx n(i) \left(1 - e^{-\frac{1}{\beta}} \right) \quad (3.52)$$

onde $\beta = f(i) / n(i)$. Substituindo $c_k(i) \approx b_k^{f(i),n(i)}$ no lado direito de (3.43)

$$\gamma \cdot c_k(i) \approx \gamma \cdot f(i) \left[1 - e^{-\frac{n(i)}{f(i)}} - n(i) \frac{1}{f(i)} \left(\frac{f(i)}{f(i)-1} \right) e^{-\frac{n(i)}{f(i)}} \right] \quad (3.53)$$

simplificando em função de β ,

$$\gamma \cdot c_k(i) \approx \beta \cdot n(i) \left[1 - \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) e^{-\frac{1}{\beta}} \right] \quad (3.54)$$

Resolvendo (3.43), (3.52) e (3.54) em função de γ ,

$$\gamma = \frac{1 - e^{-\frac{1}{\beta}}}{\beta \left[1 - \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) e^{-\frac{1}{\beta}} \right]} \quad (3.55)$$

Uma vez que $c_1(i)$ e $c_k(i)$ podem ser observados a partir da leitura do quadro i com tamanho $f(i)$, então β pode ser calculado em função de (3.43) e (3.55)

$$f(i) = \beta \cdot n(i) = \beta \cdot [\gamma \cdot c_k(i) + c_1(i)] \quad (3.56)$$

e o *backlog* estimado como

$$n(i) = \gamma \cdot c_k(i) = \frac{1 - e^{-\frac{1}{\beta}}}{\beta \left[1 - \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) e^{-\frac{1}{\beta}} \right]} \cdot c_k(i) \quad (3.57)$$

Devido à complexidade de encontrar uma solução única para (3.57), os autores propõem o cálculo recursivo com j iterações para obter γ e β . Assim, tem-se,

$$\gamma(j) = \frac{1 - e^{-\frac{1}{\beta(j)}}}{\beta(j) \left[1 - \left(1 + \frac{1}{\beta(j)} \right) e^{-\frac{1}{\beta(j)}} \right]} \quad (3.58)$$

$$\beta(j) = \frac{f(i)}{\gamma(j-1) \cdot c_k(i) + c_1(i)} \quad (3.59)$$

No primeiro passo, adotam-se os valores iniciais $\beta(1) = \infty$ e $\gamma(1) = 2$ e, a cada passo j , é determinada uma nova aproximação para β e γ . Quando o módulo $|\gamma(j-1) - \gamma(j)|$ for menor que o limite ϵ_0 preestabelecido, o processo é encerrado imediatamente. Os valores $\gamma(j-1)$ e $\gamma(j)$ representam, respectivamente, a aproximação anterior e atual para o valor de γ . Partindo do resultado $\gamma(j)$ atingido, estima-se o *backlog* como

$$n_b(i) = \gamma(j) \cdot c_k(i) \quad (3.60)$$

Para fins de simulação, considera-se nesta tese o mesmo limite de parada definido pelos autores no artigo [169], ou seja, $\epsilon_0 = 0,001$.

d) Shakiba *et al.* (2014)

Shakiba *et al.* [110] propuseram estimar a quantidade de etiquetas utilizando a teoria do Paradoxo dos Aniversários. Em teoria da probabilidade, o Paradoxo dos Aniversários baseia-se na probabilidade de pelo menos duas pessoas possuírem o mesmo dia de aniversário dentro de um grupo selecionado com n pessoas. Esta teoria assume que cada dia do ano possui igual probabilidade de aniversário e que todos os aniversários são independentes.

Seja um grupo aleatório contendo $n - 1$ pessoas e que, em média, tal grupo possui d_{n-1} dias distintos de aniversários. Dado que uma nova pessoa foi adicionada a esse grupo, define-se uma variável aleatória A para representar a quantidade de dias distintos de aniversário após a inserção dessa pessoa. Sendo assim, a função probabilidade de A pode ser descrita como

$$A = \begin{cases} d_{n-1}, & \text{com } \Pr[A = d_{n-1}] = d_{n-1} / 365 \\ d_{n-1}+1, & \text{com } \Pr[A = d_{n-1}+1] = 1 - d_{n-1} / 365 \end{cases} \quad (3.61)$$

Desse modo, o valor médio de dias distintos, d_n , pode ser calculado como

$$d_n = \mathbb{E}[A] = \frac{d_{n-1}}{365} \cdot d_{n-1} + \left(1 - \frac{d_{n-1}}{365}\right) \cdot (d_{n-1} + 1) \quad (3.62)$$

$$d_n = \frac{(d_{n-1})^2}{365} + (d_{n-1} + 1) - \left[\frac{(d_{n-1})^2}{365} + \frac{d_{n-1}}{365}\right] \quad (3.63)$$

$$d_n = 1 + \alpha \cdot d_{n-1} \quad (3.64)$$

$$d_n = \frac{1 - \alpha^n}{1 - \alpha} \quad (3.65)$$

onde $\alpha = 1 - \frac{1}{d_n} = 1 - \frac{1}{365} = \frac{364}{365}$

Definindo m -aniversariantes como a quantidade m de pessoas em um grupo de n pessoas que compartilham o mesmo dia de aniversário, os autores calculam a média de m -aniversariantes no grupo. Em outras palavras, interessa-se saber a média de dias com exatamente m -aniversariantes. Adotando o mesmo procedimento anterior, o valor médio de m -aniversariantes em um grupo de n pessoas, g_m^n , pode ser obtido como

$$g_m^n = \frac{\alpha^n}{1 - \alpha} \binom{n}{m} \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha}\right)^m \quad (3.66)$$

A partir de (3.66), o valor médio de dias sem aniversariantes, g_0^n , e com somente um aniversariante, g_1^n , para um grupo selecionado aleatoriamente de n pessoas é dado por

$$g_0^n = \frac{\alpha^n}{1 - \alpha} \quad (3.67)$$

$$g_1^n = n \cdot \alpha^{n-1} \quad (3.68)$$

Desse modo, ao substituir as n pessoas pelas $n(i)$ etiquetas transmitidas e os d_n dias pelos $f(i)$ slots na demonstração acima, é possível aproximar $g_0^n \approx c_0(i)$ e calcular $n(i)$ aplicando o logaritmo em ambos os lados da equação (3.67),

$$\log[c_0(i)] = \frac{\log[\alpha^{n(i)}]}{\log[1 - \alpha]} \quad (3.69)$$

$$n(i) = \frac{\log[c_0(i)] \cdot \log[1 - \alpha]}{\log[\alpha]} \quad (3.70)$$

$$n(i) = \frac{\log[(1 - \alpha)c_0(i)]}{\log[\alpha]} \quad (3.71)$$

como $\alpha = 1 - 1/f(i)$, então

$$n(i) = \frac{\log \left[\frac{c_0(i)}{f(i)} \right]}{\log \left[1 - \frac{1}{f(i)} \right]} \quad (3.72)$$

Utilizando (3.72) é possível realizar uma estimativa para $n(i)$, denominada $n_e(i)$, e assim calcular o *backlog* para o quadro subsequente. Todavia, quando a quantidade de etiquetas transmitidas é muito grande, o valor de $c_0(i)$ tende a zero e o método de estimação falha. Neste caso, uma alternativa adotada é desenvolver (3.66) uma vez que $d_n \approx c_1(i) + c_k(i)$,

$$n_t(i) = \frac{\log[1 - (1 - \alpha)]d_n}{\log(\alpha)} \quad (3.73)$$

e estimar o *backlog* como

$$n_b(i) = n_t(i) - c_1(i) \quad (3.74)$$

Apesar da alta complexidade computacional exigida (requer operações utilizando frações e logaritmos), os autores concluem que o estimador Paradoxo dos Aniversários possui uma alta precisão na estimativa do *backlog* capaz de reduzir a quantidade de *slots* desperdiçados (*slots* colididos e ociosos) e aumentar a eficiência de uso do canal em 81% quando comparado ao estimador Limite Inferior [152].

e) Chen *et al.* (2017)

Neste trabalho, Chen propõe usar o método da máxima probabilidade *a posteriori* (*maximum a posteriori probability, MAP*) para estimar o *backlog* a partir da observação de subquadros contidos no quadro atual [111]. Denominado *Dynamic Sub-frame based MAP*, DS-MAP, o método desenvolvido utiliza tabelas pré-armazenadas para estimar o *backlog* ao invés de calculá-las diretamente no leitor. A estimativa da quantidade de etiquetas utiliza o método MAP modificado proposto em [122].

Seja o modelo de ocupação do *slot* por r etiquetas representado por uma distribuição Binomial dado por $n(i)$ experimentos de Bernoulli (ou seja, uma realização de ocupação ou não de um determinado *slot* para cada uma das $n(i)$ etiquetas que irão transmitir), define-se uma variável aleatória R para descrever a quantidade r de etiquetas que ocupam esse *slot* com função probabilidade dada por

$$\Pr[R = r] = \binom{n(i)}{r} p^r \cdot (1 - p)^{n(i)-r}, \text{ com } r = 0, 1, \dots, n(i) \quad (3.75)$$

A probabilidade de observar *slot* vazio (nenhuma etiqueta ocupa o *slot*), r_0 , *slot* lido com sucesso (uma etiqueta ocupa o *slot*), r_1 , ou *slot* colidido (duas ou mais etiquetas ocupam o *slot*), r_k , respectivamente, é dado como descrito em (3.3), (3.4) e (3.5).

Expandindo o modelo Binomial por um modelo Multinomial onde, neste caso, as realizações de R não são independentes para uma quantidade $f(i)$ de *slots* contidos no quadro, ou seja, a probabilidade de observar *slots* vazios, M_0 , afeta a probabilidade de observar *slots* lidos com sucesso, M_1 , e essas duas probabilidades afetam a probabilidade de observar *slots* colididos, M_k ; então a probabilidade de observar *slots* não ocupados, ocupados por uma etiqueta e ocupados por duas ou mais etiquetas, respectivamente, $c_0(i)$, $c_1(i)$ e $c_k(i)$, é definida pelos autores como

$$\begin{aligned} \Pr[M_0 = c_0(i), M_1 = c_1(i), M_k = c_k(i)] \\ = \frac{f(i)!}{c_0(i)!c_1(i)!c_k(i)!} p_1^{[c_0(i)]} p_2^{[c_1(i)|c_0(i)]} p_3^{[c_k(i)|c_1(i), c_0(i)]} \end{aligned} \quad (3.76)$$

onde

$$p_1^{[c_0(i)]} = \left[1 - \frac{c_0(i)}{f(i)} \right]^{n(i)} \quad (3.77)$$

$$p_2^{[c_1(i)|c_0(i)]} = \binom{n(i)}{c_1(i)} \left\{ \frac{[f(i) - c_0(i) - c_1(i)]^{[n(i) - c_1(i)]}}{[f(i) - c_0(i)]^{n(i)}} \right\} c_1(i)! \quad (3.78)$$

$$\begin{aligned} p_3^{[c_k(i)|c_1(i), c_0(i)]} \\ = \sum_{j=0}^{c_k(i)} \sum_{v=0}^{c_k(i)-j} (-1)^{j+v} \binom{c_k(i)}{j} \binom{c_k(i)-j}{v} \frac{[n(i) - c_1(i)]!}{[n(i) - c_1(i) - j]!} \frac{[c_k(i) - j - v]^{[n(i) - c_1(i) - j]}}{c_k^{[n(i) - c_1(i)]}} \end{aligned} \quad (3.79)$$

onde p_1 , p_2 e p_3 , representam, respectivamente, a probabilidade de ocorrência dos *slots* não ocupados, ocupados por uma etiqueta e ocupados por duas ou mais etiquetas.

Assim, a estimativa $n(i)$ para a quantidade de etiquetas transmitidas, $n_t(i)$, é recursivamente calculada variando $n(i)$ de modo a maximizar a função

$$n_t(i) = \operatorname{argm\acute{a}x}_{n(i)} \{ \Pr[M_0 = c_0(i), M_1 = c_1(i), M_k = c_k(i)] \} \quad (3.80)$$

A partir desse resultado, o *backlog* é obtido por

$$n_b(i) = n_t(i) - c_1(i) \quad (3.81)$$

Considerando a sobrecarga de cálculos complexos para estimar $n_t(i)$ a partir de todos os $n(i)$ possíveis resultados, adota-se uma tabela pré-armazenada contendo os valores MAP já calculados. As operações com *loops* aninhados são evitadas consultando os resultados diretamente na tabela. Todavia, quando $f(i)$ é muito grande, um tamanho considerável de memória é necessário para armazenar todas as possíveis combinações dos *slots*.

Com o propósito de economizar memória, a estrutura de subquadros é adotada pelo estimador DS-MAP. Assim, o tamanho total do quadro é dividido em vários subquadros e, assumindo que as etiquetas se distribuem uniformemente entre todos os *slots*, considera-se que as quantidades médias de etiquetas são iguais em cada subquadro. Assim, é possível estimar a quantidade de etiquetas em cada subquadro, $n_{sub}(i)$, de acordo com a quantidade de *slots* colididos e lidos observados, e consultando os resultados pré-armazenados em tabelas MAP menores como na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Valores estimados n_{sub} utilizando MAP modificado $f_{sub} = 8$

		$c_1(i)$							
		0	1	2	3	4	5	6	7
$c_k(i)$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	2	4	5	6	7	8	9	10	0
	3	6	7	9	10	11	12	0	0
	4	9	10	11	12	13	0	0	0
	5	13	14	16	18	0	0	0	0
	6	18	20	22	0	0	0	0	0
	7	25	28	0	0	0	0	0	0
	8	64	0	0	0	0	0	0	0

O valor estimado $n_t(i)$ em função dos subquadros pode ser calculado como

$$n_t(i) = \sum_{j=1}^u n_{sub}(j) \quad (3.82)$$

onde $u = f(i)/f_{sub}$ é a quantidade inteira de subquadros com tamanho f_{sub} contidos no quadro $f(i)$. Portanto, $n_t(i)$ é calculado através da soma individual das estimativas de cada subquadro. Ao final, a estimativa do *backlog* é obtida por

$$n_b(i) = n_t(i) - c_1(i) \quad (3.83)$$

Os autores ressaltam que, se $f(i) = n_t(i)$, então u deve ser fixado em 1 até o fim do processo de identificação. A Tabela MAP continuará sendo utilizada para estimar $n_b(i)$ até que todas as etiquetas estejam identificadas.

Uma vez que o estimador DS-MAP não possui uma boa precisão quando todos os *slots* do subquadro estão colididos, os autores definem um limite superior para estimativa do *backlog* dado pelo valor mínimo de 256.

Os autores citam que o estimador DS-MAP possui baixa flutuação da taxa de transferência e ótima capacidade de adaptação a uma ampla quantidade de etiquetas. A complexidade e o custo computacional são significativamente reduzidos em comparação ao estimador MAP [123].

f) Li *et al.* (2018)

Os autores propõem aperfeiçoar o método de estimativa dupla apresentado por Jianli *et al.* [124]. Neste método, uma aproximação mais rápida e grosseira para a quantidade de etiquetas transmitidas é calculada a partir do modelo matemático que relaciona o valor médio de etiquetas transmitidas em um *slot* colidido e a proporção de *slots* colididos observada no quadro. Em seguida, baseado na estimativa grosseira, o estimador MAP é adotado para o cálculo de uma estimativa fina do *backlog*.

Li [24] propõe que a taxa de transferência do algoritmo de Jianli pode ser aumentada agrupando as etiquetas de modo a satisfazer as condições ideais de eficiência, tanto quanto for possível. Neste sentido, o autor utiliza a estimativa grosseira para definir a quantidade de grupos e o melhor tamanho do quadro para identificar as etiquetas agrupadas utilizando o estimador MAP.

g) Hasan *et al.* (2018)

A maioria das abordagens dos estimadores de etiquetas considera um tamanho de quadro inicial relativamente pequeno e uma grande quantidade de rodadas de leituras dos quadros. Neste trabalho, os autores propõe um estimador Gaussiano que admite um tamanho de quadro suficientemente grande para aproximar a precisão do estimador a uma distribuição Gaussiana [125]. O processo de identificação inicia com uma sondagem utilizando o algoritmo Flajolet Martin [126] e os ajustes nos tamanhos dos quadros subsequentes são realizados a partir do Teorema Central do Limite que também quantifica o erro de aproximação para cada estimativa calculada.

Capítulo 4. PROPOSIÇÃO DO MÉTODO

Considere um processo típico de inventário em um centro de distribuição no atacado. Um *pallet* carregado com várias caixas contendo produtos afixados com $n(0)$ etiquetas RFID atravessa um portal equipado com um leitor. Assumindo que todas as caixas estão lacradas, admite-se que a quantidade exata de produtos etiquetados é desconhecida, ou seja, podem existir desde dezenas, centenas ou até milhares de etiquetas aptas a transmitir.

O leitor, programado para operar utilizando o algoritmo DFSA baseado em estimativas, inicia o processo automatizado de identificação transmitindo um quadro com tamanho inicial $f(0)$ e ajustando os tamanhos dos quadros subsequentes de acordo com as estimativas $n_b(i)$ calculadas. Após capturar o quadro, cada etiqueta seleciona ocupar um dos *slots* e aguarda para transmitir até o leitor. A máxima eficiência de identificação é alcançada quando o tamanho do quadro, $f(i)$, for igual à quantidade de etiquetas transmitidas, $n(i)$, ou seja, quando o valor estimado $n_b(i - 1)$ for igual ao valor real $n(i)$.

Admitindo um cenário crítico onde a quantidade inicial $n(0) \gg f(0)$, pode-se deduzir que uma grande quantidade de etiquetas ocupará os mesmos *slots* do quadro e, conseqüentemente, $f(0)$ *slots* colididos será produzido no início do processo de identificação. Uma vez que o leitor não é capaz de determinar a quantidade real de sinais simultaneamente transmitidos em cada *slot* colidido, então os valores das estimativas (calculadas em função dos estados dos *slots* observados) alcançam seu limite máximo. Como resultado, ajustes imprecisos nos tamanhos dos quadros subsequentes são realizados até o estimador convergir para valores mais próximos da quantidade de etiquetas transmitidas.

A fim de ilustrar esse problema, é mostrado na Tabela 4.1 o resultado da simulação do algoritmo DFSA utilizando o estimador Limite Inferior. Sejam os parâmetros $f(0) = 10$ e $n(0) = 100$, observa-se na tabela os valores obtidos para cada quadro i contendo $f(i)$ *slots* e ajustados pela estimativa $n_b(i)$. As variáveis $n(i)$, $c_0(i)$, $c_1(i)$, $c_k(i)$ representam, respectivamente, a quantidade de etiquetas transmitidas, a quantidade de *slots* ociosos, a quantidade de *slots* lidos e a quantidade de *slots* colididos.

Tabela 4.1: Simulação do algoritmo DFSA utilizando o estimador Limite Inferior

i	$f(i)$	$n_b(i)$	$n(i)$	$c_0(i)$	$c_1(i)$	$c_k(i)$
0	10	20	100	0	0	10
1	20	40	100	0	0	20
2	40	54	100	5	8	27
3	54	58	92	8	17	29
4	58	44	75	18	18	22
5	44	32	57	14	14	16
6	32	28	43	8	10	14
7	28	14	33	5	16	7
8	14	8	17	3	7	4
9	8	6	10	2	3	3
10	6	2	7	0	5	1
11	2	2	2	1	0	1
12	2	-	2	0	2	0

É possível observar nos quadros 0, 1 e 2 (destacados na tabela) a transmissão de 300 etiquetas, 57 *slots* colididos gerados e somente 8 etiquetas lidas com sucesso. Além disso, pode-se confirmar que as estimativas do *backlog* calculadas para ajustar os quadros 1 e 2, respectivamente, 20 e 40, são muito menores do que a quantidade real de etiquetas transmitidas nos respectivos quadros.

Em razão dos ajustes nos quadros subsequentes serem realizados a partir das estimativas calculadas sobre os quadros lidos, a precisão do *backlog* tende a aumentar e o valor estimado n_b tende a aproximar-se do valor real n . Ao atingir um limiar de convergência mais próximo, observa-se que uma maior quantidade de etiquetas é identificada e uma menor quantidade de *slots* ociosos e colididos é gerada. A partir daí, a taxa de transferência do quadro aproxima-se do seu valor máximo, ou seja, $f(i) \approx n(i)$. Uma representação gráfica desse comportamento pode ser ilustrada na figura 4.1 adotando os dados simulados e exibidos na Tabela 4.1.

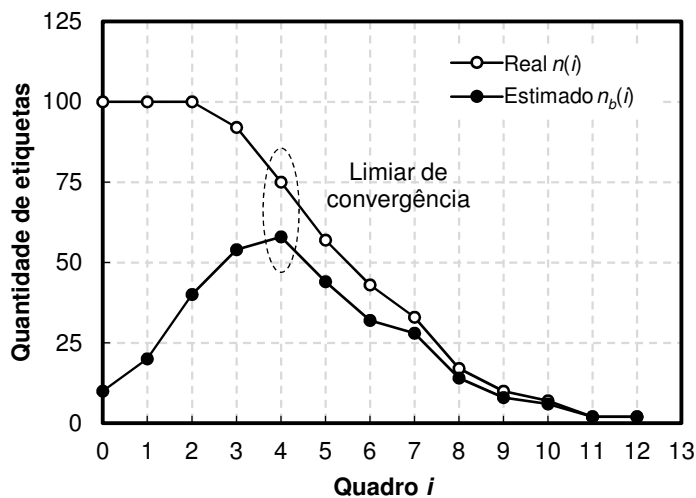


Figura 4.1: Simulação do algoritmo DFSA utilizando o estimador Limite Inferior.

4.1. Experimento prático

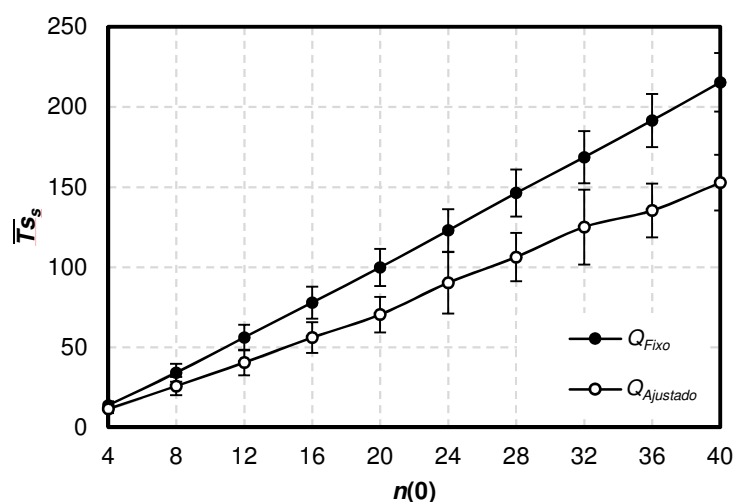
O experimento apresentado a seguir tem como propósito estudar a relação entre quadros e etiquetas considerando dois cenários de identificação. Utilizando um leitor RFID UHF passivo comercial já programado com o Algoritmo Q (algoritmo DFSA baseado em potência de 2), o primeiro cenário, Q_{Fixo} , configura o parâmetro inicial $Q_{fp} = Q(0) = 1$ de modo que a quantidade de etiquetas a serem lidas, $n(0)$, seja maior do que o tamanho do quadro inicial $f(0) = 2^{Q(0)} = 2$. Sendo assim, espera-se que múltiplas etiquetas colidam dentro dos primeiros *slots* e, conseqüentemente, o sistema RFID opere com uma maior quantidade de sinais retransmitidos até o Algoritmo Q convergir $f(i)$ para um valor mais próximo de $n(i)$.

Um segundo cenário, $Q_{Ajustado}$, configura o parâmetro inicial $Q_{fp} = Q(0)$ de modo que a relação $f(0) = 2^{Q(0)}$ seja a mais próxima de $n(0)$. Dessa forma, espera-se que o sistema RFID opere com uma menor quantidade de colisões nos primeiros quadros e, conseqüentemente, com um menor tráfego de sinais RFID para identificar todas as etiquetas. Na Tabela 4.2 são exibidas as quantidades $n(0)$ de etiquetas a serem lidas, os parâmetros Q_{fp} iniciais e os tamanhos dos quadros iniciais adotados neste experimento. É importante destacar que os tamanhos $f(i)$ são imediatamente ajustados pelo Algoritmo Q ao final da leitura de cada *slot*, sempre que a condição $Q(i) \neq \text{round}(Q_{fp})$ for satisfeita.

Tabela 4.2: Parâmetros $Q(0)$ adotados para os cenários Fixo e Ajustado

$n(0)$		4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
Q_{Fixo}	Q_{fp} inicial	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	$f(0)$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$Q_{Ajustado}$	Q_{fp} inicial	2	3	4	4	5	5	5	5	5	6
	$f(0)$	4	8	16	16	32	32	32	32	32	64

Baseado nos cenários Q_{Fixo} e $Q_{Ajustado}$, foram realizadas $k = 1.000$ simulações para cada quantidade $n(0)$ em cada cenário, com o propósito de calcular a média dos sinais RFID transmitidos entre leitor e etiquetas, \overline{T}_{S_s} , e seus respectivos desvios-padrão, figura 4.2. A variável \overline{T}_{S_s} representa a soma de todos os sinais transmitidos pelo leitor (comandos *Query*, *QueryAdjust* e *QueryRepeat* e sinais ACK e NACK) e pelas etiquetas (sinais RN16 e ID).

**Figura 4.2:** Comparação dos sinais \overline{T}_{S_s} entre os cenários Q_{Fixo} e $Q_{Ajustado}$.

Pode-se verificar na figura 4.2 que a quantidade média \overline{T}_{S_s} é maior no cenário Q_{Fixo} do que no cenário $Q_{Ajustado}$. Essa diferença demonstra que, para identificar a mesma quantidade $n(0)$ de etiquetas, mais sinais RFID são transmitidos no cenário Q_{Fixo} do que no cenário $Q_{Ajustado}$. Comprova-se, portanto, que um tamanho do quadro inicial mais próximo da quantidade de etiquetas a serem lidas reduz a quantidade de sinais RFID transmitidos entre leitor e etiquetas.

Na figura 4.3 é ilustrada a média $\overline{T_{s_s}}/n(0)$ em cada cenário. Tendo em conta que no cenário Q_{Fixo} o parâmetro inicial $Q_{fp} = Q(0) = 1$ não muda para quaisquer $n(0)$, verifica-se que o aumento na diferença entre o tamanho do quadro inicial e a quantidade de etiquetas incrementa a demanda média de sinais RFID transmitidos para identificar cada etiqueta. Dentro do intervalo estudado, essa demanda é 24,15% maior no cenário Q_{Fixo} do que no cenário $Q_{Ajustado}$.

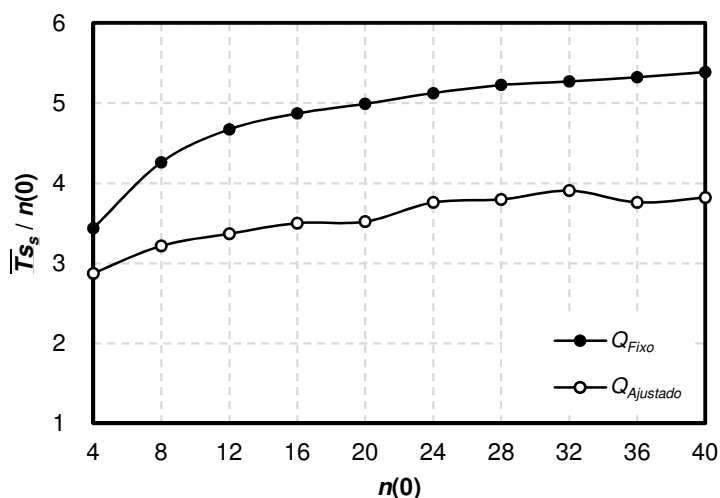


Figura 4.3: Comparação dos sinais $\overline{T_{s_s}}/n(0)$ para os cenários Q_{Fixo} e $Q_{Ajustado}$.

Experimentalmente, a identificação das $n(0)$ etiquetas foi realizada em um ambiente real de laboratório contendo diferentes obstáculos ao seu redor (piso, paredes, cadeiras, mesas, etc.). A partir dos cenários Q_{Fixo} e $Q_{Ajustado}$, mediu-se a qualidade dos sinais capturados das etiquetas identificadas com sucesso pelo leitor. Na figura 4.4(a) é ilustrado o *layout* interno do laboratório de Radiometria da Universidade Federal de Campina Grande. Na figura 4.4(b) é exibida a foto do *setup* de medição utilizado. Um leitor UHF RFID modelo comercial IF21009FF01 da Network Intermecc, figura 4.4(c), operando na frequência de 915 MHz, foi conectado a uma antena TX/RX, modelo PAL90209H da Laird Technologies, com polarização circular e ganho de 9 dBi, figura 4.4(d), sendo esta montada a 0,60 m de altura e a 90° em relação ao piso. A antena foi instalada em uma estrutura tipo portal em PVC, semelhante aos modelos encontrados comercialmente no mercado.

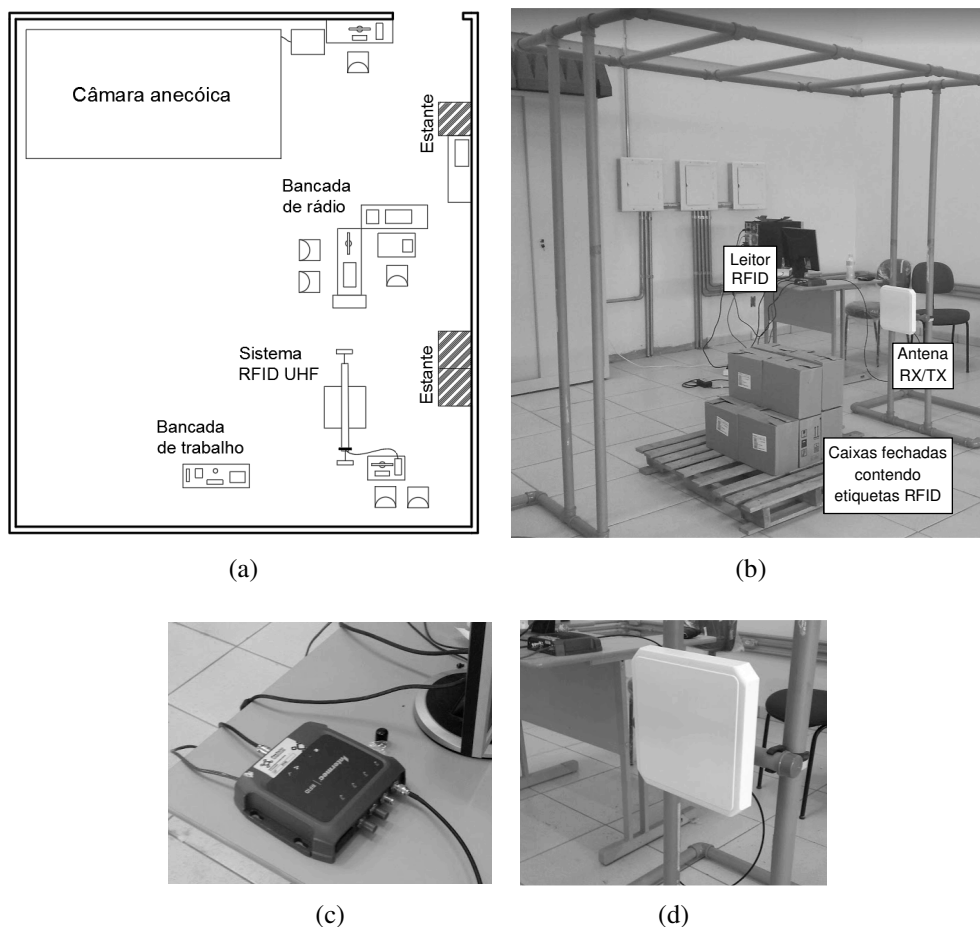


Figura 4.4: Caracterização do experimento: (a) *layout*, (b) *setup*, (c) leitor e (d) antena do leitor.

Na figura 4.5 é mostrada a vista superior da etiqueta RFID passiva utilizada. A etiqueta opera na frequência UHF no intervalo de 860 – 960MHz. A antena da etiqueta foi construída sobre uma placa de fibra de vidro e resina epóxi FR-4 revestida em cobre com espessura 1,52 mm e permissividade dielétrica $\epsilon_r = 4,4$. Um *microchip* modelo UCODE I²C SL3S4011_4021 [128] foi aplicado aos terminais da antena. O projeto construtivo da etiqueta não faz parte do escopo desta tese.

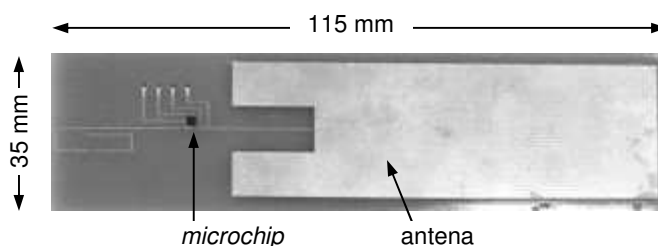


Figura 4.5: Etiqueta RFID passiva adotada no experimento.

O procedimento de medição é explicado a seguir. Um *pallet* posicionado no interior do portal RFID é carregado com caixas de papelão lacradas e contendo quatro etiquetas cada uma. As etiquetas foram separadas em 3 cm umas das outras e dispostas em 2 linhas e 2 colunas no lado interno das caixas. Todas as etiquetas foram orientadas ortogonalmente em relação à onda incidente e em linha de visão com a antena do leitor. Cada caixa possui dimensões 22,5 cm x 27,5 cm x 14,0 cm e não há objetos no seu interior. Novas caixas são acrescentadas lado a lado, na distância entre 0,70 e 1,15 cm da antena do leitor. Após o limite de 6 caixas (2 filas consecutivas contendo 3 caixas), as demais foram colocadas seguindo a mesma disposição e acima das primeiras. Foram realizadas 1.000 leituras para cada quantidade $n(0)$ em cada cenário adotando o intervalo de 0,5 s entre cada leitura.

A medida da razão sinal-ruído (*signal-to-noise ratio*, SNR) foi adotada com o propósito de avaliar a qualidade dos sinais capturados das etiquetas identificadas. Quanto maior o valor SNR, menor é o efeito das interferências sobre o sinal da etiqueta. O SNR, em decibéis, foi calculado pelo leitor e equivale à intensidade do sinal recebido da etiqueta (*received signal strength indicator*, RSSI) menos a intensidade do ruído captado (*received noise strength indicator*, RNSI) [127]. Na figura 4.6 é ilustrado o valor médio $\overline{\text{SNR}}$ para os cenários Q_{Fixo} e Q_{Ajustado} . O $\overline{\text{SNR}}_{\text{dB}}$ foi computado após converter os valores medidos em dB para a escala adimensional, calcular sua média e retornar o resultado para dB¹.

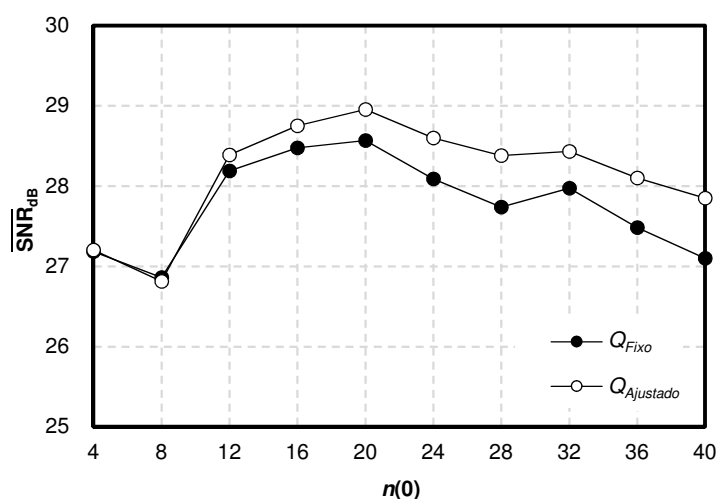


Figura 4.6: Comparação do $\overline{\text{SNR}}_{\text{dB}}$ para os cenários Q_{Fixo} e Q_{Ajustado} .

¹ $\text{SNR} = \left(10^{\frac{\text{SNR}_{\text{dB}}}{10}}\right)$ e $\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \cdot \log_{10}(\text{SNR})$

A flutuação observada na curva $\overline{\text{SNR}}_{\text{dB}}$ ocorre devido às diferentes posições geométricas das etiquetas RFID em relação a antena do leitor [49, 80]. Além disso, os resultados médios obtidos mostram uma maior potência do ruído capturado em comparação às potências das etiquetas medidas [77].

Pode-se verificar ainda que os valores $\overline{\text{SNR}}_{\text{dB}}$ tendem a ser menores no cenário Q_{Fixo} do que no cenário Q_{Ajustado} . Este resultado sugere que, em ambientes internos reais, nos casos onde a quantidade de etiquetas a serem lidas é muito maior do que o tamanho do quadro inicial preestabelecido, o maior volume de sinais RFID transmitidos no canal contribui para intensificar o efeito multipercorso interferindo, conseqüentemente, na qualidade dos sinais capturados das etiquetas identificadas com sucesso. Na escala adimensional, o $\overline{\text{SNR}}$ do cenário Q_{Fixo} apresenta uma redução de 14,50% em comparação ao Q_{Ajustado} no intervalo entre 28 e 40 etiquetas. O *datasheet* do *microchip* da etiqueta indica uma sensibilidade SNR para leitura de -18 dBm e escrita de -11 dBm [128].

É importante mencionar que outros tipos de interferências, tais como o acoplamento eletromagnético entre etiquetas vizinhas, também podem influenciar nos valores SNR medidos [77, 97].

4.2. Um método com duas aproximações

A fim de acelerar a convergência entre $n_b(i)$ e $n(i)$, dado um cenário crítico onde a quantidade de etiquetas a serem lidas é muito maior do que o tamanho do quadro inicial preestabelecido, o método de Dupla-Aproximação (DA) executa, além da aproximação pela estimativa $n_b(i)$ em direção à quantidade $n(i)$, uma segunda aproximação, que reduz temporariamente a quantidade $n(i)$ com o objetivo de convergir mais rapidamente em direção ao $n_b(i)$ estimado [129].

Sendo assim, o método DA introduz um novo tipo de aproximação dentro do algoritmo DFSA onde as quantidades de etiquetas transmitidas nos quadros subsequentes são sistematicamente reduzidas. Em seguida, após atingir o limiar de convergência preestabelecido entre $n_b(i)$ e $n(i)$, uma estimativa mais precisa para o total de etiquetas ainda não identificadas, n_e , é calculada. Na figura 4.7 é ilustrado um exemplo do funcionamento do método DA considerando o exemplo simulado e apresentado na Tabela 4.1.

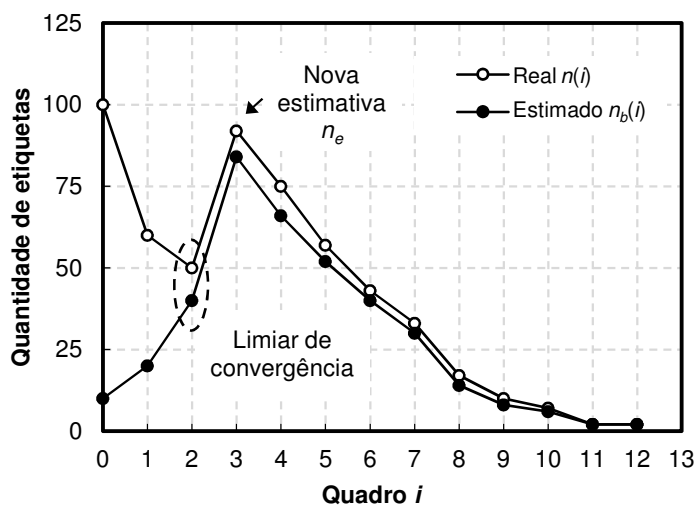


Figura 4.7: Exemplo de aplicação do método de Dupla-Aproximação.

Esquemáticamente, o conjunto de procedimentos realizados pelo método DA pode ser segmentado em três etapas que operam sobre o algoritmo DFSA: Verificação, Convergência Dupla e Convergência Simples; conforme fluxograma exibido na figura 4.8.

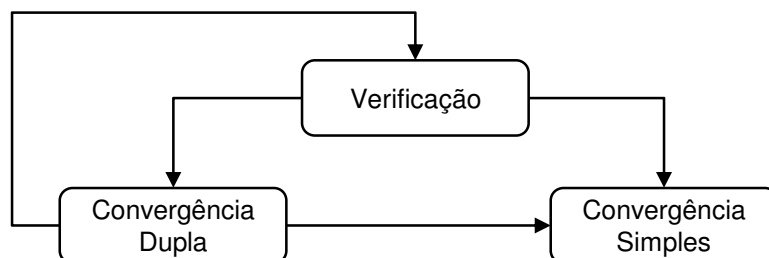


Figura 4.8: Etapas do método DA.

Na etapa de Verificação, o leitor transmite o tamanho do quadro inicial e aguarda as respostas das etiquetas. Ao final da leitura completa do quadro, o método DA verifica se o volume de colisões inviabilizou a identificação e, caso afirmativo, o processo segue para etapa de Convergência Dupla. Nesta etapa, a rotina de Sorteios Sucessivos de Etiquetas (SSE) acelera a convergência entre quadros e etiquetas até o limite de convergência preestabelecido. Em seguida, o tamanho do quadro subsequente é ajustado a partir da estimativa n_e calculada e o processo de identificação segue para a etapa de Convergência Simples. A partir daí, somente a aproximação pela estimativa do *backlog* é adotada para identificar as demais etiquetas ainda não identificadas. Destaca-se que, caso o método não alcance a convergência durante a Etapa de Convergência Dupla, o processo retorna para a etapa de Verificação.

4.2.1. Sorteio das etiquetas que irão transmitir

Considere um conjunto inicial $\mathbf{N}(0)$ contendo $n(0)$ etiquetas a serem lidas. Assumindo um cenário crítico onde $n(0) \gg f(0)$ gera uma grande quantidade de colisões, o método DA executa a rotina SSE com o objetivo de reduzir temporariamente a quantidade de etiquetas em $\mathbf{N}(i)$ que transmitem no quadro i [129]. Dessa maneira, o método DA diminui o volume de sinais transmitidos pelas etiquetas enquanto acelera a aproximação entre $n(i)$, que tende a diminuir, e $n_b(i)$, que tende a aumentar.

Na prática, a rotina SSE adota um contador de 2 bits, denominado bc , a ser inserido dentro do *microchip* de cada etiqueta. Em sistemas RFID UHF passivos, o contador bc pode ser implementado de forma semelhante ao contador de *slots* de 15 bits atualmente especificado no protocolo EPC Class 1 Gen 2. Neste contador, as etiquetas armazenam um estado binário fornecido por um gerador de números aleatórios baseado na distribuição Uniforme [92]. Como alternativa para uma solução de baixo custo, sugere-se que este mesmo gerador seja aperfeiçoado de modo a carregar o estado do contador bc com apenas os 2 bits menos significativos produzidos aleatoriamente.

É importante ressaltar que o procedimento de geração aleatória dos estados do contador bc deve ser anterior à transmissão dos sinais pelas etiquetas. Nesse sentido, o comando *QueryAdjust* utilizado para configurar o tamanho do quadro subsequente pode ser substituído pelo comando *QueryAdjustSSE* a ser implementado com características congêneres e acrescido da função que aciona o sorteio de bc . Assim, após receber o comando *QueryAdjustSSE* contendo o tamanho do quadro i , somente as etiquetas que armazenam o estado “11” participam do sorteio que habilita transmitir até o leitor. Ao final de cada sorteio, as etiquetas que mantiverem o estado “11” deverão selecionar um dos *slots* no quadro i .

Sucessivos comandos *QueryAdjustSSE* são enviados a fim de reduzir a quantidade de etiquetas em $\mathbf{N}(i) \subseteq \mathbf{N}(0)$ que armazenam o estado “11” e transmitem até o leitor. Durante esse processo, as demais etiquetas em $\mathbf{N}(i)$ que armazenam algum dos estados diferente de “11” permanecem temporariamente desabilitadas, ou seja, não transmitem e não participam dos próximos sorteios do contador [129]. Um pseudocódigo para a rotina SSE é mostrado na figura 4.9.

Rotina de Sorteios Sucessivos de Etiquetas (SSE)
<p>Entrada: $N[i] = \{tag_1_{bc}, tag_2_{bc}, \dots, tag_{n(0)}_{bc}\}$ // conjunto $N(i)$ contendo $n(0)$ etiquetas e seus respectivos estados do contador bc</p> <p>Saída: $N[i + 1]$ // novo conjunto $N(i + 1)$ contendo os novos estados sorteados</p> <ol style="list-style-type: none"> 1: Define inteiro $j = 1$ // inicia na posição 1 2: Enquanto $j \leq n(0)$ faça // verifica $N(i)$ da posição j até a posição $n(0)$ 3: Se $N[i][j] = "11"$ então // a etiqueta participa do sorteio? 4: $N[i + 1][j] = \text{randomize}("00", "01", "10", "11")$ // Sim, então sorteie um novo estado 5: Senão 6: $N[i + 1][j] = N[i][j]$ // Não, então permaneça com o estado anterior 7: fim Se 8: $j = j + 1$ // próxima posição 9: fim Enquanto

Figura 4.9: Pseudocódigo da rotina SSE.

Com o intuito de garantir que todas as etiquetas participem da etapa de Verificação e que, ao final da etapa de Convergência Dupla, todas as etiquetas temporariamente desabilitadas retornem a transmitir até o leitor, o comando resetSSE deve ser implementado com a função de programar o estado do contador bc das etiquetas não identificadas com o valor "11".

4.2.2. Estimação do total de etiquetas

O modelo probabilístico a seguir é utilizado para estimar a quantidade de etiquetas ao final da etapa de Convergência Dupla. Admite-se um experimento aleatório Γ que consiste na realização de i sorteios, independente e identicamente distribuídas (i.i.d.) dos valores binários "00", "01", "10" ou "11" por um contador bc inserido no *microchip* de uma etiqueta RFID. Ao final de cada sorteio, se o contador bc armazena:

- O valor "00", "01" ou "10", então a etiqueta estará temporariamente desabilitada para transmitir e manterá esse mesmo valor até receber o comando resetSSE do leitor;
- O valor "11", então a etiqueta estará habilitada para transmitir e poderá participar de um novo sorteio de bc .

Com o propósito de representar o estado de operação da etiqueta, define-se o estado “D”, desabilitado, para os valores “00”, “01” e “10” e o estado “H”, habilitado, para o valor “11”. Assumindo que os sorteios dos valores de bc ocorrem sempre com a mesma probabilidade p , é possível construir o diagrama de estados como ilustrado na figura 4.10. Os sentidos das flechas indicam a probabilidade de transição de um estado para outro.

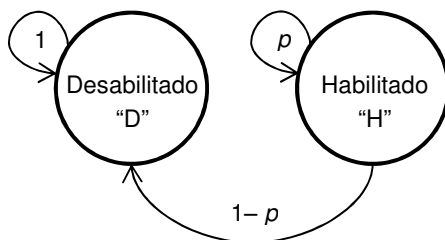


Figura 4.10: Diagrama de transição de estados da etiqueta.

Pode-se observar no diagrama que, se o estado anterior da etiqueta for habilitado, então a probabilidade da etiqueta manter o mesmo estado “H” é igual a p e a probabilidade dela mudar de estado é $1 - p$. Por outro lado, se o estado anterior da etiqueta for desabilitado, então a probabilidade da etiqueta manter o mesmo estado “D” é igual a 1 e a probabilidade dela mudar de estado é 0 (zero).

Seja uma variável aleatória T_j definida para representar o estado da etiqueta j após a realização de um sorteio, então é possível obter uma sequência de variáveis aleatórias discretas $T_j(1), T_j(2), \dots, T_j(i - 1), T_j(i)$ capaz de descrever a evolução dos estados da etiqueta após i sorteios realizados. Assumindo que o estado inicial da etiqueta é habilitado, o diagrama em treliças é mostrado na figura 4.11.

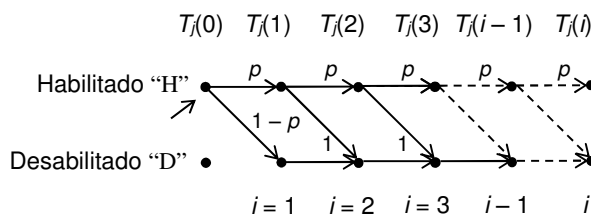


Figura 4.11: Diagrama em treliças para as transições $T_j(i)$.

Uma vez que a quantidade i de sorteios é finita e enumerada, observa-se que vários caminhos podem ser traçados para descrever os possíveis estados da etiqueta. Além disso, pode-se verificar que apenas o estado anterior é relevante para determinar o próximo estado $T_j(i)$, caracterizando assim, uma cadeia de Markov discreta. Sendo assim, a probabilidade da etiqueta j transitar para o estado $t(i)$ ao final do i -ésimo sorteio é definida como

$$\begin{aligned} \Pr[T_j(i) = t(i) \mid T_j(i-1) = t(i-1), \dots, T_j(2) = t(2), T_j(1) = t(1), T_j(0) = \text{“H”}] \\ = \Pr[T_j(i) = t(i) \mid T_j(i-1) = t(i-1)] \end{aligned} \quad (4.1)$$

onde a probabilidade de sortear o estado $t(i)$:{“H”, “D”} dado a ocorrência dos estados $t(i-1)$, ..., $t(2)$, $t(1)$ e “H” depende somente do estado anterior $t(i-1)$.

Como apenas o estado “H” permite a transmissão da etiqueta no quadro, então a probabilidade da etiqueta j encontrar-se habilitada para transmitir após i sorteios realizados é dada por

$$\Pr[T_j(i) = \text{“H”} \mid i \text{ sorteios}] = \prod_{u=1}^i \Pr[T_j(u) = \text{“H”} \mid T_j(u-1) = \text{“H”}] \quad (4.2)$$

ou seja,

$$\Pr[T_j(i) = \text{“H”} \mid i \text{ sorteios}] = \prod_{u=1}^i (p)_u = p^i \quad (4.3)$$

Expandindo as realizações do experimento Γ para cada uma das $n(0)$ etiquetas a serem lidas, adota-se uma variável aleatória I_j para indicar o valor 1 quando o estado da etiqueta j permanecer habilitado após o i -ésimo sorteio com probabilidade dada por $\Pr[I_j = 1] = p^i$ e $\Pr[I_j = 0] = 1 - p^i$ caso contrário. Desse modo, uma variável aleatória $N(i)$ pode ser definida em função de I_j com o propósito de representar o total de etiquetas habilitadas a transmitir no quadro i , ou seja,

$$N(i) = \sum_{j=1}^{n(0)} I_j \quad (4.4)$$

O valor esperado de $N(i)$, denominado $\mathbb{E}[N(i)]$, é calculado como

$$\mathbb{E}[N(i)] = \mathbb{E} \left[\sum_{j=1}^{n(0)} I_j \right] \quad (4.5)$$

Uma vez que o operador $\mathbb{E}[\cdot]$ é linear, então,

$$\mathbb{E}[N(i)] = \sum_{j=1}^{n(0)} \mathbb{E}[I_j] \quad (4.6)$$

$$\mathbb{E}[N(i)] = \sum_{j=1}^{n(0)} 1 \cdot \Pr[I_j = 1] + 0 \cdot \Pr[I_j = 0] \quad (4.7)$$

$$\mathbb{E}[N(i)] = \sum_{j=1}^{n(0)} p^i \quad (4.8)$$

$$\mathbb{E}[N(i)] = n(0) \cdot p^i \quad (4.9)$$

Assumindo que os valores sorteáveis de bc são equiprováveis, então generaliza-se $p = 1/2^{\delta_0}$ (onde δ_0 representa a quantidade de bits do contador) de modo que apenas 1 valor de bc habilite a transmissão e os demais $2^{\delta_0} - 1$ valores desabilitem temporariamente a etiqueta. Assim, o valor esperado de $N(i)$ pode ser obtido como

$$\mathbb{E}[N(i)] = n(0) \cdot \left(\frac{1}{2^{\delta_0}} \right)^i \quad (4.10)$$

Tirando de (4.10) o valor de $n(0)$,

$$n(0) = \mathbb{E}[N(i)] \cdot 2^{\delta_0 i} \quad (4.11)$$

Assumindo a existência de uma quantidade suficientemente grande de etiquetas participando dos sorteios, considera-se que o valor esperado de etiquetas habilitadas para transmitir no quadro i aproxima-se da quantidade de etiquetas transmitidas no quadro i , ou seja, $\mathbb{E}[N(i)] \approx n(i)$. Uma vez que $n(i)$ pode ser estimado como $n_b(i) + c_1(i)$, então $\mathbb{E}[N(i)] \approx n_b(i) + c_1(i)$. Substituindo essa estimativa em (4.11), tem-se

$$n(0) \approx [n_b(i) + c_1(i)] \cdot 2^{\delta_0 i} \quad (4.12)$$

Ao final da leitura de cada quadro i , $Th_f(i)$ é calculada. Taxas $Th_f(i) \approx Th_{f(máx)}$ indicam que $n(i) \approx f(i)$, ou seja, que o valor $n_b(i - 1)$ estimado para ajustar $f(i)$ está próximo do valor real $n(i)$. Após atingir $Th_f(i) \geq \theta_0$, uma estimativa mais precisa, n_e , para o total de etiquetas ainda não identificadas pode ser obtida de (4.12) subtraindo o total de etiquetas eventualmente identificadas (representado pelo total de *slots* lidos, c_1) durante a etapa de Convergência Dupla, ou seja,

$$n_e = [n_b(i) + c_1(i)] \cdot 2^{\delta_0 i} - \sum_{u=0}^i c_1(u) \quad (4.13)$$

A fim de adequar a aproximação pela estimativa do *backlog* em direção às sucessivas reduções nas quantidades de etiquetas transmitindo, o método DA adotada a seguinte condição de ajuste para os tamanhos dos quadros subsequentes, $f(i + 1)$, na etapa de Convergência Dupla:

$$f(i + 1) = \frac{n_b(i)}{2^{\delta_0}} \quad (4.14)$$

No caso dos estimadores mais lentos (como Limite Inferior, Schoute e Vogt), aplica-se $f(i + 1) = n_b(i)$ enquanto $c_k(i) = f(i)$. A equação (4.14) é utilizada com o intuito de coincidir os ajustes de $f(i + 1)$ em relação às reduções em cerca de $1/2^{\delta_0}$ na quantidade de etiquetas transmitindo durante a execução da rotina SSE.

4.3. Operação do método DA

O processo de identificação inicia na etapa de Verificação, quando o leitor transmite o comando resetSSE e programa o valor “11” para o contador bc de todas as $n(0)$ etiquetas contidas na zona de interrogação. Em seguida, o leitor transmite o comando Query contendo $f(0)$ e aguarda a transmissão das etiquetas. Após a leitura do quadro inicial, o método DA considera $n(0) \gg f(0)$ se a condição $c_k(0) = f(0)$ for satisfeita e, caso afirmativo, encaminha o processo de identificação para a etapa de Convergência Dupla. Nesta etapa, o leitor transmite o comando QueryAdjustSSE contendo o tamanho do quadro (equação 4.14) e realiza o primeiro sorteio dos contadores bc . Posteriormente, o método DA verifica o nível de convergência alcançado calculando a taxa de transferência do quadro, $Th_f(i)$, como

$$Th_f(i) = \frac{c_1(i)}{c_0(i) + c_1(i) + c_k(i)} \quad (4.15)$$

A rotina SSE realiza sucessivos sorteios de bc até atingir o limite mínimo θ_0 preestabelecido para $Th_f(i)$. Ao final, o tamanho do quadro subsequente é ajustado pela estimativa n_e calculada e o leitor transmite o comando resetSSE programando todas as etiquetas temporariamente desabilitadas para transmitir novamente. O processo de identificação segue para a etapa de Convergência Simples onde o leitor transmite o comando QueryAdjust contendo o tamanho do quadro já ajustado. A partir daí, os próximos ajustes nos quadros subsequentes serão realizados somente pela estimativa do *backlog*.

A fim de evitar longas convergências para poucas ou nenhuma etiqueta transmitindo, o método DA estima a quantidade de etiquetas que transmitirá até o leitor antes de executar o próximo sorteio. Assim, se $n_b(i) / 2^{\delta_0}$ for menor do que o limite mínimo φ_0 preestabelecido, a rotina SSE é imediatamente interrompida e o método DA reinicia na etapa de Verificação.

Outra possível ocorrência na etapa de Convergência Dupla é a inexistência de *slots* colididos durante a execução da rotina SSE. A ausência de *slots* colididos indica que não existem etiquetas habilitadas para transmitir no quadro subsequente. Neste caso, se $c_k(i) = 0$, então a rotina SSE é imediatamente interrompida e o método DA reinicia na etapa de Verificação.

O fluxograma de operação do método DA é ilustrado na figura 4.12.

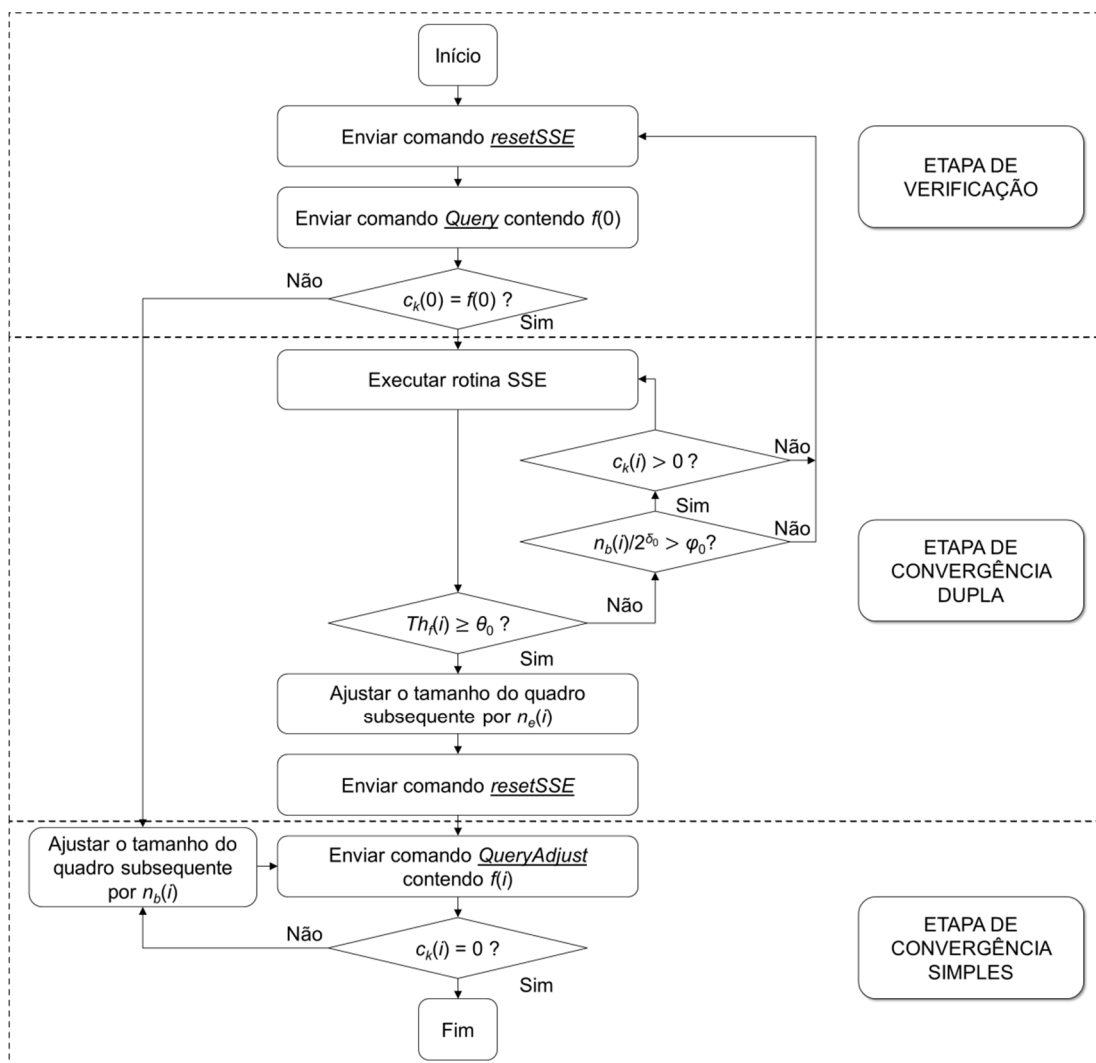


Figura 4.12: Fluxograma do método DA.

É importante destacar que, se na etapa de Verificação for observada a condição $c_k(0) < f(0)$, então o método DA assume que $n(0)$ não é suficientemente grande em comparação a $f(0)$ e o processo de identificação segue diretamente para a etapa de Convergência Simples. Nesta etapa, somente a aproximação pela estimativa do *backlog* é realizada para identificar todas as etiquetas contidas na zona de interrogação (o método opera similar ao algoritmo DFSA tradicional).

Capítulo 5. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Com o propósito de avaliar o desempenho do método DA sobre os algoritmos DFSA baseados em estimativas, foram implementados seis algoritmos DA-DFSA denominados DA-Limite Inferior, DA-Schoute, DA-Vogt, DA-Eom, DA-Aniversário, DA-DS-MAP e suas respectivas versões DFSA tradicionais. Valores médios de desempenho foram calculados após k simulações computacionais realizadas para cada quantidade $n(0)$ de etiquetas. Devido às divergências na aplicabilidade do método DA inicialmente observadas, os estimadores Li e Hasan não foram considerados nesta análise.

Tendo em vista a heterogeneidade de critérios apresentados por diferentes autores, é possível concluir que não existe um conjunto padronizado de métricas formalmente estabelecido para avaliar o desempenho dos algoritmos anticolisão de etiquetas [16]. Neste sentido, uma extensa pesquisa na literatura foi realizada com objetivo de definir um conjunto de medidas que melhor se adequem ao estudo proposto.

5.1. Métricas de avaliação

a) Total de *slots* médio ($\overline{Tc_s}$)

O total de *slots* utilizados pelo sistema, Tc_s , representa a soma de todos os *slots* disponibilizados pelo leitor às etiquetas durante o processo de identificação [16, 114]. Uma vez que a quantidade de *slots* no quadro é representada pelo tamanho f do próprio quadro, então o valor de Tc_s equivale à soma dos tamanhos de todos os i quadros transmitidos até o final do processo de identificação. Desse modo, após k simulações identificando $n(0)$ etiquetas, uma estimativa da média $\overline{Tc_s}$ pode ser calculada como

$$\overline{Tc_s}^{n(0),k} = \frac{1}{k} \sum_{p=1}^k \left[\sum_{j=0}^i f(j) \right]_{n(0),p} \quad (5.1)$$

b) Taxa de transferência média (\overline{Th}_s)

Define-se taxa de transferência ou eficiência do sistema, Th_s , como a razão entre a soma de todos os *slots* lidos com sucesso, c_1 , dividido pela soma de todos os *slots* disponibilizados durante o processo de identificação [50, 79, 109, 114]. Sendo assim, uma estimativa da média \overline{Th}_s é calculada em função de cada quantidade $n(0)$ após repetidas k simulações como

$$\overline{Th}_s^{n(0),k} = \frac{1}{k} \sum_{p=1}^k \left[\sum_{j=0}^i \frac{c_1(j)}{f(j)} \right]_{n(0),p} \quad (5.2)$$

A média \overline{Th}_s mensura, no intervalo entre 0 e 1, a produtividade média dos *slots* ao final do processo de identificação. O valor \overline{Th}_s aproxima-se do seu máximo quando os tamanhos de todos os quadros são iguais às quantidades de etiquetas que transmitem nesses mesmos quadros.

Em razão de ambas as métricas \overline{Tc}_s e \overline{Th}_s serem equivalentes na avaliação do desempenho dos algoritmos DFSA, adota-se a métrica \overline{Tc}_s somente na etapa de validação dos resultados obtidos pelo *software* simulador desenvolvido.

c) Total médio de sinais transmitidos ($\overline{T}_{S_{l \rightarrow e}}$, $\overline{T}_{S_{e \rightarrow l}}$ e $\overline{T}_{S_s}/n(0)$)

A quantidade de sinais transmitidos por um sistema RFID UHF passivo, T_{S_s} , pode ser segmentada em duas grandes parcelas de contribuição [92]: a quantidade de sinais transmitidos no sentido leitor para etiquetas, $T_{S_{l \rightarrow e}}$, e a quantidade de sinais transmitidos no sentido etiquetas para leitor, $T_{S_{e \rightarrow l}}$. Seja uma quantidade $n(0)$ de etiquetas, calcula-se $T_{S_{l \rightarrow e}}$ ao final da leitura de i quadros utilizando o algoritmo DFSA como

$$T_{S_{l \rightarrow e}}^{n(0)} = \left[\sum_{j=0}^i s_q(j) + s_r(j) + s_a(j) + s_{ACK}(j) + s_{NACK}(j) \right]_{n(0)} \quad (5.3)$$

onde s_q , s_r , s_a , s_{ACK} e s_{NACK} representam, respectivamente, a quantidade de sinais transmitidos pelo leitor utilizando o comando de consulta inicial, Query, o comando de leitura do próximo slot, QueryRep, o comando de ajuste do tamanho do quadro, QueryAdjust, e contendo as mensagens de reconhecimento ACK e não reconhecimento NACK transmitidas de volta às etiquetas.

No caso dos algoritmos DA-DFSA, a equação (5.3) é acrescida dos sinais utilizados pelo método DA, ou seja,

$$T_{S_{l \rightarrow e}}^{n(0)} = \left[\sum_{j=0}^i s_q(j) + s_r(j) + s_a(j) + s_{ACK}(j) + s_{NACK}(j) + s_{SSE}(j) + s_{reSSE}(j) \right]_{n(0)} \quad (5.4)$$

onde s_{SSE} e s_{reSSE} representam, respectivamente, a quantidade de sinais transmitidos utilizando o comando que realiza um novo sorteio do contador bc , QueryAdjustSSE, e o comando que habilita a transmissão de todas as etiquetas não identificadas, resetSSE.

Em relação à parcela de contribuição no sentido etiquetas para leitor, calcula-se $T_{S_{e \rightarrow l}}$ ao final de i quadros utilizando o algoritmo DFSA como

$$T_{S_{e \rightarrow l}}^{n(0)} = \left[\sum_{j=0}^i s_{RN16}(j) + s_{ID}(j) \right]_{n(0)} \quad (5.5)$$

onde s_{RN16} e s_{ID} representam, respectivamente, a quantidade de sinais transmitidos pelas etiquetas contendo a mensagem RN16 e contendo a identificação única ID. Haja vista que o método DA não requer a transmissão de outros tipos de sinais no sentido etiquetas para leitor, então não há mudanças da equação (5.5) em relação aos algoritmos DA-DFSA.

Por fim, após k simulações identificando $n(0)$ etiquetas, o total médio de sinais RFID transmitidos entre leitor e etiquetas pode ser estimado por

$$\overline{T}_{S_s}^{n(0),k} = \frac{1}{k} \sum_{p=1}^k [T_{S_{l \rightarrow e}} + T_{S_{e \rightarrow l}}]_{n(0),p} \quad (5.6)$$

Uma vez que a quantidade de sinais RFID normalmente cresce à medida que a quantidade $n(0)$ de etiquetas aumenta, utiliza-se a métrica \overline{T}_{S_s} normalizada por $n(0)$ com o propósito de evidenciar a demanda média de sinais RFID requerida pelo sistema para identificar cada etiqueta utilizando os algoritmos DFSA e DA-DFSA, ou seja,

$$\frac{\overline{T}_{S_s}^{n(0),k}}{n(0)} = \frac{\frac{1}{k} \sum_{p=1}^k [T_{S_{l \rightarrow e}} + T_{S_{e \rightarrow l}}]_{n(0),p}}{n(0)} \quad (5.7)$$

Com a intenção de analisar mais detalhadamente o volume de sinais transmitidos em cada uma das direções, estima-se ainda as médias de sinais transmitidos nos sentidos leitor para etiquetas e etiquetas para leitor, respectivamente,

$$\overline{T}_{S_{e \rightarrow l}}^{n(0),k} = \frac{1}{k} \sum_{p=1}^k \left[\sum_{j=0}^i s_{RN16}(j) + s_{ID}(j) \right]_{n(0),p} \quad (5.8)$$

$$\overline{T}_{S_{l \rightarrow e}}^{n(0),k} = \frac{1}{k} \sum_{p=1}^k \left[\sum_{j=0}^i s_q(j) + s_r(j) + s_a(j) + s_{ACK}(j) + s_{NACK}(j) \right]_{n(0),p} \quad (5.9)$$

aplicando o método DA,

$$\overline{T}_{S_{l \rightarrow e}}^{n(0),k} = \frac{1}{k} \sum_{p=1}^k \left[\sum_{j=0}^i s_q(j) + s_r(j) + s_a(j) + s_{ACK}(j) + s_{NACK}(j) + s_{SSE}(j) + s_{reSSE}(j) \right]_{n(0),p} \quad (5.10)$$

d) Erro médio da estimativa (\overline{Ee}_s e $\overline{Ee}_{s\%}$)

A métrica Ee_s refere-se à precisão da estimativa obtida pelo método DA. Define-se erro da estimativa do sistema, Ee_s , como a diferença absoluta entre a quantidade real de etiquetas ainda não identificadas, n_r , e a quantidade n_e estimada ao final da Etapa de Convergência Dupla. A estimativa n_e somente é calculada após a rotina SSE atingir o limite mínimo θ_0 que indica $n_b(i) \approx n(i)$. O valor médio \overline{Ee}_s é computado ao final de k simulações por

$$\overline{Ee}_s^{n(0),k} = \frac{1}{k} \sum_{p=1}^k |n_r - n_e|_{n(0),p} \quad (5.11)$$

ou em valores percentuais como

$$\overline{Ee}_{s\%}^{n(0),k} = \frac{1}{k} \sum_{p=1}^k \left| \frac{n_r - n_e}{n_r} \right|_{n(0),p} \quad (5.12)$$

e seu respectivo desvio padrão por

$$\sigma(Ee_s) = \sqrt{\frac{\sum_{p=1}^k [(Ee_s)_p - \overline{Ee}_s]^2}{k}} \quad (5.13)$$

e) Total de inícios e reinícios da rotina SSE (Ti_s e Tr_s)

Na etapa de Convergência Dupla, a rotina SSE reduz sucessivamente a quantidade de etiquetas transmitindo de modo a aproximar-se mais rapidamente em direção aos tamanhos dos quadros ajustados pelo *backlog*. Todavia, por se tratar de um processo probabilístico, a rotina SSE pode ou não ser iniciada (ou seja, pode ou não seguir para a etapa de Convergência Dupla) e pode ou não convergir inicialmente. Sendo assim, a quantidade total de inícios e reinícios da rotina SSE após k simulações realizadas é calculada como

$$Ti_s^{k,n(0)} = \sum_{p=1}^k (i_{SSE}) \quad (5.14)$$

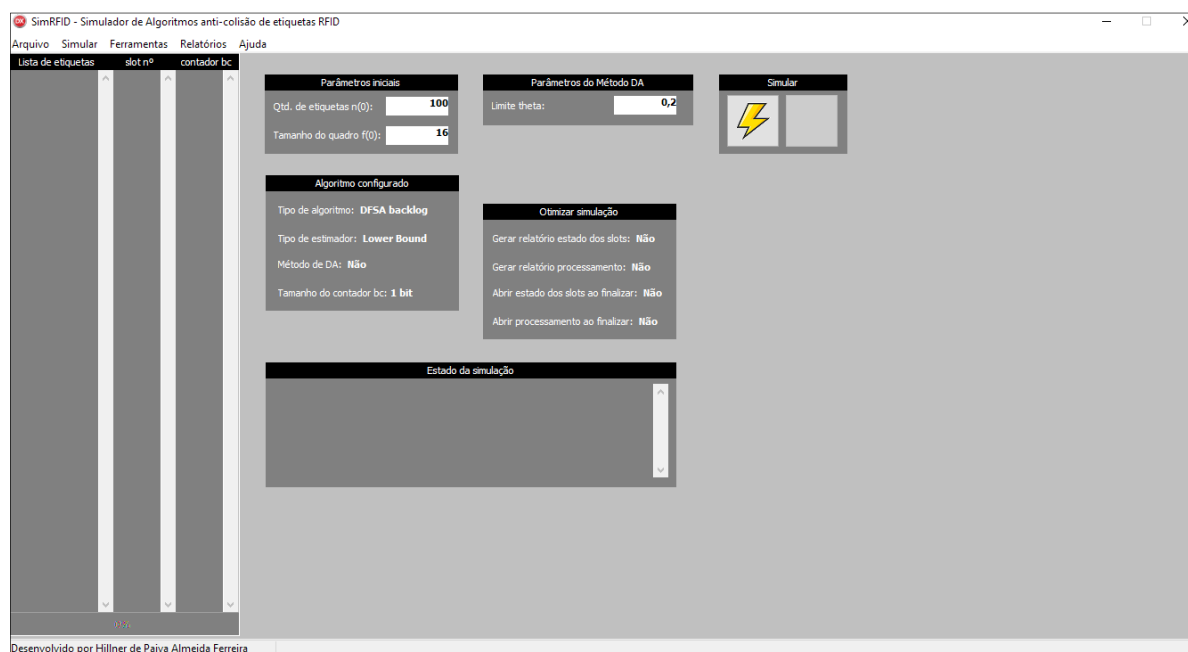
$$Tr_s^{k,n(0)} = \sum_{p=1}^k (r_{SSE}) \quad (5.15)$$

onde i_{SSE} e r_{SSE} indicam o valor 1 quando a rotina for, respectivamente, iniciada ou reiniciada, e 0 caso contrário. A métrica Ti_s também pode representar o total de vezes que o processo de identificação seguiu para a etapa de Convergência Dupla.

5.2. Construção e validação do simulador

Com a intenção de estudar o funcionamento dos algoritmos DFSA e DA-DFSA, foi desenvolvido um *software* capaz de simular as operações de identificação realizadas na camada de enlace de dados. O modelo computacional desenvolvido baseia-se em um sistema RFID UHF passivo genérico caracterizado por um único leitor e múltiplas etiquetas.

A construção do *software* simulador, denominado SimRFID, foi realizada empregando a linguagem de programação *Object Pascal* e implementada através da plataforma de desenvolvimento *Embarcadero Delphi 10 Seattle*. O SimRFID simula o passo-a-passo executado pelos algoritmos DFSA tradicionais (sem o uso do método DA) e pelos algoritmos DA-DFSA (com o uso do método DA) durante o processo de identificação. Ao final, o SimRFID fornece dois tipos de relatórios que permitem a análise completa dos resultados obtidos: um sobre o processamento geral do algoritmo e outro sobre os estados dos *slots* após a leitura de cada quadro (um exemplo de ambos os relatórios pode ser encontrado no anexo desta tese). Na figura 5.1 é ilustrada a interface Windows do SimRFID e a janela de configuração do algoritmo.



(a)

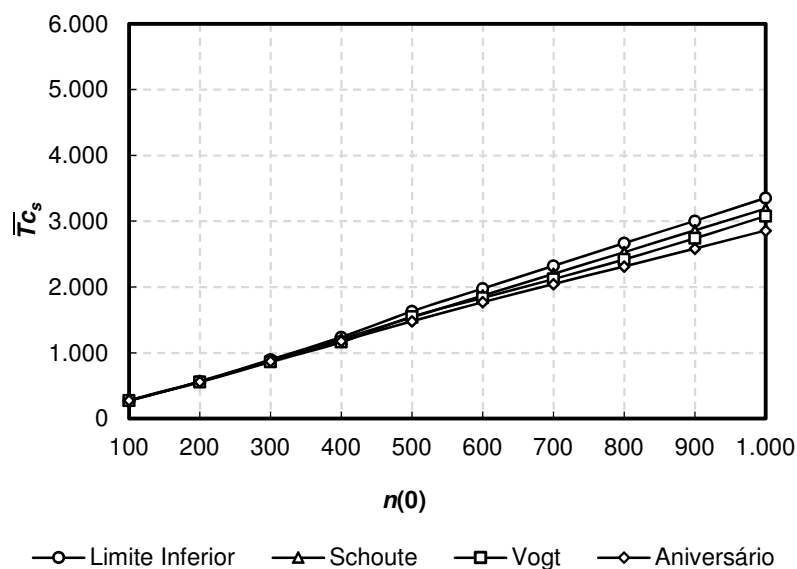


(b)

Figura 5.1: Interface do SimRFID: (a) tela de entrada e (b) parametrização do algoritmo.

Para simular no SimRFID, o usuário deve inserir a quantidade $n(0)$ de etiquetas a serem lidas e o tamanho $f(0)$ preestabelecido para o quadro inicial. Em seguida, deve definir o tipo de algoritmo DFSA e o estimador a ser utilizado. No caso dos algoritmos baseados em estimativas, é possível optar pelo uso ou não do método DA. Ao final de cada simulação, o SimRFID apresenta os procedimentos, variáveis e métricas calculadas.

A validação dos resultados gerados pelo SimRFID é realizada por meio da comparação com resultados divulgados por outros autores. Na figura 5.2(a) é ilustrada a métrica \overline{Tc}_s obtida pelo SimRFID e na figura 5.2(b) seu respectivo resultado apresentado por Shakiba *et al.* [110].



(a)

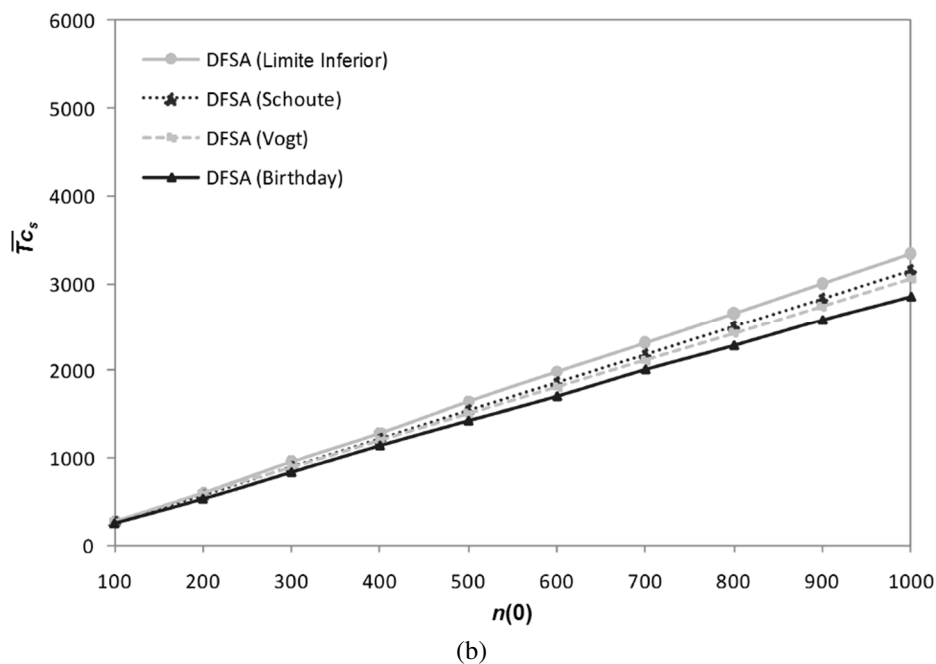
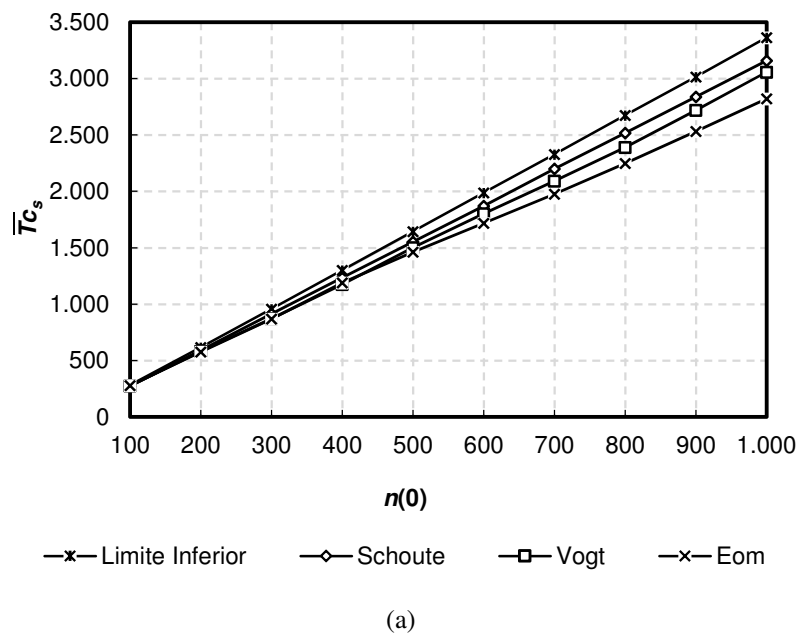


Figura 5.2: Validação dos resultados: (a) SimRFID e (b) Shakiba *et al.* (Adaptado de [110]).

Na figura 5.3(a) é ilustrada a métrica \overline{Tc}_s obtida pelo SimRFID e na figura 5.3(b) seu respectivo resultado apresentado por Eom *et al.* [121].



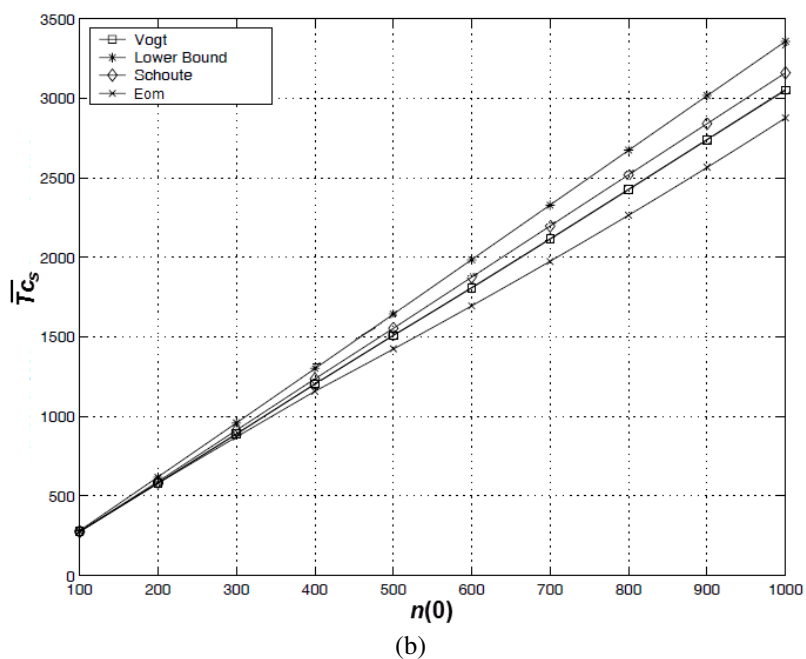
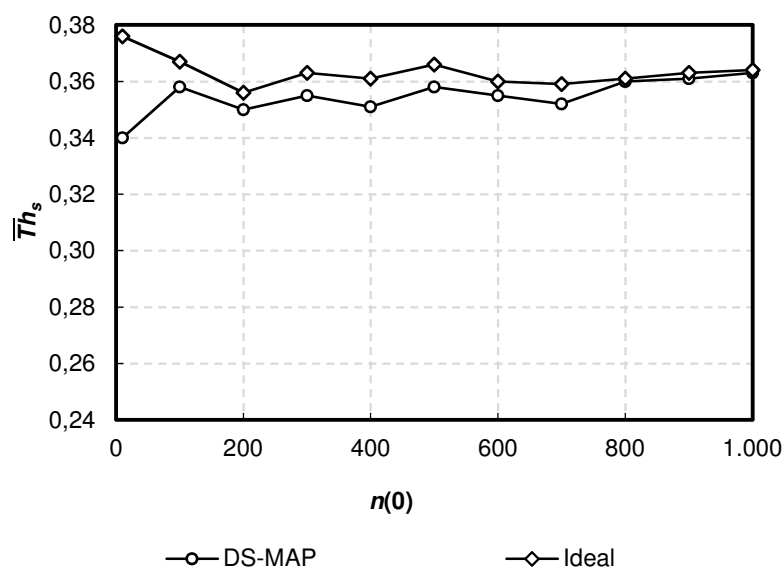


Figura 5.3: Validação dos resultados: (a) SimRFID e (b) Eom *et al.* (Adaptado [121]).

Na figura 5.4(a) é ilustrada a métrica \overline{Th}_s obtida pela SimRFID e na figura 5.4(b) seu resultado apresentando por Chen *et al.* em [117]. O algoritmo Ideal adota o estimador Ideal, ou seja, as quantidades estimadas e reais de etiquetas transmitidas nos quadros são consideradas sempre iguais.



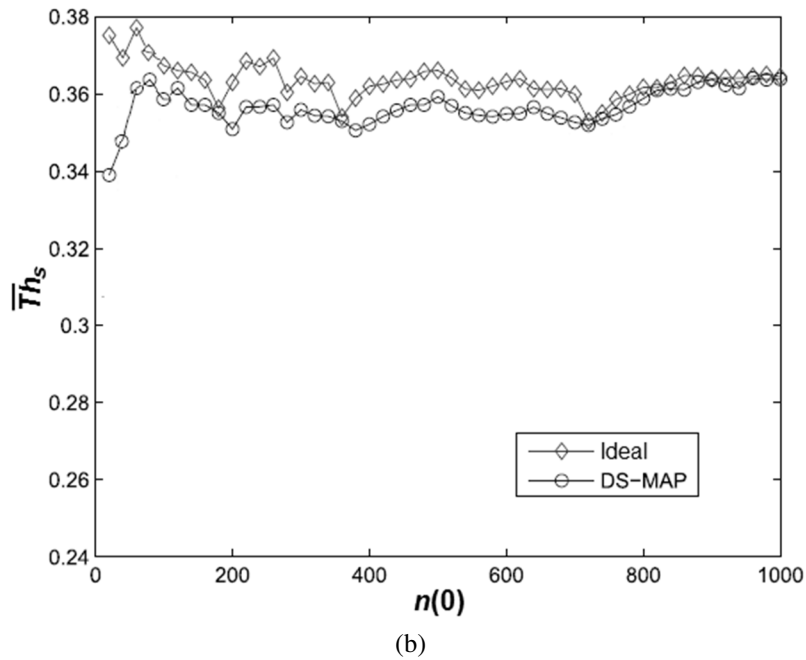


Figura 5.4: Validação dos resultados: (a) SimRFID e (b) Chen *et al.* (Adaptado de [187]).

Considerando as comparações realizadas nas figuras 5.2, 5.3 e 5.4, pode-se concluir que os resultados gerados pelo SimRFID apresentam boa concordância em relação aos resultados simulados pelos autores estudados.

5.3. Parâmetros do método DA

O uso do método DA requer a parametrização do limiar de aproximação a ser alcançado na etapa de Convergência Dupla. A taxa de convergência mínima, θ_0 , representa o valor mínimo a ser atingido pela taxa de transferência do quadro, Th_f , de modo a obter uma estimativa $n_b(i)$ mais precisa que permita o cálculo de n_e . Essa taxa deverá ser alcançada antes da rotina SSE atingir o limite φ_0 preestabelecido. O limitante φ_0 condiciona a execução dos sorteios até uma quantidade mínima de etiquetas que deverão transmitir.

Durante a rotina SSE, os resultados Th_f computados ao final de cada quadro lido orientam sobre a convergência entre $f(i)$ e $n(i)$. Valores Th_f crescem na proporção que os tamanhos dos quadros aproximam-se das quantidades de etiquetas que transmitem nestes mesmos quadros. Na condição $Th_f \geq \theta_0$, verifica-se que $f(i) \approx n(i)$ onde $f(i)$ é ajustado por n_b . Portanto, neste ponto, a quantidade real $n(i)$ aproxima-se da quantidade estimada $n_b(i - 1)$.

É importante destacar que a não convergência da rotina SSE até θ_0 implica no reinício da própria rotina, ou seja, o método DA ajustará o quadro subsequente para o tamanho inicial $f(0)$ e habilitará todas as etiquetas ainda não identificadas a transmitir novamente (o método volta para a etapa de Verificação). Pode-se induzir, portanto, que uma elevada quantidade de reinícios causa instabilidade e reduz o desempenho global do processo de identificação. Na Tabela 5.1 é detalhado o total de reinícios Tr_s da rotina SSE assumindo os limites mínimos $\theta_0 = 0,20, 0,27, 0,34$ para $k = 1.000$ simulações, $\varphi_0 = 3$ (obtido empiricamente por simulação), $f(0) = 16$ e $n(0) = 400$ etiquetas adotando o contador bc com 2 bits.

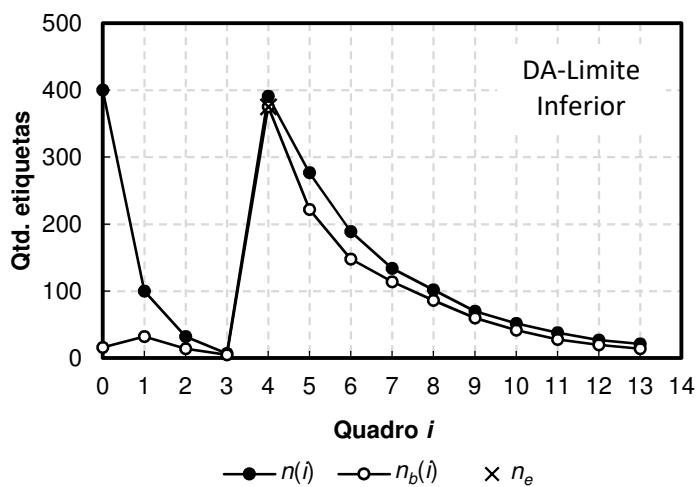
Tabela 5.1: Total de reinícios Tr_s para $k = 1.000$, $n(0) = 400$ e $f(0) = 16$

θ_0	DA-Limite Inferior	DA-Schoute	DA-Vogt	DA-Eom	DA-Aniversário	DA-DS-MAP
0,34	694	327	331	269	740	391
0,27	270	96	61	49	174	86
0,20	35	12	7	1	8	9

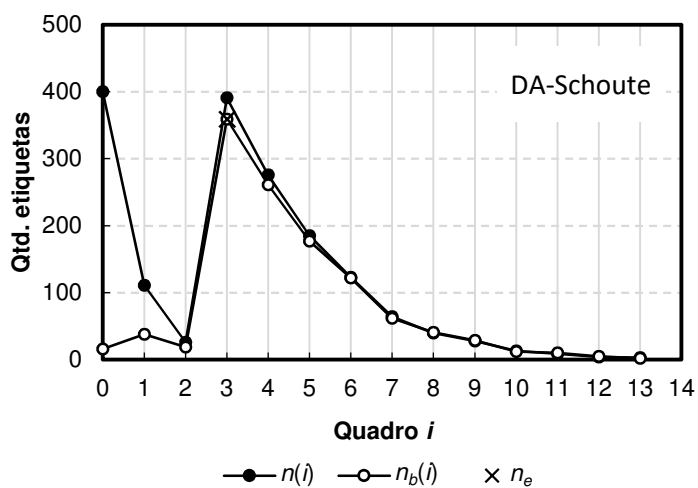
Tomando, por exemplo, o limite $\theta_0 = 0,34$ para o algoritmo DA-Limite Inferior, observa-se um total de 694 reinícios da rotina SSE após $k = 1.000$ simulações realizadas. Essa quantidade é reduzida para 35 reinícios quando θ_0 é ajustado para 0,20. Com o propósito de mitigar os efeitos dos reinícios sobre o desempenho de identificação, adota-se $\theta_0 = 0,20$ como parâmetro preestabelecido para o método DA em todos os estimadores estudados.

5.4. Simulação da convergência

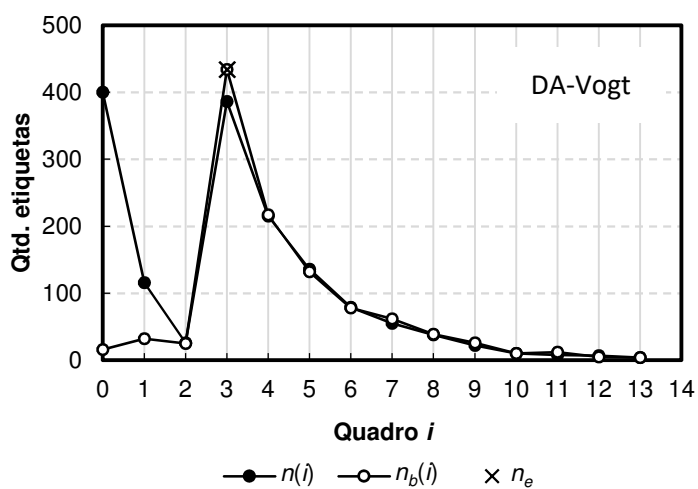
Conforme mencionado no capítulo 4, o método DA realiza uma etapa de Convergência Dupla onde as quantidades de etiquetas transmitidas, $n(i)$, são sistematicamente reduzidas em direção as estimativas $n_b(i)$ calculadas. Ao final, o tamanho do quadro subsequente é ajustado a partir de uma nova estimativa n_e mais precisa. Na figura 5.5 é ilustrada a realização de uma simulação quadro-a-quadro descrevendo o comportamento de $n(i)$, $n_b(i)$ e n_e . As simulações foram obtidas para os algoritmos DA-DFSA utilizando os parâmetros $\theta_0 = 0,20$, $\varphi_0 = 3$, $k = 1$, $f(0) = 16$ para identificar $n(0) = 400$ etiquetas adotando o contador bc de 2 bits.



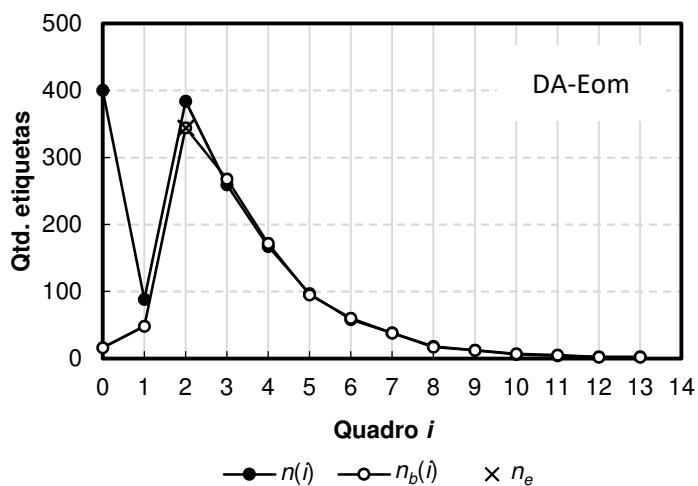
(a)



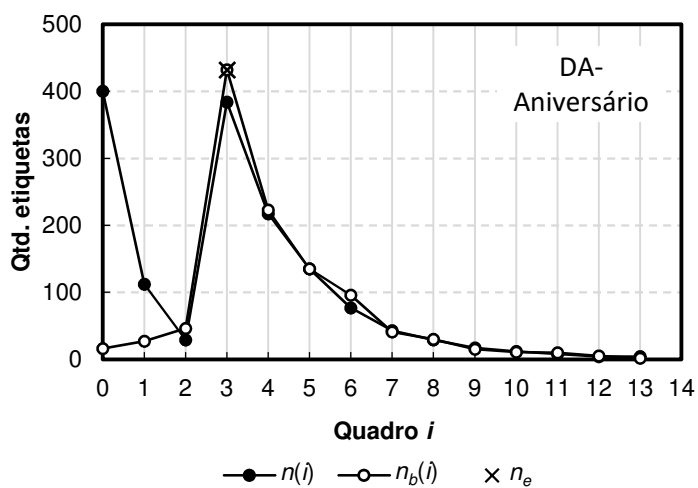
(b)



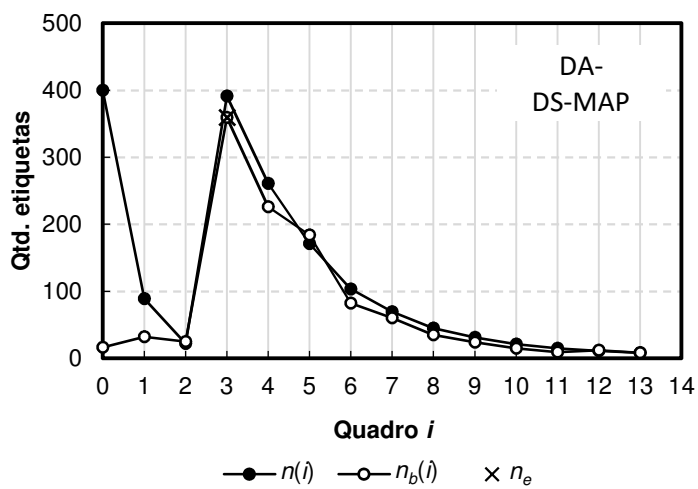
(c)



(d)



(e)



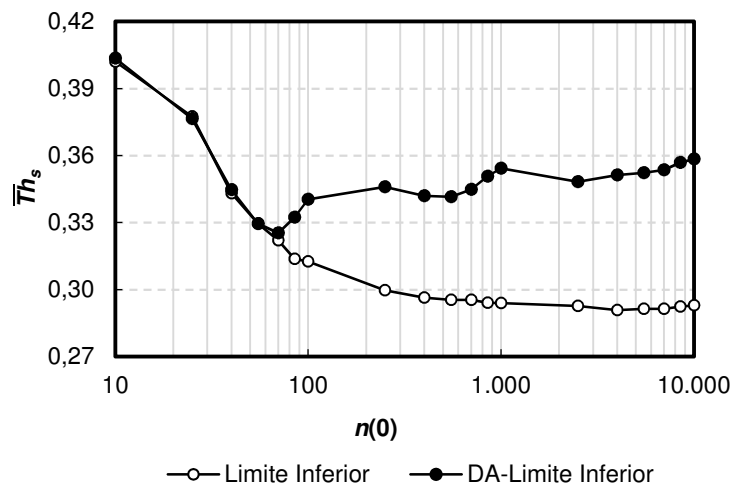
(f)

Figura 5.5: Dupla-Aproximação entre $n(i)$ e $n_b(i)$ utilizando os estimadores (a) Limite Inferior, (b) Schoute, (c) Vogt, (d) Eom-Lee, (e) Aniversário e (f) DS-MAP.

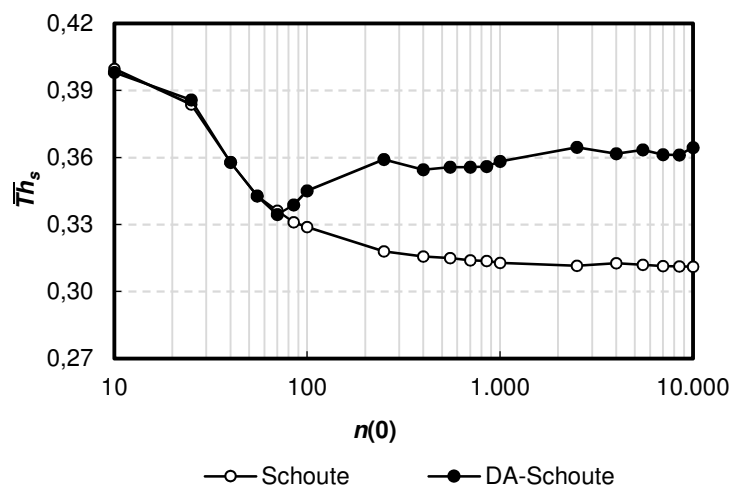
Conforme esperado, é possível verificar que os algoritmos DA-DFSA que utilizam etiquetas contendo contadores bc com 2 bits (ou seja, $\delta_0 = 2$) apresentaram uma redução em cerca de 1/4 na quantidade de etiquetas transmitidas no quadro 1 e, em alguns casos, uma segunda e terceira reduções também de aproximadamente 1/4 nos quadros 2 e 3, respectivamente. Desse modo, o método DA é capaz de ajustar os tamanhos dos primeiros quadros demandando uma menor quantidade de *slots*. Após atingir o limite mínimo θ_0 , os algoritmos DA-DFSA ajustam o tamanho do quadro pela estimativa n_e e o processo de identificação segue para a etapa de Convergência Simples utilizando somente a aproximação pelo *backlog* estimado.

5.5. Comparação do desempenho

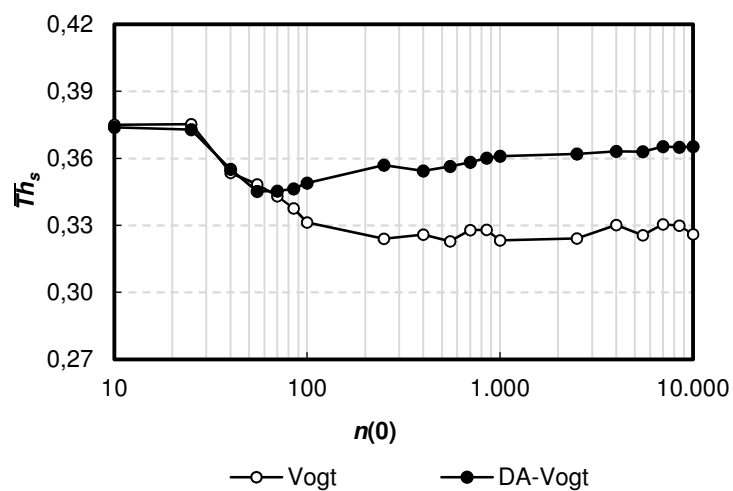
A fim de comparar o desempenho dos algoritmos DA-DFSA em relação as suas respectivas versões DFSA, realizaram-se $k = 1.000$ simulações para cada quantidade $n(0) = 10, 25, 40, 55, 70, 85, 100, 250, 400, 550, 700, 850, 1.000, 2.500, 4.000, 5.500, 7.000, 8.500, 10.000$ etiquetas contendo contadores bc com 2 bits. O tamanho do quadro inicial $f(0) = 16$ foi parametrizado para ambos os algoritmos. Adota-se o parâmetro $\theta_0 = 0,20$ e $\varphi_0 = 3$ para o método DA. Na figura 5.6 é ilustrada a comparação da métrica taxa de transferência média, \overline{Th}_s , entre as respectivas versões dos algoritmos DFSA e DA-DFSA.



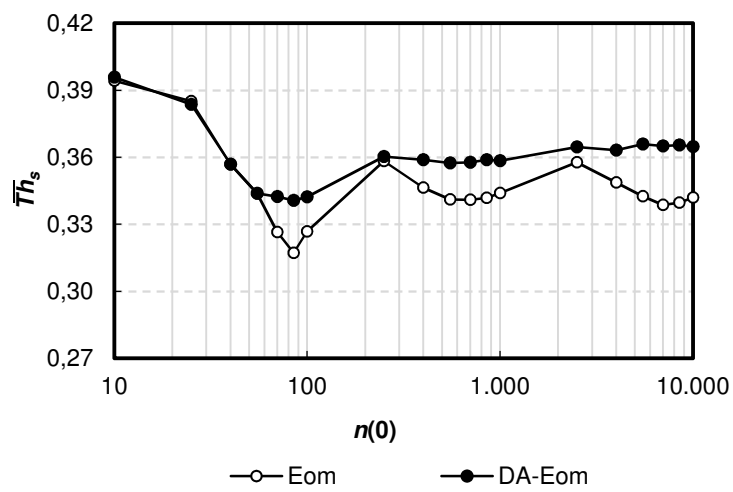
(a)



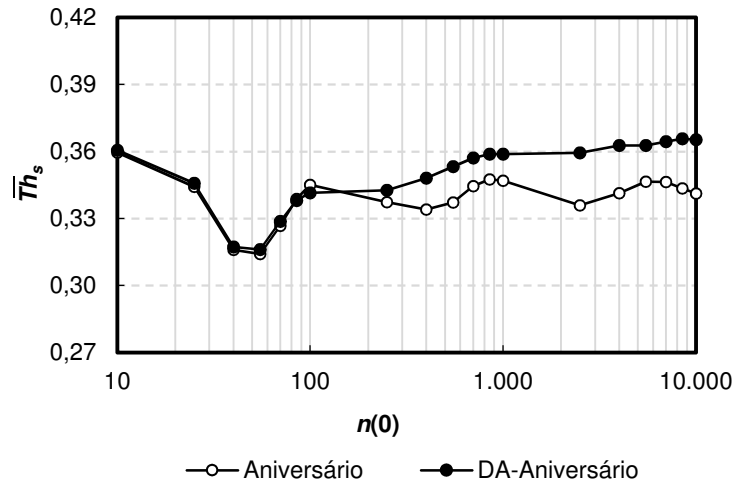
(b)



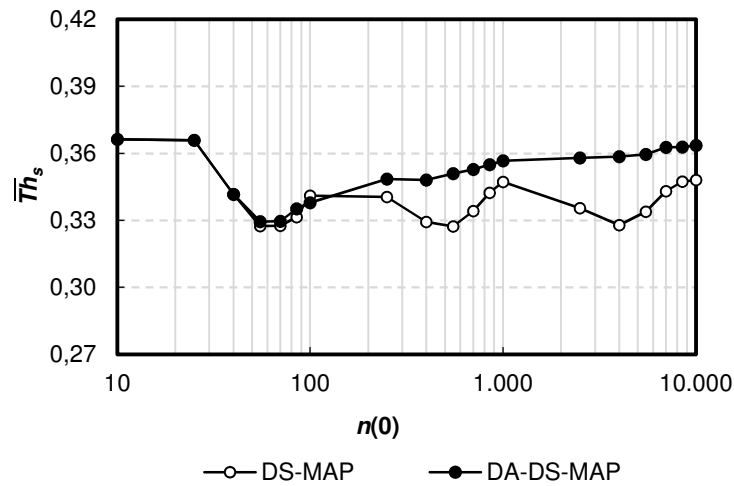
(c)



(d)



(e)



(f)

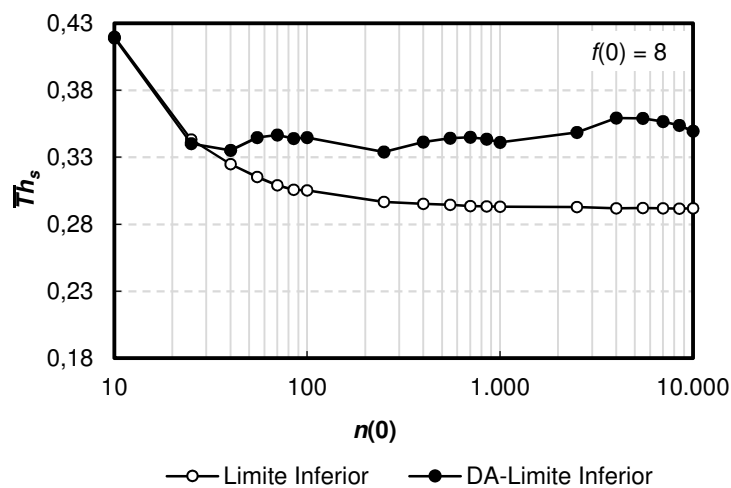
Figura 5.6: Comparação \bar{Th}_s entre os algoritmos DFSA e DA-DFSA utilizando os estimadores (a) Limite Inferior, (b) Schoute, (c) Vogt, (d) Eom-Lee, (e) Aniversário e (f) DS-MAP.

É possível notar que ambos os algoritmos DFSA e DA-DFSA apresentam flutuações no desempenho médio \bar{Th}_s ao longo do intervalo $n(0)$ simulado. Essas variações podem ser explicadas a partir da forma de cálculo e da natureza aleatória dos *slots* (ociosos, lidos e colididos) utilizados no computo das estimativas por cada estimador. Em geral, pode-se verificar que os algoritmos DA-DFSA apresentam um desempenho \bar{Th}_s mais estável em comparação aos algoritmos DFSA.

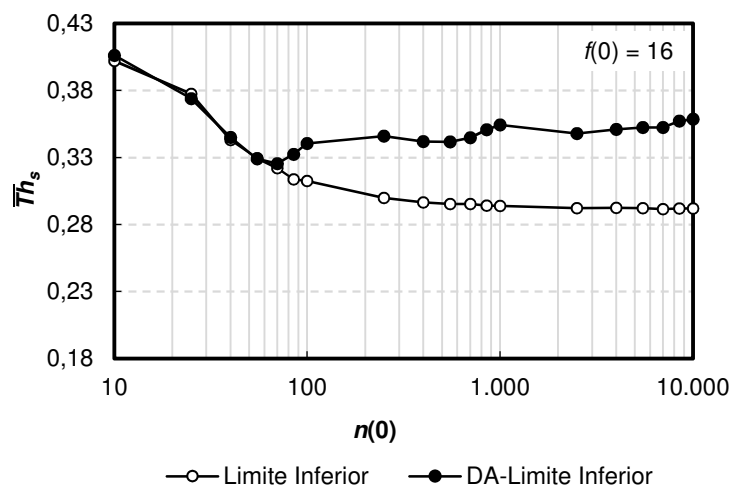
Além disso, é possível observar na figura 5.6 que ambos os algoritmos DFSA e DA-DFSA apresentam desempenhos \overline{Th}_s próximos até $n(0) = 55$ (Limite Inferior, Schoute, Vogt e Eom) e 100 (Aniversário e DS-MAP) etiquetas (valores variam em função de cada estimador). A partir dessas quantidades, o método DA torna-se efetivo e os algoritmos DA-DFSA passam a apresentar taxas \overline{Th}_s maiores em comparação a suas respectivas versões DFSA. Esse ganho no desempenho justifica-se pela maior produtividade dos quadros (maior quantidade de etiquetas identificadas por quadro) uma vez que uma estimativa mais precisa é obtida rapidamente. Como resultado, a demanda de *slots* nos quadros é reduzida.

A condição crítica na qual a operação do método DA torna-se significativa para o algoritmo DFSA depende da relação estabelecida entre $n(0)$ e $f(0)$. Uma vez que $n(0)$ é desconhecido pelo sistema RFID até o fim da identificação, conclui-se que o tamanho $f(0)$ previamente estabelecido determina a condição $c_k(0) = f(0)$ que leva o processo para a etapa de Convergência Dupla.

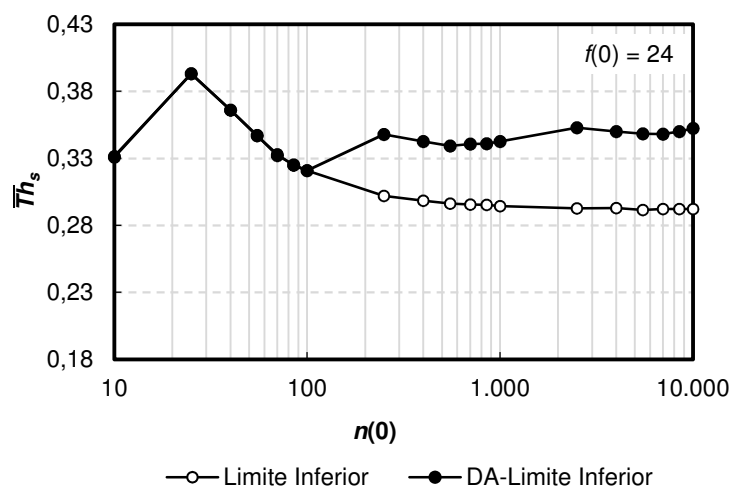
A fim de analisar essa relação, na figura 5.7 é ilustrada a comparação da métrica \overline{Th}_s entre os algoritmos DFSA Limite Inferior e as suas respectivas versões DA-DFSA parametrizadas com os tamanhos iniciais $f(0) = 8, 16, 24$ e 48. É importante destacar que o desempenho \overline{Th}_s em ambos os algoritmos também oscila de acordo com a relação $n(0)$ e $f(0)$ estabelecida.



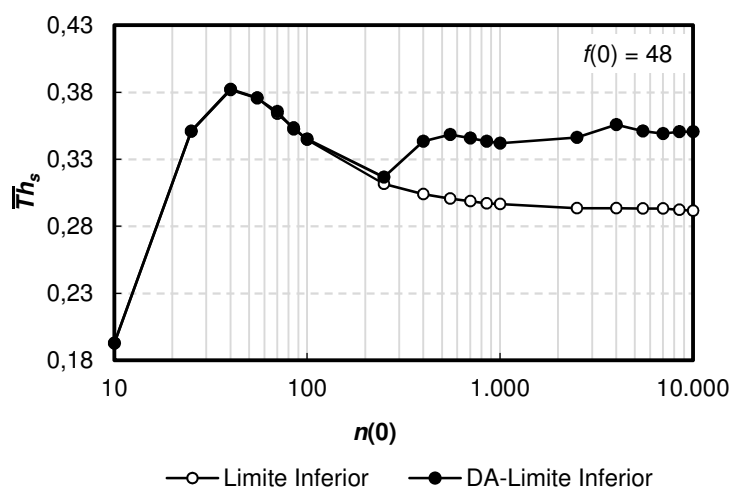
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.7: Comparação \bar{Th}_s entre os algoritmos DFSA e DA-DFSA utilizando o estimador Limite Inferior e os tamanhos $f(0)$ (a) 8, (b) 16, (c) 24 e (d) 48.

Pode-se verificar que valores maiores de $f(0)$ deslocam os ganhos \overline{Th}_s alcançados pelo método DA para quantidades maiores de $n(0)$. Isso ocorre porque mais *slots* colididos são necessários para satisfazer a condição crítica $c_k(0) = f(0)$ que leva o processo para etapa de Convergência Dupla.

Na Tabela 5.2 é descrito o erro médio \overline{Ee}_s e o seu respectivo desvio $\sigma(Ee_s)$ para a estimativa n_e calculada (adota-se $f(0) = 16$). Nos casos em que $n(0) = 10, 25$ e 40 , a condição $c_k(0) = f(0)$ não foi satisfeita e, portanto, o método DA utiliza somente a aproximação pelo *backlog* para identificar todas as etiquetas (o processo não seguiu para a etapa de Convergência Dupla).

Tabela 5.2: $\overline{Ee}_s \pm \sigma(Ee_s)$ para n_e adotando o contador *bc* com 2 bits

$n(0)$	DA-Limite Inferior	DA-Schoute	DA-Vogt	DA-Eom	DA-Aniversário	DA-DS-MAP
55	10 ± 7	13 ± 9	14 ± 10	9 ± 7	12 ± 8	21 ± 13
70	11 ± 9	13 ± 10	14 ± 11	13 ± 10	13 ± 11	22 ± 17
85	12 ± 10	13 ± 11	15 ± 11	14 ± 12	18 ± 22	22 ± 16
100	13 ± 10	15 ± 11	16 ± 12	15 ± 13	21 ± 25	19 ± 16
250	65 ± 21	28 ± 21	30 ± 28	26 ± 20	80 ± 137	40 ± 38
400	119 ± 55	84 ± 47	69 ± 55	38 ± 33	95 ± 124	80 ± 62
550	163 ± 71	89 ± 74	82 ± 64	75 ± 58	99 ± 125	93 ± 71
700	169 ± 122	139 ± 90	93 ± 70	92 ± 68	110 ± 113	121 ± 84
850	132 ± 119	163 ± 112	101 ± 87	98 ± 69	130 ± 103	143 ± 100
1.000	129 ± 100	142 ± 121	109 ± 85	106 ± 93	155 ± 167	153 ± 107
2.500	794 ± 245	347 ± 155	271 ± 206	158 ± 116	492 ± 340	463 ± 292
4.000	1.003 ± 502	653 ± 486	470 ± 380	309 ± 224	601 ± 523	620 ± 402
5.500	1.331 ± 804	705 ± 342	577 ± 357	340 ± 299	659 ± 544	961 ± 396
7.000	1.500 ± 997	1.406 ± 316	651 ± 604	573 ± 449	817 ± 697	951 ± 669
8.500	1.464 ± 990	1.570 ± 917	746 ± 483	812 ± 465	893 ± 678	928 ± 618
10.000	1.515 ± 767	1.015 ± 848	619 ± 448	674 ± 382	962 ± 655	910 ± 393

Na figura 5.8 é ilustrada a métrica \overline{Th}_s para o algoritmo DA-Limite Inferior adotando os contadores bc com 1, 2, 3 e 4 bits para $k = 1.000$ simulações.

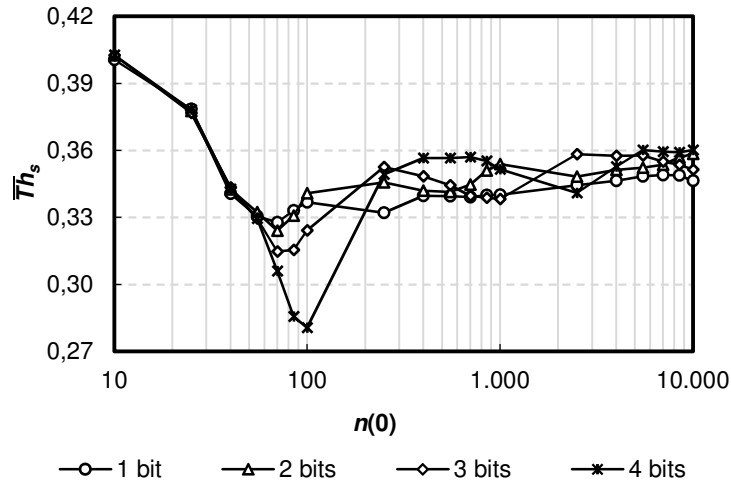


Figura 5.8: Comparação \overline{Th}_s para o algoritmo DA-DFSA utilizando o estimador Limite Inferior e adotando os contadores bc com 1 bit, 2 bits, 3 bits e 4 bits.

É possível notar que os algoritmos DA-DFSA tendem a apresentar desempenhos \overline{Th}_s muito próximos à medida que a quantidade de etiquetas aumenta. Todavia, no intervalo entre $55 \leq n(0) \leq 100$, os algoritmos que utilizam o contador com 3 e 4 bits alcançam \overline{Th}_s menores do que os contadores com 1 e 2 bits. Estes resultados podem ser explicados a partir do erro $\overline{Ee}_s\%$ e da quantidade de inícios Ti_s e reinícios Tr_s na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: $\overline{Ee}_s\%$, Ti_s e Tr_s adotando contadores bc com 1, 2, 3 e 4 bits

$n(0)$	1 bit			2 bits			3 bits			4 bits		
	$\overline{Ee}_s\%$	Ti_s	Tr_s	$\overline{Ee}_s\%$	Ti_s	Tr_s	$\overline{Ee}_s\%$	Ti_s	Tr_s	$\overline{Ee}_s\%^2$	Ti_s	Tr_s
55	15,96%	53	0	21,61%	63	7	48,35%	61	44	-	59	61
70	15,62%	329	0	16,97%	263	23	23,91%	313	193	101,00%	326	385
85	18,57%	672	1	16,53%	604	7	24,29%	591	181	65,34%	601	938
100	22,02%	830	4	14,35%	810	5	21,13%	762	205	46,59%	800	1437

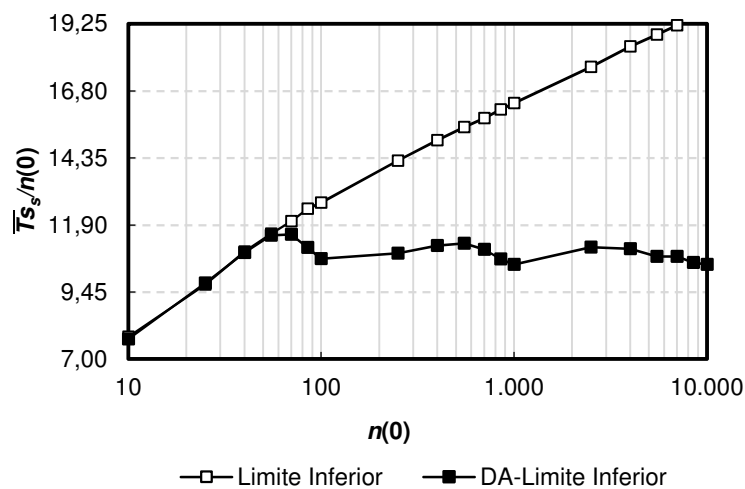
² Para contadores bc com 4 bits e $n(0) = 55$, a rotina SSE não convergiu até θ_0 preestabelecido.

Pode-se observar na Tabela 5.3 que os erros $\overline{Ee}_{s\%}$ utilizando os contadores com 3 e 4 bits são maiores em comparação aos contadores com 1 e 2 bits. O aumento no erro da estimativa n_e pode ser explicado pela menor quantidade de etiquetas que participam da etapa de Convergência Dupla. A ocorrência de uma pequena quantidade $n(0)$ combinada a uma maior quantidade de valores nos quais as etiquetas podem sortear (maior quantidade de bits) reduz significativamente a quantidade de etiquetas que realizam sorteios, tornando-se insuficiente para aproximar a média probabilística em direção à quantidade de etiquetas habilitadas a transmitir.

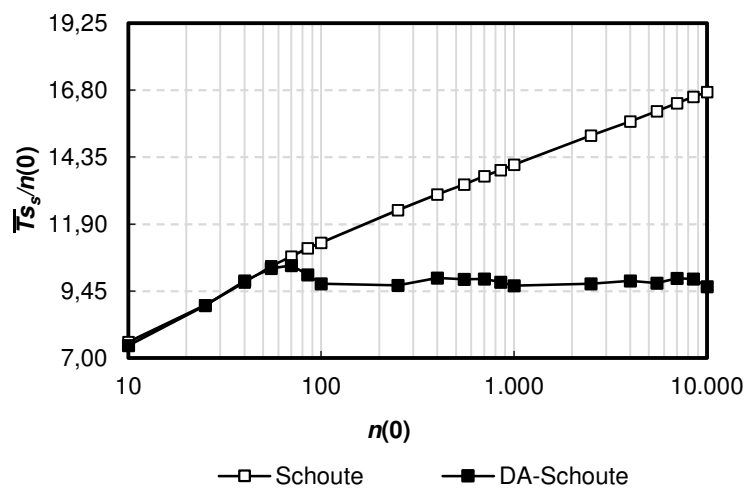
Uma menor quantidade de etiquetas sorteando valores também dificulta o processo de convergência até o limite θ_0 gerando, conseqüentemente, uma maior quantidade Tr_s de reinícios. Uma vez que $n(0)$ é desconhecido pelo sistema até o fim do processo de identificação, uma forma de contornar esse problema é aumentar $f(0)$ de modo a deslocar a execução da etapa de Convergência Dupla para quantidades $n(0) > 100$.

Apesar do alto $\overline{Ee}_{s\%}$ para identificar $n(0) = 55$ etiquetas utilizando contadores com 3 e 4 bits, observa-se na Tabela 5.3 que não houve uma redução relevante da média \overline{Th}_s . Isto ocorre devido ao pequeno número de vezes que as k simulações realizadas seguiram para a etapa de Convergência Dupla (representada pela métrica Ti_s).

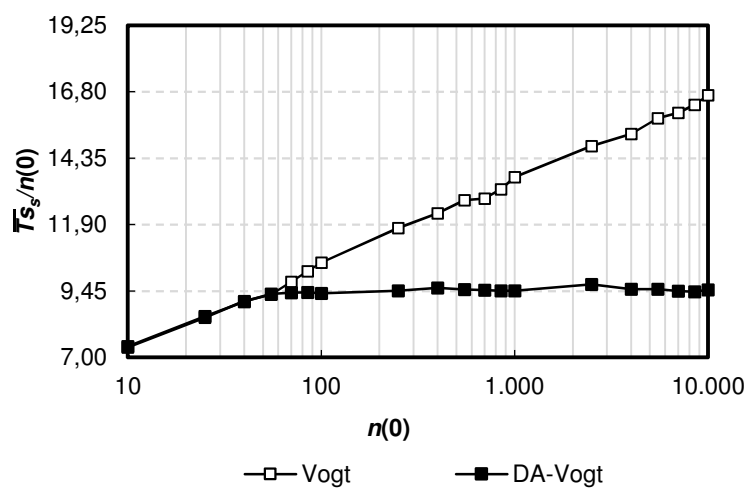
Adotando o contador bc com 2 bits por apresentar maior \overline{Th}_s no intervalo, é ilustrada na figura 5.3 a comparação das quantidades de sinais RFID transmitidos normalizado por etiqueta, $\overline{Ts}_s/n(0)$, entre os algoritmos DFSA e DA-DFSA.



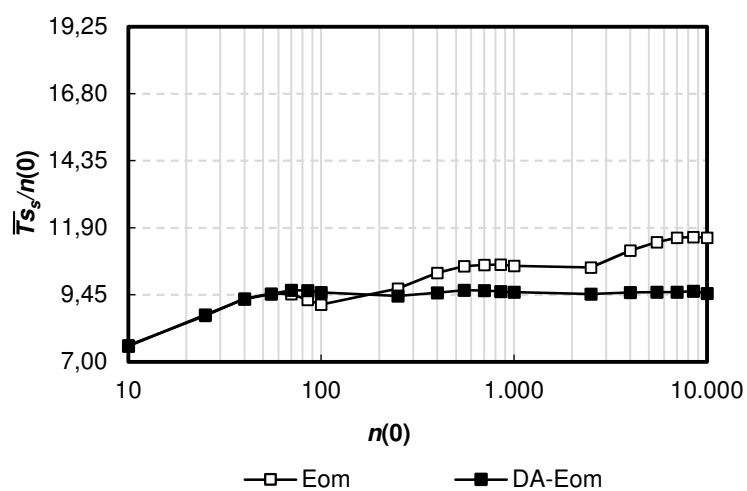
(a)



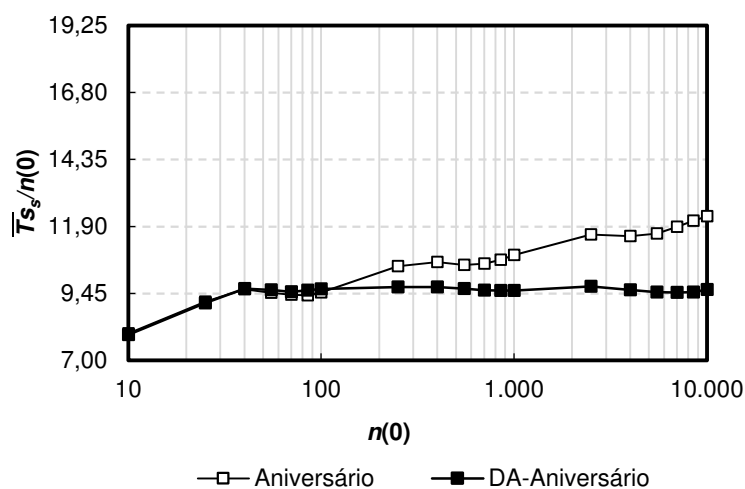
(b)



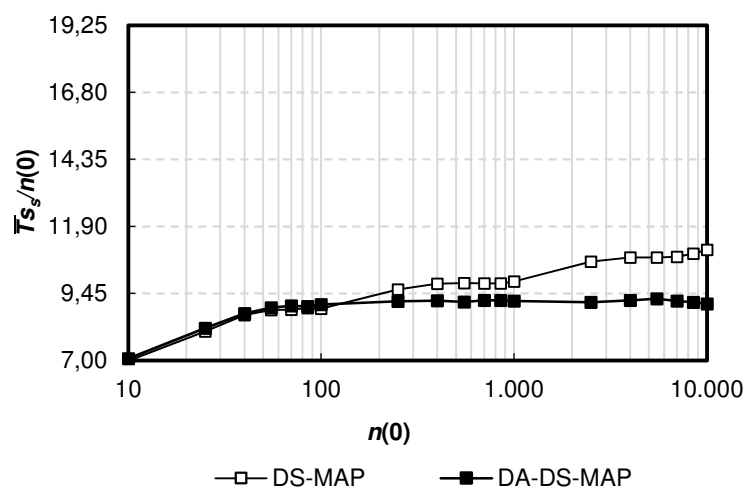
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.9: Comparação $\overline{T}s_s/n(0)$ entre os algoritmos DFSA e DA-DFSA utilizando os estimadores (a) Limite Inferior, (b) Schoute, (c) Vogt, (d) Eom-Lee, (e) Aniversário e (f) DS-MAP.

Comparativamente aos algoritmos DFSA, observa-se que os algoritmos DA-DFSA apresentam uma redução na demanda média $\overline{T}s_s/n(0)$ após o efetivo início do método DA. Pode-se concluir, portanto, que a dupla convergência produzida pelo método reduz a demanda de sinais RFID transmitidos para identificar cada etiqueta na zona de interrogação. Como resultado, menos sinais RFID trafegam no canal e um menor nível de interferências entre sinais pode ser alcançado.

Investigando com maiores detalhes o tráfego de sinais entre leitor e etiquetas, na Tabela 5.4 é descrita a quantidade média $\overline{T}_{s_{e \rightarrow l}}$ transmitida pelos algoritmos DFSA e DA-DFSA na identificação de $n(0) = 1.000$ etiquetas.

Tabela 5.4: Quantidade $\overline{T}_{s_{e \rightarrow l}}$ algoritmos DFSA e DA-DFSA para $n(0) = 1.000$

Estimadores	DFSA	DA-DFSA	$\Delta\overline{T}_{s_s}$	Redução
Limite Inferior	10.223	5.622	-4.601	45,01%
Schoute	8.523	5.044	-3.479	40,82%
Vogt	8.410	4.922	-3.488	41,47%
Eom-Lee	5.678	4.663	-1.015	17,88%
Aniversário	6.014	4.786	-1.228	20,42%
DS-MAP	5.976	5.040	-936	15,66%

Uma vez que nenhuma etiqueta transmite em *slots* ociosos e apenas uma única etiqueta transmite em *slots* lidos com sucesso, é possível concluir que a diminuição na quantidade média $\overline{T}_{s_{e \rightarrow l}}$ ocorre nos *slots* colididos. Em comparação com os algoritmos DFSA, observa-se uma redução entre 15% e 45% na quantidade de sinais simultaneamente transmitidos pelas etiquetas para os algoritmos DA-DFSA. Na Tabela 5.5 é exibida a quantidade média de sinais $\overline{T}_{s_{l \rightarrow e}}$ pelos algoritmos DFSA e DA-DFSA para identificar $n(0) = 1.000$ etiquetas.

Tabela 5.5: Quantidade $\overline{T}_{s_{l \rightarrow e}}$ algoritmos DFSA e DA-DFSA para $n(0) = 1.000$

Estimadores	DFSA	DA-DFSA	$\Delta\overline{T}_{s_s}$	Redução
Limite Inferior	6.123	4.836	-1.287	21,02%
Schoute	5.550	4.605	-945	17,03%
Vogt	5.240	4.539	-701	13,38%
Eom-Lee	4.831	4.489	-342	7,08%
Aniversário	4.846	4.473	-373	7,70%
DS-MAP	3.900	3.726	-174	4,46%

Pode-se observar na Tabela 5.5 uma redução entre 4,46% e 21,02% na quantidade de sinais transmitidos no sentido leitor para etiquetas. Esse resultado demonstra que, apesar da inserção do novo comando *resetSSE* e da substituição eventual do comando *QueryAdjust* por *QueryAdjustSSE*, todos os algoritmos DA-DFSA apresentaram uma redução na quantidade de sinais transmitidos pelo leitor.

Capítulo 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A principal contribuição dessa tese foi desenvolver um novo método capaz de aperfeiçoar o desempenho dos algoritmos DFSA em sistemas RFID UHF passivos. Tendo em vista que esses sistemas são cada vez mais aplicados na identificação automática de várias quantidades de etiquetas (desde dezenas, centenas até milhares de etiquetas), as pesquisas foram conduzidas até o estudo de um cenário crítico de operação, mais especificamente, nos casos onde a quantidade de etiquetas a serem lidas é muito maior do que o tamanho do quadro inicialmente estabelecido para o algoritmo DFSA.

No ambiente de laboratório, foi realizado um experimento que investigou o impacto da relação entre o tamanho do quadro inicial e a quantidade de etiquetas a serem lidas sobre o processo de identificação. Um leitor RFID UHF passivo comercial programado para operar utilizando o Algoritmo Q (algoritmo DFSA baseado em potência de 2) foi parametrizado com o tamanho do quadro inicial fixo e menor do que a quantidade de etiquetas a serem lidas. As medições realizadas indicaram que a qualidade média dos sinais captados das etiquetas identificadas tendia a diminuir à medida que a quantidade de etiquetas na zona de interrogação aumentava em relação ao tamanho do quadro inicial.

Com o propósito de acelerar a convergência entre os tamanhos dos primeiros quadros e a quantidade de etiquetas a serem lidas, o método de Dupla-Aproximação (DA) desenvolvido insere uma nova etapa de Convergência Dupla dentro da operação de identificação dos algoritmos DFSA baseados em estimativas. Nesta etapa, a rotina SSE proposta reduz temporariamente e sistematicamente as quantidades de etiquetas transmitidas nos quadros de modo a convergir mais rapidamente em direção aos tamanhos dos quadros ajustados pelas estimativas do *backlog*. Após alcançar o limite de convergência preestabelecido, uma estimativa mais precisa para a quantidade total de etiquetas ainda não identificadas é calculada. Depois de ajustado o tamanho do quadro em função dessa nova estimativa, as etiquetas temporariamente desabilitadas retornam a transmitir e o processo de identificação continua identificando as demais etiquetas na zona de interrogação utilizando somente a aproximação pela estimativa do *backlog*.

Resultados simulados mostraram que a rápida convergência alcançada pelos algoritmos DA-DFSA (algoritmos DFSA que utilizam o método DA) produzem, no cenário crítico de operação, taxas de transferência médias maiores e mais estáveis (ou seja, com menor flutuação) em comparação aos algoritmos DFSA tradicionais (ou seja, sem o uso do método DA). Além disso, a operação da rotina SSE também promoveu uma redução na demanda de sinais RFID transmitidos, tanto no sentido leitor para etiquetas quanto no sentido etiquetas para leitor. Em ambientes reais de operação RFID, um menor tráfego de sinais UHF contribui para mitigar a ocorrência de interferências tais como o efeito multipercurso.

Como desvantagem, observou-se que o método DA produziu um menor desempenho de identificação em cenários com pequenas quantidades de etiquetas participando da etapa de Convergência Dupla. Neste caso, o método desenvolvido apresentou altas taxas de erro na estimativa do total de etiquetas ainda não identificadas ou uma elevada quantidade de reinícios. Entretanto, verificou-se também que esse problema poderia ser contornado aumentando o tamanho do quadro inicial de modo a deslocar a execução da etapa de Convergência Dupla para quantidades maiores de etiquetas.

Por fim, assumindo que a energia consumida pelas etiquetas para sortear os valores do contador bc seja menor do que a energia consumida para transmitir até o leitor, considera-se o método DA como uma excelente alternativa na redução do consumo de energia também para os sistemas RFID UHF que utilizam o algoritmo DFSA e etiquetas ativas (ou seja, etiquetas que possuem bateria própria), principalmente em aplicações que demandam a identificação de grandes volumes de etiquetas.

6.1. Trabalhos futuros

O desenvolvimento do método DA estabelece um primeiro passo na elaboração de uma abordagem robusta e praticável baseada em dupla aproximação. Neste sentido, a presente tese sugere duas novas pesquisas relacionadas à:

- Um método DA modificado para algoritmos determinísticos;
- Análise do desempenho dos algoritmos DA-DFSA em ambientes com altos níveis de interferência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] In Lee. *RFID Technology Integration for Business Performance Improvement*. Business Science Reference, Hershey, EUA, 2015.
- [2] João Paulo Ajala Sorgato, Claudia Beatriz Lopes Almeida e Ibsen Mateus Bittencourt. Transferência de Tecnologia e Negócios de Impacto Social: Um Estudo sobre o Estado da Arte nos Últimos 10 anos. *Cadernos de Prospecção*, 12(1): 48–58, 2019.
- [3] ZongWei Luo. *Innovations in Logistics and Supply Chain Management Technologies for Dynamic Economies*. IGI Global, Hershey, EUA, 2012.
- [4] David B. Grant. *Gestão de Logística e Cadeia de Suprimentos*. Saraiva, São Paulo, Brasil 2014.
- [5] Bruno Alves da Cruz, Charles Henrique R. Francisco Rosa e Waldirene da Silva. *Sistema de Informação Aplicados à Cadeia Logística para Aumento da Assertividade das Operações*. *Semana Acadêmica Revista Científica*, 17(1):1–16, 2019.
- [6] Eduardo Festa e Maria Rita Pontes Assumpção. *Uso da Tecnologia de Informação e Desempenho Logístico na Cadeia Produtiva de Eletrônicos*. *Revista Ciência & Tecnologia*, 17(33):7–23, 2012.
- [7] Amy Phillips, Paige Baltzan. *Sistemas de Informação - Série A*. McGraw-Hill, Nova York, EUA, 2012.
- [8] Chia-Chen Chao, Jiann-Min Yang, Wen-Yuan Jen, *Determining Technology Trends and Forecasts of RFID by a Historical Review and Bibliometric Analysis from 1991 to 2005*. Technovation: Elsevier, EUA, 2007.
- [9] Hervé Chabanne, Pascal Urien e Jean-Ferdinand Susini. *RFID and the Internet of Things*. John Wiley & Sons, Hoboken, EUA, 2011.

- [10] Stefania Bartoletti, Nicolò Decarli, Davide Dardari, Marco Chiani e Andrea Conti. Order-of-Arrival of Tagged Objects. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 2(4):185–196, 2018.
- [11] Klaus Finkenzeller. *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication*. Wiley & Sons, Wiltshire, Reino Unido, 2010.
- [12] Stefan Hofmayr. *Analysis and Comparison of the Potential of RFID-technology in European and U.S. Retail Supply Chains*. Vienna University of Economics and Business Administration, Dissertação de mestrado, 2012.
- [13] Alp Ustundag. *The Value of RFID: Benefits vs. Costs*. Springer Science Business Media, Peru, 2013.
- [14] Nemai Chandra Karmarkar. *Advanced RFID Systems, Security, and Applications*. IGI Global, Hershey, EUA, 2013.
- [15] L. Roselli. *Green RFID Systems*. Cambridge University Press, Reino Unido, 2014.
- [16] Rafael Perazzo Barbosa Mota. *Mecanismo para a Melhoria do Desempenho de Sistemas RFID Passivos*. Universidade de São Paulo, Tese de doutorado, 2015.
- [17] Osvaldo Torezan Neto, Luiz Ariosvaldo Fabri Junior e Marli de Freitas Gomes Hernandez. *Abordagem sobre a Tecnologia RFID UHF e suas Aplicações*. *Perspectivas em Ciências Tecnológicas*, 4(4):135–147, 2015.
- [18] D.-Y. Kim, J.-G. Yook, H.-G. Yoon e B.-J. Jang. *Interference Analysis of UHF RFID Systems*. *Progress In Electromagnetics Research*, 4(1):115–126, 2008.
- [19] Sudhir Bhaskar, Bidisha Barman e Amit Kumar Singh. Circularly Polarized Meander Line Cross Dipole Antenna for UHF RFID Applications. *URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC)*, Nova Delhi, Índia, 2019.
- [20] Nemai Chandra Karmakar. *Handbook of Smart Antennas for RFID Systems*. John Wiley & Sons, Nova Jersey, EUA, 2010.

- [21] Chun-Fu Lin, Frank Yeong-Sung Lin. Efficient Estimation and Collision-Group-Based Anticollision Algorithms for Dynamic Frame-Slotted ALOHA in RFID Networks. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 7(4):840–848, 2010.
- [22] Abdoul Aziz Mbacke, Nathalie Mitton e Hervé Rivano. A Survey of RFID Readers Anticollision Protocols. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 2(1):38–48, 2018.
- [23] S. Rani Muthu e C. P. Indumathi. Empirical Perusal on Anti-collision Algorithms of RFID Tags. *IEEE International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies*, pages 764–768, Ramanathapuram, Índia, 2014.
- [24] Aiguo Li e Weikang Yang. Dynamic Frame Slotted ALOHA Algorithm Based on Improved Tag Estimation. *10th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, pages 328–331, Zhejiang, China, 2018.
- [25] Dheeraj K. Klair, Kwan-Wu Chin e Raad Raad. A Survey and Tutorial of RFID Anti-Collision Protocols. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 12(3):400–421, 2010.
- [26] Walfredo da Costa Lucena Filho. *Mecanismo de Controle de Potência para Estimativa de Etiquetas em Redes de Identificação por Rádio Frequência*. Universidade Federal do Amazonas. Dissertação de mestrado, 2015.
- [27] Haifeng Wu e Yu Zeng. Passive RFID Tag Anticollision Algorithm for Capture Effect. *IEEE Sensors Journal*, 15(1):218–226, 2015.
- [28] Jae Sung Choi, Mingon Kang, Ramez Elmasri e Daniel Engels. Investigation of Impact Factors for Variou Performances of Passive UHF RFID System. *IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications*, pages 152–159, 2011.
- [29] Rafael Perazzo Barbosa Mota e Daniel M. Batista. An Easy to Implement and Energy-saving Anti-Collision Algorithm for RFID Systems. *9th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*, Rostov on Don, Rússia, 2015.

- [30] Xiaohui Lu, Zhihong Qian, Yanhang Zhao e Yuqi Guo. An Adaptive Tag Anti-Collision Protocol in RFID Wireless Systems. *China Communications*, 11(7):117–127, 2014.
- [31] Harvey Lehpamer. *RFID Design Principles*. Artech House Digital, Norwood, EUA, 2012.
- [32] Huseyin Caferoglu e Martin G. Moehrle. Measuring Technology Diffusion for the Case of RFID Technology. *Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)*, Honolulu, EUA, 2018.
- [33] Youlin Zhang, Shigang Chen, You Zhou e Olufemi Odegbile. Missing-Tag Detection With Presence of Unknown Tags. *15th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON)*, Hong Kong, China, 2018.
- [34] J. Landt. The history of RFID. *IEEE Potentials*, 24(4):8–11, 2005.
- [35] Arnaud Vena, Etienne Perret e Smail Tedjini. Chipless RFID Tag Using Hybrid Coding Technique. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 59(12):3356–3364, 2011.
- [36] Daniel M. Dobkin. *The RF in RFID, Second Edition: UHF RFID in Practice*. Elsevier, Nova York, 2007.
- [37] Simone Zuffanelli. *Antenna Design Solutions for RFID Tags Based on Metamaterial-Inspired Resonators and Other Resonant Structures*. Springer Theses, Suíça, 2018.
- [38] Kashif Ali. *Enabling Ultra Large-Scale Radio Identification Systems*. Queen's University. Tese de doutorado, 2011.
- [39] Harald Vogt. Efficient Object Identification with Passive RFID Tags. *2th Proceedings of the First International Conference on Pervasive Computing*, pages 98–113, Zurique, Suíça, 2002.

- [40] Paulo Cesar Crepaldi e Tales Cleber Pimenta. *Introductory Chapter: RFID: A Successful History*. IntechOpen, 2017.
- [41] Sun-Youb Kim, Jung-Ki Lee, Seung-Woo Lee, Hyoung-Keun Park e Yu-Chan Ra. A Study on Control Method to Reduce Collisions and Interferences between Multiple RFID readers and RFID tag. *International Conference on New Trends in Information and Service Science*, page 339–343, Beijing, China, 2009.
- [42] Cristiano Manhães de Oliveira, Tiago Andrade Muniz Terra, Edson Terra Azevedo Filho, Mozart Caetano Heymann e Italo de Oliveira Matias. RFID nos Cuidados com a Saúde: uma Revisão de Mapeamento Sistemático. *ACTA Biomedica Brasileira*, 9(1):48–61, 2018.
- [43] Xuefei Leng. *Lightweight RFID Authentication Protocols for Special Schemes*. Universidade de Londres. Tese de doutorado, 2011.
- [44] Muhammad Shahzad e Alex X. Liu. Probabilistic Optimal Tree Hopping for RFID Identification. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 23(3):796–809, 2015.
- [45] Flavio Maia, Carlos Henrique da Silva Santos e Alexandre Alvaro. Outlining Low Costs and Open Embedded Systems for RFID in Internet of Things Applications. *IEEE Brasil RFID*, São Paulo, 2014.
- [46] Juho Partanen. *History of RFID*. RAIN RFID Alliance, 2015.
- [47] Hadi Farhat, Plamen Iliev, Philippe Marriage e Nathalie Rolland. An Added Value Alternative to RAIN RFID Items Characterization in Retail. *IEEE Access*, 6:32430–32439, 2018.
- [48] Petar Šolic, Zoran Blažević, Maja Škiljo e Luigi Patrono. Impact of Tag Responsiveness on Gen2 RFID Throughput. *IEEE Communications Letters*, 20(11):2181–2184, 2016.
- [49] Haifeng Wu, Yang Wang e Yu Zeng. Capture-aware Bayesian RFID Tag Estimate for Large-scale Identification. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 5(1):119–127, 2018.

- [50] Zhonghua Li, Chunhui He e Hong-Zhou Tan. An Enhanced Tag Estimation Method Applied to Tag Anti-collision Algorithm in RFID Systems. *International Conference on Information Science and Technology*, Nanjing, China, 2011.
- [51] Secretaria Executiva da Câmara de Comércio Exterior do Brasil. Resolução nº 61 de 31 agosto 2018. Disponível em: <http://www.camex.gov.br/lista-de-resolucoes-camex-vigor/2089-resolucao-n-61-de-31-de-agosto-de-2018>. Acesso em 26 de abr. 2019.
- [52] Nicolò Decarli, Massimo del Prete, Diego Masotti, Davide Dardari e Alessandra Costanzo. High-Accuracy Localization of Passive Tags With Multisine Excitations. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 66(12):5894–5908, 2018.
- [53] Marco Fantuzzi, Diego Masotti e Alessandra Costanzo. Rectenna array with RF-Uncoupled Closely-spaced Monopoles for Autonomous Localization. *Proceedings of the 48th European Microwave Conference*, Madrid, Espanha, 2018.
- [54] Shital D. Bachpalle e Minakshi R. Shinde. Integration of Sensors for Location Tracking using Internet of Things. *International Conference on Information, Communication, Engineering and Technology (ICICET)*, Pune, Índia, 2018.
- [55] Andrea Michel, Vittorio Franchina, Paolo Nepa e Alfredo Salvatore. A UHF RFID Tag Embeddable in Small Metal Cavities. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 67(2):1374–1379, 2018.
- [56] Devaka Jayawardana e Ranijith Liyanapathirana. UHF RFID-Based Low-Power Wireless Sensor Development for Infrastructure Health Monitoring: Issues in Metallic Environments. *2nd International Conference on Electrical Engineering (EECon)*, Colombo, Sri Lanka, 2018.
- [57] Wang Lan e Yu Jianguo. A Novel UHF-RFID Tag Using a Planar Inverted-F Antenna Mountable on the Metallic Objects. *IEEE International Conference on Computer and Communication Engineering Technology (CCET)*, Beijin, China, 2018.

- [58] Ali Imam Sunny, Jun Zhang, Gui Yun Tian, Chaoqing Tang, Waqas Rafique, Aobo Zhao e Mengbao Fan. Temperature Independent Defect Monitoring using Passive Wireless RFID Sensing System. *IEEE Sensors Journal*, 19(4):1525–1532, 2019.
- [59] Larry M. Arjomandi e Nemai C. Karmakar. An Enhanced Chipless RFID System in 60 GHz Using Pattern Recognition Techniques. *Proceedings of the 48th European Microwave Conference (EuMC)*, Madrid, Espanha, 2018.
- [60] Laura Corchia, Giuseppina Monti e Luciano Tarricone. A Fully-Textile Chipless Tag. *Proceedings of the 48th European Microwave Conference*, Madrid, Espanha, 2018.
- [61] Vijay Sharma, Sambhav Malhotra e Dr. Mohammad S. Hashmi. Orientation Independent Printable Backscattering Chipless RFID Tags Based on L-Resonator. *Proceedings of the 48th European Microwave Conference*, Madrid, Espanha, 2018.
- [62] Vijay Sharma e Mohammad Hashmi. Simple Chipless RFID Tag Configurations. *IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*, Auckland, Nova Zelândia, 2018.
- [63] Vijay Sharma, Amogh Vithalkar e Mohammad Hashmi. Power Saving Method in Chipless RFID Reader for IoT Applications. *IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*, Auckland, Nova Zelândia, 2018.
- [64] Kyuwon Han, Sang Hyun Mo, Hoesung Yang e Kangbok Lee. An Enhanced Range Estimation Algorithm based on Trimmed WPD for Passive UHF RFID Systems. *International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, Jeju, Coréa do Sul, 2018.
- [65] Mustapha Benssalah, Mustapha Djeddou e Karim Drouiche. A Secure RFID Authentication Scheme for Healthcare Environments Based on Digital Signature Algorithm. *International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, Roma, Itália, 2018.

- [66] Ivana Strumberger, Eva Tuba, Nebojsa Bacanin, Marko Beko e Milan Tuba. Modified Monarch Butterfly Optimization Algorithm for RFID Network Planning. *6th International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*, Rabat, Marrocos, 2018.
- [67] Madiha Khalid, Umar Khokhar e Muhammad Najam-ul-Islam. Advance Strong Authentication Strong Integrity (ASASI) Protocol for Low Cost Radio Frequency Identification. *International Conference on Smart Computing and Electronic Enterprise. (ICSCEE2018)*, Shah Alam, Malásia, 2018.
- [68] GTA/UFRJ Grupo de Teleinformática e Automação. *RFID - Identificação por Rádio Frequência*. Disponível em: https://www.gta.ufrj.br/grad/15_1/rfid/tecnologia.html. Acesso em 7 de dez. 2018.
- [69] Dr Faizul Nisha. Implementation of RFID Technology at Defence Science Library, DESIDOC: A Case Study. *DESIDOC Journal of Library & Information Technology*, 38(1):27–33, 2018.
- [70] Antonio Batocchio. Uma Visão Geral sobre RFID e Áreas de Aplicações. *X Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, volume X, São João Del-Rei, Brasil, 2011.
- [71] I. Antic e T. I. Tokić. RFID: Past, Present, Future. *Scientific Publications of The State University of Novi Pazar*, 4(1):39–52, 2012.
- [72] Tian Xiaoyong. Chaos Encryption Algorithm to Deal with Security Threat to Internet of Things RFID. *Journal of Networks*, 8(5):1168–1174, 2013.
- [73] Jorge Rei, RFID Versus Código de Barras: da Produção à Grande Distribuição. Universidade do Porto. Dissertação de mestrado, 2010.
- [74] Praharsin M. Senadeera, Numan S. Dogan, Zhijian Xie, Huseyin S. Savci, Ibraheem Kateeb e Mohammed Ketel. Recent Trends in RFID Transponders. *Proceedings of IEEE Southeastcon*, Florida, EUA, 2013.

- [75] Shannan Williams, Melissa Taylor, Jeffrey Irland e Anuj Mehta. *RFID Technology in Forensic Evidence Management*. National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce, 2014.
- [76] Syed Ahson e Mohammad Ilays, *RFID Handbook - Applications, Technology, Security, and Privacy*. CRC Press, Florida, EUA, 2008.
- [77] Miodrag Bolic, David Simplot-ryl e Ivan Stojmenovic. *RFID Systems: Research Trends and Challenges*. Wiley & Sons, Ottawa, Canadá, 2010.
- [78] Cipriano Luís Arede Pereira. *Sistemas e Tecnologias de Informação para as Organizações*. Instituto Politécnico de Viseu. Dissertação de mestrado, 2012.
- [79] Marcelo C. de Azambuja, César A. M. Marcon e Fabiano P. Hessel. Survey of Standardized ISO 18000-6 RFID Anti-Collision Protocols. *The Second International Conference on Sensor Technologies and Applications*, Cap Esterel, França, 2008.
- [80] Intermec Technologies Corporation, *Intermec System Manual*, EUA, 2005.
- [81] Yan Zhang, Laurence T. Yang e Jiming. Chen. *RFID and Sensor Networks: Architectures, Protocols, Security, and Integrations*. CRC Press, Nova York, EUA, 2017.
- [82] India Active RFID Products. *Tag Temperature Sensor*. Disponível em: <https://activerfid.wordpress.com/products/aerotag-24ghz-active-rfid/tag-temperature-sensor/>. Acesso em 5 de fev. 2018.
- [83] James Roger Copper. *Novel Wireless Sensor Configurations Incorporating Isotropic Radiators on Conformal Artificial Magnetic Conductors*. Georgia Institute of Technology. Tese de doutorado, 2014.
- [84] Bai Zhi, Wang Sainan e He Yigang. A Novel Anti-Collision Algorithm in RFID for Internet of Things. *IEEE Access*, 6:45860–45874, 2018.

- [85] Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) e Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC). Estudos para o fomento do uso de Etiquetas Inteligentes nos Setores de Comércio e Serviços Logísticos. Brasil, 2014.
- [86] Tanveer Ahmad e Yan Tian Feng. An Improved Accelerated Frame Slotted ALOHA (AFSA) Algorithm for Tag Collision in RFID. *International Journal of Mobile Network Communications & Telematics (IJMNCT)*, 2(4):1–8, 2012.
- [87] Adriano Almeida Goes. Modelo de Propagação Empírico para Sistemas RFID passivos. Universidade Estadual de Campinas. Tese de doutorado, 2014.
- [88] Carla R. Medeiros, Jorge R. Costa e Carlos A. Fernandes. RFID Reader Antennas for Tag Detection in Self-Confined Volumes at UHF. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 53(2): 39–50, 2011.
- [89] Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). Resolução nº 506, de 1º de julho de 2008. Disponível em: <http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2008/104-resolucao-506>. Acessado em 15 de mai. de 2019.
- [90] Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). Resolução nº 680, de 27 de junho de 2017. Disponível em: <http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2017/936-resolucao-680>. Acessado em 10 mai. de 2019.
- [91] Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). Ato nº 14.448, de 04 de dezembro de 2017. Disponível em: <http://www.anatel.gov.br/legislacao/atos-de-requisitos-tecnicos-de-certificacao/2017/1139-ato-14448>. Acessado em 1 de fev. de 2019.
- [92] Intermec Technologies Corporation. *EPC Radio-Frequency Identification Protocols Class-1 Generation-2 UHF RFID Protocol for Communications at 860 MHz–960 MHz*. EPCglobal Inc., ver. 2.0.1 Ratified, 2005.
- [93] P. V. Nikitin, K. V. S. Rao e R. D. Martinez. Differential RCS of RFID tag. *Electronics Letters*, 43(8):431–432, 2007.

- [94] Manoel Vitorio Barbin. Etiqueta de RFID em UHF para Objetos Metálicos. Universidade Estadual de Campinas. Dissertação de mestrado, 2015.
- [95] Chong Swee Keat e Lai Nai Shyan. Dynamic framed slotted ALOHA algorithm for RFID systems with enhanced tag estimation technique. *IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications (RFID-TA)*, Johor Bahru, Malaysia, 2013.
- [96] ISO/IEC International Standard. *ISO/IEC 18000-6 Information technology Radio frequency identification for item management Part 6*, ISO/IEC, 2004.
- [97] Jae Sung Choi, Daniel Engels, Mingon Kang e Ramez Elmasri. Investigation of Impact Factors for Various Performances of Passive UHF RFID System. *IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications*, Sitges, Espanha, 2011.
- [98] Everton Luís Berz. Sistema Híbrido de Localização Indoor baseado em RFID e Análise Visual. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Tese de doutorado, 2015.
- [99] Yunfei Ma e Edwin C. Kan. Multi-Path Interference Reduction in Passive NLTL RFID Tags. *IEEE International Wireless Symposium (IWS)*, Nova York, EUA, 2013.
- [100] Wang Yong, Liu Qing. Research on UHF RFID Wireless Channel. *Sixth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control*, Harbin, China, 2016.
- [101] Louis E. Frenzel Jr. *Fundamentos de Comunicação Eletrônica*. McGraw-Hill, Porto Alegre, Brasil, 2013.
- [102] Yu-Min Hu, Iang-Chong Chang e Jung-Shian Li. Hybrid Blocking Algorithm for Identification of Overlapping Staying Tags Between Multiple Neighboring Readers in RFID Systems. *IEEE Sensors Journal*, 15(7):4076–4085, 2015.
- [103] Amir-Hamed Mohsenian-Rad, Vahid Shah-Mansouri, Vincent W. S. Wong e Robert Schober. Randomized Multi-Channel Interrogation Algorithm for Large-Scale RFID Systems. *GLOBECOM IEEE Global Telecommunications Conference*, Honolulu, EUA, 2009.

- [104] Okkyeong Bang, Ji Hwan Choi, Dongwook Lee e Hyuckjae Lee. Efficient Novel Anti-collision Protocols for Passive RFID Tags. Auto-ID Labs, 2009.
- [105] Cristina Turcu. *Radio Frequency Identification Fundamentals and Applications: Bringing Research to Practice*. IntechOpen, volume 1, Romania, 2010.
- [106] Degan Zhang, Xiang Wang, Xiaodong Song e Dexin Zhao. A Novel Approach to Mapped Correlation of ID for RFID Anti-Collision. *IEEE Transactions on Services Computing*, 7(4):741–748, 2014.
- [107] Chun-Fu Lin e Frank Yeong-Sung Lin. Efficient Estimation and Collision-Group-Based Anticollision Algorithms for Dynamic Frame-Slotted ALOHA in RFID Networks. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 7(4):840–848, 2010.
- [108] Anh Tuan H. Bui, Chuyen T. Nguyen, Thang M. Hoang e Anh T. Pham. Tweaked Query Tree Algorithm to Cope with Capture Effect and Detection Error in RFID Systems. *International Conference on Communications, Management and Telecommunications (ComManTel)*, DaNang, Vietnam, 2015.
- [109] José Luís Sorokin e Flavius Portella Ribas Martins. Um Ambiente de Simulação de Algoritmos Anticolisão para Apoio ao Desenvolvimento de Aplicações de RFID. *Revista Brasileira de Computação Aplicada*, 4(2):58–71, 2012.
- [110] Dr. Masoud Shakiba, J. S. Mandeep, Elankovan Sundararajan e Azam Zavvari. Extending Birthday Paradox Theory to Estimate the Number of Tags in RFID Systems. *PLoS ONE Journal*, 9(4):1–11, 2014.
- [111] Wen-Tzu Chen. A Feasible and Easy-to-Implement Anticollision Algorithm for the EPCglobal UHF Class-1 Generation-2 RFID Protocol. *IEEE Trans. on Automation Science and Engineering*, 11(2):485–490, 2014.
- [112] Yuan Sun, Peter J. Hawrylak, Zhi-Hong Mao e Marlin H. Mickle. Collision Resolution in ISO 18000-6C Passive RFID Communication. University of Pittsburgh. Tese de doutorado, 2009.

- [113] Markus Cremer, Uwe Dettmar, Rainer Kronberger e Anjum Pervez. Modeling of the Passive UHF RFID Multipath Channel for Tag Read Region Estimation. *International Journal of Wireless Information Networks*, 22(3):188–204, 2015.
- [114] W. C. Lucena Filho, L. C. Cordeiro, W. S. da Silva Júnior and C. B. Carvalho. A Power Control and Anticollision Mechanism for RFID Systems. *IEEE Latin America Transactions*, 15(10):1933–1939, 2017.
- [115] Iztok Bratuž, Andrej Vodopivec e Andrej Trost. Resolving Collision in EPCglobal Class-1 Gen-2 System by Utilizing the Preamble. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 13(10):5330–5339, 2014.
- [116] Petar Šolic, Joško Radić e Nikola Rožić. Energy Efficient Tag Estimation Method for ALOHA-Based RFID Systems. *IEEE Sensors Journal*, 14(10):3637–3647, 2014.
- [117] Wen-Tzu Chen e Guan-Hung Lin. An Efficient Anti-Collision Method for Tag Identification in a RFID System. *IEICE Transaction Communications*, E89-B(12):3386–3392, 2006.
- [118] Christian Floerkemeier. Infrastructure Support for RFID Systems. University of Cambridge. Tese de doutorado, 2006.
- [119] Frits C. Schoute. Dynamic Frame Length ALOHA. *IEEE Transactions on Communications*, 31(4):565–568, 1983.
- [120] Harald Vogt. Multiple Object Identification with Passive RFID Tags. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Yasmine Hammamet, Tunisia, 2002.
- [121] Jun-Bong Eom e Tae-Jin Lee. Accurate Tag Estimation for Dynamic Framed-Slotted ALOHA in RFID Systems. *IEEE Communications Letters*, 14(1):60–62, 2010.
- [122] Ehsan Vahedi, Vincent W.S. Wong, Ian F. Blake e Rabab K. Ward. Probabilistic Analysis and Correction of Chen’s Tag Estimate Method. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 8(3):659–663, 2011.

- [123] Yongrui Chen, Jian Su e Weidong Yi. An Efficient and Easy-to-Implement Tag Identification Algorithm for UHF RFID Systems. *IEEE Communications Letters*, 21(7):1509–1512, 2017.
- [124] Ding J. L., Han Y. C. e Wang J. L. Estimation method for RFID tags based on rough and fine double estimation. *Journal of Computer Applications*, 37(9):2722–2727, 2017.
- [125] Md Mahmudul Hasan, Shuangqing Wei e Ramachandran Vaidyanathan. Estimation of RFID Tag Population Size by Gaussian Estimator. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kansas, EUA, 2018.
- [126] Philippe Flajolet e G. Nigel Martin. Probabilistic Counting Algorithms for Data Base Applications. *Journal of Computer and System Sciences*, 31(2):182–209, 1985.
- [127] Intermec Technologies, BRI Basic Reader Interface. Programmer Reference Manual, ver. 012, julho de 2013.
- [128] NXP Semiconductors. SL3S4011_4021 UCODE 1PC. *Datasheet do produto*, ver. 3.4, 24 de maio de 2017.
- [129] Hillner de P. A. Ferreira, Francisco M. Assis e Alexandre R. Serres. A Novel RFID Method for Faster Convergence of Tag Estimation on Dynamic Frame Size ALOHA Algorithms. *IET Communications*, 13(9):1218–1224, 2019.
- [130] Hillner de P. A. Ferreira, Alexandre J. R. Serres e Francisco M. Assis. Archimedean spiral multi-resonator for chipless RFID tag using Frequency-Coded Decimal method. *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Porto de Galinhas, Brasil, 2015.

LISTA DE ANEXOS

a) Relatórios gerados pelo SimRFID

Simulação: $n(0) = 20$ $f(0) = 5$ algoritmo DFSA utilizando estimador Limite Inferior

Relatório 01: processamento geral do algoritmo

Algoritmo DA-DFSA Limite Inferior

=> Iniciado dia 31/05/2019 às 17:23:17.

1. Carregando etiquetas...

2. Total de etiquetas não identificadas no campo de leitura $n(0) = ?$ (desconhecido)

3. ETAPA DE VERIFICAÇÃO:

3.1. Realizando primeira leitura

3.2. Transmitindo comando inicial Query e lendo RN16 das etiquetas... ($f(0) = 3$)

>> Ocioso ($c0$) = 0 Lido ($c1$) = 0 Colidido (ck) = 3

>> $Thf(i) = 0$

3.3. Slots colididos = Comprimento do quadro? $< ck(0) = f(0) ? >$ SIM!

4. ETAPA DE CONVERGÊNCIA DUPLA: Rodando método de Dupla-Aproximação (DA)

Theta: $0,2 \leq Thf(i)$

Tags restantes $nc(0) = 20$

4.1. Transmitindo comando QueryAdjust_SSE e lendo RN16 das etiquetas... ($f(1) = 6$)

4.2. Sorteando etiquetas...

Tamanho do contador $bc = 2$ bits

>> Estado das etiquetas em campo:

($bc = '00'$) = 2 e ($bc = '01'$) = 6 ($bc = '10'$) = 8 e ($bc = '11'$) = 4

>> Ocioso ($c0$) = 3 Lido ($c1$) = 2 Colidido (ck) = 1

>> $Thf(i) = 0,3333333333333333$

Cálculo de ne :

$ne = (2+2)*4^{1-2} \rightarrow ne = 14$

Tags restantes $nc(1) = 18$

5. ETAPA DE CONVERGÊNCIA SIMPLES: identificando com base na nova estimativa

5.1. Ativando etiquetas temporariamente desabilitadas ($bc=11$)

Tags restantes $nc(2) = 18$

5.2. Transmitindo comando QueryAdjust e lendo RN16 das etiquetas... ($f(2) = 14$)

>> Ocioso ($c0$) = 5 Lido ($c1$) = 5 Colidido (ck) = 4

>> $Thf(i) = 0,357142857142857$

Tags restantes nc(3)= 13

5.2. Transmitindo comando QueryAdjust e lendo RN16 das etiquetas... (f(3) = 8)

>> Ocioso (c0) = 2 Lido (c1) = 1 Colidido (ck) = 5

>> Thf(i) = 0,125

Tags restantes nc(4)= 12

5.2. Transmitindo comando QueryAdjust e lendo RN16 das etiquetas... (f(4) = 10)

>> Ocioso (c0) = 3 Lido (c1) = 3 Colidido (ck) = 4

>> Thf(i) = 0,3

Tags restantes nc(5)= 9

5.2. Transmitindo comando QueryAdjust e lendo RN16 das etiquetas... (f(5) = 8)

>> Ocioso (c0) = 3 Lido (c1) = 2 Colidido (ck) = 3

>> Thf(i) = 0,25

Tags restantes nc(6)= 7

5.2. Transmitindo comando QueryAdjust e lendo RN16 das etiquetas... (f(6) = 6)

>> Ocioso (c0) = 1 Lido (c1) = 3 Colidido (ck) = 2

>> Thf(i) = 0,5

Tags restantes nc(7)= 4

5.2. Transmitindo comando QueryAdjust e lendo RN16 das etiquetas... (f(7) = 4)

>> Ocioso (c0) = 1 Lido (c1) = 2 Colidido (ck) = 1

>> Thf(i) = 0,5

Tags restantes nc(8)= 2

5.2. Transmitindo comando QueryAdjust e lendo RN16 das etiquetas... (f(8) = 2)

>> Ocioso (c0) = 1 Lido (c1) = 0 Colidido (ck) = 1

>> Thf(i) = 0

Tags restantes nc(9)= 2

5.2. Transmitindo comando QueryAdjust e lendo RN16 das etiquetas... (f(9) = 2)

>> Ocioso (c0) = 0 Lido (c1) = 2 Colidido (ck) = 0

>> Thf(i) = 1

RESULTADO FINAL:

Ths = 0,3174

Lido (c1) = 20

Ocioso (c0) = 19

Colidido (ck) = 24

Total de sinais RFID transmitidos = 115

=> Finalizado dia 31/05/2019 às 17:23:17.

Relatório 02: estados dos slots em cada quadro

Quadro 0 lido:

Slot 0 colidido (6 tags)

Slot 1 colidido (8 tags)

Slot 2 colidido (6 tags)

Quadro 1 lido:

Slot 0 RN16 e EPC lido

Slot 1 RN16 e EPC lido

Slot 2 colidido (2 tags)

Slot 3 ocioso

Slot 4 ocioso

Slot 5 ocioso

Quadro 2 lido:

Slot 0 RN16 e EPC lido

Slot 1 colidido (3 tags)

Slot 2 ocioso

Slot 3 ocioso

Slot 4 ocioso

Slot 5 colidido (3 tags)

Slot 6 ocioso

Slot 7 RN16 e EPC lido

Slot 8 RN16 e EPC lido

Slot 9 colidido (2 tags)

Slot 10 colidido (5 tags)

Slot 11 RN16 e EPC lido

Slot 12 ocioso

Slot 13 RN16 e EPC lido

Quadro 3 lido:

Slot 0 colidido (2 tags)

Slot 1 colidido (3 tags)

Slot 2 ocioso

Slot 3 colidido (2 tags)

Slot 4 ocioso

Slot 5 colidido (3 tags)

Slot 6 colidido (2 tags)

Slot 7 RN16 e EPC lido

Quadro 4 lido:

Slot 0 colidido (2 tags)

Slot 1 ocioso

Slot 2 colidido (2 tags)

Slot 3 RN16 e EPC lido

Slot 4 ocioso

Slot 5 ocioso

Slot 6 colidido (2 tags)

Slot 7 RN16 e EPC lido

Slot 8 RN16 e EPC lido

Slot 9 colidido (3 tags)

Quadro 5 lido:

Slot 0 colidido (3 tags)

Slot 1 colidido (2 tags)

Slot 2 RN16 e EPC lido

Slot 3 ocioso

Slot 4 colidido (2 tags)

Slot 5 RN16 e EPC lido

Slot 6 ocioso

Slot 7 ocioso

Quadro 6 lido:

Slot 0 RN16 e EPC lido

Slot 1 ocioso

Slot 2 colidido (2 tags)

Slot 3 colidido (2 tags)

Slot 4 RN16 e EPC lido

Slot 5 RN16 e EPC lido

Quadro 7 lido:

Slot 0 colidido (2 tags)

Slot 1 ocioso

Slot 2 RN16 e EPC lido

Slot 3 RN16 e EPC lido

Quadro 8 lido:

Slot 0 ocioso

Slot 1 colidido (2 tags)

Quadro 9 lido:

Slot 0 RN16 e EPC lido

Slot 1 RN16 e EPC lido

LISTA DE PUBLICAÇÕES DO DOUTORADO

- Hillner de P. A. Ferreira, Alexandre J. R. Serres e Francisco M. Assis. Study about the Influence of Tag Collision over the Identified RFID tag signals. *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de sinais (SBrT2019)*, Petrópolis, Rio de Janeiro, 2019.
- Hillner de P. A. Ferreira, Francisco M. Assis e Alexandre J. R. Serres. A Novel RFID Method for Faster Convergence of Tag Estimation on Dynamic Frame Size ALOHA Algorithms. *IET Communications*, 13(9): 1218–1224, 2019.
- Hillner de P. A. Ferreira, Alexandre J. R. Serres e Francisco M. Assis. A Multi-resonant Circuit based on Dual-band Matryoshka Resonator for Chipless RFID Tag. *12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018)*, Londres, Inglaterra, 2018.
- Hillner de P. A. Ferreira, Alexandre J. R. Serres e Francisco M. Assis. Archimedean spiral multi-resonator for chipless RFID tag using Frequency-Coded Decimal method. *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Porto de Galinhas, Brasil, 2015.