

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

**MODELOS E TÉCNICAS PARA
SIMULAÇÃO DE SISTEMAS UHF DE
IDENTIFICAÇÃO POR RÁDIO FREQUÊNCIA (RFID)**

MARCELO CUNHA DE AZAMBUJA

TESE SUBMETIDA COMO
REQUISITO PARCIAL PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR
EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

PROF. DR. FABIANO PASSUELO HESSEL
ORIENTADOR

PORTO ALEGRE, BRASIL
AGOSTO DE 2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

A991m Azambuja, Marcelo Cunha de
Modelos e técnicas para simulação de sistemas UHF de
identificação por rádio frequência (RFID) / Marcelo Cunha de
Azambuja. – Porto Alegre, 2011.
136 f.

Tese. (Doutorado) – Fac. de Informática, PUCRS.
Orientador: Prof. Dr. Fabiano Passuelo Hessel.

1. Informática. 2. RFID. 3. Sistemas Automáticos de
Identificação. I. Hessel, Fabiano Passuelo. II. Título.

CDD 006.31

**Ficha Catalográfica elaborada pelo
Setor de Tratamento da Informação da BC-PUCRS**



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
FACULDADE DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

TERMO DE APRESENTAÇÃO DE TESE DE DOUTORADO

Tese intitulada "Modelos e Técnicas para Simulação de Sistemas UHF de Identificação por Rádio Frequência (RFID)", apresentada por Marcelo Cunha de Azambuja, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Doutor em Ciência da Computação, Sistemas Embarcados e Sistemas Digitais, aprovada em 23/08/2011 pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. Fabiano Passuelo Hessel - PPGCC/PUCRS
Orientador



Prof. Dr. Cesar Augusto Missio Marcon - PPGCC/PUCRS



Prof. Dr. Adenauer Correa Yamin - UFPEL/UCPEL



Prof. Dr. Fernando César Comparsi de Castro - PUCRS/FENG

Homologada em 11/10/11, conforme Ata No. 20... pela Comissão Coordenadora.



Prof. Dr. Fernando Luís Dotti
Coordenador.

PUCRS

Campus Central

Av. Ipiranga, 6681 - P. 32 - sala 507 - CEP: 90619-900
Fone: (51) 3320-3611 - Fax (51) 3320-3621
E-mail: ppgcc@pucrs.br
www.pucrs.br/facin/pos

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, um aviso fundamental: algumas pessoas enxergam estas seções de agradecimentos como algo que foi escrito quase por obrigação. Então, quero salientar que o que vou escrever a seguir é sincero: as pessoas aqui citadas foram realmente muito importantes para mim nestes cinco anos que passei no doutorado.

Vou iniciar fazendo um agradecimento geral: além de toda a parte científica e técnica que aprendi ao longo deste curso, consolidei um aprendizado que só com o tempo fui verdadeiramente compreendendo: como as pessoas que nos cercam são fundamentais em nossas vidas. Tanto a nível social, quanto profissional, cada pequena contribuição, algumas vezes contribuições planejadas, outras tantas, contribuições quase involuntárias (mas as vezes mais importantes do que muitas das planejadas), pois hoje tenho plena consciência de como devo ao grande número de todas estas contribuições que tenho recebido ao longo dos anos. Algumas poucas destas contribuições estão citadas a seguir. Citá-las todas seria impossível aqui.

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, Prof. Fabiano Hessel. Sempre estimulando, confiando, cobrando na medida certa, e, como poucos saberiam fazer, apoiando em todos os aspectos possíveis. Grande apoio técnico, apoio sobre como proceder nos às vezes insondáveis meandros acadêmicos, e grande apoiador moral e pessoal. Ter a compreensão que um aluno tem dimensões além da mera relação professor-aluno é uma visão que poucos professores, assim como o Hessel, têm. Sorte de quem o tem como orientador! (Frase antiga esta minha, e tenho testemunhas disso!)

Já que falo de professores, gostaria de agradecer e elogiar todos aqueles com os quais tive a honra de ter aulas durante o doutorado. Eu, que já me imaginava grande conhecedor, tive contribuições importantíssimas em todas as disciplinas que fiz ao longo do curso. Duncan, JB, Moraes, Ney e, novamente, Hessel, muito obrigado, e rendo-lhes aqui minha homenagem. Ainda, agradeço a imensa colaboração que tive do Prof. Bezerra, que foi quem inicialmente me acolheu no PPGCC, em seguida me encaminhando para as boas mãos do Hessel, e também o Prof. Marcon, ajuda fundamental em algumas definições do meu trabalho e também em alguns artigos.

Falando de aulas e trabalhos, impossível não lembrar de alguns colegas. Em primeiro lugar, a amiga Alexandra Aguiar, hoje merecidamente professora da PUCRS. Apesar de gremista, e também sempre incomodando e pedindo alguma ajuda (principalmente nos textos em inglês), sempre foi uma colega que se podia contar, principalmente para aqueles trabalhos mais exigentes, pois tem fantástico conhecimento em computação. Sérgio Johann, Andriele Busatto, Flaviano Luzzatto e Guilherme Guindani: todos vocês têm lugar eterno em meu coração e fazem parte das minhas mais belas lembranças deste período.

Colega e mestre Prof. Dr. Carlos Fernando Jung: como agradecer toda a ajuda que tenho recebido deste amigo desde que me recebeu tal qual um irmão, de braços abertos na Faccat? Além de toda a ajuda pessoal e profissional, o seu profundo conhecimento em rádio frequência, a ajuda constante, sem medir esforços, tanto na parceria nos artigos, quanto na disponibilização de todos os seus equipamentos, foram fundamentais para os inúmeros ensaios práticos realizados e divulgação dos resultados desta pesquisa. Amigo Jung, sem palavras para agradecer!

Colega Everton Berz: e pensar que foi meu aluno! Sua chegada em nosso grupo de

pesquisa, com sua reconhecida capacidade de trabalho e inteligência, foi ajuda importantíssima para o encaminhamento e definições de muitos dos resultados obtidos aqui neste trabalho.

Colega e mestre Reginaldo Caetano: poder contar com um engenheiro eletrônico, dos primeiros mestres em Ciência da Computação do Estado, mestre em estatística, daqueles que, como ele mesmo diz, “sabe fazer as perguntas certas (e não apenas responder o que alguém já perguntou)”, para dezenas de consultas sobre estatística, presenciais e por e-mail, sempre respondidas detalhadamente, com rigor de informações e além de tudo sempre com rapidez inacreditável, é algo que, novamente, me remete ao segundo parágrafo desta seção. Não tenho como agradecer. Para completar, junto com a Ione, foram companheiros constantes de inúmeras jantãs, onde além da boa prosa e companhia, cada encontro desses tem servido como lições de vida para mim e para a Flavinha.

Prof. Delmar Backes, Diretor Geral da Faccat: tenha certeza que o seu constante apoio e confiança em mim depositada, nesta e em diversas outras iniciativas desde que cheguei à Faccat, serão eternamente lembrados e reverenciados. Prof. Delmar, muito obrigado por tudo.

Mestre em Eng. Elétrica Leandro Porfirio: gigantescos auxílios para o melhor entendimento de todos os segredos que cercam a rádio frequência, além de apontar os caminhos viáveis para nossos devaneios. Leandro, muito obrigado pela paciência.

Do laboratório RFID-CoE (*RFID Center of Excellence*): Profa. Suely Pieri, e engenheiros Paula Valerio e Luiz Costa. O apoio a esta pesquisa e o auxílio para os testes na câmara anecóica foram uma ajuda primordial. Muito obrigado. Da mesma forma, agradeço também ao engenheiro Thiago Santos, do Centro de Pesquisa em Tecnologias Wireless (CPTW) da Faculdade de Engenharia da PUCRS, ajuda fundamental durante os ensaios com o simulador FDTD.

Agradeço também a todos aqueles que de diversas formas ajudaram ao longo das inúmeras atividades práticas que foram necessárias até a conclusão desta pesquisa: meus alunos Vinícius Schmidt e Leonardo Dalmina, Caio Niederauer e Rodrigo Henrich e Flavio Rosa.

Finalmente os agradecimentos de cunho mais pessoal, iniciando pela base de tudo, a família: minha irmã (Guinha) e, claro, principalmente minha mãe (Edith) e meu pai (Ari). Certamente eu não falo o suficiente sobre o quanto sou grato por todos os esforços que vocês sempre fizeram para me dar a melhor formação possível, tanto na parte educacional, quanto social e moral. Não há como agradecer por tudo que vocês sempre fizeram por mim.

Amigos Paulo Ferreira e Débora Simões, com seus lindos filhos Lucas e Marina. Em boa parte do período deste doutorado, foram a grande parceria, as melhores conversas e camaradagens. Novamente, sou obrigado a recorrer ao segundo parágrafo desta seção. Além disso, foi um grande aprendizado poder compartilhar com um então doutorando em Ciência da Computação da mais fina estirpe. Foi um período dos mais ricos que eu pude desfrutar em termos de amizade e aprendizagem sobre companheirismo.

E por último, mas certamente a mais importante: Flavinha. Como é possível alguém com a aparência tão delicada ser a pessoa que em boa parte das vezes é quem mais coragem e apoio me dava? Nas (várias) vezes em que tudo parecia desmoronar, a tua inteligência e garra vinham me auxiliar e dar novas esperanças. Para completar, o teu grande senso de humor, a fantástica facilidade em ir se sociabilizando com todos ao redor, o riso constante, tudo isso torna nossas vidas mais fáceis e felizes. Esta é uma perfeita definição: é fácil ser feliz estando contigo. Flavinha, tu és a mulher da minha vida!

Modelos e Técnicas para Simulação de Sistemas UHF de Identificação por Rádio Frequência (RFID)

RESUMO

Este trabalho apresenta a tecnologia de Identificação por Rádio Frequência (RFID), e tem como principal objetivo a definição de modelos que permitam a simulação de ambientes que utilizem esta tecnologia. Para o desenvolvimento destes modelos de simulação, são extensamente abordados alguns dos principais desafios enfrentados por sistemas RFID: (i) a colisão dos sinais provenientes das etiquetas; (ii) interferências típicas de sinais de rádio frequência (RF) de acordo com cada tipo de ambiente de uso de sistemas RFID; (iii) o relacionamento entre o problema das interferências de RF com a potência mínima necessária para a ativação e comunicação das etiquetas e dos equipamentos leitores (as distâncias máximas possíveis entre etiquetas e antenas dos leitores); (iv) o relacionamento entre o tempo necessário para os protocolos padronizados resolverem o problema das colisões e as interferências de RF de acordo com as características físicas dos ambientes onde os sistemas estarão instalados. Muitos modelos para predição de sistemas tradicionais baseados em RF já foram desenvolvidos, mas nenhum que considere as características e variáveis específicas de sistemas RFID aqui abordadas. Devido ao fato de cada sistema de RF a ser instalado possuir características próprias de ambiente, é inviável a definição de uma única equação matemática ou modelo que defina todos os sistemas de RF. Sendo assim, existem diferentes modelos para diferentes tipos de comunicação de rádio em diferentes condições. A contribuição principal desta tese é a apresentação de técnicas para a definição de modelos que permitam a estimação sobre o funcionamento de sistemas RFID, considerando os problemas (i), (ii), (iii) e (iv) citados. Uma ferramenta de simulação de ambientes RFID que utiliza os modelos desenvolvidos é apresentada. Os resultados de validação são promissores, e foram obtidos através da comparação das simulações com ensaios práticos, bem como através de comparações com resultados disponíveis na literatura.

Palavras chave: *RFID, simulação de sistemas RFID, algoritmos anti-colisão para os sinais provenientes das etiquetas RFID, simulação de RF.*

Simulation Models and Techniques for UHF Radio Frequency Identification (RFID)

ABSTRACT

This thesis presents the Radio Frequency Identification (RFID) technology, and its main goal is to define the models which allow the simulation of environments that use this technology. For the development of these simulation models, it is extensively discussed some of the main challenges faced by RFID systems: (i) the signal collision generated by the tags; (ii) the typical Radio Frequency (RF) signal interference according with each RFID use environment; (iii) the relationship between the RF interference problem with the minimum needed power to the activation and communication between tags and reader equipment (the maximum possible distance between tags and reader's antenna); (iv) the relationship between the time demanded to the standardized protocols resolve the collision problem and the RF interferences according with the physical environment characteristics where the systems will be installed. Several prediction models for traditional RF based systems were already developed; however, none of them consider the RFID systems characteristics and variables here approached. Due to the fact that each RF system to be installed have its own environment characteristics, it is impossible the definition of one single mathematic equation or model that defines every RF system. Thus, there are different models for different radio communication types in each different condition. The main contribution of this thesis is the presentation of techniques for the model definition that allow the estimation about the RFID system operation, considering problems (i), (ii), (iii) and (iv) previously enumerated. A RFID environment simulation tool that uses the developed models is presented. The validation results are promising, and were obtained through the practical rehearsal simulations comparison, and also through the available results in literature comparison.

Keywords: *RFID, RFID environments simulation, anti-collision algorithms for signals coming from tags, RF simulation.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1: Canais de envio e de retorno em um sistema UHF RFID.....	25
Figura 1-2: Processo de comunicação entre equipamento leitor e etiqueta.	26
Figura 1-3: “Anatomia de uma etiqueta RFID”. Antena, circuito integrado (chip), conexão entre CI e antena e substrato base da antena.	27
Figura 1-4: ISO 18000, Classes EPCGlobal e a relação entre as tecnologias fundamentais de RFID.....	29
Figura 1-5: Formato do Código Eletrônico de Produto – EPC.	31
Figura 2-1: Estados principais da FSM para um sistema completo de simulação RFID....	43
Figura 2-2: HCFSM para o sistema completo de simulação RFID, com estados <i>principais</i> e <i>escravos</i> identificados.	45
Figura 2-3: Definição de um modelo de camadas para comunicação de sistemas RFID ..	46
Figura 2-4: Interrupção das etapas realizadas por um leitor para acessar uma etiqueta, devido surgimento de ruído ou devido o limite da atenuação ter sido alcançado.	47
Figura 3-1: Comprimento e pico de amplitude de uma onda	49
Figura 3-2: Representação de uma antena dipolo de meia onda	50
Figura 3-3: (a) Antena dipolo polarizada horizontalmente; (b) ondas polarizadas horizontalmente e verticalmente	50
Figura 3-4: comparação das direções de potência entre uma antena isotrópica (Pi) e um dipolo (P).....	51
Figura 3-5: Valores de alcance para leitura em dispositivos RFID ISO 18000-6	53
Figura 4-1: Transmissões RFID em espaço livre.....	61
Figura 4-2: Ambiente de simulação RFID em espaço livre com variáveis do modelo.	62
Figura 4-3: Modelo RFID de espaço livre com perdas entre leitor e antena.....	63
Figura 4-4: Potência mínima para ativar a etiqueta e respectivos parâmetros <i>KdB</i>	66
Figura 4-5: Câmara anecóica do RFID-CoE, antena do leitor, etiqueta e suporte para testes de leitura em espaço livre.....	67
Figura 4-6: Diagrama de configuração da câmara anecóica durante os testes para obtenção dos valores de potência mínima para ativação das etiquetas.	67
Figura 4-7: Etiqueta fixada nos materiais plástico e madeira.....	67
Figura 4-8: Intervalo de confiança para leitura da etiqueta em espaço livre	71
Figura 4-9: Limitadores da distância máxima de leitura em diferentes cenários de B_L	72
Figura 4-10: Ambiente de validação “rua”, sem obstáculos próximos.	76
Figura 4-11: Um dos ambientes “sala estreita com muitos materiais reflexivos”	76
Figura 4-12: Ambiente “sala ampla”	77
Figura 4-13: Acerto em 95,3% das simulações no ambiente “rua”	77
Figura 4-14: Acerto em 90,7% das simulações no ambiente “sala estreita 1”.	78
Figura 4-15: Acerto em 87,0% das simulações no ambiente “sala estreita 2”.	78

Figura 4-16: Acerto em 88,8% das simulações no ambiente “sala ampla”	79
Figura 4-17: Etiquetas em movimento defronte antena de interrogador RFID.....	80
Figura 4-18: Etiquetas energizadas em relação à distância do interrogador	81
Figura 4-19: Modelo para cálculo da distância e tempo de exposição.	82
Figura 4-20: Dados para análise do ambiente no modo Single.	83
Figura 4-21: Alerta para impossibilidade de leitura devido questões físicas.....	84
Figura 5-1: Janela inicial do RFID-Env - aba Simulator.	97
Figura 5-2: Tela Portal Mode do RFID-Env.....	98
Figura 5-3: Ambiente de simulação e etapas iniciais de funcionamento do RFID-Env.....	99
Figura 5-4: Entrada de etiquetas na simulação do ALOHA-DoubleRoundSize.	103
Figura 5-5: Saídas durante a simulação do ALOHA-DoubleRoundSize (ALOHA v.1).....	104
Figura 5-6: Resultados da simulação do ALOHA-DoubleRoundSize.	105
Figura 5-7: Entrada de etiquetas e <i>round size</i> na simulação do ALOHA-Standby.....	106
Figura 5-8: Relatório de simulação do ALOHA-Standby.....	107
Figura 5-9: Resultados da simulação do ALOHA-Standby.	108
Figura 5-10: Estágio inicial do algoritmo Btree.	109
Figura 5-11: Novos valores do contador COUNT do Btree.....	109
Figura 5-12: Entrada do número de etiquetas na simulação do Btree.....	110
Figura 5-13: Saídas durante a simulação do Btree, com um único grande <i>round</i>	111
Figura 5-14: Resultados da simulação do Btree.	112
Figura 5-15: Exemplo de algoritmo para determinação do tamanho do frame (valor do parâmetro Q).....	114
Figura 5-16: Algoritmo Calculated Q para determinação do parâmetro Q.	115
Figura 5-17: Gráfico comparativo entre os resultados obtidos através da execução do algoritmo Calculated Q e os resultados obtidos através da simulação pelo modelo de equação linear.....	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1: Resultados dos ensaios na câmara anecóica e análises estatísticas.....	68
Tabela 4-2: Tempos para escrita e leitura em dispositivos RFID.....	79
Tabela 5-1: Resultados comparativos entre protocolo padrão e as propostas	117
Tabela 5-2: Coeficientes e padrões de confiabilidade do modelo.....	121

LISTA DE SIGLAS

ACK	Acknowledge
ACPL	Anti-collision Protocol Library
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
B_L	Backscatter Transmission Loss
CAD	Computer-aided design
CCA	Configuração das Características do Ambiente
CI	Circuito Integrado
cm	Centímetro
COST	European Co-operation in the field of Scientific and Technical research
CPqD	Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações
CPTW	Centro de Pesquisa em Tecnologias Wireless
CRC	Cyclic Redundancy Check
CT	Collision Tree Protocol
CW	Continuous Wave
dB	Decibel
dBi	Decibéis relativo a uma fonte isotrópica
dBm	Decibéis relativo a 1 mW
DoD	Department of Defense
DNS	Domain Name Service
EPC	Electronic Product Code
EPC Gen2	Electronic Product Code Generation 2
Faccat	Faculdades Integradas de Taquara
FDTD	Finite-Difference Time-Domain
FS	Free Space

FSM	Finite State Machine
FST	Fast Slot Mode
Ft	Feet
FTTP	Fast Tree Traversal Protocol
GHz	Gigahertz
HCFSM	Hierarchical Concurrent FSM
HF	High Frequency
HP	Hewlett-Packard
IA	Inteligência Artificial
ID	Código Único Identificador de Etiqueta
i.e.	Id est (latim); “Isto é” (português)
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
ISO	International Organization for Standardization
Kbps	Quilo bits por segundo
kHz	Quilo-hertz
LF	Low Frequency
LOS	Line Of Sight
LST	Long Slot Mode
MHz	Mega-hertz
MIT	Massachusetts Institute of Technology
mm	Milímetro
MoC	Model of Computation
mW	Miliwatt
ms	Milisegundo
ONS	Object Naming Service
PIE	Pulse-Interval Encoding

RF	Radio Frequency
RFID	Radio Frequency Identification
RFID-CoE	RFID Center of Excellence
RFID-Env	RFID Environment Software Simulation
RN16	Round Number 16
ROM	Read-only memory
RTL	Register-transfer level
Rx	Receiver
RX_{max}	Valor máximo de potência refletida que poderia chegar na antena Rx do leitor
SAN	Software aplicativo de alto-nível
SNR	Signal-to-noise Ratio
SRF	Simulação de Rádio Frequência
SPA	Simulação do Processo de Anti-colisão
SUID	Sub UID
Tx	Transmitter
UID	Unique Identifier
UHF	Ultra High Frequency
VHF	Very High Frequency
WORM	Write-once-read-many

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS.....	15
LISTA DE SIGLAS	17
1. INTRODUÇÃO	25
1.1 Tipos de Etiquetas Eletrônicas	26
1.2 Somente-Leitura ou Escrita-Leitura.....	27
1.3 Organizações de Padronização para RFID.....	28
1.3.1 Auto-ID Labs e EPCGlobal	30
1.3.2 EPC - Código Eletrônico de Produto	30
1.3.3 Estrutura de Classes EPCGlobal.....	31
1.4 Descrição do Problema.....	32
1.5 Motivação.....	33
1.6 Objetivo	35
1.7 Originalidade e Contribuições da Tese	37
1.8 Estrutura do Trabalho	38
2. MODELO PRINCIPAL PARA UM SIMULADOR DE AMBIENTES RFID.....	41
2.1 FSM – Máquinas de Estado Finito do Sistema Completo de Simulação	42
2.2 Eventos e Transições da Máquina de Estados.....	43
2.3 Definição de um Modelo de Comunicação de Dados para Sistemas UHF RFID.....	45
3. DEFINIÇÕES SOBRE RÁDIO FREQUÊNCIA, RFID E FORMAS DE SIMULAÇÃO PARA ESTAS TECNOLOGIAS.....	49
3.1 Comprimento, Amplitude, Frequência de uma Onda RF e Distâncias Máximas de Leitura	49
3.1.1 Dipolo de Meia Onda	50
3.1.2 Ganho de uma antena	51
3.1.3 Distâncias de Leitura	51
3.2 Breve Histórico das Metodologias de Criação de Modelos de Simulação para Transmissões Baseadas em RF	53
3.2.1 Modelos de Propagação RF: Estatísticos e Determinísticos	54
3.3 Trabalhos Relacionados com Modelos de Simulação da Camada Física de RFID.....	55
4. SIMULAÇÃO DA CAMADA FÍSICA (RÁDIO FREQUÊNCIA) DE SISTEMAS UHF RFID.....	59

4.1	Definição de um Modelo Determinístico de Propagação RF para Ambientes RFID Utilizando a Metodologia Site-Specific	60
4.2	Simulação do Nível Físico em Sistemas RFID: Propagação de Rádio Frequência	61
4.3	Sensibilidade de Recepção do Leitor	64
4.4	Material no qual a Etiqueta está Fixada.....	65
4.5	Considerações Estatísticas e Criação de um Intervalo de Confiança para Uso dos Resultados dos Testes Realizados na Câmara Anecóica	67
4.6	Potência Retornada pela Etiqueta	71
4.6.1	Limitador da Distância Máxima de Leitura: Potência Refletida pela Etiqueta ou Emitida pelo Leitor?	72
4.6.2	Descoberta do B_L	73
4.6.3	Solução para Descobrir o B_L : uso dos resultados da câmara anecóica	74
4.7	Uso e Validação do Modelo	74
4.7.1	Tipos de Ambiente.....	75
4.7.2	Validação e Percentuais de Acertos das Simulações.....	77
4.8	Tempos para Escrita e Leitura nas Etiquetas	79
4.8.1	Movimentação <i>Versus</i> Tempo de Exposição das Etiquetas <i>Versus</i> Alcance para Leitura.....	80
4.9	Conclusões	84
5.	COMUNICAÇÃO RFID NA CAMADA LÓGICA: PROTOCOLOS ANTI-COLISÃO DOS SINAIS REFLETIDOS PELAS ETIQUETAS	87
5.1	Protocolos Anti-Colisão dos Sinais Emitidos pelas Etiquetas	88
5.2	Trabalhos Relacionados	89
5.3	RFID-ENV: um Ambiente de Software para Simulação de Modelos de Sistemas RFID	91
5.3.1	Não Detalhamento da ISO para Implementação dos Algoritmos Anti-Colisão: Oportunidade para Propostas de Novos Modelos	93
5.3.2	RFID-Env: Descrição do Ambiente de Software Desenvolvido	96
5.4	Protocolo ALOHA LST: Modelo, Implementação e Resultados	100
5.4.1	Primeiro Modelo Proposto para o Padrão ISO 18000-6 A: ALOHA-Double-Round-Size	101
5.4.1.1	Descrição do Modelo Proposto ALOHA Double-Round-Size	102
5.4.1.2	Segundo Modelo Proposto para o Padrão ISO 18000-6 A: ALOHA-Standby	105
5.5	Protocolo Btree: Simulação do Algoritmo e Resultados	108

5.5.1	Algoritmo Btree	108
5.5.2	Simulação do Btree no RFID-Env	110
5.6	Protocolo ALOHA Random Slotted (Q): Simulação e Resultados	112
5.6.1	Padrão ISO 18000-6 C: Random Slotted (Algoritmo Q)	113
5.6.2	Terceiro Modelo Proposto: Calculated Q - um Algoritmo Anti-Colisão Aprimorado para o Padrão ISO 18000-6 C.....	114
5.6.3	Simulação e Comparação dos Algoritmos Através da Quantidade de Slots Utilizados e Resultados Obtidos	116
5.6.4	Um Modelo de Equação Linear para Simulação do Calculated Q	118
5.6.4.1	Definição do Modelo	119
5.6.4.2	Resultados.....	120
5.7	Conclusão	122
6.	CONCLUSÕES GERAIS E TRABALHOS FUTUROS	125
6.1	Publicações	128
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129

1. INTRODUÇÃO

RFID (*Radio Frequency Identification*) é a denominação genérica para sistemas compostos de dispositivos eletrônicos que permitem realizar identificações utilizando comunicação por RF (Rádio Frequência) entre os elementos básicos que compõem este sistema: o equipamento interrogador ou leitor (do inglês, *reader*) e as etiquetas eletrônicas de identificação (do inglês, *tags*) [Glo06].

As etiquetas de identificação são os dispositivos que, anexados ao que se deseja identificar, respondem aos sinais emitidos pelo equipamento leitor, que por sua vez consegue detectar a presença de etiquetas RFID e ler as informações armazenadas nessas etiquetas. A Figura 1-1 demonstra as características dos enlaces de transmissão entre o equipamento leitor e a etiqueta. O canal de comunicação é dividido em um canal de envio e outro de retorno. No canal de envio, o transmissor do leitor envia uma portadora modulada para a etiqueta. No canal de retorno, o leitor recebe um sinal refletido (do inglês, *backscattered*) pela etiqueta.

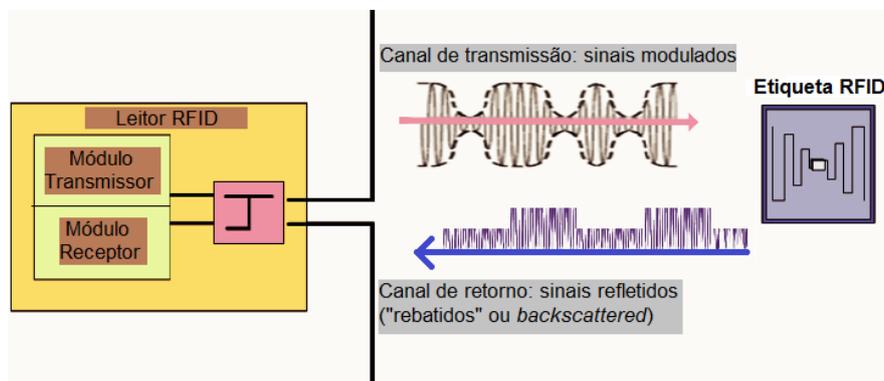


Figura 1-1: Canais de envio e de retorno em um sistema UHF RFID (imagem adaptada da figura originalmente publicada por [KIM09]).

O canal de comunicação é compartilhado entre todos os dispositivos do sistema. Etiquetas do tipo passivas, que são objeto de pesquisa deste trabalho, não possuem fonte própria de energia, emitindo informações somente após terem sido interrogadas por um equipamento leitor [ISO06]. Esse tipo de etiqueta é alimentado com energia pelo campo de RF emitido pelo leitor. A Figura 1-2 demonstra a interação entre o equipamento leitor e etiquetas passivas, que não possuem fonte de energia.

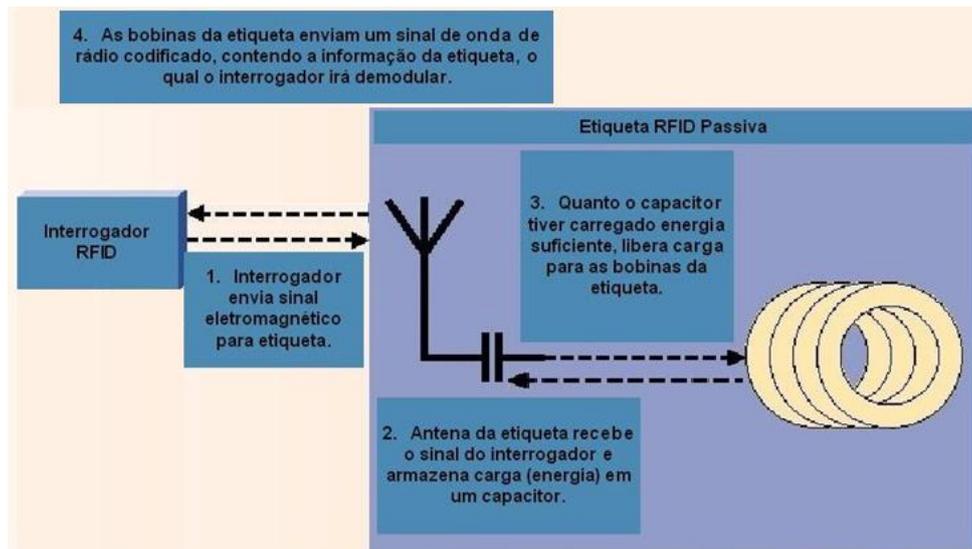


Figura 1-2: Processo de comunicação entre equipamento leitor e etiqueta (adaptado de [Eng06]).

Devido a combinação de tamanho da etiqueta, capacidade de leitura a distâncias médias próximas a 5 metros (m) e controle da área de leitura através do direcionamento das antenas e configurações do equipamento leitor, grande parte dos esforços para a utilização de RFID no controle de cadeias de suprimentos e bens de consumo são direcionados para as etiquetas passivas UHF, padronizadas pelas normas ISO 18000-6 e EPCGlobal¹ Gen2² [Cur07], [Bor05], [Wei05] e [Has06]. Por este motivo, este trabalho está concentrado nas características físicas e técnicas deste tipo de etiqueta, bem como nas características do seu canal de comunicação (Níveis 1 e 2 – camadas Física e Enlace), os quais são, respectivamente, o canal de comunicação baseado em RF e os protocolos anti-colisão utilizados por estas etiquetas.

1.1 TIPOS DE ETIQUETAS ELETRÔNICAS

As etiquetas eletrônicas são classificadas de acordo com suas características construtivas e as respectivas funcionalidades. Um dos tipos de classificação diz respeito à existência ou não de circuitos integrados nas etiquetas (“chip tags” versus “chipless tags”) [Sch01]. Por exemplo, etiquetas eletrônicas utilizadas em animais para cadastro e rastreamento, são “chip tags”. Já etiquetas eletrônicas utilizadas atualmente em contracapas de livros são “chipless tags”. Outra classificação, que se trata de um subconjunto das etiquetas com circuitos integrados, caracteriza a forma como se dá a comunicação entre as etiquetas e os equipamentos leitores, bem como o poder computacional dos dispositivos: etiquetas passivas, semi-passivas e ativas. Etiquetas passivas não possuem fonte de energia nem dispositivo para transmissão “ativa” (apenas

¹ A organização EPCGlobal (criada em 2003) é a responsável pela padronização dos códigos numéricos únicos EPC (Electronic Product Code) para RFID. Esta organização nasceu a partir dos trabalhos iniciados em 1999 pelo laboratório de pesquisa Auto-ID Center do MIT (Massachusetts Institute of Technology), sendo, portanto, o EPCGlobal uma entidade organizada visando permitir a profissionalização dos resultados dos trabalhos do MIT/Auto-ID Center.

² EPCGlobal Gen2 é a denominação de um dos padrões regulados pela EPCGlobal. Este padrão é equivalente a norma 18000-6C padronizada pela ISO.

respondem aos sinais enviados pelos equipamentos leitores). As semi-passivas possuem fonte de energia, mas também não possuem dispositivo de transmissão ativa, e, portanto, somente respondem aos sinais do equipamento leitor. Etiquetas ativas possuem fonte de energia e também podem tomar a iniciativa de iniciar a transmissão de dados. Finalmente, as etiquetas podem ser classificadas de acordo com o tipo de acesso a memória, somente-leitura ou leitura-e-escrita [Fin03]. A Figura 1-3 apresenta a arquitetura típica de uma etiqueta eletrônica passiva.

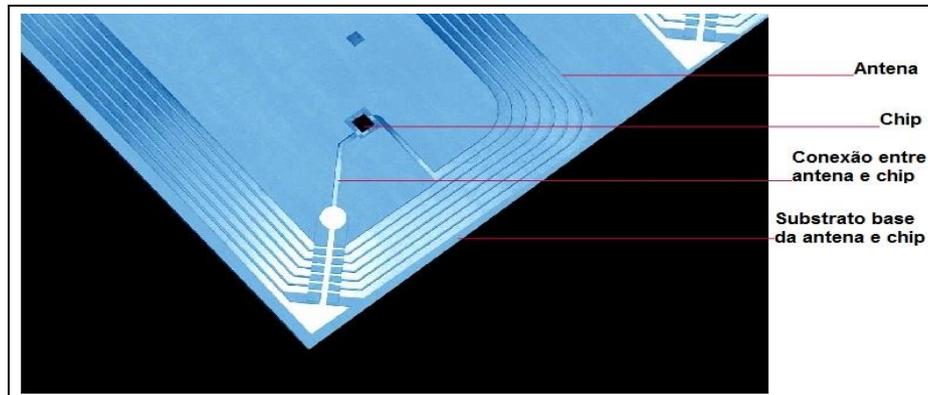


Figura 1-3: “Anatomia de uma etiqueta RFID” (adaptado de [Sar06]). Antena, circuito integrado (chip), conexão entre CI e antena e substrato base da antena.

Em situações onde o custo extremamente baixo se faz necessário, etiquetas sem circuitos integrados, do tipo somente-leitura e com um identificador único permanente podem ser a solução ideal. Estas etiquetas oferecem o mínimo necessário para um sistema de identificação eletrônica, e evitam os custos mais elevados do uso e fabricação de circuitos integrados. Mas a utilização de etiquetas com circuitos integrados é necessária nos seguintes tipos de caso:

1. Quando as etiquetas necessitam armazenar um número de identificação com tamanho suficiente para permitir a combinação de um grande volume de objetos;
2. Quando o equipamento leitor necessita ter a capacidade de ler múltiplas etiquetas em uma mesma área de alcance de leitura. Para esta funcionalidade, os protocolos anti-colisão necessitam que a etiqueta tenha um mínimo de capacidade computacional.

A fim de permitir a identificação única de um grande número de elementos, os modelos de etiquetas UHF atuais possuem capacidades de armazenamento variando entre 64 e 512 bits, sendo este último valor o mais comum no mercado atualmente.

1.2 SOMENTE-LEITURA OU ESCRITA-LEITURA

De acordo com [Fin03], as etiquetas com circuito integrado podem possuir a funcionalidade de ser do tipo somente-leitura (do inglês, *read-only*) ou escrita-leitura (do inglês, *read-write*). Etiquetas somente-leitura recebem seu código único identificador (ID) no momento da fabricação ou quando atreladas a algum objeto em particular. As

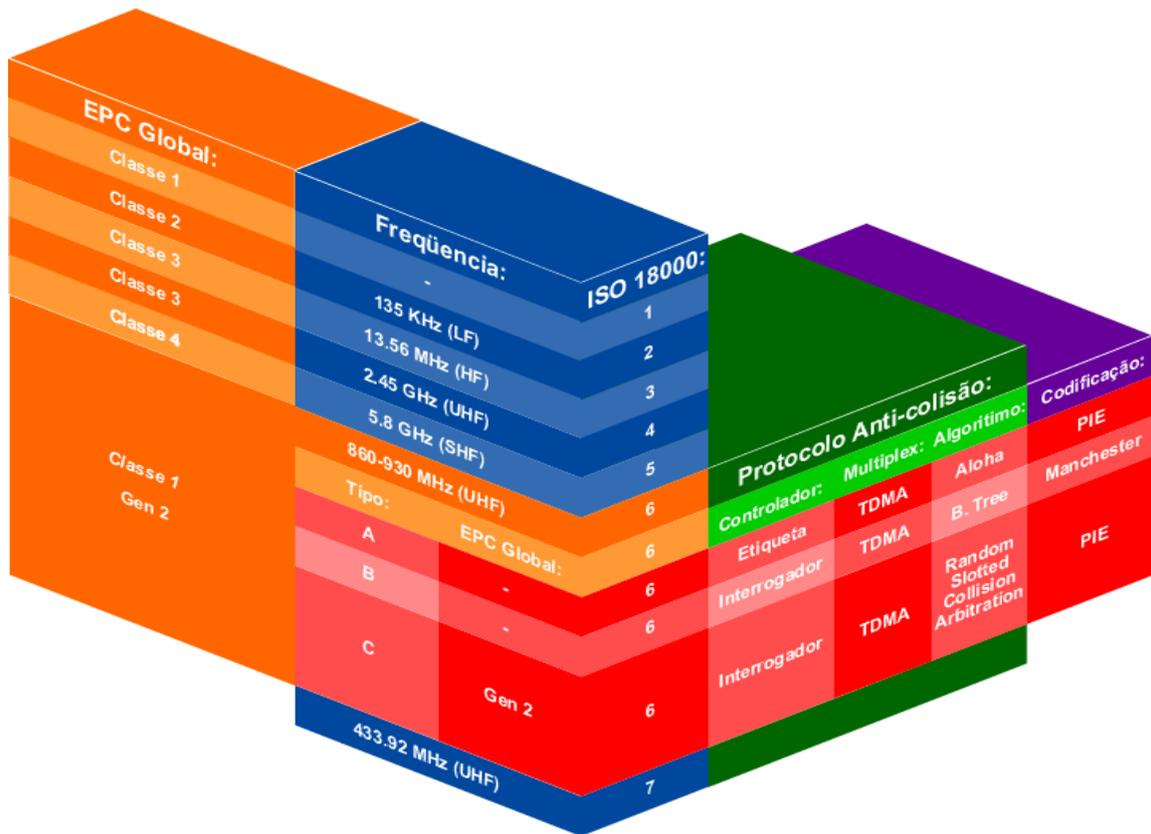
memórias para etiquetas somente-leitura costumam ser do tipo ROM (*Read-only memory*) ou WORM (*Write-once-read-many*).

Etiquetas escrita-leitura podem ter dados regravados várias vezes durante sua vida operacional. Devido à variedade de tipos de dados que podem ser escritos, normalmente para acompanhamento do fluxo de fabricação ou entrega de produtos, as etiquetas escrita-leitura oferecem uma funcionalidade adicional importante aos sistemas RFID, e atualmente são as mais comuns no mercado.

1.3 ORGANIZAÇÕES DE PADRONIZAÇÃO PARA RFID

As principais organizações de padronização para RFID são a ISO (International Organization for Standardization) e a EPCGlobal, esta última uma instituição formada para controlar a numeração dos ID's únicos para cada etiqueta ao redor do mundo (a classe de codificação EPC - Electronic Product Code), bem como criar padrões para a tecnologia (incluindo protocolos e frequências), e promover pesquisas sobre RFID. A ISO, por sua vez, atua no desenvolvimento de padrões técnicos de RFID, tais como frequências de operação, protocolos de codificação e de anti-colisão. O padrão ISO para RFID é a série de normas ISO 18000, cobrindo também os protocolos para a comunicação sem fio. Esses padrões abrangem as atuais frequências utilizadas para RFID ao redor do mundo [ISO06]. Na Figura 1-4 são relatadas as sete partes da ISO 18000, bem como o relacionamento com outras tecnologias que são discutidas ao longo deste trabalho.

Os padrões EPC cobrem as tecnologias de comunicação sem fio, formato dos códigos de identificação, sistemas de apoio intermediários e bancos de dados com informações sobre as etiquetas eletrônicas. A principal contribuição desta organização foi a criação de uma arquitetura que permite o controle dos ID's para todos os usuários de RFID ao redor do mundo, o código EPC, que tal como um código de barras, fornece suporte para identificação do fabricante, tipo do produto, número serial e outras informações para rastreamento de cada objeto ao longo da cadeia produtiva.



* **ISO 18000-1:** Parâmetros genéricos para comunicação sem fio para frequências aceitas em todo o mundo

Figura 1-4: ISO 18000, Classes EPCGlobal e a relação entre as tecnologias fundamentais de RFID.

Os padrões de frequência e protocolos da ISO e da EPC eram, inicialmente, incompatíveis. Entretanto, em janeiro de 2005 a EPC submeteu o seu padrão UHF Classe 1 Geração 2 para possível inclusão como um padrão ISO. Após um período de estudos e ajustes, em junho de 2006 a ISO adicionou este padrão na classe UHF da ISO 18000. O padrão denominado EPCGlobal Gen2 é agora equivalente ao padrão ISO/IEC 18000-6 tipo C, ou, simplesmente, ISO 18000-6 C (a Figura 1-4 mostra estas equivalências). O aceite por parte da ISO para a norma EPCGlobal Gen2 significa que equipamentos de acordo com a normatização Gen2 também estão de acordo com os padrões ISO.

A Figura 1-4 pode ser identificada da seguinte maneira: a primeira coluna (EPC Global) descreve as 6 classes da EPCGlobal. A coluna Frequência apresenta as frequências de operação e as relaciona com cada padrão ISO, que aparecem na terceira coluna. A Classe 1 Gen2 da EPCGlobal trabalha na frequência UHF, e existe uma ligação entre estas duas linhas, relacionando a Classe 1 Gen2 com a frequência UHF. Esta por sua vez é dividida em três padrões pela ISO: ISO 18000-6A e 18000-6B (que não se relacionam com nenhuma Classe EPC), e a ISO 18000-6C, esta sim relacionada com a Classe 1 Gen2 da EPCGlobal. A coluna Protocolo Anti-Colisão descreve quem é o controlador do respectivo protocolo (se a etiqueta ou o equipamento interrogador), qual o tipo de multiplexação e o algoritmo anti-colisão utilizado nas três classificações ISO 18000-6. A coluna Codificação descreve se determinado algoritmo anti-colisão utiliza PIE

(Pulse-Interval Encoding) ou Manchester como codificação dos sinais digitais provenientes dos sinais de rádio-frequência.

No Brasil, a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) é quem administra o espectro de rádio frequência. A norma número 365/04, que regulamenta os equipamentos de radiocomunicação de radiação restrita, especifica que dispositivos UHF RFID no Brasil devem trabalhar na faixa de 902 à 907,5 MHz ou 915 à 928 MHz. Esta regulamentação alinha o Brasil ao padrão Norte-Americano.

1.3.1 AUTO-ID LABS E EPCGLOBAL

A organização denominada Auto-ID Labs, formada por sete grupos de pesquisas de universidades de quatro diferentes continentes, nasceu a partir dos trabalhos iniciados pelo grupo de pesquisa MIT Auto-ID Center. Esse último grupo foi financiado por grandes empresas, tais como Procter and Gamble e Gillette, e tinha como principal objetivo a criação do EPC (Electronic Product Code), um código a ser lido e escrito através da tecnologia RFID e que objetiva substituir, em grande parte, o código de barras atualmente utilizado para identificação de produtos e objetos em todo o mundo.

A organização EPCGlobal (criada em 2003), por sua vez, é a sucessora comercial das atividades do MIT Auto-ID Center, sendo, portanto, o EPCGlobal uma entidade organizada visando permitir a profissionalização dos resultados dos trabalhos do antigo Auto-ID Center [Sar07]. EPCGlobal e Auto-ID Labs trabalham em conjunto, com o primeiro tendo caráter comercial e de negócios e o segundo com visão acadêmica e de pesquisas e desenvolvimento.

O principal padrão da organização EPCGlobal é o Código Eletrônico de Produto (EPC - Electronic Product Code). Esse código trata-se de um valor único para identificações. Além disso, os padrões EPC regulam a comunicação entre todos os elementos, incluindo então o ID (valor de identificação) e formatos para transferência de dados e armazenamento de informações. Os padrões EPC são focados principalmente em recursos para cadeia de manufaturas e distribuição de produtos, contando também com um sistema denominado Serviço de Nomes para Objetos (ONS – Object Naming Service), similar ao Serviço de Domínios de Nomes (DNS) da Internet. O objetivo do ONS é possibilitar que a partir de um código EPC seja possível localizar o computador na Internet onde residem todas as informações sobre esse produto (fabricante, modelo, data de fabricação, etc.).

O EPC classifica as etiquetas eletrônicas em 4 classes, onde um incremento no número da classe significa um aumento no nível de sofisticação da etiqueta. As próximas seções desse capítulo relatam mais detalhes sobre o código EPC e a estrutura de classes da EPCGlobal.

1.3.2 EPC - CÓDIGO ELETRÔNICO DE PRODUTO

Um código EPC é formado por um conjunto de bits, divididos em campos com

diferentes informações. A Figura 1-5 demonstra a representação em campos do EPC.



Figura 1-5: Formato do Código Eletrônico de Produto – EPC.

O número da versão especifica o formato EPC usado pela etiqueta eletrônica, tendo em vista que existe mais de um formato para o EPC. Atualmente há códigos EPC com 64, 96 e 256 bits. O campo fabricante é um número único atribuído a cada empresa que utiliza EPC para identificação dos seus produtos, e todos os produtos de um determinado fabricante terão o mesmo valor neste campo. O código do produto é um valor único atribuído a cada tipo de produto fabricado por uma empresa. O número serial identifica cada unidade de produto individualmente produzido por um determinado fabricante.

1.3.3 ESTRUTURA DE CLASSES EPCGLOBAL

Devido as diferenças de funcionalidades e características de funcionamento entre os diversos tipos de etiquetas RFID atualmente disponíveis, o EPCGlobal definiu uma Estrutura de Classes RFID, classificando os hardwares conforme suas características. A versão atual dessa estrutura foi definida em novembro de 2007 e possui as seguintes definições principais [EPC08]:

Classe 1 – Etiquetas para identificação: etiquetas passivas que contenham um número EPC e um identificador de etiqueta (ID), opção para senha de acesso aos dados e uma memória adicional para o usuário também opcional.

Classe 2 – Etiquetas de alta funcionalidade: essas etiquetas possuem as mesmas características das etiquetas Classe 1, acrescidas de maior ID, maior memória para usuário e controle de acesso aos dados.

Classe 3 – Etiquetas passivas com bateria (Etiquetas Semi-Passivas): todas as funcionalidades das etiquetas Classe 1 e 2 acrescidas de uma fonte de energia. Essas etiquetas podem possuir sensores para controles diversos (sensores de temperatura, umidade, som, entre outros) e, opcionalmente, podem possuir memória para armazenamento do histórico dos valores coletados pelos sensores. Etiquetas Classe 3 continuam sendo dispositivos passivos, ou seja, necessitam que um equipamento leitor inicie a comunicação.

Classe 4 – Etiquetas Ativas: essas etiquetas possuem todas as funcionalidades existentes nas três classes anteriores acrescidas da capacidade de iniciar uma comunicação, o que é a principal característica de uma etiqueta ativa. Tal comunicação pode se dar tanto entre etiqueta e leitor como também diretamente entre etiquetas.

1.4 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Os conceitos fundamentais que compõem um sistema RFID são, basicamente, o canal de comunicação sem fio baseado em RF, etiquetas eletrônicas, equipamentos leitores e antenas de leitores. Os dispositivos mencionados podem ser de diversas características técnicas, e podem ser instalados nas mais diversas configurações de ambientes.

A colisão dos sinais provenientes das etiquetas eletrônicas, situação esta que ocorre quando mais de uma etiqueta está sob o raio de ação de um equipamento leitor, exige a aplicação de protocolos anti-colisão para a correta identificação dos sinais de cada uma das etiquetas [ISO06]. Estes sinais utilizam a mesma frequência no espectro e por este motivo se tornam não identificáveis para os equipamentos leitores. Os protocolos anti-colisão utilizam algoritmos que, através de técnicas de multiplexação do canal de comunicação, conseguem identificar as mensagens individuais de cada etiqueta. Mas tais protocolos possuem deficiências. Uma deficiência importante, tratada neste trabalho, é a não definição completa dos algoritmos de controle de três dos quatro protocolos atualmente padronizados [ISO06], [Ali07], [Shi06] e [Yu005]. O problema da “colisão de sinais” entre dispositivos RFID é amplamente discutido e pesquisado na comunidade científica e acadêmica, conforme poderá ser observado ao longo deste trabalho em citações diversas, como as já citadas anteriormente e também em outras, tais como [Cho08], [Xia10], [Cho10] e [Myu06].

Assim como ocorre em relação ao problema da colisão dos sinais, a comunidade de pesquisa em RFID tem trabalhado em busca de soluções que possibilitem realizar a simulação de ambientes que utilizem esta tecnologia. Estes procedimentos, para serem completos, precisam simular o funcionamento dos protocolos anti-colisão, mas também precisam simular o canal de comunicação RF do sistema. Dispositivos RFID sofrem com uma grande quantidade de tipos de interferência no sinal de RF, tais como aquelas causadas pelos materiais nos quais as etiquetas podem estar fixadas, barreiras físicas entre os dispositivos, ruídos no ambiente, reflexões, entre outros. No caso da tecnologia RFID, em específico, ainda existe a particularidade da baixa potência do sinal que é emitido (ou, mais precisamente: refletido) pelas etiquetas UHF do tipo passivas, aumentando a dificuldade da comunicação. Por fim, ainda existem questões como a possível mobilidade das etiquetas durante o processo de leitura, que somado ao problema do consumo de tempo para resolver a colisão dos sinais emitidos pelas etiquetas, pode tornar insuficiente o tempo de exposição das etiquetas com o raio de ação do leitor [Min09], [Kim09], [Mal10] e [Flo09].

Comercialmente, apesar das grandes empresas envolvidas no desenvolvimento de equipamentos e softwares diversos relacionados com RFID, tais como Hewlett-Packard (HP), Philips, Cisco/ThingMagic e IBM, não se tem conhecimento de nenhum sistema de simulação para esta tecnologia. Em termos de iniciativas acadêmicas ou trabalhos de pesquisas práticas na área, existem vários estudos disponíveis, mas nenhum com resultados relevantes. Desta forma, considerando os altos investimentos em pesquisa e desenvolvimento na área de RFID por grandes empresas de computação e

microeletrônica, tais como:

- Philips e IBM, que efetivaram uma parceria para o desenvolvimento integrado de sistemas RFID [PHI10];
- Parceria entre Cisco, SAP e Intermec, que visa poder oferecer informações sobre a localização de caminhões e os respectivos produtos transportados [COM11];
- Projetos governamentais, tais como os realizados no Brasil pelos Ministérios da Ciência e Tecnologia e da Fazenda, que assinaram um acordo de cooperação para a criação do Brasil-ID: um sistema de identificação e rastreamento de mercadorias [MIN11];
- Centros de pesquisa e universidades, tais como o laboratório RFID do CPqD, inaugurado em fevereiro de 2011, até então o único no Brasil com uma câmara semianecóica com capacidade de realizar avaliações de sistemas de grandes dimensões, tais como armazéns de distribuição ou de veículos [CPQ11];

percebe-se então a necessidade de maiores pesquisas em técnicas e modelos que permitam a simulação em laboratório de sistemas e ambientes RFID. Poder simular em laboratório se uma etiqueta, fixada em um determinado tipo de material, será lida em uma determinada localização, propicia economia de tempo de testes e de custos financeiros para os usuários, o que beneficiaria toda a cadeia de consumo na atualmente vasta área de usuários de RFID.

As várias diferenças técnicas e a diversidade de dispositivos RFID, em conjunto com as infinitas possibilidades de configuração de ambientes onde a tecnologia pode vir a ser instalada, somam-se aos problemas da colisão dos sinais e da dificuldade de criação de um modelo para simulação da camada física (RF). Isto explica a dificuldade para a criação de modelos para simulação completa de ambientes e sistemas RFID. Além disso, conforme será explicado no decorrer deste trabalho, descobrir determinadas características dos dispositivos RFID utilizados, tais como a potência do sinal refletido por uma etiqueta e a influência de certos materiais para a ativação das etiquetas, fatores básicos para a simulação destes dispositivos, tornam ainda maior o desafio para a criação de tais simuladores.

A evolução da tecnologia RFID é contínua, o que pode ser confirmado pelas constantes novas especificações lançadas pelos organismos de padronização, bem como pelo exponencial investimento na área realizado por grandes indústrias e governos. Mas a tecnologia continua dependendo de pesquisas a fim de resolver os problemas ainda enfrentados, bem como depende da criação de recursos que aumentem a confiabilidade e facilitem o uso destes sistemas. Os métodos e modelos propostos ao longo desta tese estão diretamente relacionados com os problemas relatados nesta seção.

1.5 MOTIVAÇÃO

Atualmente a tecnologia RFID é alvo de um grande número de pesquisas e investimentos por parte da indústria e comunidade científica, com taxas de crescimento

contínuas no uso destes dispositivos nos últimos anos. Incentivados por regulamentações federais, alguns países, como os EUA, e mais recentemente o Brasil, passaram a utilizar etiquetas RFID para identificação de passaportes, dando grande visibilidade e ampliando o uso da tecnologia. Na indústria, é utilizada, por exemplo, como meio de identificação de componentes, permitindo o rastreamento completo de toda cadeia produtiva de um determinado produto, da linha de produção ao ponto de venda. Em outro exemplo, uma das maiores redes varejo do mundo, o Wal-Mart, em conjunto com 100 dos seus maiores fornecedores, está empenhado em uma iniciativa de transição para a etiquetagem com RFID de todas as caixas e paletes destinados aos centros de distribuição do Wal-Mart.

Mas a implantação de sistemas RFID ainda enfrenta problemas. Do ponto de vista prático, usuários e projetistas precisam considerar uma série de questões do ambiente e das características construtivas dos dispositivos RFID a fim de prover o sistema com as melhores condições de funcionamento da tecnologia.

Conforme será citado nas seções de trabalhos relacionados, modelos que representem sistemas baseados em rádio frequência têm sido muito úteis ao longo dos anos para sistemas tradicionais de RF, tais como sistemas de transmissão de celular e telecomunicações em geral. Tais modelos são baseados em fórmulas de propagação e atenuação de sinais de RF para cada tipo de faixa de frequência. Baseado nessas fórmulas fundamentais, os modelos foram criados levando em consideração alguns tipos de casos de uso mais comuns, de acordo com os ambientes e os equipamentos mais tradicionais. Estes modelos podem indicar valores medianos de funcionamento e servir como parâmetro para a instalação de novos sistemas em novos ambientes de uso.

O canal de comunicação entre equipamentos leitores e etiquetas UHF RFID é dividido em dois níveis: o Físico (rádio frequência) e o Lógico (nível 2, Camada de Enlace). O nível lógico é controlado através dos protocolos anti-colisão dos sinais provenientes das etiquetas. Atualmente são quatro os protocolos anti-colisão padronizados pela ISO. Esta diversidade de protocolos, ao mesmo tempo em que possibilita a escolha da melhor opção para cada projeto de hardware, obriga os projetistas a realizar séries de testes e simulações a fim de que sejam encontradas as melhores especificações para cada caso de uso específico. O protocolo anti-colisão mais atual é o ISO 18000-6 C (equivalente ao padrão Gen2 da EPC), e por este motivo é a escolha natural de uso por um desenvolvedor de equipamentos RFID. Mas, conforme será demonstrado, o padrão anterior, protocolo ISO 18000-6 B, pode ter um desempenho melhor para determinadas situações. Enquanto no tipo C é necessário uma perfeita escolha de variáveis do algoritmo anti-colisão, o tipo B, por não exigir escolha alguma por parte do projetista e mesmo do usuário final, possui um desempenho sempre uniforme (ruim nas primeiras iterações em casos de muitas leituras simultâneas e muito bom ao longo das iterações finais; já para a leitura de poucas etiquetas, o padrão B pode ser melhor mesmo nas primeiras iterações). O padrão mais atual ainda possui um grande problema, também demonstrado neste trabalho: o algoritmo anti-colisão adotado não possui todas as etapas completamente definidas, deixando a cargo de, parte pelo desenvolvedor do hardware, e parte pelo usuário final, a escolha de certos valores que irão influenciar decisivamente no bom (ou mau) funcionamento do sistema. Conforme

será demonstrado nas simulações (Capítulo 5), estas escolhas influenciam significativamente no funcionamento do sistema como um todo. O algoritmo anti-colisão do tipo C possui vantagens, e por isso foi especificado no padrão mais atual da tecnologia. O problema, constatado aqui e nos trabalhos relacionados, é que para ter um bom desempenho, este algoritmo exige uma perfeita definição das variáveis; variáveis estas que precisam ser definidas em tempo de programação do algoritmo que controla o equipamento leitor. Para a boa definição de tais variáveis, as características de uso do sistema deverão ser previamente muito bem conhecidas, o que dificulta o trabalho para grande parte dos desenvolvedores de hardwares RFID. Finalmente, é necessária ainda a definição de um valor pelo usuário final do sistema (o parâmetro Q), o que é outro agravante para boa parte das situações práticas. Maiores detalhes sobre estas características dos algoritmos anti-colisão podem ser vistos na seção específica (Seção 5.6) que aborda o assunto.

A definição de modelos de simulação dos níveis 1 e 2 do canal de comunicação de sistemas RFID pode colaborar de forma importante para projetistas de hardwares e de ambientes RFID. Para usuários finais da tecnologia RFID, os modelos podem auxiliar na instalação de sistemas levando em conta o ambiente físico onde o sistema irá funcionar. Variáveis como distância máxima possível entre as antenas e a influência dos materiais nos quais as etiquetas estarão fixadas, se o ambiente é mais ou menos livre de interferências e reflexões, e se os dispositivos encontram-se parados ou em movimento, podem ser previamente simuladas em modelos que são definidos e apresentados nesta tese.

1.6 OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho é a definição de técnicas e modelos de simulação para as Camadas Física e de Enlace do canal de comunicação de sistemas UHF RFID. Apresentar as técnicas e ensaios para a descoberta de alguns dos valores para o uso dos modelos também é objetivo importante deste trabalho. A metodologia de desenvolvimento foi baseada na construção de modelos formais e empíricos gerados a partir de simulações (no caso dos modelos do nível da camada de enlace), e no caso dos modelos de simulação da camada física, ensaios em ambientes controlados (câmara anecóica) e também em ambientes reais típicos de sistemas RFID.

Para se atingir o objetivo principal, **em relação à Camada de Enlace** do canal de comunicação, os seguintes objetivos específicos foram traçados:

1. Definição de um modelo completo para simulação de sistemas UHF RFID. A partir do modelo geral, devem ser propostos os submodelos complementares de simulação que serão controlados pelo modelo principal.
2. Estudo, análise e implementação de todos os algoritmos utilizados pelos protocolos anti-colisão dos sinais provenientes das etiquetas atualmente padronizados pela ISO e EPC.
3. Desenvolvimento de um *framework* que permita a implementação, execução e avaliação dos protocolos anti-colisão atualmente padronizados pela ISO e EPC.

Para atender o último requisito, uma metodologia de avaliação de desempenho dos protocolos deve ser elaborada.

4. A partir da avaliação dos protocolos anti-colisão já existentes, apontar quais são melhores de acordo com o tipo de uso; propor melhorias para estes protocolos.
5. Desenvolvimento de um novo algoritmo anti-colisão para os sinais provenientes das etiquetas. Este algoritmo deve ser compatível (ou melhor) em termos de desempenho com os algoritmos já existentes, mas com a vantagem de ser completamente definido, facilitando o desenvolvimento pelos projetistas de hardwares e o uso por parte do usuário final. Preferencialmente, este novo algoritmo não deve exigir alterações nos hardwares (leitor e etiquetas) já existentes, mas somente nos *firmwares* e protocolos.
6. A partir do desenvolvimento do novo algoritmo anti-colisão, desenvolver um modelo matemático que simule a execução do algoritmo, a fim de tornar as simulações de funcionamento do algoritmo mais rápidas e com menor consumo de recursos computacionais.

Em relação à Camada Física do canal de comunicação, os seguintes objetivos específicos foram traçados:

1. Proposta de um modelo geral de propagação de RF que leve em consideração as características específicas de sistemas UHF RFID. Os valores típicos de RFID para os parâmetros (variáveis) do modelo de propagação deverão ser pesquisados e apresentados.
2. Definição e apresentação de metodologias que permitam descobrir os valores dos parâmetros que compõem o modelo de propagação, i.e., metodologias para a obtenção das características técnicas específicas do ambiente usuário. Todos os métodos avaliados deverão ser apresentados, bem como o roteiro final para a obtenção dos parâmetros das equações.
3. Determinar o grau de influência que os materiais nos quais as etiquetas podem estar fixadas exercem sobre o funcionamento destas etiquetas. Para isto, uma metodologia para verificação desta influência deve ser elaborada.
4. Uma metodologia estatística de validação e uso adequado dos resultados obtidos durante os ensaios de obtenção dos valores dos parâmetros deve ser definida e apresentada.
5. Dadas as características técnicas dos dispositivos (hardwares) RFID a serem utilizados, os modelos devem informar sobre a viabilidade de leitura de todas as etiquetas presentes no ambiente, considerando:
 - a. quantidade de etiquetas a serem lidas "simultaneamente";
 - b. tempo máximo disponível para essa leitura.
6. Para validação, o modelo de simulação da camada física deve ter seus resultados comparados com os resultados obtidos em testes realizados em ambientes reais. Os resultados obtidos nestes ambientes devem ser compatíveis com os resultados gerados pelo modelo de simulação. Ainda, uma metodologia para testes e comparação de desempenho de sistemas RFID em ambientes reais deve ser desenvolvida.

Em relação ao modelo completo de simulação de sistemas UHF RFID, levando em consideração os modelos dos níveis físico e lógico do canal de comunicação, os seguintes objetivos específicos foram traçados:

1. Desenvolver um modelo de controle geral dos submodelos específicos das Camadas Física e de Enlace.
2. O conjunto de modelos desenvolvidos deve permitir a definição da melhor configuração de ambiente possível, considerando:
 - a. tipo de antena do leitor;
 - b. tipo de etiqueta;
 - c. tipo de algoritmo anti-colisão;
 - d. potência do sinal emitido pelo equipamento leitor;
 - e. material no qual a etiqueta está fixada;
 - f. distância entre a antena do leitor e a etiqueta;
 - g. quantidade de etiquetas a serem lidas simultaneamente;
 - h. tipo do ambiente.

A partir de valores para cada uma dessas variáveis, os modelos deverão indicar sobre a probabilidade de funcionamento do sistema.

1.7 ORIGINALIDADE E CONTRIBUIÇÕES DA TESE

A proposta de um conjunto de estados que, de forma integrada, e controlados por um estado principal, permitam simular tanto a Camada Física quanto a Camada Lógica do enlace de comunicação entre leitor e etiquetas RFID é original. Não se tem conhecimento de trabalhos similares, e as diversas referências encontradas no decorrer da pesquisa e citadas neste texto permitem comprovar que os resultados aqui apresentados são originais e contribuem para o estado da arte na área de simulação de ambientes RFID. O modelo de comunicação em camadas apresentado, semelhante ao modelo de referência de redes ISO/OSI, com as camadas Física e de Enlace bem definidas, é original desta tese, bem como o novo algoritmo anti-colisão (Calculated Q) com todas as etapas completamente definidas.

Demais contribuições principais da tese:

- Os métodos utilizados e detalhadamente apresentados para a obtenção dos valores fundamentais dos modelos de simulação da camada física.
- Uma equação de propagação de RF para a camada física de dispositivos RFID que leva em consideração interferências do ambiente, tais como, por exemplo, o material no qual a etiqueta está fixada.
- Os experimentos e valores obtidos ao longo deste trabalho, com o cenário utilizado, que é típico entre usuários RFID, permitem concluir que, embora o

contrário seja amplamente citado e replicado entre a maioria absoluta das referências da área, o limitador da distância máxima de leitura da etiqueta nem sempre será dado pela sensibilidade de ativação da etiqueta. Esta idéia comum diz que, tendo a etiqueta energia suficiente para ser ativada, ela conseguirá retornar um sinal com energia suficiente para ser entendida pelo equipamento leitor. Este conceito, errado, faz com que muitos pesquisadores calculem apenas o canal de ida na transmissão entre leitor e etiqueta, desconsiderando os cálculos para o canal de retorno. Esta tese mostra que, através dos resultados obtidos e fontes pesquisadas, que nem sempre uma etiqueta ativada retornará um sinal com energia suficiente para ser compreendida pelo leitor. A situação de “‘etiqueta ativada’ significar ‘etiqueta com potência suficiente para ser lida’” ocorrerá na maior parte das vezes, mas não sempre. Portanto, para uma perfeita simulação do ambiente, é necessário calcular sempre a intensidade também do canal de retorno (da etiqueta para o leitor).

- A metodologia de comparação de desempenho entre todos os algoritmos anti-colisão atualmente padronizados pela ISO, bem como, a partir das análises realizadas, a proposta de um novo e original algoritmo anti-colisão, com todas as suas etapas completamente definidas. Ainda, a definição de um modelo baseado em regressão linear que facilita a simulação deste novo algoritmo anti-colisão.
- Um modelo que, dada a velocidade de movimentação de um conjunto de etiquetas e a distância destas etiquetas em relação a antena do leitor, informa sobre a viabilidade ou não da leitura deste conjunto de etiquetas.
- A definição de um *framework* que utiliza os modelos propostos ao longo desta tese.

1.8 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado da forma como segue: o Capítulo 2 apresenta o modelo principal proposto para um simulador de ambientes RFID. A Máquina de Estado Finito (FSM) do sistema, os eventos e transições, são relatados e justificados. Um modelo de camadas para comunicação de sistemas RFID, consequência da FSM descrita, também é proposto neste capítulo. O modelo de simulação principal prevê a existência de submodelos para as Camadas Física e de Enlace da comunicação, os quais são apresentados nos capítulos seguintes do trabalho.

O Capítulo 3 apresenta conceitos sobre rádio frequência (RF) e sobre características de funcionamento de sistemas RFID que serão necessários para o entendimento da continuidade do trabalho, principalmente em relação ao Capítulo 4, onde a contribuição principal desta tese para simulação da camada física de sistemas RFID é relatada. Também são discutidas metodologias típicas para criação de modelos de simulação para sistemas baseados em RF. Os trabalhos relacionados com simulação da camada de RF em sistemas RFID também são apresentados neste capítulo.

No Capítulo 4, são apresentadas as técnicas, metodologias, as dificuldades e soluções encontradas para a definição de um modelo completo para a simulação do nível físico da comunicação de sistemas UHF RFID. São apresentados resultados de validação e uma conclusão.

O Capítulo 5 apresenta a comunicação RFID na Camada de Enlace: os protocolos anti-colisão dos sinais refletidos pelas etiquetas, os problemas dos protocolos atualmente padronizados, as soluções apresentadas para estes problemas e formas de simulação dos protocolos. Um *framework* especificamente desenvolvido para os testes e validações deste trabalho, que implementa todos os algoritmos anti-colisão e também os modelos de simulação da Camada Física propostos no Capítulo 4, é descrito neste capítulo. A criação de um modelo de simulação de algoritmo anti-colisão baseado em equação linear também é descrita. O capítulo também apresenta uma seção de trabalhos relacionados específicos, resultados e conclusão.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões gerais, contribuições, trabalhos futuros e as publicações obtidas ao longo do doutorado.

2. MODELO PRINCIPAL PARA UM SIMULADOR DE AMBIENTES RFID

Este trabalho apresenta uma série de modelos de computação (MoCs – *Models of Computation*) para o desenvolvimento de sistemas de simulação de ambientes RFID. Em [Vin00], bem como também em [Mar02], é visto que um MoC refere-se a modelos de sistemas formados por componentes de hardware e software, sendo abstrações de objetos que devem representar o comportamento real de (ou proposto para) tais objetos.

A descrição de sistemas de computação pode utilizar o formalismo dos MoCs para apresentar as funcionalidades do sistema. Muitos sistemas computacionais, tais como o simulador geral apresentado neste capítulo, realizam tarefas de forma paralela ou concorrente. Edward Lee, em [Gir99] e [Buc94], diz que:

Em sistemas concorrentes, módulos são agentes relativamente autônomos que interagem através de mensagens. As regras de interação entre estes agentes, a sintaxe e a semântica destas mensagens, são o que chamamos de modelos de computação.

Ainda neste capítulo, é apresentada a proposta de um modelo de camadas (semelhante ao modelo ISO/OSI) para comunicação de sistemas RFID. Este modelo é utilizado como premissa para os modelos independentemente desenvolvidos ao longo do trabalho.

Em relação a simulações de rádio frequência, estas são baseadas em modelos de propagação. Tais modelos são equações que permitem estimar precisamente as características do sinal para sistemas de comunicação sem fio, possibilitando estimar a potência e a dispersão do sinal no tempo em ambientes que utilizam RF [Sar03], [Tam95]. As equações e o modelo geral de propagação desenvolvido neste trabalho para a simulação do nível físico da comunicação de sistemas RFID serão apresentados no Capítulo 3.

Os resultados e validações apresentados neste trabalho foram gerados através da implementação, em software, dos modelos aqui propostos, e os resultados das simulações foram comparados, quando possível, com testes práticos, e também através de comparações com resultados disponíveis na literatura e em documentos técnicos.

Este trabalho foi baseado em modelos de alto nível de abstração, que permitem representar as características fundamentais de sistemas RFID, permitindo aos usuários dos modelos a configuração detalhada do ambiente a ser simulado.

2.1 FSM – MÁQUINAS DE ESTADO FINITO DO SISTEMA COMPLETO DE SIMULAÇÃO

A estratégia de projeto do primeiro MoC a ser apresentado, descreve, em alto nível, através de uma Máquina de Estado Finito (FSM – *Finite State Machine*), o comportamento geral da proposta de ambiente simulador de ambientes RFID. A Figura 2-1 apresenta os quatro estados principais do modelo (as transições e eventos desta FSM são detalhados a seguir, na Seção 2.2). Simulações do nível físico e lógico da comunicação de dispositivos RFID são previstas neste MoC principal do sistema de simulação.

Configuração das características do ambiente (CCA): estado do sistema no qual o usuário configura as características físicas do ambiente a ser simulado. Tipo e quantidade de etiquetas presentes no ambiente, distâncias e materiais são descritos neste momento.

Simulação de rádio frequência (SRF): estado que avalia, em cada período de tempo, quais etiquetas do ambiente estão fisicamente dentro do raio de leitura do equipamento leitor. Outra importante questão a ser considerada é que, eventualmente, etiquetas poderão estar acessíveis ao leitor, mas o oposto não ser verdadeiro, isto é, uma etiqueta pode ser alcançada pelo sinal do leitor, mas no caminho inverso (da etiqueta para o leitor), o sinal pode não ter potência suficiente para ser compreendido pelo leitor (mais detalhes são discutidos na seção de simulação do nível físico da comunicação). O estado SRF é ativado cada vez que uma ou mais etiquetas estiverem presentes no ambiente, e que ainda não tenham sido identificadas pelo estado de anti-colisão do sinal (SPA). Basicamente, o estado SRF passa todas as etiquetas detectadas para o estado SPA. O estado SPA identifica as informações únicas de cada etiqueta e retorna o controle do sistema para o estado SRF. Estes dois estados alternam-se entre si até que todas as etiquetas do ambiente tenham sido identificadas. Devido a colisão dos sinais emitidos pelas etiquetas, a mesma etiqueta pode ser fisicamente detectada mais de uma vez pelo estado SRF, até que o estado SPA consiga identificar unicamente as informações desta etiqueta entre as demais presentes no ambiente.

Simulação do processo de anti-colisão (SPA): recebe do estado SRF a informação sobre a(s) etiqueta(s) presente(s) no ambiente. No caso de haver mais de uma etiqueta no ambiente, o processo anti-colisão é iniciado e diversas trocas de informações entre os estados SRF e SPA são necessárias até que o processo completo de anti-colisão dos sinais das etiquetas possa ser concluído. Eventualmente, uma etiqueta que no início do processo anti-colisão tenha sido detectada no ambiente pelo processo SRF, pode sofrer interferências ou o ambiente pode ser alterado e esta mesma etiqueta ficar não acessível antes da conclusão do processo realizado no estado SPA. O estado SRF interrompe o envio de informações sobre esta etiqueta para o estado SPA, que desta forma não consegue completar a leitura dos dados da etiqueta. Esta situação pode acontecer, por exemplo, em ambientes com etiquetas em movimento ou com taxas elevadas de ruídos.

Software aplicativo de alto-nível (SAN): estado final do software de simulação,

quando a informação armazenada na etiqueta recém identificada é repassada para um sistema aplicativo de alto-nível do usuário do sistema.

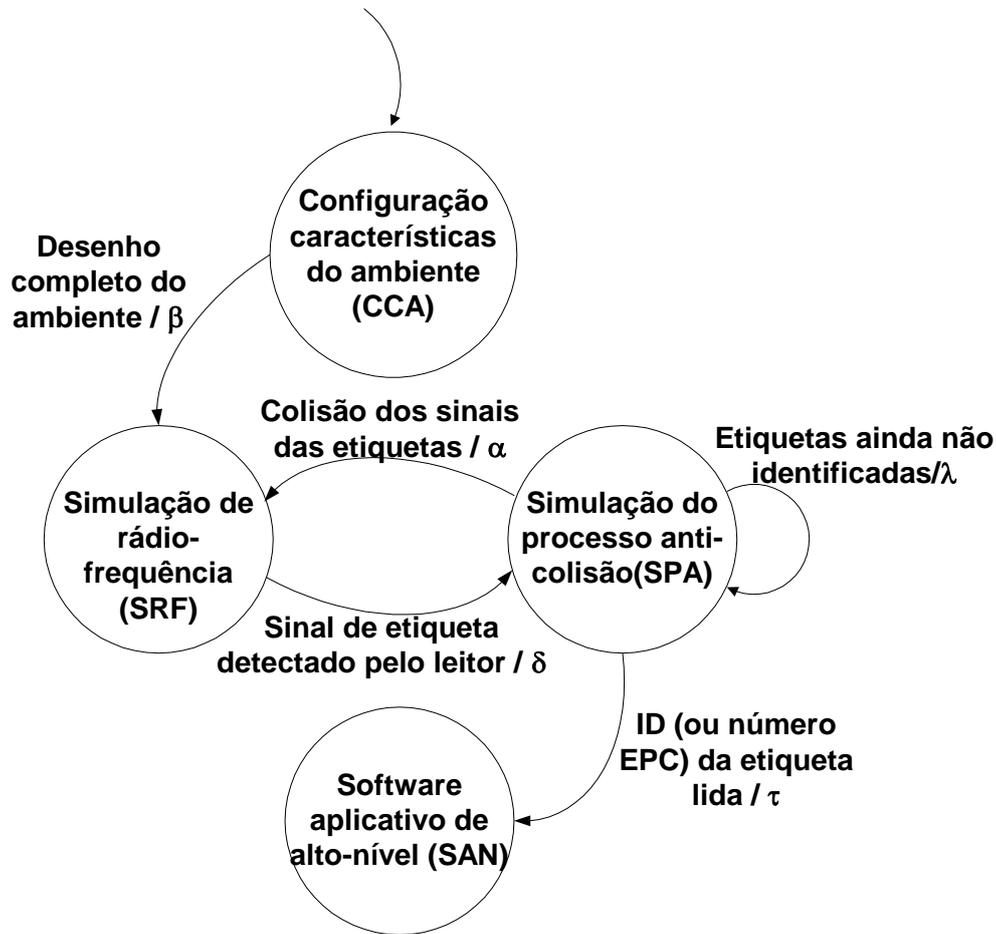


Figura 2-1: Estados principais da FSM proposta para um sistema completo de simulação RFID.

2.2 EVENTOS E TRANSIÇÕES DA MÁQUINA DE ESTADOS

Conforme apresentado na Figura 2-1, cada nodo representa um estado e cada arco representa uma transição. CCA é o estado inicial da máquina.

De acordo com [Lee98], uma FSM M é um registro definido por

$$M ::= \langle I, O, Q, q_0, T \rangle \quad (2.1)$$

onde

- I é o conjunto de eventos de entrada; O é o conjunto de eventos de saída; Q é o conjunto finito de estados; $q_0 \in Q$ é o estado inicial; T é o conjunto de transições.

Um evento é uma tupla que relaciona uma ação ao tempo. Cada transição $t \in T$ é

$$t ::= \langle qs, aguardar/ação, qd \rangle \quad (2.2)$$

onde

- $qs \in Q$ é o estado que iniciou o evento.
- Um *aguardar* (g) é uma expressão Booleana gerada a partir da seguinte gramática

$$g ::= true \mid false \mid e \mid \neg g \mid g \vee g \mid g \wedge g \quad (2.3)$$

onde $e \in I$. A definição sobre se um evento e é *true* ou *false* é de acordo com a avaliação sobre se o evento está ativo ou inativo, respectivamente. Os operadores \neg , \vee , \wedge correspondem aos operadores Booleanos *not*, *or*, *and*, respectivamente.

- Uma ação (a) é composta por uma lista de eventos de saída:

$$a ::= nil \mid b \quad (2.4)$$

$$b ::= e \mid b, b \quad (2.5)$$

onde $e \in O$ e “,” distingue dois eventos da ação.

- $qd \in Q$ é o estado de destino.

Quando a FSM está em execução, os eventos são processados e uma transição é ativada quando seu gatilho *aguardar* torna-se *true* sob a entrada atual. A FSM passa para o estado de destino da transição ativada, e emite cada evento de saída programado para esta transição.

Cada estado é ligado a um estado de destino e esta ligação é nomeada “aguardar/ação”. Para o diagrama de estados apresentado na Figura 2-1, $I = \{\text{“Desenho completo do ambiente”, “Colisão dos sinais das etiquetas”, “Sinal de etiqueta detectado pelo leitor”, “Etiquetas ainda não identificadas”, “ID (ou número EPC) da etiqueta lida”}\}$, $O = \{\beta, \alpha, \delta, \lambda, \tau\}$, $Q = \{CCA, SRF, SPA, SAN\}$, $q_0 = CCA$, e $T = \{ \langle CCA, \text{Desenho completo do ambiente}/\beta, SRF \rangle, \langle SRF, \text{Sinal de etiqueta detectado pelo leitor}/\delta, SPA \rangle, \langle SPA, \text{Colisão dos sinais das etiquetas}/\alpha, SRF \rangle, \langle SPA, \text{Etiquetas ainda não identificadas}/\lambda, SPA \rangle, \langle SPA, \text{ID (ou número EPC) da etiqueta lida}/\tau, SAN \rangle \}$, onde

β é a informação sobre o ambiente, tais como o tipo de etiquetas, materiais nos quais as etiquetas estão fixadas e distâncias.

α é o comando de solicitação para nova detecção de sinais RF de etiquetas.

δ é o sinal de RF detectado.

λ é a continuação da troca de dados do processo de anti-colisão dos sinais das etiquetas.

τ é o ID (ou número EPC) da etiqueta completamente reconhecida.

O modelo mostrado na Figura 2-1 é hierárquico; em outras palavras, ele prevê a existência de outros modelos internos específicos, sendo, portanto, uma máquina de

estados hierárquica (HCFSM - *Hierarchical Concurrent FSM*). Os modelos internos (escravos) irão descrever as formas de simulação do nível físico da comunicação (rádio frequência) e as simulações do nível lógico (anti-colisão dos sinais das etiquetas). HCFSM são modelos que permitem a um estado de uma FSM ser refinado em outra FSM, i.e., um conjunto de subestados. Esta característica possibilita que sejam desenvolvidos, de forma independente, diversos modelos internos de simulação, tornando o sistema flexível de acordo com suas especificidades [Lee98]. Nos próximos capítulos, serão apresentados os modelos e técnicas de simulação já desenvolvidos para os estados RFS e SPA, i.e., seus respectivos estados escravos.

A Figura 2-2 apresenta a mesma FSM já apresentada na Figura 2-1, mas agora identificada com os estados FSM escravos que podem ser acionados pelos dois principais estados do simulador aqui apresentado, os quais são os estados de simulação do nível físico (RFS) e lógico (SPA) da comunicação de sistemas RFID. De fato, cada estado escravo é uma FSM completa que deve ser especificamente definida, e são apresentados com auto-transições a fim de caracterizar esta independência. Este trabalho irá apresentar os estados escravos já desenvolvidos, tais como os estados Btree e ALOHA Calculated Q para simulação do nível lógico (SPA) e também os estados referentes à simulação do nível físico (SRF).

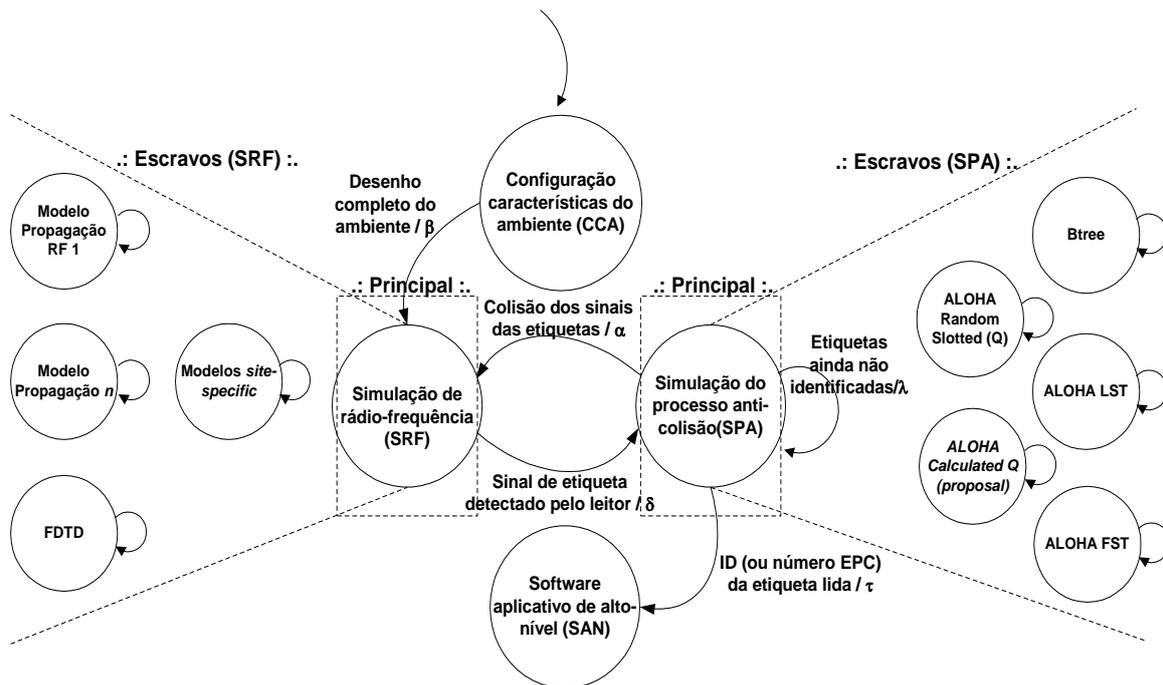


Figura 2-2: HCFSM para o sistema completo de simulação RFID, com estados *principais* e *escravos* identificados.

2.3 DEFINIÇÃO DE UM MODELO DE COMUNICAÇÃO DE DADOS PARA SISTEMAS UHF RFID

A operação de um sistema RFID pode ser dividida em dois principais estágios: (1) a comunicação física baseada em RF entre o leitor e as etiquetas; (2) o estágio de identificação de cada etiqueta presente no ambiente. Esta é a definição básica deste

trabalho, e é possível fazer uma analogia entre esses estágios com as camadas 1 (Física) e 2 (Enlace) do modelo OSI de redes. Na camada 1 ocorre a primeira parte da comunicação entre o leitor e as etiquetas, quando o leitor, através do envio de um sinal de RF inicial, energiza as etiquetas e estas podem iniciar seus processamentos internos básicos e responder, através da reflexão modulada, o sinal originalmente recebido. Tendo em vista que todas as etiquetas utilizam a mesma frequência do espectro, no estágio 2, de acordo com protocolos de multiplexação do canal de RF (os protocolos anti-colisão dos sinais emitidos pelas etiquetas), um conjunto de operações entre o leitor e as etiquetas é realizado a fim de que, a cada instante de tempo, somente uma etiqueta tome a iniciativa de enviar seus dados.

A grande diferença entre o modelo de camadas aqui sugerido para descrever a comunicação de sistemas RFID, e o modelo OSI, é que enquanto no OSI a interação entre as camadas, a sua troca de serviços, ocorre toda em um único estágio, no modelo de simulação da comunicação RFID aqui apresentado existem diversas trocas de mensagens entre os níveis 1 e 2 até que, finalmente, o nível 3 possa ser acionado (Figura 2-3). As linhas horizontais servem para representar, assim como é feito no modelo OSI, que cada camada de um nodo comunica-se com a camada correspondente do outro nodo.

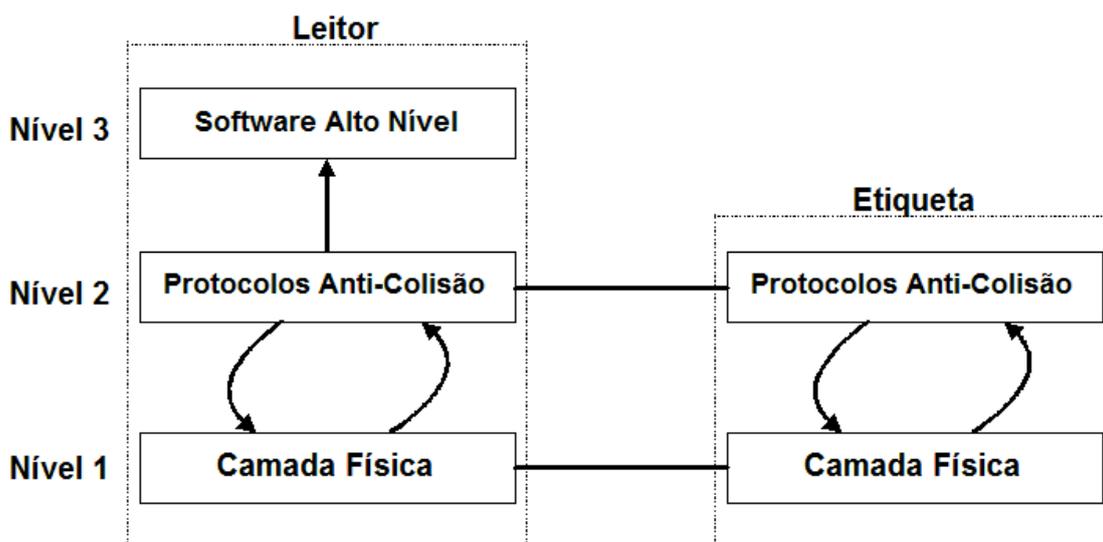


Figura 2-3: Definição de um modelo de camadas para comunicação de sistemas RFID.

O motivo das trocas de mensagens entre os níveis 1 e 2 é que, a fim de tornar as simulações o mais fiel possível com a realidade, é necessário verificar, a cada passo da comunicação entre o leitor e a etiqueta:

- (i) se a etiqueta continua acessível no nível físico, ou seja, se o sinal RF continua chegando com a intensidade mínima necessária para manter a etiqueta ativa;
- (ii) se a etiqueta não se encontra em uma distância na qual não seja possível o seu sinal chegar até a antena do leitor com a potência mínima da sensibilidade do leitor, logo após algum dos passos intermediários do

processo de identificação (mas antes do término da comunicação), e;

- (iii) se não surgiu algum sinal interferente ou modificação no ambiente que atrapalhe a comunicação já em andamento entre leitor e etiqueta. A Figura 2-4 mostra, baseado nas informações fornecidas pelo padrão ISO 18000-6C/EPC Gen2 [ISO06], os passos através dos quais um equipamento leitor acessa e lê uma etiqueta. É possível perceber que se alguma interferência surgir entre algum dos passos intermediários, a comunicação não se completará. Este é o motivo pelo qual o modelo principal de simulação aqui apresentado (Figura 2-1) realiza uma nova simulação do nível físico cada vez que a etapa da leitura no nível físico (troca de informações entre leitor - etiqueta) vai ser realizada. É necessário verificar se a etiqueta continua acessível fisicamente naquele instante de tempo.

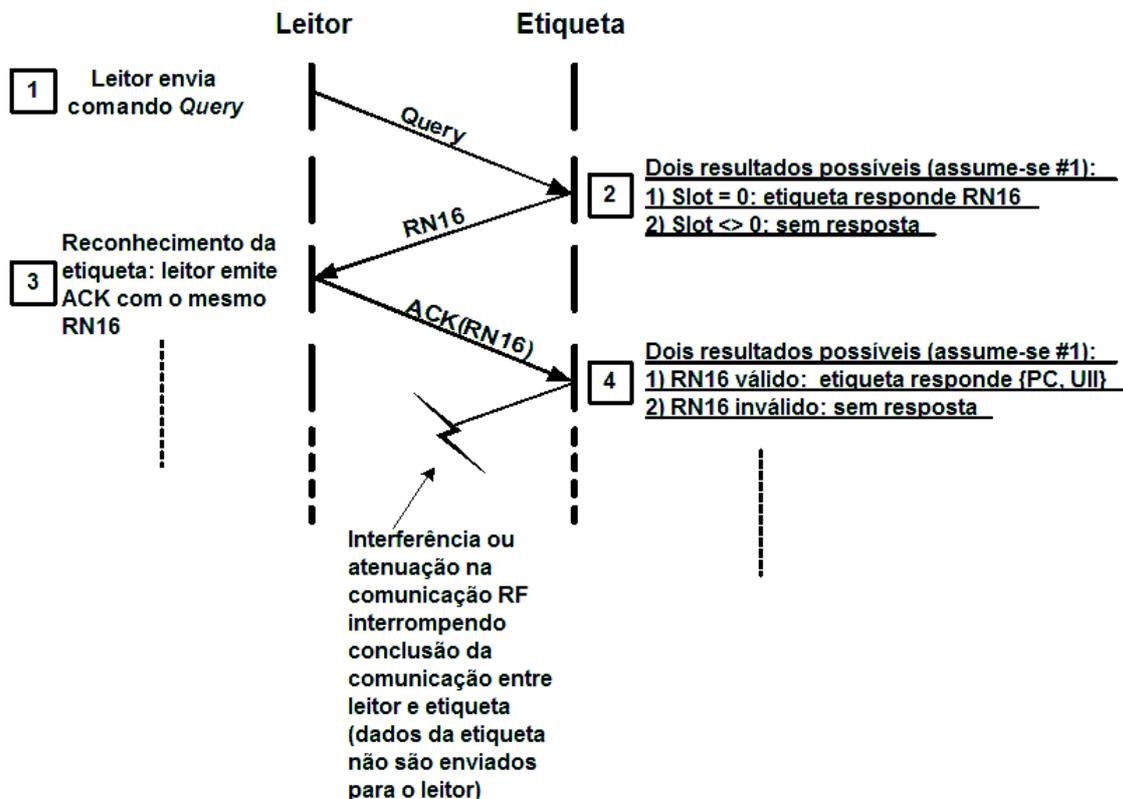


Figura 2-4: Interrupção das etapas realizadas por um equipamento leitor para acessar uma etiqueta, devido surgimento de ruído ou devido o limite da atenuação ter sido alcançado.

3. DEFINIÇÕES SOBRE RÁDIO FREQUÊNCIA, RFID E FORMAS DE SIMULAÇÃO PARA ESTAS TECNOLOGIAS

Neste capítulo são apresentados conceitos sobre rádio frequência (RF) e sobre características de funcionamento de sistemas RFID que serão necessários para o entendimento da continuidade do trabalho, principalmente em relação ao Capítulo 4, onde a contribuição principal desta tese sobre simulação da camada física de sistemas RFID é relatada. Também são discutidas metodologias típicas para criação de modelos de simulação para sistemas baseados em RF. Os trabalhos relacionados com simulação da camada de RF em sistemas RFID também são apresentados neste capítulo.

A Seção 3.1 apresenta definições básicas de RF, tais como amplitude, frequência e ganho de antena, entre outros. A Seção 3.2 faz um resumo sobre as metodologias de criação de modelos de simulação para transmissões baseadas em RF, abordando os modelos de propagação estatísticos e determinísticos. O leitor familiarizado com os conceitos de RF e os respectivos modelos de simulação pode avançar a leitura diretamente para as seções seguintes.

A Seção 3.3 apresenta trabalhos relacionados sobre modelos de simulação da camada física de RFID.

3.1 COMPRIMENTO, AMPLITUDE, FREQUÊNCIA DE UMA ONDA RF E DISTÂNCIAS MÁXIMAS DE LEITURA

O comprimento de uma onda irradiada é o tempo entre cada ciclo do sinal propagado. Usualmente representado pela letra grega lambda (λ) [Fus06].

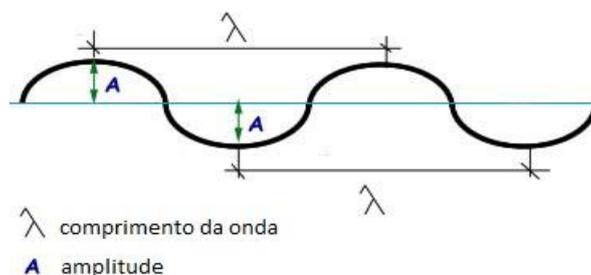


Figura 3-1: Comprimento e pico de amplitude de uma onda (adaptado de [Bis11]).

A frequência f é o número de ciclos (repetições) por segundo executados pela onda, e é medida em Hertz. O comprimento de onda λ é igual à velocidade da onda c

(velocidade da luz no vácuo = 299.792,458 km/s ~ 300.000 km/s = 300.000.000 m/s) dividida pela sua frequência (3.1). A amplitude é a magnitude máxima da oscilação da onda.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.1)$$

Neste trabalho foram utilizados dispositivos padronizados pela norma ISO 18000-6, que funcionam dentro da faixa de frequência UHF. Dispositivos UHF trabalham na faixa de frequência entre 300 MHz e 3 GHz, com comprimentos de onda, portanto, entre 10 centímetros (cm) a 1 m. Mais especificamente, neste trabalho, a frequência utilizada nos dispositivos foi 915,25 MHz (32,78 cm), dentro da faixa regulamentada pela ANATEL para o funcionamento de sistemas UHF RFID no Brasil.

3.1.1 DIPOLO DE MEIA ONDA

Entre os tipos mais frequentes de antena utilizada por etiquetas RFID está o dipolo de meia onda [IMP11], [UPM10]. Uma antena dipolo é formada por dois condutores retilíneos, cada um com $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda (λ) da radiação do sistema (Figura 3-2). Portanto, o comprimento total de um dipolo é igual à metade da onda que se deseja captar. A alimentação é pelo centro [Wen09].

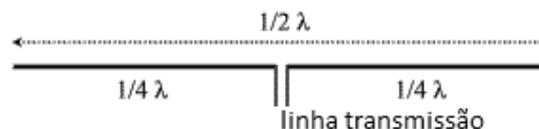


Figura 3-2: Representação de uma antena dipolo de meia onda [Soa11].

Uma antena dipolo pode ser polarizada horizontalmente ou verticalmente. A polarização de uma onda eletromagnética é o plano no qual se encontra o campo elétrico desta onda (Figura 3-3).

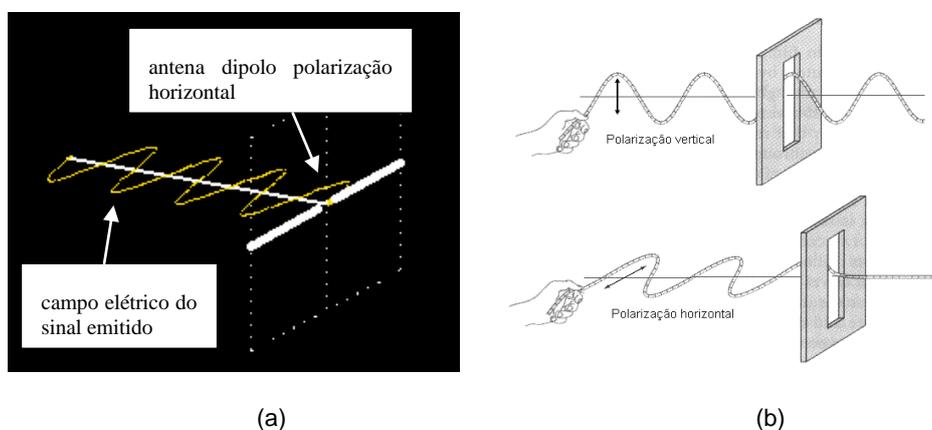


Figura 3-3: (a) Antena dipolo polarizada horizontalmente (adaptado de [PY411]); (b) ondas polarizadas horizontalmente e verticalmente [Mun10].

3.1.2 GANHO DE UMA ANTENA

A propriedade de ganho de potência (G) é uma medida relacional entre a diretividade do sinal emitido por uma dada antena em relação a uma antena isotrópica, a qual irradia uniformemente em todas as direções. A antena de uma etiqueta RFID, assim como qualquer outra antena diretiva, possui a propriedade de ganho.

Qualquer antena que apresente características direcionais terá ganho de potência, pelo menos em algumas direções de radiação [Fus06]. Uma antena dipolo, por exemplo, tem a concentração principal de potência ao longo do plano equatorial ($\theta = 90^\circ$) da antena.

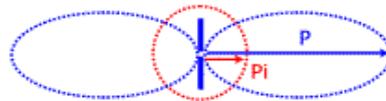


Figura 3-4: comparação das direções de potência entre uma antena isotrópica (P_i) e um dipolo (P) [Soa11].

A Figura 3-4 demonstra um exemplo de curva aproximada de potência irradiada por um dipolo de meia onda e por uma antena isotrópica. O vetor P apresenta a direção da potência máxima irradiada pelo dipolo. P_i apresenta a irradiação máxima de uma antena isotrópica na mesma posição do dipolo e alimentada com a mesma potência de transmissão – no caso da antena isotrópica, a potência é a mesma em todas as direções ao redor da antena.

O ganho do dipolo de meia onda tendo como referência a antena isotrópica é dado pela relação ente essas potências, expressa em decibéis:

$$dBi = 10 \log (P / P_i) \quad (3.2)$$

A unidade de medida para o ganho é o dBi (“decibéis em relação ao isotrópico”). Uma antena isotrópica tem, portanto, ganho igual a zero dBi.

A definição do ganho é definida como

$$G = \frac{\text{potência máxima recebida (radiada) a partir de uma dada antena}}{\text{potência máxima recebida (radiada) a partir de uma antena de referência}} \quad (3.3)$$

Considerando uma eficiência de 100%, o valor do ganho de uma antena dipolo de meia onda em relação a um radiador isotrópico (G) é 2,1 dBi.

3.1.3 DISTÂNCIAS DE LEITURA

Em [Che07] estão citadas as distâncias típicas de alcance de leitura para as quatro escalas principais de rádio-frequência utilizadas em RFID: LF (baixa frequência, tal como 125 KHz), HF (alta frequência, tal como 13.56 MHz), UHF (ultra alta frequência, tais como 868 MHz ou 915 MHz) e microondas (tal como 2.4 GHz). Para sistemas RFID nas faixas

LF e HF, a distância típica de leitura entre a antena de um interrogador e as etiquetas é normalmente de até 60 cm. Para sistemas na faixa de microondas, a distância máxima é normalmente em torno de 1 m. Em UHF, a distância de leitura aumenta para uma média de 5 m, justificando o motivo pelos quais estas etiquetas sejam atualmente as mais utilizadas para um grande número de aplicações. Em relação à distância média de leitura para etiquetas UHF, foco deste trabalho, a distância de 5 m fornecida pela referência [Che07] pode ser parcialmente confirmada com as informações fornecidas pela referência da empresa Atmel, uma das pioneiras da tecnologia de RFID [Fri10], onde é apresentada a relação entre a potência³ (dBm) recebida pelas etiquetas e a distância (m) máxima possível para leitura das etiquetas. Na medida em que a distância aumenta, o ganho de potência diminui até chegar ao limite mínimo necessário para ativar as etiquetas, que, conforme apresentado na referência, é de -15 dBm (este valor varia para mais ou para menos conforme o modelo da etiqueta e as características do ambiente – esta variação irá influenciar também a distância máxima de leitura). Ainda de acordo com a referência, a distância máxima para leitura de etiquetas UHF seria na faixa dos 4 m.

Conforme será apresentado no Capítulo 4, aqui neste trabalho os testes realizados em câmara anecóica apontaram -12,1 dBm como a potência mínima para ativar o modelo de etiqueta utilizada no cenário deste trabalho, quando em espaço livre.

Um conjunto de informações bem mais detalhado sobre distâncias possíveis para leitura, considerando fatores do ambiente, pode ser visualizado no gráfico da **Erro! Fonte e referência não encontrada. Erro! Fonte de referência não encontrada.** Figura 3-5. Este gráfico faz parte do material técnico de um reconhecido fornecedor de dispositivos RFID [INT08], e leva em consideração as diferenças de alcance do sinal dentro das várias escalas de frequência do UHF padronizadas para RFID ISO 18000-6 (860MHz até 960MHz), além de também considerar três tipos de materiais onde a etiqueta poderá estar fixada (madeira, papelão ou plástico), citando também, para referência, a etiqueta no “espaço livre” (sem estar afixada em material algum). Por considerar fatores do ambiente (diferentes tipos de materiais onde as etiquetas estarão fixadas, sofrendo interferência na propagação da RF devido a estes materiais), e diferenças na escala de frequência, os valores de alcance do sinal variam bastante ao longo do gráfico. Conforme pode ser observado, especificar objetivamente uma distância máxima de leitura em dispositivos RFID é algo complexo, devido às diversas variáveis envolvidas.

³ dBm: dB miliwatt, medida mais comum para expressar a potência de um equipamento de transmissão de rádio.

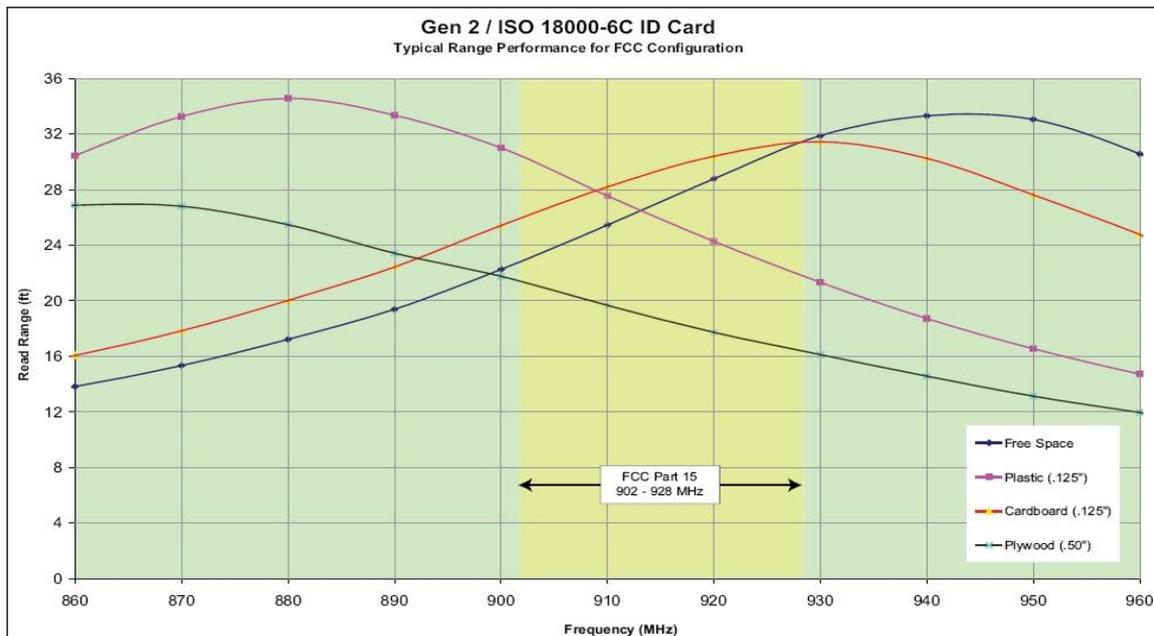


Figura 3-5: Valores típicos de alcance para leitura em dispositivos RFID ISO 18000-6 [INT08].

Dentro do ambiente no qual foi gerado o gráfico da Figura 3-5, na faixa completa de frequência da norma ISO 18000-6, 3,65 m (12 ft) é o pior caso em relação à distância máxima de leitura, quando operam na faixa de 960MHz e fixadas em materiais compostos por madeira (*Plywood*). A maior distância de comunicação entre uma etiqueta e o leitor foi obtida na frequência de 880MHz quando fixada em plástico (*Plastic*), atingindo algo próximo a 10,66 m (35 ft). Na frequência central, 915MHz, as distâncias de leitura variaram entre aproximadamente 5,48 m (18 ft), quando fixadas em plástico, e 9,14 m (30 ft), quando fixadas em papelão (*Cardboard*). Esta referência demonstra também, portanto, como determinados materiais interferem na capacidade de comunicação. Além disso, fatores técnicos como desenho da antena e tipo do circuito integrado da etiqueta eletrônica, bem como os diversos fatores ambientais, influenciam os valores de distância máxima de leitura. Conforme será apresentado nas próximas seções deste capítulo, os resultados obtidos pelo presente trabalho apontaram uma distância máxima de leitura em 6,76 m, com a etiqueta em espaço livre e na frequência 915 MHz.

3.2 BREVE HISTÓRICO DAS METODOLOGIAS DE CRIAÇÃO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO PARA TRANSMISSÕES BASEADAS EM RF

Através de pesquisas em trabalhos anteriores que descrevem modelos de propagação de ondas de rádio frequência, tais como, [Sei92], [Ber92] e [Wir90], é possível constatar que esse tipo de modelo é implementado, em sua grande maioria, através de formulações matemáticas empíricas. Esses modelos de propagação de RF são desenvolvidos para prever o comportamento da atenuação de sinais de enlaces de RF similares e sob as mesmas condições daquele que está servindo de base para as definições.

Tanto nas referências acima citadas, como também em [Dob96], os métodos utilizados para a medição da atenuação do sinal de RF de um sistema a ser instalado,

bem como para a definição de modelos de simulação, a abordagem é baseada na simulação, durante os testes de captura do sinal de RF a ser utilizado, de um ambiente o mais próximo possível da realidade. As referências da área recomendam que as medições devem ser realizadas até se encontrar o ponto onde a qualidade do sinal está com a potência mínima possível para o funcionamento do serviço. De posse dessa informação, é possível determinar a área total de funcionamento do sistema. É necessário realizar uma série de medições a fim de localizar o melhor ponto para as antenas transmissoras e receptoras.

Os métodos descritos nessas referências, considerando-se as devidas características específicas de ambiente e formas de uso, servirão como base para a definição dos modelos de propagação para RFID propostos nesse trabalho.

3.2.1 MODELOS DE PROPAGAÇÃO RF: ESTATÍSTICOS E DETERMINÍSTICOS

Várias metodologias têm sido utilizadas ao longo dos anos para a criação de modelos tradicionais de propagação RF. As metodologias dividem os modelos entre estatísticos e determinísticos (ou *Site-specific*). Modelos estatísticos são baseados em dados históricos de testes e são mais simples de serem desenvolvidos. Modelos determinísticos tais como *Site-specific* são baseados na teoria da propagação de ondas eletromagnéticas, cálculos e intensas medições sobre as características físicas do tipo de ambiente em questão (daí o termo *Site-specific*), possibilitando simulações muito precisas da propagação dos sinais.

Finite-Difference Time-Domain (FDTD) é outro exemplo de método determinístico que implementa as equações de Maxwell⁴, gerando simulações muito precisas. Por se tratar de um método numérico, FDTD exige grandes quantidades de recursos computacionais e exaustivos cálculos para atualizar os sucessivos instantes de tempo. Devido estas características, FDTD não é viável para todos os tipos de aplicações [Sar03], [Lau06].

Para a criação do modelo apresentado neste trabalho, que pode ser replicado para outras situações e ambientes, foi utilizada a abordagem determinística *Site-specific*. Conforme citado, esta pesquisa descobriu que dois dos principais problemas para a criação de um modelo de simulação para ambientes RFID são:

- (i) descobrir a influência de cada material no qual a etiqueta está colada em relação a potência necessária para ler a etiqueta;
- (ii) descobrir o percentual de energia refletida pela etiqueta quando atingida pelo sinal RF do leitor.

⁴ A relação entre os campos elétrico e magnético, desenvolvida por James Clerk Maxwell (1831-1879) em 1863 e codificadas por quatro equações concisas, permitem a compreensão e o cálculo da propagação das ondas eletromagnéticas [Wen09].

A abordagem determinística *Site-specific* foi utilizada para determinar a influência dos materiais nos quais as etiquetas estavam fixadas, e também as demais características do ambiente, tais como a potência dos sinais de RF provenientes (refletidos ou *backscattered*⁵) da etiqueta, ou seja, o caminho etiqueta – leitor.

Além dos problemas normais para simulação RF, tais como obstáculos, ruídos e reflexões, sistemas RFID ainda têm a particularidade da baixa potência do sinal refletido pelas etiquetas passivas UHF [Nik06], [Nik08]. Para calcular o canal reverso (sinal RF refletido pela etiqueta em direção ao leitor) é fundamental saber o percentual de potência que a etiqueta retorna quando atingida pelo sinal RF do leitor. Infelizmente, essa é uma informação não disponibilizada pelos fabricantes (mesmo quando consultados), tampouco disponível de forma objetiva na literatura. A obtenção desse valor se mostrou um dos desafios deste trabalho.

Para determinar a influência dos materiais nos quais as etiquetas estavam fixadas, foram realizadas séries de testes em uma câmara anecóica de um laboratório certificado de acordo com os padrões estabelecidos pela EPCglobal para testes RFID, apresentados na Seção 4.4.

3.3 TRABALHOS RELACIONADOS COM MODELOS DE SIMULAÇÃO DA CAMADA FÍSICA DE RFID

Devido os benefícios gerados e a necessidade prática por parte dos projetistas de sistemas, vários trabalhos nos últimos anos apresentaram propostas de modelos específicos para propagação de sistemas RFID. Apesar disto, não foi encontrado na literatura um trabalho com a metodologia aqui apresentada para resolver, conforme já citado, os dois principais problemas para a criação de um modelo determinístico prático para RFID: influência do material no qual a etiqueta está fixada e percentual de potência refletida pela etiqueta. Conforme será demonstrado, determinar estes dois valores é a base para a criação de qualquer outro tipo de modelo de simulação de camada física para RFID. A seguir são citados os trabalhos relacionados com o modelo de simulação da camada física apresentado neste trabalho. Para cada trabalho relacionado é citada a relação específica com a presente tese.

Um dos trabalhos mais representativos da área é o de Floerkemeier e Sarma [Flo09]. Neste artigo os autores apresentam o RFIDSim (RFID simulation engine), software que simula em uma máquina de eventos discretos o funcionamento dos algoritmos anti-colisão e, de forma apenas teórica, sem testes reais e considerando um único modelo (genérico) de propagação de RF, os aspectos físicos de funcionamento de um sistema RFID. Não são consideradas as influências reais do ambiente sobre o modelo de propagação RF, tais como materiais que podem atenuar ou refletir os sinais. As simulações e resultados apresentados consideraram o funcionamento dos protocolos anti-colisão e resultados teóricos sobre o modelo de propagação de RF, mas sem citações

⁵ *Backscatter* é a reflexão (retorno) dos sinais, no sentido em que vieram. Etiquetas RFID tipo passivas utilizam este tipo de modulação, alternando o coeficiente de reflexão das suas antenas entre dois estados, de acordo com o dado a ser enviado.

sobre como os protocolos anti-colisão foram implementados, tendo em vista que partes fundamentais das rotinas desses não são especificadas nos documentos de padronização. Relação com este trabalho: apresentação de um sistema completo (camadas física e enlace) de simulação para ambientes RFID.

Outra referência importante são as pesquisas realizadas por Hugo Mallinson, da Universidade de Cambridge [Mal07], [Mal10]. As pesquisas deste autor apresentam uma série de testes do tipo "Site-specific". Os testes são de alto-nível, isto é, verificam o comportamento e funcionalidade da leitura de etiquetas RFID em determinados tipos de cenários específicos, tais como medir a interferência da localização exata onde a etiqueta está fixada em determinados invólucros de produtos. Em outros testes, robôs foram utilizados para movimentar uma etiqueta por grandes áreas, a fim de medir as melhores localizações de leitura da etiqueta. Os resultados apresentados relatam a influência do ambiente no comportamento do sistema. Os fundamentos e características técnicas básicas de funcionamento de sistemas RFID foram deixados em segundo plano, sendo pouco ou até não considerados na maior parte dos testes, tais como as diferenças que a potência emitida pelo equipamento leitor poderia exercer sobre os resultados ou os diferentes ganhos possíveis das antenas do leitor e das etiquetas e, também relevado, a diferença na potência de retorno do sinal refletido pela etiqueta. Os protocolos anti-colisão (camada lógica da comunicação RFID) também não foram considerados, o autor procurou focar os ensaios em situações onde estes protocolos não fossem determinantes para os testes. Relação com este trabalho: testes práticos, tipo "Site-specific", foram realizados a fim de registrar o comportamento do sistema sob determinadas condições.

Ainda citando Mallinson, em [Mal10] ele afirma que "não existem experimentos formais, rigorosos, de testes sobre o percentual de interferência de materiais no qual a etiqueta está fixada sobre o funcionamento do sistema". Relação com este trabalho: aqui nesta tese serão apresentados resultados específicos e uma metodologia para descoberta sobre a influência dos materiais no comportamento da leitura de etiquetas RFID, contribuindo para a falta destas informações citadas por Mallinson.

[Aro07] avalia, com ensaios práticos, as limitações máximas de distâncias de leitura, as interferências exercidas por metal e pela água quando próximos das etiquetas comerciais comuns, e também as limitações de distâncias máximas do sinal no canal de envio (do leitor para a etiqueta) e do canal de retorno (da etiqueta para o leitor). Relação com este trabalho: apresentação de ensaios que mostram que o canal de retorno (sinal refletido pela etiqueta) pode ser o limitador da distância máxima de leitura. Conforme cita Aroor [Aro07], "a sabedoria popular costuma afirmar que o sistema é limitado apenas pelo canal de envio (...) mas nós descobrimos que isto muitas vezes é falso".

[Gak08] apresenta a criação de um modelo de propagação para RFID para um único caso de uso, o mais simples possível: uma antena posicionada exatamente em frente a uma etiqueta, visada direta sem obstáculos entre os dois dispositivos. A etiqueta está afixada em uma bandeja de plástico, sobre uma mesa de metal. Foram realizados testes variando as distâncias entre a antena do leitor e a etiqueta e a angulação da etiqueta em relação à antena. Foram consideradas as influências do ambiente, tais como o metal da

mesa de apoio da bandeja, o chão e paredes ao redor. Os protocolos anti-colisão não foram considerados nos testes. Relação com este trabalho: criação de um modelo de simulação da camada física, considerando uma situação específica de ambiente.

Em [Lin10], é citado o atual aumento nas pesquisas sobre métodos de predição para sistemas RFID. O referido trabalho propõe, para simulação de dispositivos (e não de ambientes) RFID, o uso direto das equações de Maxwell a fim de calcular os campos magnéticos e a corrente das antenas utilizadas no sistema. Com o cálculo inicial das características elétricas dos dispositivos RFID em questão, são simuladas variações de funcionamento a partir de diversos ângulos e movimentações das etiquetas eletrônicas. Posteriormente, é utilizado o método estatístico Monte Carlo para ampliar a previsibilidade do modelo. Relação com este trabalho: estudo sobre as melhores formas de simulação de dispositivos e ambientes RFID.

[Kim09] é um trabalho teórico onde são apresentadas as formas de interferência entre dispositivos UHF RFID, bem como modelos matemáticos de propagação RF. Relação com este trabalho: o artigo não apresenta soluções para casos de uso reais, mas os modelos apresentados auxiliam a criação de modelos para usos práticos como os aqui apresentados.

Yamamoto e Yamazoe [Yam11] apresentam uma proposta a fim de reduzir as zonas de "sombra" de leitura no raio de ação da leitura de interrogadores RFID. A proposta é baseada no uso de conjuntos de antenas e na correta disposição destas antenas em relação à área onde as etiquetas estarão no momento da leitura. Relação com este trabalho: a referência apresenta equações de propagação RF e metodologias de uso destas equações para o estudo de caso do trabalho, conforme utilizado também nesta tese.

[Art09] apresenta a construção de um hardware que, ligado ao equipamento leitor, permite gravar as características de número de leituras com e sem sucesso ao longo de um determinado trajeto em um ambiente, bem como características e resultados de RF (tais como intensidade do sinal e ruídos) ao longo deste trajeto. A proposta, portanto, não permite a simulação de ambientes. Relação com este trabalho: conforme é citado no artigo, são realizados testes de funcionalidade de ambientes RFID já montados, permitindo a comparação técnica entre modelos de leitores e de etiquetas.

Em [Nik08], conforme aqui neste trabalho, é apresentado um detalhado estudo sobre a característica de propagação de sinais RFID, considerando várias características dos níveis físico e lógico da comunicação entre etiqueta e leitor. Mas diferentemente dos resultados apresentados nesta tese, a referência não apresenta modelos que possam ser utilizados para simulações.

Em [Xia11] é apresentado um estudo específico sobre a influência e o comportamento de sistemas RFID utilizados na identificação de containers, tipicamente fabricados de materiais metálicos. As influências do metal na propagação do sinal de RF, quais as melhores posições para as antenas do leitor e da etiqueta, bem como um modelo de propagação para esta situação, são apresentados no trabalho. Relação com este

trabalho: as metodologias utilizadas no trabalho citado para obter alguns resultados serviram de referência importante.

Existem trabalhos relacionados com forte abordagem no uso da metodologia FDTD. Sanchis et al, em [San10], apresentam um estudo específico sobre o comportamento de dispositivos RFID quando utilizados próximos ao corpo humano. O trabalho utiliza os métodos numéricos utilizados pelo FDTD. Estes métodos exigem grandes quantidades de recursos computacionais e exaustivos cálculos para atualizar os sucessivos instantes de tempo, não sendo viável para todos os tipos de aplicações. Em [Miy10] é apresentado um detalhado estudo sobre as características dos sinais RF, especificamente nas faixas RFID e em alguns ambientes típicos de uso de sistemas RFID. A influência da polarização da antena da etiqueta eletrônica é enfatizada nos resultados. O trabalho é estritamente teórico, mas com referências importantes para trabalhos que pretendem simular este tipo de ambiente. Os resultados apresentados nestes artigos foram importantes fontes de consulta sobre o comportamento elétrico e magnético dos dispositivos RFID. Também serviram para elucidar a dificuldade de se utilizar FDTD como método de simulação que pretenda ser rápido para o usuário.

4. SIMULAÇÃO DA CAMADA FÍSICA (RÁDIO FREQUÊNCIA) DE SISTEMAS UHF RFID

Conforme citado no Capítulo 2, este trabalho é baseado na apresentação de propostas de modelos de simulação para os dois principais estados de um sistema completo de simulação de ambientes UHF RFID. Estes dois principais estados, conforme o MoC apresentado naquele capítulo, são: simulação do nível físico da comunicação entre dispositivos RFID, a qual é baseada em rádio frequência, e a simulação do nível lógico (camada de enlace) da comunicação, que é baseado em protocolos de multiplexação. A simulação do nível físico é a representada pelo estado SRF e a simulação do nível lógico é a representada pelo estado SPA (ver Figura 2-1, Capítulo 2).

A predição da propagação de RF para ambientes RFID pode representar grandes benefícios para os projetistas destes sistemas. A medição e testes práticos no local onde estes sistemas irão atuar são caros em tempo e dinheiro.

O objetivo deste capítulo é apresentar as técnicas e metodologias utilizadas para a definição de um modelo completo para a simulação do nível físico da comunicação de sistemas UHF RFID, algo ainda inédito em termos de normas técnicas e também na literatura.

Inicialmente, a fim de servir como referência para a leitura e entendimento do restante do trabalho:

- i. Conceitos e equações que definem a propagação de rádio frequência;

E na continuação do capítulo:

- ii. Definição de “Um Modelo Determinístico de Propagação RF para Ambientes RFID Utilizando as Metodologias Site-Specific e FDTD”;

Ainda:

- iii. A influência exercida no modelo pelo material no qual a etiqueta está fixada;
- iv. Considerações estatísticas e proposta para a criação de um intervalo de confiança para uso dos resultados obtidos ao longo deste trabalho;
- v. Apresentação da técnica utilizada para descobrir a potência retornada pela etiqueta;
- vi. A metodologia de avaliação criada e os resultados finais de validação do modelo, os quais tiveram percentuais de acerto nas simulações, por ambiente, entre 95,3% (melhor caso) e 87,0% (pior caso).
- vii. Encerrando o capítulo, são apresentadas as definições técnicas sobre os tempos para escrita e leitura das etiquetas, e como esta informação pode ser utilizada

para descobrir se um determinado número de etiquetas poderá ser lido quando movimentadas na velocidade y , dados o tempo de exposição de leitura das etiquetas, aliado com a simulação sobre o alcance máximo de leitura destas etiquetas.

4.1 DEFINIÇÃO DE UM MODELO DETERMINÍSTICO DE PROPAGAÇÃO RF PARA AMBIENTES RFID UTILIZANDO A METODOLOGIA SITE-SPECIFIC

Simular em laboratório se uma etiqueta RFID será lida em uma determinada localização propicia economia de tempo de testes e de custos financeiros para os usuários. Esta seção apresenta as soluções e uma metodologia para a criação de modelos determinísticos de propagação RF, no nível físico da comunicação (camada 1 do modelo de comunicação) para ambientes RFID.

O modelo aqui apresentado foi desenvolvido a partir de um tradicional cenário de sistemas RFID:

- Etiquetas: Class1Gen2 UPM Dogbones (93 x 23 milímetros (mm))⁶
- Altura: etiquetas e antena do leitor a 1,5 m em relação ao solo
- Polarização: horizontal
- Material no qual a etiqueta estava fixada: cinco tipos de materiais (isopor, papelão, plástico, vidro e madeira) e espaço livre.

Durante o desenvolvimento do trabalho, foi possível determinar dois dos principais desafios para a criação de um modelo de propagação RF para ambientes RFID, como o aqui apresentado:

- i. descobrir a influência de cada material no qual a etiqueta está colada em relação a potência necessária para ler a etiqueta;
- ii. descobrir o percentual de energia refletida pela etiqueta quando atingida pelo sinal RF do leitor.

Para validar o modelo teórico resultante desta pesquisa, foram realizados testes reais em quatro tipos de ambiente, com etiquetas fixadas em cinco tipos de materiais (mais espaço livre). Em cada um dos quatro ambientes, foram utilizadas seis distâncias diferentes e três potências no leitor. Estes testes resultaram em percentuais de acerto entre 95.3% no melhor caso e 87.0% no pior caso. A metodologia aqui apresentada pode ser replicada para gerar modelos de simulação para outras configurações de ambientes RFID.

⁶ Este modelo de etiqueta, em específico, é um dos recomendados por grandes multinacionais do varejo, tais como a americana Wal-Mart e a alemã METRO Group, bem como pelo Departamento de Defesa Americano (DoD - Department of Defense) [UPM10].

4.2 SIMULAÇÃO DO NÍVEL FÍSICO EM SISTEMAS RFID: PROPAGAÇÃO DE RÁDIO FREQUÊNCIA

De acordo com [Sar03] a forma básica de simulação do nível físico de uma rede sem fios é através de modelos de propagação de rádio frequência. Modelos de propagação são fórmulas que permitem estimar precisamente os parâmetros do sinal para sistemas sem fio, tal como RFID. Considerando que testes práticos nos diversos locais de uso demandam muito tempo e custos financeiros, modelos de propagação têm sido desenvolvidos como uma forma conveniente e de baixo custo a fim de possibilitar simulações.

Para [Tam95], modelos de propagação propiciam estimar a potência do sinal ao longo da dispersão no tempo em diversos ambientes que utilizem RF. Estes dados são importantes na concepção e instalação de sistemas de RF. Modelos de propagação de RF podem ser gerados a partir de experimentos físicos reais e ou através de modelos teórico-matemáticos que apliquem as leis físicas de propagação de sinais elétricos.

Em espaço livre⁷, a potência atingindo a antena receptora – a qual é separada da antena transmissora por uma distância r – é dada pela equação de cálculo de propagação denominada Friis

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (4.1)$$

onde P_r é a potência recebida, P_t é a potência transmitida, G_t e G_r são, respectivamente, os ganhos das antenas de transmissão e recepção. Lambda (λ) é o comprimento de onda e r é a distância entre transmissor e receptor.

Um ambiente RFID é ilustrado na . Partindo desse cenário, é possível aplicar (4.1) em um modelo RFID de propagação em espaço livre, tendo como transmissor o equipamento leitor e, como receptor, a etiqueta eletrônica.

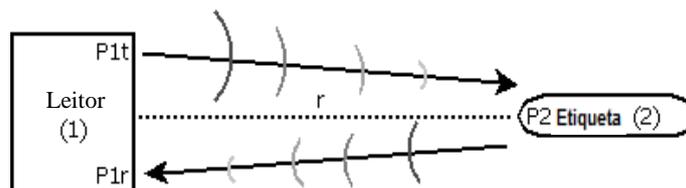


Figura 4-1: Transmissões RFID em espaço livre.

A equação de Friis adaptada para calcular a potência do sinal recebido pela etiqueta pode ser descrita da seguinte forma (4.2)

⁷ Espaço livre é o modelo mais simples para estudo da propagação de sinais. Neste modelo há uma componente de sinal de caminho direto entre o transmissor e o receptor, onde não há objetos que atenuem ou reflitam o sinal [Roc11].

$$P_{2r} = P_{1t} G_1 G_2 \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (4.2)$$

onde P_{2r} é a potência recebida pela etiqueta, P_{1t} é a potência transmitida pelo leitor, G_1 e G_2 são os ganhos das antenas do leitor e da etiqueta, respectivamente.

Para o cálculo do canal de retorno (da etiqueta para o leitor) o resultado da equação é a potência recebida pelo leitor (4.3)

$$P_{1r} = P_{2r} G_1 G_2 \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (4.3)$$

Entretanto, devido uma certa quantidade de potência consumida pela etiqueta para sua ativação e preparo para a transmissão, existe uma diferença entre a potência recebida pela etiqueta e a potência que esta mesma etiqueta consegue transmitir para responder os seus dados. Isto é a perda de potência na transmissão da resposta da etiqueta e é dado por B_L [Gau08]. A potência refletida (ou *backscattered*) pela etiqueta é dada por (4.4)

$$P_{2t} = B_L P_{2r} \quad (4.4)$$

Na equação que contempla todo o cenário de espaço livre RFID, a potência recebida pelo leitor é inversamente proporcional a quarta potência da distância. Adicionalmente, agora as duas antenas são usadas duas vezes (na transmissão e na recepção), então o ganho de cada antena é multiplicado por 2. A fórmula completa da potência recebida pelo leitor é definida em (4.5), e o ambiente é mostrado na Figura 4-2.

$$P_{1r} = P_{1t} (G_1 G_2)^2 \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^4 B_L \quad (4.5)$$

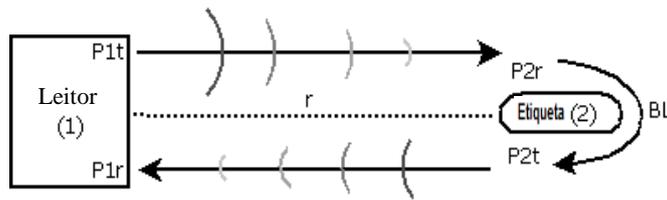


Figura 4-2: Ambiente de simulação RFID em espaço livre com variáveis do modelo.

Para facilitar a adição de valores como atenuação e outras informações disponíveis, é recomendado transformar a equação (4.5) para a escala logarítmica, ficando, desta forma, todas as unidades sendo informadas em dB . A equação na escala logarítmica é (4.6)

$$P_{1r} = P_{1t} + 2G_1 + 2G_2 + 40 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right) + B_{L_{dB}} \quad (4.6)$$

onde $B_{L_{dB}} = 10 \log_{10}(B_L)$. É possível observar que a potência configurada no leitor possui

como ponto de partida o próprio leitor. Mas existem perdas de potência nas conexões (C_L) existentes entre o leitor e a antena. Portanto, para calcular o valor real de P_{1t} , é necessário calcular a perda total de C_L e adicionar esta potência ao leitor a fim de que P_{1t} represente a verdadeira potência desejada. O canal de retorno também sofre com as atenuações C_L , pois o sinal proveniente da etiqueta será interpretado somente após passar pelos cabos e conectores e chegar ao leitor propriamente dito. Este sinal que chega ao leitor, para ser corretamente identificado, precisa atingir a potência mínima da sensibilidade do leitor (potência mínima necessária para que o leitor consiga interpretar o sinal).

A Figura 4-3 ilustra este novo cenário, e a equação (4.7) descreve o modelo considerando as perdas⁸.

$$P_{3r} = P_{3t} + 2G_1 + 2G_2 + 40 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right) + B_{LdB} - C_L \quad (4.7)$$

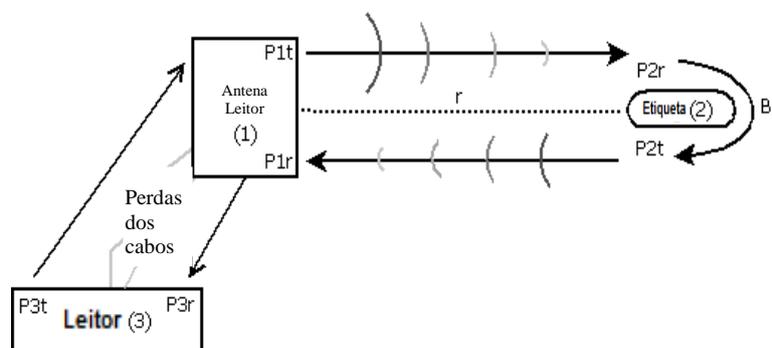


Figura 4-3: Modelo RFID de espaço livre considerando as perdas entre leitor e antena.

É fundamental que os valores usados nas fórmulas sejam os mais corretos possíveis. O usuário deste modelo precisa obter os valores exatos dos seus dispositivos RFID e do seu ambiente a fim de obter uma correta simulação.

A seguir são relatados valores típicos de cada parâmetro e que podem ser utilizados no modelo Friis. Estes valores são encontrados na literatura (por exemplo, em [Wan08], [Nik06], [Han08]) e em manuais técnicos de fabricantes de equipamentos RFID:

⁸ Alguns exemplos bem conhecidos de modelos e perdas de cabos (dB/100 m):

Exemplos de atenuação em modelos de cabos bem conhecidos (frequência = 915 MHz).

Cabo (modelo)	Atenuação (dB/100m)
RG58	56 dB
RF174	84,4
RGC58	33,8 dB

Leitor:

P_{3t} = Potência do leitor (entre 23 dBm e 33 dBm)

G_r = Ganho da antena do leitor (entre 6,0 dBi e 9,0 dBi)

Etiquetas:

P_{2r} = potência recebida (exige um mínimo de -10 dBm a -13 dBm para ser ativada)

G_t = Ganho da antena (entre 1,8 dBi e 3,0 dBi)

RF e ambiente:

λ = largura de onda (32,78 cm à 915 MHz)

d = distância (m) entre o leitor e a etiqueta

4.3 SENSIBILIDADE DE RECEPÇÃO DO LEITOR

Conhecer a sensibilidade de recepção (S_r) do equipamento leitor é um parâmetro técnico de fundamental importância para a predição de funcionamento de sistemas RFID.

É baseado no S_r que será possível avaliar se o caminho de retorno (sinal da etiqueta para o leitor) tem a potência mínima para que o sinal possa ser corretamente lido pelo leitor, i.e.:

$$P_{3r} \geq S_r \quad (4.8)$$

onde P_{3r} é o resultado do cálculo do modelo dado em (4.7), o qual é a potência recebida pelo leitor após o cálculo das perdas de transmissão e recepção, perdas dos cabos e de processamento da etiqueta.

Em pesquisas realizadas a respeito de equipamentos leitores comercialmente disponíveis, e também na literatura, a sensibilidade variou entre -70 dBm e -77 dBm [IMP10], -80 dBm [Wan08] e [Nik06] e -85 dBm [Han08]. Conhecer este valor é de fundamental importância para a simulação (a Seção 4.61, através de um exemplo, amplia esta discussão).

O leitor utilizado nos testes deste trabalho foi o ThingMagic Mercury4, um dos modelos mais tradicionais na área de RFID, constantemente citado na literatura técnica e acadêmica. Como explicado, para a realização dos testes de validação era fundamental conhecer a sensibilidade do leitor utilizado nos ensaios. Os documentos técnicos e materiais diversos disponibilizados pelo fabricante (ThingMagic Inc.) não disponibilizam esta informação. O suporte técnico da empresa foi contactado, que recomendou utilizar o valor de -70 dBm para os cálculos de simulação. Ainda, este suporte técnico fez uma série de considerações, explicando que o valor da sensibilidade do leitor pode variar para cima ou para baixo de acordo com características do ambiente, tal como a relação sinal ruído (SNR: *signal-to-noise ratio*). (As cópias destes e-mails estão armazenadas por este autor.)

Nos ensaios práticos de validação do modelo de simulação aqui apresentado, a partir de cálculos de propagação de RF, a sensibilidade do leitor que se mostrou correta com os diversos resultados foi o valor na faixa de -80 dBm, que, conforme citado, é um valor normal para a sensibilidade de leitores RFID.

4.4 MATERIAL NO QUAL A ETIQUETA ESTÁ FIXADA

Esta seção apresenta uma extensão do modelo (4.7). Neste novo modelo, é considerada a influência do material no qual a etiqueta está fixada.

Devido a variação de materiais no qual a etiqueta pode estar fixada, a potência recebida pelo leitor varia de acordo com a influência destes materiais, e considerando que durante os testes os mesmos dispositivos (leitor, etiquetas e antenas) e o mesmo ambiente foram utilizados, a fim de isolar o fator de interferência do material, um novo modelo foi gerado, que agora adiciona a variável K_{dB} (dB) de cada material; em outras palavras, foi analisado o quanto o material no qual a etiqueta está fixada influencia os resultados de cada teste. A nova equação obtida é mostrada em (4.9):

$$K_{dB} = P_{fs} - P_{mat} \quad (4.9)$$

onde P_{fs} é a potência mínima necessária para ativar a etiqueta em testes realizados em espaço livre, e P_{mat} é a potência mínima necessária para ativar a etiqueta em testes realizados com a etiqueta fixada em materiais ou com atenuadores ou amplificadores influenciando o canal de transmissão. Com o valor de K_{dB} tendo sido determinado, esta variável pode agora ser adicionada a equação de simulação em espaço livre demonstrada em (4.7), que calcula a potência recebida pelo leitor. O modelo que contempla todos os fatores descritos está em (4.10):

$$P_{3r} = P_{3t} + 2G_1 + 2G_2 + 40 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right) + B_{LdB} - C_L + K_{dB} \quad (4.10)$$

A Figura 4-4 apresenta os resultados dos testes para determinar o K_{dB} do grupo de materiais objetos de estudo deste trabalho. Estes testes foram realizados na câmara anecóica⁹ do laboratório de pesquisa RFID-CoE (RFID Center of Excellence)¹⁰. Os valores apresentados são as potências mínimas (na exata localização da etiqueta) para

⁹ Câmaras anecóicas são salas blindadas que têm como objetivo reduzir o fenômeno da reflexão e outras interferências externas que possam influenciar o funcionamento de sistemas baseados em rádio frequência. A blindagem objetiva que se capte apenas o sinal emitido pelo equipamento em teste. A característica de ser anecóica significa que, as paredes da câmara, revestidas por materiais apropriados, não permitem a reflexão das ondas eletromagnéticas, livrando de reflexões o sinal principal emitido pelo equipamento em teste [INO11].

¹⁰ O laboratório RFID-CoE, localizado em São Paulo, é uma iniciativa da empresa HP (Hewlett-Packard) e visa prestar consultorias técnicas sobre o uso da tecnologia RFID. Inaugurado em 2005, foi o primeiro laboratório específico para RFID e o primeiro certificado pela EPCglobal no Brasil. Com esta certificação, o CoE passou a integrar a rede de Centros Internacionais de Testes para RFID, a mais importante rede de certificação e consultoria para RFID. Em 2009, o CoE obteve também a certificação de *Static Test Method*, tornando-se o primeiro laboratório no mundo para certificação de portais, esteiras e ambientes estáticos de RFID.

ativar a etiqueta utilizada nesta pesquisa (apresentada na Seção 4.1) e fazê-la responder seus dados para o leitor. Os valores entre parênteses mostram o K_{dB} (dB) de cada material.

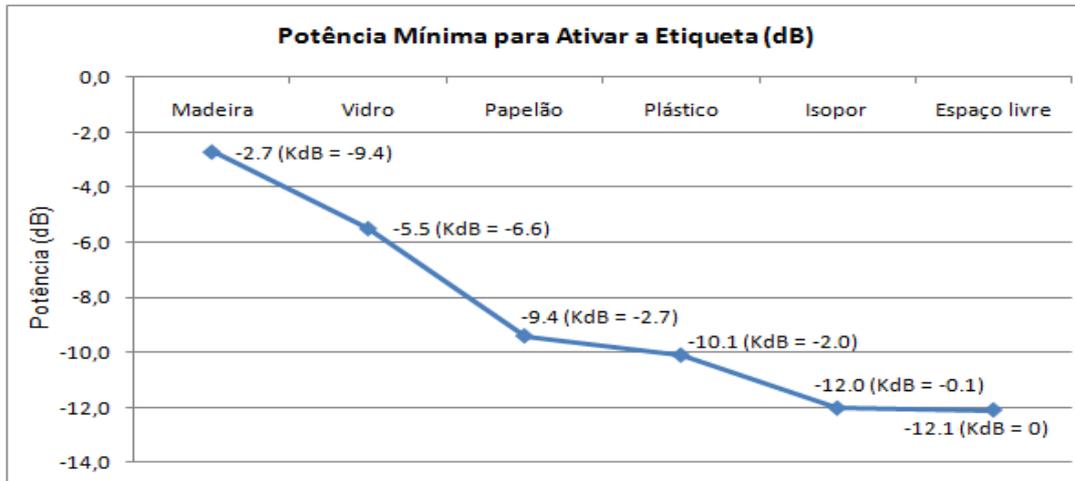


Figura 4-4: Potência mínima para ativar a etiqueta e respectivos parâmetros K_{dB} .

O gráfico mostra que, por exemplo, para ativar a etiqueta em espaço livre, -12,1 dB foi a potência necessária. Para ativar a mesma etiqueta, mas agora fixada em madeira, a potência necessária aumentou para -2,7 dB; em outras palavras, o K_{dB} da madeira é -9,4 dB quando comparado com o espaço livre, que é o valor de referência. Estes valores, quando aplicados em simulações, permitem deduzir que, caso as etiquetas estejam fixadas em madeira, é necessário aumentar a potência de transmissão do leitor em 9,4 dB em relação a potência mínima necessária para ativar a etiqueta (que é o valor em espaço livre). A rotina de testes realizada para a obtenção destes valores será explicada na próxima seção.

Como esperado, os valores de ativação da etiqueta em espaço livre e quando fixada em isopor são extremamente próximos, devido o isopor ser um material transparente para RF. Além disso, conforme [Han08] e [Fri10], os valores para ativação da etiqueta nestes casos (-12,1 e -12,0 dB) ficaram dentro da faixa normal de ativação de uma típica etiqueta EPC Gen2 em espaço livre, o que confirma os valores obtidos nos experimentos deste trabalho na câmara anecóica.

Os testes foram realizados dentro da câmara anecóica (Figura 4-5 e Figura 4-6), com a etiqueta UHF Raflatac DogBone, 0,9 m de distância entre as antenas (leitor e etiqueta) com polarização horizontal, 1,1 m de distância entre a etiqueta e o piso da câmara, e 7 ($\pm 0,5$) dBi de ganho na antena do leitor. Todos os materiais possuem 60 cm X 60 cm quadrados e 1 cm de espessura (alguns exemplos na Figura 4-7). A frequência de radiação foi mantida fixa no leitor em 915,25 MHz.

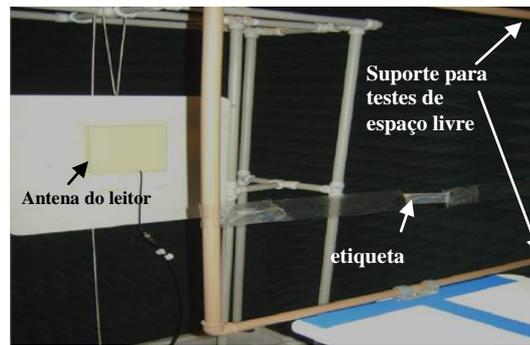


Figura 4-5: Câmara anecóica do RFID-CoE, antena do leitor, etiqueta e suporte para testes de leitura em espaço livre.

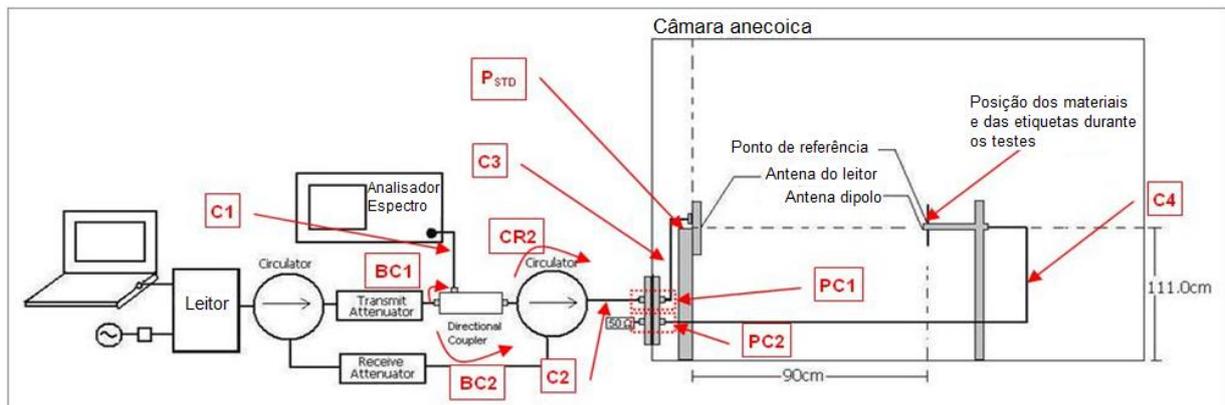


Figura 4-6: Diagrama de configuração dos equipamentos e da câmara anecóica durante os testes para obtenção dos valores de potência mínima para ativação das etiquetas.

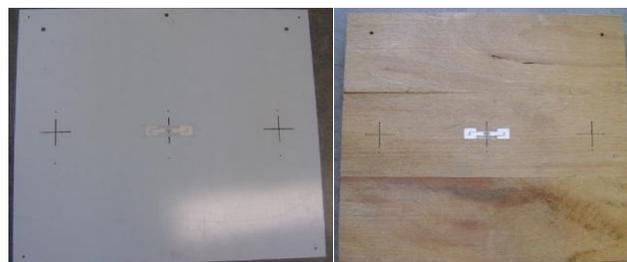


Figura 4-7: Etiqueta fixada nos materiais plástico e madeira.

4.5 CONSIDERAÇÕES ESTATÍSTICAS E CRIAÇÃO DE UM INTERVALO DE CONFIANÇA PARA USO DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS TESTES REALIZADOS NA CÂMARA ANECÓICA

As etiquetas fixadas em cada tipo de material foram testadas em rotinas de 30 leituras. Pelo baixo desvio padrão apresentado ao longo das rotinas de teste (ver Tabela 4-1), esta quantidade de execuções (30 leituras) mostrou-se ser uma amostra suficiente, inclusive para a criação de um intervalo com 99% de confiança. O objetivo principal do ensaio prático era definir os valores de potência mínima para ativação da etiqueta (e os respectivos cálculos de K_{dB}), por material. A Tabela 4-1 a seguir apresenta os valores médios de potência mínima para ativação (leitura) das etiquetas, por material (os mesmos já apresentados na Figura 4-4). Por exemplo, a média da potência (dB) necessária para

ler a etiqueta quando fixada na madeira é -2,7 dB, mas, conforme será demonstrado a seguir nesta seção, a fim de se aumentar a confiança de sucesso na leitura para 99%, deve-se aumentar a potência para -2,67 dB.

Devido o ambiente do local dos ensaios ser muito controlado (a câmara anecóica), os desvios padrões foram baixos. Mas dependendo das condições do ambiente onde os valores a serem usados no modelo serão obtidos, o intervalo de confiança terá uma diferença significativamente maior em relação à média. Desta forma, este intervalo será importante para o usuário do modelo, que caso utilizasse os valores da média, não teria simulações precisas. Recomenda-se, portanto, que seja criado um intervalo de valores para a potência mínima de ativação da etiqueta.

A Tabela 4-1 também apresenta, para cada etiqueta-material, o desvio padrão, o erro padrão da média, o erro da amostra e o intervalo de confiança (variação da potência mínima para ativar a etiqueta, com 99% de confiança). As definições e cálculos sobre cada valor da tabela são discutidos na sequência.

Tabela 4-1: Resultados dos ensaios na câmara anecóica e análises estatísticas.

Materiais / Valores	Média (\bar{x}) da potência (dB) para ativação da etiqueta	Desvio padrão (s)	Erro padrão estimado da média amostral	Erro da amostra	Intervalo de confiança (99%)	
					Potência mínima	Potência máxima
Madeira	-2,7	0,059	0,0108	0,028	-2,73	-2,67
Vidro	-5,5	0,106	0,0194	0,050	-5,55	-5,45
Papelão	-9,4	0,062	0,0113	0,029	-9,43	-9,37
Plástico	-10,1	0,118	0,0215	0,056	-10,16	-10,04
Isopor	-12,0	0,123	0,0225	0,058	-12,06	-11,94
Espaço livre	-12,1	0,207	0,0378	0,098	-12,20	-12,00

Durante o ensaio, cada etiqueta, fixada no respectivo material, foi lida 30 vezes pelo equipamento leitor e, portanto, 30 é o tamanho da amostra para cada etiqueta-material e para o teste de espaço livre. A metodologia consistiu em, para cada um dos 30 testes, diminuir a potência emitida pelo leitor até descobrir a potência mínima necessária para ativar (ler) a etiqueta. Quando esta potência era descoberta, uma antena dipolo ligada a um equipamento medidor de potência era posicionada na mesma posição da etiqueta dentro da câmara anecóica, e a potência mínima na exata localização da etiqueta podia então ser medida e registrada. Ao final de cada rodada de testes, para cada etiqueta-material, o resultado era uma sequência de 30 valores, representando em cada valor a potência mínima necessária para a leitura da etiqueta naquele teste de leitura em específico.

A partir dos 30 valores para cada um dos cinco conjuntos de etiqueta-material (mais espaço livre), os resultados apresentados na Tabela 4-1 foram calculados. A seguir são definidos estes valores [Hin06], [Lar10]:

Média da amostra (\bar{x}): representa o valor médio de todas as observações, por amostra (ou seja, por etiqueta-material), e é dada por

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (4.11)$$

Média da população (μ) a partir da amostra: dado um número finito de observações possíveis (N) na população, a média populacional é

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (4.12)$$

onde $\sum_{i=1}^N x_i$ é o total para população finita. A média da amostra (4.12) é a melhor estimativa para a média da população.

Desvio padrão (σ): medida de dispersão usada com a média, definida pela raiz quadrada positiva da variância, onde

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x - \bar{x})^2} \quad (4.13)$$

denotando que pequenos valores de σ indicam pouca dispersão, enquanto grandes valores indicam maior dispersão, ou seja, mede a variabilidade dos valores à volta da média. O valor mínimo do desvio padrão é zero, indicando que não há variabilidade, i.e., todos os valores são iguais à média. Analisando os resultados da Tabela 4-1, é possível observar que os desvios padrões obtidos nos ensaios deste trabalho são valores baixos, o que no caso é uma boa característica para o uso da média da potência apresentada.

A melhor estimativa do desvio padrão da população a partir de uma amostra é chamado desvio padrão amostral e é dada pela expressão:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (4.14)$$

Erro padrão da média: é a melhor estimativa do desvio padrão das médias amostrais a partir de uma única amostra. O erro padrão obtém-se por

$$S_x = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4.15)$$

Erro amostral: a partir do erro padrão estimado da média amostral calculado em (4.15), é possível calcular o erro em torno da amostra com o grau de confiança desejado.

Este valor é calculado a partir do resultado de (4.15), multiplicado por um valor obtido na Tabela de Distribuição Normal (Z). Para calcular o erro com 99% de confiança, $Z = 2,58$. O erro amostral é necessário para calcular o intervalo de confiança, apresentado a seguir.

Intervalo de confiança bilateral: mostra os limites de confiança superior (S) e inferior (I) à média (μ), onde $I \leq \mu \leq S$. Para calcular um intervalo de 99% de confiança, $Z = 2,58$ (onde Z é obtido da Tabela de Distribuição Normal padrão). Por exemplo, para o caso da etiqueta fixada na madeira, o limite inferior (I), conforme os valores apresentados na Tabela 4-1, pode ser calculado da seguinte forma:

$$\begin{aligned} I &= \mu - Z_{\alpha/2} S / \sqrt{n} & (4.16) \\ &= -2,7 - 2,58(0,059)/\sqrt{30} \\ &= -2,7 - 0,028 \\ &= -2,73 \end{aligned}$$

Da mesma forma, o cálculo do limite superior (S):

$$\begin{aligned} S &= \mu + Z_{\alpha/2} S / \sqrt{n} & (4.17) \\ &= -2,7 + 2,58(0,059)/\sqrt{30} \\ &= -2,7 + 0,028 \\ &= -2,67 \end{aligned}$$

O intervalo de confiança do valor da potência mínima para a leitura da etiqueta fixada na madeira é, portanto, entre -2,73 dB e -2,67 dB, com 99% de confiança. Esta estimativa de intervalo estabelece a faixa de valores de potência dentro da qual se espera que os testes de leitura funcionem. Para o intervalo de confiança aqui calculado, 99% das médias amostrais cairão a uma distância máxima de 2,58 desvios de padrões da média populacional.

Conforme citado no início desta seção, recomenda-se que seja criado um intervalo de valores possíveis para a potência mínima de ativação da etiqueta. Tendo sido determinado este intervalo, os usuários do modelo, na prática, podem inicialmente utilizar o valor exato da potência mínima do intervalo de confiança. No caso de a leitura não funcionar nesta primeira tentativa, o usuário deve aumentar a potência, talvez de forma gradual, até o limite da potência máxima do intervalo de confiança.

Uma análise possível do intervalo de confiança é a seguinte: usar sempre a potência mais alta do intervalo fará com que a chance de leitura seja sempre a maior possível. Um risco de se adotar esta abordagem é que, em muitos casos, a potência mínima ou

intermediária do intervalo já será suficiente para a leitura da etiqueta. Nestes casos, utilizar a potência máxima do intervalo fará com que a área de abrangência de leitura avance para além do ponto no qual a etiqueta está localizada. Em muitas situações, o usuário não deseja capturar dados de outras etiquetas que possam estar presentes no ambiente do sistema, e para isto, a potência precisa então estar muito bem calibrada a fim de não extrapolar o ponto de referência.

Por exemplo, para ler a etiqueta no espaço livre, a média obtida nos experimentos foi -12,1 dB, e o intervalo de confiança calculado ficou entre -12,2 dB (limite inferior) e -12,0 dB (limite superior) (Figura 4-8). Se o usuário quiser garantir ao máximo que a etiqueta seja lida, independentemente do fato de, eventualmente, a área de leitura possível estar além do ponto alvo de leitura da etiqueta, pode-se usar imediatamente o valor de -12,0 dB de potência no modelo. Mas caso o usuário deseje restringir ao máximo que etiquetas sejam lidas além do ponto de referência, deve-se iniciar os testes de leitura com a potência mínima do intervalo de confiança, no caso, -12,2 dB, até que, gradativamente, a potência exata necessária seja determinada.

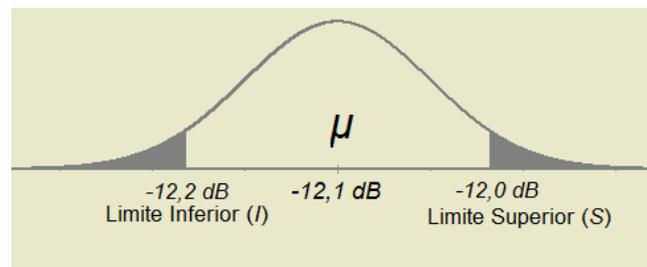


Figura 4-8: Intervalo de confiança (potência para ativar a etiqueta) para leitura da etiqueta em espaço livre.

4.6 POTÊNCIA RETORNADA PELA ETIQUETA

Descobrir a quantidade de energia refletida pela etiqueta é de fundamental importância para um modelo de simulação RFID. Somente com esta informação é possível calcular o trajeto do sinal RF no sentido etiqueta-leitor. É necessário saber se este sinal chegará até o leitor com potência igual ou maior do que a sensibilidade do leitor (S_r). Este conceito foi discutido em [Flo09] e também em [Gau08], onde neste último foi denominado B_L (*backscatter transmission loss*). A equação (4.5) e a Figura 4-2 também apresentam este conceito.

[Flo09] cita que existe uma relação entre a potência do sinal recebido e a potência refletida pela etiqueta, mas não cita valores ou outras informações mais concretas. [Gau08] apresenta uma série de ensaios, com diversos modelos de etiquetas e faixas de frequência. Nesta referência, o resultado mais aproximado com o ambiente deste trabalho (modelo de etiqueta e frequência) apresentou um $B_L = 1,5\%$, i.e, a etiqueta transmitiria 1,5% da energia recebida. Mas este valor varia conforme o desenho específico da antena e do circuito integrado (CI) da etiqueta. Quando este valor foi utilizado no modelo aqui apresentado, os resultados de validação não foram satisfatórios, i.e, a simulação pelo modelo não gerava resultados corretos quando comparados com os resultados dos testes

reais.

Desta forma, ficou claro que seria necessário descobrir qual o B_L exato do modelo de etiqueta utilizado nos ensaios do presente trabalho (etiqueta esta que, conforme já referenciado, está entre as mais utilizadas e citadas nas literaturas acadêmicas e técnicas na área de RFID). As próximas seções seguem esta discussão e apresentam soluções para a descoberta do B_L .

4.6.1 LIMITADOR DA DISTÂNCIA MÁXIMA DE LEITURA: POTÊNCIA REFLETIDA PELA ETIQUETA OU EMITIDA PELO LEITOR?

Uma consideração importante sobre o B_L é que, de acordo com este valor, é possível determinar se o limitador da distância máxima de leitura da etiqueta é:

- (i) a potência mínima para ativar a etiqueta (P_{2r} , equação 4.2), i.e., o trajeto leitor-etiqueta, ou
- (ii) o S_r , i.e., o trajeto etiqueta-leitor. Um B_L abaixo de determinado limiar faz o limitador ser o S_r , e passando deste limiar, o limitador passa a ser P_{2r} .

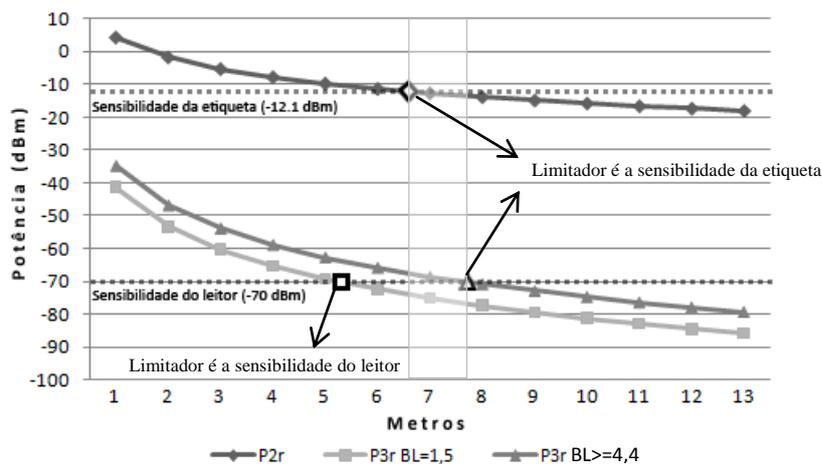


Figura 4-9: Limitadores da distância máxima de leitura em diferentes cenários de B_L .

Conforme ilustrado no gráfico da Figura 4-9, quando utilizado no modelo o $B_L = 1,5\%$ citado por [Gau08], com a sensibilidade do leitor $S_r = -70$ dBm, o trajeto etiqueta-leitor era o limitador do sistema (quadrado destacado na Figura 4-9): a simulação de distância máxima de leitura era diminuída devido a baixa potência refletida pela etiqueta. Conforme mostrado no gráfico, com potência (no leitor) 31,6 dBm, em espaço livre, 915 MHz, usando $B_L = 1,5\%$, e sensibilidade do leitor (S_r) = -70 dBm, a distância máxima de leitura é de 5,22 m. Com esses valores, $P_{3r} = -69.9$ dBm, ou seja, o limite do S_r ; então, caso fosse aumentada a distância, a potência recebida pelo leitor não seria suficiente para que ele interpretasse corretamente o sinal. Neste mesmo cenário, mas com $B_L \geq 4,4\%$ (determinado a partir dos ensaios mostrados nas seções a seguir), o limitador passa a ser a potência mínima para ativar a etiqueta, e a simulação de distância máxima de leitura passa para 6,76 m, que é a distância correta conforme as validações.

No cenário com $B_L \geq 4,4\%$, a sensibilidade do leitor somente seria alcançada em, aproximadamente, 8,0 m de distância (triângulo destacado no gráfico). Porém, o limite imposto pela sensibilidade da etiqueta (-12,1 dBm) é alcançado primeiro (losango destacado), limitando a leitura em 6,76 m.

No primeiro cenário ($B_L = 1,5\%$), a potência necessária na etiqueta (P_{2r}) para que ela retorne energia suficiente ($P_{3r} \geq S_r$) é -10,0 dBm. Mas os testes na câmara anecóica mostraram que a potência mínima para ativar a etiqueta em espaço livre é menor: -12,1 dBm. Ou seja, devido o baixo B_L , é necessário atingir com mais potência a etiqueta do que ela realmente necessita para ser lida. Neste caso, como o leitor já está emitindo o máximo de potência possível, a solução é diminuir as distâncias entre a etiqueta e o leitor, e por este motivo a distância máxima de leitura estava em 5,22 m. Já com $B_L \geq 4,4\%$, é possível aumentar a distância entre as antenas, pois a etiqueta é atingida com um sinal com a potência mínima necessária exata para ativá-la (-12.1 dBm), e no trajeto de volta (etiqueta-leitor), se obtém $P_{3r} = -68.4$ dBm, i.e, $P_{3r} > S_r$.

Os experimentos e valores obtidos ao longo deste trabalho, com o cenário utilizado, que é típico entre usuários RFID, permitem concluir que, portanto, o limitador da distância máxima de leitura da etiqueta se dá pela sensibilidade da etiqueta (P_{2r}), i.e., se ela for ativada com a potência mínima necessária, sua resposta será forte o suficiente para o leitor conseguir interpretar seu sinal. Mas foi demonstrado que esta característica pode variar entre tipos de ambiente.

4.6.2 DESCOBERTA DO B_L

Conforme explanado na Seção 4.6.1, a referência [Gau08] cita um valor de B_L que, ao ser usado no modelo proposto, gera valores incorretos de distâncias máximas de leitura no ambiente deste trabalho. Dessa forma, foi necessário descobrir o B_L correto para o ambiente desta pesquisa (objetivamente, com o modelo de etiqueta e frequência).

Os manuais técnicos da etiqueta não apresentam este tipo de informação. Ao contactar o suporte técnico do fabricante (UPM Raflatac), a resposta é que a empresa não fornece os critérios de testes e desenvolvimento, e também explicam que “testes padronizados para esse tipo de informação ainda não foram adotados pelas organizações e entidades padronizadoras dos governos” (as cópias originais destas mensagens estão armazenadas).

Sendo assim, foi necessário determinar algum tipo de ensaio prático em que fosse possível obter essa informação. Vários ensaios práticos com equipamentos RFID foram experimentados, dentro e fora da câmara anecóica, mas nenhum atingiu o objetivo. Por exemplo, a primeira tentativa consistiu em ligar a conexão Rx (recepção) da antena do leitor em um analisador de espectro. O objetivo consistia em medir o sinal com e sem a etiqueta posicionada em um ponto de referência. A diferença dos resultados dessas duas medições corresponderia à potência que a etiqueta reflete de volta. De posse desses valores, utilizando Friis (pois sabe-se quanto o caminho atenua a energia no trajeto), seria possível calcular o B_L . Mas, infelizmente, devido a etiqueta não refletir um sinal constante,

e sim um sinal que tem intensidade variante no tempo (que é o que justamente gera os dados de resposta), o sinal também variava de forma extremamente rápida no analisador de espectro, de forma inviável para interpretá-lo, mesmo com diferentes tentativas.

Em outra tentativa de ensaio para encontrar o B_L , foi utilizado um gerador de sinal de RF, com características bem conhecidas, uma onda com frequência fixa e sem modulação. A expectativa era que a etiqueta, mesmo sem ser ativada pelo protocolo de um equipamento leitor, refletisse algum sinal mensurável. Este ensaio também não funcionou. A realimentação do sinal entre as antenas Tx e Rx foi provavelmente o problema neste ensaio, e novamente o valor medido no analisador de espectro não condizia com resultados esperados.

4.6.3 SOLUÇÃO PARA DESCOBRIR O B_L : USO DOS RESULTADOS DA CÂMARA ANECÓICA

Para determinar o B_L da etiqueta utilizada neste trabalho, foram utilizados os resultados obtidos nos testes da câmara anecóica, apresentados na Seção 4.4. Os referidos resultados apresentam a exata potência mínima para ativação da etiqueta quando fixada em um determinado tipo de material. Desta forma, tem-se a exata potência mínima P_{2r} (Figura 4-3) para ativar a etiqueta a fim de que o sinal P_{2t} emitido (após as perdas do B_L) alcance o equipamento leitor (P_{3r}) com a potência mínima acima ou igual à sensibilidade deste equipamento.

Conforme citado e referenciado na Seção 4.3, a sensibilidade mínima de um equipamento leitor é -70 dBm, ou seja, este seria o pior caso (há leitores com sensibilidades significativamente melhores).

De posse dos dois valores acima citados, é possível calcular o percentual mínimo de potência que a etiqueta está retornando, dada uma certa quantidade de potência que a atinge (esta é a definição do B_L). Por exemplo, a potência necessária para ativar a etiqueta quando em espaço livre foi de -12,1 dB. Utilizando a equação de Friis (equação 4.1), é possível calcular a perda de potência entre os dois pontos. Dado que a etiqueta tenha sido atingida por -12,1 dB, para que o sinal de retorno (P_{2t}) tenha a potência mínima a fim de que chegue um valor maior ou igual a -70 dBm no equipamento leitor, é possível calcular que o B_L é no mínimo de 4,4%, ou seja, a etiqueta retorna no mínimo 4,4% da energia que a atinge.

Conforme acima desenvolvido, é possível determinar que o B_L da etiqueta utilizada neste trabalho é $\geq 4,4\%$.

4.7 USO E VALIDAÇÃO DO MODELO

A partir do modelo demonstrado em (4.10) e considerando os valores K_{dB} e B_L determinados pelos experimentos, é possível calcular, dados a potência no leitor e o

material no qual a etiqueta está fixada, a distância máxima de leitura para cada situação. Por exemplo, configurando no leitor a potência máxima, que é 31,6 dBm, e aplicando estes valores no modelo proposto (4.10):

Potência configurada no leitor = 31,6 dBm

G_1 : ganho antena do leitor = 8 dBi

C_L : perda cabo e conectores Tx = 3,65 dB

Então, P_{1t} = 35,95 dBm.

Considerando os demais parâmetros:

G_2 = 2 dBi

λ = 0,3277 (915,25 MHz)

B_L = 4,4%

K_{dB} = -2,0 dB (etiqueta fixada no plástico)

Então, distância máxima de leitura (r) = 3,78 m.

Considerando esta simulação de distância máxima de leitura ($r = 3,78$ m), é possível entender por que, na Figura 4-14, é apontado um erro na simulação do modelo no ponto de medição de 5,5 m com potência 31,6 dBm para plástico: durante os ensaios práticos de validação do modelo, houve leitura (r) nesse ponto, mas o modelo aponta que a distância máxima deveria ser 3,78 m. Ou seja, na prática, houve leitura em uma distância maior do que a apontada como máxima pelo modelo.

A metodologia para validação do modelo consistiu na simulação de uso de um típico usuário: “*é possível ler a tag, fixada no material ‘x’, na distância ‘z’, com potência ‘y’?*”. Foram escolhidas seis distâncias entre a antena do leitor e a etiqueta e três potências para cada um dos seis materiais (incluindo espaço livre), gerando 36 pontos de medição para cada uma das três potências, totalizando 108 pontos de simulação para cada ambiente. Quatro ambientes tiveram pontos de leitura simulados. Ao todo, 432 pontos foram simulados e testados.

O modelo teórico (4.10) foi executado uma vez para cada ponto e o resultado era “sim | não” para a pergunta do usuário. Os testes práticos de validação do modelo foram realizados para cada um dos 432 pontos de teste, permitindo a comparação com os resultados da simulação.

4.7.1 TIPOS DE AMBIENTE

O desafio de todo modelo de propagação de RF é ser válido apesar dos inúmeros obstáculos e ruídos possíveis em um ambiente real. Para comprovar a validade do modelo aqui apresentado, os testes foram realizados em ambientes típicos de uso real, onde as possibilidades de ruídos e reflexões sofrem variações.

O primeiro ambiente simulado teve como objetivo servir como parâmetro de

referência: testes na rua, sem paredes e obstáculos no raio de leitura (ver Figura 4-10). A altura da etiqueta em relação ao solo era sempre 1,5 m, com polarização horizontal. A estrutura de suporte das antenas foi construída com canos de PVC, que é um material neutro, não interferente na propagação de RF [EPC09].



Figura 4-10: Ambiente de validação “rua”, sem obstáculos próximos.

O segundo e terceiro ambientes visavam ser “desafiadores” para o modelo: salas estreitas com diversos materiais reflexivos próximos às antenas. Este mesmo tipo de ambiente foi repetido em duas salas, para fins de comparação: “ambientes semelhantes terão resultados semelhantes?”. A Figura 4-11 mostra uma destas salas. As medidas e disposição dos obstáculos, nas duas salas, são idênticas.

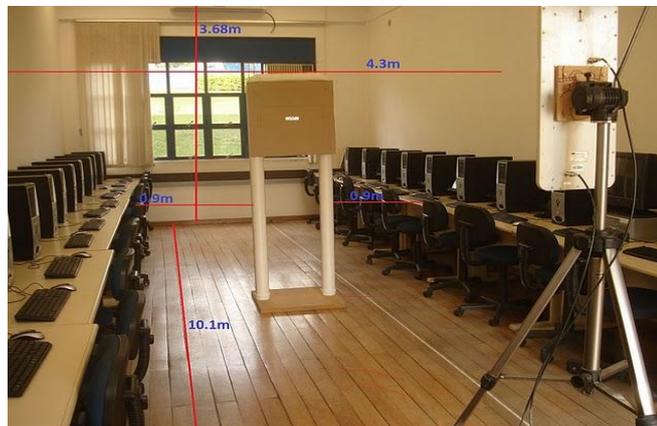


Figura 4-11: Um dos ambientes “sala estreita com muitos materiais reflexivos”.

O quarto e último ambiente foi uma ampla sala, grandes distâncias entre alguns materiais reflexivos e as antenas. Figura 4-12.

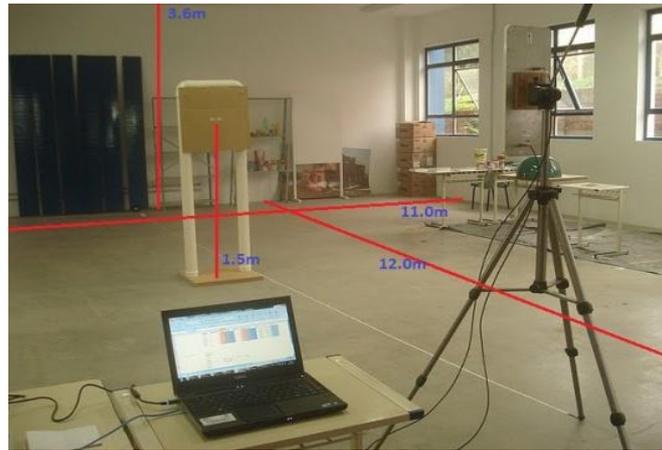


Figura 4-12: Ambiente “sala ampla”.

4.7.2 VALIDAÇÃO E PERCENTUAIS DE ACERTOS DAS SIMULAÇÕES

O modelo proposto por este trabalho gerou percentuais de acerto, por ambiente, entre 95,3% (melhor caso) e 87,0% (pior caso).

As quatro tabelas a seguir (um para cada ambiente de teste) apresentam os resultados da validação do modelo para os seis tipos de materiais. As linhas indicam a distância (m) entre a antena do leitor e a etiqueta, e as colunas indicam a potência configurada no leitor (dBm). As simulações consideradas certas são representadas pelos círculos, indicando que o teste real apontou o mesmo resultado gerado pelo modelo, i.e., o modelo gerou um resultado correto em relação ao ensaio prático. ‘r’ mostra onde aconteceu leitura da etiqueta em local onde a simulação indicava que não haveria leitura, i.e., o modelo não gerou o mesmo resultado do ensaio. ‘x’ mostra onde não houve leitura em local que a simulação indicava que ocorreria leitura.

Por exemplo, na tabela do ambiente “rua” (Figura 4-13), executando o modelo com as informações: Papelão, 2,5 m de distância entre as antenas, 25 dBm de potência no leitor, o modelo indica que a distância máxima de leitura é 1,76 m; mas no teste real, a etiqueta foi lida em 2,5 m. Já o círculo no ponto (Papelão, 3,5 m, 25 dBm) indica que o modelo e a simulação deram resultados iguais, i.e, o modelo gerou uma resposta correta.

Distância (m)	20			25			31.6			20			25			31.6			20			25			31.6		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
7,5	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
5,5	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
3,5	●	r	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
2,5	●	●	●	●	●	●	●	r	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
1,4	●	●	●	●	●	●	●	●	●	r	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	r	●
0,7	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	r	●	●	●	●
	Espaço livre			Isopor			Papelão			Plástico			Vidro			Madeira											

Figura 4-13: Acerto em 95,3% das simulações no ambiente “rua”.

No ambiente “rua” (Figura 4-13), comparando os resultados das 108 simulações pelo modelo com os resultados obtidos nos 108 ensaios práticos, o modelo acertou 95,3% dos pontos simulados. Como era esperado, devido à ausência de obstáculos, este ambiente foi o que os resultados dos ensaios e os gerados pelo modelo mais se aproximaram.

Nos ambientes “sala estreita 1” e “sala estreita 2”, os percentuais de acerto do modelo foram, respectivamente, 90,7% e 87,0% (Figura 4-14 e Figura 4-15), o que pode-se considerar como resultados aproximados, o que também era esperado. Estes dois ambientes eram idênticos em suas dimensões, nas distâncias entre as antenas e nos obstáculos (Figura 4-11). Mas, em se tratando de propagação de RF, principalmente quando um dos dispositivos é uma etiqueta RFID passiva, sabe-se que alguma mínima diferença na disposição, composição ou formato de algum obstáculo do ambiente pode representar diferenças na propagação RF, o que explica a pequena diferença de acerto do modelo entre os dois ambientes.

Potência	20	25	31.6	20	25	31.6	20	25	31.6	20	25	31.6	20	25	31.6	20	25	31.6
7,5	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	r	●	●	●	●	●	●
5,5	●	●	●	●	●	●	●	●	r	●	●	r	●	●	●	●	●	●
3,5	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
2,5	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	r	●	●	r
1,4	x	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	r	●	●	●	r
0,7	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	r	●	●	r	●
	Espaço livre			Isopor			Papelão			Plástico			Vidro			Madeira		

Figura 4-14: Acerto em 90,7% das simulações no ambiente “sala estreita 1”.

Potência	20	25	31.6	20	25	31.6	20	25	31.6	20	25	31.6	20	25	31.6	20	25	31.6
7,5	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	r	●	●	●	●	●	●
5,5	●	●	●	●	●	x	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
3,5	●	r	●	●	r	●	●	●	●	●	●	●	●	●	r	●	●	●
2,5	●	x	●	●	x	●	●	●	●	●	●	●	●	●	r	●	●	●
1,4	x	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	r	●	●	●	r
0,7	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	r	r	●	●	r	●
	Espaço livre			Isopor			Papelão			Plástico			Vidro			Madeira		

Figura 4-15: Acerto em 87,0% das simulações no ambiente “sala estreita 2”.

Finalmente, no último ambiente de teste, “sala ampla”, o percentual de acerto do modelo foi de 88,8% (Figura 4-16), situando-se abaixo do ambiente “rua” em número de acertos.

Potência	20 25 31.6			20 25 31.6			20 25 31.6			20 25 31.6			20 25 31.6					
	20	25	31.6	20	25	31.6	20	25	31.6	20	25	31.6	20	25	31.6			
Distância (m)	7,5	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
	5,5	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
	3,5	●	r	●	●	r	●	●	●	●	●	●	r	●	●	●		
	2,5	●	●	●	●	●	●	●	r	●	●	r	●	●	●	r		
	1,4	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	r	●	●	●	r		
	0,7	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	r	●	●	r	●		
	Espaço livre			Isopor			Papelão			Plástico			Vidro			Madeira		

Figura 4-16: Acerto em 88,8% das simulações no ambiente “sala ampla”.

4.8 TEMPOS PARA ESCRITA E LEITURA NAS ETIQUETAS

Em [Zhe05] é dado como 5 milissegundos (ms) o tempo necessário para que uma etiqueta RFID passiva responda à uma requisição de um interrogador, a partir da análise da documentação do sistema RFID passivo do sistema Philip's I-Code, circuito integrado muito utilizado por diversos fabricantes de etiquetas RFID.

Nos documentos de padronização da área [ISO06] e [EPC05] os tempos máximos de leitura e escrita para cada tipo de etiqueta são os demonstrados na Tabela 4-2.

Tabela 4-2: Tempos para escrita e leitura em dispositivos RFID [ISO06].

	ISO 18000-6 A	ISO 18000-6 B	ISO 18000-6 C
Leitura	Primeiros 128 bits tipicamente lidos em menos de 10 ms.		Varia de acordo com a velocidade do enlace entre o interrogador e etiqueta e também com a quantidade de bits a serem lidos ¹¹ .
Escrita	Após a etiqueta já ter sido identificada e selecionada, um bloco de 32 bits pode tipicamente ser escrito em menos de 20 ms.		Máximo de 20 ms.

Os tempos máximos para leitura e escrita das etiquetas padronizadas pela ISO e EPCGlobal, combinado com a velocidade na comunicação entre os dispositivos, permitem calcular o tempo máximo total para a leitura de um conjunto de etiquetas. Estas informações também servem para a especificação técnica de equipamentos leitores, pois baseado no tempo máximo de resposta de cada etiqueta, é possível determinar o número mínimo de etiquetas que um interrogador deverá ser capaz de identificar a cada segundo.

¹¹ Usando a taxa de transferência típica de 40 Kbps, a média de tempo para a leitura de 16 bits (quantidade de bits necessária para identificação de etiquetas tipo ISO 18000-6 C / EPC Gen2) será menor que 1 ms.

Estas especificações servirão para as simulações de leitura de etiquetas em movimento, citadas na Seção 4.8.1 a seguir.

4.8.1 MOVIMENTAÇÃO *VERSUS* TEMPO DE EXPOSIÇÃO DAS ETIQUETAS *VERSUS* ALCANCE PARA LEITURA

Em [Flo06] estão demonstrados resultados valiosos para a simulação de sistemas RFID onde devem ser considerados ambientes onde as etiquetas estejam em movimento, tais como produtos passando em uma esteira ou sob um portal que sustente uma antena de leitor na entrada de um depósito. Nestes ambientes normalmente são utilizadas esteiras ou bases móveis como paletes onde os itens a serem identificados por RFID são movidos defronte a antena. Conforme já visto ao longo deste capítulo, o sinal de RF emitido pelo leitor perde potência conforme uma série de fatores, tais como o aumento da distância, interferências causadas por outros equipamentos e barreiras físicas.

O trabalho citado realizou simulações onde dois paletes carregados com 200 etiquetas aleatoriamente posicionadas são movidos defronte a antena de um interrogador. O ambiente é demonstrado na Figura 4-17, onde também são apresentados o tamanho total dos suportes que carregam os produtos com as etiquetas eletrônicas, distâncias e a velocidade de exposição com o leitor.

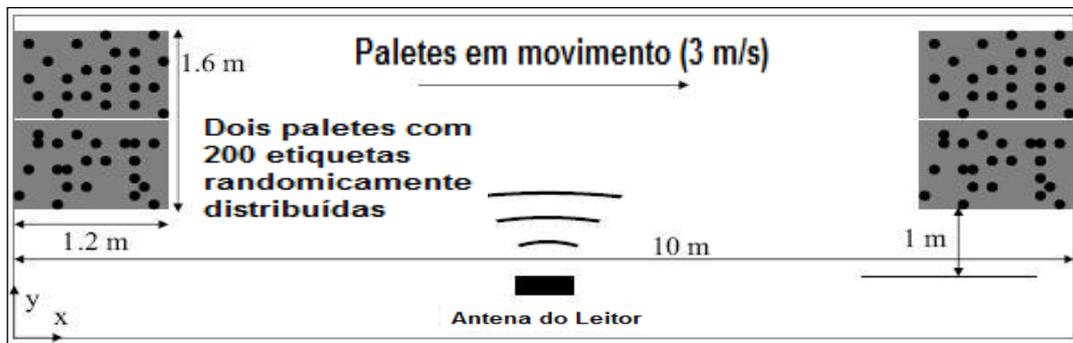


Figura 4-17: Etiquetas em movimento defronte antena de interrogador RFID [Flo06].

A mesma referência mostra, na Figura 4-18, a quantidade de etiquetas energizadas de acordo com a distância à esquerda e à direita do interrogador durante a movimentação dos paletes. Neste experimento, a distância máxima de leitura ficou dentro da faixa aproximada de 5 m entre o equipamento leitor e as etiquetas, pois, conforme citado no trabalho, a distância frontal entre o interrogador e o palete é de 1 m e as distâncias máximas de leitura à esquerda e à direita do interrogador foram de aproximadamente 4 m, chegando-se ao valor médio de 5 m como distância máxima entre etiquetas e leitor.

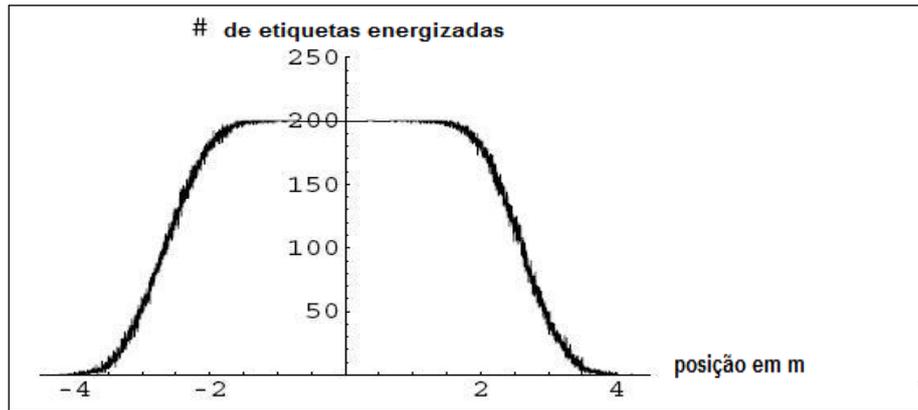


Figura 4-18: Quantidade de etiquetas energizadas em relação à distância do interrogador [Flo06].

O cenário mostrado (Figura 4-17 e Figura 4-18) pode ser utilizado como valor de referência importante para a criação de modelos que permitirão a simulação de sistemas RFID onde as etiquetas a serem lidas movem-se diante da antena do leitor. Relacionando as informações de quantidade de etiquetas energizadas, velocidade de exposição das mesmas com o interrogador e o tempo necessário para a leitura de cada etiqueta, é possível criar um modelo que determine se um número x de etiquetas poderá ser lido em uma determinada configuração de ambiente RFID, dadas as informações de quantidade de etiquetas a serem lidas, a velocidade, medidas dos suportes das etiquetas e distâncias totais. Como são conhecidas também a velocidade de leitura dos dados das etiquetas e a quantidade de bits a serem lidos, é possível responder a seguinte pergunta:

no tempo 'x' será possível ler os 'y' bits de 'n' etiquetas?

Como exemplo, na situação descrita na Figura 4-17, o tempo total de exposição das etiquetas com o interrogador será de 2,66 segundos (s) (8 metros totais divididos por 3 metros por segundo (m/s) que é a velocidade de movimentação dos paletes). Calculando a velocidade de leitura das etiquetas em 40 Kbps, e considerando que seja necessário a leitura de, por exemplo, 80 bits para a identificação de cada etiqueta, pode-se calcular que 80 bits vezes 200 etiquetas são 16 Kbps totais para a identificação de 200 etiquetas, ou 0,002 s para a leitura de cada etiqueta (200 etiquetas necessitarão de 0,4 s para identificação). Com a taxa de transferência de 40 Kbps, 16000 bits são lidos em 0,4 s, confirmando o cálculo de tempo anterior. Mas caso a relação

(número de etiquetas) versus (velocidade) versus (distância de alcance da leitura) versus (bits por etiqueta)

resultasse em um valor maior do que o tempo total de exposição das etiquetas com o interrogador (que no exemplo em questão seria de 2,66 s), o modelo utilizado na simulação conseguiria afirmar a necessidade de diminuição da quantidade de etiquetas a serem lidas ou de diminuição da velocidade da movimentação das mesmas, até chegar a uma relação viável para a leitura completa.

De posse dessas informações, modelos poderão simular e responder ao usuário se a configuração do ambiente a ser montado está dentro das possibilidades médias normais de um sistema RFID, aquém ou além destas possibilidades.

Para o cálculo do tempo total de exposição de cada etiqueta no raio de ação do leitor, primeiramente será necessária a determinação dos alcances máximos de leitura à direita e à esquerda da antena do interrogador, informações estas que poderão ser obtidas a partir da execução dos modelos de propagação RF já demonstrados nas seções anteriores deste trabalho. Em cenários típicos onde há uma antena direcionada para uma esteira que esteja movimentando embalagens com produtos etiquetados, existe um ponto (T1 na Figura 4-19) em que as etiquetas entram no raio de leitura do leitor, considerando uma movimentação no sentido da esquerda para direita. O ponto T2 seria o ponto exatamente frontal ao interrogador, e a metade da distância total percorrida pela etiqueta dentro do raio de leitura do interrogador. De forma análoga, pode-se dizer que existe um ponto T3, à direita de T2, que seria o ponto máximo do alcance de leitura do interrogador, onde a etiqueta estaria saindo do raio de leitura. É a soma destas duas distâncias que dará o total de exposição em metros do grupo de etiquetas com o leitor. Dividindo este valor pela velocidade por segundo (m/s) da movimentação das etiquetas, chega-se ao tempo total de exposição. Este é o tempo x citado na fórmula, no qual o interrogador deverá conseguir ler todos os bits de todas as etiquetas de cada embalagem em movimento.

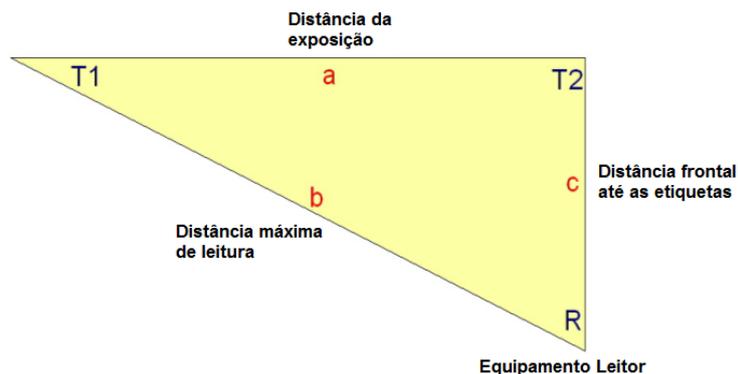


Figura 4-19: Modelo para cálculo da distância e tempo de exposição.

Para a execução dos modelos propostos, são necessárias as informações básicas do ambiente. A Figura 4-20 mostra a tela de entrada de dados no software simulador criado ao longo deste trabalho, o RFID-Env (ver Seção 5.3), onde são solicitadas as seguintes informações para a simulação do modelo:

1. Material no qual a etiqueta está fixada;
2. Taxa de transferência (Kbps) de leitura da etiqueta (dado fornecido pelo fabricante);
3. Velocidade de movimentação das etiquetas;
4. Distância frontal entre a antena do leitor e as etiquetas, ou seja, a distância (c), ou “menor cateto” de um triângulo retângulo, mostrados na Figura 4-19.

Cabe salientar que o cálculo do tempo total necessário para a leitura de um grupo de etiquetas é realizado após a simulação completa do protocolo anti-colisão no grupo de

etiquetas (o protocolo a ser utilizado é selecionado na tela inicial do RFID-Env). De posse do número total de *slots* necessários para a leitura do grupo de etiquetas é que o modelo atual poderá calcular:

$$\text{número_total_slots (gerados na simulação)} \times \text{tempo_leitura_cada_slot} \quad (4.18)$$

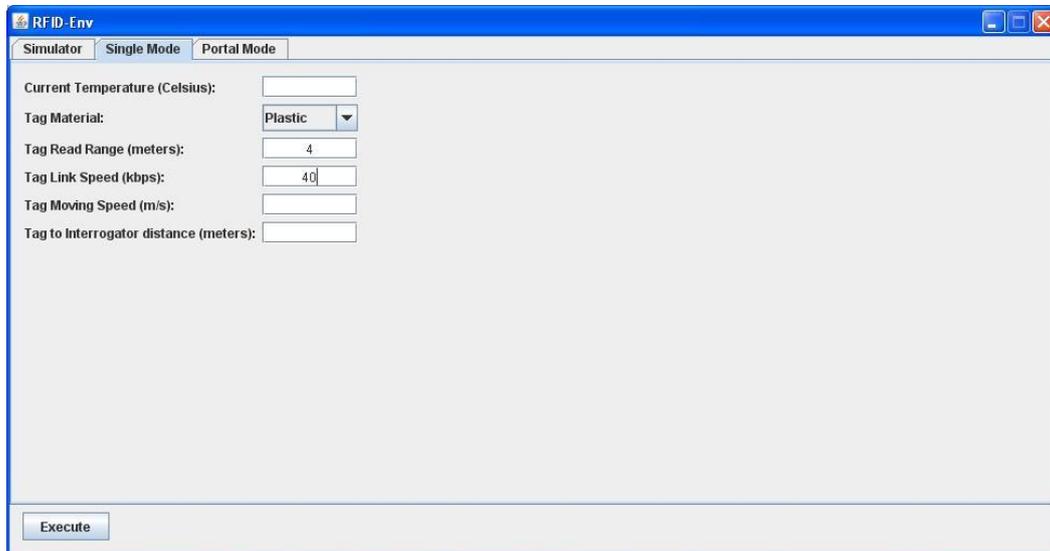


Figura 4-20: Dados para análise do ambiente no modo Single.

A partir das informações do ambiente, é possível calcular a distância do cateto (a), tendo em vista que a distância máxima de leitura da etiqueta é a distância da hipotenusa (b). A distância frontal entre a antena do interrogador e as etiquetas refere-se a distância do cateto (c).

A distância máxima de leitura é calculada pelo simulador a partir do uso dos modelos específicos mostrados nas seções anteriores, sendo necessárias todas as demais informações para a execução deste modelo, tais como potência do leitor e ganhos das antenas. Para cada tipo de material selecionado, o valor do alcance de leitura para o material respectivo é calculado e mostrado no campo distância máxima. Para a taxa de transferência de leitura das etiquetas, o RFID-Env sugere a típica de 40 Kbps, mas o usuário pode alterar esta informação para aquela obtida junto aos documentos técnicos da etiqueta específica que será utilizada.

De posse destas informações e dos cálculos realizados, é possível para os modelos executados pelo RFID-Env a previsão de situações de impossibilidades físicas para a leitura de um determinado número de etiquetas. Um exemplo é mostrado no relatório da Figura 4-21 gerado pelo RFID-Env, onde as informações são as seguintes:

1. distância máxima de leitura (hipotenusa): 4 m
2. taxa de transferência de leitura: 40 Kbps
3. velocidade de movimentação das etiquetas: 5 m/s
4. distância frontal (cateto c): 2 m

Estas informações referem-se a um conjunto de 1000 etiquetas (por exemplo, uma

caixa com 1000 produtos etiquetados, movendo-se sobre uma esteira) usando o protocolo ISO 18000-6 C. Com estas configurações, foi possível ao RFID-Env afirmar que existe a possibilidade de não funcionamento deste sistema.

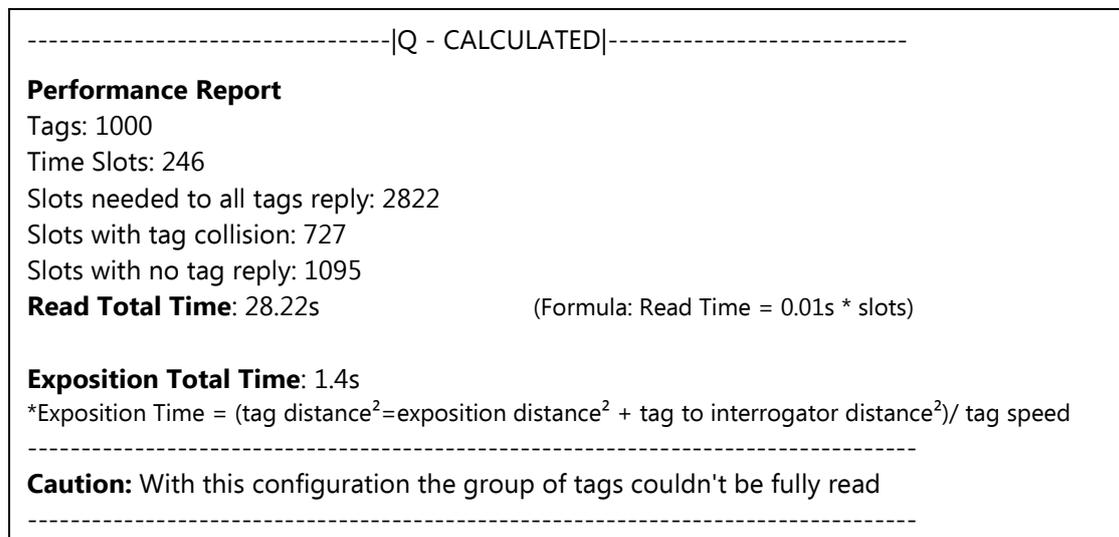


Figura 4-21: Alerta no RFID-Env para impossibilidade de leitura devido questões físicas.

A solução para o problema apontado pelo simulador na Figura 4-21 poderia ser alguma entre as seguintes:

1. Redução da quantidade de etiquetas a serem lidas “simultaneamente” (a quantidade de etiquetas contidas na mesma embalagem);
2. Diminuição da velocidade de movimentação;
3. Alteração na distância frontal (cateto c);
4. Combinações entre as três soluções anteriores.

4.9 CONCLUSÕES

O modelo desenvolvido e os valores obtidos para utilização nas variáveis das equações de simulação da camada física da comunicação de um sistema UHF RFID se mostraram promissores para simulações de ambientes com as características apresentadas, com percentuais de acerto variando entre 87,0% a 95,3%. Por consequência, estes resultados demonstram que foi adequada a metodologia Site-specific para obtenção dos valores fundamentais a serem utilizados no modelo, tais como medir os valores de influência de um conjunto de materiais nos quais a etiqueta pode estar fixada. É importante salientar que as etapas demonstradas para determinar os valores fundamentais das equações (tais como K_{dB} e B_L) podem ser utilizadas como uma metodologia, e podem agora ser replicadas para outros ambientes.

A validação do modelo foi realizada através de 432 pontos de testes, onde o resultado simulado pelo modelo (*ler* | *não ler*) em cada ponto foi comparado com o resultado prático dos ensaios realizados. Conforme esperado, houve variações no número

de acertos do modelo entre cada um dos quatro ambientes utilizados. Como também era esperado, o ambiente “rua” se mostrou aquele onde os resultados práticos mais se aproximaram dos resultados simulados pelo modelo, comprovando que, além da influência do material no qual a etiqueta está fixada, outro desafio para o bom funcionamento de um sistema RFID são os obstáculos e interferências eletromagnéticas do ambiente. Mas, conforme demonstrado, o modelo conseguiu obter um ótimo percentual de acerto nas simulações mesmo quando o ambiente possuía muitas interferências de reflexão, como no caso das duas salas estreitas.

Sobre os resultados das simulações: nos ambientes fechados, o material vidro apresentou maior percentual de erros. Já na rua, este material funcionou exatamente conforme esperado pelas simulações, o que valida o modelo. Isopor e plástico apresentaram sempre baixo percentual de erros em relação às simulações. Estas conclusões são ótimas referências para projetistas de sistemas RFID.

Dos 432 pontos testados e simulados, em 391 pontos (90,5%) a simulação e os resultados práticos foram iguais. Dos 41 pontos onde a simulação gerou resultados diferentes dos resultados práticos, apenas em cinco pontos o problema foi o de não ter ocorrido leitura da etiqueta em local onde a simulação apontava leitura ('x' nos gráficos de simulação). Em muitas situações reais de uso de sistemas RFID, este seria o maior problema: a simulação apontar que em determinado local a etiqueta seria lida, mas, na prática, a leitura não acontecer. Pode-se dizer, portanto, que o principal erro de simulação aconteceu apenas em 1,16% entre todos os pontos medidos. Os demais 36 erros apontados nos gráficos ('r') foram aqueles onde ocorreu leitura da etiqueta em um ponto onde o modelo indicava que não ocorreria leitura.

A partir do uso dos resultados obtidos com os modelos de propagação de RF para ambientes RFID, onde é possível obter a resposta se uma determinada etiqueta será ou não lida em um determinado ponto do ambiente, é possível criar outros modelos derivados, tais como o que permite simular se uma determinada quantidade de etiquetas, passando em frente a antena de um leitor, a uma velocidade y , serão ou não completamente lidas.

Finalmente, pode-se concluir que este capítulo apresenta uma metodologia promissora para criação de modelos de simulação de ambientes RFID. Para a continuidade deste trabalho, determinar a influência de outros tipos e formatos de materiais nos quais a etiqueta pode estar fixada, bem como o percentual de retorno de energia de outros modelos de etiqueta, ampliaria a usabilidade do modelo, permitindo a criação de uma base de dados para simulações de variados tipos de ambientes. Por fim, também poderia ser medida a influência de certos tipos de obstáculos ao redor da etiqueta, tais como paredes, móveis e equipamentos, possibilitando ao modelo simular ambientes com um número maior de variáveis.

5. COMUNICAÇÃO RFID NA CAMADA LÓGICA: PROTOCOLOS ANTI-COLISÃO DOS SINAIS REFLETIDOS PELAS ETIQUETAS

Este capítulo apresenta métodos e novos modelos para funcionamento dos algoritmos anti-colisão. Conforme definido nos capítulos anteriores e nos modelos já apresentados, estes algoritmos serão utilizados na simulação da camada lógica (Camada de Enlace) da comunicação de dados entre o equipamento leitor e as etiquetas.

A colisão de sinais provenientes das etiquetas exige a aplicação de protocolos anti-colisão para a identificação do sinal individual de cada etiqueta. Estes sinais utilizam a mesma frequência no espectro, e quando emitidos simultaneamente por mais de uma etiqueta se tornam não identificáveis para os equipamentos leitores.

Considerado um dos maiores desafios no desenvolvimento da tecnologia RFID, a colisão de sinais provenientes das etiquetas é um fator importante e que limita o desempenho destes sistemas [Cho10], [Cho08], [Law00], [Ali07], [Shi06], [Yu005]. As constantes atualizações, os vários protocolos anti-colisão padronizados ao longo dos últimos anos e os inúmeros trabalhos científicos sobre o assunto confirmam a importância do tema.

Neste capítulo serão apresentadas as definições sobre os protocolos e os respectivos algoritmos anti-colisão utilizados por todos os padrões ISO 18000-6. Conforme será apresentado, entre os quatro protocolos anti-colisão padronizados, três não possuem a definição completa dos algoritmos anti-colisão. As partes não definidas visam dar liberdade aos desenvolvedores de equipamentos RFID. Porém, estes parâmetros não definidos são cruciais para o melhor ou pior desempenho desta etapa de identificação das etiquetas, e encontrar o melhor valor para tais parâmetros é notadamente um desafio. Ao longo deste trabalho, baseado em diversos testes realizados, são apresentadas propostas práticas para a solução destes desafios.

O roteiro deste capítulo é dado como segue: a Seção 5.1 apresenta uma introdução sobre o assunto em questão, bem como os padrões da área. A Seção 5.2 apresenta os trabalhos relacionados. A fim de possibilitar a criação e testes dos diversos algoritmos padronizados, bem como as propostas deste trabalho para o desenvolvimento destes algoritmos, e ainda possibilitar a criação de rotinas de execução e de comparações de desempenho entre os diversos algoritmos desenvolvidos, foi desenvolvido um Ambiente de Software para Simulação de Modelos de Sistemas RFID, denominado RFID-ENV. Este *framework* permite ao programador incluir novos modelos de protocolos anti-colisão e as características físicas dos ambientes de funcionamento, aquelas citadas ao longo do Capítulo 4. O RFID-Env, os algoritmos padronizados, as proposta deste trabalho para o desenvolvimento destes algoritmos, e os resultados obtidos, são apresentados na Seção

5.3. A Seção 5.6.2 apresenta mais uma proposta de algoritmo, desenvolvida para o controle do protocolo anti-colisão do padrão ISO 18000-6 C, o mais atual. Os resultados obtidos com esta proposta demonstram melhorar em até 11,7% o desempenho do processo quando comparado com o desenvolvimento padrão do algoritmo original. Ainda, este algoritmo é apresentado de forma completa, sem as indefinições do padrão original, o que, na prática, soluciona o desafio enfrentado por desenvolvedores de sistemas RFID, que quando se deparam com o algoritmo padronizado, precisam de alguma forma determinar o valor de variáveis e de constantes que são de difícil resolução. Complementando a proposta do novo algoritmo, foi desenvolvida uma equação baseada em regressão linear para simular o funcionamento do algoritmo, tornando as simulações mais rápidas e com menor consumo de recursos computacionais. As conclusões do capítulo estão na Seção 5.7.

5.1 PROTOCOLOS ANTI-COLISÃO DOS SINAIS EMITIDOS PELAS ETIQUETAS

A detecção e leitura de várias etiquetas RFID que enviam e recebem sinais sobre uma mesma frequência compartilhada trata-se de um problema que exige a aplicação de alguma técnica de divisão do canal de comunicação. Tais técnicas denominam-se *protocolos anti-colisão*. Os protocolos atualmente utilizados em sistemas RFID são baseados principalmente em duas estratégias genéricas: divisão do canal por tempo (algoritmos do tipo ALOHA) ou identificação de etiquetas a partir de questionamentos do equipamento leitor, que trabalha “montando” ou identificando por eliminação os valores únicos de cada etiqueta, utilizando para isto as estruturas lógicas de dados tipo árvores, genericamente denominados protocolos de árvore binária.

Os protocolos anti-colisão utilizados por dispositivos RFID são baseados em algoritmos executados nas etiquetas eletrônicas e no equipamento leitor. O leitor percebe a presença de mais de uma etiqueta no ambiente através do recebimento de um sinal não identificável, composto pela sobreposição das respostas simultâneas de mais de uma etiqueta. Quando isto acontece, o leitor inicia a execução do protocolo anti-colisão, envolvendo rotinas executadas também pelas etiquetas.

Conforme já citado nos capítulos anteriores, as etiquetas padronizadas pela série ISO 18000-6 (A, B, C) e EPC Classe 1 Geração 2 (EPC Gen2) são os tipos de etiquetas RFID mais utilizados. Para cada um destes padrões de etiqueta, um novo protocolo anti-colisão foi especificado: ALOHA LST e ALOHA FST para o ISO 18000-6 A, Btree para o ISO 18000-6 B e Random Slotted (Algoritmo Q) para o ISO 18000-6 C (padrão este equivalente ao EPC Gen2) [Myu06], [Law00]. Entre os quatro protocolos (exceto o Btree), três possuem um importante desafio para os desenvolvedores de equipamentos RFID: a não definição completa dos algoritmos anti-colisão pelos documentos de padronização. A definição dos algoritmos precisa ser resolvida pelos desenvolvedores dos dispositivos RFID. Um dos grandes problemas dessa tarefa é que, para cada tipo de ambiente físico ou tipo de aplicação, uma rotina de algoritmo pode ser melhor ou pior. Além disso, a própria existência de quatro protocolos, cada um para uma das especificações de hardware normalizadas pela ISO, dão liberdade de escolha para o desenvolvedor, mas,

em contrapartida, aumentam a necessidade do uso adequado de boas ferramentas de simulação de modelos a fim de escolher a melhor opção entre as possíveis.

5.2 TRABALHOS RELACIONADOS

Esta seção apresenta alguns trabalhos relevantes da literatura sobre algoritmos anti-colisão dos sinais emitidos (ou, mais precisamente: refletidos) pelas etiquetas. Inicialmente, observa-se que, nesta pequena amostra desta área específica de sistemas RFID, há trabalhos não tão recentes, dos anos de 2007 e 2008, e outros mais atuais, de 2010 e inclusive de 2011. Como dito, esta é uma pequena amostra sobre a área, e os trabalhos sobre protocolos e algoritmos anti-colisão são realmente constantes e em grande volume na literatura. Isto demonstra como o assunto é e continua sendo um desafio importante para desenvolvedores de dispositivos RFID.

Nesta seção também poderá ser observado que existe uma idéia frequente entre os pesquisadores, que é a de tentar utilizar a estratégia de programação "dividir para conquistar". Sabe-se que dividir um grande problema computacional em vários problemas menores costuma ser vantajoso, e isto tem sido buscado por vários autores. O problema para este tipo de abordagem é que, na maior parte das vezes, os projetistas de sistemas RFID não têm conhecimento sobre quantas etiquetas estarão presentes no ambiente, e isto dificulta a criação de métodos para a divisão do conjunto de etiquetas em grupos que tenham quantidades de etiquetas que tornem o processo vantajoso em relação aos já existentes.

Finalmente, poderá ser observado que as pesquisas para desenvolvimento de novos algoritmos anti-colisão, envolvem, em geral, a implementação dos novos algoritmos, as simulações e a obtenção dos resultados, a partir da implementação em software e execução em computadores das rotinas dos algoritmos apresentados. Normalmente, estes trabalhos também desenvolvem as rotinas dos protocolos padronizados a fim de comparação entre os resultados obtidos pela proposta em relação aos resultados obtidos pelos algoritmos padronizados. Estas características relacionam todos os trabalhos abaixo citados com a proposta e os resultados desta tese, conforme será observado nas próximas seções.

O primeiro trabalho a ser citado é [Che07], onde é proposto um novo protocolo chamado Advanced DFSA. A proposta principal da referência é dividir o grupo de etiquetas em sub-grupos menores, e nestes grupos menores executar o algoritmo anti-colisão padronizado (Q). Os resultados apresentados mostram que com esta estratégia foi possível diminuir a quantidade de *slots* utilizados em relação aos valores obtidos pelo mesmo trabalho na implementação padrão do algoritmo Q, utilizado pelo protocolo mais atual (ISO 18000-6 C). Para a separação do grupo de etiquetas presentes no ambiente em sub-grupos menores, o trabalho propõe que, cada etiqueta, no início do processo de identificação, realize o sorteio de um número. Aquelas etiquetas que sortearem o mesmo número estarão no mesmo grupo. É citado que cada etiqueta deverá fazer um sorteio entre zero e N , e o sorteio realizado pelas etiquetas será 2^N . Infelizmente não é explicado como determinar o valor de N em situações diferentes daquelas apresentadas no trabalho, o

que influenciará o número de grupos que serão criados. O desenvolvimento da proposta de novo algoritmo, as simulações e obtenção dos resultados, assim como aqui neste trabalho, foram realizadas a partir da implementação em software das rotinas do algoritmo proposto. Naquele trabalho, foi utilizada a linguagem C#.NET, enquanto no presente trabalho, Java foi a linguagem utilizada. Em ambos os trabalhos, foram desenvolvidas as rotinas de software correspondentes exatamente àquelas realizadas pelo equipamento leitor e pelas etiquetas. Durante as simulações, números randômicos são gerados para representar os ID's das n etiquetas presentes no ambiente de simulação, e os comandos previstos nos protocolos padronizados e nas propostas de novos algoritmos são executados conforme determinado pelos protocolos.

Conforme já citado, na maior parte das vezes, os projetistas de sistemas RFID não têm conhecimento sobre quantas etiquetas estarão presentes no ambiente, e isto dificulta a criação de muitas estratégias que poderiam melhorar a funcionalidade dos algoritmos anti-colisão. Tendo em vista esta dificuldade, em [Cho08] foi desenvolvido um método para estimar a quantidade de etiquetas presentes no ambiente. Mas esta estimativa citada no trabalho, na realidade, é baseada em respostas de colisões ou leituras com sucesso das primeiras interações entre o leitor e as etiquetas. Então, é uma estimativa não pré-realizada, mas sim encontrada de acordo com as respostas iniciais do protocolo. A partir desta constatação, é uma proposta que se aproxima da que é apresentada por este trabalho. Na referência citada [Cho08], duas propostas de novos algoritmos anti-colisão são definidas, ambas baseadas principalmente na estratégia dos algoritmos determinísticos baseados em árvores binárias, onde o leitor, a partir de interações diversas com o grupo de etiquetas presentes no ambiente, vai "montando" os ID's individuais de cada etiqueta. Resumidamente, neste tipo de protocolo o leitor envia partes de um ID (um conjunto de bits) para a sua área de alcance de leitura e pergunta se há etiquetas cujos ID's coincidam com aquela mesma sequência binária. Se várias responderem, haverá colisão, e o leitor aumenta um bit na pergunta e repete o processo. Esta rotina se repete várias vezes até que somente uma única etiqueta responda ao questionamento do leitor. Posteriormente, o leitor percorre a árvore binária já montada e testada, e as outras etiquetas poderão ser também identificadas a partir de novas consultas. Para testes e validação do referido trabalho, as rotinas dos algoritmos propostos foram desenvolvidas em software e executadas em computador.

Em [Xia10] é proposto um protocolo denominado Collision Tree Protocol (CT). O protocolo trabalharia no nível físico da transmissão. O equipamento leitor, utilizando a codificação de sinais Manchester, conseguiria identificar exatamente quais sequências de bits são iguais, e quais são diferentes, no conjunto de ID's das etiquetas presentes no ambiente. Os autores defendem que os bits comuns entre o grupo de etiquetas conseguirão ser sempre identificados pelo leitor. A partir da separação do grupo de etiquetas em sub-grupos, que serão formados de acordo com os bits comuns entre cada grupo, o equipamento leitor processa de forma independente os sub-grupos até a identificação única de cada etiqueta. Esta proposta trabalha no nível da codificação dos sinais digitais realizada pelo leitor, o que atualmente nenhum protocolo anti-colisão padronizado utiliza. Uma observação que é possível fazer é que o desempenho deste protocolo irá depender da distribuição dos ID's das etiquetas presentes no ambiente. Por

fim, trabalhar neste nível levaria os problemas da Camada Física de comunicação (interferências no sinal de RF) para o nível lógico.

Em [Cho10] é proposto o protocolo Fast Tree Traversal Protocol (FTTP). Como nas propostas anteriores, o artigo apresenta uma solução onde o grupo de etiquetas é dividido em vários sub-grupos, e cada sub-grupo é lido pelo algoritmo padronizado Q. A estratégia de divisão dos grupos é dada pelo algoritmo definido no trabalho para determinar o "fator k de divisão" dos grupos. Este fator k de divisão seria a grande contribuição do trabalho, e é definido a partir do conhecimento obtido no número de *slots* necessários para a leitura com sucesso de cada etiqueta em cada grupo anteriormente já processado. O fator k se atualiza conforme o processamento de cada grupo, e esta estratégia de usar o conhecimento já adquirido com as leituras anteriores para melhorar o ajuste sobre a estimativa da quantidade de etiquetas que ainda faltam ser lidas assemelha esta proposta com as que são apresentadas aqui neste trabalho. A referência citada não apresenta detalhes de implementação do algoritmo proposto, mas apenas as definições formais matemáticas sobre a forma de divisão dos grupos.

Em [Zha10] é proposto um algoritmo anti-colisão baseado em políticas de prioridade entre as etiquetas do ambiente. Cada etiqueta, no momento do recebimento (gravação) dos dados, teria uma parte da memória reservada para a identificação da sua prioridade. O leitor sempre iniciaria emitindo comandos de leitura para as etiquetas com prioridade maior, até alcançar a leitura das etiquetas com menor prioridade. Esta classificação prévia de etiquetas com maior ou menor prioridade, quando possível, naturalmente diminui a concorrência de múltiplas etiquetas pelo intervalo de tempo único existente no canal de comunicação entre o leitor e as etiquetas.

Os autores Lei e Yum, em [Lei11], apresentam uma pesquisa comparativa com todas as abordagens atualmente existentes para algoritmos anti-colisão. O trabalho faz comparações de desempenho entre os algoritmos atualmente existentes, através de simulações em computador, da mesma forma feita aqui neste trabalho. A conclusão, assim como aqui defendido, é que os algoritmos atualmente padronizados, bem como as pesquisas publicadas mais relevantes, ainda precisam de aprimoramentos.

5.3 RFID-ENV: UM AMBIENTE DE SOFTWARE PARA SIMULAÇÃO DE MODELOS DE SISTEMAS RFID

Com o objetivo de possibilitar a criação, simulação e comparação dos modelos propostos para a camada de enlace, bem como os modelos desenvolvidos para a simulação da camada física, foi desenvolvido o software denominado RFID-ENV (RFID Environment). Desenvolvido em Java, possui uma arquitetura que visa facilitar ao programador incluir novos modelos de simulação da camada física e da camada de enlace (os protocolos anti-colisão), sendo então um *framework* que possibilita o desenvolvimento rápido e a realização de simulações e comparações entre os diversos modelos. Portanto, este software implementa a Máquina de Estado Finito do Sistema Completo de Simulação apresentada no Capítulo 2.

Especificamente em relação aos algoritmos anti-colisão, o simulador permite que sejam desenvolvidos modelos em alto nível de abstração, antes de futuras implementações em hardware. Tendo em vista que partes das rotinas dos protocolos de comunicação não são definidas pelos organismos de padronização da área, uma ferramenta de simulação desses algoritmos é de fundamental importância para desenvolvedores de hardwares RFID.

Quanto à simulação de ambientes físicos onde sistemas RFID podem ser instalados, o RFID-Env permite simular a viabilidade de funcionamento do sistema em relação às características do ambiente a partir dos modelos desenvolvidos para a simulação da camada física.

O RFID-Env permite uma completa parametrização, permitindo ao programador criar testes a fim de melhor representar o ambiente real. Por exemplo, a ferramenta permite ao usuário a determinação do número de etiquetas presente no ambiente, a distância destas para o leitor, o tipo de protocolo anti-colisão, a velocidade de deslocamento das etiquetas, o material no qual a etiqueta está fixada e a quantidade de testes entre as etiquetas e o leitor.

Para possibilitar análises comparativas entre os algoritmos anti-colisão já existentes e a implementação de novas propostas, estes protocolos foram implementados na ACPL (*Anti-collision Protocol Library*) do simulador RFID-Env. Esta biblioteca de protocolos compõe, portanto, os algoritmos anti-colisão padronizados pela ISO e as propostas deste trabalho para novos modelos. Adicionalmente, a ACPL facilita o desenvolvimento de novos algoritmos, pois oferece bibliotecas de rotinas comuns entre os protocolos.

Não foram encontrados na literatura, ou em softwares comerciais, sistemas de avaliação de desempenho de ambientes RFID como o descrito aqui neste trabalho. Em [Flo09] é proposto um simulador com funcionalidades semelhantes, mas a forma adotada para o desenvolvimento daquele trabalho foi baseada em ferramentas, de terceiros, simuladoras de máquinas de estados, enquanto que no presente trabalho se investiu no desenvolvimento integral dos códigos dos protocolos anti-colisão utilizados pelos hardwares RFID. Não foram relatados, na referência citada, os valores e a forma de implementação dos protocolos anti-colisão. Ainda, foram usados modelos genéricos de simulação de RF, não específicos para a tecnologia RFID, que conforme demonstrado no Capítulo 3 possui especificidades que a diferenciam de sistemas tradicionais baseados em RF.

Vários trabalhos descrevem ambientes de avaliação de desempenho. No entanto, estes ambientes fazem a avaliação de desempenho em níveis baixos de abstração, como, por exemplo, a necessidade de implementação física ou o RTL (register-transfer level) do ambiente de teste. Estes níveis de avaliação de desempenho possuem custos proibitivos e gastam muito tempo da simulação.

Existem atualmente quatro protocolos anti-colisão padronizados pela ISO para a série de dispositivos RFID 18000-6, sendo que a versão mais recente deste padrão, o ISO 18000-6 C, é igual ao padrão EPCglobal-Generation 2 (EPC Gen2). Nas seções a seguir

são apresentados o desenvolvimento e os testes de quatro modelos que representam os quatro protocolos anti-colisão padronizados. Dois modelos são propostas aqui deste trabalho para o protocolo anti-colisão do padrão ISO 18000-6 A LST. Outro modelo desenvolvido é para a versão FST do mesmo padrão 18000-6 A, e é uma otimização (proposta pela ISO) da primeira versão, que passou a ser denominada LST. Também são demonstrados os detalhes de implementação e exemplos de uso dos algoritmos especificados pelas normas ISO 18000-6 B e ISO 18000-6 C (EPC Gen2). Finalmente, é apresentada mais uma proposta deste trabalho, um novo modelo para a implementação do protocolo anti-colisão mais atual, o ISO 18000-6 C. Este protocolo possui variáveis em aberto no seu algoritmo controlador, a fim de que desenvolvimentos otimizados possam ser realizados. Mas tais variáveis tornam as implementações extremamente complexas, conforme será discutido. Aqui neste trabalho é apresentada uma proposta para o algoritmo citado que elimina a necessidade das variáveis que dificultam o desenvolvimento. Conforme as simulações, a proposta apresentou resultados promissores.

A próxima seção apresenta os argumentos sobre as possibilidades de desenvolvimento de novos algoritmos anti-colisão dentro das normas ISO já especificadas, ou seja, os modelos aqui propostos podem ser implementados sem que uma nova norma seja criada, o que é importante do ponto de vista prático para desenvolvedores de equipamentos RFID.

5.3.1 NÃO DETALHAMENTO DA ISO PARA IMPLEMENTAÇÃO DOS ALGORITMOS ANTI-COLISÃO: OPORTUNIDADE PARA PROPOSTAS DE NOVOS MODELOS

Um esclarecimento importante, para o entendimento deste trabalho em relação ao desenvolvimento dos modelos para os algoritmos anti-colisão, é sobre as questões em aberto pelos documentos de padronização da ISO em relação à implementação dos algoritmos anti-colisão. Estes documentos explicam perfeitamente os recursos de hardware que devem existir nos dispositivos, tais como tamanhos dos registradores de memória e a quantidade destes. Os documentos também especificam perfeitamente os diagramas de estado de cada algoritmo anti-colisão a ser usado pelo protocolo respectivo, bem como o significado exato de cada estado. Mas há um elemento crucial para a implementação dos algoritmos que não é especificado pelos documentos: o momento exato que o algoritmo deve decidir pela troca do tamanho do “ambiente de tráfego”, que nos documentos ISO é denominado *round size*. Conforme poderá ser melhor compreendido nas seções específicas, os algoritmos utilizados pelos protocolos dos padrões ISO 18000-6 A LST, ISO 18000-6 A FST e ISO 18000-6 C, (ou seja, exceto o algoritmo do ISO 18000-6 B), trabalham usando sorteios, por parte das etiquetas, para decidir qual o número do “espaço de tempo” (número do *slot*) que usarão para enviar suas informações para o interrogador. Este valor que deve ser sorteado em cada etiqueta possui um valor mínimo que é zero em todos os padrões, e também possui um valor máximo, o *round size*, que é especificado pelo equipamento leitor. De acordo com este valor máximo, duas situações críticas irão normalmente acontecer:

- Colisões: as colisões acontecem quando mais de uma etiqueta sorteou o mesmo número de *slot* para se comunicar com o leitor. Quanto menor o valor atual do *round size* determinado pelo leitor, em relação ao número total de etiquetas presentes no ambiente, maior será a probabilidade de que duas ou mais sorteiem o mesmo número de *slot* para transmitir.
- *Slots* vazios: existirão *slots* vazios quando nenhuma etiqueta sortear um dos *slots* do tamanho total do *round size* determinado pelo interrogador. Quanto maior o valor atual do *round size* em relação ao número de etiquetas presentes no ambiente, maior será a probabilidade de que nenhuma sorteie algum dos valores. Os *slots* não sorteados são totalmente desperdiçados pelo protocolo, pois tanto o leitor, quanto as etiquetas, nada fazem neste período.

Conforme pode ser compreendido, o ajuste mais preciso possível entre o *round size* determinado pelo leitor e o número de etiquetas fisicamente presentes no ambiente é fundamental para o desempenho final da leitura de todas as etiquetas. Este desempenho pode ser medido da seguinte forma: tanto os *slots* com colisão, quanto os *slots* vazios, são espaços de tempo desperdiçados e que, além disso, consomem processamento e energia nos dispositivos. As análises de desempenho realizadas neste trabalho adotam este critério: quanto menor o número de *slots* vazios ou com colisões em função do número total de etiquetas a serem lidas, melhor o desempenho do algoritmo.

Os documentos de padronização da ISO explicam o seguinte para este problema que pode ser facilmente identificado durante o estudo dos protocolos:

The number of slots in a round referred to as round size, is determined by the interrogator and signaled to the tag in the Init_round command. The initial round size is predetermined by the user. During the subsequent collision arbitration process the interrogator dynamically chooses an optimum round size for the next round based on the number of collisions in the round. The number of collisions is a function of the number of tags in the active state present in the interrogator field and the round size.

Fonte: ISO/IEC (2003), pág. 39

After issuing a Query to initiate an inventory round, the interrogator typically issues one or more QueryAdjust or QueryRep commands. QueryAdjust repeats a previous Query and may increment or decrement Q, but does not introduce new tags into the round. An inventory round can contain multiple QueryAdjust or QueryRep commands.

Tags in the arbitrate or reply states that receive a QueryAdjust first adjust Q (increment, decrement, or leave unchanged), then pick a random value in the range $(0, 2^Q - 1)$, inclusive, and load this value into their slot counter. Tags that pick zero transition to the reply state and reply immediately. Tags that pick a nonzero value transition to the arbitrate state and await a QueryAdjust or a QueryRep command.

Fonte: ISO/IEC (2006), pág. 65

Conforme os textos, o interrogador deve dinamicamente determinar um valor melhor para o *round size* durante a execução completa da rotina de identificação das etiquetas.

Mas o documento ISO não especifica como melhorar e tampouco quando o algoritmo deve realizar esta melhora. O que em um primeiro momento pode parecer simples, como a decisão de aumentar o *round size* quando colisões forem percebidas, no momento da implementação do algoritmo verifica-se não ser algo trivial. Um exemplo: em um sistema ISO 18000-6 A, um ambiente com 50 etiquetas e que o *round size* inicial determinado pelo interrogador tenha sido 32 (ou seja, 50 etiquetas terão 32 slots para sortear), certamente irá resultar em alguma colisão em algum dos espaços de tempo. Se esta colisão for percebida, por exemplo, no *slot* número 12, significa que 12 etiquetas (de zero a 11) já conseguiram transmitir corretamente e já podem passar para o estado de “identificadas”, e inclusive podem já estar sendo processadas por outros sistemas, ou já receberam informações (foram gravadas/escritas), etc. Portanto, pode ser interessante que o algoritmo, apesar de perceber uma primeira colisão, ainda não decida pela troca do *round size* do processo atual, pois na média o número de sucessos ainda é bem maior do que o número de problemas. Além disso, o tamanho do aumento do *round size* passa a ser uma incógnita, pois as etiquetas já identificadas saem do processo, o que diminui o espaço total necessário em relação à situação inicial, e, além disso, o interrogador não tem como saber quantas etiquetas ainda faltam se comunicar. Outra situação possível é ter acontecido uma única colisão, o que é perfeitamente aceitável estatisticamente falando, mas ainda restarem muitos *slots* vazios, e isto deve ser considerado pelo equipamento leitor antes de decidir pelo aumento do *round size*. Nesta primeira identificação de uma colisão, nada muito conclusivo pode ser realizado pelo algoritmo do leitor. Somente quando um número significativo de colisões ocorrerem, em relação ao número de sucessos, é que talvez seja o momento de o interrogador parar o *round* e reiniciar todo o processo com um novo tamanho de *round size*. Mas surge então uma nova pergunta: aumentar em quanto o *round size*? Um percentual de 10% do *round size* atual? 20%? Uma função dada entre o número de colisões e sucessos? Como o interrogador não tem como saber quantas etiquetas ainda não enviaram seus dados, este tamanho do aumento precisa usar, talvez, elementos estatísticos já percebidos até o momento da troca do tamanho do *round*, mas ainda assim é provável que tenha que ser reajustado várias vezes. Os modelos apresentados nesse trabalho para o funcionamento dos protocolos anti-colisão apresentam propostas para a solução desses desafios.

Além das questões sobre o momento exato que o *round size* deve ser aumentado, e a quantidade deste aumento, existem outras questões para a operação de diminuição do *round size*. Algumas destas questões são idênticas em relação ao aumento do *round*, mas outras não. Por exemplo, o protocolo ISO 18000-6 A LST especifica tamanhos fixos para o *round size*. Estes tamanhos são: 1, 8, 16, 32, 64, 128 e 256. De acordo com a decisão adotada pelo algoritmo, o *round size* poderá ser diminuído em algum momento, provavelmente quando perceber um certo número de *slots* vazios. Uma dificuldade encontrada é que a troca do tamanho do *round size* neste protocolo pode gerar uma diferença muito grande no tamanho desse frame. Se o interrogador perceber um grande número de *slots* vazios, como por exemplo, 20 *slots* sem dados, e decidir pela diminuição do *round size*, pode estar decidindo pela troca de 256 para 128. Mas se no ambiente em questão existir 200 etiquetas, este novo *round size* acabará gerando, agora, muitas colisões, embora que com o *round size* anterior estivessem acontecendo muitos casos de

slots vazios. Resumindo, o *round size* anterior de tamanho 256, apesar dos *slots* vazios inevitáveis, era o correto, e o novo *round size* de tamanho 128 acabará tendo que ser alterado para 256 novamente, e esta decisão do equipamento leitor de ter diminuído o tamanho do *round* teria gerado uma grande perda de tempo e reprocessamentos. Em muitos sistemas reais RFID, onde as etiquetas estão em movimento (malas em aeroportos ou produtos em esteiras), o tempo para leitura de um grupo de etiquetas é fator crucial para o bom funcionamento do sistema.

Nos modelos propostos e que já foram implementados no RFID-Env, estas decisões de implementação em relação ao momento do aumento ou diminuição do *round size*, bem como o valor destas alterações, são de grande importância para o desempenho dos protocolos. De acordo com as simulações, pequenas alterações nas rotinas de reinício do *round size* resultam em desempenhos significativamente melhores ou piores.

Nas seções a seguir são descritos os algoritmos utilizados pelos protocolos anti-colisão, de acordo com os padrões ISO, e as propostas desta tese para a implementação destes algoritmos. Tais modelos foram implementados, testados e simulados no ambiente do RFID-Env. São apresentados também os resultados obtidos.

5.3.2 RFID-ENV: DESCRIÇÃO DO AMBIENTE DE SOFTWARE DESENVOLVIDO

No que diz respeito à simulação da leitura de etiquetas RFID realizada pelo ambiente de software RFID-Env, levando em consideração as etiquetas tipo A, B e C do padrão ISO 18000-6 e os respectivos protocolos anti-colisão, a simulação respeita a forma de funcionamento dos protocolos de identificação de etiquetas: existem processos relativos ao funcionamento do interrogador e processos relativos ao funcionamento das etiquetas. Alguns poucos processos foram desenvolvidos especificamente para a simulação, ou seja, atividades que não fazem parte do funcionamento real de um sistema RFID. O mais importante desses processos extras é o que gera a informação de cada etiqueta, o código único identificador UID (Unique Identifier). Em um sistema real típico, as etiquetas já possuem um valor UID gravado em memória no momento que os protocolos são executados. Já no RFID-Env, em todos os protocolos desenvolvidos, um processo inicial “gerador de UID” é executado e aloca para cada etiqueta da simulação o UID correspondente. Para este processo uma função de geração de valores randômicos é executada, e os códigos únicos de cada etiqueta recebem tamanhos binários correspondentes aos tamanhos reais de cada padrão ISO que está sendo implementado, variando entre 16 bits (no ISO 18000-6 C) e 64 bits (no ISO 18000-6 B).

Na verdade, de acordo com as normas ISO, durante o processo de identificação das etiquetas o protocolo pode usar apenas parte do conteúdo total da memória da etiqueta. No ISO 18000-6 A é enviado o SUID (Sub Identifier), de 40 bits. Já no ISO 18000-6 B é enviado o UID inteiro, com 64 bits, e no ISO 18000-6 C é enviado o RN16, um valor randômico de 16 bits exclusivo para uso do processo anti-colisão. Mas este processo de geração de UID no RFID-Env é um processo completamente separado da execução do protocolo, não interferindo de nenhuma forma na interpretação dos resultados da simulação, servindo apenas para preparação inicial do processo.

A janela principal do RFID-Env é dividida em três seções (abas): Simulator, Single Mode e Portal Mode. Na tela inicial (Simulator), conforme a Figura 5-1, o usuário especifica qual(is) algoritmo(s) deseja testar, a quantidade de etiquetas no ambiente e, de acordo com algoritmo selecionado, pode especificar alguns parâmetros específicos, tais como tamanho inicial do frame nos algoritmos ALOHA. O usuário também pode selecionar o número total de execuções (a fim de facilitar a geração de médias estatísticas de resultados) e o formato do relatório de saída (que é gerado em um arquivo ASCII). A Figura 5-1 mostra a janela inicial do RFID-Env.

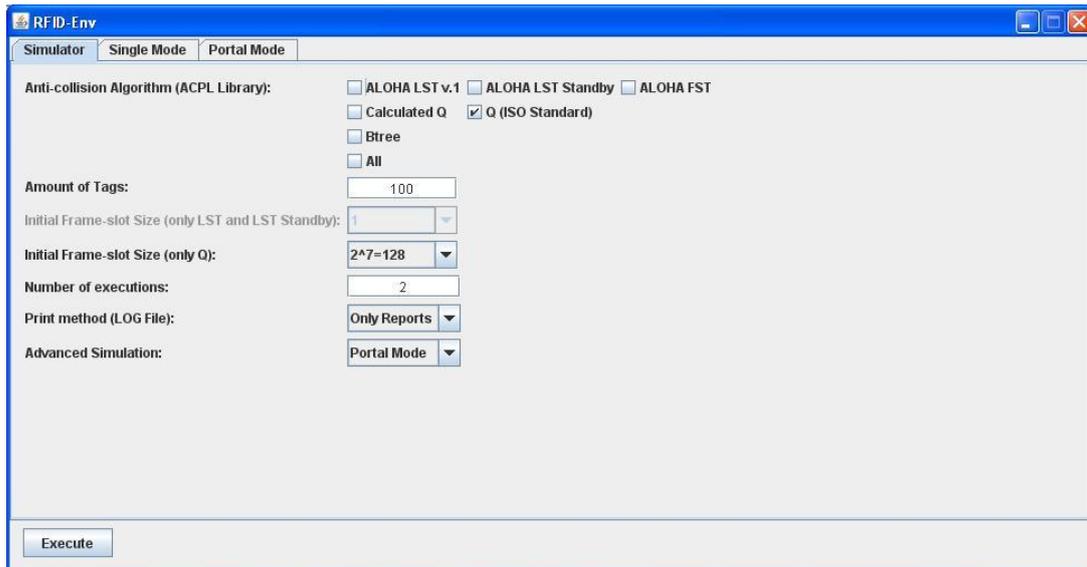


Figura 5-1: Janela inicial do RFID-Env - aba Simulator.

Na tela inicial, Simulator, há uma caixa de seleção, opcional, denominada Advanced Simulation, onde o usuário pode selecionar o modo de operação do sistema a ser simulado: Single Mode ou Portal Mode. No caso de o usuário desejar testar apenas o funcionamento dos modelos para algoritmos anti-colisão, sem que as interferências físicas do ambiente sejam consideradas, esta opção não é necessária, bem como as abas correspondentes. Mas para testes onde as variáveis físicas do ambiente devem ser consideradas, tais como distância entre o leitor e as etiquetas e a velocidade de exposição da etiqueta diante das antenas, o usuário deverá então selecionar o modo Single ou Portal. A Figura 5-2 mostra a tela Portal Mode habilitada após a seleção de Advanced Simulation pelo usuário e as opções correspondentes deste modo.

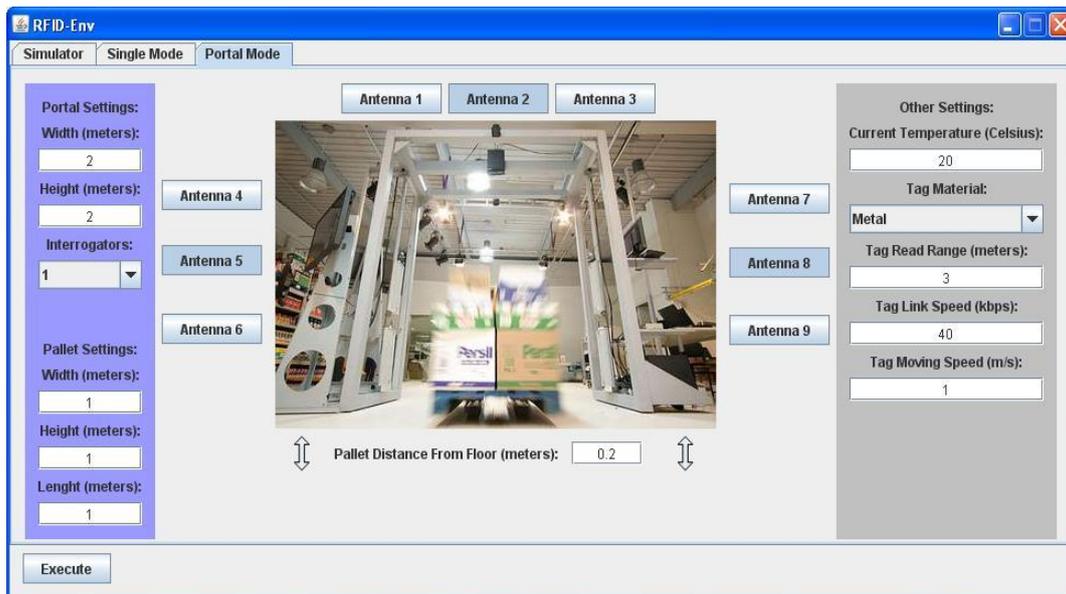


Figura 5-2: Tela Portal Mode do RFID-Env.

No momento que o usuário informa a quantidade de etiquetas presentes no ambiente, algo que em sistemas RFID ISO 18000-6 A e C real pode acontecer de forma semelhante no equipamento leitor, onde o usuário precisa informar o valor inicial do *round size*, que precisa ser baseado no número de etiquetas que o usuário supõe existir no ambiente, imediatamente o processo de geração de UID no ambiente de simulação é executado e para cada etiqueta do ambiente virtual de simulação um código único é atribuído. Para simulação do padrão ISO 18000-6 B, apesar de em sistemas reais não ser necessário informar o tamanho do *round*, no simulador esta informação precisa ser solicitada ao usuário, a fim de que o processo possa carregar em memória um número de etiquetas para a simulação. Da mesma forma, esta informação dada pelo usuário não interfere de forma alguma na simulação, tendo em vista que apenas serve para montagem do ambiente inicial de testes, e somente após esta etapa é que as execuções dos algoritmos anti-colisão são realizadas.

O ambiente total montado em memória e as etapas iniciais para a simulação são demonstrados na Figura 5-3.

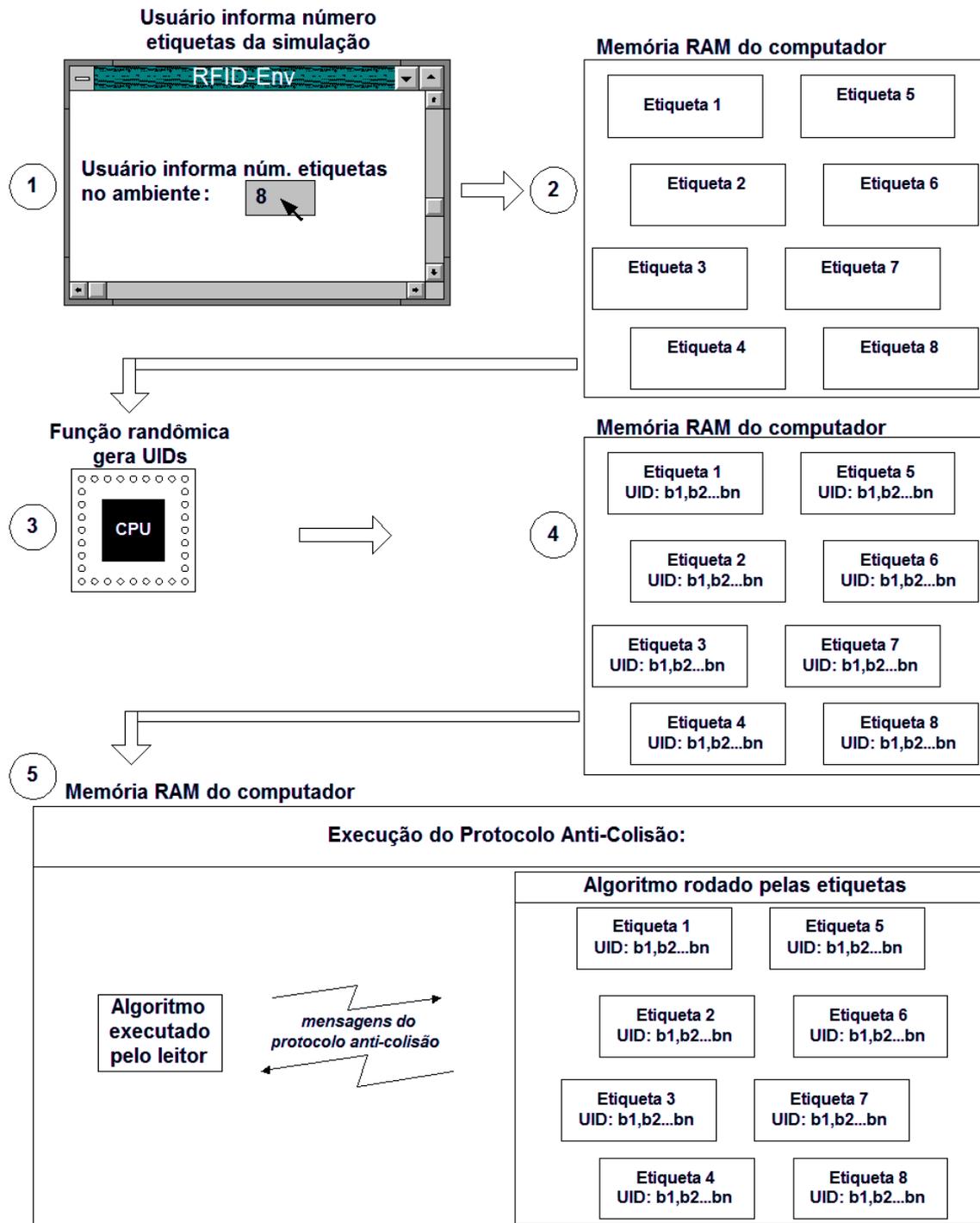


Figura 5-3: Ambiente de simulação e etapas iniciais de funcionamento do RFID-Env.

A Figura 5-3 demonstra cinco das etapas principais dos processos de simulação no RFID-Env. Conforme visto anteriormente, no início da execução é solicitado ao usuário o número de etiquetas na simulação (passo 1 da Figura 5-3). Com esta informação, o software gera em memória um espaço para os valores a serem armazenados em cada etiqueta (passo 2). Após, é chamado o processo de geração de UID das etiquetas (passos 3 e 4). No passo 5 é demonstrado que o processo que roda o algoritmo específico do protocolo a ser simulado é inicializado e passa a interagir com as etiquetas, surgindo neste momento o processo do leitor, que é sempre o principal em um protocolo anti-colisão de RFID.

5.4 PROTOCOLO ALOHA LST: MODELO, IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS

Nesta seção é apresentado o algoritmo genérico padronizado pela ISO para uso no protocolo anti-colisão dos dispositivos tipo 18000-6 A LST (Long Slot Mode). Após são apresentados dois modelos propostos para a implementação deste algoritmo. Esses modelos foram implementados a partir dos recursos oferecidos pelo RFID-Env, levando em consideração o não detalhamento de algumas rotinas nos documentos de padronização ISO e EPC. As variações entre os dois modelos se dão na parte da decisão sobre o momento da troca do tamanho do *round* (*round size*) e o percentual desta modificação para maior ou menor.

Na primeira versão do padrão ISO 18000-6 A o protocolo anti-colisão utilizado foi baseado no ALOHA [ISO03], enquanto na segunda versão do padrão, este mesmo protocolo recebeu a opção do uso da técnica Fast Slot Mode (FST) [ISO06]. Desta forma, o protocolo anti-colisão atual de um dispositivo do padrão tipo A é o ALOHA, com a opção do uso da técnica FST.

Os protocolos tipo ALOHA utilizam um mecanismo que aloca as transmissões das etiquetas em etapas (*rounds*) e espaços (*slots*). Um *round* consiste em um número de *slots*. Cada *slot* possui uma duração com tempo suficiente para o equipamento leitor receber a resposta de uma etiqueta, sendo que o leitor determina este tempo. Uma diferença importante do ALOHA FST em relação ao ALOHA LST é que no primeiro o interrogador pode interromper um *slot* que tenha sido percebido como vazio, ou seja, que não está sendo utilizado por nenhuma das etiquetas. De qualquer forma, é um tempo desperdiçado, embora menor do que aconteceria com o ALOHA LST, onde o interrogador aguarda todo o tempo de cada *slot*, mesmo quando vazios.

O início do processo de leitura dos dados das etiquetas pelo leitor se dá através do recebimento, nas etiquetas, de um campo de energização proveniente do leitor, seguido do comando `Init_round_all`. Quando as etiquetas recebem este comando, randomicamente selecionam um *slot* no qual irão responder, e aguardam este momento de iniciar a transmissão. O número de *slots* em um *round*, denominado *round size*, é determinado pelo leitor e é informado para as etiquetas no comando `Init_round`. Este *round size* é determinado inicialmente pelo usuário, mas vai sendo adaptado pelo interrogador, nos próximos *rounds*, conforme este percebe sobra ou falta de *slots* para o volume de etiquetas presentes no ambiente. Neste momento entra o problema do não detalhamento pelo documento padronizador da ISO para a implementação que deve ser realizada, ficando a cargo de o desenvolvedor escolher o momento da troca do *round size*, bem como o tamanho desta modificação.

Ao receberem o comando `Init_round`, as etiquetas selecionam o número do *slot* que irão utilizar para responder. Esta seleção é realizada através de um gerador de número randômico.

A etiqueta insere na resposta, além dos dados solicitados (basicamente o UID), os 4 bits do *tag signature*. Estes 4 bits tem como objetivo possibilitar a criação de uma sessão de comunicação única entre uma etiqueta e o interrogador no momento da resposta. A

forma da geração deste *tag signature* não é especificada no padrão ISO, ficando a critério do desenvolvedor como será implementada. Por exemplo, usando parte do UID da própria etiqueta ou do CRC (Cyclic Redundancy Check). Durante o processo de identificação das etiquetas, esta assinatura é enviada pelas etiquetas, e o interrogador também a utiliza para especificar qual etiqueta deve receber um determinado comando.

Após o comando inicial *Init_round*, o interrogador aguarda a resposta da primeira etiqueta, ou seja, aquela que sorteou o número 1 como *slot*. Caso nenhuma etiqueta responda, o interrogador envia o comando *Close_slot*. Este comando faz com que todas as etiquetas que estão em *Round_active* incrementem em 1 seu contador de *slot* (ou seja, aquela que na geração do número de *slot* recebeu o valor 2, poderá responder neste momento). O comando *Close_slot* também é utilizado pelo interrogador quando este detecta uma colisão no *slot* atual (o que significa que mais de uma etiqueta sorteou um mesmo valor para o número de *slot*, e estão colidindo suas respostas). Colisões podem ser detectadas pela disputa de várias transmissões ou também pelo valor de CRC inválido.

Finalmente, quando o interrogador recebe uma resposta de etiqueta sem erro, com um CRC válido, envia o comando *Next_slot*, e nele o valor do *tag signature*, para que a etiqueta que acabou de responder confirme a correta recepção dos seus dados. Quando isto acontece, a etiqueta pode então entrar no estado *Quiet*, que a faz “silenciar” a partir deste momento. O comando *Next_slot* também faz com que as demais etiquetas do *round* atual incrementem em 1 o seu contador de *slot*. Aquela etiqueta que agora contenha seu contador de *slot* com valor igual ao do *slot* corrente do interrogador, poderá então responder.

Os passos explicados nos parágrafos anteriores são repetidos até que todas as etiquetas tenham sido identificadas. Para os casos das etiquetas que não foram detectadas (não receberam o sinal de confirmação de recebimento dos seus dados), e quando o contador de *slots* emitido pelo interrogador chegar ao mesmo valor do tamanho do *round size* (ou seja, há uma indicação de que o *round* atual terminou), estas etiquetas não identificadas sorteiam novamente um novo valor para o seu *slot*, bem como geram uma nova *tag signature* e entram então em um novo *round*, e assim sucessivamente, até receberem a confirmação dos seus dados pelo interrogador.

5.4.1 PRIMEIRO MODELO PROPOSTO PARA O PADRÃO ISO 18000-6 A: ALOHA-DOUBLE-ROUND-SIZE

O documento ISO do padrão 18000-6 A LST especifica tamanhos fixos para o *round size* que podem ser determinados pelo leitor e informado para as etiquetas. São eles: 1, 8, 16, 32, 64, 128 e 256. O documento diz que o valor inicial será determinado pelo usuário, ficando a critério do desenvolvedor como irá obter esta informação no equipamento leitor, ou ainda se o próprio equipamento irá eleger um valor padrão inicial e a partir deste valor determinar as alterações para os próximos *rounds*.

Para um funcionamento ótimo do algoritmo, quanto mais próximo o tamanho do *round size* selecionado pelo usuário em relação ao número de etiquetas presentes no ambiente, melhor. Ainda melhor se o *round size* for de um valor aproximado ao número de etiquetas presentes, mas nunca menor, e sim maior. Caso o *round size* escolhido seja menor do que o número de etiquetas, então é certo que ocorrerão colisões, pois será impossível que cada etiqueta selecione um valor de *slot* único. Mas também é importante que o valor a mais do *round size* não seja a ponto de gerar muitos *slots* vazios, o que também gera desperdício de tempo.

Por fim, como se trata de um sorteio, ainda que o ajuste do *round size* seja ótimo, ou seja, de um valor idêntico ao número de etiquetas, ou de um valor maior suficiente apenas para evitar colisões, ainda assim é possível que duas ou mais etiquetas sorteiem o mesmo valor de *slot*, gerando colisões. Mas a tentativa para que um *round* perfeito aconteça, ou seja, um *round* com poucos ou nenhum *slot* vazio, e sem colisões, passa pela escolha de um bom valor para o *round size* inicial.

5.4.1.1 DESCRIÇÃO DO MODELO PROPOSTO ALOHA DOUBLE-ROUND-SIZE

A primeira proposta de modelo desenvolvido para simulações no RFID-Env, denominada ALOHA-DoubleRoundSize, utiliza uma abordagem onde, na detecção de uma colisão dentro de um *round*, se interpreta que o *round size* não está com tamanho suficiente para alocar todas as etiquetas. Quando um *round* não conseguiu fazer com que todas as etiquetas sejam lidas pelo interrogador (devido colisões), um novo *round* é iniciado com as etiquetas que ainda não foram lidas. E devido às colisões detectadas, o novo *round* é iniciado com um número de *slots* maior do que o *round* anterior. Como os valores de *round size* são fixos no protocolo ISO 18000-6 A LST, como já citados, 1, 8, 16, 32, 64, 128 ou 256, o algoritmo passa o *round size* para o próximo tamanho da escala de valores possíveis, que é sempre o dobro do valor anterior, até chegar ao máximo de 256.

Uma observação possível neste protocolo é que a leitura de um número maior do que 256 etiquetas terá sempre um mau desempenho, tendo em vista que não será possível que um único *round* possibilite a leitura de todas as etiquetas. E na medida em que o número de etiquetas se distancie para mais de 256, pior ainda será o gasto de tempo e processamento, obrigando que um número cada vez maior de *rounds* sejam executados, além de que as colisões poderão atingir percentuais muito grandes dentro do total de *slots*.

A Figura 5-4 mostra as etapas iniciais de execução de um exemplo de simulação deste algoritmo, denominado ALOHA LST v.1 no RFID-Env. Esta simulação não irá utilizar as funcionalidades de análise das variáveis físicas de ambiente do RFID-Env, tendo em vista que se deseja observar unicamente o funcionamento dos algoritmos.

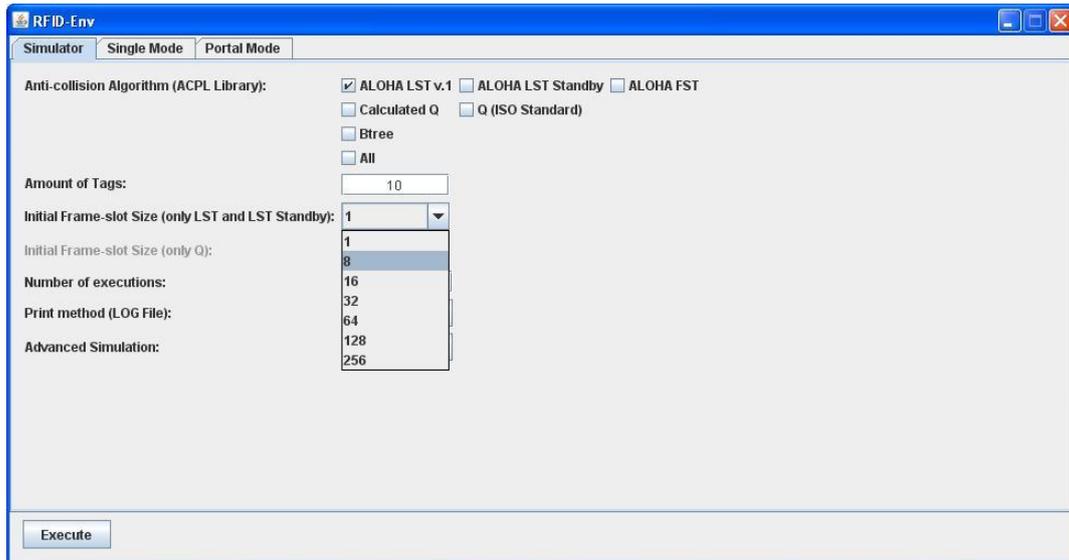


Figura 5-4: Entrada do número de etiquetas na simulação do ALOHA-DoubleRoundSize.

Na Figura 5-4 é mostrado que a execução do exemplo será realizada com um número de 10 etiquetas, bem como a seleção de um *round size* de valor 8, ou seja, um valor menor do que o número de etiquetas presentes no ambiente, o que já indica que obrigatoriamente no mínimo dois *rounds* serão executados, em um melhor caso. A melhor escolha seria ter configurado o *round size* inicial com valor 16, o que possibilitaria que, talvez, um único *round* fosse suficiente para ler as 10 etiquetas do ambiente.

A Figura 5-5 mostra as saídas em ASCII da simulação gerada pelo RFID-Env para o exemplo, e a Figura 5-6 mostra o sumário final com o resultado. Na Figura 5-5 é possível visualizar que a execução completa da simulação para a leitura das 10 etiquetas exigiu dois *rounds*, conforme o previsto.

```

|
Início do Round 1
Slot: 1
Etiquetas que sortearam este Slot: | 0C1B110C2E | | 52BF7BE660 | | 6F62102B42 |
Slot: 2
Etiquetas que sortearam este Slot: | AA01F4A226 | | FA02E1312F |
Slot: 3
Etiquetas que sortearam este Slot: Nenhuma etiqueta sorteou este Slot
Slot: 4
Etiquetas que sortearam este Slot: | 5934F34AB4 |
Slot: 5
Etiquetas que sortearam este Slot: | E77671364B |
Slot: 6
Etiquetas que sortearam este Slot: Nenhuma etiqueta sorteou este Slot
Slot: 7
Etiquetas que sortearam este Slot: | AE233B64E5 | | FF70896A8A |
Slot: 8
Etiquetas que sortearam este Slot: | 5DE0769B00 |

Início do Round 2
Slot: 1
Etiquetas que sortearam este Slot: Nenhuma etiqueta sorteou este Slot
Slot: 2
Etiquetas que sortearam este Slot: Nenhuma etiqueta sorteou este Slot
Slot: 3
Etiquetas que sortearam este Slot: Nenhuma etiqueta sorteou este Slot
Slot: 4
Etiquetas que sortearam este Slot: | 52BF7BE660 |
Slot: 5
Etiquetas que sortearam este Slot: Nenhuma etiqueta sorteou este Slot
Slot: 6
Etiquetas que sortearam este Slot: | 6F62102B42 |
Slot: 7
Etiquetas que sortearam este Slot: | AA01F4A226 |
Slot: 8
Etiquetas que sortearam este Slot: Nenhuma etiqueta sorteou este Slot
Slot: 9
Etiquetas que sortearam este Slot: Nenhuma etiqueta sorteou este Slot
Slot: 10
Etiquetas que sortearam este Slot: Nenhuma etiqueta sorteou este Slot
Slot: 11
Etiquetas que sortearam este Slot: | 0C1B110C2E |
Slot: 12
Etiquetas que sortearam este Slot: Nenhuma etiqueta sorteou este Slot
Slot: 13
Etiquetas que sortearam este Slot: | FF70896A8A |
Slot: 14
Etiquetas que sortearam este Slot: | FA02E1312F |
Slot: 15
Etiquetas que sortearam este Slot: | AE233B64E5 |
Slot: 16
Etiquetas que sortearam este Slot: Todas as etiquetas enviaram

```

Figura 5-5: Saídas durante a simulação do ALOHA-DoubleRoundSize (ALOHA v.1).

Em cada *slot* de cada *round* uma mensagem é escrita para que se possa acompanhar o andamento da simulação. As etiquetas são identificadas pelos respectivos UID em hexadecimal. Nas linhas onde mais de um valor é mostrado, significa que estas n etiquetas sortearam o mesmo *slot* para se comunicar com o interrogador, gerando uma colisão, bem como é uma indicação de que um *round* adicional será obrigatório para estas etiquetas. No *Round 1*, apenas três etiquetas conseguiram se comunicar, e os *slots* com colisão seriam os de número 1 (três etiquetas sortearam este valor), 2 (duas etiquetas sortearam) e 7 (duas etiquetas sortearam). Já os *slots* 3 e 6 ficaram vazios, pois nenhuma etiqueta sorteou estes valores. No *Round 2*, todas as sete etiquetas que ainda precisavam se comunicar conseguiram sortear *slots* únicos, completando a leitura das 10 etiquetas, mas em contrapartida, 11 *slots* ficaram vazios, o que sempre é um tempo desperdiçado no sistema. Outra observação sobre o *Round 2* é que este possui o tamanho de 16 *slots*, obedecendo ao algoritmo que diz que, no caso de colisões em um *round*, tais como as que aconteceram no *Round 1*, o próximo deverá ser de tamanho igual ao dobro do atual.

```

Relatório de desempenho
Total de etiquetas: 10
Total de Rounds: 2
Total de Slots necessários para o envio: 24
Total de Slots com colisões: 3
Total de Slots vazios: 11

```

Figura 5-6: Resultados da simulação do ALOHA-DoubleRoundSize.

A Figura 5-6 mostra os resultados finais gerados pelo RFID-Env na simulação. Para a leitura das 10 etiquetas, foram necessários 24 *slots* totais, ou seja, 24 espaços de tempo, quando na realidade apenas 10 foram usados. Houve um desperdício de 14 *slots*, com 11 *slots* vazios e 3 com colisões. Parte deste mau resultado se deve a escolha de um *round size* inicial menor do que o número de etiquetas, embora esta situação sempre seja possível, pois é uma escolha a ser feita pelo usuário, e este nem sempre saberá o número exato de etiquetas presentes no ambiente (muito pelo contrário: muitas vezes, o objetivo de um sistema RFID é exatamente esta descoberta). Portanto, um algoritmo que gere um percentual menor de *slots* desperdiçados em relação ao número de etiquetas, apesar da má escolha do *round size* inicial, é uma melhoria importante para o desenvolvimento de um bom equipamento leitor RFID.

5.4.1.2 SEGUNDO MODELO PROPOSTO PARA O PADRÃO ISO 18000-6 A: ALOHA-STANDBY

A partir dos resultados e experimentos gerados no simulador RFID-Env pelo algoritmo ALOHA-DoubleRoundSize, um novo modelo foi desenvolvido. O objetivo deste novo modelo deveria ser o de diminuir a quantidade de *slots* desperdiçados em relação ao total de *slots* realmente utilizados para as transmissões, objetivo que foi alcançado, conforme demonstram as simulações.

Neste novo algoritmo, denominado ALOHA-Standby, toda vez que alguma resposta de alguma etiqueta é recebida pelo leitor, os seguintes testes são executados:

- Se o número de *slots* vazios for maior do que o número de *slots* transmitidos corretamente, o *round* é imediatamente interrompido e um novo *round* é iniciado com *round size* menor do que o atual;
- Se o número de *slots* com colisões for maior do que o número de *slots* vazios, o *round* é imediatamente interrompido e um novo *round* é iniciado com *round size* maior do que o atual.

Os dois testes acima descritos são a grande diferença desta nova proposta de algoritmo, que está plenamente de acordo com a norma ISO, onde existe a especificação sobre o momento que o *round size* pode ser reavaliado – durante o estado Round_standby (que é o estado no momento que o leitor recebe a resposta de alguma etiqueta) – apesar de não explicar como esta reavaliação deve ser implementada. De acordo com a análise comparativa entre *slots* vazios, *slots* corretamente utilizados e *slots*

com colisões, o algoritmo proposto neste trabalho determina que o *round* deve ser interrompido, para que possa ser reiniciado com um valor de *round size* mais adequado. Quando muitas colisões são identificadas, existe uma probabilidade que estejam faltando *slots* para sorteio. E quando muitos *slots* vazios são identificados, a probabilidade é que o *round size* esteja com tamanho maior do que o número de etiquetas para transmitir. A fim de possibilitar esta implementação e testes, foram adicionados contadores de *slots* vazios, *slots* corretamente transmitidos e *slots* com colisões no processo do equipamento leitor. A proposta geral deste novo algoritmo é a de que não adianta um *round* ir até o seu final quando muitos problemas estão acontecendo, valendo a pena interromper este *round* em execução e reiniciá-lo com um *round size* ajustado em relação ao tipo de problema que está sendo detectado pelo algoritmo.

A Figura 5-7 mostra a entrada do número de etiquetas a serem simuladas no RFID-Env com o algoritmo ALOHA-Standby e a determinação do tamanho inicial do *round size*. Assim como no teste realizado com o ALOHA-DoubleRoundSize, não serão utilizados os parâmetros que podem analisar as variáveis de ambiente.

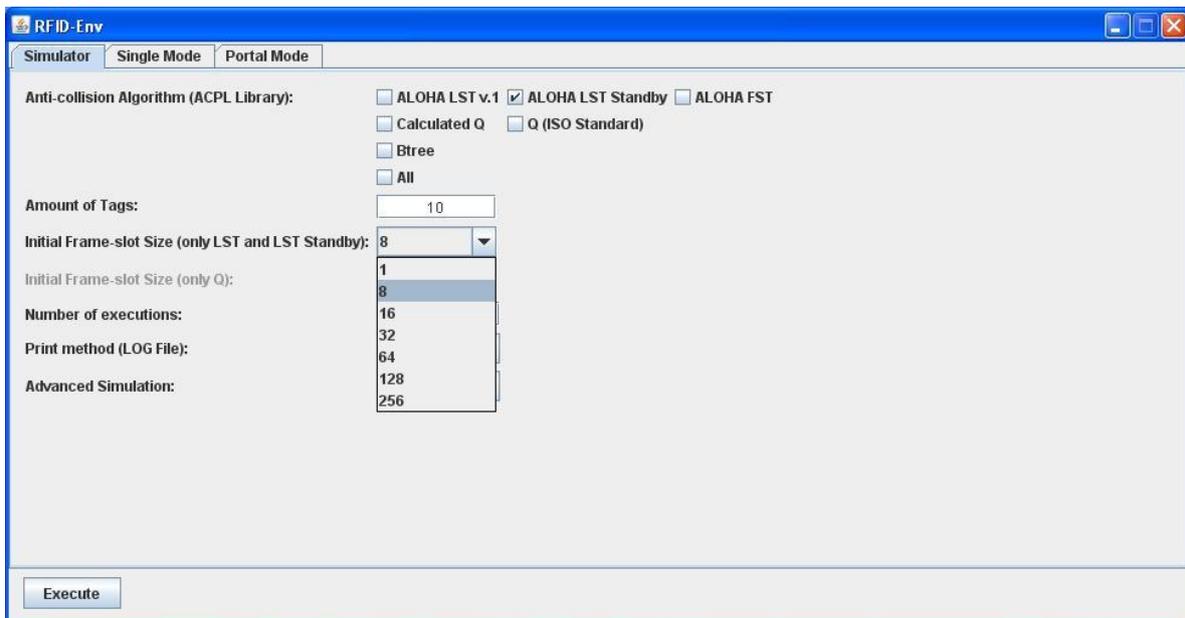


Figura 5-7: Entrada do número de etiquetas e *round size* na simulação do ALOHA-Standby.

Para fins de comparação com o algoritmo ALOHA-DoubleRoundSize, neste exemplo também serão utilizadas 10 etiquetas na simulação. Da mesma forma, o *round size* inicial será com um valor 8, não ideal para este número de etiquetas, e que foi o mesmo já utilizado no exemplo anterior.

A Figura 5-8 mostra as saídas geradas pelo RFID-Env para a simulação. Conforme demonstrado nesta simulação, um *round* a mais foi executado em relação ao mesmo teste com o ALOHA-DoubleRoundSize. Mas apesar deste *round* a mais, o número total de *slots* para que as 10 etiquetas transmitissem suas informações foi 21, o que representa um percentual 12,5% a menos de *slots* necessários para transmitir o mesmo número de etiquetas, em relação ao número de *slots* que foram utilizados no modelo anterior. Outros testes realizados demonstram que, quanto maior o número de etiquetas simuladas, maior

o ganho absoluto e também percentual.

```

Início do Round 1
Slot: 1
Etiquetas que sortearam este Slot: | A133A7E1AF |
Slot: 2
Etiquetas que sortearam este Slot: | 9087C82F29 | | A30607E7CB | | 87903FEC78 |
Slot: 3
Etiquetas que sortearam este Slot: Nenhuma etiqueta sorteou este Slot
Slot: 4
Etiquetas que sortearam este Slot: | 845D00D20F | | 7247C70768 |
Slot: 5
Etiquetas que sortearam este Slot: Nenhuma etiqueta sorteou este Slot
Slot: 6
Etiquetas que sortearam este Slot: | 83CD485FB2 |
Slot: 7
Etiquetas que sortearam este Slot: | 7F89E7C9EC |
Slot: 8
Etiquetas que sortearam este Slot: | 872AB0309B | | 3ED6A3FDEC |

Início do Round 2
Slot: 1
Etiquetas que sortearam este Slot: Nenhuma etiqueta sorteou este Slot
Slot: 2
Etiquetas que sortearam este Slot: Nenhuma etiqueta sorteou este Slot
Slot: 3
Etiquetas que sortearam este Slot: Nenhuma etiqueta sorteou este Slot
Slot: 4
Etiquetas que sortearam este Slot: Nenhuma etiqueta sorteou este Slot
Slot: 5
Etiquetas que sortearam este Slot: | 845D00D20F |

Início do Round 3
Slot: 1
Etiquetas que sortearam este Slot: | 3ED6A3FDEC |
Slot: 2
Etiquetas que sortearam este Slot: | 9087C82F29 |
Slot: 3
Etiquetas que sortearam este Slot: Nenhuma etiqueta sorteou este Slot
Slot: 4
Etiquetas que sortearam este Slot: | A30607E7CB |
Slot: 5
Etiquetas que sortearam este Slot: Nenhuma etiqueta sorteou este Slot
Slot: 6
Etiquetas que sortearam este Slot: | 872AB0309B |
Slot: 7
Etiquetas que sortearam este Slot: | 87903FEC78 |
Slot: 8
Etiquetas que sortearam este Slot: | 7247C70768 |

```

Figura 5-8: Relatório de simulação do ALOHA-Standby.

Analisando as saídas do RFID-Env (Figura 5-8), é possível verificar a funcionalidade do modelo proposto quando o *Round 2* foi interrompido antes de concluir todos os 16 *slots* originalmente planejados para este *round*. O *Round 1* foi concluído normalmente, ou seja, os 8 *slots* especificados como *round size* inicial pelo usuário, foram executados. Já o *Round 2* foi interrompido quando o *slot 5* foi executado. Como explicado, no momento que o protocolo entra no estado *Round_standby*, e este estado é executado quando alguma etiqueta é lida pelo leitor (o que aconteceu no *slot 5* do *Round 2*), uma das verificações do modelo de algoritmo ALOHA-Standby é a quantidade de *slots* vazios em relação à quantidade de *slots* com transmissões. No *Round 2*, havia 4 *slots* vazios quando um *slot* finalmente transmitiu. O algoritmo comparou os contadores de *slots* vazios e *slots* corretamente transmitidos e decidiu pela interrupção do *round* no *slot 5*. Este *round* teria um total de 16 *slots* caso fosse executado normalmente, mas com a detecção de uma quantidade de *slots* vazios maior do que *slots* utilizados, o algoritmo determinou que um novo *round* fosse iniciado com um *round size* uma escala menor do que a atual (8 ao invés de 16). O *Round 3* é então iniciado e segue normalmente até o final, com 8 *slots*, e consegue concluir a transmissão de todas as etiquetas que ainda restavam. Esta decisão fez com que apenas estes 8 *slots* fossem executados, ao invés de 11 que ainda restavam para concluir o *Round 2*.

A Figura 5-9 mostra os resultados finais da simulação no RFID-Env da leitura de 10 etiquetas, com *round size* igual a 8, utilizando o algoritmo ALOHA-Standby.

```
Relatório de desempenho
Total de etiquetas: 10
Total de Rounds: 3
Total de Slots necessários para o envio: 21
Total de Slots com colisões: 3
Total de Slots vazios: 8
```

Figura 5-9: Resultados da simulação do ALOHA-Standby.

O exemplo demonstra uma das possibilidades de ganho do algoritmo ALOHA-Standby em relação a outras propostas de modelos possíveis, mais objetivamente, em relação à primeira proposta, o ALOHA-DoubleRoundSize.

5.5 PROTOCOLO BTREE: SIMULAÇÃO DO ALGORITMO E RESULTADOS

O protocolo Btree utiliza um algoritmo com características bem diferentes dos algoritmos utilizados pelos demais três protocolos padronizados pela ISO. Enquanto os protocolos anti-colisão dos padrões ISO 18000-6 A LST, FST e o 18000-6 C (EPC Gen 2) são baseados no ALOHA, com sorteios realizados pelas etiquetas para determinação do *slot* a ser utilizado, o ISO 18000-6 B utiliza um algoritmo baseado em árvore, onde através de sorteios sucessivos pelas etiquetas, sempre dentro de um único grande *round*, estas podem se manter próximas ou se distanciar do único *slot* que tem permissão de transmissão, que é a etiqueta que possui o valor zero no seu contador de *slot* [ISO06].

A seguir, o algoritmo utilizado pelo Btree é detalhado. Na sequência é demonstrado um exemplo de uso do simulador RFID-Env com o algoritmo Btree.

5.5.1 ALGORITMO BTREE

Dos quatro protocolos anti-colisão padronizados pela série ISO 18000-6, o Btree é o único não baseado nos algoritmos ALOHA. Apesar disso, possui algumas similaridades com estes protocolos, tais como o sorteio que deve ser realizado pelas etiquetas a fim de determinar qual poderá transmitir em cada instante e o conceito de *slot* de transmissão.

O Btree possui sempre um único *slot* de transmissão disponível para todas as etiquetas, o *slot* zero, e as etiquetas sorteiam valores que farão com que se aproximem ou se afastem do valor zero. Quando uma etiqueta chegar à zero no seu contador de *slot*, poderá transmitir. As colisões ocorrem quando mais de uma etiqueta atinge o valor zero no contador de *slot* em uma mesma etapa da execução do algoritmo. A ocorrência de *slot* vazio se dá quando nenhuma etiqueta estiver com zero no contador. A quantidade de leituras realizadas pelo leitor (ou seja, a quantidade de iterações com o *slot* zero) dá a quantidade total de *slots* utilizados pelo Btree para a leitura de todas as etiquetas presentes no ambiente [ISO06].

Como exemplo, a Figura 5-10 mostra uma típica situação inicial do processo de identificação com Btree. A coluna Tag mostra o ID de cinco etiquetas. No início do processo todas possuem o valor zero no contador (coluna COUNT). Por este motivo, sempre que houver mais de uma etiqueta no ambiente de leitura de um leitor utilizando Btree, na primeira interação do algoritmo todas as etiquetas irão enviar seus dados simultaneamente e colidir os sinais.

Tag (ID)	COUNT	Rand
0101	0	
0011	0	
1111	0	
0001	0	
1000	0	

Figura 5-10: Estágio inicial do algoritmo Btree.

Após uma colisão, as etiquetas realizam um sorteio somente entre os valores zero e 1. As etiquetas que sortearam 1 devem incrementar em 1 o COUNT. A Figura 5-11 dá continuidade ao exemplo. A coluna Rand mostra os resultados dos sorteios entre zero e 1 que todas as etiquetas realizaram. Aquelas que sortearam zero mantiveram o valor inicial do COUNT, e as que sortearam 1 incrementaram este contador, conforme demonstra a segunda coluna, grifada, do COUNT.

Tag (ID)	COUNT	Rand
0101	0	0
0011	0	0
1111	0	0
0001	0	1
1000	0	1

Figura 5-11: Novos valores do contador COUNT do Btree.

Realizado o sorteio, todas as etiquetas que continuam com zero no COUNT transmitem novamente seus dados. Pelo exemplo, três etiquetas {0101, 0011 e 1111} sortearam zero no Rand e não alteraram o valor do COUNT. Estas novamente enviarão agora os seus dados para o leitor, e irão novamente colidir os sinais. O processo descrito na Figura 5-10 e Figura 5-11 é repetido até que somente uma etiqueta tenha o valor zero no COUNT e possa transmitir sem colisões. A cada colisão e novo sorteio, o valor COUNT é incrementado em mais 1 nas etiquetas com COUNT diferente de zero, se distanciando cada vez mais do momento que poderão transmitir.

Finalmente, quando uma única etiqueta transmite e seus dados podem ser lidos pelo leitor, todas demais etiquetas podem decrementar o COUNT, e aquela que ficar com zero neste momento poderá transmitir.

5.5.2 SIMULAÇÃO DO BTREE NO RFID-ENV

Conforme citado, o algoritmo do protocolo Btree possui uma diferença determinante em relação aos algoritmos baseados no ALOHA: ele não possui o conceito de *round size*. Enquanto nos outros três protocolos anti-colisão um *round size* inicial precisa ser determinado, o Btree utiliza uma abordagem que dispensa este conceito. Uma vantagem deste algoritmo é que enquanto os algoritmos utilizados pelo ISO 18000-6 A LST e FST possuem performances extremamente baixas para a leitura de mais de 256 etiquetas, pois o *round size* máximo destes protocolos é 256, o Btree não possui esta limitação. Por outro lado, o Btree utiliza uma abordagem na qual os primeiros *slots* irão sempre gerar muitas colisões, conforme descrito na seção anterior e também na simulação do Btree no RFID-Env, a seguir.

A Figura 5-12 mostra a tela do RFID-Env onde o usuário informa o protocolo a ser utilizado e o número de etiquetas da simulação. Para manter similaridade com os exemplos anteriores, foi utilizado o número de 10 etiquetas para esta simulação, bem como não foram utilizados os parâmetros de variáveis do ambiente da ferramenta. É possível verificar que ao selecionar o protocolo Btree o campo de seleção do tamanho do *round size* permanece desabilitado, pois não é necessária esta informação para o Btree.

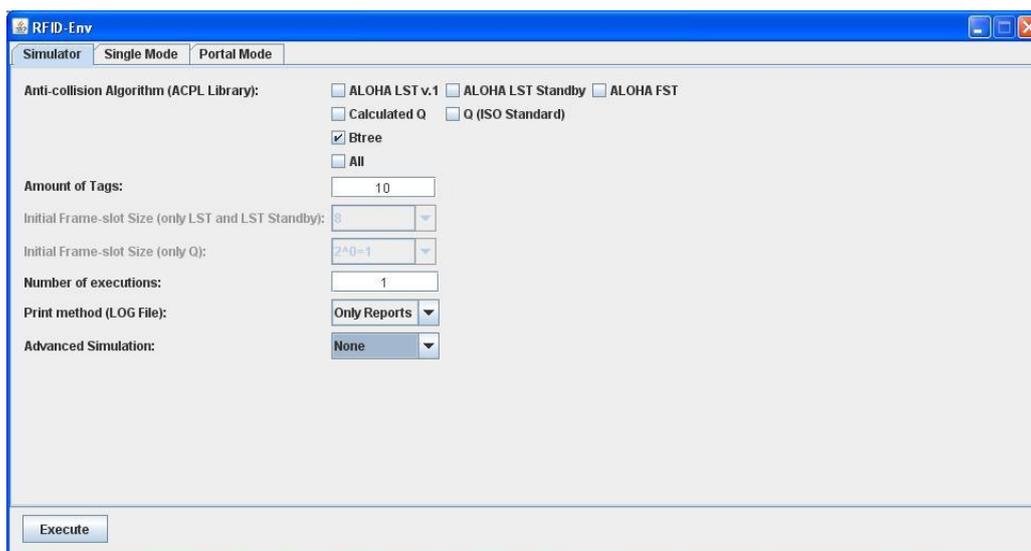


Figura 5-12: Entrada do número de etiquetas na simulação do Btree.

Dado o número de etiquetas da simulação, o RFID-Env executa os algoritmos e gera as saídas (Figura 5-13) e o resultado final da simulação (Figura 5-14).

```

Iteração 1 - Etiquetas que enviaram: | E020FFD165FD331CD9 | | E0CEA22BF3381E770A | | E06D4D55D2F7E92D23 | |
E0422ED99D243C95E0 | | E063071BABC4DFF054 | | E0FDBE86E334C1C68F | | E05F503B2518E55FCE | |
E09FCD6EAB90C99A27 | | E00CF1E74FB566157A | | E0B796D4C43829D86D | |

Iteração 2 - Etiquetas que enviaram: | E0CEA22BF3381E770A | | E06D4D55D2F7E92D23 | | E063071BABC4DFF054 | |
E05F503B2518E55FCE | | E09FCD6EAB90C99A27 | | E00CF1E74FB566157A | | E0B796D4C43829D86D | |

Iteração 3 - Etiquetas que enviaram: | E05F503B2518E55FCE | |

Iteração 4 - Etiquetas que enviaram: | E0CEA22BF3381E770A | | E06D4D55D2F7E92D23 | | E063071BABC4DFF054 | |
E09FCD6EAB90C99A27 | | E00CF1E74FB566157A | | E0B796D4C43829D86D | |

Iteração 5 - Etiquetas que enviaram: | E063071BABC4DFF054 | | E09FCD6EAB90C99A27 | | E00CF1E74FB566157A | |
E0B796D4C43829D86D | |

Iteração 6 - Etiquetas que enviaram: | E063071BABC4DFF054 | | E09FCD6EAB90C99A27 | | E0B796D4C43829D86D | |

Iteração 7 - Etiquetas que enviaram: | E0B796D4C43829D86D | |

Iteração 8 - Etiquetas que enviaram: | E063071BABC4DFF054 | | E09FCD6EAB90C99A27 | |

Iteração 9 - Etiquetas que enviaram: Nenhuma etiqueta enviou

Iteração 10 - Etiquetas que enviaram: | E063071BABC4DFF054 | | E09FCD6EAB90C99A27 | |

Iteração 11 - Etiquetas que enviaram: | E063071BABC4DFF054 | | E09FCD6EAB90C99A27 | |

Iteração 12 - Etiquetas que enviaram: | E09FCD6EAB90C99A27 | |

Iteração 13 - Etiquetas que enviaram: | E063071BABC4DFF054 | |

Iteração 14 - Etiquetas que enviaram: Nenhuma etiqueta enviou

Iteração 15 - Etiquetas que enviaram: | E00CF1E74FB566157A | |

Iteração 16 - Etiquetas que enviaram: | E0CEA22BF3381E770A | | E06D4D55D2F7E92D23 | |

Iteração 17 - Etiquetas que enviaram: | E0CEA22BF3381E770A | |

Iteração 18 - Etiquetas que enviaram: | E06D4D55D2F7E92D23 | |

Iteração 19 - Etiquetas que enviaram: | E020FFD165FD331CD9 | | E0422ED99D243C95E0 | | E0FDBE86E334C1C68F | |
E0422ED99D243C95E0 | | E0FDBE86E334C1C68F | |

Iteração 20 - Etiquetas que enviaram: | E0422ED99D243C95E0 | | E0FDBE86E334C1C68F | |

Iteração 21 - Etiquetas que enviaram: | E0422ED99D243C95E0 | |

Iteração 22 - Etiquetas que enviaram: | E0FDBE86E334C1C68F | |

Iteração 23 - Etiquetas que enviaram: | E020FFD165FD331CD9 | |

```

Figura 5-13: Saídas durante a simulação do Btree, com um único grande *round*.

Analisando as saídas geradas pelo RFID-Env na Figura 5-13, pode-se entender melhor a forma de funcionamento do algoritmo utilizado pelo protocolo Btree. Na primeira iteração do algoritmo, as 10 etiquetas do ambiente tentam transmitir suas informações, gerando uma grande colisão de sinais direcionados para o interrogador, devido as 10 etiquetas tentarem transmitir na primeira iteração do protocolo. A partir deste momento, as etiquetas iniciam as demais etapas do algoritmo.

O primeiro passo realizado por todas as etiquetas após uma primeira tentativa normalmente frustrada de transmissão, é sortear um valor zero ou 1. As etiquetas que geraram 1 neste sorteio incrementam seu contador de *slot* e só irão tentar transmitir novamente quando atingirem zero neste contador. Já as etiquetas que gerarem zero neste sorteio não precisam incrementar o contador de *slot* e seguem tendo a oportunidade de transmitir na iteração seguinte. Se mais de uma etiqueta sorteou zero, que é o que aconteceu na segunda iteração mostrada na Figura 5-13, onde pode ser visto que 7 etiquetas tentaram transmitir neste passo, novamente estas sorteiam um valor zero ou 1, enquanto as que já estavam com o contador de *slot* em 1 (as outras três etiquetas do ambiente) incrementam mais uma vez este valor. Estes passos vão sendo repetidos até que somente uma etiqueta tenha sorteado zero e as demais todas tenham sorteado 1, ou ainda, que todas tenham sorteado 1, o que iria gerar um *slot* vazio, e após comandos

do interrogador, iriam agora iniciar a decrementar o contador de *slot* até que somente uma atingisse zero neste contador. O decremento do contador das etiquetas acontece quando o interrogador envia algum comando que indica “próximo *slot*” para todas as etiquetas, o que faz com estas decrementem o seu contador, até que alguma novamente atinja zero e tenha a oportunidade de novamente enviar seus dados.

Seguindo a observação das saídas geradas pelo RFID-Env para a execução do protocolo Btree na Figura 5-13, percebe-se que na iteração número 3 uma única etiqueta possuía zero em seu contador de *slot* e conseguiu transmitir. Já na iteração 4, o número de etiquetas que tentaram transmitir foi seis, novamente gerando colisões. Esta característica de muitas colisões nas primeiras iterações do Btree é própria deste protocolo. Na medida em que as iterações vão acontecendo, as etiquetas vão tendo o seu contador de *slots* incrementado e aos poucos o fluxo de transmissões passa a funcionar corretamente.

A Figura 5-14 mostra os resultados finais da simulação no RFID-Env da leitura de 10 etiquetas utilizando o algoritmo Btree.

```
Relatório de desempenho
Total de etiquetas: 10
Total de Iterações: 23
Total de Iterações com colisões: 11
Total de Iterações vazias: 2
```

Figura 5-14: Resultados da simulação do Btree.

O teste apresentado com o Btree o coloca em uma posição intermediária de desempenho entre o modelo proposto ALOHA-Standby, que conseguiu transmitir 10 etiquetas em 21 *slots*, e o modelo ALOHA-DoubleRoundSize, que precisou de 24 *slots* para transmitir as mesmas 10 etiquetas.

5.6 PROTOCOLO ALOHA RANDOM SLOTTED (Q): SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Esta seção irá mostrar que certos aspectos do algoritmo do padrão mais atual, o Random Slotted (Q), utilizado pelo padrão ISO 18000-6 C, possui variáveis cujos valores não são definidos pela padronização, o que dificulta sua implementação. A proposta de melhoria para o padrão Q apresentada neste trabalho, chamada Calculated Q, além de ter a implementação facilitada em relação ao Q original, por ter todas as etapas exatamente definidas, melhorou em média até 11% os resultados obtidos com o Q original através de simulações. Estes valores foram comparados também com os obtidos por um trabalho semelhante, utilizado como referência. Esta comparação entre os resultados obtidos neste trabalho e a referência pretende validar a abordagem da avaliação de desempenho através do número total de *slots* utilizados, bem como mostrar que os resultados aqui obtidos são realmente promissores em relação aos obtidos com o algoritmo Q original.

5.6.1 PADRÃO ISO 18000-6 C: RANDOM SLOTTED COLLISION ARBITRATION (ALGORITMO Q)

Assim como todos os algoritmos ALOHA, o Random Slotted é estruturado no método de geração de um número randômico para um contador de *slot* da etiqueta. Mas assim como no Btree, somente a etiqueta com valor zero no contador de *slot* pode comunicar, e de acordo com instruções do equipamento leitor, o valor do contador de *slot* é decrementado nas etiquetas. Quando este contador chega à zero em alguma etiqueta, esta inicia a comunicação.

O leitor, quando inicia o processo de identificação Random Slotted, envia para as etiquetas um parâmetro denominado Q (e por este motivo este protocolo é seguidamente referenciado na literatura como protocolo ou algoritmo Q, e não pelo nome Random Slotted). As etiquetas participantes do processo de identificação sorteiam um valor na faixa entre zero e $2^Q - 1$ e armazenam este valor no respectivo contador de *slot*. A etiqueta que sortear o valor zero neste momento pode responder imediatamente. Etiquetas que sortearam valores maiores que zero aguardam instruções do interrogador para decrementar o valor do seu contador, e cada etiqueta que chegar a zero poderá responder.

O Random Slotted possui previsão para ajuste constante no tamanho do frame. Conforme análise sobre a ocorrência de *slots* vazios ou com colisão, o frame vai sendo ajustado dinamicamente, a fim de tentar ajustar o seu tamanho para um valor o mais próximo possível da quantidade de etiquetas. O interrogador do padrão ISO 18000-6 C possui o comando QueryAdjust, que envia um novo valor do parâmetro Q para as etiquetas participantes de um processo de identificação. Quando as etiquetas recebem este comando sorteiam novamente o valor para o contador de *slot* entre zero e $2^Q - 1$, baseado agora no novo valor de Q. O equipamento leitor realiza este ajuste quando detecta muitas colisões ou muitos *slots* vazios.

Apesar de o protocolo Random Slotted prever uma forma aprimorada para ajuste do tamanho do frame através da atualização constante do valor do parâmetro Q, determinar o tamanho deste ajuste é o desafio. Os padrões ISO 18000-6 C e o equivalente EPC Gen2 apresentam um algoritmo para determinar o valor do Q (Figura 5-15). Q_{fp} é uma representação em ponto flutuante do Q. Query é o comando emitido pelo interrogador para ler as etiquetas do ambiente. O parâmetro Q_{fp} é arredondado para um inteiro e é adotado como o novo valor Q. Na Figura 5-15, C é uma constante que irá aumentar ou diminuir o valor do Q_{fp} . Quando a parte fracional do Q_{fp} é igual ou maior a 0,5, o Q irá aumentar em 1. O valor de Q será diminuído quando a parte fracional do Q_{fp} for menor do que 0,5. De acordo com [EPC05] e [ISO06], típicos valores para C são $0,1 < C < 0,5$, e um equipamento leitor normalmente utiliza valores menores para C quando o valor de Q é alto, e valores maiores para C quando o Q é baixo.

Para desenvolvedores, a palavra “normalmente” para determinar o valor de C deve ser avaliada com critério e testes específicos precisam ser realizados a fim de saber se esta definição se encaixa para suas necessidades. Em [Flo06], baseado em resultados empíricos, foi determinada a equação $C = 0.8/Q$. Mas esta escolha ainda não é exata,

pois foi baseada em testes que levaram em conta determinadas situações que não são sempre verdadeiras em todos os tipos de ambientes. Outro problema é como determinar o valor inicial de Q_{fp} . No algoritmo fornecido na Figura 5-15 foi utilizado o valor 4, o que resulta em um frame com 15 *slots*. Este número inicial de *slots* pode ser bom ou ruim, pois depende totalmente do número de etiquetas no ambiente.

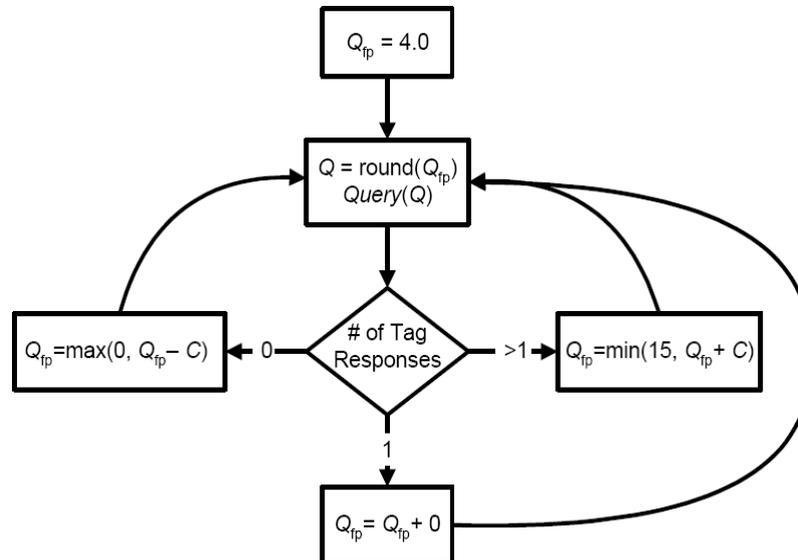


Figura 5-15: Exemplo de algoritmo para determinação do tamanho do frame (valor do parâmetro Q) [EPC05] [ISO06].

Devido aos problemas apresentados pelo algoritmo Random Slotted, uma série de testes e implementações foram realizados no RFID-Env a fim de melhor definir um algoritmo de atualização do tamanho do frame do protocolo. A proposta resultante deste trabalho gerou o algoritmo denominado Calculated Q, apresentado na seção a seguir. As maiores contribuições desta proposta estão listadas a seguir:

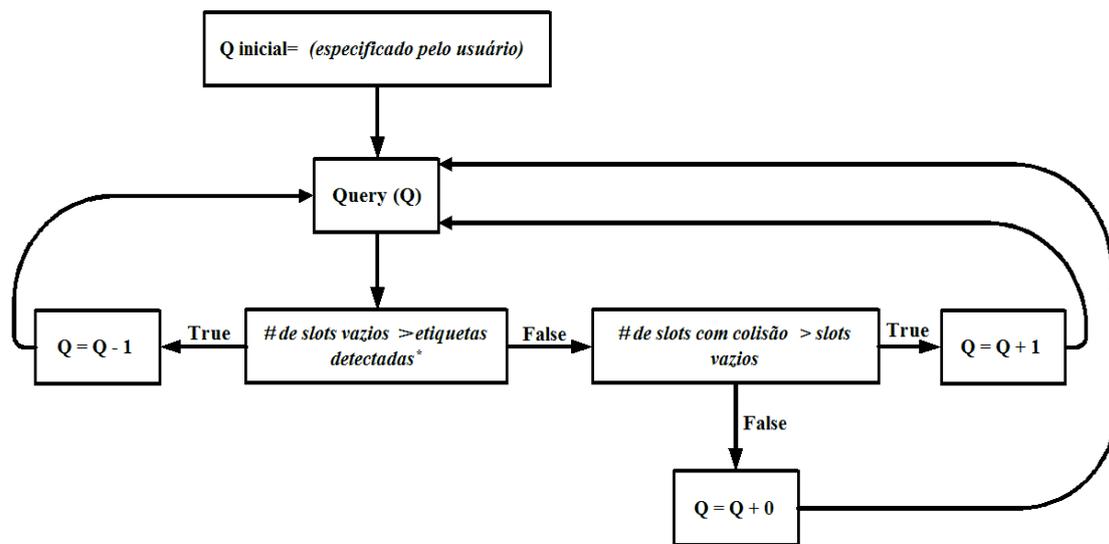
1. Definição completa do algoritmo, permitindo um trabalho mais rápido para o desenvolvedor de equipamentos RFID. Atualmente, o desenvolvedor se depara com variáveis que não são definidas. Esta proposta aumenta a velocidade de desenvolvimento, portanto.
2. Os testes de validação mostram que a proposta melhora em até 11% o desempenho do processo anti-colisão, quando comparada com uma implementação típica do algoritmo atualmente padronizado.
3. Ainda, os testes demonstraram ser melhores do que aqueles obtidos por uma referência usada como parâmetro de comparação.

5.6.2 TERCEIRO MODELO PROPOSTO: CALCULATED Q - UM ALGORITMO ANTI-COLISÃO APRIMORADO PARA O PADRÃO ISO 18000-6 C

Conforme já apresentado, o algoritmo Q possui uma indefinição sobre a especificação do valor da constante de ajuste do parâmetro Q. Esta definição fica a cargo do implementador, e uma escolha ruim para a constante prejudica seriamente o desempenho do sistema desenvolvido.

Baseado em testes realizados no ambiente de simulação RFID-Env, uma proposta de implementação do algoritmo Q foi desenvolvida, o Calculated Q. Esta implementação, além de melhorar em até 11% o desempenho médio do Q original, não necessita de variáveis para ajuste do tamanho do frame, tornando rápido e preciso o desenvolvimento do algoritmo.

Conforme demonstram as simulações realizadas, o novo algoritmo diminui a quantidade de *slots* vazios e com colisões. Para isto, a estratégia utilizada foi a demonstrada na Figura 5-16 e no pseudocódigo a seguir.



* [etiquetas detectadas]: a cada slot com colisão => *etiquetas detectadas*=*etiquetas detectadas* + 2;
a cada slot com leitura correta => *etiquetas detectadas*=*etiquetas detectadas* + 1;

Figura 5-16: Algoritmo Calculated Q para determinação do parâmetro Q.

Pseudocódigo do Calculated Q:

1. Usuário especifica no equipamento leitor o valor inicial do Q
 2. Comando de leitura (*Query*) é enviado pelo leitor para todas as etiquetas
 3. Um teste compara se o número de *slots* vazios é maior do que o número de *etiquetas detectadas**
 - 3.1. **if TRUE**
 - 3.1.1. O frame atual é cancelado e reiniciado com tamanho menor (o valor do Q é decrementado em 1 e uma nova seleção randômica de *slots* é realizada pelas etiquetas). Ir para passo 2.
 - 3.2. **if FALSE**
 - 3.2.1. Um teste é feito para comparar se o número de *slots* com colisões é maior que o número de *slots* vazios
 - 3.2.1.1. **if TRUE**
 - 3.2.1.1.1. O frame atual é imediatamente cancelado e reiniciado com um tamanho maior do que o atual. O valor do Q é incrementado em 1. Ir para o passo 2.
 - 3.2.1.2. **if FALSE**
 - 3.2.1.2.1. Nada é feito. O frame continua com o mesmo tamanho. Ir para o passo 2.
- * *Cálculo do número de etiquetas detectadas*: para cada colisão, sabe-se que no mínimo duas etiquetas existem no ambiente. Para cada *slot* com leitura correta, sabe-se que uma etiqueta existe no ambiente.

Conforme demonstrado, a principal estratégia do novo algoritmo proposto é a realização de verificações sobre a quantidade de *slots* vazios e com colisões a cada leitura do equipamento leitor (comando *Query*), gerando ajustes constantes do tamanho do frame para que fique o mais próximo possível da quantidade de etiquetas presentes no ambiente. De acordo com a análise comparativa entre *slots* vazios, *slots* corretamente utilizados e *slots* com colisões, o algoritmo proposto determina quando o *round* deve ser reiniciado com um valor de *round size* mais adequado. Quando muitas colisões são identificadas, existe uma probabilidade que estejam faltando *slots* para sorteio. E quando muitos *slots* vazios são identificados, a probabilidade é que o *round size* esteja com tamanho maior do que o número de etiquetas para transmitir. A fim de possibilitar esta implementação foram adicionados no algoritmo do leitor do simulador RFID-Env, contadores de *slots* vazios, etiquetas encontradas e *slots* com colisões. Esta seria a única modificação necessária para a implementação em um ambiente real de RFID. Outra vantagem da proposta é que nas etiquetas eletrônicas nenhuma alteração de hardware seria necessária, o que seria um complicador para a real utilização da proposta.

5.6.3 SIMULAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS ALGORITMOS ATRAVÉS DA QUANTIDADE DE SLOTS UTILIZADOS E RESULTADOS OBTIDOS

Conforme já discutido sobre o funcionamento dos algoritmos anti-colisão, é possível avaliá-los de acordo com a quantidade total de *slots* necessários para a leitura de todas

as etiquetas. Como cada *slot* consome uma unidade de tempo, quanto menor o número de *slots* utilizados, mais rápido será o protocolo. Considerando que a rapidez no processo de identificação de um grupo de etiquetas é uma característica necessária para sistemas RFID, é adequada a abordagem utilizada neste trabalho para comparação do desempenho dos protocolos, baseada na análise sobre a quantidade de *slots* utilizados para a leitura de um determinado número de etiquetas. Esta mesma abordagem foi utilizada no trabalho correlato [Che07], cujos resultados serão utilizados como parâmetros de comparação dos resultados aqui obtidos.

A Tabela 5-1 apresenta os resultados obtidos neste trabalho para quantidades diversas de etiquetas através das simulações no RFID-Env e também os resultados do trabalho relacionado [Che07]. Nos dois trabalhos a análise foi baseada na quantidade total de *slots* necessários para a leitura de um grupo de etiquetas. Portanto, quanto menor o número de *slots*, melhor o desempenho do algoritmo. Em [Che07] é apresentada a proposta Advanced DFSA, que através da divisão das etiquetas em sub-grupos, diminui a quantidade de *slots* utilizados em relação aos valores obtidos pelo mesmo trabalho na implementação padrão do algoritmo Q (apresentados como Standard Q *Ref* na Tabela 5-1). A outra parte da tabela mostra os resultados obtidos pelo RFID-Env para o Q original e para a proposta Calculated Q. A última coluna mostra o percentual da melhora obtida pelo Calculated Q em relação ao Standard Q. Os resultados do RFID-Env são médias de 20 execuções para cada caso, e o desvio padrão ficou abaixo de 5% para todas as rodadas de execução do algoritmo.

Tabela 5-1: Resultados comparativos entre protocolo padrão e as propostas.

Etiquetas	Médias das simulações (<i>etiquetas X total slots</i>)				
	Artigo de referência		Este trabalho		
	Standard Q (<i>Ref</i>)	Advanced Q (<i>Ref</i>)	Standard Q	Calculated Q	Melhora do Calculated Q em relação ao Standard Q
20	69,2		65,1	60,1	7,68%
50	166,8	165,5	158,3	147,9	6,57%
100	375,7	306,3	311,5	290,6	6,71%
200		652,0	647,3	571,6	11,69%
300	1170,3	1030,6	965,5	891,2	7,70%
500	1855,5	1744,0	1579,8	1407,4	10,91%
1000		3481,3	3245,9	2902,8	10,57%
2000		6940,6	6399,1	5722,1	10,58%

OBS 1: Valores da referência são médias dos resultados mostrados naquele trabalho.

OBS 2: As células em branco na tabela são para resultados não apresentados pela referência citada.

5.6.4 UM MODELO BASEADO EM EQUAÇÃO LINEAR PARA SIMULAÇÃO DO CALCULATED Q

Utilizando os resultados obtidos nas execuções do algoritmo Calculated Q, foi criado, através de regressão linear, um modelo para simulação deste algoritmo. Este modelo torna menor o tempo de execução de simulações para casos onde seja conhecido o número de etiquetas no ambiente ou cuja necessidade seja inferir o tempo total necessário para a leitura em casos onde o número de etiquetas seja n . Para estas situações, através do modelo aqui apresentado, o consumo de recursos computacionais é menor, tendo em vista que o algoritmo anti-colisão não precisará ser executado a cada simulação, mas, sim, apenas a resolução matemática do modelo criado.

A análise de regressão é uma técnica para estimar uma relação que possa existir na população e compreende a análise de dados amostrais para saber se e como duas ou mais variáveis estão relacionadas uma com a outra numa população. Trata-se de um dos modelos básicos de inferência estatística, e está entre os mais utilizados métodos de análise de dados, sendo utilizada principalmente com o propósito de previsão, como é o caso deste trabalho.

Através da regressão linear é possível determinar a equação de regressão, que será o modelo de simulação. Através desta equação é possível estimar uma variável dependente y (resposta), em função das variáveis independentes x_1, x_2, x_n , e é denominada equação de regressão de y para x_1, x_2, x_n . Portanto, y é uma função de x_1, x_2, x_n [Spi09].

A equação de uma reta de regressão para uma variável independente x e uma variável dependente y é:

$$\hat{y} = mx + b \quad (5.1)$$

onde \hat{y} é o valor y previsto para um dado valor x . O coeficiente m (inclinação) e o coeficiente b (interseção) são dados por

$$m = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad \text{e} \quad b = \bar{y} - m\bar{x} = \frac{\sum y}{n} - m \frac{\sum x}{n} \quad (5.2)$$

onde \bar{y} é a média dos valores y no conjunto de dados e \bar{x} é a média dos valores x . A linha de regressão sempre passa pelo ponto (\bar{x}, \bar{y}) [Lar10].

Existem três tipos de variação sobre uma linha de regressão:

- Variação total: é a soma dos quadrados das diferenças entre o valor y e cada par pedido e a média de y .

$$\text{Variação total} = \sum (y_i - \bar{y})^2$$

- Variação explicada: é a soma dos quadrados das diferenças entre cada valor y previsto e a média de y .

$$\text{Variação explicada} = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2$$

- Variação não explicada: é a soma dos quadrados das diferenças entre o valor y de cada par pedido e cada valor y previsto correspondente.

$$\text{Variação não explicada} = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$$

A soma das variações explicadas e não explicadas é igual a variação total. A “variação explicada” é dada pela relação entre x e y . Já a “variação não explicada” não pode ser determinada pela relação entre x e y , sendo razão do acaso ou outras variáveis [Lar10].

O coeficiente de determinação (R^2) é uma medida de regressão igual à relação da “variação explicada” com a “variação total”,

$$R^2 = \frac{\text{Variação explicada}}{\text{Variação total}} \quad (5.3)$$

representando o percentual de variação dos dados do modelo. Por exemplo, se

$$R^2 = 0,85$$

temos que 85% da variação de y podem ser explicados, enquanto os 15% restantes da variação não é explicada, em razão de outros fatores ou erros da amostra. Em outras palavras, R^2 é o poder explicativo do modelo, que informa o quanto a variação de y pode ser explicada pela variação de x . Se R^2 for próximo a 1 podemos encontrar a curva de regressão que seria a equação da reta, válida não só para o conjunto de dados da amostra, mas para qualquer situação que replique as demais condições.

O erro padrão da estimativa (S_e) é o desvio padrão dos valores y_i , observados sobre o valor y_i previsto para um dado valor x_i . O S_e pode ser descrito como

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 2}} \quad (5.4)$$

onde n é o número de pares pedidos no conjunto de dados. O resultado do erro padrão da estimativa é informado utilizando a mesma escala dos dados originais.

5.6.4.1 DEFINIÇÃO DO MODELO

A equação de regressão foi obtida com o auxílio do software IBM SPSS Statistics [SPS11], amplamente utilizado em trabalhos na área de estatística. Este software permite,

entre outras funcionalidades, a entrada e análise dos dados, geração da equação linear e de gráficos.

O modelo de regressão linear foi obtido através das variáveis disponíveis nos resultados das execuções do algoritmo Calculated Q, apresentados na Tabela 5-1, que informa o número de *slots* necessários para a leitura de um determinado número de etiquetas. A variável independente para a criação do modelo é o número de etiquetas (horizontal de um gráfico) e a variável dependente é o número de *slots* (vertical do gráfico), ou seja, o modelo será capaz de responder o número de *slots* necessários para a completa leitura do número de etiquetas que será informado na equação.

Baseado na Equação (5.1) de regressão linear foi desenvolvido o modelo para a inferência do número de slots necessários para a leitura completa de um dado número de etiquetas:

$$S = bn + a \quad (5.5)$$

onde S é o número inferido de slots para um determinado número n de etiquetas. b é o coeficiente de inclinação e a o coeficiente de ajuste (interseção) da regressão linear.

Conforme citado, os dados para a execução da regressão linear foram os apresentados na Tabela 5-1, mais especificamente, os dados das colunas Etiquetas (variável independente do modelo) e Calculated Q (variável dependente, que é o número de slots necessários para a leitura de uma quantidade n de etiquetas). De posse desses dados, foi utilizado o software SPSS para a execução da regressão linear, onde então foram obtidos os valores para o R^2 , o erro padrão e os coeficientes de inclinação e de interseção.

5.6.4.2 RESULTADOS

Os resultados do R^2 e do erro padrão calculados:

$$R^2 = 0,9998$$

$$\text{Erro padrão} = 21,9$$

O resultado do R^2 demonstra que os resultados obtidos nas execuções do algoritmo Calculated Q são lineares. Portanto, a análise feita por regressão linear possibilita a criação de um modelo confiável. O erro padrão de 21,9 slots é baixo quando comparado com a quantidade de slots necessária nos dados da amostra.

Os coeficientes encontrados através da regressão linear executada no SPSS:

$$\text{Coeficiente de inclinação } b = 2,86$$

$$\text{Coeficiente de ajuste (interseção) } a = 6,63$$

A relação completa dos coeficientes obtidos pode ser visualizada na Tabela 5-2.

Tabela 5-2: Coeficientes e padrões de confiabilidade do modelo.

	<i>Coeficientes</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Interseção	6,630754476	0,533936574	17,96368114	31,22519009	17,96368114	31,22519009
Etiquetas	2,863466178	4,12041E-13	2,833511086	2,893421271	2,833511086	2,893421271

Com estes valores, é possível determinar o modelo final da equação linear, aplicados na Equação (5.5):

$$S = n * 2,86 + 6,63 \quad (5.6)$$

onde S é o resultado da simulação do número de slots necessários para a leitura completa de n etiquetas.

Dada a equação (5.6) é possível calcular, por exemplo, que para uma quantidade de 300 etiquetas, serão necessários

$$S = 300 * 2,86 + 6,63$$

$$S = 865$$

ou seja, o modelo de regressão criado está apontando que serão necessários aproximadamente 865 slots para a leitura completa destas etiquetas. Ao comparar este resultado com aquele obtido nas execuções do algoritmo, que foi 891 slots (ver Tabela 5-1), é possível perceber que o modelo possui uma boa previsibilidade em relação ao número de slots necessários para a leitura completa de uma dada quantidade de etiquetas, e com a vantagem desta previsão ser obtida sem a execução completa do algoritmo, mas apenas através do cálculo da equação gerada para o modelo.

Devido o R^2 encontrado, muito próximo de 1, os resultados obtidos com as simulações a partir do modelo (5.6) são ótimos. O gráfico da Figura 5-17 a seguir apresenta um comparativo entre os resultados obtidos através da execução do algoritmo Calculated Q e os resultados obtidos através da simulação pelo modelo de equação linear cujo desenvolvimento foi demonstrado nesta seção.

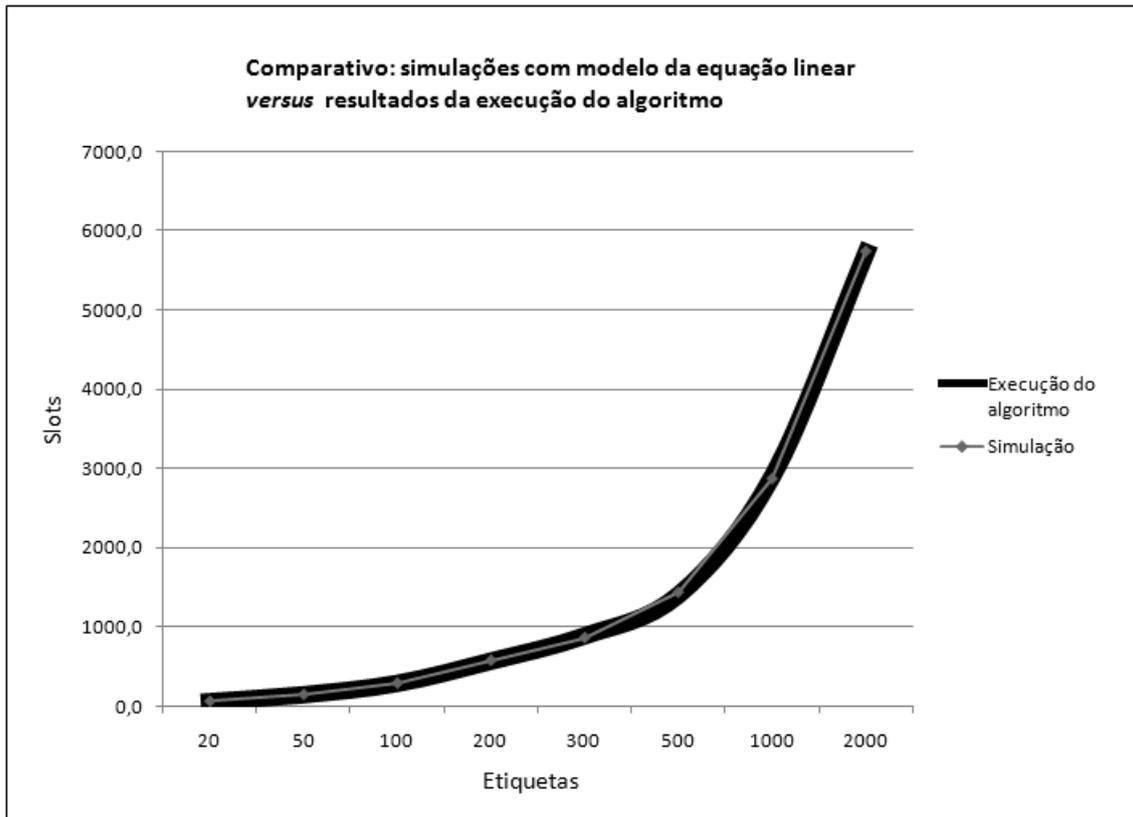


Figura 5-17: gráfico comparativo entre os resultados obtidos através da execução do algoritmo Calculated Q e os resultados obtidos através da simulação pelo modelo de equação linear.

O gráfico da Figura 5-17 demonstra a quase sobreposição entre as duas linhas, a que apresenta os resultados obtidos através da execução do algoritmo (foram utilizados os mesmos apresentados na Tabela 5-1) e a que apresenta os resultados obtidos através da simulação pelo modelo da equação linear (5.6), para o mesmo número de etiquetas. Como os resultados da execução do algoritmo Calculated Q se mostraram lineares em relação ao número de etiquetas a serem lidas, a regressão linear se mostrou um método de predição muito adequado.

Concluindo, o modelo desenvolvido e apresentado ao longo desta seção demonstrou ser extremamente confiável para simulações sobre a quantidade de slots necessários para a leitura de um determinado número de etiquetas. Sabendo o número de slots, é possível calcular o tempo total necessário para a leitura de um conjunto de n etiquetas, o que é uma informação importante para a simulação de ambientes RFID.

5.7 CONCLUSÃO

Este capítulo apresentou uma série de modelos para a implantação dos protocolos e algoritmos anti-colisão, os quais são os responsáveis pela camada lógica do modelo de comunicação de dados entre leitor e etiquetas RFID. Os protocolos e algoritmos padronizados, suas definições e principais características foram discutidos.

Foram apresentados vários trabalhos relacionados. Alguns destes trabalhos com abordagens semelhantes às utilizadas por este autor, tais como a proposta de, a partir da

análise constante sobre quantidades de colisões e *slots* vazios, adaptar o tamanho do frame atual para a tendência do número de etiquetas que ainda restem ser identificadas. Para implementar e realizar as simulações das propostas, todos os trabalhos relacionados utilizaram os mesmos métodos que foram aqui utilizados. O diferencial do presente trabalho foi a opção por uma abordagem mais prática: existe um problema a ser resolvido imediatamente por qualquer desenvolvedor de software para leitores RFID da versão mais atual dos dispositivos ISO 18000-6. Este problema é a determinação dos valores de atualização do tamanho do frame. Como a proposta principal do trabalho é a de oferecer técnicas e modelos de simulação para ambientes RFID, bem como servir como ferramenta de apoio para desenvolvedores e usuários finais destes sistemas, o trabalho apresenta uma solução prática (e completa) para o desenvolvimento do algoritmo. Outra vantagem desta proposta é a de estar de acordo com as definições do documento de padronização, ou seja, não são necessárias alterações destes padrões, bem como nos hardwares dos leitores ou etiquetas. As simulações apresentaram resultados promissores, quando comparados com os resultados de uma implementação típica do algoritmo padronizado, bem como quando comparados com resultados de um trabalho relacionado.

O capítulo também apresentou a proposta de um Ambiente de Software para Simulação de Modelos de Sistemas RFID, o RFID-ENV. Este *framework* permite ao usuário, de acordo com as características fundamentais do seu ambiente (tais como o número aproximado de etiquetas que serão lidas simultaneamente em cada instante de tempo), simular o desempenho dos quatro protocolos anti-colisão atualmente padronizados. Foram adicionadas ao *framework* todas as propostas de novos algoritmos apresentadas ao longo do trabalho, e exemplos de execução e resultados foram discutidos, permitindo ao leitor conhecer as principais características técnicas dos diversos algoritmos. O *framework* foi desenvolvido de forma a permitir a inclusão de novos modelos de protocolos anti-colisão. O ambiente também permite a execução dos modelos de simulação apresentados para a camada física da comunicação de dados entre leitores e etiquetas. Resumidamente, é um ambiente de software para PC que permite a execução de todos os modelos apresentados ao longo do trabalho, bem como a inclusão de novos modelos. As estratégias utilizadas para a criação de um software de simulação de ambientes RFID foram relatadas.

A fim de tornar as simulações do algoritmo anti-colisão Calculated Q mais rápidas e com menor consumo de processamento, também foi criado um modelo baseado em regressão linear. Este modelo permite a realização de simulações sem a necessidade da execução do algoritmo. Os resultados de simulação obtidos com o modelo se demonstraram ótimos, dado as características lineares dos resultados das execuções do algoritmo.

6. CONCLUSÕES GERAIS E TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo apresenta as conclusões sobre o conjunto geral do trabalho realizado e dos resultados obtidos, com as consequentes contribuições da tese. Propostas de trabalhos futuros também são citadas. A Seção 6.1 apresenta as publicações realizadas durante o doutorado.

Primeiramente, os resultados apresentados ao longo deste trabalho permitem concluir que a criação de um sistema completo de simulação de ambientes RFID é viável. Os modelos desenvolvidos são úteis para os dois tipos principais de usuários: desenvolvedores, cujos interesses poderão ser, por exemplo, simulações voltadas para verificação do funcionamento dos protocolos, e projetistas ou usuários finais da tecnologia, cujos interesses serão simulações de mais alto nível, de testes de funcionalidade, leituras, de acordo com o tipo de ambiente.

O trabalho apresentou de forma esquematizada as necessidades para a criação de sistemas de simulação para ambientes RFID. Iniciou pela definição de um modelo de comunicação de dados dividido em camadas, baseado no modelo ISO/OSI, a fim de organizar as duas principais etapas da comunicação entre os equipamentos leitores e etiquetas, que são a comunicação da camada Física e da camada de Enlace. Esta definição é inédita no contexto da tecnologia RFID e ainda não havia sido formalmente apresentada. A partir da definição deste modelo de comunicação em camadas, foi possível concluir sobre a necessidade da criação de modelos independentes para a simulação de cada camada, metodologia esta de simulação de sistemas RFID que também é inédita e ainda não havia sido formalmente organizada e apresentada. Por consequência da criação de modelos de simulação independentes para as duas camadas, foi necessário desenvolver uma proposta para um modelo controlador geral para todos os modelos, proposta esta que foi definida através de uma Máquina de Estado Finito, com todos seus estados e transições detalhadamente apresentados.

O conjunto de técnicas utilizadas, ou seja, a metodologia apresentada para a criação do modelo de simulação da camada Física, foi detalhadamente relatada e justificada. O modelo foi criado de tal forma a permitir que inúmeros outros modelos de dispositivos RFID e tipos de ambiente possam ser verificados e seus dados utilizados para simulações de outros tipos de cenários, diferentes dos aqui apresentados.

O trabalho apresentou as abordagens de simulação baseadas em modelos estatísticos e determinísticos (ou *Site-specific*). Justificou a escolha deste trabalho pela abordagem determinística, que é baseada na teoria da propagação de ondas eletromagnéticas.

A definição do parâmetro K_{dB} no modelo básico de propagação RF permite flexibilidade, pois novas características específicas de elementos interferentes podem ser utilizados no modelo proposto. Neste trabalho, foi utilizado como estudo de caso a influência causada na propagação por diferentes tipos de materiais nos quais as etiquetas podem estar fixadas, e os valores descobertos foram utilizados no parâmetro K_{dB} . Mas este mesmo parâmetro pode ser utilizado como entrada de valores para uma grande quantidade de outros tipos de interferências, tornando o modelo proposto flexível para uma infinidade de tipos de ambientes. A metodologia para a descoberta da influência do tipo de material, com testes realizados em um ambiente controlado (câmara anecóica) e medição das diferenças na potência necessária para ativar a etiqueta de acordo com o material no qual estava fixada, se mostrou uma metodologia correta, conforme demonstraram os ensaios de validação. Ainda, estes ensaios demonstraram que o modelo teórico conseguiu representar ambientes reais. Este resultado certamente estava entre os maiores desafios deste trabalho, pois ambientes reais normalmente possuem uma grande quantidade de interferências para propagação de RF, e muitos modelos teóricos de propagação não conseguem ser válidos no momento do uso prático. Neste trabalho os resultados de validação foram promissores, mesmo quando os ambientes testados apresentavam um desafio maior para a propagação de RF, tais como as duas salas estreitas cheias de elementos reflexivos ao redor das antenas, ou seja, o modelo tolera ambientes diferentes daqueles tipo “espaço livre”. O uso do intervalo de confiança apresentado aumenta esta tolerância.

A criação do intervalo de confiança para uso dos resultados obtidos nos testes realizados na câmara anecóica apresentou uma proposta prática para o uso dos valores do parâmetro K_{dB} . Tendo em vista que os valores obtidos para este parâmetro, normalmente, serão obtidos a partir de uma determinada quantidade de repetições de testes, e os valores dos resultados normalmente irão variar entre uma execução e outra destes testes, a criação de um intervalo de confiança para o K_{dB} é uma estratégia que torna o modelo mais confiável para a sua implementação e uso. A forma de criação do intervalo de confiança foi detalhadamente apresentada e justificada, permitindo sua replicação para outros tipos de situações e ambientes.

Um trabalho futuro importante para a continuidade desta pesquisa seria a criação de uma base de dados de cenários (tipos de ambientes), tais como:

- A partir da metodologia aqui apresentada, descobrir o percentual de energia retornada por outros modelos e fabricantes de etiquetas (o B_L);
- Qual a influência de outros tipos de materiais nos quais as etiquetas podem estar fixadas, diferentes dos aqui apresentados;
- Qual a influência de materiais com diferentes formatos;
- Análise sobre a interferência de materiais que estejam entre as antenas;
- Análise sobre a influência de materiais que estejam próximos das antenas.

Esta base de dados de ambientes permitiria a criação de sistemas de simulação RFID de alto nível, com a apresentação de diversas opções de dispositivos e cenários

que atenderiam boa parte das possibilidades que um usuário possa vir a necessitar. Os resultados apresentados sobre os dispositivos e cenários analisados permitem concluir que a criação deste tipo de sistema é viável. Um ambiente de software tipo CAD, onde seja possível uma fácil personalização do ambiente a ser simulado, com flexibilidade sobre quais modelos de simulação das camadas Física e de Enlace devem ser utilizados, também é um trabalho futuro importante, e que inclusive já está sendo executado pelo grupo de pesquisa no qual este trabalho está inserido.

Em relação à simulação da camada de Enlace, o trabalho iniciou apresentando os protocolos anti-colisão padronizados, suas diferentes abordagens e, principalmente, as rotinas indefinidas de alguns dos protocolos, inclusive daquele mais atual, o Random Slotted. Conforme apresentado, as rotinas não definidas permitem aperfeiçoar os protocolos para situações específicas, mas, ao mesmo tempo, criam para os desenvolvedores o desafio sobre a definição de tais rotinas. Desta forma, o presente trabalho apresentou uma série de discussões sobre as formas possíveis de implementação dos protocolos, as abordagens e rotinas utilizadas ao longo da pesquisa para o desenvolvimento de várias propostas e todos os resultados obtidos, com comparações. Um resultado importante apresentado foi o desenvolvimento do novo algoritmo anti-colisão denominado Calculated Q, que possui como principais características positivas a de ser completamente definido e ter apresentado, nas simulações, desempenho melhor do que a implementação do algoritmo mais atual padronizado pela ISO.

Finalmente, foi proposto um modelo de simulação do protocolo anti-colisão baseado em regressão linear, e seu desenvolvimento detalhadamente apresentado, mostrando sua utilidade para a simulação de protocolos anti-colisão. Os resultados de simulação obtidos com o modelo de regressão linear foram muito próximos daqueles obtidos pela execução real do protocolo anti-colisão.

Outro resultado importante desta tese foi o desenvolvimento de um *framework* que agrega todos os modelos apresentados ao longo do trabalho. Tanto o modelo de simulação da camada física, como também os protocolos padronizados e as implementações propostas para a camada de enlace podem ser executados e simulados no referido *framework*, denominado RFID-Env. Esta ferramenta se mostrou útil e comprova a viabilidade do desenvolvimento prático de um sistema completo de simulação para ambientes RFID.

Como trabalho futuro relacionado com os protocolos anti-colisão, poderia ser citada a implementação do algoritmo proposto Calculated Q na forma de um novo *firmware* para algum equipamento leitor disponível no mercado, a fim de possibilitar a realização de ensaios práticos com esta proposta de implementação do protocolo.

Os resultados das simulações de execução dos protocolos anti-colisão propostos neste trabalho foram melhores do que os obtidos por trabalhos relacionados, sendo que foram equivalentes as formas da análise de desempenho. Como maior contribuição em relação a estes protocolos, está o fato de o algoritmo apresentado para o protocolo mais

atual (ISO 18000-6C) ser completamente definido, não deixando variáveis em aberto, como é o caso do algoritmo mais atual padronizado pela ISO.

6.1 PUBLICAÇÕES

As pesquisas e resultados obtidos durante o doutorado permitiram a publicação dos trabalhos abaixo citados.

Azambuja, M. C.; Jung, C. F.; Caten, C. S. T.; Hessel, F. P. **RFID-Env: Methods and Software Simulation for RFID Environments**. Business Process Management Journal *JCR*, v. 16, 2010, pp. 1014-1038 [Aza10].

Azambuja, M. C.; Marcon, C.; Hessel, F. P. **A Communication Protocol and Physical Characteristics Simulator for an RFID Sensor Environment**. In: IEEE IWCMC'08 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, 2008, pp. 1093-1098 [Aza08a].

Azambuja, M. C.; Marcon, C.; Hessel, F. **Survey of Standardized ISO 18000-6 RFID Anti-Collision Protocols**. In: The Second International Conference on Sensor Technologies and Applications, 2008, pp. 468-473 [Aza08b].

Azambuja, M. C.; Jung, C. F.; Caten, C.; Hessel, F. P. **A Technological Innovation Applied to the Simulation of RFID Environments as Used in the Logistics and Supply Chains**. In: XIV ICIEOM - International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 2008 [Aza08c].

Azambuja, M. C.; Jung, C. F.; Caten, C.; Hessel, F. P. **An Innovation Applied to the Simulation of RFID Environments as Used in the Logistics**. In: Angappa Gunasekaran; Maqsood Sandhu. (Org.). Handbook of Business Information Systems. New Jersey: World Scientific Publishing Company Co., 2008, v.1, pp. 415-430 [Aza08d].

Hessel, F. P.; Azambuja, M. C. **Etiquetas e Leitores RFID**. In: Fabiano Hessel; Reinaldo Villar; Renata Rampim; Suely Baladei. (Org.). Implementando RFID na cadeia de negócios: tecnologia a serviço da excelência. 1a. ed. Porto Alegre: Edipucrs, 2009, v. 1, pp. 107-146 [Hes09].

Além das publicações acima citadas, os seguintes trabalhos foram submetidos e estão atualmente em processo de avaliação pelos respectivos periódicos.

Azambuja, M.; Hessel, F.; Berz, E.; Porfírio, L.; Valério, P.; Costa, L.; Baladei, S. **A Deterministic RF Propagation Model for RFID Environments Using the Site-specific and FDTD Methodologies**. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering.

Azambuja, M.; Hessel, F.; Berz, E.; Porfírio, L.; Valério, P.; Costa, L.; Baladei, S. **Models and Techniques for UHF RFID Scenario Validation**. Springer - Wireless Networks.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [Ali07] Ali, K.; Hassanein, H.; Tana, A. "RFID Anti-collision Protocol for Dense Passive Tag Environments". In: IEEE Conference on Local Computer Networks, 2007, pp. 819-824.
- [Aro07] Aroor , S. R.; Deavours, D. D. "Evaluation of the state of passive UHF RFID: An experimental approach". *IEEE Systems Journal*, vol. 1, no. 2, Dez. 2007, pp. 168–176, 2007.
- [Art09] Arthaber, H.; Schuberth, C. "A UHF RFID Channel Emulator Hardware for Playback of Measured Link-Scenarios". In: IEEE International Conference on RFID, 2009, pp. 34-41.
- [Aza08a] Azambuja, M. C.; Marcon, C.; Hessel, F. P. "A Communication Protocol and Physical Characteristics Simulator for an RFID Sensor Environment". In: IEEE IWCMC'08 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, 2008, pp. 1093-1098.
- [Aza08b] Azambuja, M. C.; Marcon, C.; Hessel, F. "Survey of Standardized ISO 18000-6 RFID Anti-Collision Protocols". In: The Second International Conference on Sensor Technologies and Applications, 2008, pp. 468-473.
- [Aza08c] Azambuja, M. C.; Jung, C. F.; Caten, C.; Hessel, F. P. "A Technological Innovation Applied to the Simulation of RFID Environments as Used in the Logistics and Supply Chains". In: XIV ICIEOM - International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 2008.

- [Aza08d] Azambuja, M. C.; Jung, C. F.; Caten, C.; Hessel, F. P. "An Innovation Applied to the Simulation of RFID Environments as Used in the Logistics. In: Angappa Gunasekaran; Maqsood Sandhu. (Org.). Handbook of Business Information Systems. New Jersey: World Scientific Publishing Company Co., 2008, v.1, pp. 415-430.
- [Aza10] Azambuja, M. C.; Jung, C. F.; Caten, C. S. T.; Hessel, F. P. "RFID-Env: Methods and Software Simulation for RFID Environments". *Business Process Management Journal* **JCR**, v. 16, Jan. 2010, pp. 1014-1038.
- [Ber92] Berg, J.; Bownds, R.; Lotse, F. "Path Loss and Fading Models for Microcells at 900 MHz". In: IEEE 42nd Vehicular Technology Conference, 1992, pp: 666-671.
- [Bis11] Bisquolo, P. A. "Tipos de onda, de vibração, amplitude e comprimento de onda". Capturado em: <http://educacao.uol.com.br/fisica/ult1700u17.jhtm>, Março 2011.
- [Bor05] Borriello, Gaetano (Ed.). "RFID: tagging the world", *Communications Of The ACM*, Set. 2005, v. 48, n. 9, pp: 34-37.
- [Buc94] Buck, T.; Ha, S.; Lee, E.A; Messerschmitt, D.G. "Ptolemy: A framework for simulating and prototyping heterogeneous systems". *International Journal of Computer Simulation*, vol. 4, Abr. 1994, pp. 155-182.
- [Che07] Cheng, T; Jin L. "Analysis and Simulation of RFID Anti-collision Algorithms". In: IEEE The 9th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT2007), 2007, pp. 697 - 701.
- [Cho08] Choi J.; Hyun L.; Engels, D.W.; Elmasri, R. "Robust and Dynamic Bin Slotted Anti-Collision Algorithms in RFID System". In: IEEE International Conference on RFID, 2008, pp. 191-198.
- [Cho10] Choi, J; Lee, I; Du, D; Lee, W. "FTTP: A Fast Tree Traversal Protocol for Efficient Tag Identification in RFID Networks". *IEEE Communications Letters*, Ago. 2010, v. 14, n. 8. pp: 713-715.

- [COM11] COMPUTERWORLD. “Empresas de TI lançam no Brasil *supply chain* Colaborativo”. Capturado em: <http://computerworld.uol.com.br/gestao/2011/03/23/empresas-de-ti-lancam-no-brasil-supply-chain-colaborativo/>, Abril 2011.
- [CPQ11] CPqD. “Evento de Inauguração do Laboratório de RFID”. Capturado em: <http://www.cpqd.com.br/noticias-relacionadas/289-noticias-2011/5353-evento-de-inauguracao-do-laboratorio-de-rfid-reune-autoridades-e-personalidades-do-mundo-tecnologico.html>, Março 2011.
- [Cur07] Curtin, J; Kauffman, R; Riggins, F. “Making the MOST out of RFID technology: a research agenda for the study of the adoption, usage and impact of RFID”. *Information Technology and Management*, Jun. 2007, v. 8, n. 2, pp: 87-110.
- [Dob96] Doble, J. “Introduction to Radio Propagation for Fixed And Mobile Communications”. Norwood: Artech House, 1996, 216p.
- [Eng06] Engels, D.; Sarma, S. “Standardization Requirements within the RFID Class Structure Framework”. In: MIT (Massachusetts Institute of Technology) Auto-ID Labs, 2005. Capturado em: <http://autoid.mit.edu/whitepapers/>, Outubro 2006.
- [EPC05] EPCGLOBAL. “EPC™ Radio-Frequency Identity Protocols Class-1 Generation-2 UHF RFID Protocol for Communications at 860 MHz – 960 MHz Version 1.0.9”. Documento de Padronização EPCGlobal, 2005.
- [EPC08] EPCGLOBAL. “Tag Class Definitions”. Documento de Padronização EPCGlobal, 2007. Capturado em: http://www.epcglobalinc.org/standards/TagClassDefinitions_1_0-whitepaper-20071101.pdf, Mar. 2008.
- [EPC09] EPCGlobal. “Portal Field Strength Measurement Test Method For Applied Tag Performance Testing - Approved by the EPCglobal Technical Steering Committee and EPCglobal Business Steering Committee on July 14, 2009”. Documento de Padronização EPCGlobal, 2009.
- [Fin03] Finkenzeller, K. “RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contact Less Smart Cards and Identification”. New York: Wiley & Sons, 2003, 446p.

- [Flo06] Floerkemeier C; Wille, M. "Comparison of Transmission Schemes for Framed ALOHA based RFID Protocols". In: IEEE Proceedings of the International Symposium on Applications and the Internet Workshops (SAINTW'06), 2006, pp. 92-95.
- [Flo09] Floerkemeier, C.; Sarma, S. "RFIDSim—A Physical and Logical Layer Simulation Engine for Passive RFID". *IEEE Journal Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 6, Jan. 2009, pp. 33-43.
- [Fri10] Friedrich, U. "UHF RFID Protocols – Reading RFID at the dock door" In: Darmstadt: VDE RFID Workshop, 2005. Capturado em: <http://www.atmel.com/products/RFID/>, Julho 2010.
- [Fus06] Fusco, V. "Teoria e Técnicas de Antenas – Princípios e Prática". Porto Alegre: Bookman, 2006, 248p.
- [Gak08] Gakhar, S.; Feldkamp, J.; Perkins, M.; Sun R.; Reddy, C.J. "Engineering RFID systems through Electromagnetic Modeling". In: IEEE International Conference on RFID, 2008, pp. 344-349.
- [Gau08] Gautham, A. "Practical Evaluation and Analysis of Passive UHF RFID Tags", Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, University of Texas at Arlington, 2008, 117p. Capturado em: <http://dspace.uta.edu/bitstream/10106/1002/1/umi-uta-2105.pdf>.
- [Gir99] Girault, A.; Lee, B; Lee, E.A. "Hierarchical Finite State Machines with Multiple Concurrency Models". *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, vol. 18, Jun. 1999, pp. 742-760.
- [Glo06] Glover, B; Bhatt, H. "RFID Essentials". Sebastopol: O'reilly, 2006, 260p.
- [Han08] Han, Y.; Min, H. "System Modeling and Simulation of RFID". In: MIT (Massachusetts Institute of Technology) Auto-ID Labs, 2005. Capturado em: <http://www.autoidlabs.org/single-view/dir/article/6/56/page.html>, Abril 2008.
- [Has06] Hassan, T.; Chatterjee, S. "A Taxonomy for RFID". In: IEEE 39th Annual Hawaii International Conference On System Sciences, 2006, pp: 1-10.

- [Hes09] Hessel, F. P.; Azambuja, M. C. “Etiquetas e leitores RFID”. In: Fabiano Hessel; Reinaldo Villar; Renata Rampim; Suely Baladei. (Org.). *Implementando RFID na cadeia de negócios: tecnologia a serviço da excelência*. 1^a. ed. Porto Alegre: Edipucrs, 2009, v. 1, pp. 107-146.
- [Hin06] Hines, W.; Montgomery, D.; Goldsman, D.; Borror, C. “Probabilidade e Estatística na Engenharia”. Rio de Janeiro: LTC, 2006, 587p.
- [IMP10] IMPINJ Inc. “UHF Gen 2 RFID Readers - Five Factors for Success”. Capturado em: <http://www.impinj.com/WorkArea/linkit.aspx?LinkIdentifier=id&ItemD=2533>, Novembro 2010.
- [IMP11] IMPINJ. “The RFID Tag Antenna: Orientation Sensitivity”. Capturado em: <http://www.impinj.com/WorkArea/linkit.aspx?LinkIdentifier=id&ItemD=2559>, Março 2011.
- [INT08] INTERMEC. “IT32 A Gen2 ID Card”. Capturado em: <http://www.intermec.com/products/rfidit32a/index.aspx>, Junho 2008.
- [ISO03] ISO (*International Organization for Standardization*). “ISO/IEC 18000-6: Information technology automatic identification and data capture techniques — Radio frequency identification for item management air interface — Part 6: Parameters for air interface communications at 860-960 MHz”. Documento de Padronização ISO, 2003.
- [ISO06] ISO (*International Organization for Standardization*). “ISO/IEC 18000-6: Information technology – Radio frequency identification for item management – Part 6: Parameters for air interface communications at 860 MHz to 960 MHz. Amendment 1 (2006-06-15): Extension with Type C and update of Types A and B”. Documento de Padronização ISO, 2006.
- [Kim09] Kim, D; Yoon, H.; Jang, B; Yook, J. “Interference analysis of UHF RFID systems”. *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 4, 2009, pp. 115-126.
- [Lar10] Larson, R.; Farber, B. "Estatística aplicada". São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010, 4^a Ed., 637p.

- [Lau06] Laudien, M. "Radio Frequency Identification (RFID) Antenna and System Design". In: *Converge - An Applications Workshop for High-Performance Design* (Ansoft Corporation), 2006, pp. 1-19.
- [Law00] Law, C; Lee, K; Siu, K. "Efficient Memoryless Protocol for Tag Identification". In: *4th International Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications*, 2000, pp.1-22.
- [Lee98] Lee, B; Lee, E.A. "Hierarchical concurrent finite state machines in Ptolemy". In: *International Conference on Application of Concurrency to System Design*, 1998, pp. 34-40.
- [Lei11] Lei Zhu; Yum, T.-S.P. "A critical survey and analysis of RFID anti-collision mechanisms". *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, pp. 214-221, Mai. 2011.
- [Lin10] Lindgren, T.; Kvarnstro, B.; Ekman, J. "Monte Carlo simulation of an radio frequency identification system with moving transponders using the partial element equivalent circuit method". *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 4, pp. 2069-2076, Dez. 2010.
- [Mal07] Mallinson, H.; Hodges, S.; Thorne, A. "A System to Test the Performance of RFID-Tagged Objects". In: *IEEE International Symposium on Applications and the Internet Workshops*, 2007, pp. 23-26.
- [Mal10] Mallinson, H. "Measuring and Predicting the Performance of RFID-Tagged Objects", Tese de Doutorado, Department of Engineering, University of Cambridge, 2010, 172p.
- [Mar02] Marcon, C.A.M; Calazans, N.L.V; Moraes, F.G. "Requirements, Primitives and Models for Systems Specification". In: *15th Symposium on Integrated Circuits and Systems Design*, 2002, pp. 323-.
- [Min09] Jo, M.; Youn, H; Cha, S.; Choo, H. "Mobile RFID tag detection influence factors and prediction of tag detectability". *IEEE Sensors Journal*, vol. 9, Fev. 2009, pp. 112-119.

- [MIN11] MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. "MCT assina acordo de cooperação para a criação do Brasil-ID". Capturado em: <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/311415.html>, Fevereiro 2011.
- [Miy10] Miyazaki, Y.; Hashimoto, T.; Takahashi, K. "Signal Analysis of Electromagnetic Wave Propagation for RFID Systems in In-door and Out-door". In: Progress In Electromagnetics Research Symposium, 2010, pp. 1097-1102.
- [Mun10] Mundim, K. "Curso de Física: Virtual". Capturado em: <http://vsites.unb.br/iq/kleber/EaD/Fisica-4/Aulas/>, Novembro 2010.
- [Myu06] Myung, J; Lee, W; Srivastava, J. "Adaptive Binary Splitting for Efficient RFID Tag Anti-Collision". *IEEE Communications Letters*, v. 10, n. 3, Mar. 2006, pp.144-147.
- [Nik06] Nikitin, P.; Rao, K. "Theory and Measurement of Backscattering from RFID Tags". *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 48, Dez. 2006, pp. 212-218.
- [Nik08] Nikitin, P.; Rao, K. "Antennas and Propagation in UHF RFID Systems". In: IEEE International Conference on RFID, 2008, pp. 277-288.
- [PHI10] PHILIPS. "Philips e IBM anunciam parceria para desenvolvimento de sistemas de identificação por rádio frequência e smartcard". Capturado em: http://www.newscenter.philips.com/br_pt/standard/about/news/pres/s/article-2959.wpd, Dezembro 2010.
- [PY411] PY4ZBZ. "Polarização de ondas". Capturado em: <http://www.gsl.net/py4zbz/antenas/polarizacao.htm>, Março 2011.
- [San10] Sanchis, A.; Espinosa-García, J.; Martín, A. "Numerical Simulation of EM Environment and Human Exposure When Using RFID Devices". *PIERS Online*, vol. 6, no. 7, pp. 651 - 654, Jul. 2010.
- [Sar03] Sarkar, T.K.; Zhong Ji; Kyungjung K.; Medouri, A.; Salazar-Palma, M. "A survey of various propagation models for mobile communication". *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 45, Jun. 2003, pp. 51-82.

- [Sar06] Sarma, S. "Towards the 5c Tag". In: MIT (Massachusetts Institute of Technology) Auto-ID Labs, 2001. Capturado em: <http://autoid.mit.edu/whitepapers/MIT-AUTOID-WH-006.PDF>, Nov. 2006.
- [Sar07] Sarma, S. "Integrating RFID". ACM Queue: RFID: Threat or Promise, v.2, n. 7, 2004, pp: 50-57. Capturado em: <http://queue.acm.org/detail.cfm?id=1035620>, Jan. 2007.
- [Sch01] Scharfeld, T. "An Analysis of the Fundamental Constraints on Low Cost Passive Radio-Frequency Identification System Design", Dissertação de Mestrado, Dept. Of Mechanical Eng., MIT - Massachusetts Institute Of Technology, Cambridge, 2001, 115p.
- [Sei92] Seidel, S. Y.; Rappaport, T. S. "914 MHz path loss prediction models for indoor wireless communication in multifloored buildings". *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, 1992, v. 40, n. 2, pp: 207-217.
- [Shi06] Shih, D et al. "Taxonomy and survey of RFID anti-collision protocols". *Elsevier Computer And Communications*, Jan. 2006, v. 29, n. 11, pp.2150-2166.
- [Soa11] Soares, M. "MSPC - Informações Técnicas". Capturado em: <http://www.mspc.eng.br/eletrn/antena110.shtml>, Janeiro 2011.
- [Spi09] Spiegel, M. R.; Stephens, L. J. "Estatística". Porto Alegre: Bookman, 2009, 4ª edição, 597p.
- [SPS11] SPSS Inc. "IBM SPSS Statistics". Capturado em: <http://www.spss.com/software/statistics/>, Fevereiro de 2011.
- [Tam95] Tam, W. K.; Tran, V. N. "Propagation modeling for indoor wireless communication". *Electronics & Communication Engineering Journal*, vol. 7, Out. 1995, pp. 221-228.
- [UPM10] UPM. "UPM Raflatac ShortDipole". Capturado em: http://www.upmrfid.com/rfid/rfid.nsf/sp?open&cid=ProductInfo&sale_scode=3001276, Maio 2010.
- [Vin00] Vincentelli, A.S.; Sgroi, M; Lavagno, L. "Formal Models for Communication-Based Design". In: 11th International Conference on Concurrency Theory, Concur '00, 2000, pp. 29-47.

- [Wan08] Wang, H.; Pei, C.; Zhu, C. "A link analysis for passive UHF RFID system in LOS indoor environment". In: *IEEE Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 2008, pp. 1-7.
- [Wei05] Weinstein, R. "RFID: A Technical Overview and Its Application to the Enterprise". *IEEE It Professional*, Jun. 2005, v. 7, n. 3, pp: 27-33.
- [Wen09] Wentworth, S. "Eletromagnetismo Aplicado – Abordagem Antecipada das Linhas de Transmissão". Porto Alegre: Bookman, 2009, 672p.
- [Wir90] Wirdemark, P. "Fitting a twoslope inverse power law to microcell LOS measurements - COST 231 Temporary Documents (TD 90) 123. Darmstadt: Cost Telecom Secretariat". Documento de padronização COST, 1990.
- [Xia10] Xiaolin, J; Feng, Q; Ma, C. "An Efficient Anti-Collision Protocol for RFID Tag Identification". *IEEE Communications Letters*, Nov. 2010, v. 14, n. 11, pp. 1014–1016.
- [Xia11] Xiaohua, C.; Hanbin, X. "Propagation prediction model and performance analysis of RFID system under metallic container production circumstance". *Microelectronics Journal*, Jan. 2011, v. 42, pp. 247–252.
- [Yam11] Yamamoto, M.; Yamazoe, T. "A Null-zone Control Method for RFID Systems". In: *IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, 2011, pp. 106-109.
- [Yu005] Yu, S et al. "Anti-collision Algorithm Based on Jumping and Dynamic Searching and Its Analysis". *Computer Engineering*, v. 31, Set. 2005, pp. 19-20.
- [Zha10] Zhang, X. "One New RFID Anti-collision Algorithm Based on Priority Control". In: *International Conference on Electrical and Control Engineering*, 2010. pp. 2884 - 2887.
- [Zhe05] Zhen, B; Kobayashi, M; Shimizu, M. "Framed ALOHA for Multiple RFID Objects Identification". *IEICE Trans.commun*, Mar. 2005, v. 88, n. 3, pp. 991-999.