

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

JOÃO MIGUEL DA CONCEIÇÃO MARQUES

**ANÁLISE DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A EFICIÊNCIA DA
TECNOLOGIA RFID APLICADA A SISTEMAS DE PRODUÇÃO**

Porto Alegre, 2012

JOÃO MIGUEL DA CONCEIÇÃO MARQUES

**ANÁLISE DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A EFICIÊNCIA DA
TECNOLOGIA RFID APLICADA A SISTEMAS DE PRODUÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção

Orientadores: Carla Schwengber ten Caten, Dr^a. Fernando Bigares Charrua Santos, Dr. e Susana Garrido Azevedo Dr^a.

Porto Alegre, 2012

JOÃO MIGUEL DA CONCEIÇÃO MARQUES

**ANÁLISE DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A EFICIÊNCIA DA
TECNOLOGIA RFID APLICADA A SISTEMAS DE PRODUÇÃO**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na modalidade Acadêmica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof^ª. Carla Schwengber ten Caten

PPGEP / UFRGS

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Fernando Jung - FACCAT

Prof. Dr. Marcelo Cunha de Azambuja - FACCAT

Prof^ª. Dra. Márcia Elisa Echeveste - PPGEP/UFRGS

AGRADECIMENTOS

Aos professores que se disponibilizaram para me orientarem e que contribuíram com o seu conhecimento para a realização deste trabalho, Fernando Santos (UBI), Susana Azevedo (UBI), Carla S. ten Caten (UFRGS) e Carlos Fernando Jung (FACCAT).

Ao Marcelo Azambuja e Flávio Rosa (FACCAT) que estiveram presentes e colaboraram na realização dos experimentos no campus da FACCAT.

Aos restantes colegas tanto da UBI como da UFRGS que me ajudaram a apoiaram durante este período.

RESUMO

Os sistemas de identificação por radio frequências (RFID - Radio Frequency IDentification) são uma tecnologia de transmissão e armazenamento de informação remota, composta por dispositivos (etiquetas e leitores RFID), que comunicam à distância sem necessitarem de qualquer contato direto. Embora a RFID possua algumas décadas de existência, apenas nos últimos anos tem recebido atenção por parte do meio industrial e demonstrado ser uma tecnologia com um futuro promissor, devido especialmente às suas inúmeras possibilidades de utilização e vantagens que possui quando comparada com outras tecnologias semelhantes. Embora a utilização da RFID aparente ser bastante vantajosa e com bastantes benefícios, muitas questões e dificuldades são colocadas no momento da sua implementação. No âmbito desta dissertação será apresentado uma revisão bibliográfica sobre o estado de arte da tecnologia RFID, os dispositivos que a compõem e que são essenciais ao seu funcionamento, assim como várias aplicações da tecnologia. Serão igualmente abordados os problemas que dificultam a disseminação da tecnologia. O objetivo do trabalho foi (i) realizar um levantamento na literatura dos fatores que influenciam a eficiência da tecnologia RFID e (ii) realizar uma análise experimental dos fatores que influenciam a capacidade de transmissão do sinal de radio frequência entre os vários dispositivos RFID existentes no contexto industrial.

Palavras-chave: RFID, Tag, Reader, UHF, Sistemas de Produção, Estudo Prático.

ABSTRACT

The Radio frequency identification (RFID) systems are a technology that permits the transmission and storage of information remotely, composed of devices (tags and readers), which communicate at a distance without the need for any direct contact. While RFID has a few decades of existence only in recent years it has received attention from the industrial environment and demonstrated to be a technology with a promising future, especially due to its many possibilities of use and advantages when compared with other similar technologies. However, although the actual use of RFID may appear to be very advantageous and with many benefits, many issues and problems are posed at time of implementation. Within this dissertation it will be presented a literature review on the state of the art RFID technology, the devices that make up to it and that are essential to its operation, as well as the various applications of technology. The problems and difficulties that are posed at the moment and difficulties that compromise the spread of technology will also be discussed. The objective of this work was (i) to conduct a literature review of the factors that influence the efficiency of RFID technology and (ii) conduct an experimental analysis of the factors that influence the ability of signal transmission between different radio frequency RFID devices existing in the industrial context.

Keywords: *RFID Tag, Reader, UHF, Production Systems, Design of Experiments, Practical Study.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Visão geral das tecnologias de Auto-ID com maior relevo.....	15
Figura 2 - Representação de um código de barras utilizando a simbologia UPC.....	16
Figura 3 - Evolução da tecnologia RFID ao longo do tempo	22
Figura 4 - Vantagens da RFID sobre o código de barras.....	24
Figura 5 – Componentes e fluxo de informação de um sistema RFID	26
Figura 6 - Possíveis tamanhos e formas de <i>tags</i> RFID.....	27
Figura 7 - Componentes de uma <i>tag</i> RFID.....	28
Figura 8 - Princípio de funcionamento sistema RFID passivo, modulação <i>backscatter</i>	28
Figura 9 - Exemplos de <i>tags</i> ativas a passivas.....	29
Figura 10 – Ilustração das distâncias de leitura active/passive <i>tags</i>	30
Figura 11 - Comparação entre chipless <i>tags</i> e chip <i>tags</i>	31
Figura 12 - Estrutura do <i>EPC</i>	33
Figura 13 - Classes de <i>tags</i>	34
Figura 14 - Representação frequências admitidas em sistemas RFID	35
Figura 15 - Características das <i>tags</i> que operam em diferentes frequências	36
Figura 16 - Exemplos de antenas de <i>Tags</i> que operam em diferentes frequências.....	39
Figura 17 - Representação da amplitude e comprimento da onda.	40
Figura 18 - Comparação das direções de irradiação de uma antena isotrópica (Pi) e uma antena dipolo (P)	41
Figura 19 - Exemplo de uma antena dipolo de meia onda	42
Figura 20 - Polarização Vertical e Horizontal	43
Figura 21 - Antena de Yagi.....	43
Figura 22 – Representação da direção de radiação de uma antena Yagi.....	44
Figura 23 - Projeção de mercado RFID, 2008, 2013 e 2018 (em dólares).	46
Figura 24 - Mercado global para a RFID nos cuidados médicos 2006-2016 (em dólares).....	47
Figura 25 - <i>Tag</i> passiva " <i>SpeedPass</i> "	49
Figura 26 – Tipos de <i>tags</i> para identificação animal.....	51
Figura 27 - Exemplo de uma cadeia de abastecimento simples.....	51
Figura 28 - Fluxo físico e informacional numa cadeia de abastecimento	52
Figura 29 – Fatores relevantes para a implementação da RFID como sistema de gestão num processo produtivo	55
Figura 30 - Exemplos de estudos RFID aplicados em ambientes indústrias reais.....	56
Figura 31 - Modelos geral de processo ou sistema	58
Figura 32 - Experimento isolado.....	66
Figura 33 - Experimento fatorial.....	66
Figura 34 - Influência de alguns materiais no sinal de RF	74
Figura 35 – Antena Circular	75
Figura 36 – <i>Tag</i> passiva UHF, colada num produto	75
Figura 37 - Recipientes de diferentes materiais utilizados nos ensaios	76
Figura 38 – Esquema exemplificativo dos ensaios e posicionamentos dos equipamentos	76
Figura 39 - Testes realizados em espaço livre	79
Figura 40 – Testes realizados com os recipientes	79
Figura 41 - Gráfico dos efeitos principais dos fatores controláveis e sobre a variável de resposta	81
Figura 42 - Gráfico dos efeitos de interação dos fatores controláveis sobre a variável de resposta	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplo de tabela Anova e formulário para os cálculos.....	69
Tabela 2 - Definição da Variável de Resposta.....	77
Tabela 3 - Fatores controláveis e fatores mantidos constantes	77
Tabela 4 - Fatores de Ruído	78
Tabela 5 - Análise de Variância do experimento (ANOVA).....	80
Tabela 6 – Comparação Múltipla de Médias para os materiais	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RF	Rádio Frequências
RFID	Radio Frequency Identification
Auto-ID	Identificação Automática
OCR	Optical Character Recognition
dB	Decibéis
RTLS	Real Time Locating Systems
ROI	Return of Investment

SUMÁRIO

1. Introdução	12
1.1. Enquadramento	12
1.2. Objetivos.....	12
1.3. Organização da dissertação.....	13
2. Revisão de Literatura.....	14
2.1. Tecnologias Auto-ID.....	14
2.2. Tecnologia RFID.....	17
2.2.1. Desenvolvimento da tecnologia RFID.....	19
3. Características dos Sistemas RFID	23
3.1. <i>Tags</i> RFID	26
3.1.1. <i>Tags</i> passivas versus <i>tags</i> ativas.....	28
3.1.2. <i>Chip tags</i> versus <i>Chipless tags</i>	31
3.1.3. Classes de <i>tags</i> e <i>Electronic Product Code</i>	33
3.1.4. Frequências de operação	34
3.2. <i>Reader</i>	37
3.3. Antenas	38
3.3.1. Caracterização RF.....	39
3.3.2. Ganho de uma antena.....	40
3.3.3. Dipolo de meia onda	42
3.3.4. Antena Yagi.....	43
3.4. <i>Middleware</i>	44
4. Aplicações da tecnologia RFID	46
4.1. Cuidados de saúde.....	47

4.2.	Pagamentos eletrônicos e pósticos de cobrança.....	48
4.3.	Serviços bibliotecários.....	49
4.4.	Identificação de animais	50
4.5.	Gestão da cadeia de abastecimento	51
4.6.	Sistemas de Produção.....	53
5.	Projeto de experimentos	57
5.1.	Definições utilizadas em projetos de experimentos	59
5.2.	Etapas do projeto de experimentos	61
5.3.	Tipos de Projetos de Experimentos.....	63
5.4.	Projetos fatoriais.....	65
5.5.	Análise de variância (ANOVA).....	67
5.6.	Análise de Regressão.....	69
6.	Estudo Prático	73
6.1.	Objetivo do estudo	74
6.2.	Equipamento utilizado.....	74
6.3.	Identificação dos objetivos do experimento	76
6.4.	Seleção das variáveis de resposta.....	77
6.5.	Escolhas dos Parâmetros de processo	77
6.6.	Fatores de Ruído	78
6.7.	Procedimentos dos ensaios	78
6.8.	Análise dos resultados	80
7.	Conclusões.....	83
8.	Referências Bibliográficas.....	85
	Apêndice	90

1. Introdução

1.1. Enquadramento

A *Radio Frequency Identification* (RFID) é uma tecnologia que existe desde a II Guerra Mundial, no entanto apenas nos últimos anos começou a ser vista como um instrumento de produtividade nas empresas. RFID é a denominação genérica para sistemas compostos de dispositivos eletrônicos que utilizam RF (Rádio Frequência) como meio de comunicação para realizar identificação e localização. Um sistema RFID é composto por dois elementos básicos: *reader* RFID (em português, leitor ou interrogador) e *tags* RFID (em português etiquetas eletrônicas de identificação), dispositivos eletrônicos que contêm dados gravados no seu interior e possuem a capacidade de serem agregadas a outros objetos físicos.

Esta tecnologia tem sido aplicada nos mais variados setores: gestão logística, cuidados médicos, indústria pecuária, sistemas produtivos, entre outros. No meio industrial a inclusão desta tecnologia têm-se multiplicado ao longo dos últimos anos, com um grande número de empresas introduzindo o RFID nos seus processos de produção, o que tem proporcionado às empresas benefícios na redução de custos, melhorias de qualidade, aumento de valor para o cliente, redução de mão-de-obra, aumento e melhoria do controle produtivo, melhoria na eficiência dos processos, etc. Sabe-se que a eficiência na utilização desta tecnologia depende de muitos fatores, como por exemplo, os materiais utilizados nos produtos onde as *tags* são colocadas, a direção das antenas, as leituras de vários produtos simultaneamente no mesmo espaço reduzido. Nesta dissertação pretende-se precisamente explorar esta questão.

1.2. Objetivos

Os objetivos desta dissertação foram: (i) realizar um levantamento literário dos fatores que influenciam a eficiência da tecnologia RFID; e (ii) realizar um análise experimental dos fatores que influenciam no contexto industrial. Neste sentido, foi realizada inicialmente uma revisão e análise crítica da literatura disponível sobre o tema através de informação recolhida em bases de dados de artigos científicos, revistas científicas, livros técnicos e na Internet, tendo sido abrangidas algumas das tecnologias de auto identificação (Auto-ID) existentes atualmente com especial enfoque a tecnologia de RFID, com o propósito

de fazer um levantamento sobre o estado de arte atual da tecnologia RFID e consequente identificação dos principais fatores que podem influenciar e condicionar o funcionamento de um sistema RFID.

Uma vez realizada a identificação dos fatores foi executado um experimento planejado, seguindo a metodologia de projeto de experimentos, com o intuito de estudar o grau de influência e a forma como esses fatores afetam o funcionamento do sistema RFID em contexto industrial comparando os resultados obtidos experimentalmente com a revisão de literatura.

1.3. Organização da dissertação

A presente dissertação está organizada em 7 capítulos, estruturados da seguinte forma: no primeiro capítulo é feito um enquadramento do tema a estudar, apresentando-se os objetivos do estudo; no capítulo dois apresenta-se uma revisão bibliográfica das tecnologias de Auto-ID e da tecnologia RFID; no terceiro capítulo são abordadas as características que possuem os diferentes sistemas RFID, o seu princípio de funcionamento assim com os dispositivos essenciais que compõem um sistema RFID; no quarto capítulo apresentam-se algumas áreas genéricas onde a tecnologia RFID se encontra aplicada: Cuidados de saúde, Pagamentos eletrônicos e pósticos de cobrança, serviços bibliotecários, identificação de animais, gestão da cadeia de abastecimentos e sistemas de produção; no capítulo cinco descreve-se a metodologia do projeto de experimentos, tendo sido realizada uma revisão bibliográfica dos conceitos básicos de projeto de experimentos; no capítulo seis é apresentado o experimento realizado, onde se estudou os fatores que influenciam a eficiência da tecnologia RFID em sistemas produtivos.

Finalmente no sétimo e último capítulo apresentam-se as conclusões obtidas no decorrer da revisão da literatura, e feitas algumas afirmações com base nos resultados do experimento obtidos no capítulo seis.

2. Revisão de Literatura

2.1. Tecnologias Auto-ID

Tecnologias de Auto Identificação, (também referido como AIDC – *Automatic Identification and Data Capture*), são tecnologias que permitem a identificação automática de objetos, a recolha de informações sobre estes e a introdução posterior dessas informações diretamente num sistema computadorizado, sem a necessidade do envolvimento humano.

Inicialmente as tecnologias Auto-ID foram desenvolvidas como resposta à necessidade de recolher e transferir informações de forma eficiente, rápida e precisa, permitindo reduzir, ou mesmo eliminar, a recolha manual de dados e a consequente ocorrência de erros que daí poderiam advir. O desenvolvimento ocorrido nas tecnologias Auto-ID nos últimos anos, possibilitou a sua aplicação em áreas distintas, como o retalho, gestão logística, empresas de manufaturação, entre outras (HODGSON, NABHANI e ZAREI, 2010). A capacidade que estas tecnologias possuem para fornecer informações fidedignas e em tempo real sobre pessoas, animais, bens ou outro tipo de produtos que se encontrem em circulação, contribuiu igualmente para o aumento da sua popularidade no meio industrial (FINKENZELLER, 2010).

A Identificação por Rádio Frequência (RFID - *Radio Frequency Identification*), é uma tecnologia Wireless (comunica sem a necessidade de fios) que se inclui no grupo das tecnologias Auto-ID. Para além da RFID um variado número de sistemas pode ser incluindo dentro desta família de tecnologias, entre eles destacam-se: Códigos de Barras; Reconhecimento Óptico de Caracteres (OCR – *Optical Character Recognition*); Cartões Inteligentes (*Smart Cards*); Identificação por Infravermelhos (*Infrared Identification*); etc. (HUNT, PUGLIA e PUGLIA, 2007) (FINKENZELLER, 2010).

A Figura 1 representa uma visão geral das tecnologias de Auto-ID com maior relevo disponíveis atualmente no mercado. Seguidamente será feita uma breve visão geral sobre algumas tecnologias Auto-ID, sendo dado um maior destaque ao código de barras e à sua comparação com a RFID.

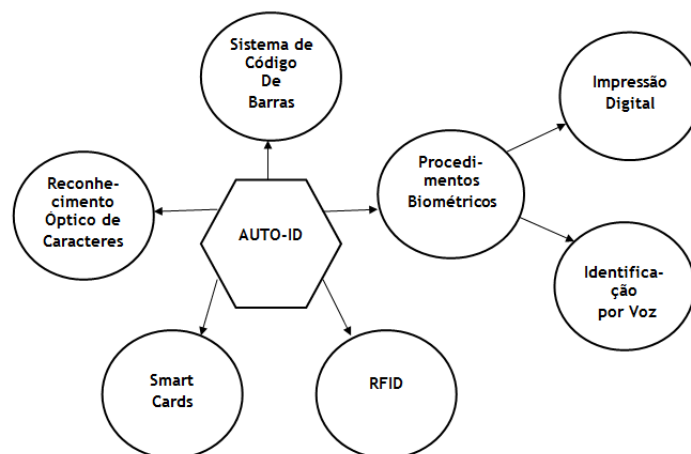


Figura 1 - Visão geral das tecnologias de Auto-ID com maior relevo

Adaptado: (FINKENZELLER, 2010)

Um código de barras pode ser entendido como uma etiqueta de identificação, composta por barras e espaços organizados numa configuração paralela, com diferentes espessuras e que alternam consecutivamente entre a cor preta e branca, que no seu conjunto formam um padrão/símbolo.

A tecnologia por códigos de barras é desde as últimas três décadas a tecnologia de Auto-ID com maior difusão e utilização no mercado, no entanto, esta tecnologia detém algumas limitações que não lhe permitem tirar partido dos avanços tecnológicos disponíveis atualmente (SWEENEY II, 2005).

A limitada quantidade de informação que conseguem armazenar, o facto de que para serem lidos necessitam estar muito próximos do laser emitido pelo leitor (XIAO, YU, *et al.*, 2006), a necessidade da intervenção humana para que seja executada a leitura dos códigos de barras (LEE e OZER, 2007), são exemplos de limitações que os códigos de barras possuem.

Os conjuntos destes padrões pré-definidos são usados para codificar pequenas sequências de dados num símbolo que é posteriormente impresso e colocado no item a identificar. Apesar de os códigos de barras serem idênticos na sua concepção física, existem cerca de dez simbologias diferentes de códigos de barras atualmente em uso (FINKENZELLER, 2010). A simbologia UPC (*Universal Product Code*) é a mais conhecida e utilizada mundialmente, ver Figura 2.



Figura 2 - Representação de um código de barras utilizando a simbologia UPC.

Fonte: (HUNT, PUGLIA e PUGLIA, 2007).

Os códigos de barras possibilitaram a recolha precisa de dados, o movimento rápido de mercadorias, e desenvolvimento de sistemas de automação, desde a sua invenção em 1940 estes têm sido amplamente utilizados em todos os tipos de mercados, indústrias e serviços, pois conseguem providenciar um método relativamente simples, com custo bastante reduzido para encriptação de informação, permitindo a recolha de dados de forma rápida e com extrema precisão (ZHOU, 2008).

No entanto, e devido às limitações que a esta tecnologia de Auto-ID detém, nos últimos anos a utilização de códigos de barras para a identificação de itens tem vindo a ser substituída pela tecnologia RFID, uma tecnologia Auto-ID de nova geração, que utiliza ondas de rádio para identificar e seguir individualmente qualquer item que possua uma *tag* RFID (etiqueta RFID) agregada (JAIN e TANWER, 2010).

A OCR é outra tecnologia de Auto-ID que realiza o reconhecimento de caracteres/texto num documento físico e efetua a conversão para um ficheiro de texto capaz de ser lido e manipulado num computador, como ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) ou MS Word (MOHIUDDIN e MAO, 1999).

Caracteres especiais foram desenvolvidos e aperfeiçoados especialmente para a utilização desta tecnologia, para que estes pudessem ser lidos tanto pelas pessoas como automaticamente por máquinas. Porém a tecnologia OCR falhou o objetivo de ser aceita e aplicada universalmente, muito devido ao custo elevado da tecnologia e às limitações que esta possui, como o reduzido número de caracteres capazes de serem reconhecidos e a elevada taxa de erros associados à leitura (HODGSON, NABHANI e ZAREI, 2010).

A principal vantagem da tecnologia OCR é a capacidade de recolha de grandes densidades de informação. Atualmente é utilizada nos sistemas produtivos, em serviços administrativos e em instituições financeiras (FINKENZELLER, 2010).

Um *smart card* (cartão inteligente) pode ser entendido como um sistema eletrónico de armazenamento e transferência de informação, composto por um microprocessador, que se

encontra incorporado num cartão de plástico usualmente com dimensões semelhantes a um cartão de crédito. A leitura/processamento da informação contida num *smart card* é conseguida através de colocação do *card* num leitor que por sua vez se encontra conectado a um sistema computadorizado, a ligação entre os dois dispositivos pode ser conseguida com ou sem contato físico (ZHOU, 2008), sendo que o leitor fornece energia necessária para o funcionamento do microprocessador contido *smart card*.

Uma das principais vantagens da tecnologia *smart card* reside na elevada proteção contra leitura e manipulação indesejada dos dados armazenados no seu interior. Os *smart cards* são utilizados em todo o tipo de serviços que necessitem a troca de informações ou transações financeiras.

A utilização desta tecnologia de Auto-ID tem vindo a aumentar consideravelmente nas mais diversas áreas. É de salientar uma importante desvantagem que os *smart cards* possuem, nomeadamente a sua vulnerabilidade à corrosão, desgaste e inoperacionalidade causado pelo seu uso regular (FINKENZELLER, 2010). O custo dos leitores, assim como a elevada manutenção necessária para o seu bom funcionamento (caso estes sejam usados frequentemente) são igualmente fatores que não abonam a favor desta tecnologia.

A tecnologia de identificação por infravermelhos é bastante similar à tecnologia RFID, estando a maior diferença, relacionada com suas frequências de operação. No espectro eletromagnético, as frequências infravermelhas estão num patamar muito mais elevado, mesmo quando comparadas com mais elevadas frequências micro-ondas utilizadas pelos sistemas RFID. Nos sinais infravermelhos facilmente se perde o sinal entre a etiqueta e o leitor o que dificulta a troca de informação entre os dois, além disso, estes possuem igualmente grande dificuldade em penetrar objetos sólidos, o que coloca grandes entraves à leitura de etiquetas que estejam contidas no interior de itens, como caixas ou contentores. Devido a estes problemas a identificação por infravermelhos é mais utilizada em aplicações de imagiologia, como visão noturna ou detecção de movimentos (HUNT, PUGLIA e PUGLIA, 2007).

2.2. Tecnologia RFID

A tecnologia RFID não é uma tecnologia que possa ser considerada nova. Embora as aplicações comerciais desta tecnologia remontem à década de 60 do século XX, apenas no início do século XXI foi percebido que a RFID se apresentava como uma promessa para o

futuro com possibilidades de utilização nas mais diversificadas indústrias. Previsivelmente, iniciou-se então um vasto e profundo estudo acadêmico focalizado especialmente na RFID, que sem surpresa, atraiu bastante as atenções do meio industrial que rapidamente reconheceu a importância da tecnologia e as vantagens competitivas que poderiam ganhar com a implementação (ZHU, MUKHOPADHYAY e KURATA, 2011).

Num mercado globalizado cada vez mais competitivo e onde as inovações surgem a cada instante, a procura do aumento de eficiência e diminuição dos custos, essencial para a sobrevivência empresarial, apenas se torna possível com a integração de novas tecnologias e metodologias de trabalho. Com o avançar do desenvolvimento da tecnologia, a RFID está rapidamente a ser empurrada para o ambiente empresarial, as suas aplicações industriais multiplicam-se ao longo dos anos, projetos-piloto estão constantemente a ser desenvolvidos e testados em diversas áreas como: a logística, gestão de cadeias de abastecimento, controlo de inventários, identificação e seguimento pecuário, automatização de indústrias, etc (LIAO, LIN e LIAO, 2011).

Através de uma análise retrospectiva relativamente às tendências e previsões da tecnologia RFID entre os anos de 1991 a 2005, Chao et al. (2007) constataram que nestes anos a inovação tecnológica da RFID passou por três períodos distintos. O primeiro período teve especial enfoque na inovação das *tags* RFID como a transferência de dados, controle de acessos, melhorias na comunicação, desenvolvimento de uma antena ativa integrada e diminuição do consumo energético. No segundo período aplicaram-se as *tags* à automação, serviços integrados com diversas aplicações computacionais. Finalmente o terceiro período trouxe automação às empresas de fabricação, controle logístico, aplicações ao comércio eletrônico, produção em massa de *tags* mais baratas e com dimensões bastante reduzidas, interação via comunicações móveis, utilização da RFID no rastreamento de bens de consumo e a utilização de *tags* à escala mundial.

Com o desígnio de compreender o estado de arte da pesquisa académica relacionada com a tecnologia RFID, Ngay et al. (2008) apresentaram um estudo onde foram examinados 85 artigos publicados em jornais científicos diretamente relacionados com a tecnologia e a sua aplicação, entre o período de 1995-2005, agrupando-os em quatro categorias principais: questões tecnológicas; áreas de aplicação; obstáculos políticos e de segurança; e outros problemas.

Do estudo efetuado, importantes conclusões são retiradas pelos autores, nomeadamente: (i) o facto de ter ocorrido uma proliferação de artigos publicados, especialmente desde 2003 que permite prever um aumento substancial de desenvolvimentos na área da RFID no futuro; (ii) que as utilizações atuais da RFID são numerosas e variadas, tendo os autores identificado pelo menos catorze implementações industriais distintas; (iii) o custo da tecnologia, (mais especificamente da *tag*) assim como a sua performance, têm um papel muito importante na tomada de decisão das empresas quando da implementação de sistemas RFID; (iv) a literatura publicada inicialmente possuía um enfoque nas dificuldades técnicas, comuns quando ocorre a disseminação de novas tecnologias, não abrangendo questões relacionadas com a criação de valor da RFID nos negócios ou o impacto desta nas relações interempresariais.

Sendo provável que com a maior maturidade da tecnologia e a conseqüente resolução dos problemas técnicos, comecem a ganhar notoriedade os trabalhos científicos publicados nas áreas de pesquisa menos desenvolvidas, como questões empresariais e organizacionais e os problemas de segurança e privacidade que a RFID coloca.

A realização de um projeto experimental, onde seja estudado e analisado o comportamento das ondas de rádio frequência, em sistemas RFID implementados em ambientes industriais, será útil para aprofundar os conhecimentos relativos á forma como é afetada a transmissão de informações entre os dispositivos que compõem este tipo de sistemas e a sua conseqüente influência no desempenho de todo o sistema, colmatando assim a limitação atual de estudos práticos realizados neste tipo de ambientes.

2.2.1. Desenvolvimento da tecnologia RFID

Embora a utilização generalizada da tecnologia de identificação por radio frequência seja relativamente recente, os princípios de funcionamento da tecnologia remontam à Segunda Guerra Mundial. A ideia de identificar de forma automática utilizando um *transponder* de rádio, teve originalmente o intuito de conseguir efetuar a distinção entre os aviões considerados amigáveis e os aviões inimigos, daí a tecnologia RFID ter tido o nome inicial de *IFF – Identification Friend or Foe*, onde os aviões “*Friendly*” (amigáveis) respondiam com a identificação correta, enquanto os que não respondiam corretamente eram considerados “*Foes*” (Inimigos) (LOZANO-NIETO, 2011).

O IFF trabalha de forma muito semelhante a RFID. Um sinal codificado de interrogação é emitido numa rádio frequência específica, que o *transponder* recebe e descodifica. O *transponder* responde posteriormente com informação de identificação encriptada. Cada *transponder* possui um número de identificação único, em alguns tipos existe ainda a possibilidade da adição manual de alguma informação secundária pelo piloto da aeronave (SWEENEY II, 2005).

Um dos primeiros estudos que explora a RFID foi publicado em Outubro de 1948 por Harry Stockman intitulado “*Communication by Means of Reflected Power*” (ROBERTS, 2006), motivado pelos avanços conseguidos na Segunda Guerra Mundial sobre comunicações através de rádio frequência. Esta publicação é compreendida como o nascimento da tecnologia RFID (HUNT, PUGLIA e PUGLIA, 2007), no entanto as concepções apresentadas por Stockman (1948) só se tornaram realidade depois de trinta anos, quando outras tecnologias necessárias para a sua concretização foram desenvolvidas: o transístor; o circuito integrado; o microprocessador e os semicondutores (LANDT, 2001).

A década de 50 foi a era onde se iniciou a exploração teórica das técnicas de RFID com a publicação de artigos científicos inovadores sobre o tema, (F. L. Vernons’s. “*Application of the microwave homodyne*” e D. B. Harris, “*Radio transmission systems with modulatable passive responder*”) e quando começaram a ser realizados os primeiros testes laboratoriais em dispositivos rádio.

Nos anos 60 começaram a emergir sistemas RFID protótipos, e principiou-se a atividade comercial da tecnologia com a formação de empresas como a *Sensormatic* e *Checkpoint*, que lançaram no mercado sistemas de Vigilância Eletrónica de Artigos (EAS – *Electronic Article Surveillance*), sistemas RFID de prevenção contra roubos que utilizam *tags* de 1-bit e apenas detectam a presença ou ausência de uma *tag*.

A EAS é indiscutivelmente a primeira utilização massificada da tecnologia RFID. Em 1970, houve um crescente interesse pela tecnologia RFID por parte de investigadores, empresas, instituições académicas e laboratórios governamentais, ficando esta época marcada principalmente pelo desenvolvimento de novas aplicações para tecnologia, rastreamento de animais e veículos assim como automação de sistemas industriais, começou a ser entendido o potencial da tecnologia RFID (LANDT, 2001).

A primeira comercialização generalizada de sistemas RFID, nas mais diversificadas áreas aconteceu na década de 80. Os Estados Unidos da América interessaram-se mais pela aplicação da tecnologia ao nível dos transportes, controle de acessos, e rastreabilidade de animais. Por sua vez na Europa o interesse voltou-se para as aplicações industriais e empresarias, seguimento de animais, com o início da aplicação de sistemas RFID no pagamento de portagens em estradas na Itália, França, Espanha, Portugal e Noruega (ROBERTS, 2006). Todos os sistemas RFID implementados na década de 80 eram sistemas com direitos de propriedade, não existindo interoperabilidade entre eles, o que manteve os custos acentuados e impediu o seu crescimento industrial.

Os anos 90 foram o período onde ocorreu a massificação da aplicação dos sistemas RFID no controle eletrônico de portagens nos Estados Unidos da América, assim como o início da sua utilização num vasto número de países onde se incluem, a Argentina, Austrália, Brasil, Canadá, China, Hong Kong, Japão, Malásia, México, Nova Zelândia, Coreia do Sul, África do Sul, Singapura e Tailândia (ROBERTS, 2006).

A investigação e o desenvolvimento da tecnologia sofreram igualmente um enorme crescimento, com o aumento do interesse por parte de empresas como a *Microdesign*, *CGA*, *Alcatel*, *Bosch*, *Philips*, etc. O aperfeiçoamento da tecnologia manteve-se durante toda a década com o desenvolvimento de circuitos integrados e redução de tamanho até as *tags* RFID de micro-ondas estarem resumidas a um único circuito integrado. No início do século XXI tornou-se claro que seria possível comercializar etiquetas RFID ao preço de \$0.05 e que a tecnologia RFID poderia vir um dia a substituir a tecnologia por código de barras (HUNT, PUGLIA e PUGLIA, 2007).

O ano de 2003 foi um ano relevante para o desenvolvimento da tecnologia RFID. A empresa Wal-Mart, com o objetivo de conseguir realizar o rastreamento eficiente dos seus inventários ao nível das paletes, emitiu um mandato exigindo que os seus 100 principais fornecedores colocassem *tags* RFID nas suas paletes e produtos até ao dia 1 de Janeiro de 2005 identificadas com um código *EPC*. Posteriormente, a Wal-Mart litigou que os seus restantes 12000 fornecedores seguissem o mesmo mandato e colocassem igualmente *tags* RFID nas suas paletes e produtos até 2006 (XIAO, YU, *et al.*, 2006). O Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (DoD) rapidamente seguiu os mesmos passos e emitiu um mandado semelhante ao da Wal-Mart para os seus maiores fornecedores.

A Wal-Mart e o DoD são, respetivamente, a maior retalhista mundial e o maior operador de cadeia de abastecimento mundial. Este intento de incluir a tecnologia RFID nas suas cadeias de abastecimento foi motivado pelo objetivo de aumentar a eficiência ao nível da expedição, recepção e gestão de estoques e conseguir uma redução dos custos de operação, armazenamento e perda de produtos que uma visibilidade de inventário ao nível das paletes pode acarretar. Um número significativo de empresas retalhistas entre as quais se podem destacar a *Target*, *Tesco*, *Metro*, *Best Buy* e a *CVS*, seguiu o exemplo destas duas organizações e implementaram sistemas RFID nas suas cadeias de abastecimento (HUNT, PUGLIA e PUGLIA, 2007).

Rapidamente se percebeu que inúmeras aplicações da RFID nas mais variadas indústrias e com as mais diversas finalidades iriam rapidamente emergir. O mercado da tecnologia RFID ultrapassou recentemente os vários biliões de dólares sendo o seu crescimento exponencial, com aplicações nos mais diversos sectores como a medicina, agricultura, agropecuária, logística, cadeias de retalho, etc (PRERADOVIC e NEMAI, 2007).

Atualmente um trabalho considerável está a ser desenvolvido e investigado, tanto pelas indústrias como pelos académicos com o objetivo de conseguir a atribuição de um espectro de rádio frequências comum entre os vários países, desenvolvimento de padrões standard e introdução de muitas aplicações comerciais de sistemas RFID (ROBERTS, 2006).

Na Figura 3, é apresentada uma síntese do progresso da tecnologia RFID ao longo do tempo.

DÉCADA	ACONTECIMENTO
1940-1950	<ul style="list-style-type: none"> Invenção e desenvolvimento do Radar, durante a 2ª Grande Guerra. RFID inventado em 1948.
1950-1960	<ul style="list-style-type: none"> Início da exploração da tecnologia RFID, experimentações laboratoriais.
1960-1970	<ul style="list-style-type: none"> Desenvolvimento da teoria da RFID. Primeiras aplicações experimentais no terreno.
1970-1980	<ul style="list-style-type: none"> Progressos importantes da RFID. Crescimento dos testes da RFID. Implementações muito iniciais da tecnologia.
1980-1990	<ul style="list-style-type: none"> Massificação das aplicações comerciais da tecnologia RFID
1990-2000	<ul style="list-style-type: none"> Aparecimento de normas standard. A RFID começa a ser amplamente implementada e a fazer parte da vida das pessoas.

Figura 3 - Evolução da tecnologia RFID ao longo do tempo

Fonte: (LANDT, 2001)

3. Características dos Sistemas RFID

A sigla RFID é uma designação genérica para definir tecnologias e sistemas que comunicam através de sinais de rádio frequência e possuem a capacidade de identificar e/ou localizar de forma automática e individual qualquer item físico que possua uma etiqueta Eletrônica RFID associada (WANG, WANG e YANG, 2010), (HODGSON, NABHANI e ZAREI, 2010).

Para operar um sistema RFID, o *reader* envia sinais de rádio numa frequência pré-definida. Estes sinais são recebidos pelas *tags* RFID sintonizadas na mesma frequência do *reader* e que se encontram no raio de leitura deste. As *tags* seguidamente transmitem os dados que contêm armazenados (exemplo código EPC¹ - *Electronic Product Code*) quando interrogadas pelo *reader*. O *reader* recolhe a informação emitida, descodifica-a e transmite-a para o *Middleware* (CHANG, KLABJAN e VOSSSEN, 2010).

Resumidamente, um sistema RFID funciona usualmente da seguinte forma (XIAO, YU, *et al.*, 2006) (INTERMEC, 2009):

- O *reader* emite um sinal de rádio frequência;
- Todas as *tags* sintonizadas na mesma frequência do *reader* e que se encontrem dentro do seu raio de alcance, recebem o sinal através das suas antenas;
- As *tags* selecionadas respondem ao *reader* transmitindo a informação que possuem armazenada;
- O *reader* recebe o sinal da *tag*, via antena, e descodifica-o;
- O *reader* transfere posteriormente os dados recolhidos para o sistema, *Middleware*.

O software utilizado no *Middleware* é o elo de ligação entre o sistema RFID e o sistema TI (Tecnologia de Informação) existente na organização, sendo este responsável pela qualidade e em última instância pela utilização da informação recolhida pelo sistema RFID (HUNT, PUGLIA e PUGLIA, 2007). O *Middleware* desempenha um papel de relevo em

¹ *Electronic Product Code* é um número de série único no mundo, que permite a identificação e pesquisa de um único item.

qualquer sistema RFID, pois é responsável por colocar a informação correta na aplicação correta no momento exato em que ela é necessária, evitando redundâncias de informação.

Chao et al. (2007) consideram a RFID como uma das dez tecnologias com maior poder contributivo do século XXI, que se encontra numa rápida ascensão no mercado, pois as empresas reconhecem os benefícios que dela podem resultar e implementam este tipo de sistemas com o intuito de melhorar a eficiência das suas operações e assim ganhar uma vantagem competitiva face aos seus concorrentes. Muitos são os investigadores que defendem a superioridade da RFID face às restantes tecnologias de Auto-ID, em especial ao código de barras.

Xiao (2006) sumariza as vantagens da RFID face aos códigos de barras (Figura 4) e anuncia que no futuro a RFID poderá mesmo vir a substituir os códigos de barras na sua totalidade. Corroborando, Preradovic e Nemaï (2007) afirmam que, atualmente a tendência indicia-nos para a substituição dos códigos de barras pela RFID, que permite o reconhecimento e identificação unitária de itens, e que possibilitará ultrapassar os obstáculos atuais como a distância necessária para realizar a leitura e automatização que a tecnologia por código de barras possui, os códigos de barras necessitam ser posicionados individualmente de forma que fiquem colocados no campo de leitura do *reader* algo que se torna difícil de realizar automaticamente (MCFARLANE e SHEFFI, 2003).

RFID	Código de Barras
A Informação é específica para cada item	Os produtos semelhantes possuem o mesmo código de barras
A leitura é conseguida a distâncias variáveis	Necessita estar no campo de visão do <i>reader</i> para ser lido
Permite a leitura através de diversos materiais	Não permite
Pode armazenar centenas de bytes de informação	Limitado a 13 dígitos de informação (no caso de códigos de barras lineares)
Um único <i>reader</i> pode identificar um grande número de <i>tags</i> quase simultaneamente	Um <i>reader</i> apenas pode ler um código a cada momento
Sistema robusto, pode ser utilizado em ambientes agressivos.	Não permite a utilização em ambientes agressivos, exemplo, um meio insalubre, demasiada humidade.
Alguns sistemas permitem a limitação da leitura através da introdução de uma palavra-chave na <i>tag</i>	Qualquer leitor pode ler um código de barras que lhe seja compatível
<i>Tags</i> de dimensões reduzidas permitem que a sua aplicação seja feita de forma discreta	Necessita de ser fixado numa superfície plana

Figura 4 - Vantagens da RFID sobre o código de barras

Adaptado: (XIAO, YU, *et al.*, 2006)

No entanto, embora a RFID apresente diversas vantagens sobre os códigos de barras, a transferência total de tecnologias não ocorrerá num futuro próximo e ambas terão primeiramente de coexistir em paralelo durante um longo período de tempo (WU, NYSTROM, *et al.*, 2006).

Preradovic e Nemai (2007) constatam que um motivo pelo qual esta transferência de tecnologias ainda não se concretizou deve-se, em grande parte com o custo atual das *tags* RFID, sendo este muito mais elevado quando comparado ao preço das etiquetas de códigos de barras, porém o grande investimento e investigação que estão a ser desenvolvidos atualmente, com especial ênfase na redução do custo das etiquetas RFID farão com que o preço da tecnologia continue a baixar substancialmente com o avançar dos anos.

A carência atual de recursos humanos especializados na tecnologia RFID, problemas de privacidade, desafios tecnológicos, falta de Standards adotados internacionalmente, problemas por parte das empresas em reconhecer o retorno obtido pelo investimento na tecnologia (*ROI – Return of Investment*), são exemplos de outros desafios que a tecnologia RFID enfrenta (WU, NYSTROM, *et al.*, 2006).

Hardgrave e Miller (2006) acrescentam que em determinadas circunstâncias, como na proximidade de água ou metais, os códigos de barras são mais fidedignos para providenciar taxas de leitura mais precisas e o facto de estes poderem ser colocados ou impressos diretamente em quase todo o tipo de produtos, as *tags* RFID atuais não são adequadas para certos tipos de contentores, são igualmente motivos para que ainda não tenha ocorrido a substituição das tecnologias.

Um Sistema RFID é constituído essencialmente pelos seguintes componentes: (1) *Tags* RFID (etiquetas eletrônicas), fixadas aos itens que se pretendem que sejam individualmente identificados, as quais contêm informações relativas ao objeto em causa; (2) Antenas; (3) *Readers* (Leitores), cuja localização pode ser fixa ou móvel, com a função básica é “interrogar” as *tags* RFID, que se encontram dentro do seu raio de alcance, e posteriormente receber a informação por elas remetida e transmiti-la para o sistema de informação; (4) RFID *Middleware*, software que gere os fluxos de informação entre os diferentes componentes do sistema RFID, processa os dados transmitidos pelo *reader*, e serve como elo de ligação que faça a interface entre o sistema RFID e os (5) sistemas informacionais de gestão que se encontram localizados posteriormente, em organizações de maior escala é comum existirem programas informáticos de gestão/planeamento empresarial como: ERP – *Enterprise*

Resource Planning, MRP – Manufacturing Resource Planing ou WMS – Warehouse Management System.

O fluxo de informação é bidirecional (Figura 5), ou seja, passa dos sistemas de gestão para as *tags* (fluxo de gravação) e das *tags* para os sistemas de gestão (fluxo de leitura). Isto possibilita uma integração entre as informações recolhidas pelo sistema RFID e os sistemas de gestão o que permite a gestão do fluxo de informações dos produtos distribuídos ao longo de um determinado sistema (exemplo, cadeia de abastecimento) e a atualização de informação nos sistemas de gestão (PEDROSO, ZWICKER e DE SOUSA, 2009).

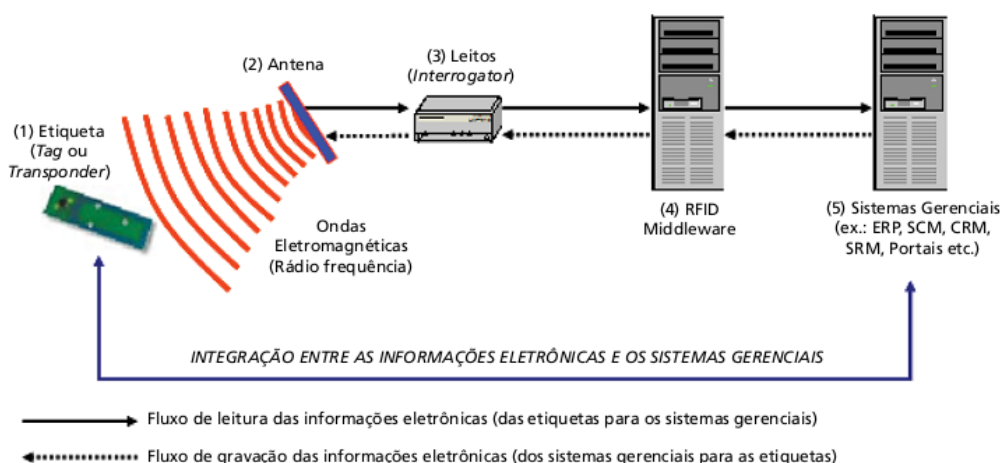


Figura 5 – Componentes e fluxo de informação de um sistema RFID

Fonte: (PEDROSO, ZWICKER e DE SOUSA, 2009)

3.1. Tags RFID

As *tags* RFID enquadram-se dentro de uma classe de dispositivos de rádio denominados de *transponders*. Um *transponder* é uma combinação de um emissor com um recetor (TRANSMitter/resPONDER), desenhado para receber um sinal de rádio específico e automaticamente emitir uma resposta. Na sua forma mais simples um *transponder* recebe um sinal de rádio, e transmite um sinal próprio em resposta, sistemas mais complexos podem transmitir um dígito único, ou múltiplas cadeias de letras e números. Finalmente os *transponders* mais avançados podem realizar cálculos ou processos de verificação e emitir transmissões de rádio encriptadas como medida de segurança (THORNTON, 2006).

As *tags* possuem uma grande variedade de formas e características funcionais, na Figura 6 é possível observar algumas formas e tamanhos que as *tags* RFID podem adquirir.

As *tags* RFID podem ser agrupadas em: (i) *tags* ativas “*active tags*”, e (ii) *tags* passivas “*passive tags*”, caso possuam ou não fonte de energia própria. Existe uma subcategoria onde se encontram as *tags* semi-passivas “*semi-passive tag*”; (i) *Chip tags* ou (ii) *chipless tags*, consoante a existência ou não de circuitos integrados/chips nas *tags* (ROBERTS, 2006), (DOBKIN, 2007); Segundo a capacidade que as *tags* possuem de serem ou não reprogramadas (alteração da informação contida no seu interior), existem as seguintes: (i) “*Read Only Memory*” (ROM) *tags*, (ii) “*Write Once Read Many*” (WORM) *tags* e (iii) “*Read Write/Random Access Memory*” (RAM) *tags* (PRERADOVIC e KARMARKAR, 2006).



Figura 6 - Possíveis tamanhos e formas de *tags* RFID

Fonte: (THORNTON, 2006)

As *tags* RFID são compostas por uma antena, opcionalmente podem conter um pequeno chip de silicone com a capacidade de guardar algumas quantidades de informação (Figura 7) e revestidas por material de encapsulamento. O formato e a dimensão das *tags* podem variar consoante a utilização a que se destinam e a tecnologia utilizada, podendo as mais recentes ser do tamanho de pequenas esferas quase invisíveis ao olho humano e capazes de serem embutidas em tintas usadas na pintura de automóveis, notas e moedas (XIAO, YU, *et al.*, 2006).

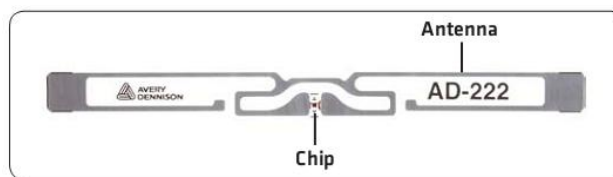


Figura 7 - Componentes de uma tag RFID

Fonte:(INTERMEC, 2009)

3.1.1. Tags passivas versus tags ativas

Um critério importante utilizado para a distinção dos diferentes sistemas RFID, é a forma como é feito fornecimento de energia para a tag. Tendo por base este critério, as tags podem ser divididas em dois grupos, tags passivas “*passive tags*” e tags ativas “*active tags*” (Figura 9).

As tags passivas não possuem uma fonte de energia própria, toda a alimentação necessária para o seu funcionamento é fornecida pelo *reader* via antena, que irradia energia através de um campo eletromagnético (FINKENZELLER, 2010). Estas tags dependem da rectificação da corrente alternada recebida do *reader* para funcionar e modular (modulação *backscatter*, Figura 8) os sinais a serem transmitidos (ou refletidos) ao *reader* com as informações existentes na tag (DOBKIN, 2007). A obtenção de energia a partir do campo eletromagnético do leitor é alcançada através de uma propriedade eletromagnética denominada *Near Field* onde é utilizado o campo eletromagnético produzido pelo *reader* para gerar uma corrente elétrica reduzida, mas, ainda assim, com energia suficiente para que a tag passiva funcione o tempo necessário para emitir um sinal de resposta de volta ao *reader* (THORNTON, 2006).

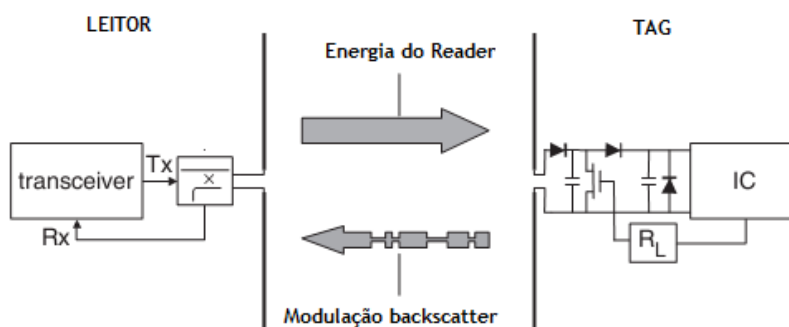


Figura 8 - Princípio de funcionamento sistema RFID passivo, modulação *backscatter*

Adaptado de: (PENTTILÄ, KESKILAMMI, *et al.*, 2006)

As *tags* ativas têm um alcance de leitura superior (Figura 10), quando comparadas com as *tags* passivas. Ao possuírem uma fonte de energia própria (bateria), esta dá-lhes a capacidade de receber e transmitir informação sem a necessidade de serem alimentadas pelo *Near Field* produzido pelo *reader* (PRERADOVIC e NEMAI, 2007).

Ao comunicar com o *reader*, as *tags* ativas são as primeiras a iniciar a transmissão de dados, pois emitem de forma contínua um sinal de rádio frequência, por seu lado as *tags* passivas necessitam de ser primeiramente interrogadas pelo *reader* para se faça transmissão dos dados guardados no seu interior.

As *tags* ativas têm dimensões maiores e o seu custo é superior quando comparadas com *tags* passivas, o facto de possuírem uma bateria própria limita-lhes o seu tempo de vida útil, por sua vez, as *tags* passivas têm um tempo de vida indefinido, são mais leves e mais baratas, porém a sua capacidade de armazenamento é bastante reduzida em relação às *tags* ativas, sendo mais suscetíveis a interferências eletromagnéticas (ROBERTS, 2006).



Figura 9 - Exemplos de *tags* ativas a passivas

Adaptado: (RFID Technologies, 2007)

Existe uma subcategoria de *tags* denominada de *tags* semi-passivas “semi-passive *tags*”, que á semelhança das *tags* ativas possui uma fonte própria de energia, no entanto, a principal diferença reside no facto de esta fonte de energia não estar permanentemente ativa e apenas ser utilizada para alimentar os circuitos internos da *tag*, pois a energia necessária para

a transmissão de informação é conseguida, da mesma forma que as *tags* passivas, ou seja, através da propriedade eletromagnética *Near Field*.

À semelhança das *tags* passivas, as *tags* semi-passivas têm primeiro de reconhecer o sinal de interrogação enviado pelo *reader* e só depois emitir o seu sinal de resposta. Estas *tags* podem ser vistas como um tipo de *tag* híbrida entre as passivas e ativas.

As *tags* semi-passivas consomem menos energia quando comparadas com as *tags* ativas e têm um alcance de leitura superior à passivas, contudo devido á presença da bateria, as suas dimensões e o seu custo são consideravelmente superiores quando confrontadas com as *tags* passivas (PRERADOVIC e KARMARKAR, 2006) (SWEENEY II, 2005).

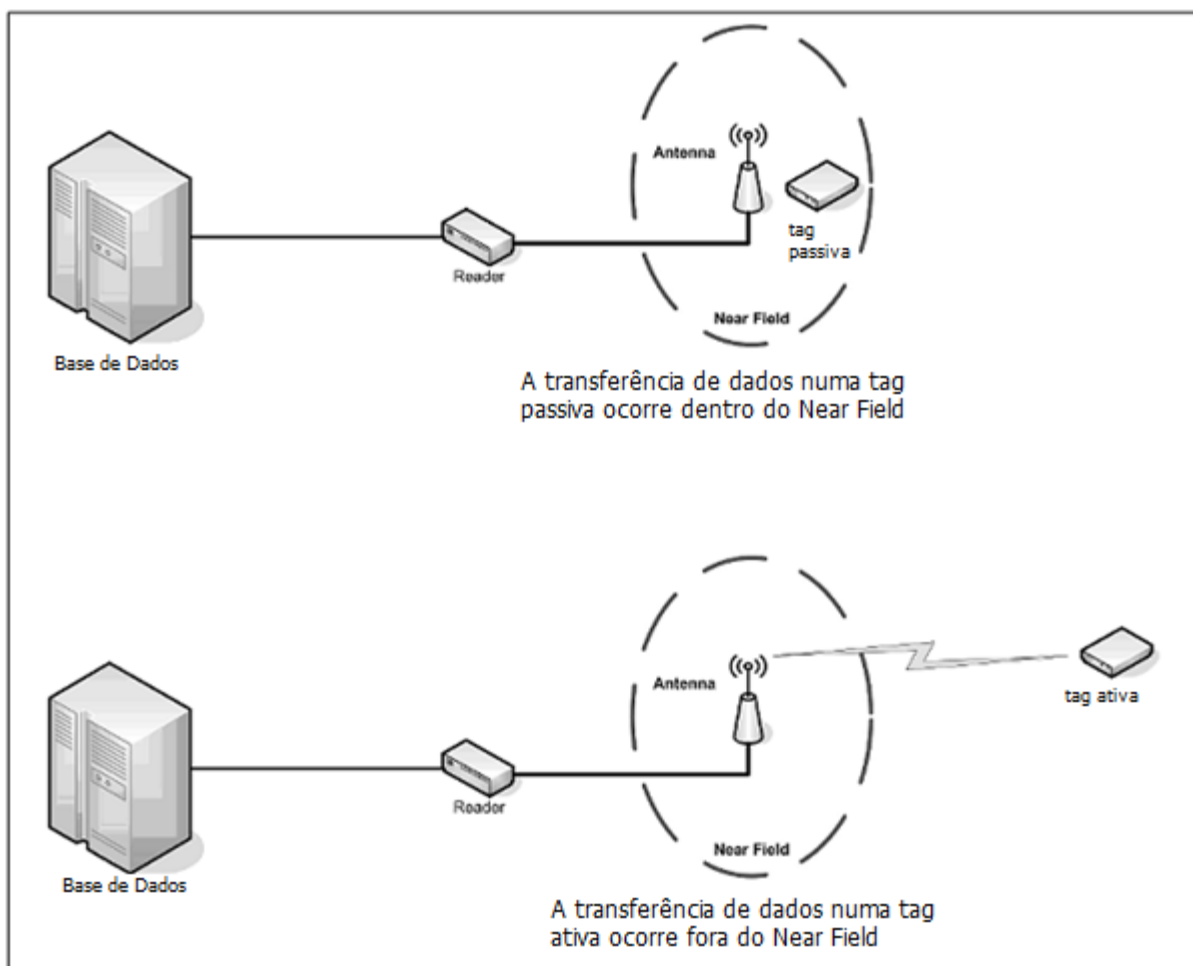


Figura 10 – Ilustração das distâncias de leitura active/passive tags

Fonte: (THORNTON, 2006)

3.1.2. *Chip tags* versus *Chipless tags*

Outra forma de caracterizar as *tags* RFID é consoante a presença ou não de um chip (ou circuito integrado) no seu interior. As *tags* que possuem um chip são designadas por *chip tags* e as que não possuem um chip denominam-se de *chipless tags*. Preradovic e Karmarkar (2006) salientam que estas duas categorias de *tags* diferem fundamentalmente nos seus princípios operacionais e quanto ao seu consumo de energia.

Uma *chip tag* contém um *chip* interno que possibilita o armazenamento de uma quantidade superior de informação quando comparada com uma *tag* que não possua um *chip* (XIAO, YU, *et al.*, 2006).

Todas as *chipless tags* são exclusivamente do tipo passivo, uma vez que não possuem um circuito extra para armazenamento de dados e não requerem a presença de uma fonte própria de energia. As *chip tags* por sua vez tanto podem ser do tipo passivo como ativo consoante a quantidade de informação que se pretende que estas armazenem.

Uma *tag* sem *chip* é mais limitada em relação ao seu desempenho, capacidade de armazenamento e transferência de dados e não possui competências que lhe permitam o processamento de dados. No entanto quando comparada com a *tag* com *chip* o seu custo é mais baixo o que pode justificar a sua utilização em algumas aplicações onde não seja necessária a troca de grandes quantidades de informação.

As *chip tags* podem ser utilizadas, por exemplo, para identificação, cadastro e rastreabilidade de animais, enquanto as *chipless tags* são colocadas atualmente em contracapas de livros (AZAMBUJA, JUNG, *et al.*, 2011), como sistema de segurança antirroubo.

Uma comparação entre *chip tags* e *chipless tags* é apresentada na Figura 11.

	Chipless tags	Chip tags
Existência de Chip	Não possui.	Possui.
Custo	Menos dispendiosa	Relativamente dispendiosa.
Utilização	Internamente numa organização.	Aplicação em massa no mercado.
Alcance de utilização	Reduzido.	Comparativamente mais longo.
Tamanho	Menores dimensões.	Dimensões relativamente superiores.
Peso	Mais leve.	Consideravelmente mais pesada.

Figura 11 - Comparação entre *chipless tags* e *chip tags*

Fonte: (XIAO, YU, *et al.*, 2006)

A diferença entre *tags* RFID também pode ser constatada pelo tipo de memória que estas utilizam. Preradovic e Karmarkar (2006) classificam-nas em três tipos distintos: (i) *Read Only Memory* - ROM; (ii) *Write Once Read Many* - Worm; e (iii) *Read Write/Random Access* – RW/RA.

Dependendo da aplicação que é pretendida da *tag*, assim como do tipo de *tag* a utilizar, a quantidade de memória que esta pode carregar pode variar entre alguns bytes a vários megabytes.

As *tags* do tipo ROM são exclusivamente de leitura e apenas podem ser programadas uma única vez, normalmente feita no momento da sua produção não podendo esta ser posteriormente apagada ou modificada. Geralmente os dados introduzidos consistem apenas num número de identificação único (código EPC), composto apenas por alguns bytes. Este tipo de *tag* é bastante utilizado em pequenas aplicações comerciais, sendo impraticável o seu uso quando existe a necessidade de personalização dos dados consoante a aplicação a que se destinam, devido ao seu funcionamento simples. Numa *tag* do tipo ROM as dimensões da área reservada ao chip podem ser minimizadas, o que resulta num consumo de energia reduzido e num baixo custo de produção (FINKENZELLER, 2010).

Teoricamente, *tags* do tipo WORM podem ser programadas apenas uma vez, sendo esta programação normalmente feita pelo utilizador e não no momento da sua produção. Na prática porém, existem *tags* com este tipo de memória que podem ser reprogramadas cerca de cem vezes, mas caso a *tag* seja reprogramada excessivamente poderá ficar permanentemente danificada e inoperacional (PRERADOVIC e KARMARKAR, 2006).

Tags com memória *Read Write/Random Access* são mais versáteis, pois permitem ser programadas e reprogramadas bastantes vezes (o número de ciclos de reprogramação pode ir até cem mil vezes). A informação contida no seu interior pode ser atualizada continuamente e em tempo real o que acarreta inúmeras vantagens quando da sua utilização, no entanto, *tags* do tipo RW/RA acarretam alguns problemas ao nível da segurança da informação, o seu custo de produção também é mais elevado quando comparado com as outras *tags*. Preradovic e Karmarkar (2006) consideram estes os motivos pelos quais *tags* RW/RA ainda não são amplamente utilizadas atualmente.

3.1.3. Classes de *tags* e *Electronic Product Code*

Uma das vantagens da tecnologia RFID reside na capacidade que as *tags* RFID possuem para armazenar na sua memória um código que identifica de forma individualizada qualquer tipo de item (ZHU, MUKHOPADHYAY e KURATA, 2011), este código é designado de EPC (*Electronic Product Code* ou Código Eletrônico de Produto).

Os códigos EPC são desenvolvidos e padronizados pela organização *EPCGLOBAL* (organização internacional que gera padrões para atribuição dos números EPC), estes são constituídos por um conjunto de bits e divididos em vários campos (Figura 12), possuindo cada, informações específicas: (i) Número da versão (*Header*), que especifica o comprimento, tipo, estrutura, versão do EPC usado pela *tag*, atualmente existem códigos com 64, 96 e 256 bits; (ii) Fabricante (*EPC Manager*) número único atribuído a cada organização que utiliza EPC para identificar os seus produtos; (iii) Produto (*Object Class*), código único atribuído a cada tipo de produto produzido pela organização; (iv) Número de série (*Serial Number*) permite identificar especificamente cada produto identificado na *Object Class* (AZAMBUJA, JUNG, *et al.*, 2011), (JAIN e TANWER, 2010).

Um EPC de 96 bits pode identificar mais de 268 milhões de fabricantes, aproximadamente 16 milhões de produtos diferentes e cada fabricante pode utilizar quase 69 milhares de milhão de números de série (SARAC, ABSI e DAUZÈRE-PÉRÈS, 2010).

Cada fabricante possui um número único para cada linha de produção *Object Class*, cada produto individual é identificado por um número de serie. Os fabricantes possuem a autonomia de escolherem o número do produto assim como o número de serie que desejarem, isto permite ao fabricante a capacidade de identificar individualmente cada produto (THORNTON, 2006).

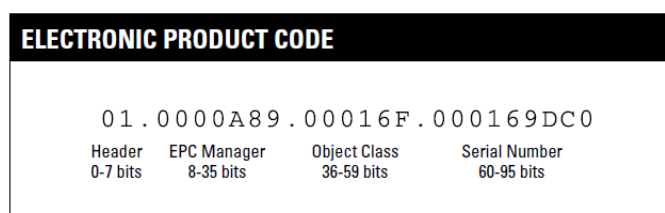


Figura 12 - Estrutura do EPC

Fonte: (EPC Global)

Sweeney II (2005) identifica duas razões que justificam o facto dos códigos EPC apenas possuírem códigos numéricos de identificação individualizados e não informação descritiva sobre o produto que identificam (i) Segurança, o código EPC remete para um ficheiro numa base de dados que contem a informação sobre o produto, a leitura de um número EPC não possui qualquer utilidade se este não for pesquisado e anexado à informação do produto presente base de dados. (ii) Custo, um dos objetivos a atingir é a produção de uma *tag* RFID de custo reduzido. A fim de obter o menor custo possível, os componentes de cada *tag* necessitam ser tão minimalistas quanto possível, o circuito integrado (IC) existente em cada *tag* é um componente que aumenta consideravelmente o preço desta, logo quando menores os requisitos de memória mais simples será o IC e consequentemente mais baixo será o seu valor total.

De forma a facilitar a distinção entre os diferentes tipos de *tags*, a *EPCGLOBAL* estabeleceu uma estrutura de classes distintas para a classificação dos hardwares das *tags* RFID consoante as características e funcionalidades que estas possuem (Figura 13).

Classe da <i>tag</i>	Tipo de <i>tag</i>	Características
Classe 1	Passiva	Compostas por um número EPC, identificador de <i>tag</i> (<i>Tag ID</i>), opcionalmente poderá ter uma senha para controlo de acesso aos dados e memória adicional para o utilizador.
Classe 2	Passiva	As mesmas características das <i>tags</i> Classe 1, acrescidas de ID superior, mais memória adicional para o utilizador, e controlo de acesso aos dados.
Classe 3	Semi-passiva	Todas as características das <i>tags</i> Classe 2, acrescidas de uma fonte de energia. Estas podem possuir sensores para medição de parâmetros físicos (temperatura, humidade, etc), e opcionalmente memória para armazenamento dos dados recolhidos pelos sensores. As <i>Tags</i> da Classe 3 são dispositivos passivos logo necessitam que um <i>reader</i> inicie a comunicação.
Classe 4	Ativa	Possuem todas as funcionalidades das <i>tag</i> Classe 3, têm mais a capacidade de transmitir e iniciar comunicação tanto com o <i>reader</i> como com outras <i>tags</i> , característica principal de uma <i>tag</i> ativa.

Figura 13 - Classes de *tags*

Adaptado de: (AZAMBUJA, JUNG, *et al.*, 2011) e (EPCGLOBAL, 2008)

3.1.4. Frequências de operação

A frequência em que o sistema RFID opera designa a intensidade das ondas de rádio utilizadas para a comunicação entre os diversos elementos do sistema, este é um fator

importante que pode determinar o alcance do sistema RFID, o grau de imunidade a interferências, entre outros fatores que podem afetar a performance do sistema.

A grande maioria dos sistemas RFID funciona em uma de quatro frequências de operação possíveis: (i) baixa frequência (LF – *Low Frequency*) que se situa na gama de 125 até 134 KHz; (ii) alta frequência (HF – *High Frequency*) nos 13.56 MHz, (iii) ultra-alta frequência (UHF – *Ultra High Frequency*) de 860 a 930 MHz e (iv) micro-ondas (*Microwave*) localizadas 2.4 aos 5.8 GHz (TAJIMA, 2007), (THORNTON, 2006).

Sendo a RFID uma tecnologia que comunica utilizando ondas de rádio (as ondas de rádio são parte do espectro eletromagnético, sendo que este espectro já se encontra praticamente todo utilizado ao nível mundial), e de forma a evitar a ocorrência de interferências entre outros dispositivos que também utilizem ondas de rádio (Figura 14), por exemplo: rádios; televisões; equipamentos aeronáuticos e marítimos; telefones móveis, e que operem nas mesmas bandas de frequências definidas para a RFID, bandas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*, bandas sem licenciamento obrigatório, reservadas para aplicações industriais, científicas e médicas cuja utilização está sujeita a normas impostas por parte das entidades reguladoras de cada país), as frequências disponíveis para a tecnologia RFID encontram-se significativamente restringidas (Ruggedized Mobile Business Solutions, 2010), (ANGELES, 2005).

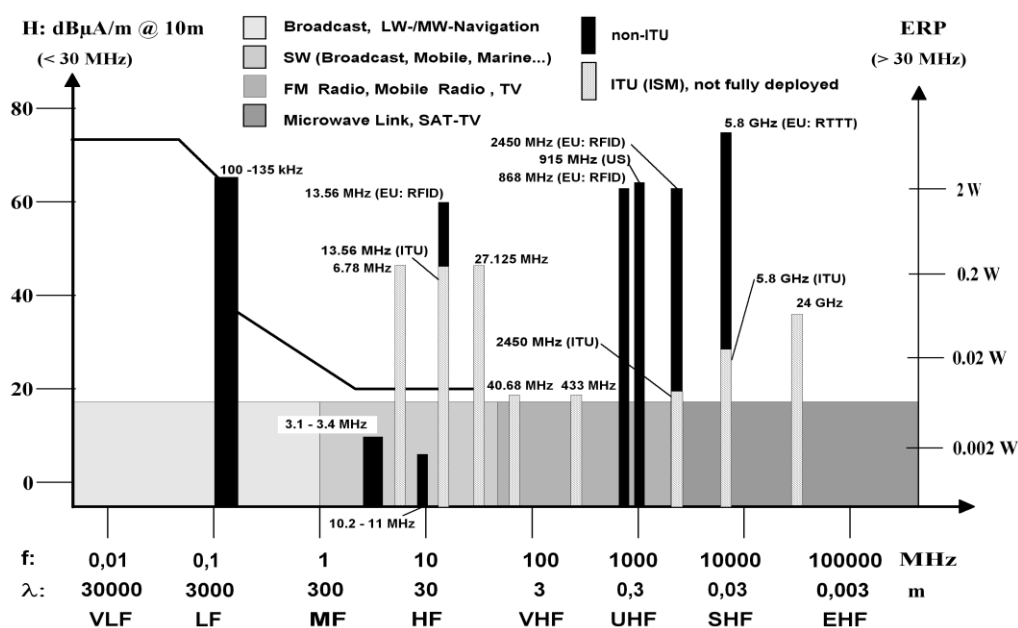


Figura 14 - Representação frequências admitidas em sistemas RFID

Fonte: (FINKENZELLER, 2010), Página 156.

É importante salientar que a atribuição das frequências para o funcionamento dos sistemas RFID é normalmente regulamentada através de legislação definida por organismos governamentais. Internacionalmente as frequências designadas para a utilização de sistemas RFID diferem, embora esteja a ser realizado um intenso esforço quer por parte da ISO quer por parte organizações semelhantes para que se atinja uma standardização internacional. A título de exemplo, a Europa utiliza uma frequência de 868 MHz para sistemas RFID de UHF enquanto os Estados Unidos da América utilizam 915 MHz (ROBERTS, 2006).

A frequência em que opera um sistema RFID afeta a performance do sistema assim como as características dos componentes que o constituem, nomeadamente: o design físico e as dimensões das antenas, o alcance de leitura entre a *tag* e o *reader*, a capacidade de resistência a interferências causadas por outros sistemas elétricos e que utilizem igualmente ondas de rádio (ANGELES, 2005).

A Figura 15 apresenta de forma simplificada as principais características das diferentes gamas de frequências.


	LF 125 - 134 KHz	HF 13.56 MHz	UHF 860 - 930 MHz	Microwave 2.4 - 5.8 GHz
Alcance de leitura	<0.5 m	≈1 m	≈3 m	≈1 m
Velocidade de leitura	Lenta	Média	Média	Rápida
Características	Custo elevado; Menor atenuação de sinal na presença de água; Necessita de uma antena de maiores dimensões; Alcance de leitura bastante reduzido	Custo inferior às <i>tags</i> LF; Antenas de menores dimensões; Adequada para aplicações que não necessitam de grandes distâncias de leitura;	Possuem um bom equilíbrio entre alcance e velocidade de leitura. Adequadas especialmente quando é necessária a leitura de um grande número de <i>tags</i> .	Possuem as taxas de leitura mais rápidas; Frequências muito suscetíveis a atenuações na presença de metais e líquidos
Aplicações principais	Identificação de animais; Recipientes reutilizáveis.	Controlo de acessos; Controlo de bagagens.	Gestão de cadeias de abastecimento; Rastreamento de contentores	Porticos automaticos; Identificação de veiculos.
Capacidade de leitura junto a superfícies de metal ou água.	Melhor  Pior			

Figura 15 - Características das *tags* que operam em diferentes frequências

Adaptado de: (Allied Business Intelligence Inc. RFID White Paper 2002) e (JAIN e TANWER, 2010)

As *tags* RFID passivas que utilizam frequências UHF são as *tags* que atualmente possuem uma maior aceitabilidade e utilização no mercado, o facto de necessitarem de uma antena extremamente pequena e a não existência de bateria, permite que o seu custo de produção seja mais baixo quando comparado com outros tipos de *tags*. Estas são especialmente utilizadas na gestão de cadeias de abastecimento (SCM – *Supply Chain Management*) para efetuar o rastreamento de produtos (a sua grande utilização na SCM deve-se especialmente ao facto de os mandatos emitidos pela Wal-Mart e pelo DoD terem exigido aos seus fornecedores a colocação de *tags* passivas UHF nos seus produtos). Quando um determinado produto possui uma *tag* deste tipo o seu paradeiro pode ser seguido de forma automática, o que permite obter uma visibilidade total sobre o inventário e maximiza a eficiência da cadeia de abastecimento (WU, NYSTROM, *et al.*, 2006).

3.2. *Reader*

Os *readers* RFID, igualmente denominados de interrogadores (*interrogators*), são dispositivos essenciais em qualquer sistema RFID. A sua função é reconhecer a presença de *tags* RFID dentro do seu raio de alcance e estabelecer uma comunicação com estas, transmitindo e recebendo energia por irradiação eletromagnética. A antena da etiqueta recebe esta irradiação, e converte em energia elétrica (KHAN, 2008). Em síntese, um *reader* é um equipamento eletrônico que emite e recebe sinais de rádio, consiste essencialmente num transmissor (TX) e receptor (RX) de RF.

De forma a estabelecer a conexão com as *tags*, o *reader* RFID necessita de ter uma, ou mais, antenas, que podem ser posicionadas em diferentes locais estratégicos, de forma a maximizar a capacidade de leitura das etiquetas.

Sweeney II (2005) estabelece os vários passos existentes num ciclo de leitura de um leitor RFID:

1. A energia necessária para a alimentação do *reader* é fornecida por uma fonte externa, como por exemplo, uma bateria ou rede elétrica de corrente alternada (CA);
2. No interior do *reader* um processador de sinal digital (DSP- *Digital Signal Processor*) e um processador controlam o fluxo de eletricidade de uma forma bastante específica, modulando a frequência, gerando e controlando a amplitude da onda rádio gerada pelo *reader*;
3. O fluxo de eletricidade é dirigido para a antena, por meio de um condutor coaxial;

4. A antena emite a sinal de RF que transporta informação utilizando um processo denominado de Modulação;
5. Após a recepção a antena do *reader* recebe o sinal emitido pelas *tags*, o leitor envia esse sinal de volta aos seus componentes elétricos;
6. Os componentes decodificam as pequenas variações do sinal e transformam-nos em informação útil, que transmitem para os sistemas computacionais seguintes.

Um leitor possui um alcance de leitura limitado, denominado de Zona de Interrogação, dependendo da frequência em que o sistema RFID funciona e da potência do leitor, este alcance pode variar entre poucos centímetros e vários metros, consoante a aplicação do sistema RFID. A definição da zona de interrogação de um *reader* é uma questão técnica importante, pois quando as zonas de interrogação de dois *readers* se cruzam o sinal emitido por um *reader* pode interferir com o sinal emitido pelo outro, o que resultará numa colisão entre ambos e um impedimento da leitura das *tags* (ANGELES, 2005).

3.3. Antenas

As antenas são dispositivos passivos que emitem ou recebem sinais de RF e estão presentes em todos os sistemas que comunicam por RF. Os sistemas RFID possuem antenas tanto nas *tags* como nos *readers*. Um sinal de RF, gerado por um transmissor de rádio viaja através de uma linha de transmissão (usualmente um cabo coaxial) para uma antena. A antena ligada ao transmissor é o dispositivo que emite a RF (sob a forma de um campo eletromagnético) para um receptor a uma determinada distância. A antena receptora capta a energia de RF, à medida que o campo eletromagnético atinge a antena de recepção é induzida uma tensão, posteriormente utilizada para recuperar a informação da RF transmitida (Antenna Theory, 2005).

O funcionamento de uma antena está dependente da banda de frequências para a qual esta foi projetada, se o sinal de RF estiver fora da banda de operação este é rejeitado pela antena.

Nos *readers* a concepção das antenas é baseada em parâmetros específicos de cada aplicação, tais como a alcance de leitura pretendido, a direção e largura do feixe de RF emitido, a forma da antena, etc. Os *readers* RFID podem ser compostos por uma ou múltiplas antenas, os que possuem uma única antena utilizam-na tanto para a transmissão como para a recepção de dados, o que poderá criar problemas operacionais, uma vez que a comunicação

nas duas direções pode ocorrer no mesmo instante. Uma forma de evitar esta ocorrência é a utilização de duas antenas em que uma é utilizada exclusivamente para a emissão e outra para a recepção de RF. Outra opção é a utilização de múltiplas antenas para emissão e recepção de RF, neste caso o *reader* tem de seguir uma sequência de funcionamento onde apenas poderá manter uma antena ligada a cada instante encontrando-se as restantes desligadas a fim de evitar interferências entre as RF das antenas. Nas *tags* RFID as antenas necessitam ser cuidadosamente projetadas por forma a garantir que esta consiga receber a alimentação necessária para o seu funcionamento (PENTTILÄ, KESKILAMMI, *et al.*, 2006).

As antenas podem ser de diferentes tipos e com designs distintos, a Figura 16 apresenta exemplos de algumas configurações de antenas de *tags* RFID que operam nas diferentes bandas de frequências. O tipo de antena mais utilizada nas *tags* RFID é o dipolo de meia onda, operando na frequência de banda UHF (AROOD e DEAVOURS, 2007).

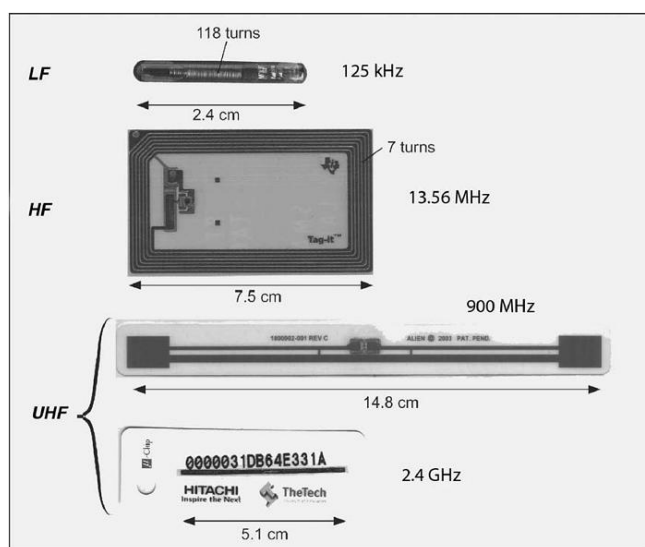


Figura 16 - Exemplos de antenas de *Tags* que operam em diferentes frequências

Fonte: (DOBKIN, 2007)

3.3.1. Caracterização RF

As RF são representadas por ondas periódicas que se propagam no ar caracterizadas por uma amplitude, frequência, período, comprimento de onda e velocidade.

A amplitude (A) de uma onda RF é a medida da extensão de uma perturbação durante um ciclo da onda, medida em dB (decibéis).

O comprimento de onda, usualmente representado por λ é a distância entre valores repetidos que uma onda sonora percorre durante um período, sendo que o período de uma onda é o intervalo de tempo necessário para que ela complete uma oscilação. (BISQUOLO)

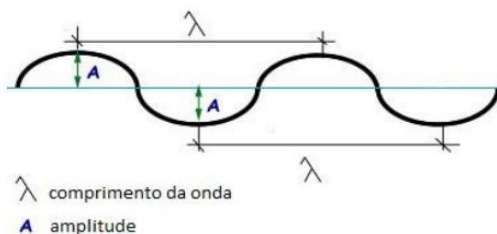


Figura 17 - Representação da amplitude e comprimento da onda.

Adaptado de: (BISQUOLO)

A frequência f é o número de ciclos (repetições) executada pela onda durante o período de tempo de um segundo t , sendo esta medida em Hertz (Hz).

$$f = \frac{1}{t} \quad (1)$$

O comprimento de onda λ é igual à velocidade de propagação da onda c (299.792,458 km/s \approx 300.000 km/s = 300.000.000 m/s) a dividir pela frequência. (AZAMBUJA, JUNG, *et al.*, 2011)

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

O sistema RFID utilizado na realização dos experimentos deste trabalho opera na banda de frequências UHF localizada entre os 860 a 930 MHz, mais concretamente na frequência de 915 MHz.

3.3.2. Ganho de uma antena

Antenas sendo elementos passivos que não amplificam sinais. O ganho de uma antena expressa a relação desta com uma antena de referência (antena isotrópica). A antena isotrópica é uma antena hipotética com a capacidade de irradiar RF em todas as direções de

forma simétrica, uma antena real irradia mais energia em algumas direções do que em outras. Uma vez que uma antena não consegue incrementar a energia que recebe, o total da energia irradiada por uma antena real é o mesmo que a irradiada por uma antena isotrópica quando ambas são alimentadas pelo mesmo transmissor, logo uma antena real irá irradiar mais energia em determinadas direções do que outras quando comparada com uma antena isotrópica. O ganho de uma antena numa dada direção é a quantidade de energia irradiada nessa direção em comparação com a energia que uma antena isotrópica iria irradiar na mesma direção, quando induzida com uma potência de entrada semelhante (WADE, 1998), uma antena do tipo dipolo de meia onda, por exemplo, tem a concentração principal de potência ao longo do seu plano equatorial (Figura 18). Uma antena com um ganho baixo emite RF com a mesma potência em todas as direções, enquanto uma antena com um ganho elevado emite RF preferencialmente apenas em determinadas direções.

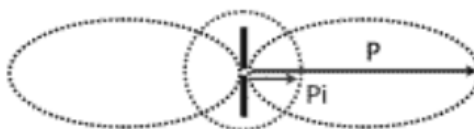


Figura 18 - Comparação das direções de irradiação de uma antena isotrópica (P_i) e uma antena dipolo (P)

Fonte: (SOARES, 2007)

A Figura 18 exemplifica a curva aproximada da potência irradiada por um dipolo de meia onda. Onde o vetor traçado P representa a potência irradiada por um dipolo de meia onda nessa mesma direção e o vetor P_i apresenta a potência de irradiação máxima de uma antena isotrópica, igual em todas as direções, na mesma posição do dipolo e alimentada com a mesma potência de transmissão.

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

$$dBi = 10 \log \frac{P}{P_i} \quad (3)$$

A unidade de medida para o ganho é o dBi , um valor em decibéis em relação a uma antena isotrópica. Uma antena isotrópica tem, portanto, ganho igual a 0 dB (SOARES, 2007).

O ganho é definido como:

$$G = \frac{\text{potência máxima recebida (radiada) a partir de uma dada antena}}{\text{potência máxima recebida (radiada) a partir de uma antena de referência}} \quad (4)$$

Tendo em consideração uma eficiência de 100%, o valor do ganho (G) de uma antena dipolo de meia onda em relação a uma antena isotrópica é 2,1 dBi (AZAMBUJA, 2011).

3.3.3. Dipolo de meia onda

A antena do tipo dipolo é das antenas mais simples utilizadas para a captação de RF, na sua forma mais básica esta é formada por dois condutores elétricos retilíneos, cada um medindo $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda (λ) da radiação a ser transmitida ou recebida, o comprimento total de um dipolo é igual à $\frac{1}{2}$ do comprimento de onda que se deseja captar, a alimentação deste tipo de antenas é feito pelo centro (Figura 19) (SOARES, 2007).

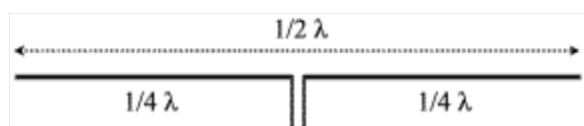


Figura 19 - Exemplo de uma antena dipolo de meia onda

Fonte: (SOARES, 2007)

A polarização de uma antena é a orientação do campo elétrico, da onda eletromagnética em relação à superfície da Terra e é determinada pela estrutura física e orientação da antena, a onda eletromagnética é composta por um campo elétrico e um campo magnético perpendicular entre si. Quando o campo elétrico é vertical em relação à terra, a onda está polarizada verticalmente, se o campo elétrico é horizontal em relação à terra a onda está polarizada horizontalmente. As antenas do tipo dipolo podem ser polarizadas verticalmente ou horizontalmente, se o campo elétrico se encontra na posição horizontal a polarização do dipolo é horizontal, se o campo elétrico está na vertical a polarização da antena dipolo é vertical (WADE, 1998).

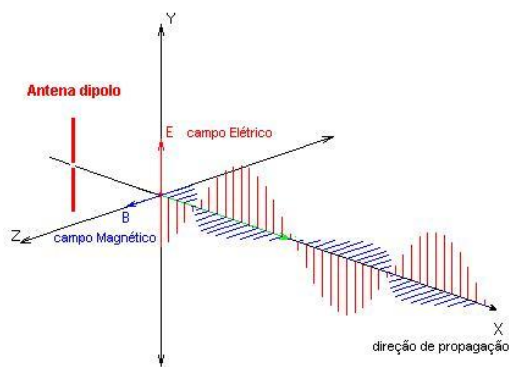


Figura 20 - Polarização Vertical e Horizontal

Fonte: (PY4ZBZ, 2008)

3.3.4. Antena Yagi

A antena de Yagi é uma antena direcional, formada por um dipolo de meia onda que funciona como elemento excitador (elemento ativo), um refletor e um ou mais elementos diretores (ou parasitas). Estas antenas são as que oferecem um maior alcance, no entanto apenas são capazes de cobrir uma área específica para onde são direcionadas. (SOARES, 2007)

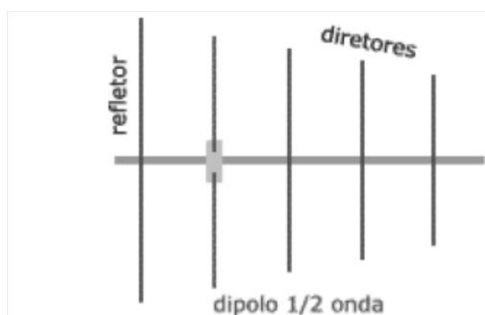


Figura 21 - Antena de Yagi

Fonte: Soares 2007

Na Figura 21, é possível observar os diferentes elementos que compõe a antena, o elemento refletor localiza-se atrás do dipolo de meia onda e tem a função de direcionar as RF apenas numa direção.

O elemento excitador é alimentado diretamente por uma fonte de energia sendo normalmente o seu tamanho menor que o refletor e maior que os diretores. Por fim, os diretores são elementos parasitas, cujos tamanhos variam de acordo com a distância entre os elementos, o número destes, a espessura e a largura de banda pretendida.

A onda eletromagnética emitida pelo excitador induz uma corrente no elemento diretor que, por sua vez, re-irradia parte da energia recebida. A fase da corrente neste elemento depende do seu comprimento e da distância de separação entre este e o elemento ativo (OLIVEIRA, 2008). A Figura 22 representa a curva aproximada da potência irradiada por uma antena Yagi

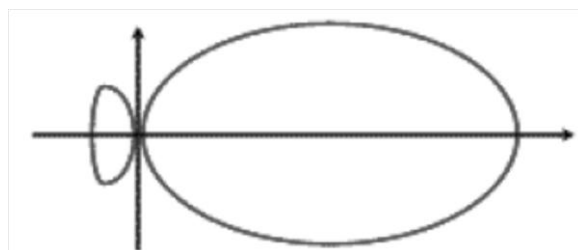


Figura 22 – Representação da direção de radiação de uma antena Yagi

Fonte: (SOARES 2007)

3.4. *Middleware*

Se a interface entre o sistema de gestão de uma organização e o *reader* do sistema RFID for realizada de forma direta, isto é, sem a existência de nenhum software que faça a gestão dos fluxos de informação e que funcione como elo de ligação entre os dois sistemas, todas as informações recolhidas pelo sistema RFID serão enviadas em bruto para o sistema de gestão. Cada *reader* que esteja conectado ao sistema RFID lê as informações de todas as *tags* que se encontrem dentro do seu alcance de leitura, o que poderá originar milhares de leituras de *tags* por segundo, incluindo *tags* que são lidas múltiplas vezes (KHAN, 2008).

Isto resultará numa grande quantidade de informação que não possuirá utilidade para a gestão da organização. Para que os dados recolhidos possam ser utilizados de forma eficiente, é necessário a existência de um elemento que faça a integração de ambos os sistemas e realize um tratamento, filtragem e gestão do grande volume de informações, este elemento é denominado de RFID *middleware*.

O *middleware* deve realizar as seguintes funções: (i) Gestão do *reader* – o *middleware* deve permitir a configuração, monitorização e coordenação dos *readers*, uma organização de grande dimensão pode possuir centenas de *readers* espalhados pelas suas instalações, a monitorização e gestão de todos estes dispositivos será feita de forma mais eficiente através do software *middleware*; (ii) Gestão dos dados – Processar e filtrar os dados em bruto recolhidos pelos vários *readers* do sistema RFID e permitir apenas o envio de

informação considera útil para os sistemas de gestão; (iii) Integração entre aplicações – Agregar de forma fiável o sistema RFID e o sistemas de gestão ERP, SCM, WMS, etc.(WANG, WANG e YANG, 2010).

4. Aplicações da tecnologia RFID

Quando uma nova tecnologia é desenvolvida e o potencial da sua aplicação é comprovado, as empresas consideram introduzi-la nos seus processos como forma de gerar valor acrescentado para os seus clientes e melhorar o seu desempenho operacional em termos de custos, qualidade, velocidade e flexibilidade, etc.(FERRER, DEW e APTE, 2010). A tecnologia RFID é um exemplo deste tipo de tecnologia, que possui atualmente a atenção do mundo empresarial e industrial, estando implementada numa grande variedade de indústrias com uma variedade ainda maior de usos.

Os executivos e gerentes de grandes empresas compreenderam a importância da RFID e começam a avaliar novas formas de a aplicarem nas suas corporações de forma a retirarem o máximo benefício dela (LIAO, LIN e LIAO, 2011). Com o custo da tecnologia a baixar significativamente nos últimos anos e a sua crescente disseminação um número cada vez mais significativo de empresas começa a avaliar a hipótese de adoção da RFID.(HUNT, PUGLIA e PUGLIA, 2007).

Um estudo efetuado pela IDTechEx, (IDTECHEX, 2008), prevê que o valor do mercado da tecnologia RFID será cinco vezes superior no ano de 2013 em relação ao ano de 2008 (Figura 23), e que o número de *tags* RFID transacionadas será aproximadamente trezentas vezes superior.

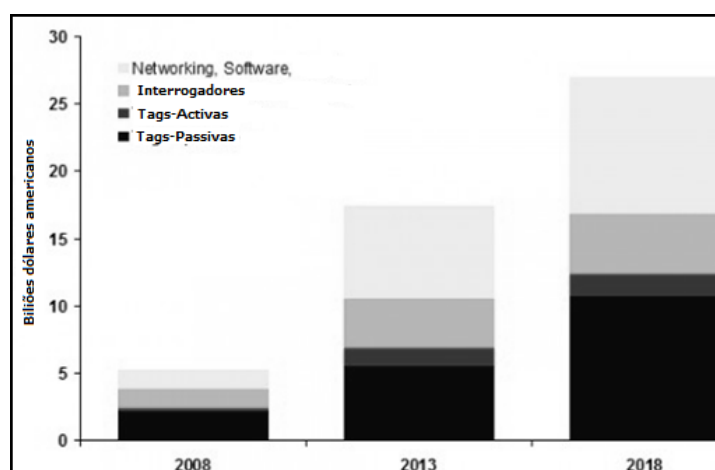


Figura 23 - Projeção de mercado RFID, 2008, 2013 e 2018 (em dólares).

Adaptado: (IDTECHEX, 2008)

Seguidamente serão discutidas algumas áreas genéricas onde a tecnologia RFID se encontra aplicada.

4.1. Cuidados de saúde

Contrariamente a outro tipo de organizações que operam em ambientes de risco bastante baixos, as organizações que fornecem cuidados médicos são caracterizadas pelo seu ambiente de alto risco, onde os fatores de segurança empregues são bastante mais elevados que os adotados em outro tipo meios, uma vez que trabalham diretamente com vidas humanas. Esta condição traduz-se numa necessidade constante de manter um alto nível de eficácia e qualidade nos serviços prestados, mesmo quando os fundos, horários de trabalho, e capacidade de eficiência são ultrapassados (MEILLER, BUREAU, *et al.*, 2011).

Quando aplicados nos cuidados de saúde os sistemas RFID podem contribuir para a redução dos recursos utilizados, quer sejam estes humanos, monetários, ao nível do tempo, etc. aumentando a sua disponibilidade para serem empregues em outras atividades que melhorem a qualidade do serviço prestado (AHSAN, SHAH e KINGSTON, 2010).

A utilização da tecnologia RFID no meio hospitalar tem sofrido um aumento crescente ao longo dos anos, um estudo realizado pela IDtechEX (2006) afirma que o mercado para a RFID irá aumentar rapidamente de 90 milhões de dólares em 2006 para os 2.1 bilhões de dólares no ano de 2016 (Figura 24). Este crescimento dever-se-á inicialmente á etiquetagem individual de fármacos e a instalação de Sistemas de Localização em Tempo Real (RTLS – *Real Time Locating Systems*) nos funcionários, pacientes e itens, como forma de melhoria da eficiência, segurança e disponibilidade e assim como redução das perdas.

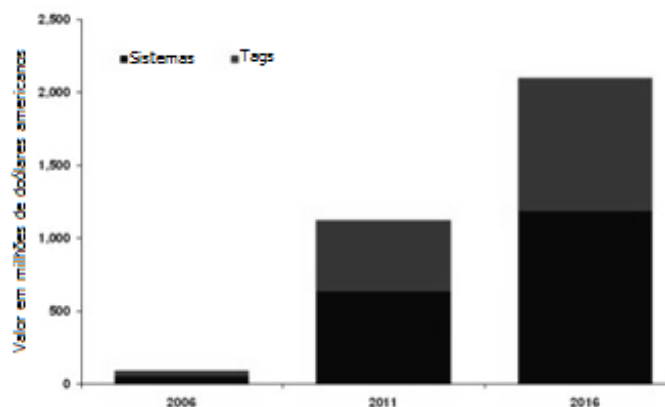


Figura 24 - Mercado global para a RFID nos cuidados médicos 2006-2016 (em dólares)

Adaptado: (IDTECHEX, 2006)

No entanto, e apesar do potencial e das previsões de crescimento da utilização da RFID nos cuidados médicos, a falta de conhecimento por parte das entidades hospitalares tem-se mostrado como um entrave a adoção da tecnologia, em adição a implementação da RFID pode ser dispendiosa, particularmente se uma unidade hospitalar não possuir as infraestruturas necessitárias à utilização da tecnologia (AZEVEDO e FERREIRA, 2010).

As aplicações mais importantes de sistemas RFID neste meio são as seguintes: (i) Eliminação da contrafação de fármacos, a introdução de uma *tag* RFID na embalagem de um fármaco, possibilita o reconhecimento de contrafações/falsificações ou a identificação de embalagens que tenham sido violadas, adulteradas ou substituídas. (ii) Ensaios clínicos, a tecnologia RFID permite o acompanhamento de fármacos que se encontram em fase de testes clínicos, melhorando a sua segurança e resultando consequente redução do tempo necessário para a sua aprovação e comercialização. (iii) Gestão de stocks, um aumento da visibilidade ao nível dos stocks reduz a necessidade de stocks de segurança, reduzindo assim o custo de stock total. (iv) Localização funcionários, pacientes e itens. A utilização de sistemas RTLS permite a conhecer a localização em tempo real de pessoas ou objetos que possuam uma *tag* RFID, resultando numa melhor utilização de recursos disponíveis e redução do tempo desperdiçado assim como dos gastos monetários associados (v) redução dos erros humanos, (vi) automatização de determinados processos e melhorias no fluxo de informações (KHAN, 2008), (AZEVEDO e FERREIRA, 2010).

4.2. Pagamentos eletrônicos e pórticos de cobrança

Um esforço considerável tem sido feito, por empresas como *MasterCard*, *American Express* e *Exxon-Mobil*, para conseguir a automatização de pagamentos utilizando dispositivos eletrônicos como os *smart cards*, etc. Um dos mais bem sucedidos casos de implementação de este tipo de pagamentos utilizando a tecnologia RFID foi conseguido pela empresa *Exxon-Mobil* (THORNTON, 2006). Que introduziu no ano de 1977 um sistema denominado de *SpeedPass*. Neste tipo de sistema o utilizador possui uma *tag* RFID passiva (Figura 25), que ao ser lida pelos *readers*, colocados estrategicamente na estação, efetuam o pagamento de forma automática, com uma maior rapidez conveniência e segurança. (KHAN, 2008).



Figura 25 - Tag passiva "SpeedPass"

Fonte:(THORNTON, 2006)

A aplicação da tecnologia RFID em pórticos para pagamento de estradas, proporciona uma melhoria no fluxo de tráfego, uma vez que não existe a necessidade de paragem dos veículos para que seja efetuada a cobrança (AHSAN, SHAH e KINGSTON, 2010). Os automóveis possuem uma *tag* ativa incorporada, com um número de serie único armazenado na sua memória. Ao passar pelos *readers* instalados no pórtico de cobrança a *tag* é lida, o número de serie da *tag* é associado a uma conta bancaria localizada na base de dados do sistema e o pagamento efetuado de forma automática (XIAO, YU, *et al.*, 2006).

4.3. Serviços bibliotecários

A utilização da RFID nos serviços bibliotecários é uma das aplicações recentes mais importantes da tecnologia. A *tag* colocada num livro pode conter toda a informação relevante sobre este, identificando-o individualmente e de forma automática sem a necessidade de intervenção humana (ZHU, MUKHOPADHYAY e KURATA, 2011).

A RFID apresenta bastantes vantagens quando comparada á tecnologia de códigos de barras, usualmente utilizada neste tipo de serviços, esta permite que a informação de vários livros possa ser lida simultaneamente, reduzindo o tempo gasto pelos funcionários em processos controlo de inventários, diminuir os erros humanos (associados á leitura manual e individual dos códigos de barras) e aumentar o rigor dos registos de inventário, a colocação de *readers* em diferentes pontos permite controlar a circulação dos livros, assim como saber a sua localização a qualquer instante (KHAN, 2008), uma vez que as *tags* não necessitam de estar na linha de leitura do *reader*, sistemas automáticos para registo e controlo de requisições de livros podem ser implementados á saída da biblioteca não sendo necessária intervenção humana (NARAYANAN, SINGH e SOMASEKHARAN, 2005).

As bibliotecas começaram a utilizar a tecnologia RFID nos anos 90, tendo sido esta adoptada por 130 bibliotecas na América do norte como sistema de controlo de entradas e saídas de livros (XIAO, YU, *et al.*, 2006).

4.4. Identificação de animais

A utilização da tecnologia RFID para controlo e identificação de animais tem crescido acentuadamente nos últimos anos, sendo atualmente uma prática comum num grande número de países, e mesmo um método de controlo na indústria pecuária obrigatório no Canadá, na Austrália e na União Europeia. A RFID tem sido utilizada em animais domésticos, a *tag* pode conter um número de identificação correspondente aos dados do proprietário, assim como na indústria pecuária, a principal utilização da tecnologia RFID na área (XIAO, YU, *et al.*, 2006).

As vantagens da utilização RFID em substituição aos antigos métodos de identificação de animais na indústria pecuária (marcações com tinta ou tatuagens, utilização de ferros quentes, etiquetas, etc), são rapidamente identificadas, a possibilidade de identificação individual de cada animal, a movimentação do animal desde que foi colocada a *tag* (idealmente no seu nascimento) até á época do seu abate, podem ser vistos como dois exemplos. A tecnologia RFID pode, portanto, fornecer um rastreamento seguro e eficiente, enquanto, ao mesmo tempo permite identificar não apenas a origem do animal, como a sua localização e locais por onde este passou, assim como a identificação dos pais do animal e possíveis contatos que tenham ocorrido com outros animais, critérios muitos importantes para identificar e minimizar a disseminação de doenças (VOULODIMOSA, PATRIKAKIS, *et al.*, 2010).

A Figura 26, mostra os quatro tipos de *tags* RFID utilizadas na indústria pecuária para identificação de animais, (i) *tag* em formato de colar (*Collar tag*), (ii) *tag* fixadas na orelha do animal (*Ear tag*), (iii) *tag* em vidro, injetada por baixo da superfície da pele do animal (*Injectible tag*), (iv) *tag* ingerível, que se deposita permanentemente na retícula (*Rumen Bolus Tag*) (FINKENZELLER, 2010).

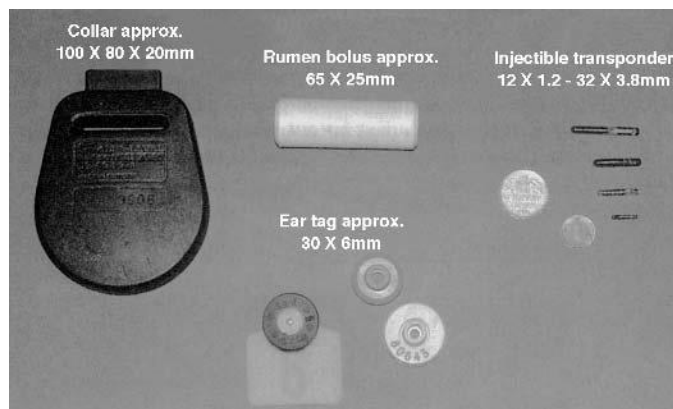


Figura 26 – Tipos de tags para identificação animal

Fonte: (FINKENZELLER, 2010)

4.5. Gestão da cadeia de abastecimento

Segundo Ustundag e Tanyas (2009), cadeia de abastecimentos refere-se ao fluxo físico de bens ou produtos e ao fluxo de informação a estes associada desde origem do produto (matéria-prima) até ao consumidor final. As atividades principais inerentes á gestão de uma cadeia de abastecimentos (*SCM – Supply Chain Management*) incluem, planeamento de produção, compras, gestão de materiais, distribuição, atendimento às necessidades do cliente e previsão de vendas.

Geralmente uma cadeia de abastecimentos é composta por consumidores finais que compram produtos ou serviços a um retalhista. O retalhista (possui usualmente um stock dos produtos) coloca uma encomenda e é abastecido por um distribuidor que compra os seus produtos em grandes quantidades e desencadeia a produção por parte de uma fábrica ou instalação de produção. A fábrica por sua vez adquire as matérias-primas a um fornecedor. A Figura 27 é representativa dos vários níveis que compõem uma cadeia de abastecimento.

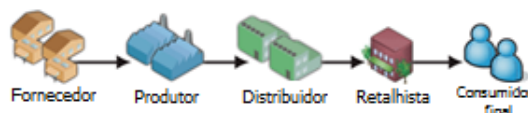


Figura 27 - Exemplo de uma cadeia de abastecimento simples

Adaptado: (SIKANDER, 2005)

Segundo o processo prévio, o fluxo de informações e o fluxo de bens físicos movem-se em direções opostas. Enquanto o fluxo de informações inicia-se no retalhista e termina no

fornecedor da matéria-prima o fluxo de bens físicos começa na fonte de matéria-prima e termina no consumidor final, Figura 28.

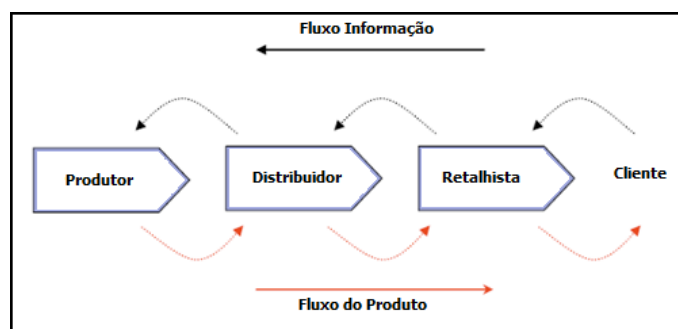


Figura 28 - Fluxo físico e informacional numa cadeia de abastecimento

Adaptado: (USTUNDAG e TANYAS, 2009)

Na prática, a maioria das cadeias de abastecimento possui uma complexidade muito superior à cadeia apresentada previamente, sendo estas compostas por mais do que uma entidade a cada nível. Até chegarem ao consumidor final as matérias-primas têm necessariamente de transpor os diversos níveis da cadeia de abastecimento, sendo-lhes adicionado valor e custo a quando da sua passagem por cada nível até se tornarem nos produtos finais. Ao avançar pelos diferentes níveis e até a chegada ao consumidor final a cadeia de abastecimentos torna-se cada vez mais complexa, com o aglomerar de diferentes produtos provenientes de vários parceiros de negócio, é o exemplo de empresas retalhistas como a Wal-Mart que vendem milhares de produtos provenientes de milhares de distribuidores diferentes (SIKANDER, 2005).

O aumentar do número de entidades envolvidas nos diversos níveis das cadeias de abastecimento, pressupõe um conseqüente aumento dos fluxos de bens e informação. Devido às características que a tecnologia RFID possui (identificação individualizada, facilidade na leitura das *tags*, capacidade de localização em tempo real, etc.), a sua implementação na gestão das cadeias de abastecimento permite realizar o seguimento e rastreamento de produtos, aumento da sua visibilidade e partilha de informação entre as diversas organizações incorporadas nos diversos níveis da cadeia de abastecimento (SARAC, ABSI e DAUZÈRE-PÉRÈS, 2010), o que possibilita às organizações alcançarem uma maior autonomia de gestão e planeamento dos seus processos (ANGELES, 2005), reestruturação na forma como realizam o fabrico e distribuição dos produtos e atingir uma melhoria significativa na sua eficiência e eficácia (HARDGRAVE e MILLER, 2006).

A SCM é a área onde a RFID tem maior aplicação, principalmente devido aos mandatos impostos por organizações como a Wal-Mart e o DoD em 2003, onde obrigaram os seus fornecedores a adotar a RFID para seguimento e localização de mercadorias nas cadeias de abastecimento até 2005 (WU, NYSTROM, *et al.*, 2006).

Os potenciais benefícios que podem advir da implementação da tecnologia RFID na gestão de cadeias de abastecimento podem estar relacionados, (i) diretamente com os processos e procedimentos das empresas: ampliação no controlo e visibilidade dos produtos e processos; aumento da eficiência e velocidade dos processos; controlo mais preciso sobre todo o tipo informação relacionada com a movimentação dos produtos; automatização de processos; gestão mais eficaz devido á recolha de informação em tempo real (SARAC, ABSI e DAUZÈRE-PÉRÈS, 2010); redução de erros no envio de produtos; redução de contrafações (KHAN, 2008), entre outros. (ii) Ou relacionados com algum tipo de fluxo monetário (que tanto podem ser de a redução de gastos como no aumento dos lucros): redução de níveis de stocks inventários, um melhor controlo e gestão de inventários; decrescimento de custos laborais; diminuição no número de produtos extraviados, efeito de roubos ou devido á colocação de produtos em locais incorretos não sendo possível posteriormente identificar a sua localização (TAJIMA, 2007).

4.6. Sistemas de Produção

Especialmente durante a última década a RFID teve uma forte atenção por parte das indústrias produtivas, que progressivamente têm utilizado esta tecnologia para melhorar e aperfeiçoar os seus processos produtivos. O facto de a RFID facilitar a identificação, controle e monitorização de objetos ao longo de uma cadeia produtiva, proporciona às organizações uma visibilidade adicional dos seus sistemas produtivos o que lhes confere a capacidade de tomarem decisões baseadas em informações precisas e em tempo real (NGAI, CHAU, *et al.*, 2012).

Os sistemas de produção são propícios a perturbações e/ou interrupções inesperadas, como a avaria de equipamentos, quebras de desempenho nos trabalhadores, alterações no mercado de procura, mudanças de prazos ou quantidades de encomendas em curtos espaços de tempo, produção de quantidades incorretas, atrasos nos prazos de recebimento de matérias-primas, defeitos de qualidade, etc. os produtores necessitam, portanto responder de forma rápida e eficaz a estas interferências como forma de minimizar o seu impacto nos sistemas

produtivos. A RFID tem a capacidade de ser um sistema de monitorização em tempo real, que transmite informações credíveis para os sistemas de gestão empresariais permitindo a tomada de decisões eficientes que melhorem a produtividade, qualidade e garantam a conformidade dos produtos finais, trazendo uma mudança fundamental na forma como são controlados os processos produtivos, facilitando a recolha automática e processamento de dados, e reduzindo ou mesmo eliminando atividades manuais tediosas e propensas a erros (HUANG, WILLIAMS e ZHENG, 2011).

Num estudo realizado por Huang, Wright e Newman (2009), os autores apresentam os potenciais benefícios e impactos resultantes da incorporação da RFID nos sistemas produtivos de uma organização, onde destacam: um aumento na visibilidade e precisão das informações; aumento da produtividade; uma maior flexibilidade no planeamento da produção e programação; melhor controlo de garantia de qualidade; um melhor acompanhamento e registo da genealogia de produtos, um melhor acompanhamento e utilização dos produtos reutilizáveis (por exemplo, recipientes e ferramentas); um maior conhecimento das operações de manutenção; um controle de inventários mais eficiente e redução nos custos de trabalho.

No entanto, os mesmos autores ressaltam que a RFID não é uma tecnologia que exista na forma de uma aplicação prontamente disponível para utilização e adequada para os diferentes ambientes produtivos existentes, e para que uma organização consiga beneficiar da sua implementação é necessário desenvolver e personalizar a melhor forma de adequar a tecnologia á sua realidade produtiva. Uma solução RFID ótima varia consoante o ambiente produtivo específico de cada indústria, logo o processo produtivo assim como todos os produtos associados a este, devem ser examinados e estudados (HUANG, WRIGHT e NEWMAN, 2009).

Ngay et al (2012), identificam oito fatores que consideram relevantes para que uma implementação da RFID num sistema de gestão de um processo produtivo tenha sucesso, (i) seleção do fornecedor, (ii) motivação da organização, (iii) avaliação do custo/benefício, (iv) apoio da gestão de topo, (v) envolvimento dos utilizadores, (vi) supervisão de todo o progresso, (vii) competência e formação do pessoal e (viii) políticas e estruturas organizacionais (Figura 29).

Seleção do fornecedor	A experiência, o conhecimento da realidade da organização, a confiança, acompanhamento pós instalação do sistema, são fatores importantes na escolha do fornecedor.
Motivação da organização	Motivar cada nível dos funcionários com a adoção de RFID, compreensão das melhorias e benefícios potenciais da tecnologia RFID.
Avaliação do custo/benefício	Os gestores necessitam de avaliar e justificar o custo e os benefícios da adoção RFID e como a mudança estratégica poderá beneficiar a organização.
Apoio da gestão de topo	É necessário que gestão de topo providencie apoio e acesso á informação assim como os recursos necessários para simplificar o processo de implementação do sistema.
Envolvimento dos utilizadores	Envolver os utilizadores no processo de concepção e desenvolvimento, de modo a compreender as suas expectativas e opinião para com a tecnologia.
Supervisão de todo o progresso	É necessário á organização manter uma estreita supervisão e investigar a forma como a tecnologia RFID interfere com os atuais contextos organizacionais.
Competência e formação do pessoal	O sistema RFID deve ser compatível com as competências dos utilizadores, estes devem ser alvo de ações de formação regulares de forma a minimizar os problemas de adaptação ao novo sistema.
Políticas e estruturas organizacionais	Alteração nas políticas organizacionais, estruturas ou do processo produtivo podem conduzir a um maior valor de negócio para a organização.

Figura 29 – Fatores relevantes para a implementação da RFID como sistema de gestão num processo produtivo

Adaptado de: (NGAI, CHAU, *et al.*, 2012)

A RFID possui uma grande variedade de aplicações em diversas indústrias produtivas. Na Figura 30 são apresentados alguns estudos de casos reais que apresentam exemplos da utilização da RFID em ambientes industriais.

Porém existe alguma dificuldade por parte dos gestores industriais na identificação de novas oportunidades onde a RFID possa tornar um determinado sistema produtivo mais eficiente e livre de desperdícios (*lean manufacturing*). Uma razão importante para esta dificuldade relaciona-se com um número reduzido de estudos práticos realizados em ambientes produtivos reais em que indústrias de áreas distintas se possam relacionar, pois apesar de existirem estudos realizados em ambientes reais estes são na sua maioria orientados para a gestão de cadeias de abastecimento, sendo os benefícios identificados difíceis de quantificar e transpor para os sistemas produtivos (BRINTRUP, RANASINGHE e MCFARLANE, 2010).

Lee e Ozer (2007) mencionam que existe um grande problema de credibilidade com os estudos teóricos e relatórios industriais, que proclamam os benefícios da implementação da RFID fundamentados em apreciações qualitativas, mas não apresentam como esses benefícios

podem ser materializados com o uso da RFID, isto é, existe uma lacuna entre a utilização ideal e a percepção real da tecnologia RFID. No futuro com o disseminar de implementações e estudos práticos sobre a tecnologia aplicada em sistemas industriais reais esta lacuna tenderá a ser reduzida.

Indústria	Organização	Aplicação	Referência/Fonte
Automóvel	<i>BMW</i>	Automatização de um sistema que corresponder aos automóveis no processo montagem as ferramentas adequadas para o trabalho e assim automatizar todo o sistema.	Huang et al. (2010)
	<i>Ford Motor Company</i>	Introdução de um sistema RFID para aumentar o controlo sobre o processo de montagem dos componentes de um automóvel	Johnson (2002)
	<i>Volvo Trucks</i>	Controlo e seguimento de componentes em tempo real nas secções de pintura e corte.	Fasth (2004)
Aeroespacial	<i>Boeing</i>	Seguimento de componentes em processos manutenção dos aviões.	Griffin (2004)
	<i>Virgin</i>	Gestão do inventário de componentes de aviões com valor elevado.	Swedberg (2005)
Componentes eletrónicos	<i>Infineon Technologies</i>	Localização e identificação em tempo real numa unidade de produção <i>Wafers</i> ² , para a redução de níveis de stock e aumento da eficiência do sistema produtivo.	Thiess e Fleish (2008)
	<i>Arkansas Logistics Institute</i>	Análise da viabilidade da tecnologia como ferramenta de controlo em tempo real	Brewer et.al (1999)
Têxtil e Confecção	Fábrica de confecções em Hong Kong	Desenvolvimento de um sistema para controlo e gestão do processo produtivo.	Ngai et al. (2012)
Fabrico de tubagens	Shawn Fabricators & Fluor Corporation	Viabilidade técnica da RFID para o acompanhamento do fabrico de carretéis de tubagens para projetos industriais.	Song et al. (2006)

Figura 30 - Exemplos de estudos RFID aplicados em ambientes indústrias reais

² *Wafers* são discos circulares constituídos por finas camadas de material semicondutor, por exemplo, cristais de silício, utilizados no fabrico de circuitos integrados.

5. Projeto de experimentos

Experimentos são utilizados em todos os campos do saber para descobrir informações a respeito de processos, produtos ou sistemas. O uso de Projeto de experimentos nas áreas de desenvolvimento e melhoria de produtos e processos pode gerar como resultado produtos e processos com maior confiabilidade, maior durabilidade e menor custo, entre outras vantagens (MONTGOMERY, 2001).

A execução de experimentos procura aumentar o entendimento dos pesquisadores em relação a um fenômeno particular (ANTONY, 1998), um experimento projetado ou planejado é um teste ou uma série de testes nos quais se induzem mudanças deliberadas nas variáveis de entrada do processo ou sistema, de maneira que seja possível observar e identificar as causas das mudanças nas respostas ou variáveis de saída, um pesquisador que trabalha com experimentos procura tradicionalmente, determinar a influência que diversos fatores provocam em uma dada variável de resposta. O projeto de experimentos é uma técnica utilizada para o planejamento de experimentos, ou seja, para definir quais dados, em que quantidade e em que condições devem estes ser recolhidos num determinado experimento, procurando satisfazer dois objetivos principais: a maior precisão estatística possível na resposta e o menor custo. Numa forma geral experimentos são usados para estudar a performance de processos e sistemas, um projeto de experimentos adequado permite, além de aperfeiçoamentos em processos, a identificação de causas de variabilidade de resultados, a redução de tempos de análises e dos custos envolvidos.

Um processo ou sistema pode ser representado pelo modelo da Figura 31, o processo pode ser visto como uma combinação de máquinas, métodos, pessoas, ou outro recurso que transforma uma entrada numa saída que tem uma ou mais respostas observáveis. Algumas das variáveis do processo x_1, x_2, \dots, x_p são controláveis, enquanto outras variáveis z_1, z_2, \dots, z_p são incontroláveis (MONTGOMERY, 2001).

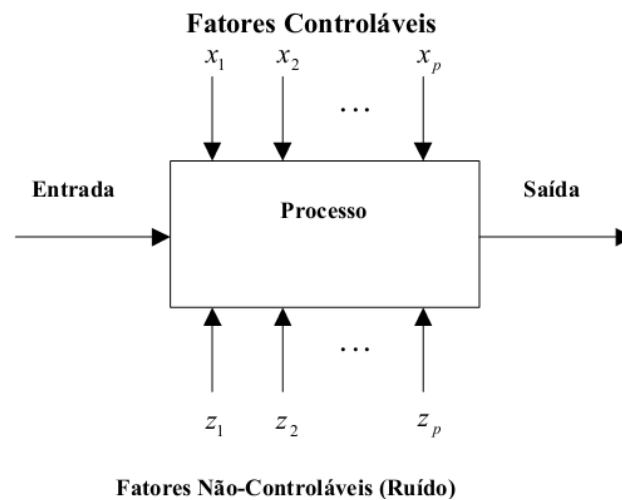


Figura 31 - Modelos geral de processo ou sistema

Fonte: (MONTGOMERY, 2001)

Os objetivos do experimento segundo Montgomery (2001), podem ser os seguintes:

- Determinar quais variáveis têm maior influência na resposta, y .
- Determinar para que valores ajustar os x 's influentes de modo que y fique quase sempre próximo do valor nominal desejado;
- Determinar para que valores ajustar os x 's influentes para minimizar a variabilidade de y ;
- Determinar para que valores ajustar os x 's influentes de forma a minimizar os efeitos das variáveis incontroláveis z_1, z_2, \dots, z_p .

Os métodos de projeto de experimentos são fundamentais na melhoria e otimização do desempenho de produtos ou processos e na resolução de problemas. Um experimento planejado é entendido como um conjunto de testes ou ensaios onde as variáveis de entrada do experimento são modificadas deliberadamente, com recurso a metodologia estatística, e observação das causas das mudanças nas respostas do experimento. O objetivo é através de uma análise estatística, obter conclusões credíveis e relevantes sobre o produto, processo ou sistema em estudo (WERKEMA e AGUILAR, 1996).

Segundo Werkema e Aguilar (1996) a realização de um projeto de experimentos tem como objetivos: (i) determinar as causas que mais influenciam o efeito de interesse do produto ou do processo; (ii) determinar a melhor faixa para os parâmetros de processo que são controlados no experimento, onde se obtenha o melhor desempenho para um conjunto de

variáveis de resposta de interesse; e (iii) determinar a faixa de ajuste dos parâmetros de processo que minimiza a ação dos fatores de ruído sobre as variáveis de resposta.

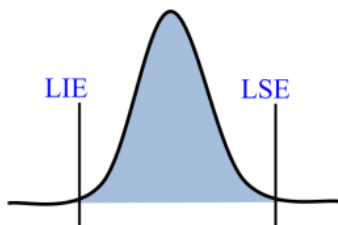
5.1. Definições utilizadas em projetos de experimentos

Algumas definições utilizadas no planejamento de experimentos segundo Montgomery (2001) e Ribeiro e Caten (2011) são apresentadas seguidamente.

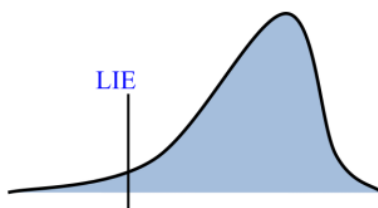
Características de qualidade (CQ) são as características do produto que o cliente percebe como importantes.

Variável de resposta (VR) é o resultado de um sistema de medição, registado após a realização do ensaio, que permite quantificar as CQ. São as variáveis que sofrem algum efeito no experimento, quando mudanças, provocadas propositalmente, podem existir uma ou mais variáveis de resposta que sejam importantes de avaliar.

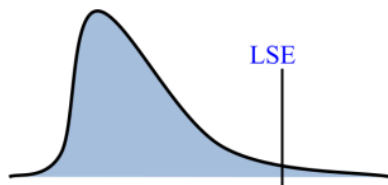
Características de qualidade podem ser do tipo nominal-é-melhor quando tendem a apresentar uma distribuição de probabilidade aproximadamente simétrica, quando as causas de variabilidade geram valores que podem se afastar tanto para cima como para baixo do alvo. Elas apresentam tolerâncias bilaterais.



Características de qualidade do tipo maior-é-melhor tendem a apresentar uma distribuição de probabilidade assimétrica à esquerda, apresentam apenas Limite inferior de especificação (LIE)



Características de qualidade do tipo menor-é-melhor tendem a apresentar uma distribuição de probabilidade assimétrica à direita, apresentam apenas Limite superior de especificação (LSE).



Parâmetros do processo são as variáveis da linha de produção e/ou da composição do produto que podem ser alteradas e que talvez tenham efeito sobre as VRs.

Fatores controláveis (FCs) são um subconjunto dos parâmetros do processo, são os parâmetros que foram eleitos para serão estudados; são fatores que podem ter influência sobre as VRs estudadas, e por isso são alterados propositalmente durante o experimento.

Fatores constantes são parâmetros do processo cujos efeitos não são de interesse para o experimento, e que se mantêm constantes durante o experimento.

Fatores não controláveis (Ruído) são fatores que não são controláveis no experimento, podem ser conhecidos ou não e que influenciam nas variáveis de resposta do experimento. São responsáveis pelo erro experimental ou variabilidade residual ou variância do erro. Diferem dos fatores mantidos constantes pois não podem ser propositalmente mantidos em níveis constantes durante o experimento.

Tratamento ou ensaio é cada combinação dos FCs realizadas no decorrer do experimento.

Repetição implica na realização do ensaio sob as mesmas condições experimentais repetidamente. Tal procedimento permite obter uma estimativa da variabilidade da VR, devida ao erro experimental. Pela escolha adequada do número de repetições, é possível detectar, com a precisão desejada, efeitos produzidos pelas diferentes condições experimentais, que seja considerada significativa do ponto de vista estatístico.

Aleatorizar significa realizar os ensaios ao acaso, no que se refere à definição da sua ordem de realização. A aleatorização permite que os efeitos dos fatores de ruído que afetam a VR e estão presentes na realização do experimento, sejam distribuídos, evitando, assim, possíveis confusões na avaliação dos efeitos dos FCs com os fatores de ruído.

A formação de blocos é o controlo e a avaliação da variabilidade resultante da presença de fatores perturbadores conhecidos. O ideal é que os fatores perturbadores sejam mantidos constantes. Quando isso não for possíveis, esses fatores devem ser divididos em grupos homogêneos (blocos) tomando o cuidado de evitar a troca dos efeitos dos FCs com esses fatores perturbadores.

Diz-se que existe interação entre FC se o efeito (diferença) observado na VR, quando se altera os níveis de um fator, depende do nível de outro fator.

5.2. Etapas do projeto de experimentos

Para executar um experimento de forma adequada é importante a utilização de uma abordagem científica a quando do seu planeamento. O objetivo é recolher os dados num espaço de tempo reduzido e com o custo mínimo. A análise destes dados por meio de técnicas estatísticas resultará em conclusões confiáveis, sendo que os dois aspetos importantes intimamente ligados são o próprio planeamento e a análise estatística dos dados (WERKEMA e AGUILAR, 1996).

Segundo Montgomery (2001), para utilizar uma abordagem estatística no planeamento e análise do experimento, é necessário que todos os indivíduos envolvidos no experimento tenham antecipadamente uma ideia clara e exata sobre o que se pretende estudar, de como vai ser realizada a recolha dos dados e um entendimento qualitativo de como eles vão ser analisados. Montgomery (2001) apresenta igualmente diretrizes a seguir para a realização de projetos de experimentos:

1. **Reconhecimento e afirmação do problema:** Na prática, usualmente torna-se difícil reconhecer a existência de um problema que exige experimentos planeados, de forma que pode não ser fácil obter um relato do problema, claro e aceito por todos os envolvidos. É necessário desenvolver todas as ideias em relação aos objetivos que se pretendem alcançar com o experimento, é bastante importante recolher informações de todas as partes envolvidas no experimento.
2. **Escolha dos fatores e dos seus níveis:** Consideram-se os fatores controláveis (FCs), os fatores constantes e os fatores de ruído. Devem ser definidos os fatores que devem variar, os intervalos sobre os quais esses fatores variarão e os níveis específicos nos quais cada rodada será feita. É importante investigar todos os fatores que possam influenciar as respostas do processo e evitar considerações de

experiências passadas, particularmente nos estágios iniciais do experimento ou quando o processo não está ainda amadurecido.

3. **Seleção da variável de resposta:** A VR deve ser selecionada de forma representar e quantificar as CQs definidas. É preferível selecionar uma VR que seja contínua, que reflita a continuidade de uma propriedade física de interesse utilizando uma unidade de medida que seja apropriada, podendo ser absoluta ou relativa. À VR deve estar associada um valor alvo ou condições desejáveis. Devendo esta ser definida como sendo do tipo nominal-é-melhor, maior-é-melhor ou menor-é-melhor, assim como os seus alvos e especificações. Sempre que possível é preferível a seleção de uma VR que permita a replicação das medições quantificando os erros de medição.
4. **Planeamento do projeto experimental:** O projeto experimental deverá ser planeado de forma que o efeito causado pelos fatores não controláveis seja minimizado. No planeamento experimental, deve-se igualmente considerar o limite do número de ensaios, o custo das alterações dos FCs e as considerações logísticas, e relacionados a restrições específicas de cada caso, que podem ser financeiras ou técnicas.
5. **Realização do experimento:** O experimento deve ser executado conforme o seu planeamento, sendo vital a monitorização de todo o processo como garantia que tudo é realizado de acordo com planeado, eventuais erros que possam ocorrer durante a realização do experimento afetam a validade do experimento.
6. **Análise estatística dos dados:** São empregados métodos estatísticos apropriados para o experimento, por exemplo, a análise de regressão e a análise de variância (ANOVA). Com o auxílio dessas ferramentas, identifica-se o ajuste ótimo individual, ou seja, a combinação de fatores controláveis que minimiza (menor-é-melhor) ou maximiza (maior-é-melhor) cada uma das variáveis de resposta separadamente.
7. **Conclusões e recomendações.** A análise e interpretação dos dados deve permitir a obtenção de conclusões práticas e recomendar uma ação a tomar em relação ao problema inicial. A utilização de métodos gráficos é útil particularmente na apresentação dos resultados alcançados.

Por sua vez, Ribeiro e Caten (2011) sugerem que para a realização de um experimento, este deverá seguir as seguintes etapas:

1. **Ouvir a voz do cliente (o quê):** pesquisar o mercado, identificar as características de qualidade que são de interesse e identificar a importância relativa dessas CQ.
2. **Ouvir a voz do engenheiro (o como):** definir variáveis de resposta associadas às CQ, identificar outras variáveis que podem estar associadas a custos ou produtividade, identificar os parâmetros de processo e seu intervalo de variação, identificar os fatores controláveis (parâmetros de processo que podem afetar as variáveis de resposta), definir o número de níveis para cada FC assim como as suas possíveis interações, identificar as restrições experimentais como o número máximo de ensaios, equipamentos e recursos humanos disponíveis e tempo disponível e escolher o modelo estatístico a utilizar no experimento.
3. **Planeamento final e execução:** Escrever a matriz experimental, definir a ordem dos ensaios (aleatorização), definir os procedimentos de ensaio (uniformização), desenhar planilhas de recolha de dados e finalmente executar o experimento e anotar resultados.
4. **Análise:** escrever a tabela de médias, fazer gráficos dos efeitos dos fatores principais assim como das interações significativas.
5. **Otimização:** modelar individualmente cada variável de resposta, definir uma função-objetivo, encontrar o ajuste dos FC que minimiza ou maximiza a VR e realizar a verificação da consistência da solução.

5.3. Tipos de Projetos de Experimentos

A escolha adequada do tipo de projeto de experimento a ser utilizado em cada situação permite obter economia no número de rodadas experimentais, além de calcular com a precisão adequada as estimativas dos efeitos de interesse e da variabilidade do erro experimental. O planeamento de um experimento deve ser elaborado de forma a atender aos objetivos e restrições físicas e económicas de cada experimento. Para Werkema e Aguilar, (1996) os projetos experimentais podem ser classificados, pelo número de fatores a serem estudados, pela estrutura utilizada (blocos, fatoriais, hierárquicos ou aninhados, ou para superfícies de resposta) e pelo tipo de informação que ele fornece (estimativa dos efeitos, da variância ou mapeamento empírico da VR).

Antony (1998), afirma que um experimento pode ser conduzido em uma ordem padrão ou aleatória. A ordem aleatória procura minimizar a influência experimental devido a fatores não-controláveis, e esta aleatorização pode, eventualmente, distribuir os efeitos de

distúrbios externos sobre todo o experimento, desse modo, resultados mais confiáveis e previsíveis serão obtidos. As seguintes questões devem ser levantadas antes da realização de experimentos aleatórios:

- Quais os custos envolvidos com a mudança dos níveis de fatores como tipo de material, temperatura, etc?
- Qual é o tempo de preparação entre os experimentos?
- Existem fatores desconhecidos que influenciam a saída ou resposta, e são controláveis estes fatores?

Seguidamente apresentam-se sumariamente alguns tipos de projetos de experimentos Hahn (1977).

- **Blocos aleatórios**, este projeto remove a variabilidade devido ao efeito do bloco, a fim de diminuir o erro experimental. A variabilidade é removida pelo conhecimento e controle de alguns fatores externos, projetos em blocos completos aleatórios são amplamente utilizados e facilmente implementados na prática
- **Projetos fatoriais**, são experimentos que envolvem dois ou mais fatores. Um projeto fatorial completo é aquele onde são estudadas todas as combinações dos níveis de todos os fatores investigados. Projetos fatoriais permitem identificar o efeito principal e todas as interações entre os fatores utilizados para investigar todas as combinações de tratamentos possíveis formados pelos fatores considerados. A ordem em que cada fator se escolhe é completamente aleatória.
- **Projetos fatoriais fracionados**, este tipo de projetos são frequentemente utilizados quando há um grande número de combinações de níveis dos fatores e não é possível rodar todas estas combinações, sendo selecionada apenas uma fração destas para serem rodadas. O projeto fatorial é viável quando se está estudando 5 ou mais fatores, e a sua aplicação nestes casos é fortemente recomendada pois leva a uma grande economia na experimentação.
- **Projetos fatoriais confundidos em blocos**, por vezes torna-se é impossível conduzir uma repetição completa de um projeto fatorial em condições homogêneas, sendo necessária a divisão do experimento em blocos, onde o bloco pode ser um dia, um lote homogêneo de matéria-prima, um laboratório, etc. Para dividir o experimento em blocos, é necessário confundir o efeito do bloco com algum efeito, perdendo-se assim

alguma informação, a melhor forma é confundir o bloco com o efeito de interação de ordem mais alta, pois esse efeito raramente será significativo.

- **Quadrados latinos**, são projetos experimentais onde cada nível de um fator é combinado somente uma vez com cada nível de dois outros fatores. São considerados projetos económicos, pois exigem poucas rodadas, no entanto, não permitem o estudo de interações. Segundo Montgomery (2001), este tipo de projeto utiliza-se para eliminar as diferenças de duas fontes de variabilidade, pois os quadrados latinos sistematicamente permitem blocagem em duas direções. Assim sendo, linhas e colunas representam duas restrições de aleatorização. Projetos deste tipo são possíveis quando o número de níveis de ambas as restrições é igual ao número de níveis do fator principal.

Seguidamente apresentar-se-á mais detalhadamente os projetos do tipo fatorial, devido á sua aplicação neste trabalho.

5.4. Projetos fatoriais

Para Montgomery (2001), os projetos fatoriais são os mais económicos para estudar efeitos provocados por dois ou mais fatores. Este tipo de projetos permitem analisar simultaneamente todas as combinações possíveis para os diferentes níveis de um determinado fator, o que possibilita verificar o efeito principal do fator, ou seja, a mudança ocorrida na resposta quando o nível do fator é modificado, e o efeito de interação entre fatores sobre a VR.

Um projeto fatorial é vantajoso se comparado a experimentos isolados. Experimentos isolados são aqueles, onde um apenas um fator é modificado de cada vez, permanecendo os restantes fixos. A vantagem principal sobre os experimentos isolados é que experimentos fatoriais são capazes de identificar a existência de interação entre os fatores controláveis. Fazendo um de cada vez pode-se chegar a conclusões erradas além do fato de aumentar o número de experiências necessárias (WERKEMA e AGUILAR, 1996). Experimentos fatoriais além de eficientes são a única maneira de descobrir interações entre as variáveis.

Para exemplificar esta comparação, considere o exemplo de duas variáveis como pressão e temperatura, com os fatores A e B explorados a apenas dois níveis A1, A2, B1 e B2. No experimento isolado as informações sobre cada fator seriam alcançadas ao variando cada

variável isoladamente. O efeito do fator A, seria dado por $A_2B_1 - A_1B_2$, ou seja, o fator B permanece fixo e o fator A é o modificado. Ele é chamado efeito principal porque ele se refere a fatores primários no estudo. Do mesmo modo o efeito do fator B seria dado por $A_1B_1 - A_1B_2$, onde o fator A se mantém fixo e o fator B é modificado num terceiro tratamento. Em conclusão, seriam necessários 3 tratamentos distintos A_2B_1 , A_1B_1 e A_1B_2 , porém considerando-se que sempre existe um erro experimental associado é desejável que se tenha 2 observações de cada tratamento, totalizando 6 tratamentos como é possível verificar na Figura 32.

Fator A	Fator B	
	B_1	B_2
A_1	A_1B_1	A_1B_2
	A_1B_1	A_1B_2
A_2	A_2B_1	
	A_2B_1	

Figura 32 - Experimento isolado

Num projeto do tipo fatorial, todas as combinações de níveis são realizadas e, portanto, um tratamento adicional A_2B_2 deve ser executado, conforme mostrado na Figura 33. Apesar de ser necessário um tratamento adicional, o projeto fatorial é vantajoso pois ao total são necessários apenas 4 tratamentos para obter a mesma precisão dos dados do experimento isolado. A explicação está no fato de que neste tipo de experimento têm-se duas estimativas para o efeito do fator A, $A_2B_1 - A_1B_1$ e $A_2B_2 - A_1B_2$, e similarmente duas estimativas para o efeito do fator B. Ao fazer-se a média das duas estimativas alcança-se a mesma precisão do experimento isolado, com apenas 4 tratamentos.

Fator A	Fator B	
	B_1	B_2
A_1	A_1B_1	A_1B_2
A_2	A_2B_1	A_2B_2

Figura 33 - Experimento fatorial

Conforme referido previamente uma vantagem dos projetos fatoriais está possibilidade de analisar o efeito da interação entre os fatores, o que não é viável com experimentos realizados isoladamente, não considerar a interação entre fatores, principalmente se o efeito da interação é grande, pode levar a interpretação errada de projetos

experimentais. Quando uma interação é grande, os efeitos principais correspondentes têm muito pouco significado prático. Logo conhecimento da interação AB torna-se mais útil do que o conhecimento do efeito principal. Uma interação significativa pode dissimular o significado dos efeitos principais.

O número de experimentos necessários para a otimização depende do número de k fatores, do número de níveis de cada fator e do tipo do fenômeno a explicar. Como exemplo, num projeto que possua quatro fatores cada um com dois níveis $2^4 = 16$ testes, todas as interações serão calculadas, cada uma a quatro fatores. Esse tipo de experimento denomina-se de projeto fatorial completo, no qual cada fator varia entre os níveis de forma independente em cada experimento, enquanto os demais fatores permanecem constantes (LIRA e ALARCON, 2004). De acordo com Gabrielsson et al. (2002), em um projeto fatorial completo todas as combinações dos valores extremos são incluídas no experimento, e estes valores estão baseados no conhecimento prévio sobre o objeto em estudo.

5.5. Análise de variância (ANOVA)

A ANOVA é uma das principais ferramentas estatísticas para a análise de dados obtidos em experimentos planejados é usada para testar hipóteses sobre a saída de um experimento ou pesquisa possibilitando a comparação de várias médias oriundas de grupos ou tratamentos diferentes. ANOVA pode ser usada para investigar diferenças entre combinações de grupos pela formação de contrastes que são combinações lineares de grupos onde a soma dos coeficientes é igual a zero. Os ensaios feitos em cada nível da variável de entrada configuram um grupo. O objetivo que se persegue usando a metodologia da ANOVA é a identificação das possíveis diferenças entre os diversos níveis do fator controlável.

A variância é uma medida de variabilidade, definida como o quadrado do desvio padrão. A notação utilizada para variância é $2S$, quando se refere à variância de uma população, e s^2 , quando se refere à variância de uma amostra extraída desta população. (RIBEIRO e CATEN, 2011).

Se for considerada uma situação onde é pretendido comparar várias médias oriundas de resultados observados de diferentes níveis de um mesmo fator, os resultados observados podem demonstrar a existência de dois tipos de variabilidade. A variabilidade existente dentro das amostras de cada tratamento e a variabilidade existente devido à diferença das médias dos tratamentos. A soma das duas variabilidades é denominada variabilidade total, que

corresponde à variabilidade de todas as amostras de todos os tratamentos. A análise de variância pode ser definida como um procedimento estatístico, utilizado para decompor a variabilidade total em componentes de variabilidade, atribuídos a determinadas fontes de variação (ou seja, a determinados tratamentos experimentais), com o objetivo de comparar as médias dos resultados associadas às fontes de variação através de testes de hipótese apropriados.

O objetivo da ANOVA é testar se o efeito de cada fator (A ou B) ou a interação entre eles (AB) são significativos. Ao analisar-se projetos fatoriais com mais de dois fatores, utiliza-se a análise de variância para k fatores, com o seguinte modelo estatístico:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \dots + \varepsilon_{ijkl} \quad (5)$$

Para $i=1,a; j=1,b; K=1,c; l=1,n;$

Onde:

μ é média geral;

τ_i é o efeito do i-ésimo nível de A;

β_j é o efeito do j-ésimo nível de B;

$(\tau\gamma)_{ik}$ é o efeito da interação AC;

$(\beta\gamma)_{jk}$ é o efeito da interação BC;

$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ é o efeito da interação entre os valores ABC;

ε_{ijkl} é o erro aleatório.

Os cálculos associados são realizados utilizando-se a chamada tabela ANOVA, conforme formulário apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Exemplo de tabela Anova e formulário para os cálculos

Fonte de Variação	<i>SQ</i>	<i>GDL</i>	<i>MQ</i>	<i>Teste F</i>
Entre Grupos	<i>SQG</i>	<i>k-1</i>	<i>MQG</i>	<i>MQG/MQR</i>
Dentro Grupos	<i>SQR</i>	<i>N-k</i>	<i>MQR</i>	
Total	<i>SQT</i>	<i>N-1</i>		

$TC = \frac{(T..)^2}{N}$	Termo de Correção
$SQT = \sum (Y_{ij}^2) - TC$	Soma dos Quadrados Totais
$SQG = \sum \left(\frac{T_{i.}^2}{n_i}\right) - TC$	Soma dos Quadrados dos Grupos
$SQR = \sum (Y_{ij}^2) - \sum \left(\frac{T_{i.}^2}{n_i}\right) = SQT - SQG$	Soma dos Quadrados dos Resíduos
<i>T.</i> - soma de todas as observações	
<i>T_i</i> - soma das observações no grupo <i>i</i>	
<i>GDL</i> - número de graus de liberdade	
<i>MQ</i> - média quadrada	

Fonte: (RIBEIRO e CATEN, 2011)

A comparação do valor obtido no Teste F indica a existência de diferença significativa ou não entre os grupos, respectivamente se o F calculado for maior ou menor que o F tabelado. Diferença significativa entre as médias dos grupos significa que a variabilidade entre grupos é maior que a variabilidade dentro do grupo devida ao erro aleatório.

5.6. Análise de Regressão

A Regressão Múltipla está associada a predição de algum fenómeno partindo de um conjunto de variáveis independentes tendo como saída uma equação contendo um conjunto de pesos refletindo a importância relativa preditiva de cada uma das variáveis independentes.

Para Montgomery (2001), a análise de regressão processa as informações contidas num conjunto de dados e gera um modelo que representa o relacionamento que existe entre as variáveis de entrada e as variáveis de saída de um processo ou produto, através do processamento de informações contidas em um conjunto de dados. Segundo o mesmo autor a análise de regressão pode ser utilizada para: (i) descrever um conjunto de dados ou um relacionamento entre variáveis de interesse; (ii) prever valores de variáveis de interesse; (iii)

controlar os valores de variáveis de interesse; (iv) estimar parâmetros desconhecidos de equações que representem relacionamentos de variáveis de interesse.

A regressão linear simples é uma técnica estatística que ajusta, a um conjunto de dados, um a equação que representa o relacionamento linear entre uma variável dependente (Y) e um a variável explicativa (X). O modelo de regressão linear simples é dado pela equação seguinte:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (6)$$

Onde:

$\beta_0 + \beta_1$ - Parâmetros da relação linear, onde β_0 representa a intersecção e β_1 a inclinação da reta;

ε - Erro aleatório dado pela diferença entre o valor observado Y e o valor previsto pela equação da reta $\beta_0 + \beta_1 X$;

Y - Valor previsto pela reta $\beta_0 + \beta_1 X$ é denominada variável dependente ou variável de resposta;

X - Variável independente.

As seguintes suposições estão associadas ao modelo de regressão linear simples: (i) Os erros têm a mesma variância desconhecida σ^2 e média zero; (ii) O valor de um erro não depende de qualquer outro, não há correlação entre os erros; (iii) Os erros têm uma distribuição normal; (iv) O experimentador controla a variável X, e a medida desta variável é realizada considerando o erro desprezível do ponto de vista prático (WERKEMA e AGUILAR, 1996).

A regressão linear múltipla envolve mais de uma variável independente X, pois na maioria dos casos as variáveis de resposta estão relacionadas com k variáveis independentes, sendo o seu modelo dado pela equação:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (7)$$

O adjetivo linear em análise de regressão linear múltipla é utilizado para indicar que o modelo é linear nos parâmetros $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$, e não porque Y é função linear dos X's.

Pode-se explicitar a proporção da variância total na VR explicada pelo modelo de regressão através do coeficiente de determinação R^2 , obtido através da equação:

$$R^2 = 1 - \frac{SQR}{SQT} \quad (8)$$

Onde:

SQT é a soma dos quadrados totais;

SQR é a soma dos quadrados devido aos resíduos.

Todas as observações estarão sobre o hiperplano definido pelo modelo e, se $R^2 = 0$, não existe nenhuma relação entre a variável dependente e as variáveis independentes. O coeficiente de determinação R^2 representa a quantidade de variabilidade nos dados considerada pelo modelo de regressão. Contudo, um grande valor de R^2 não implica, necessariamente, que o modelo ajustado seja adequado. É sempre possível aumentar o valor de R^2 por meio da adição de novas variáveis explicativas ao modelo. No entanto, apesar do maior valor para R^2 , nem sempre o novo modelo com mais variáveis explicativas será melhor que o modelo anterior. Para contornar este problema se utiliza, para o modelo de regressão múltipla, o coeficiente de determinação ajustado R^2_{aj} , que leva em consideração o número de variáveis explicativas incluídas no modelo obtido pela equação:

$$R^2_{aj} = 1 - \frac{SQR/(n-p)}{SQT(n-1)} = 1 - \frac{n-1}{n-p} (1 - R^2) \quad (9)$$

Onde:

n é o número de observações

p é o número de variáveis independentes mais um.

Se R^2 e R^2_{aj} forem muito diferentes, pode-se afirmar que há um excesso de variáveis no modelo, existe a possibilidade de termos não significativos terem sido incluídos no modelo.

Segundo Werkema e Aguilar (1996), para ajustar o modelo de regressão, as variáveis que representam os níveis dos fatores (variáveis xi) são usualmente utilizadas de forma codificada. A equação 10 é utilizada para obtenção dos valores codificados para as variáveis xi. Os mesmos autores indicam que as principais vantagens da utilização das variáveis

codificadas são: (i) obter uma maior precisão na estimativa dos coeficientes do modelo de regressão e (ii) facilitar a interpretação das estimativas dos coeficientes do modelo.

$$x_i = \frac{nf - (naf) + nbf}{(naf - nbf)/2} \quad (10)$$

Onde:

nf - é o nível do fator;

naf - é o nível alto do fator;

nbf - é o nível baixo do fator.

6. Estudo Prático

Apesar do promissor futuro das aplicações de sistemas RFID, uma série de desafios têm dificultado a adoção de sistemas RFID por parte do meio industrial. Wu et al. (2006) divide esses desafios em: desafios tecnológicos, padronização, patentes, custo, infraestruturas e retorno do investimento feito na tecnologia. No âmbito deste trabalho será abordado o grau da influência que certos materiais exercem sobre o funcionamento de sistemas RFID que operam em UHF e a sua relação na potência necessária para ler a etiqueta. Recentemente os sistemas RFID passivos que operam na banda de frequências UHF têm recebido uma grande quantidade de atenção, sendo geralmente aceito que os sistemas de RFID UHF podem revolucionar várias aplicações comerciais (FINKENZELLER, 2010).

Dispositivos RFID estão sujeitos a um grande número de fatores que interferem na capacidade de transmissão do sinal de RF, estas interferências podem ser causadas, pelos materiais onde as *tags* estão fixadas, barreiras físicas entre os vários componentes do sistema RFID, ruídos do ambiente, reflexões de RF, dificuldades na comunicação entre o *reader* e a *tag* devido à baixa potência do sinal emitido pelas etiquetas UHF do tipo passivas (AZAMBUJA, 2011). Kim et al. (2008) referem que neste tipo de sistema UHF podem ocorrer três tipos de interferências: (i) “*tag interference*”, que ocorre quando várias *tags* são energizadas pelo *reader* e refletem os seus respectivos sinais de RF simultaneamente causando uma colisão entre eles, (ii) “*reader-to-tag interference*” acontece quando uma *tag* está localizada em duas ou mais zonas de interrogação de diferentes *readers* tentando ambos comunicar simultaneamente com a *tag*, (iii) “*reader-to-reader interference*” quando o sinal emitido a partir de um leitor colide com o sinal emitido por leitores, podendo este tipo de interferência ocorrer mesmo não havendo um cruzamento entre as zonas de interrogação de diferentes *readers*.

Conforme introduzido previamente uma *tag* RFID do tipo passivo, não possui nenhuma fonte de energia própria, logo a transição de dados está dependente da capacidade da sua antena em receber as ondas de rádio emitidas pelo leitor e converte-las em energia elétrica suficiente para ativar o chip existente no seu interior e posteriormente transmitir de volta ao leitor os dados nele armazenados (WU, NYSTROM, *et al.*, 2006). A comunicação nos sistemas RFID passivos baseia-se no princípio da modelação *backscatter* das ondas eletromagnéticas: a antena da *tag* recebe as RF irradiadas pelo *reader*, altera as suas propriedades, e emite RF de volta ao *reader* com as informações requisitadas.

O material e a forma do objeto a ser identificado afeta de forma bastante significativa a performance da antena da *tag* RFID, e conseqüentemente o funcionamento de todo o sistema RFID, sendo que as ondas de rádio serão refletidas ou atenuadas de forma diferente consoante o material que estas encontram no seu caminho.

Uma vez que o desempenho das *tags* RFID passivas está dependente do campo eletromagnético recebido pelos *readers*, o design da antena presente na *tag* assim como os materiais nas proximidades ou em contato com a *tag* desempenham um papel fundamental na eficiência e fiabilidade de todo o sistema RFID. A presença de materiais coloca desafios na operação de um sistema RFID uma vez que estes podem atenuar, refletir as ondas de RF ou mesmo causar alterações na frequência de operação do sistema (PENTTILÄ, KESKILAMMI, *et al.*, 2006). A Figura 34 mostra a influência que alguns materiais provocam no sinal de RF.

Material	Efeito no sinal de RF
Papelão	Absorção/Deturpação
Plástico	Deturpação
Líquidos	Reflexão/Absorção
Metal	Reflexão

Figura 34 - Influência de alguns materiais no sinal de RF

Adaptado de: (PENTTILÄ, KESKILAMMI, *et al.*, 2006)

6.1. Objetivo do estudo

O experimento realizado teve como objetivo realizar um estudo sobre a intensidade do sinal de RF e a forma como determinados fatores poderão ter influência na recepção do sinal e conseqüente efeito que estes poderão ter no desempenho de um sistema RFID. Para isso foram projetados e realizados uma seqüência de ensaios experimentais, onde foram efetuadas uma série de medições da intensidade do sinal de RF recebido por um *reader*, na presença de materiais diferentes, variando de forma controlada os fatores de distância entre antena receptora e emissora dos equipamentos que constituem o sistema RFID (*reader/tag*) assim como a potência do sinal de RF emitido.

6.2. Equipamento utilizado

Para estudar a influência que os diferentes fatores podiam ter na intensidade do sinal de RF, foi montado um sistema RFID composto por: (i) um *Reader* “*ThingMagic Mercury4*”, conectado a uma antena “*Circular Bistatic – Acura*”, operando a uma potência variável de 5

mW e 10 mW e frequência constante de 915 MHz, Figura 35; (ii) uma *tag* RFID passiva UHF, “*EPC Gen2 Raflatac DogBone*”, colada a um produto, Figura 36. (iii) cinco recipientes construídos em materiais diferentes (Isopor, Plástico, Madeira, Metal e Papelão), Figura 37. Estes materiais foram escolhidos como forma de simular as diferentes possibilidades que poderão ser encontradas em ambientes industriais, a Figura 38, esquematiza o posicionamento dos equipamentos utilizados no decorrer do experimento.



Figura 35 – Antena Circular



Figura 36 – Tag passiva UHF, colada num produto



Figura 37 - Recipientes de diferentes materiais utilizados nos ensaios

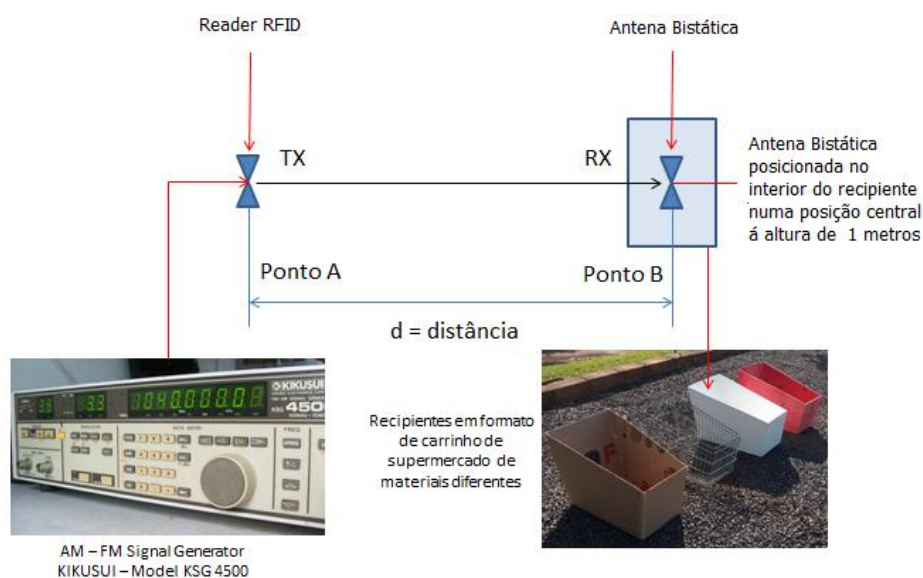


Figura 38 – Esquema exemplificativo dos ensaios e posicionamentos dos equipamentos

6.3. Identificação dos objetivos do experimento

Conforme referido em capítulos anteriores, as *tags* RFID passivas que operam em frequências UHF são as *tags* que atualmente possuem uma maior aceitabilidade e utilização no mercado, especialmente devido ao custo inferior que estas possuem, quando comparadas com as demais. No âmbito deste trabalho pretendeu-se realizar um estudo sobre a influência que diferentes materiais, distancia entre *Reader* e *Tag* e a potência do sinal, provocam na performance e funcionamento de um sistema RFID, mais concretamente na intensidade do sinal de RF recebido de volta pelo leitor.

6.4. Seleção das variáveis de resposta

Na seleção da variável de resposta definiu-se uma variável que fornecesse a informação relativa ao problema em estudo, influência que a presença de diferentes materiais, distância e potência do sinal provocam na transição e recepção de RF, para tal a variável de resposta identificada foi “Intensidade do sinal eletromagnético recebido” (Tabela 2).

Tabela 2 - Definição da Variável de Resposta

Variável de Resposta	Tipo (maior, menor ou nominal)	Alvo (unidade)	Especificações		Imp. Rel (IE)
			Min	Max	
Y1: Intensidade do sinal eletromagnético recebido	Maior	100	100	---	100%

6.5. Escolhas dos Parâmetros de processo

Nesta etapa, escolheram-se os parâmetros do processo para serem investigados no estudo. Sendo estes compostos pelos fatores controláveis, escolhidos devido a sua possível influência sobre a variável de resposta, tendo estes sido alterados propositalmente no decorrer do experimento e pelos fatores mantidos constantes, cujos efeitos provocados na variável de resposta não são de interesse para as conclusões do experimento (Tabela 3).

Tabela 3 - Fatores controláveis e fatores mantidos constantes

Fatores controláveis	Níveis reais
Tipo de material do recipiente onde será colocada a antena receptora	Espaço livre, Isopor, Papelão, Plástico, Metal, Madeira.
Distâncias entre antena receptora e emissora	1m, 2m, 3m, 4m, 5m, 6m, 7m, 8m, 9m, 10m, 11m, 12m, 13m, 14m e 15m.
Potência	5 mW, 10 mW
Fatores mantidos constantes	Níveis fixos
Frequência	915 MHz
Polarização da Antena Transmissora	Circular
Polarização da Antena Receptora	Circular
Ganho da Antena Transmissora	11,85 dBd = 14 dBi
Ganho da Antena Receptora	0 dBd = 2,15 dBi
Altura da Antena Transmissora/Solo	1 metro
Altura da Antena Receptora/Solo	1 metro
Posição da Antena no Interior dos Recipientes	Central

6.6. Fatores de Ruído

Ainda nesta etapa foram definidos os fatores não controláveis (Ruído), e que influenciam na variável de resposta do experimento, mas cujo controle é difícil ou impossível de ser realizado (Tabela 4).

Tabela 4 - Fatores de Ruído

Fatores de ruído
Z1: Temperatura
Z2: Umidade Relativa do Ar
Z3: Interferências Eletromagnéticas

6.7. Procedimentos dos ensaios

Os testes experimentais foram realizados em campo aberto numa área externa, num local livre de obstáculos e superfícies por forma a minimizar a influência que estes fatores poderiam ter nos resultados obtidos. Durante os testes experimentais mantiveram-se como fatores constantes: (i) a frequência de 915 MHz, (ii) a posição do *reader*, e (iii) a altura ao solo de 1 metro tanto da *tag* como do *reader*. Como fatores controláveis, foram considerados: (i) A distância horizontal distância entre o *reader* e a *tag* de 1 a 15 metros com incrementos de 1 metro, (ii) os recipientes onde a *tag* RFID colada ao produto foi colocada e (iii) a potência. Tendo sido efetuado a cada incremento de 1 metro entre a *tag* e o *reader* uma medição da intensidade do sinal RF recebido pelo *reader*.

Os testes experimentais foram divididos em duas sequências de ensaios. A primeira sequência de ensaios foi realizada em “espaço livre”, ou seja, não foi utilizado nenhum recipiente, a *tag* foi posicionada em cima de uma mesa com uma altura ao solo de 1 metro e diretamente em frente à antena RFID do *reader*, não havendo qualquer material entre estes. As leituras foram realizadas para verificar os resultados em espaço livre, sem a influência dos recipientes de diferentes materiais. A Figura 39 mostra o posicionamento do produto em relação à antena.



Figura 39 - Testes realizados em espaço livre

A segunda sequência de ensaios seguiu os mesmos procedimentos utilizados na primeira, no entanto, nestes ensaios foram utilizados os recipientes com os diversos tipos de materiais tendo a *tag* RFID sido colocada no interior de cada, Figura 40.



Figura 40 – Testes realizados com os recipientes

Os ensaios seguiram se seguinte ordem: (i) produto com a *tag* em espaço livre; (ii) produto com a *tag* no interior do recipiente de papelão; (iii) produto com a *tag* no interior do recipiente de isopor; (iv) produto com a *tag* no interior do recipiente de plástico; (v) produto com a *tag* no interior do recipiente de madeira; (vi) produto com a *tag* no interior do recipiente de metal.

Os 3 fatores controláveis que compõem o experimento: material do recipiente, distancia *Reader/Tag* e potência, variaram entre os níveis de 1 a 6, 1 a 15 e 1 a 2,

respetivamente. Foi utilizado um projeto fatorial completo, totalizando $6 \times 15 \times 2 = 180$ ensaios. No **Apêndice** apresenta-se a matriz experimental com todos os dados recolhidos durante o experimento assim como as respectivas medidas da variável de resposta.

6.8. Análise dos resultados

Os dados obtidos nos experimentos e apresentados no **Apêndice**, foram estudados com o auxílio do Software Minitab. Tendo sido analisados os efeitos principais isoladamente dos fatores controláveis sobre a variável de resposta Figura 41, e os efeitos de interação dos fatores controláveis sobre a variável de resposta, Figura 42. Na Tabela 5 é possível observar a análise de variância realizada, a partir da qual as conclusões foram obtidas.

Tabela 5 - Análise de Variância do experimento (ANOVA)

Fator Nível	Tipo	Valores
Material 6	fixo	Isopor; Livre; Madeira; Metal; Papelão; Plástico
Distancia 15	fixo	1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15
Potência 2	fixo	5; 10

Fonte	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Potência	1	18,6594	18,6594	18,6594	726,63	0,000
Distancia	14	16,8240	16,8240	1,2017	46,80	0,000
Material	5	135,5930	135,5930	27,1186	1056,05	0,000
Potência*Distancia	14	1,5735	1,5735	0,1124	4,38	0,000
Potência*Material	5	0,1538	0,1538	0,0308	1,20	0,312
Distancia*Material	70	5,6650	5,6650	0,0809	3,15	0,000
Potência*Distancia*Material	70	0,9615	0,9615	0,0137	0,53	0,998
Erro	180	4,6223	4,6223	0,0257		
Total	359	184,0525				

S = 0,160248 R-Sq = 97,49% R-Sq(adj) = 94,99%

Tendo considerado um nível de significância de 95%, conclui-se que a hipótese nula é rejeita e a hipótese alternativa é apoiada se o valor-p P for menor ou igual a 5% $P \leq 0.05$, logo pode ser afirmado que o efeito principal da *Potência*, *Distancia* e *Material* assim como a interação *Distancia*Material* produzem um efeito estatisticamente significativo na variável de resposta, Intensidade do sinal.

O valor do coeficiente de determinação R^2 ($R-SQ$) foi de 97.49% o que significa que existe uma relação bastante elevada entre a variável de resposta e as variáveis independentes (fatores controláveis), ou seja, o modelo utilizado explica 97.49% da variabilidade presente nos dados como pode ser constatado nas Figura 41 e Figura 42.

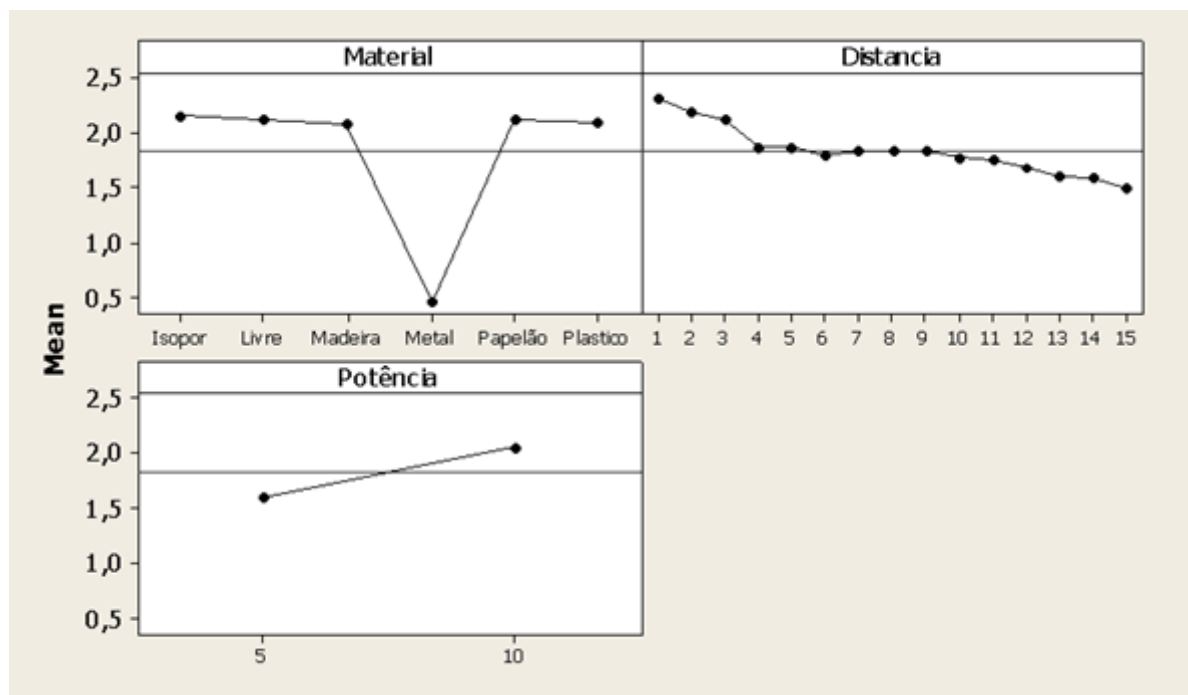


Figura 41 - Gráfico dos efeitos principais dos fatores controláveis e sobre a variável de resposta

O fator distância exerce um efeito negativo sobre a variável de resposta, o incremento da distância entre os dispositivos RFID provoca uma diminuição na intensidade do sinal de RF recebido. A potência do sinal por sua vez causa um efeito positivo sobre a variável de resposta, quanto maior a potência do sinal emitido maior será a intensidade do sinal recebido. A presença do Metal provoca uma deturpação no sinal de RF diminuindo na intensidade do sinal recebido.

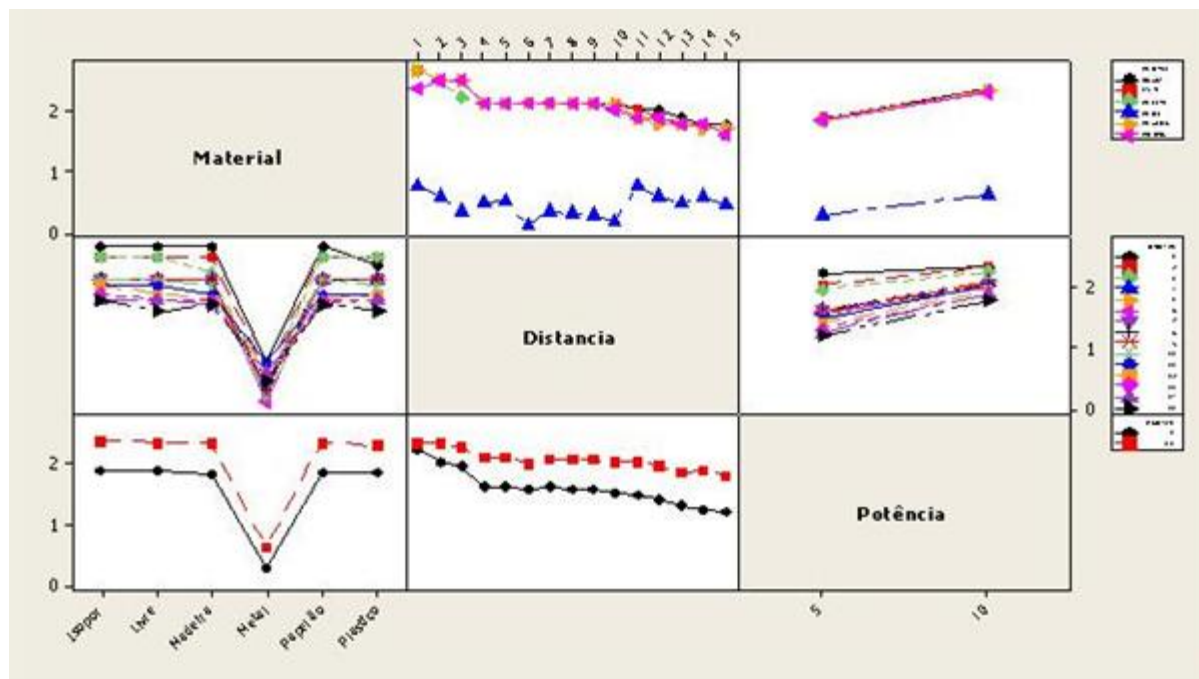


Figura 42 - Gráfico dos efeitos de interação dos fatores controláveis sobre a variável de resposta

Tabela 6 – Comparação Múltipla de Médias para os materiais

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence			
Material	N	Mean	Grouping
Isopor	60	2,1	A
Livre	60	2,1	A
Papelão	60	2,1	A
Plastico	60	2,1	A
Madeira	60	2,1	A
Metal	60	0,5	B

Means that do not share a letter are significantly different.

A Tabela 6 apresenta o teste de Tukey para comparação múltipla de médias para o Material, utilizando um nível de significância de 95% que permite observar que o efeito do metal na intensidade do sinal de RF difere significativamente dos restantes materiais, assim como do espaço livre.

7. Conclusões

A RFID é atualmente das tecnologias de Auto-ID que apresenta maior versatilidade e capacidade de expansão com um comprovado potencial de implementação nas mais diversas áreas, pelo fato de emitir e receber informações em tempo real e sem a necessidade de contato físico. No entanto, e apesar das aparentes vantagens e da crescente disseminação que a RFID tem vindo a ter especialmente nos últimos anos, problemas e questões têm sido levantados a quando da sua implementação no mercado real.

Falhas no envio e recepção de sinal de RF entre *tag* e o *reader*, interferência de fatores externos na comunicação entre os dispositivos RFID, nomeadamente a presença de diferentes materiais e os efeitos de deturpação, atenuação ou ampliação das RF que estes podem provocar no sinal e a presença de interferências eletromagnéticas produzidas por outros equipamentos, são alguns dos problemas/fatores encontrados no levantamento de literatura realizado e que poderão afetar o funcionamento e eficiência de um sistema RFID.

A análise experimental realizada neste trabalho pretendeu simular alguns dos problemas que a tecnologia RFID implementada num sistema de produção poderá ter, nomeadamente a presença de obstáculos físicos e a distância entre os elementos que compõem um sistema RFID.

Através da realização de um experimento planejado e utilizando a ferramenta ANOVA para uma análise de variância dos dados obtidos, verificou-se que os efeitos significativos sobre a variável de resposta Intensidade do sinal recebido são os efeitos principais, Material, Distância, Potência e Efeito da interação Distância*Material.

Uma análise dos gráficos dos efeitos principais dos fatores controláveis sobre a variável de resposta, Figura 41 e dos gráficos dos efeitos de interação dos fatores controláveis sobre a variável de resposta, Figura 42, permite concluir que com o aumentar da distância entre o *reader* e a *tag* RFID ocorre uma diminuição progressiva da intensidade do sinal que o *reader* recebe e que uma potência de sinal mais elevada resultará num aumento da intensidade do sinal. Examinando a interferência provocada pela presença dos diferentes materiais, conclui-se que apenas a presença de metal provoca uma alteração na intensidade do sinal diminuindo-o bastante, não provocando nos restantes materiais, (Isopor, Madeira, Papelão e Plástico) deturpações ou alterações no sinal recebido Esta conclusão vai de encontro à bibliografia existente e recolhida durante o processo de desenvolvimento deste trabalho.

8. Referências Bibliográficas

AHSAN, K.; SHAH, H.; KINGSTON, P. RFID Applications: An Introductory and Exploratory Study. **IJCSI International Journal of Computer Science Issues**, Vol. 7, Issue 1, No. 3, 2010.

ANGELES, R. RFID technologies: Supply-chain applications and implementation issues. **Information Systems Management**, Vol. 22, N. 1, p. 51-65, 2005.

ANTENNA Theory. Georgia: The Army Institute for Professional Development, 2005.

ANTONY, J. Some Key Things Industrial Engineers Should Know About Experiments Design. **Logistics Information Management**, p. Vol. 11, N. 6, P. 386-392, 1998.

AROR, S. R.; DEAVOURS, D. D. Evaluation of the State of Passive UHF RFID: An Experimental Approach. **IEEE Systems Journal**, Vol. 1, N. 2, p. 168-176, 2007.

AZAMBUJA, M. C. D. Modelos e Técnicas para Simulação de Sistemas UHF de Identificação por Rádio Frequência (RFID), Tese submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em Ciência da Computação, Agosto 2011.

AZAMBUJA, M. C. D. et al. **Análise de problemas e soluções propostas para uso da tecnologia RFID em sistemas produtivos**. XI SEPROSUL, 2011, Santa Maria. XI SEPROSUL - Semana de Engenharia de Produção Sul-Americana. [S.l.]: [s.n.]. 2011.

AZEVEDO, S. G.; FERREIRA, J. RFID Technology in Retailing: An Exploratory Study on Fashion Apparels. **The IUP Journal of Managerial Economics**, Vol. VII, No.1, 2009.

AZEVEDO, S. G.; FERREIRA, J. J. Radio frequency identification: a case study of healthcare organisations. **Int. J. Security and Networks**, Vol. 5, N. 2/3, 2010. 147-154.

BISQUOLO, P. A. Tipos de onda, de vibração, amplitude e comprimento de onda. Disponível em: <<http://educacao.uol.com.br/fisica/ondas--b-tipos-de-onda-de-vibracao-amplitude-e-comprimento-de-onda.jhtm>>. Acesso em: Março 2012.

BOLIC, M.; ATHALYE, A.; HAO LI, T. **RFID Systems: Research Trends and Challenges**. [S.l.]: John Wiley & Sons Ltd., 2010.

- BRINTRUP, A.; RANASINGHE, D.; MCFARLANE, D. RFID opportunity analysis for leaner manufacturing. **International Journal of Production Research**, Vol. 48, No. 9, p. 2745–2764, 2010.
- CAVOUKIAN, A. Tag, You're It: Privacy Implications of Radio Frequency Identification (RFID) Technology. **Information and Privacy Commissioner**, 2004.
- CHANG, S.; KLABJAN, D.; VOSSSEN, T. Optimal radio frequency identification deployment in a supply chain network. **Int. J. Production Economics** 125, p. 71-83, 2010.
- CHAO, C.; YANG, J.; JEN, W. Determining technology trends and forecasts of RFID by a historical review and bibliometric analysis from 1991 to 2005. **Tecnovation** 27, p. 268-279, 2007.
- DOBKIN, D. M. **The RF in RFID: Passive UHF RFID in Practice**. [S.l.]: Newnes, 2007.
- EPCGLOBAL. Tag Class Definitions. White Paper, 2008.
- FERRER, G.; DEW, N.; APTE, U. When is RFID right for your service? **Int. J. Production Economics**, 124, p. 414-425, 2010.
- FINKENZELLER, K. **RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication**. 3rd. ed. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
- FORCINIO, H. O Valor de Negócio da Tecnologia RFID. **White Paper - Windows Server System Engineered**, 2006.
- HARDGRAVE, B.; MILLER, R. The Myths and Realities of RFID. **International Journal of Global Logistics and Supply Chain Management**, 1, p. 1-16, 2006.
- HODGSON, S.; NABHANI, F.; ZAREI, S. AIDC feasibility with in a manufacturing SME. **Assembly Automation**, Vol. 30, N. 2, p. 109-116, 2010.
- HUANG, G. Q.; WRIGHT, P. K.; NEWMAN, S. T. Wireless manufacturing: a literature review, recent developments, and case studies. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing** Vol. 22, No. 7, p. 579-594, 2009.
- HUANG, Y.; WILLIAMS, B.; ZHENG, L. Reactive, model-based monitoring in RFID-enabled manufacturing. **Computers in Industry** 62, p. 811-819, 2011.

HUNT, V. D.; PUGLIA, A.; PUGLIA, M. **RFID-A Guide to radio frequency identification**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2007.

IDTECHEX. Rapid adoption of RFID in healthcare, 08 Maio 2006. Disponível em: <http://www.idtechex.com/research/articles/rapid_adoption_of_rfid_in_healthcare_00000470.asp>. Acesso em: 3 Janeiro 2012.

IDTECHEX. IDTechEx RFID Market projections 2008 to 2018, 2008. Disponível em: <<http://www.printedelectronicsworld.com/articles/idtechex-rfid-market-projections-2008-to-2018-00000813.asp>>. Acesso em: 2012 Janeiro 10.

INC., A. B. I. RFID White Paper, 2002.

INTERMEC. **ABCs of RFID**: Understanding and using radio frequency identification, White Paper. [S.l.]: [s.n.], 2009.

JAIN, A.; TANWER, A. Modified Epc Global Network Architecture of Internet of Things for High Load Rfid Systems. **Proc. of Int. Conf. on Advances in Computer Science**, p. 125-129, 2010.

KAPOOR, G.; ZHOU, W.; PIRAMUTHU, S. Challenges associated with RFID tag implementations in supply chains. **European journal of information Systems**, p. 529-533, 2009.

KHAN, M. Z. Generic RFID Application Framework. **A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Technology**, Department Of Computer Science & Engineering. Indian Institute Of Technology, Kanpur, June 2008.

KIM, D. et al. Interference analysis of UHF. **Progress In Electromagnetics Research B**, Vol. 4, 2008. 115-126.

LANDT, J. Shrouds of Time: The History of RFID. **AIM**, 2001.

LEE, H.; OZER, O. Unlocking the value of RFID. **Production and Operations Management** 16 (1), p. 40-64, 2007.

LIAO, W.-P.; LIN, T. M. Y.; LIAO, S.-H. Contributions to Radio Frequency Identification (RFID) research: An assessment of SCI-, SSCI-indexed papers from 2004 to 2008. **Decision Support Systems**, Vol. 50 , p. 548-556, 2011.

- LOZANO-NIETO, A. **RFID Design Fundamentals and Applications**. [S.l.]: Taylor & Francis Group, 2011.
- MCFARLANE, D.; SHEFFI, Y. The Impact of Automatic Identification on Supply Chain Operations. **The International Journal of Logistics Management** **1**, p. 14-17, 2003.
- MEILLER, Y. et al. Adaptive knowledge-based system for health care applications with RFID-generated information. **Decision Support Systems**, p. 198-207, 2011.
- MOHIUDDIN, K. M.; MAO, J. Optical Character Recognition. **Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering**, 1999.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 5ª. ed. [S.l.]: Arizona State University, 2001.
- NARAYANAN, A.; SINGH, S.; SOMASEKHARAN, M. Implementing RFID in Library: Methodologies, Advantages and Disadvantages, 2005.
- NGAI, E. W. T. et al. RFID research: an academic literature review (1995-2005) and future research directions. **Internacional Journal of Production Economics** **112** (2), p. 510-520, 2008.
- NGAI, E. W. T. et al. Implementing an RFID-based manufacturing process management system: Lessons learned and success factors. **Journal of Engineering and Technology Management**, p. 112-130, 2012.
- OLIVEIRA, R. P. Antena Yagi-Uda: Desenvolvimento de Antena para Telefonia Celular, 2008. Disponível em: <<http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialyagiuda/Default.asp>>. Acesso em: Abril 2012.
- PEDROSO, M. C.; ZWICKER, R.; DE SOUSA, C. A. Adoção de RFID no Brasil: Um estudo exploratório. **Revista de Administração Mackenzie**, **Vol.10,N. 1**, p. 12-36, 2009.
- PENTTILA, K. et al. Radar Cross-Section Analysis for Passive RFID. **IEE Proc.-Microw. Antennas Propag.** **Vol. 153, N.1**, 2006.
- PENTTILÄ, K. et al. Radio frequency technology for automated manufacturing and logistics control. Part 2: RFID antenna utilisation in industrial applications. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.**, 2006. 31: 116-124.

PRERADOVIC, S.; KARMARKAR, N. RFID Transponders - A Review. **4th International Conference on Electrical and Computer Engineering**, 2006.

PRERADOVIC, S.; NEMAI, C. K. Modern RFID Readers. **Microwave Journal**, 2007.

PY4ZBZ. Polarização de Ondas, 2008. Disponível em: <<http://www.qsl.net/py4zbz/antenas/polarizacao.htm>>. Acesso em: Abril 2012.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. S. Projeto de experimentos, Serie monográfica Qualidade. Porto Alegre: UFRGS, Escola de Engenharia, PPGEP, 2011.

ROBERTS, C. Radio Frequency Identification (RFID). **Computers and Security** **25**, p. 18-26, 2006.

RUGGEDIZED Mobile Bussiness Solutions, 2010. Disponível em: <<http://www.ruggedized-mobile-computing.com/rfid-frequency.html>>. Acesso em: 23 Dezembro 2011.

SARAC, Y.; ABSI, N.; DAUZÈRE-PÉRÈS, S. A literature review on the impact of RFID technologies on supply chain management. **Int. J. Production Economics**, p. 77-95, 2010.

SIKANDER, J. RFID Enabled Retail Supply Chain. **Microsoft Corporation**, 2005. Disponível em: <<http://msdn.microsoft.com/en-us/library/ms954628.aspx>>. Acesso em: 9 Janeiro 2012.

SOARES, M. MSPC - Informações Técnicas, 2007. Disponível em: <<http://www.mspc.eng.br/eletrn/antena110.shtml#isotrop>>. Acesso em: Março 2012.

SWEENEY II, P. J. **RFID For Dummies**. Indianapolis: Wiley Publishing, Inc., 2005.

TAJIMA, M. Strategic value of RFID in supply chain management. **Journal of Purchasing & Supply Management** **13**, p. 261-273, 2007.

THE Basics of RFID Technology. **RFID Journal**. Disponível em: <<http://www.rfidjournal.com/article/view/1337>>. Acesso em: 15 Outubro 2011.

THORNTON, F. **RFID Security**. [S.l.]: Syngress Publishing, Inc., 2006.

USTUNDAG, A.; TANYAS, M. The impacts of Radio Frequency Identification (RFID) technology on supply chain costs. **Transportation Research Part E** **45**, p. 29-38, 2009.

VOULODIMOSA, A. S. et al. A complete farm management system based on animal identification using RFID technology. **Computers and Electronics in Agriculture** **70**, p. 380-388, 2010.

WADE, P. The W1GHZ Online Microwave Antenna Book, 1998. Disponível em: <<http://www.w1ghz.org/antbook/contents.htm>>. Acesso em: Março 2012.

WANG, Y.-M.; WANG, Y.-S.; YANG, Y.-F. Understanding the determinants of RFID adoption in the manufacturing industry. **Tecnological Forecasting & Social Change** 77, p. 803-815, 2010.

WANT, R. An Introduction to RFID Technology. **Pervasive Computing, IEEE**, v. vol. 5, p. 25-36, 2006.

WERKEMA, M. C. C.; AGUILAR, S. **Planejamento e Análise de Experimentos**: como identificar e avaliar as principais variáveis influentes em um processo. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1996.

WU, N. C. et al. **Challenges to Global RFID Adoption**. PICMET 2006 Proceedings. Istanbul: [s.n.]. 9-13 July 2006.

XIAO, Y. et al. Radio frequency identification: technologies, applications and research issues. **Wiley InterScience**, 2006. 457-472.

ZHOU, W. ITEM-LEVEL INFORMATION VISIBILITY: AN APPLICATION OF RFID, UNIVERSITY OF FLORIDA, 2008.

ZHU, X.; MUKHOPADHYAY, S.; KURATA, H. A review of RFID technology and its managerial applications in different industries. **J. Eng. Technol. Manage.**, 2011.

APÊNDICE

Dados obtidos durante a realização do experimento

Ordem de Execução	Fatores Controláveis			Variável de Resposta			
	Material	Distancia	Potência	Sinal dBm	Sinal W	Sinal mW	Sinal nW
1	Livre	1	5	-56	0,0000000025	0,0000025119	2,5119
2	Livre	1	10	-56	0,0000000025	0,0000025119	2,5119
3	Livre	2	5	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
4	Livre	2	10	-56	0,0000000025	0,0000025119	2,5119
5	Livre	3	5	-56	0,0000000025	0,0000025119	2,5119
6	Livre	3	10	-56	0,0000000025	0,0000025119	2,5119
7	Livre	4	5	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
8	Livre	4	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
9	Livre	5	5	-57,5	0,0000000018	0,0000017783	1,7783
10	Livre	5	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
11	Livre	6	5	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
12	Livre	6	10	-56	0,0000000025	0,0000025119	2,5119
13	Livre	7	5	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
14	Livre	7	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
15	Livre	8	5	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
16	Livre	8	10	-56	0,0000000025	0,0000025119	2,5119
17	Livre	9	5	-57,5	0,0000000018	0,0000017783	1,7783
18	Livre	9	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
19	Livre	10	5	-57,5	0,0000000018	0,0000017783	1,7783
20	Livre	10	10	-56	0,0000000025	0,0000025119	2,5119
21	Livre	11	5	-58	0,0000000016	0,0000015849	1,5849
22	Livre	11	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
23	Livre	12	5	-58	0,0000000016	0,0000015849	1,5849
24	Livre	12	10	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
25	Livre	13	5	-58	0,0000000016	0,0000015849	1,5849
26	Livre	13	10	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
27	Livre	14	5	-58,5	0,0000000014	0,0000014125	1,4125
28	Livre	14	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
29	Livre	15	5	-59	0,0000000013	0,0000012589	1,2589
30	Livre	15	10	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953

31	Isopor	1	5	-56	0,0000000025	0,0000025119	2,5119
32	Isopor	1	10	-56	0,0000000025	0,0000025119	2,5119
33	Isopor	2	5	-56	0,0000000025	0,0000025119	2,5119
34	Isopor	2	10	-56	0,0000000025	0,0000025119	2,5119
35	Isopor	3	5	-56	0,0000000025	0,0000025119	2,5119
36	Isopor	3	10	-56	0,0000000025	0,0000025119	2,5119
37	Isopor	4	5	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
38	Isopor	4	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
39	Isopor	5	5	-57,5	0,0000000018	0,0000017783	1,7783
40	Isopor	5	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
41	Isopor	6	5	-57,5	0,0000000018	0,0000017783	1,7783
42	Isopor	6	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
43	Isopor	7	5	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
44	Isopor	7	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
45	Isopor	8	5	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
46	Isopor	8	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
47	Isopor	9	5	-57,5	0,0000000018	0,0000017783	1,7783
48	Isopor	9	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
49	Isopor	10	5	-57,5	0,0000000018	0,0000017783	1,7783
50	Isopor	10	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
51	Isopor	11	5	-58	0,0000000016	0,0000015849	1,5849
52	Isopor	11	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
53	Isopor	12	5	-58	0,0000000016	0,0000015849	1,5849
54	Isopor	12	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
55	Isopor	13	5	-58	0,0000000016	0,0000015849	1,5849
56	Isopor	13	10	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
57	Isopor	14	5	-58,5	0,0000000014	0,0000014125	1,4125
58	Isopor	14	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
59	Isopor	15	5	-58,5	0,0000000014	0,0000014125	1,4125
60	Isopor	15	10	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
61	Plástico	1	5	-56	0,0000000025	0,0000025119	2,5119
62	Plástico	1	10	-56	0,0000000025	0,0000025119	2,5119
63	Plástico	2	5	-56,6	0,0000000022	0,0000021878	2,1878
64	Plástico	2	10	-56	0,0000000025	0,0000025119	2,5119
65	Plástico	3	5	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
66	Plástico	3	10	-56	0,0000000025	0,0000025119	2,5119
67	Plástico	4	5	-57,5	0,0000000018	0,0000017783	1,7783
68	Plástico	4	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
69	Plástico	5	5	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
70	Plástico	5	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387

71	Plástico	6	5	-57,5	0,0000000018	0,0000017783	1,7783
72	Plástico	6	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
73	Plástico	7	5	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
74	Plástico	7	10	-56	0,0000000025	0,0000025119	2,5119
75	Plástico	8	5	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
76	Plástico	8	10	-56	0,0000000025	0,0000025119	2,5119
77	Plástico	9	5	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
78	Plástico	9	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
79	Plástico	10	5	-57,5	0,0000000018	0,0000017783	1,7783
80	Plástico	10	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
81	Plástico	11	5	-58	0,0000000016	0,0000015849	1,5849
82	Plástico	11	10	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
83	Plástico	12	5	-58	0,0000000016	0,0000015849	1,5849
84	Plástico	12	10	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
85	Plástico	13	5	-58	0,0000000016	0,0000015849	1,5849
86	Plástico	13	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
87	Plástico	14	5	-58,5	0,0000000014	0,0000014125	1,4125
88	Plástico	14	10	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
89	Plástico	15	5	-58,5	0,0000000014	0,0000014125	1,4125
90	Plástico	15	10	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
91	Madeira	1	5	-55,5	0,0000000028	0,0000028184	2,8184
92	Madeira	1	10	-56	0,0000000025	0,0000025119	2,5119
93	Madeira	2	5	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
94	Madeira	2	10	-56	0,0000000025	0,0000025119	2,5119
95	Madeira	3	5	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
96	Madeira	3	10	-56	0,0000000025	0,0000025119	2,5119
97	Madeira	4	5	-57,5	0,0000000018	0,0000017783	1,7783
98	Madeira	4	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
99	Madeira	5	5	-57,5	0,0000000018	0,0000017783	1,7783
100	Madeira	5	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
101	Madeira	6	5	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
102	Madeira	6	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
103	Madeira	7	5	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
104	Madeira	7	10	-56	0,0000000025	0,0000025119	2,5119
105	Madeira	8	5	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
106	Madeira	8	10	-56	0,0000000025	0,0000025119	2,5119
107	Madeira	9	5	-57,5	0,0000000018	0,0000017783	1,7783
108	Madeira	9	10	-56	0,0000000025	0,0000025119	2,5119
109	Madeira	10	5	-58	0,0000000016	0,0000015849	1,5849
110	Madeira	10	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387

111	Madeira	11	5	-58	0,0000000016	0,0000015849	1,5849
112	Madeira	11	10	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
113	Madeira	12	5	-58,5	0,0000000014	0,0000014125	1,4125
114	Madeira	12	10	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
115	Madeira	13	5	-58	0,0000000016	0,0000015849	1,5849
116	Madeira	13	10	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
117	Madeira	14	5	-59	0,0000000013	0,0000012589	1,2589
118	Madeira	14	10	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
119	Madeira	15	5	-59	0,0000000013	0,0000012589	1,2589
120	Madeira	15	10	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
121	Metal	1	5	-63	0,0000000005	0,0000005012	0,5012
122	Metal	1	10	-60	0,0000000010	0,0000010000	1,0000
123	Metal	2	5	-63,5	0,0000000004	0,0000004467	0,4467
124	Metal	2	10	-61,5	0,0000000007	0,0000007079	0,7079
125	Metal	3	5	-67	0,0000000002	0,0000001995	0,1995
126	Metal	3	10	-62,5	0,0000000006	0,0000005623	0,5623
127	Metal	4	5	-65,5	0,0000000003	0,0000002818	0,2818
128	Metal	4	10	-61,5	0,0000000007	0,0000007079	0,7079
129	Metal	5	5	-65,5	0,0000000003	0,0000002818	0,2818
130	Metal	5	10	-61,5	0,0000000007	0,0000007079	0,7079
131	Metal	6	5	-75,5	0,0000000000	0,0000000282	0,0282
132	Metal	6	10	-67,5	0,0000000002	0,0000001778	0,1778
133	Metal	7	5	-66,5	0,0000000002	0,0000002239	0,2239
134	Metal	7	10	-63	0,0000000005	0,0000005012	0,5012
135	Metal	8	5	-67	0,0000000002	0,0000001995	0,1995
136	Metal	8	10	-63	0,0000000005	0,0000005012	0,5012
137	Metal	9	5	-69	0,0000000001	0,0000001259	0,1259
138	Metal	9	10	-63	0,0000000005	0,0000005012	0,5012
139	Metal	10	5	-71,5	0,0000000001	0,0000000708	0,0708
140	Metal	10	10	-65	0,0000000003	0,0000003162	0,3162
141	Metal	11	5	-63	0,0000000005	0,0000005012	0,5012
142	Metal	11	10	-59,5	0,0000000011	0,0000011220	1,1220
143	Metal	12	5	-64,5	0,0000000004	0,0000003548	0,3548
144	Metal	12	10	-60,5	0,0000000009	0,0000008913	0,8913
145	Metal	13	5	-65	0,0000000003	0,0000003162	0,3162
146	Metal	13	10	-62	0,0000000006	0,0000006310	0,6310
147	Metal	14	5	-64,5	0,0000000004	0,0000003548	0,3548
148	Metal	14	10	-60,5	0,0000000009	0,0000008913	0,8913
149	Metal	15	5	-65	0,0000000003	0,0000003162	0,3162
150	Metal	15	10	-62,5	0,0000000006	0,0000005623	0,5623

151	Papelão	1	5	-55,5	0,0000000028	0,0000028184	2,8184
152	Papelão	1	10	-55,5	0,0000000028	0,0000028184	2,8184
153	Papelão	2	5	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
154	Papelão	2	10	-55,5	0,0000000028	0,0000028184	2,8184
155	Papelão	3	5	-56	0,0000000025	0,0000025119	2,5119
156	Papelão	3	10	-55,5	0,0000000028	0,0000028184	2,8184
157	Papelão	4	5	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
158	Papelão	4	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
159	Papelão	5	5	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
160	Papelão	5	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
161	Papelão	6	5	-57,5	0,0000000018	0,0000017783	1,7783
162	Papelão	6	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
163	Papelão	7	5	-57,5	0,0000000018	0,0000017783	1,7783
164	Papelão	7	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
165	Papelão	8	5	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
166	Papelão	8	10	-56	0,0000000025	0,0000025119	2,5119
167	Papelão	9	5	-57,5	0,0000000018	0,0000017783	1,7783
168	Papelão	9	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
169	Papelão	10	5	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
170	Papelão	10	10	-56	0,0000000025	0,0000025119	2,5119
171	Papelão	11	5	-58	0,0000000016	0,0000015849	1,5849
172	Papelão	11	10	-57	0,0000000020	0,0000019953	1,9953
173	Papelão	12	5	-58,5	0,0000000014	0,0000014125	1,4125
174	Papelão	12	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
175	Papelão	13	5	-58	0,0000000016	0,0000015849	1,5849
176	Papelão	13	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
177	Papelão	14	5	-59	0,0000000013	0,0000012589	1,2589
178	Papelão	14	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387
179	Papelão	15	5	-58,5	0,0000000014	0,0000014125	1,4125
180	Papelão	15	10	-56,5	0,0000000022	0,0000022387	2,2387

