



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica.



Projeto de Conclusão de Curso

Tema: Estudo da viabilidade de implantação de sistemas RFID nas estradas.

Curso: Engenharia Elétrica

Professor: Glauco Fontgalland

Aluno: Vítor Andrade Freitas

Mat.: 20411206

Campina Grande, setembro de 2009

Índice

Introdução e contexto do projeto.....	3
Capítulo I: Generalidades sobre o sistema RFID e caracterização do asfalto.....	4
1. Fundamentos do sistema RFID	4
2. Caracterização de estradas	5
2.1 Interação onda eletromagnética e estrada.....	6
3. Banco de testes representativo do asfalto.....	7
4. Referências	9
Capítulo II : Estudo da RFID em baixa e alta frequência (BF e HF).....	10
1. Princípio físico de comunicação entre etiqueta e leitor.....	10
1.1 Lei de Biot-Savart	11
1.2 Campo magnético emitido por uma espira circular	11
1.3 Campo magnético emitido por uma espira retangular	12
2. Caracterização do sistema RFID BF/HF	13
2.1 Coeficiente de acoplamento (k).....	13
2.2 Tensão induzida.....	14
2.3 Fator de qualidade	14
2.4 Campo magnético mínimo de ativação	15
2.5 Distância Máxima de ativação	16
3. Normas em BF e HF.....	17
9. Conclusão	27
10. Referências	28
Capítulo III: Estudo do sistema RFID ultra-alta frequência (UHF).....	29
1. Introdução.....	29
2. Teoria da RFID UHF.....	30
2.1 Equação de Friis	30
2.2 Telealimentação	31
2.3 Retromodulação	31
2.4 Enlace ascendente	32
3. Resultados dos testes realizados em UHF	33
3.1 Resultados das medições dos parâmetros de reflexão e transmissão.....	33
4. Testes funcionais em UHF	41
4.1 Medida da potência mínima de ativação dos tags	41
4.2 Testes com um sistema RFID completo.....	48
5. Referências	50
Conclusão	51

Introdução e contexto do projeto

Os Sistemas de Identificação por Rádio Freqüência (RFID) estão em franca expansão em todo o mundo. O número de aplicações cresce a cada ano.

Como exemplo, no ramo da agropecuária, etiquetas ou tags RFID vêm sendo correntemente utilizadas da seguinte forma, são colocadas etiquetas adesivas RFID nos animais, que contêm um número de identificação do animal. Em seguida, o produtor com o auxílio de um leitor RFID vai aproximar a antena desse leitor à etiqueta do animal, e assim, captar esse número de identificação, que permitirá o acesso a um banco de dados, contendo as informações mais relevantes sobre esse animal.

Pode-se citar ainda inúmeras outras aplicações, na área de reconhecimento de cartões de transporte, ou identificação de cartões bancários e na detecção de roubos de produtos em grandes lojas.

Observa-se que em todas estas aplicações, o meio entre a etiqueta e o leitor é o ar. Entretanto, começam a surgir questionamentos se seria possível utilizar esse sistema em outros meios de propagação, mais complexos, diferentes do ar.

Este projeto de fim de estudos se encaixa neste contexto e foi proposto pelo *Commissariat à l'énergie Atomique* (CEA-Grenoble) à *Ecole Supérieure d'Ingénieurs en Systèmes Avancés et Réseaux* (ESISAR).

Mais especificamente, será estudada a viabilidade da implantação de tags nas estradas, o meio de propagação seria então o asfalto. Existem inúmeras aplicações possíveis desse estudo, pode-se utilizar os tags associados a sensores que irão monitorar o estado interno da pista ou identificar vazamentos em canos no subsolo. É possível ainda, utilizar no controle do tráfego ou em pedágios eletrônicos, poder-se-ia inclusive aplicar em sistemas de condução inteligente de carros, ou seja, sem a necessidade do motorista humano, para isso, tags seriam espalhados por toda a pista, de forma a monitorar a trajetória dos veículos.

Em resumo, o objetivo deste projeto será mostrar se o sistema RFID funcionaria nessas condições adversas, em caso positivo, verificar qual seria o desempenho, ou seja, qual a profundidade poderíamos implantar os tags, mantendo os níveis do sinal de entrada dentro das especificações internacionais, e finalmente, quais freqüências, dentre as permitidas pelas normas, seriam as mais viáveis.

Para atender a estes objetivos, o presente estudo será estruturado da seguinte forma, em três capítulos: o primeiro fará uma descrição dos fundamentos da RFID, seguido por uma análise das principais características do asfalto, que poderiam perturbar a transmissão de sinais entre o leitor e o tag; o segundo abordará mais detalhadamente o sistema RFID a baixas e altas freqüências, 125kHz e 13,56MHz, seguido da análise dos experimentos práticos realizados nestas freqüências; o último capítulo tratará do RFID em ultra-altas freqüências, 856MHz, uma análise teórica acompanhada também de testes práticos.

Capítulo I: Generalidades sobre o sistema RFID e caracterização do asfalto.

1. Fundamentos do sistema RFID

O sistema RFID é composto essencialmente por três elementos, o leitor, a antena do leitor e a etiqueta ou tag (figura 1) [1].

O tag é geralmente um objeto passivo, ou seja, ele não possui nem bateria nem nenhuma outra forma de alimentação interna.

O leitor, através de uma antena, vai emitir requisições ao tag na forma de ondas eletromagnéticas. O tag, por sua vez, vai extrair a portadora deste sinal, retificá-la e usá-la para alimentar os seus circuitos internos. Há ainda um outro problema, que é o de como enviar essa resposta ao leitor, se o tag é desprovido de componentes ativos [2].

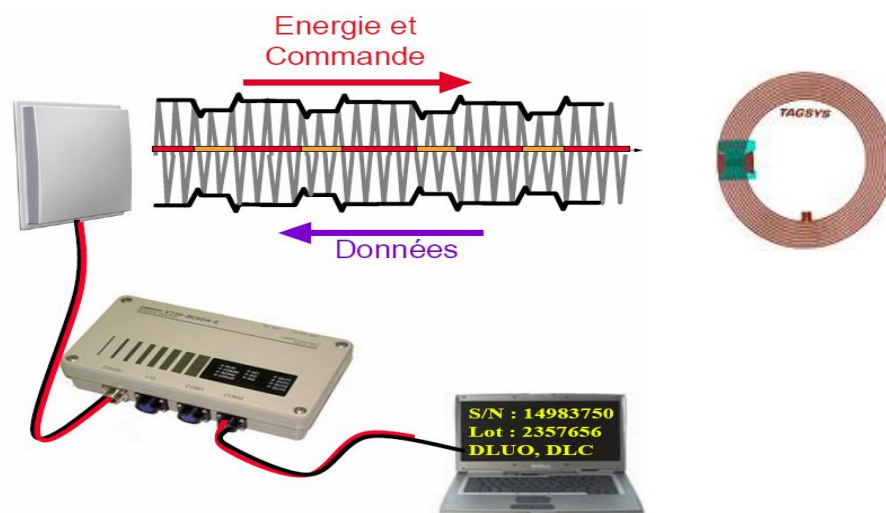


Figura 1: Esquema do sistema RFID

A solução será utilizar a modulação de carga ou retromodulação associada ao radar cross section (RCS). O princípio básico é o seguinte: uma chave controlada pelos bits a serem enviados apresentará dois estados, o 0 que liga a antena do tag a um circuito aberto e o 1 que a liga num curto circuito. Então quando o sinal proveniente do leitor atinge o tag, se a resposta for, por exemplo, o bit 0, a chave ficará na posição de circuito aberto e o sinal vai ser predominantemente refletido. Enquanto que com a antena do tag em curto, o sinal vai ser predominantemente absorvido. Assim, o leitor captará dois níveis de sinal, representando a resposta do tag correspondente ao circuito aberto ou ao curto da antena do tag.

Outro ponto fundamental no estudo da RFID é a frequência de operação. Pelas normas internacionais, a RFID pode utilizar a bandas ISM (*Industrial Scientific et Medical*), destinadas à indústria e às pesquisas médica e científica. As principais aplicações da RFID situam-se nas baixas (BF), altas (HF)

e ultra-alta frequências (UHF). Segundo as normas européias, a RFID BF corresponde às frequências em torno de 125kHz, HF em 13,56 MHz e a UHF em 868 MHz [3].

A escolha da frequência vai influenciar todos os aspectos do sistema. Em BF e HF, por exemplo, a transmissão ocorre por acoplamento magnético, enquanto em UHF, ocorre efetivamente via ondas eletromagnéticas, que podem ser consideradas planas. Em UHF, as antenas são do tipo dipolo elétrico ou derivadas do dipolo. Em BF e HF, as antenas são do tipo *loop*, para facilitar a captação do fluxo magnético. UHF também permite taxas de transmissão mais elevadas e maiores distâncias de transmissão, só que possui um custo mais alto.

Para o tipo de aplicação proposta, deve-se fazer então um estudo da tecnologia RFID que seria menos perturbada pelo meio de transmissão em questão, o asfalto.

2. Caracterização de estradas

Com o objetivo de modelizar a transmissão dos sinais do leitor ao tag dentro do asfalto, é preciso inicialmente conhecer com o máximo de precisão possível os parâmetros elétricos deste meio, sobretudo, a permissividade elétrica, a permeabilidade magnética e a condutividade elétrica.

As estradas representam um meio bastante complexo composto por diversas camadas, em que, por sua vez, a distribuição e a composição dessas camadas varia de acordo com a utilização dessa estrada, se é o caso de uma pista para um tráfego mais pesado ou uma pista rural de tráfego menos intenso, por exemplo. Vai depender ainda do local onde a pista está sendo construída, visto que normalmente aproveita-se boa parte do material que existe na região para reduzir gastos com transporte [4].

Um exemplo da composição de uma pista é ilustrado na figura 2 [5].

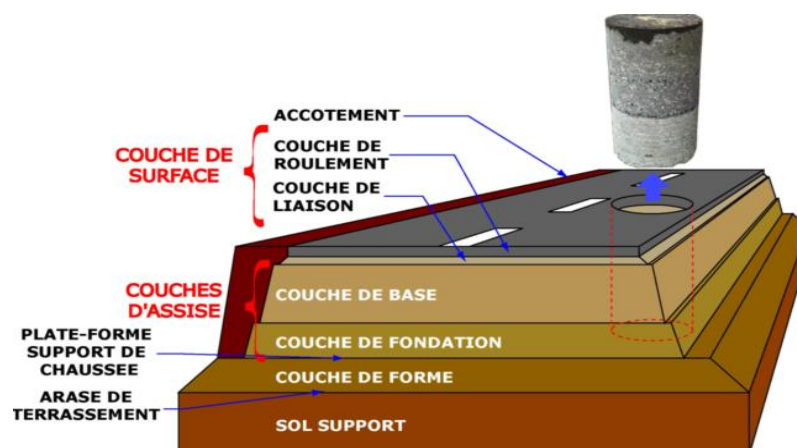


Figura 2: Ilustração da composição de uma pista.

2.1 Interação onda eletromagnética e estrada

O estudo da propagação de ondas eletromagnéticas em uma estrada compreende dois aspectos:

- Em primeiro lugar, o estudo da propagação de ondas eletromagnéticas em um meio estratificado: o meio é multicamadas não homogêneo, pois é composto de camadas de materiais diferentes. Se o comprimento de onda do sinal propagante é superior às dimensões da heterogeneidade (grãos, fissuras, descolamento), cada camada pode ser considerada como um meio homogêneo. Quando o comprimento de onda é da magnitude das heterogeneidades, fenômenos de difração deverão ocorrer, as camadas se tornam então heterogêneas. O asfalto padrão é então duplamente heterogêneo[6].
- Em segundo lugar, o estudo dos materiais que compõem uma camada da estrada e seu comportamento quando submetido a um campo eletromagnético. Qualquer solicitação eletromagnética conduz a uma resposta do meio. Essa reação pode depender da frequência e se manifesta em vários fenômenos que podem ser quantificados através de medidas de permissividade e condutividade elétrica, e pode ser entendida pela análise da composição dos materiais.

Uma onda eletromagnética e um meio interagem através de três parâmetros: a condutividade elétrica σ , permissividade dielétrica ϵ e permeabilidade magnética μ . Estes três parâmetros aparecem claramente nas equações de Maxwell e podem:

- Ter uma parte complexa e participar na atenuação global de onda eletromagnética;
- Ser dependentes da frequência (natureza dispersiva do meio).

Entretanto, uma camada de asfalto nas frequências utilizadas, pode ser considerada como um meio homogêneo, linear e isotrópico, o que implica que σ e ϵ_r [6]:

- São independentes do espaço de coordenadas X, Y e Z na camada, e são escalares,
- São linearmente relacionados com campos aplicados,
- São independentes dos campos de polarização.

2.1.1 Meio Isotrópico

Os materiais da estrada podem ser considerados como isotrópicos (dado que são policristalinos), de modo que suas permissividades serão escalares complexas [6].

Dessa forma, o piso é considerado um meio não-dispersivo, composto de camadas planas, lineares e isotrópicas se comportando como um dielétrico a baixas perdas, a perda de energia se dá principalmente devido a correntes de deslocamento. Esta hipótese não é mais válida se houver heterogeneidades da ordem do comprimento de onda (grãos, rachaduras, laminações), se o teor de água tornar-se suficiente para perturbar a propagação de ondas eletromagnéticas e, finalmente, se a fadiga ou condições de instalação do pavimento (compactação) introduzirem distorções estruturais tornando o meio anisotrópico.

2.2.2 Compacidade e propriedades dielétricas

Da compacidade se encontra a concentração de poros no material. Além das propriedades dielétricas

intrínsecas dos componentes, esta concentração de poros desempenha um papel importante na permissividade efetiva do material, visto que podem conter água e levar a fenômenos de polarização e condução [7].

Alguns fatores que podem minimizar a influência da presença de água:

- Em primeiro lugar, os materiais utilizados são dimensionados para serem impermeáveis;
- Em segundo lugar, se água é encontrada presa dentro do material, ela será pouco representativa para a condutividade, visto que a porcentagem de poros que se comunicam representa apenas uma pequena porcentagem de lacunas existentes.

2.2.3 Fenômeno da difração

Quando o comprimento de onda do campo aplicado é da ordem das maiores heterogeneidades, a difração deverá ser levada em conta.

A relação entre o tamanho de heterogeneidades, o comprimento de onda e a frequência é definida por (Eq.1.1):

$$L_g \leq \lambda = \frac{c}{f_c} \quad (\text{Eq.1.1})$$

Onde f_c é a frequência de corte superior, L_g , a dimensão da maior heterogeneidade e ϵ_r , a permissividade relativa real do material.

Tem-se, portanto, que calcular a frequência de corte e compará-las à frequência de operação, se esta for maior, será necessário considerar a difração.

Em resumo, pode-se dizer que o meio é quase uniforme, se a frequência de operação estiver abaixo do corte. Entretanto, se for superior, os valores de permissividade elétrica não serão mais precisos.

3. Banco de testes representativo do asfalto

Para possibilitar a execução de testes funcionais do sistema RFID na estrada, foi nos disponibilizado pelo CEA um banco representativo de um asfalto padrão (figura 3).



Figura 3: Foto do banco representativo do asfalto

Este banco é constituído por três camadas, de cima para baixo: o Betão betuminoso Macio (BBM), grave betume (GB3) e grave não tratado (GNT). Na figura 3, observa-se ainda 6 tubos que saem do banco, que foram colocados no momento da concepção do banco, a fim de dar suporte a colocação de sondas e tags, o que permite a execução de ensaios a 6 profundidades diferentes, englobando as três camadas.

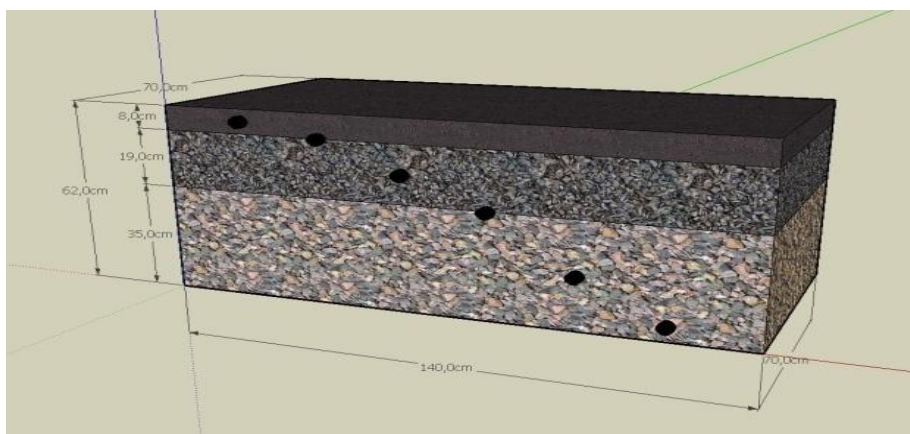


Figura 4: Ilustração do banco de testes.

Na figura 4, ilustra-se as três camadas do banco, com as profundidades correspondentes de cada uma e o material presente. Os buracos correspondem aos locais por onde passam os canos.

A tabela 1 reúne os parâmetros elétricos encontrados em [6] e [7] para os materiais das camadas do banco.

Tabela 1: Parâmetros dos materiais encontrados no banco de testes.

Material	Permissividade elétrica relativa	Condutividade (S/m)	Coefficiente de absorção (dB/m)	Impedância (Ω)	Comprimento de onda (cm)
Ar	1	0	0	377	34,56
Betão Betuminoso Macio (BBM),	4,72	3,32e-3	2,50	173	15,91
Grave Betume (GB)	5,81	1,14e-2	7,74	156	14,34
Grave Não tratado (GNT)	6	5e-3	3,34	154	14,11

Estes materiais foram escolhidos de forma a representar o tipo de asfalto mais comumente utilizado.

4. Referências

[1] FINKENZELLER, Klaus 1999, RFID Handbook Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification

[2] DOMENIC, Paret. Identification radiofréquence et cartes à puce sans contact.

[3] DOMENIC, Paret. Applications en identification radiofréquence et cartes à puce sans contact.

[4] Catalogue des structures types de chaussées neuves Lcpc-Setra - Edition 1998
http://www.colas-cst.com/documents/publications/route_futur_cd/annexes.htm#annexe1

[5] Catalogue des Structures de Chaussées 2003

[6] FAUCHARD, Cyrille. Utilisation de très hautes fréquences application à l'auscultation non destructive de la chaussée.

[7] Electrical Properties of Road Materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys - T.Saarenketo Oulu 2006

Capítulo II : Estudo da RFID em baixa e alta frequência (BF e HF)

1. Princípio físico de comunicação entre etiqueta e leitor

O objetivo deste estudo é de apresentar a teoria básica que governa o funcionamento de um sistema RFID em BF (125kHz) e HF (13,56MHz) (figura 5).

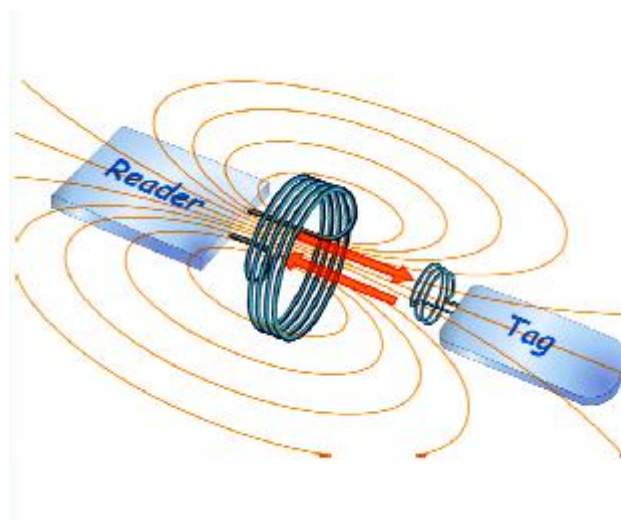


Figura 5: Esquema de comunicação leitor-etiqueta em BF e HF

A transmissão de sinais RF pode-se dar de duas maneiras diferentes: por campos próximos ou por campos distantes. A distinção entre esses dois modos é definida a partir da relação entre a distância de transmissão e o comprimento de onda do sinal [1].

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{Eq.2.1}) \quad \text{Onde } c \text{ é a velocidade da luz e } f \text{ é a frequência do sinal em Hz.}$$

A fronteira entre campos próximos e distantes é definida de maneira simplificada por :

$$\frac{\lambda}{2\pi} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Entretanto, uma formulação mais elaborada que leva em conta as dimensões da antena receptora:

$$\frac{2D^2}{\lambda} \quad (\text{Eq.2.3}) \quad \text{onde } D \text{ é a maior dimensão da antena emissora.}$$

A tabela 1 apresenta o limite entre campos próximos e distantes nas frequências mais usuais em RFID.

	Unidade	BF	HF	UHF
Frequência (f)	MHz	0,125	13,56	868
Comprimento de onda (λ)	m	2400	22,1	0,35
Fronteira campo próximo-distante : $\lambda / (2\pi)$	m	382,2	3,5	0,06

Tabela 1

Como nas aplicações de RFID em BF e HF, a distância de comunicação é geralmente inferior a 1 metro, estaremos sempre na região de campos próximos.

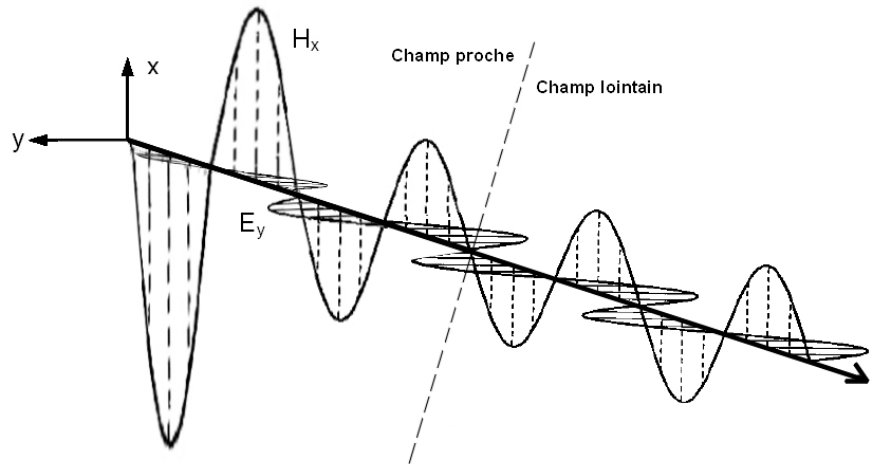


Figura 6: Ilustração da fronteira entre campos próximos e distantes

A figura 6 ilustra que na região de campos próximos, o campo magnético é mais forte. Esta situação caracteriza o acoplamento magnético entre emissor e receptor, descrita de forma simplificada pela lei de Biot-Savart, que indicará a evolução da intensidade do campo magnético com a distância.

1.1 Lei de Biot-Savart

Considera-se um circuito C percorrido por uma corrente de intensidade I. Será criado num ponto M do espaço uma densidade de fluxo magnético B. Seja dl uma parte infinitesimal do circuito e R a distância do fio ao ponto M. A partir da lei de Biot-Savart, tem-se que a densidade de fluxo magnético no ponto M é dada por:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_C \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{R^2} \quad (\text{Eq.2.4}) \quad \text{Onde } \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$$

1.2 Campo magnético emitido por uma espira circular

O desenvolvimento da expressão 2.4 nos permite encontrar o campo magnético produzido por uma espira circular, num ponto sobre seu eixo (figura 7).

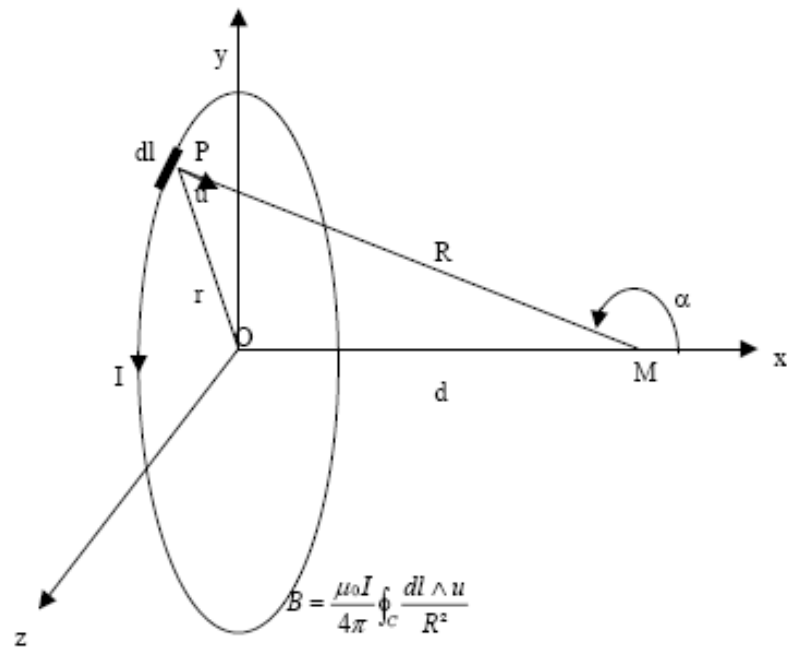


Figura 7: Campo magnético sobre o eixo de uma antena circular de raio r.

O campo magnético a uma distância x no eixo da antena de raio R será:

$$H = \frac{I \cdot N \cdot R^2}{2\sqrt{(R^2 + x^2)^3}} \quad (\text{Eq 2.5})$$

A partir da equação acima, pode-se mostrar que existe a um raio fixo, uma distância ótima d, onde o campo magnético é máximo [2]. Este campo passa por um máximo em $r=d\sqrt{2}$.

1.3 Campo magnético emitido por uma espira retangular

Ao aplicarmos a lei de Biot-Savart a uma antena retangular, a expressão do campo magnético será dada por [2]:

$$H = \frac{N \cdot I \cdot ab}{4\pi \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2 + x^2}} \cdot \left(\frac{1}{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + x^2} + \frac{1}{\left(\frac{b}{2}\right)^2 + x^2} \right) \quad (\text{Eq. 2.6})$$

Onde a e b representam o comprimento e largura da antena, respectivamente.

De posse dessas expressões de intensidade de campos para antena retangulares e circulares. Podemos definir qual formato seria mais eficiente, ou seja, qual permite obter a maior área com o menor perímetro, visto que quanto maior a área maior o fluxo magnético criado, e quanto maior o perímetro maiores serão as perdas ohmicas. Pode-se mostrar então, a partir da geometria clássica, que o formato mais eficiente é o circular.

2. Caracterização do sistema RFID BF/HF

2.1 Coeficiente de acoplamento (k)

Quando um circuito eletrônico é percorrido por uma corrente elétrica, ele produz um campo magnético H e uma densidade de fluxo B dependente da propriedade eletromagnética do meio. O fluxo total que enlaça uma área S é $\phi = B.S$.

No caso do sistema RFID, conforme observamos na figura 3, a antena do leitor vai emitir um fluxo magnético que vai enlaçar a antena do tag.

Neste momento, é interessante introduzir o coeficiente de acoplamento (k), que vai nos indicar o nível de acoplamento entre as antenas tag e leitor. Logo, quanto maior for esse coeficiente, maior será a eficiência do acoplamento.

$$k(d) \approx \frac{r_{Transp}^2 \cdot r_{Base}^2}{\sqrt{r_{Transp} \cdot r_{Base} \cdot (\sqrt{d^2 + r_{Base}^2})^3}} \quad (\text{Eq. 2.7})$$

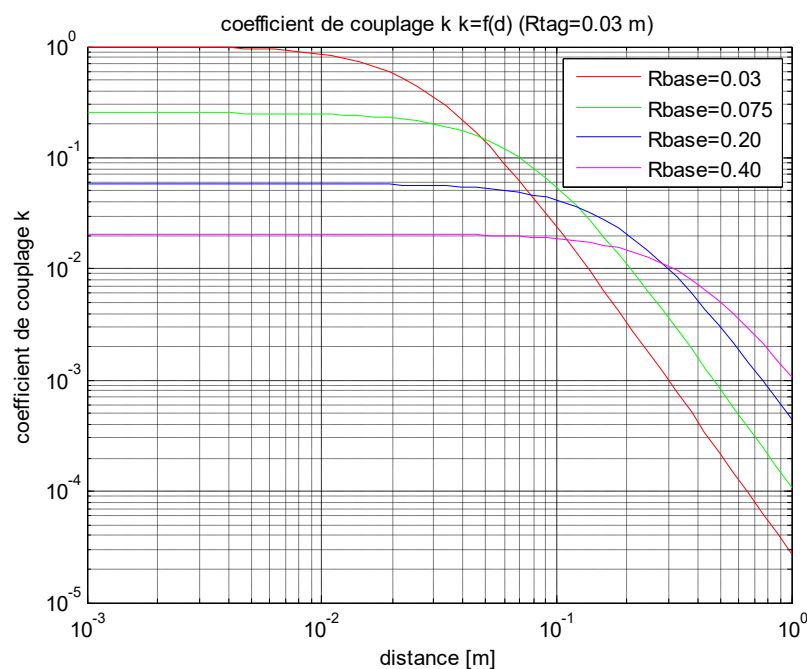


Figura 8: Evolução do coeficiente de acoplamento em função da distância.

Na figura 8, observa-se que, como esperado, o acoplamento diminui com o crescimento da distância entre as antenas e aumenta com o diâmetro da antena do tag.

2.2 Tensão induzida

As linhas de campo magnético produzidas pelo leitor, ao atravessarem as espiras da etiqueta vão, a partir da lei de Faraday, induzir uma tensão no tag.

Pode-se demonstrar que a tensão induzida será igual a $U_2 = \mu \cdot N_2 \cdot S_2 \cdot \omega \cdot H$ (Eq. 2.8)

Entretanto, para encontrar a tensão que chega ao chip do tag, é preciso conhecer os valores dos componentes e aplicar a teoria de circuitos.

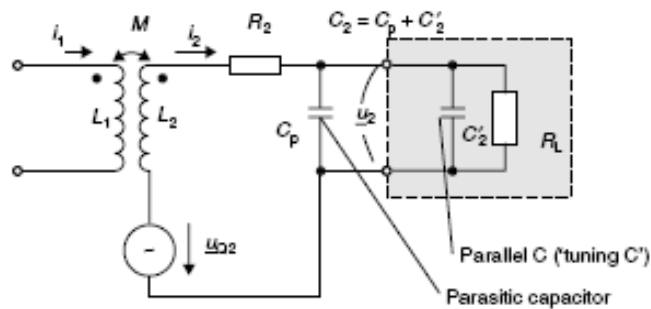


Figura 9: Esquema do circuito simplificado do tag

A partir do esquema da figura 9, pode-se deduzir a tensão u_2 terminais do circuito integrado do tag. Trata-se de um divisor de tensão simples, u_2 será então:

$$u_2 = \frac{j\omega M' i_1}{1 + (j\omega L_2 + R_2) \cdot \left(\frac{1}{R_L} + j\omega C_2 \right)} \quad (\text{Eq 2.9})$$

Desenvolvendo esta expressão, teremos:

$$|u_2| = \frac{\omega k \sqrt{L_1 L_2} \cdot |i_1|}{\sqrt{\left(\frac{\omega L_2}{R_L} + \omega R_2 C_2 \right)^2 + \left(1 - \omega^2 L_2 C_2 + \frac{R_2}{R_L} \right)^2}} \quad (\text{Eq.2.10})$$

Como exemplo numérico: Seja uma frequência de portadora igual a 13,56MHz, $i_1=0,5$, $N_1 = 1$ espira; $r_1 = 20\text{cm}$, $N_2=4$, $S_2 = 5\text{cm} \cdot 8\text{cm}$, $R_L = 2 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 1\Omega$ e $L_2 = 1\mu\text{H}$
A tensão u_2 seria então igual a 3V.

2.3 Fator de qualidade

Um outro parâmetro importante a ser considerado é o fator de qualidade (Q), visto que ele é ligado à banda passante: $Q = \frac{f_0}{\Delta f}$. Quanto maior for o valor de Q, mais estreita será a banda.

O fator de qualidade do circuito do tag (figure 7) será:

$$Q = \frac{1}{R_2 \cdot \sqrt{\frac{C_2}{L_2}} + \frac{1}{R_L} \cdot \sqrt{\frac{L_2}{C_2}}} = \frac{1}{\frac{R_2}{\omega L_2} + \frac{\omega L_2}{R_L}} \quad (\text{Eq. 2.11})$$

A figura 10 mostra a variação da tensão induzida no tag assim como do fator de qualidade em função da variação da indutância da antena do tag.

Para cada valor de L_2 , a frequência é mantida. Os gráficos foram traçados com os seguintes valores: $i_1 = 0.5 \text{ A}$; $R_L = 2 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 1 \Omega$; $L_1 = 1 \mu\text{H}$.

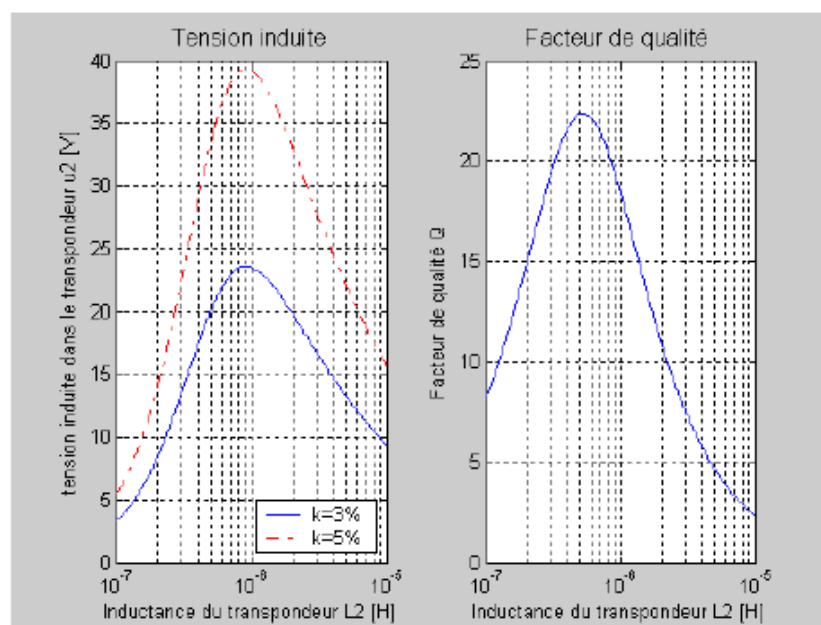


Figura 10: Tensão induzida e fator de qualidade no circuito do tag em função da sua indutância

Há dois aspectos importantes a salientar nesses gráficos:

1. A tensão induzida no tag é máxima para um certo valor de indutância de bobina do tag, considerando que o circuito continua adaptado na frequência de ressonância;
2. Para esse mesmo valor de indutância, o coeficiente de qualidade é máximo.

2.4 Campo magnético mínimo de ativação

Um ponto fundamental nesse estudo é encontrar qual o menor valor de campo magnético necessário para ativar o tag, dado que o tag possui uma tensão mínima de funcionamento. O que vai nos indicar qual a distância máxima entre tag e leitor.

A partir das expressões 2.5 e 2.10, colocando o campo H em função da tensão mínima de ativação do tag, teremos a expressão do campo mínimo de ativação:

$$H_{\min} = \frac{u_2 \sqrt{\left(\frac{\omega L_2}{R_L} + \omega R_2 C_2\right)^2 + \left(1 - \omega^2 L_2 C_2 + \frac{R_2}{R_L}\right)^2}}{\omega \mu_0 \cdot A \cdot N} \quad \text{Eq. (2.12)}$$

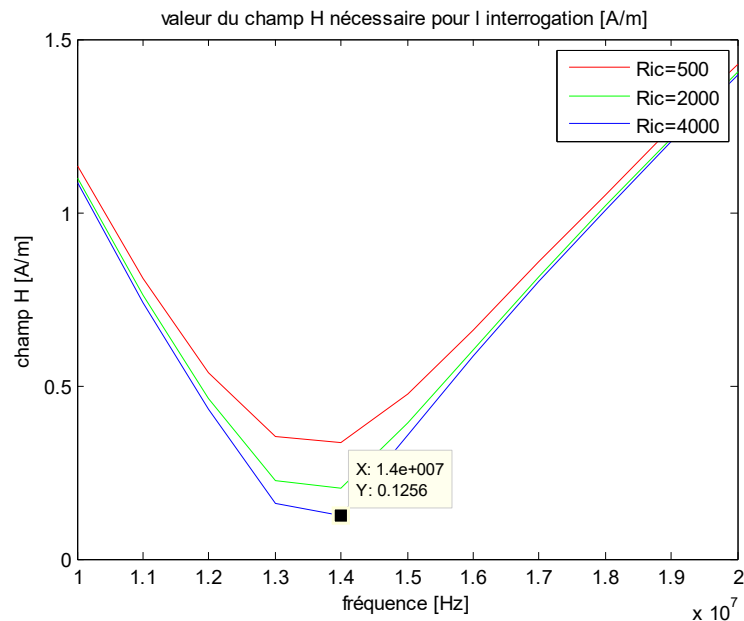


Figura 11: Evolução do campo mínimo de ativação em função da frequência.

A figura 11 evidencia o fato de que o campo de ativação é mínimo quando a frequência de ressonância da antena corresponde à nominal, ou seja, 13,56MHz. Este resultado é importante, pois indica que se a antena do tag for desadaptada ao colocá-la num meio diferente, por exemplo, o seu campo mínimo vai aumentar e, conseqüentemente, a distância de comunicação será reduzida. Por exemplo, para uma resistência do chip do tag de 4000Ω, se o campo que chega ao tag for de 0,5A/m, deslocamentos da frequência de ressonância a 12MHz ou a 16MHz, ainda poderão ativar o tag.

2.5 Distância Máxima de ativação

O último parâmetro importante é a distância máxima de ativação, ou seja, a maior distância permitida entre tag e leitor, que assegure o funcionamento. Esta pode ser encontrada a partir da associação da intensidade de campo magnético gerado pelo leitor e do campo mínimo de ativação do tag.

Como exemplo, considera-se uma antena do leitor de formato quadrado de 25cm e percorrido por uma corrente de 0,232A. A evolução do campo magnético no eixo desta antena é ilustrada na figura 12.

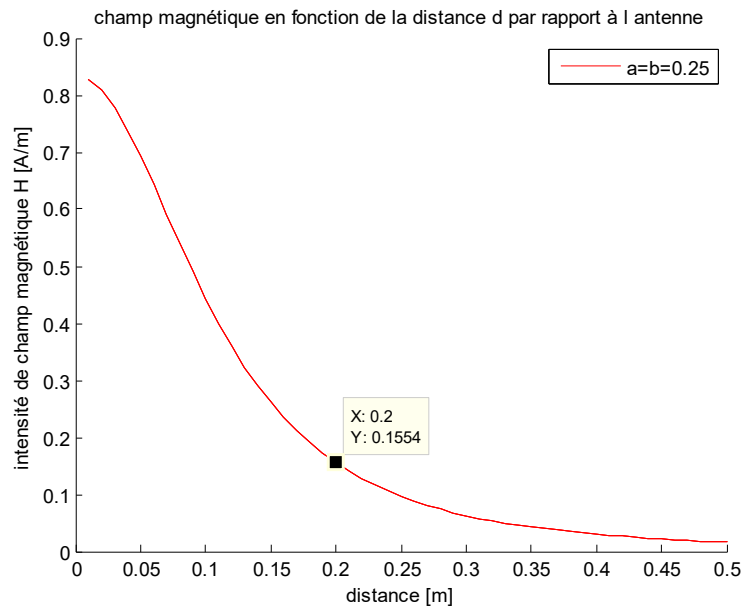


Figura 12: Evolução do campo magnético gerado pelo leitor, em função da distância.

Um tag, cujo limite de ativação situa-se em 150mA/m (coerente com a norma), irá funcionar a uma distância máxima de aproximadamente 20cm do leitor.

3. Normas em BF e HF

Como toda aplicação sem fio, o sistema RFID deve também respeitar certas normas. A seguir, apresentamos os níveis de campo toleráveis para aplicações BF/HF [6]:

ISO-14443, quando se trata de sistemas RFID cujas distâncias de funcionamento estão entre 7 e 15 centímetros. O campo produzido pelo leitor deve estar entre 1,5 A / m e 7,5 A / m. Ou seja, não é permitido gerar no centro da antena nem um campo superior a 7,5 A / m nem inferior a 1,5 A / m.

-ISO 15693: Sistemas de vizinhança, distâncias entre 50 a 70 centímetros, o campo magnético produzido no centro da antena do leitor deve estar entre 150 mA/m e 5A/m.

-ETSI EN 300-330: Padrão para aplicações entre 9kHz e 25MHz. Define a intensidade do campo magnético máxima permitida, a 10 metros do transmissor, 42 dB μ A/m em RFID HF e 72 dB μ A/m em LF.

A frequência autorizada para RFID HF é a 13,56 MHz, e uma banda de 0,07 MHz.

Para encontrar o campo elétrico equivalente a 10 m, faz-se:

$$E_{10m} = H_{10m} + 51,5dB \text{ em dB}\mu\text{V/m}$$

Assim, para cumprir a norma o campo elétrico a 10 metros não deve ultrapassar 93,5 dB μ V / m.

A potência emitida pela antena é dada por: $P = \left(\frac{Ed}{7}\right)^2$

Assim, para cumprir as normas, a potência máxima não deve ultrapassar 4,585 mW.

4. Observações

4.1 Observações sobre a propagação no asfalto

O asfalto é um material não-magnético, portanto, sua permeabilidade magnética relativa é 1, como no ar [5]. Isso nos indica que um sistema de RFID em acoplamento magnético, colocado no asfalto deve ter o mesmo desempenho que no ar.

No entanto, o aspecto que parece mais importante é a desadaptação das antenas em sua interação com o meio. Uma vez que, como foi visto, mudanças na frequência de ressonância do tag aumentam o campo mínimo de ativação e, conseqüentemente, a distância de comunicação é reduzida.

Uma possível solução seria diminuir o fator de qualidade do tag, a fim de aumentar a banda e ser menos perturbado pelo ambiente. Entretanto, isto também reduziria o campo mínimo e, assim, a distância de leitura.

4.2 Observações sobre as diferenças de desempenho entre LF e HF.

É interessante observar que a fórmula de Biot e Savart não depende da frequência. Dessa forma, um leitor de 125kHz ou 13,56 MHz irá produzir o mesmo campo magnético a uma distância fixa. Entretanto, a tensão induzida (V_{20}) no tag é proporcional à frequência:

$$V_{20\text{eff}} = \omega(\mu \cdot H_d)(N_2 \cdot S_2)$$

Vemos que, se fixarmos a superfície (S_2) e o campo que atinge o tag (H_d), precisar-se-ia em LF de cerca de 100 vezes mais voltas (N_2) para produzir a mesma tensão induzida. Assim, o sistema HF pode atingir distâncias maiores. Além disso, a taxa de transferência é de menos de 1 kbps em LF e de cerca de 25kbps em HF.

No entanto, como o sistema RFID HF é mais caro do que o LF, esta tecnologia não pode ser descartada.

5. Modelização do sistema RFID HF

5.1 Parâmetros do modelo de RFID HF

Através das expressões teóricas encontradas anteriormente, e aplicando parâmetros do sistema encontrados nas especificações de componentes RFID reais, pode-se determinar a distância máxima teórica de comunicação entre o leitor e a etiqueta.

A seguir, apresentam-se os parâmetros de entrada para se construir o modelo de transmissão HF. Este modelo permitirá encontrar os limites de funcionamento do sistema.

Parâmetros de entrada que foram considerados no modelo:

Leitor:

Frequência de operação f [Hz]

Raio da antena circular r [m] ou dimensões da antena retangular l, L [m]

Número de espiras da antena N_1

Indutância da antena L_1 [H]

Potência fornecida à antena P [W]

Fator de qualidade da antena Q_1

Tag:

Tensão mínima para ativar o chip V_{ic_min} [V];

Campo magnético mínimo H_{seuil} [A / m];

Número de espiras N_2 ;

Área efetiva S_2 [m²];

Fator de qualidade Q_2 ;

Indutância da antena: L_2 [H];

Parâmetros de saída do modelo:

- Corrente que flui na antena;
- Campo magnético mínimo de ativação em A / m;
- Tensão mínima de ativação V_{20} ;
- Distância máxima teórica de comunicação entre o leitor e o tag;
- Coeficiente de acoplamento k .

Para determinar os valores dos parâmetros de saída, utilizou-se as equações descritas abaixo:

A partir das características do leitor, encontra-se a corrente que flui na antena utilizando a seguinte

fórmula: $I_{ant} = \sqrt{\frac{P \cdot Q_1}{L_1 \cdot \omega}}$ (Eq.2.13)

Onde P é a potência entregue à antena do leitor, o fator de qualidade Q_1 da antena, L_1 indutância da

antena e ω a pulsação angular.

Conhecendo a corrente que circula na antena do leitor I_{ant} , o número de voltas N_1 , o raio r da antena do leitor, e x a distância do centro da antena ao leitor, pode-se inferir o campo magnético pela lei de Biot-Savart:

$$H = \frac{I_{ant} \cdot N_1 \cdot r^2}{2 \cdot \sqrt{(r^2 + x^2)^3}} \quad (\text{Eq.2.14})$$

No caso do leitor apresentar uma antena retangular de comprimento a e largura b , então a expressão do campo H torna-se:

$$H = \frac{I_{ant} \cdot N_1 \cdot a \cdot b}{4\pi \cdot \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2 + x^2}} \cdot \left(\frac{1}{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + x^2} + \frac{1}{\left(\frac{b}{2}\right)^2 + x^2} \right) \quad (\text{Eq.2.15})$$

O campo magnético H gerado pela antena do tag, irá criar um fluxo magnético capturado pelos espiras da antena do tag, que irá induzir uma tensão V_{20} :

$$V_{20} = \mu \cdot \omega \cdot H \cdot N_2 \cdot S_2 \quad (\text{Eq.2.16})$$

A partir da fórmula acima e usando os valores do campo magnético, pode-se traçar a tensão induzida em função da distância entre etiqueta e leitor.

A tensão sobre o chip do tag vale, por sua vez: $V_{ic} = Q_2 \cdot V_{20}$ (Eq.2.17)

Através desta fórmula e conhecendo Q_2 , pode-se determinar a tensão de ativação mínima V_{20} .

Conhecendo a tensão mínima para ativar o chip V_{ic-min} , o fator de qualidade do tag Q_2 , o número de voltas N_2 da antena e a área efetiva do tag S_2 , pode-se encontrar o campo magnético limiar que permitirá a ativação do tag:

$$H_{seuil} = \frac{V_{ic-min}}{Q_2 \cdot \mu \cdot \omega \cdot N_2 \cdot S_2} \quad (\text{Eq.2.18})$$

De posse do valor deste campo, e aplicando a fórmula 2.14, encontra-se distância máxima operacional d_{max} com a seguinte expressão:

$$D_{max} = \sqrt{\left(\frac{I_1 \cdot N_1 \cdot r^2}{2 \cdot H_{seuil}} \right)^{2/3} - r^2} \quad (\text{Eq.2.19})$$

Enquanto que o coeficiente de acoplamento k , relação entre o fluxo útil e fluxo total é igual a:

$$k = \frac{\mu \cdot r^2 \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot S_2}{2(r^2 + d^2)^{3/2} \sqrt{L_1 \cdot L_2}} \quad (\text{Eq.2.20})$$

6. Resultados de simulações com o Matlab

Modelou-se com o Matlab o desempenho do sistema de comunicação RFID HF do fabricante TAGSYS. O leitor é o TAGSYS Médio™ L100 ISO 15693 com uma antena fornecida pelo CEA, o tag é um TAGSYS FOLIO 370L CD.

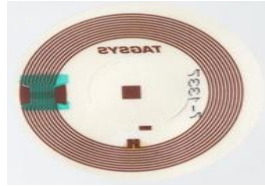


Figura 13 : Foto do tag FOLIO 370L CD, diâmetro : 35 mm, Inlay compatible ISO 15693

Vale ressaltar que se optou por não utilizar a antena do fabricante, visto que não havia a disposição os parâmetros exatos desta antena. Enquanto que com a antena do CEA, tinha-se acesso a todos os dados necessários.

Valores dos parâmetros utilizados para a modelagem deste sistema:

Leitor (Dados referentes à antena fornecida pelo CEA):

Frequência de operação f : 13,56MHz
 Raio da antena circular r : 0,0725m
 Número de voltas N_1 da antena: 1
 Indutância da antena L_1 : 0.51 μ H
 Potência fornecida à antena P : 1,485W
 Fator de qualidade Q_1 da antena: 20,5
 Impedância da antena: 50,7 Ω .

Tag:

Tensão mínima para ativar o chip V_{ic_min} : 3V
 Tipo de chip do tag: NXP ICODE DEL-L ICS50
 Número de voltas N_2 : 10
 Área efectiva S_2 : 7 cm²
 Fator de qualidade Q_2 : 30

Tendo estes parâmetros como entrada e aplicando as equações precedentes, pode-se determinar as grandezas de nosso interesse: campo magnético mínimo de ativação do tag H_{seuil} , tensão induzida nos terminais da antena do tag V_{20} , e a distância máxima de leitura do tag.

Primeiramente, pode-se encontrar a evolução do campo magnético produzido no eixo central da antena do leitor em função da distância da antena ao leitor (figura 14):

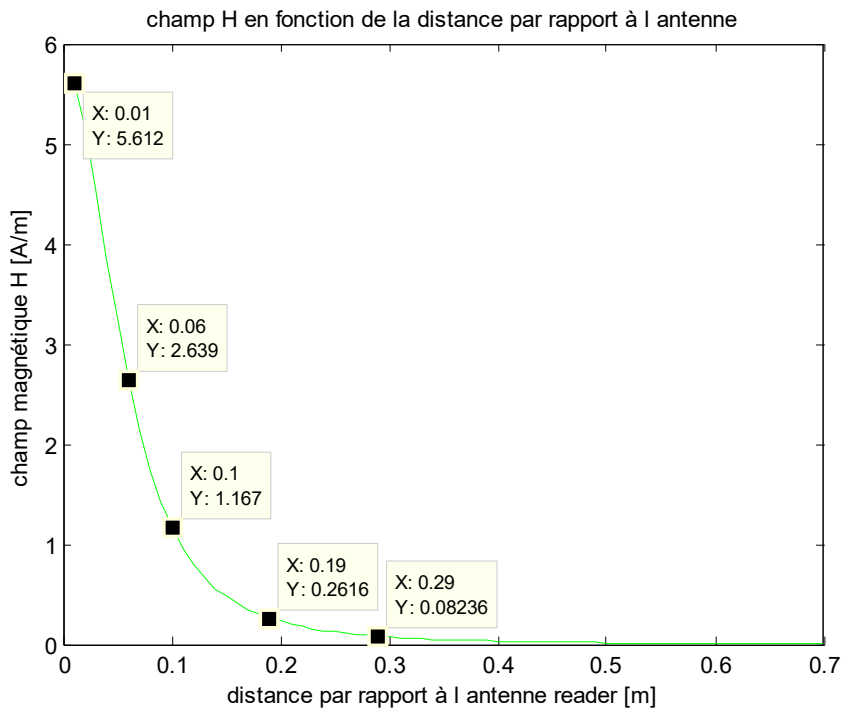


Figura 14: Evolução do campo magnético no centro da antena

Tem-se também a tensão induzida V_{20} na antena do tag, em função da distância de comunicação (figura 13).

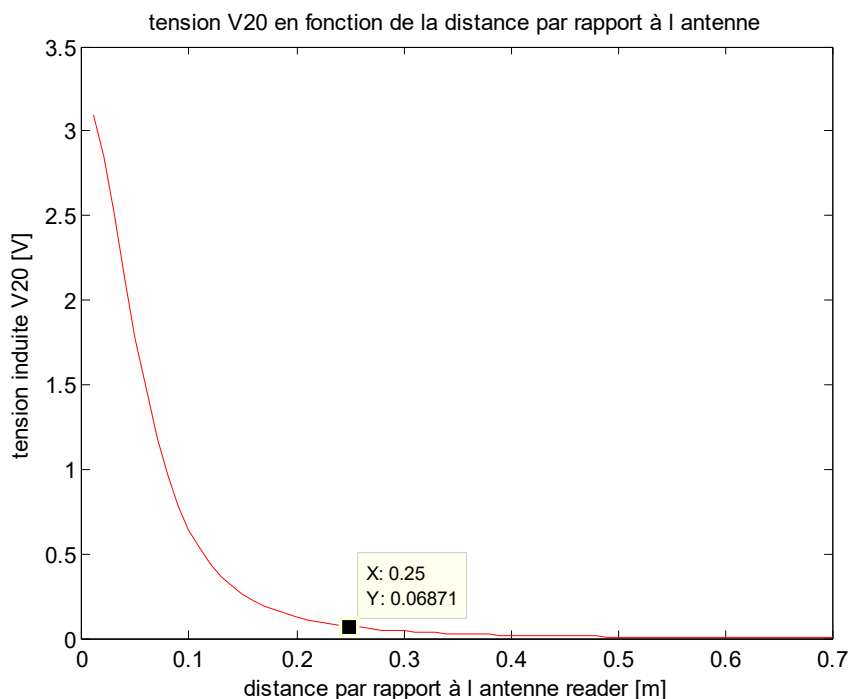


Figura 15: Tensão induzida nos terminais da antena em função da distância de comunicação.

Além disso, verificou-se, teoricamente, com a aplicação das fórmulas precedentes:

A corrente através da antena do leitor: **0,837 A**

O campo magnético mínimo de ativação do tag : $H_{seuil}=129.7\text{mA} / \text{m}$

A distância máxima teórica pode ser deduzida a partir dos gráficos das figura 14 ou 15. Basta verificar qual a distância corresponde ao campo H mínimo ou à tensão de ativação mínima. A partir deste princípio, calculou-se uma distância máxima igual a **24,65 cm**. Tal resultado será fundamental para permitir a comparação entre prática e teoria, visto que o procedimento experimental será verificar se na prática a distância de leitura corresponde a esse valor teórico.

7. Resultados de ensaios HF realizados no banco de testes.

Foram utilizados equipamentos RFID para realizar os testes no banco representativo do asfalto. Trata-se de um leitor TAGSYS MédioTM L100 ISO 15693 ligado a uma antena fornecida pelo CEA (cujas características foram dadas acima).

Foi utilizado também um sensor de campo magnético cujo ganho vale $29,5 \text{ A} / \text{m} / \text{V}$.

Inicialmente, realizaram-se testes para medir o campo magnético no ar e no banco de ensaio para diferentes distâncias possíveis: 0, 6, 10, 19 e 29 centímetros.

Utilizou-se o software L200 Explorer para ajustar o equipamento de forma a fazer os testes nas mesmas condições que nas simulações precedentes. Nesse software, regulamos a potência entregue ao

leitor em 1,49W, que corresponde a uma corrente através da antena do leitor igual a 0,83A.

Tabela 1 : Campo magnético H medido a diferentes distâncias

Potência gerada pelo leitor (dado pelo software que controla o leitor) : [W]	2,0000	2,0000	2,000			
Medida da corrente na antena do leitor: [A]	0,8300	0,8300	0,837			
Dedução da potência sobre a antena [W]	1,4959	1,4959	1,485			
	No banco de testes	No ar	Téorico	Diferença banco/ar em %	Diferença ar/teoria %	Diferença banco/teoria em %
Medida do campo magnético à 0 cm en [A/m]	6.2	6.2	5.612	0	0,094	0,094
Medida do campo magnético à 6 cm en [A/m]	2,3423	2,744	2.639	0,146	0,036	0,112
Medida do campo magnético à 10 cm en [A/m]	1,12395	1,183	1.167	0,049	0,013	0,036
Medida do campo magnético à 19 cm en [A/m]	0,24485	0,268	0.2616	0,086	0,023	0,064
Medida do campo magnético à 29 cm en [A/m]	0,08172	0,089	0.08236	0,081	0,074	0,007

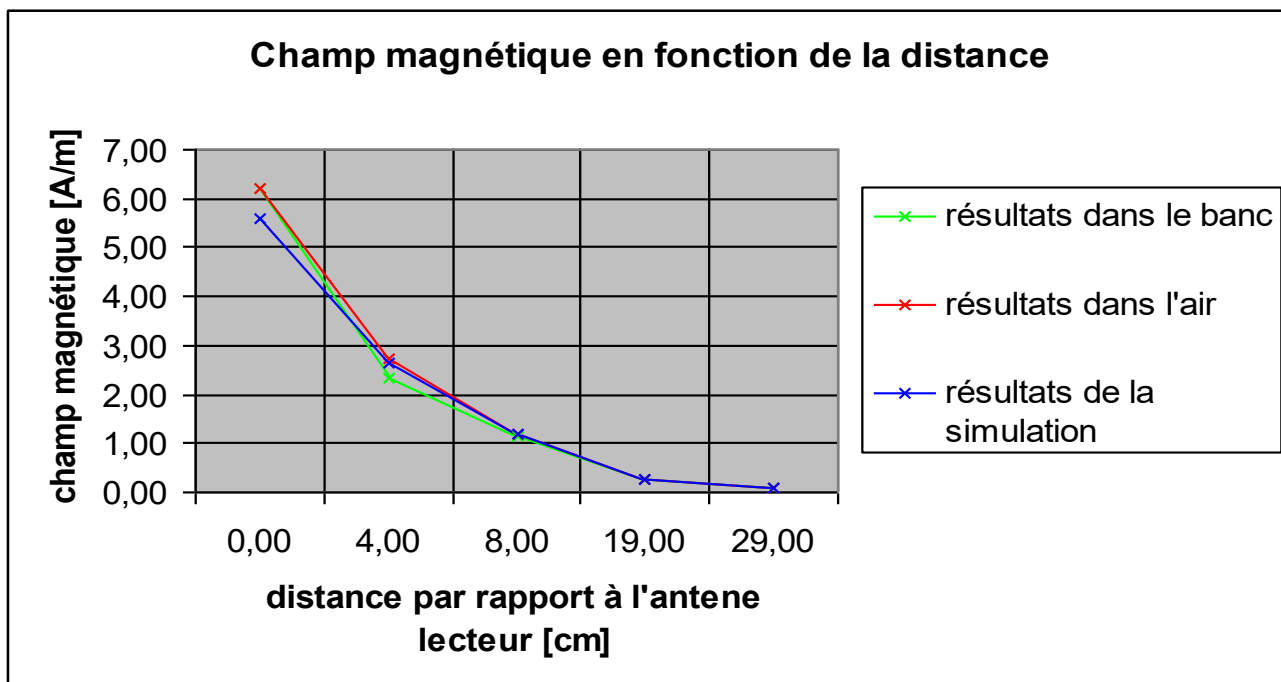


Figura 16. Evolução do campo magnético em função da distância, em três situações, no banco, no ar e teórico

A medição do campo magnético foi feita através da colocação da sonda no eixo central da antena e disposta em um plano paralelo à antena.

Deve-se levar em conta a imprecisão da sonda de campo H utilizada, bem como a incerteza quanto à posição exata da sonda com relação à antena. Tendo em conta estas considerações, constata-se que as medições do campo H em diferentes profundidades no banco são muito próximas dos resultados no ar. O desvio é, na sua maioria, inferior a 10%.

Assim, tem-se que as diferentes camadas de asfalto não modificaram a atenuação do campo magnético.

A distância de comunicação entre a antena do leitor e a etiqueta será portanto, a mesma no ar e em um meio estratificado, constituído por materiais betuminosos.

8. Resultados dos testes funcionais

Finalmente, foram realizados testes funcionais, para isso, substituiu-se a sonda por um tag TAGSYS FOLIO 370 LP e verificou-se as profundidades em que o tag era lido.

As características do tag são as seguintes:

Tensão mínima para ativar o chip V_{ic_min} : 3V
 Tipo de chip integrado tag: NXP ICODE DEL-L ICS50
 Número de voltas N2: 7
 Área efectiva (S2) em m^2 : 8,25
 Fator de qualidade Q2: 30

Como primeiro passo, realizou-se testes funcionais no ar, em seguida, no banco de ensaio para as diferentes profundidades possíveis: 0, 6, 10, 19 e 29 centímetros.

Tabela 2: Resultados de testes funcionais com o tag colocado em diferentes profundidades

Potência gerada pelo leitor (dado pelo software que controla o leitor) : [W]	2,0000	2,0000
Medida da distância máxima de leitura do tag no ar: d_max [m]	0,2200	0,2100
Medida do campo magnético na distância máxima de leitura no ar [A/m]	0,1770	0,1590
Medida da corrente na antena do leitor : I_mes [A]	0,8050	0,8030
Dedução do campo magnético na distância d_max : H_déduit [A/m]	0,1702	0,1925
Dedução da potência entregue à antena: [W]	1,4072	1,4002
	No banco	No ar
Teste de comunicação RFID à 6cm [OK, NOK]	ok	ok
Teste de comunicação RFID à 10cm [OK, NOK]	ok	ok
Teste de comunicação RFID à 19cm [OK, NOK]	ok	ok
Teste de comunicação RFID à 29cm [OK, NOK]	nok	nok

Inicialmente, efetuaram-se testes funcionais no ar. Determinou-se a distância máxima de leitura do tag TAGSYS Folio 370L (retangular), quando a potência entregue à antena era igual a 1,4 W.

Mediu-se o campo H a esta distância, em seguida, mediu-se a corrente que fluiu na antena, deduziu-se a potência entregue à antena e o campo H teórico à distância máxima de leitura.

Segundo estas medições, encontrou-se para este tag em especial, uma distância máxima de leitura igual a cerca de 21,5 centímetros no ar. Assim, o tag funcionou nas profundidades de 6, 10, 19 centímetros. Isto confirma o fato de que o banco não perturba a comunicação entre o tag e a antena do leitor.

O asfalto é um material não-magnético, logo, sua permeabilidade magnética relativa é 1, como no ar. Isso nos indica que um sistema de RFID funcionando por acoplamento magnético colocado no pavimento deve ter o mesmo desempenho que no ar.

Os resultados teóricos são apresentados na figura 17:

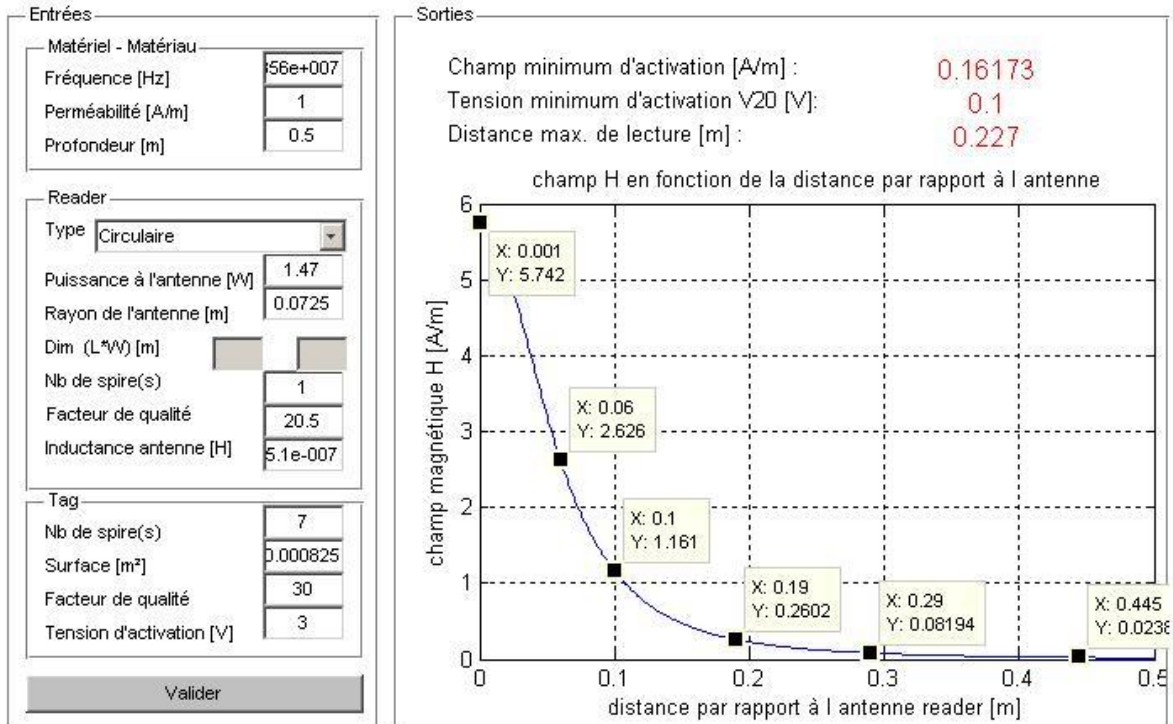


Figura 17: Campo magnético teórico em função da distância

Calculou-se com a fórmula 2.19 a distância máxima teórica de 22,7 centímetros, com um campo mínimo de ativação igual a 161mA / m.

Observa-se que os valores são muito próximos àqueles medidos no banco e no ar.

9. Conclusão

Este estudo mostrou que, como esperado, o desempenho do sistema RFID BF e HF não é afetado pelo asfalto. Este desempenho depende diretamente do equipamento técnico utilizado (potência fornecida à antena do leitor, número de voltas, do fator de qualidade da antena, a área da antena do tag ...).

Entretanto, infere-se que em meios magnéticos, este desempenho poderia ser comprometido.

Além disso, quando em contato com o asfalto, não se verificou problema de desadaptação nem da antena do leitor nem do tag.

10. Referências

[1] PLAINCHAULT, Patrick. Thèse Sécurisation de la conduite

[2] FINKENZELLER, Klaus 1999, RFID Handbook Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification

[3] DOMENIC, Paret. Applications en identification radiofréquence et cartes à puce sans contact.

[4] FAUCHARD, Cyrille. Utilisation de très hautes fréquences application à l'auscultation non destructive de la chaussée.

[5] DOMENIC, Paret. Identification radiofréquence et cartes à puce sans contact.

[6] NXP Semiconductors: product data sheet SL2 ICS50 21 Mars 2007

[7] TAGSYS: 370L_Tag_Family_Datasheet

Capítulo III: Estudo do sistema RFID ultra-alta frequência (UHF)

1. Introdução

Após o estudo do sistema RFID em baixa e alta frequência (BF e HF), será analisado o desempenho em ultra alta frequência, que pelas normas européias, corresponde a uma frequência de 868MHz.

A primeira questão que surge é o por quê dessa separação entre BF, HF e UHF. Isso se deve às grandes diferenças quanto ao princípio de comunicação dos dois sistemas. Em BF e HF, nas aplicações RFID, como discutido anteriormente, situa-se na região de campos próximos e, portanto, em acoplamento magnético. Enquanto em UHF, está-se na região de campos distantes e a comunicação se dá efetivamente por propagação de ondas planas.

Neste capítulo, será apresentado sucintamente o princípio de funcionamento dos sistemas RFID UHF. Em seguida, simulações e aplicações numéricas serão efetuadas a fim de encontrar o desempenho teórico do sistema. Por último, serão realizados ensaios práticos no ar e no banco de testes, a fim de validar as simulações e os princípios teóricos. Será verificado, sobretudo, se o asfalto afeta o desempenho do sistema UHF.

2. Teoria da RFID UHF

A essa frequência 868MHz e nas distâncias usuais das aplicações RFID, considera-se que as antenas do leitor e do tag são interligadas via ondas planas. Isso acarreta inúmeras modificações no sistema.

Primeiramente, quanto ao tipo de antena utilizada. Em BF e HF, viu-se que as antenas são do tipo loop ou dipolos magnéticos, típicas para aplicações envolvendo acoplamento magnético. Enquanto em UHF, passa-se a utilizar antenas similares a dipolos elétricos, visto que em campos distantes, o campo elétrico é predominante sobre o magnético.

Quanto às distâncias de comunicação, enquanto em BF e HF normalmente não vai além de 50cm, em UHF, é usual chegar a mais de 1m.

Para descrever o sistema UHF, será aplicada, portanto, a teoria de comunicação de antenas. Inicialmente, serão detalhados alguns conceitos importantes a esse estudo.

2.1 Equação de Friis

O aspecto mais importante a analisar neste projeto é justamente o balanço de potência do enlace entre duas antenas, ou seja, verificar quanto de energia vai chegar ao receptor, dado a potência entregue ao emissor. Para este cálculo será fundamental então, conhecer as perdas, a eficiência e o ganho das antenas do emissor e do receptor, assim como as perdas devidas ao canal de propagação, no caso, o ar.

A ferramenta mais importante nesse cálculo é a fórmula de Friis, ela permite encontrar a potência que chega no receptor, dado o ganho das antenas, a frequência do sinal, o comprimento do enlace e a potência entregue à antena emissora [1]:

$$P_{rec} = P_{emiss} G_{emiss} G_{rec} \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 \quad (\text{Eq.3.1})$$

Onde P_{emiss} é a potência emitida e G_{emiss} é o ganho da antena emissora; P_{rec} é a potência captada pela receptora e G_{rec} é o seu ganho; r é a distância entre as duas e λ é o comprimento de onda do sinal.

Entretanto, esta fórmula é válida apenas no caso ideal, ou seja, quando a propagação é no vácuo, quando as antenas estão adaptadas e não há perdas devido a diferenças de polarização.

Se forem acrescentados todos esses parâmetros, encontrar-se-á uma expressão de Friis mais completa [2]:

$$P_{rec} = P_{emiss} G_{emiss} G_{rec} \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 (1 - |\Gamma_t^2|)(1 - |\Gamma_r^2|) |a_t \cdot a_r^*|^2 e^{-\alpha r} \quad (\text{Eq.3.2})$$

$|\Gamma_t^2|$ e $|\Gamma_r^2|$ são os coeficientes de reflexão entre as antenas transmissora e receptora e os seus respectivos circuitos;

a_t e a_r são os vetores de polarização das antenas transmissora e receptora;

α é o coeficiente de absorção do meio.

2.2 Telealimentação

Na maior parte dos sistemas RFID, o tag é um elemento passivo, ou seja, ele não possui nenhum tipo de bateria. O que aumenta a sua independência, reduz seu custo final e melhora a flexibilidade de suas aplicações.

Entretanto, evidentemente é preciso que ele seja alimentado para que ele possa enviar as informações solicitadas pela estação base (leitor).

Dessa forma, o princípio utilizado é o seguinte: o tag vai demodular os dados enviados pelo leitor e, em seguida, converter este sinal numa tensão contínua que será utilizada para “despertar” o circuito integrado do tag. Enquanto que o reenvio, do tag ao leitor, vai se dar pelo princípio da retromodulação [3].

2.3 Retromodulação

O tag passivo não possui nenhum elemento de emissão RF. Dessa forma, eles utilizam a modulação da potência enviada pelo leitor, para responder as solicitações do mesmo. O esquema da figura 16 ilustra este princípio [3].

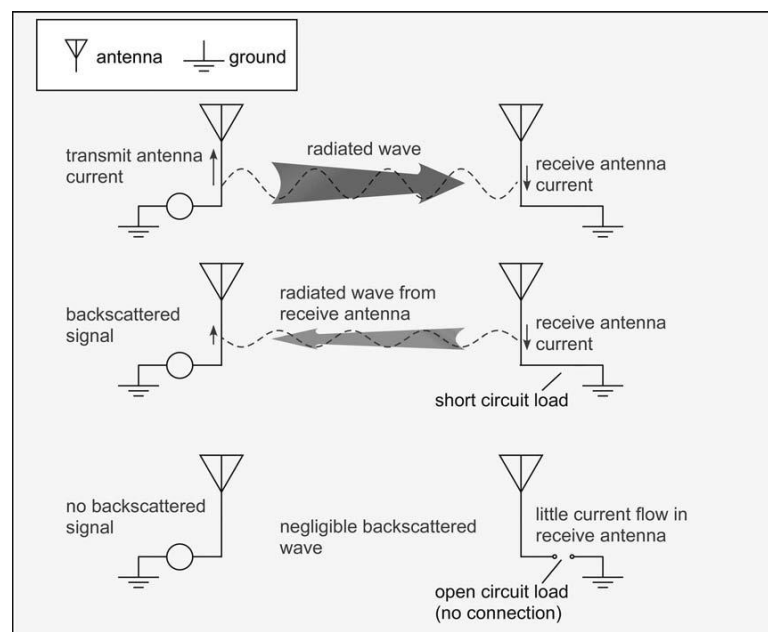


Figura 18: Esquema da retromodulação

Para retransmitir os dados, o tag vai alterar a sua impedância de entrada (chip) segundo 2 estados e assim, criar o sinal retromodulado. Em cada estado, o tag possui um “*radar cross section*” (RCS) diferente, ou seja, o nível de sinal refletido é diferente e será essa diferença de nível que o leitor vai usar como parâmetro para interpretar a resposta do tag.

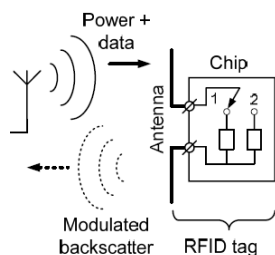


Figura 19: Ilustração dos dois estados possíveis do tag.

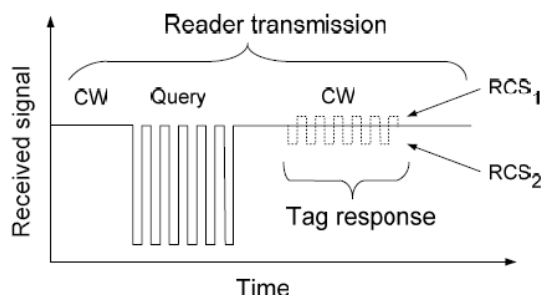


Figura 20: Representação de como a resposta do tag é vista pelo leitor.

Em muitos sistemas de rádio, o transmissor se "cala" para ouvir a resposta do receptor (receptor se torna transmissor). Em RFID passivo, entretanto, o leitor precisa alimentar o tag em permanência, então mesmo durante a fase de escuta, o leitor envia a portadora (Carrier Wave - CW) ao tag.

2.4 Enlace ascendente

Trata-se do caminho percorrido pela resposta do tag até o leitor. A equação 3.2 fornece a quantidade de energia que chega ao tag, com esse resultado, verifica-se nas especificações desse tag se este nível de energia é suficiente para ativá-lo. Se o for, deve-se observar ainda, se a resposta do tag chega com um nível de energia suficiente para ser interpretado pelo leitor.

Para poder alimentar o tag, o leitor deve fornecer energia suficiente (entre 10 e 30 μ W). No entanto, o estágio de entrada (retificador) do tag tem um rendimento baixo (30%). Assim, é necessário que a antena forneça uma potência entre 30 e 100 μ W [4]. É bom considerar, por causa da modulação utilizada, que o tag vai receber mais energia do que o necessário. No entanto, agora se deve levar em conta a potência necessária ao trajeto inverso (resposta do tag). Pode-se considerar ainda que, em média, um terço da potência absorvida será utilizada na retromodulação (dependendo da tecnologia empregada).

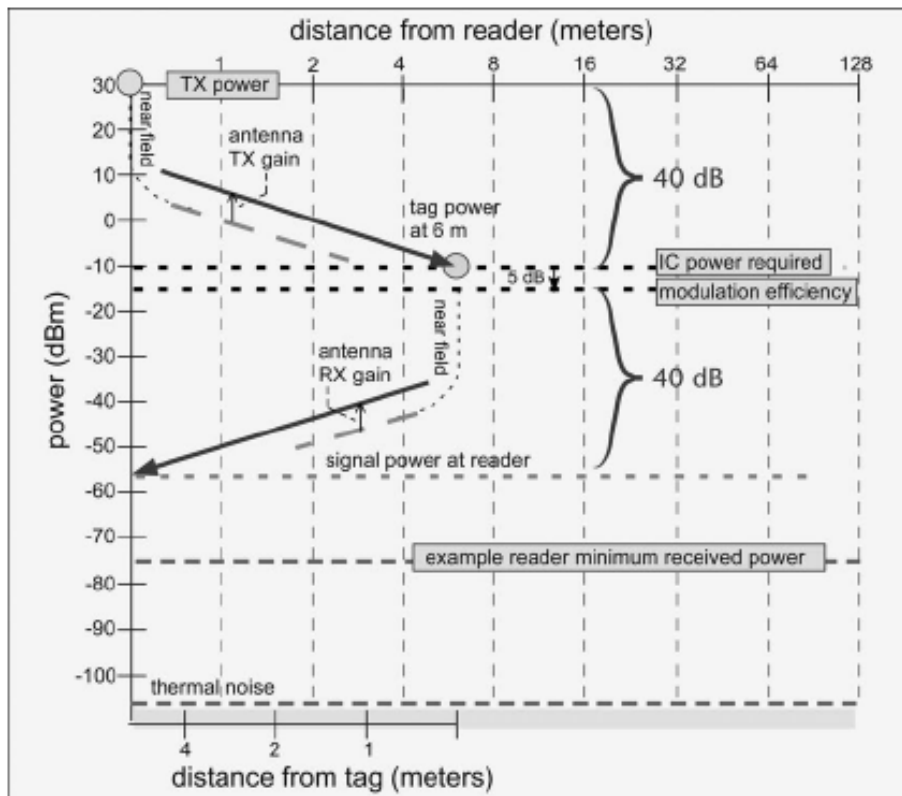


Figure 3.30: Forward and Reverse Link Budgets for Directional Antenna.

Figura 21: Ilustração do nível de potência do sinal no enlace leitor-tag.

Na figura 21, tem-se a ilustração das quedas de energia em todo o percurso, até a resposta do tag chegar ao leitor [2].

3. Resultados dos testes realizados em UHF

Os testes em UHF foram realizados em duas etapas, primeiramente com um analisador de rede, mediu-se os coeficientes de transmissão (S21) e de reflexão (S11) no banco. Em seguida, realizou-se testes funcionais com uma antena do fabricante Alien colocada sobre o banco e tags dentro dos canos do banco. Além disso, para verificar as potências de ativação dos tags no banco, substituiu-se o leitor e as antenas Alien por geradores, amplificadores e uma antena corneta.

3.1 Resultados das medições dos parâmetros de reflexão e transmissão.

O esquema dos testes realizados é mostrado na figura 22.

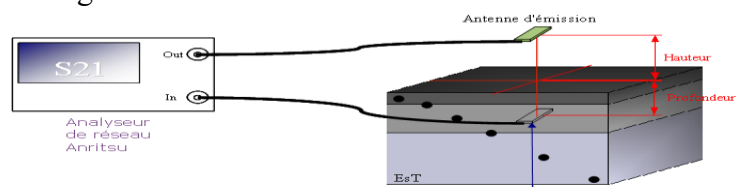


Figura 22: Esquema dos testes para a medida do S11 e do S21

O material utilizado para esses ensaios foi:

Analisor de redes Aniritsu MS2036A



Figura 23

Sondas fornecidas pelo CEA.



Figura 24

3.1.1 Parâmetros de reflexão (S_{11})

Primeiro, mediu-se os parâmetros de reflexão das sondas S_{11} em várias posições, tanto em alturas diferentes acima do banco e em diferentes profundidades no banco. O objetivo é ter uma idéia da mudança na impedância das sondas e assim verificar se o contato com o asfalto desadapta essas antenas.

Antes de iniciar os ensaios, calibrou-se o analisador de redes da seguinte forma: conectou-se um circuito RF aberto na porta 1, em seguida, um circuito RF em curto ainda na porta 1, conecta-se as duas portas e, no final, conecta-se uma carga de 50 ohms na porta 1.

Em seguida, inicia-se as medições de S_{11} , reunidos nas tabelas a seguir:

Tabela 1 : Sonda sobre o banco

Altura da sonda em cm	Valor do S_{11} em dB
0	-8,1
20	-16,5
40	-15,6
60	-15,5

Tabela 2 : Sonda dentro do banco

Profundidade da sonda em cm	Valor do S_{11} em dB
4	-6,5
8	-6,6
27	-6,22
44,5	-6,5

Observa-se que o S11 no banco é bem mais importante, ou seja, o ambiente mudou significativamente a impedância da sonda e esses valores são fundamentais para encontrar a verdadeira potência que chega ao sensor. Constata-se também que os valores de S11 para diferentes profundidades do banco estão muito próximos, o que significa que a mudança na impedância da sonda é idêntica nas várias camadas do banco.

3.1.2 Coeficientes de transmissão (S21)

Posteriormente, iniciou-se as medições dos coeficientes de transmissão no banco. Para isso, foram utilizadas duas sondas, uma ligada à porta 1 do analisador e colocada em cima do banco a 0 centímetros de altura, 20cm, 40cm e 60cm. Uma outra sonda foi conectada à porta 2, e foi colocada em cada tubo do banco.

O objetivo é ter uma idéia de atenuação do sinal no banco.

Os valores medidos do S21 são apresentados nas tabelas abaixo:

Tabela 3 : Antena emissora sobre o banco

Tubo (Profundidades)	S ₂₁ em dB
T1(4cm)	-15,00
T2(8cm)	-16,45
T3(17,5cm)	-19,47
T4(27cm)	-23,77
T5(44,5cm)	-32,95
T6(57cm)	-28,21

Tabela 4 : Antena emissora à 20cm

Tubo (Profundidades)	S ₂₁ em dB
T1(4cm)	-26,45
T2(8cm)	-25,20
T3(17,5cm)	-26,80
T4(27cm)	-29,86
T5(44,5cm)	-36,30
T6(57cm)	-32,45

Tabela 5 : Antena emissora à 40cm do banco

Tuyau (Profondeurs)	S ₂₁ en dB
T1(4cm)	-28,50
T2(8cm)	-27,41
T3(17,5cm)	-29,97
T4(27cm)	-32,35
T5(44,5cm)	-37,46
T6(57cm)	-33,45

Tabela 6 : Antena emissora à 60cm

Tuyau (Profondeurs)	S ₂₁ en dB
T1(4cm)	-30,20
T2(8cm)	-30,41
T3(17,5cm)	-32,64
T4(27cm)	-33,77
T5(44,5cm)	-42,43
T6(57cm)	-36,14

3.2 Resultados teóricos

3.2.1 Cálculo da atenuação de espaço livre

Para modelar a propagação de ondas eletromagnéticas no banco de testes, vai-se adotar o seguinte raciocínio:

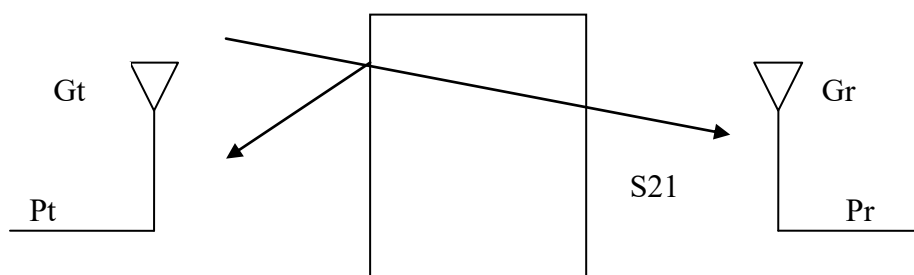


Figura 25: Esquema do enlace da antena transmissora à receptora.

Seja $S_r = \frac{G_t P_t}{4\pi R^2}$ (Eq.3.3) a densidade de potência produzida pela sonda de emissão e que chega à sonda de recepção.

A energia captada pela antena receptora é $P_r = (1 - |\Gamma_r|^2) S_r A_e$ (Eq.3.4), onde A_e representa a área efetiva da antena, dada por $\frac{G_r \lambda_m^2}{4\pi}$ (Eq.3.5) e λ_m é o comprimento de onda no ambiente onde a antena de recepção foi colocada.

Agrupando-se as expressões (3.3), (3.4) e (3.5), encontra-se a fórmula de Friis (sem perdas por polarização):

$$\frac{P_r}{P_t} = (1 - |\Gamma_t|^2)(1 - |\Gamma_r|^2) \left(\frac{\lambda_m}{4\pi R} \right)^2 G_t G_r \quad (\text{Eq.3.6})$$

É importante observar que λ_m dependerá da permissividade dielétrica relativa da camada onde a sonda foi colocada.

Então resolveu-se a equação 3.6 com as alturas e profundidades usadas nos experimentos. Para isso, utilizou-se os seguintes parâmetros:

→ Γ_r e Γ_t são os coeficientes de reflexão medidos entre a sonda e a fonte, encontrados nas Tabelas 1 e 2;

→ Ganhos das sondas (G_t e G_r) foram medidas e valem 2,4 dB;

→ O parâmetro R é a distância total entre as sondas de emissão e recepção;

→ λ_m é o comprimento de onda no meio, onde a sonda está colocada;

→ P_t potência entregue à antena;

→ P_r potência recebida pela sonda.

Os resultados da relação P_r/P_t estão agrupados na tabela 7:

Tabela 7: Resultados teóricos obtidos segundo a formula 3.6, em dB
Altura da sonda de emissão

Tubo(Profundidades)	0cm	20cm	40cm	60cm
T1(4cm)	-5,54	-21	-26,27	-29,53
T2(8cm)	-11,66	-22,32	-27	-30
T3(17,5cm)	-20,04	-25,8	-29,5	-32,1
T4(27cm)	-24,6	-27,73	-30,81	-33,1
T5(44,5cm)	-29,67	-30,64	-33	-34,83
T6(57cm)	-32,23	-32,18	-34,18	-35,8

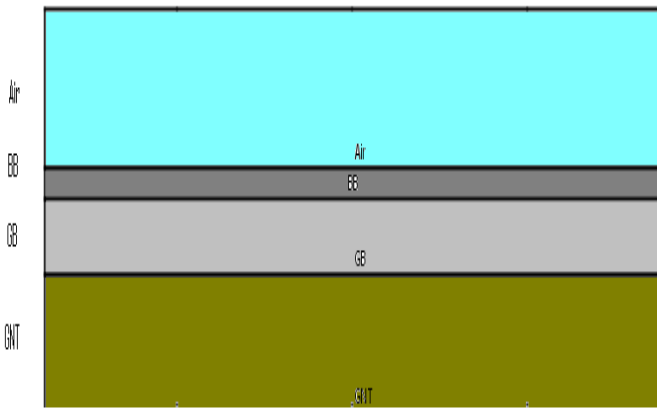
3.2.2 Cálculos das perdas por reflexão e absorção

Entretanto, para se levar em conta todas as perdas no banco, resta ainda adicionar as atenuações devido às reflexões e à absorção do banco, que podem ser estimadas com o software Comsol.

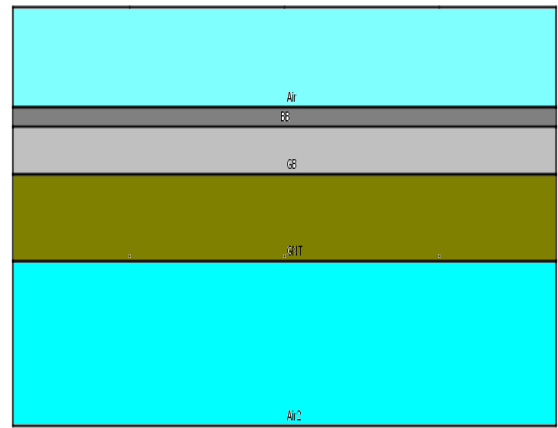
Comsol nos permite conceber um modelo representativo da estrada, e calcular as perdas por reflexão e absorção. Para isso, coloca-se uma fonte de ondas eletromagnéticas na superfície do asfalto, modelizado pelas três camadas com suas respectivas características elétricas, e um receptor na profundidade desejada. Então, o software faz a relação entre a energia recebida e a emitida, que vai se chamar $S_{21COMSOL}$ que representa apenas as perdas por absorção e reflexões múltiplas.

Na verdade, a absorção pode ser facilmente encontrada teoricamente a partir dos coeficientes de absorção de cada meio. No entanto, os cálculos das perdas por reflexões são mais complexos e com Comsol pode-se considerar não só as múltiplas reflexões entre camadas, mas também as reflexões nas bordas do banco. O problema é que para encontrar os mesmos resultados que nos ensaios, seria necessário criar um modelo bastante preciso, não só do banco, mas também do seu ambiente, dado que o exterior do banco vai alterar a configuração das reflexões e, portanto, as posições dos pontos de construção e destruição das ondas eletromagnéticas.

Assim, desenvolveu-se dois modelos, um mais simples, com um banco e uma camada de ar acima (Modelo 1) que pode representar um piso real, e um também com uma camada de ar abaixo (modelo 2) que representará o banco de ensaio. Essa mudança pode parecer insignificante, mas o problema é que as reflexões mais fortes estão na interface entre banco e ar, visto que a diferença entre as impedâncias intrínsecas do ar e do betume é elevada. As reflexões serão, portanto, mais significativas no modelo 2.



Modelo 1



Modelo 2

Agora, o objetivo é calcular o coeficiente de reflexão para cada tubo. Para isso, encontra-se o S_{21} e depois separa-se as partes de absorção e reflexão.

O cálculo da absorção pode ser facilmente feito de forma teórica, através de $\sum \alpha_i \cdot d_i$ onde α é o coeficiente de absorção do material em dB / m e d é a extensão desse material em metros.

Por exemplo, a absorção no quarto tubo vale:

$$d_{BB}\alpha_{BB} + d_{GB}\alpha_{GB} = 0,08 \cdot 2,5 + 0,19 \cdot 7,74 = 1,67 \text{ dB.}$$

Repetindo-se o mesmo procedimento para os outros 4 tubos (tabela 8)

Tubo(Profundidades)	Absorção(em dB)
T1(4cm)	0,1
T2(8cm)	0,2
T3(17,5cm)	0,935
T4(27cm)	1,67
T5(44,5cm)	2,25
T6(57cm)	2,67

Tabela 8: Perdas por absorção

Os valores de S_{21} obtidos com Comsol para os dois modelos:

Tableau 9 :Modelo 1_ S_{21}

Tubo (Profundidades)	S_{21} (em dB)
T1(4cm)	-0,5
T2(8cm)	-1,16
T3(17,5cm)	-1,74
T4(27cm)	-2,49
T5(44,5cm)	-3,05
T6(57cm)	-3,46

Tableau 10 : Modelo 2_ S_{21}

Tubo (Profundidades)	S_{21} (em dB)
T1(4cm)	-0,36
T2(8cm)	-3,28
T3(17,5cm)	-2,55
T4(27cm)	-0,68
T5(44,5cm)	-7,54
T6(57cm)	-4,2

Em seguida, calcula-se a diferença entre esse S_{21} e o valor da absorção, de forma a separar as perdas por reflexão e, assim, encontrar o gama associado:

Tabela 11 : Modelo 1-Gamma e perdas por reflexão

Tubo (Profundidades)	S ₂₁ (en dB)	Absorção(em dB)	Perdas por reflexão (em dB)	Gamma
T1(4cm)	-0,5	0,1	-0,4	0,297
T2(8cm)	-1,16	0,2	-0,96	0,445
T3(17,5cm)	-1,74	0,935	-0,805	0,411
T4(27cm)	-2,49	1,67	-0,82	0,415
T5(44,5cm)	-3,05	2,25	-0,796	0,409
T6(57cm)	-3,46	2,67	-0,79	0,408

Tabela 12 : Modelo 2-Gamma e perdas por reflexão

Tubo (Profundidades)	S ₂₁ (en dB)	Absorção(em dB)	Perdas por reflexão (em dB)	Gamma
T1(4cm)	-0,36	0,1	-0,26	0,241
T2(8cm)	-3,28	0,2	-3,08	0,713
T3(17,5cm)	-2,55	0,935	-1,615	0,557
T4(27cm)	-0,68	1,67	0,99	0,506
T5(44,5cm)	-7,54	2,25	-5,286	0,839
T6(57cm)	-4,2	2,67	-1,53	0,545

Observa-se que as perdas por reflexão são pequenas no modelo mais simples (modelo 1), entre 0,4 e 0,96 dB.

No entanto, as perdas com o Modelo 2 são mais elevadas e mais variáveis. Resultado esperado, visto que a camada de ar abaixo do banco irá gerar mais reflexões e, portanto, haverá diferenças maiores entre os pontos de reflexão construtiva e destrutiva.

No tubo 5 por exemplo, “cai-se” talvez num ponto de destruição, o que aumenta as perdas por reflexão. Isto pode explicar porque nos ensaios, foram elevados os valores de S₂₁ nesse tubo.

3.2 Comparação entre teoria e testes

Posteriormente, soma-se o S₂₁COMSOL (Modelo 2 - tabela 10) e as perdas pela fórmula de Friis (Tabela 7), isto dará a perda total, que pode ser comparada com os testes experimentais.

A seguir, apresentam-se várias tabelas e gráficos com os resultados teóricos e medidos, destacando a diferença entre eles.

Tabela 13: Comparação dos S_{21} Teoria e Testes com emissão a 20 centímetros (em dB)

Modelo 1				Modelo 2			
Tubo	Teoria+comsol	Ensaios	Diferença	Tubo	Teoria+comsol	Ensaios	Diferença
T1(4cm)	-21,50	-26,45	4,95	T1(4cm)	-21,36	-26,45	5,09
T2(8cm)	-23,48	-25,2	1,72	T2(8cm)	-25,60	-25,2	0,4
T3(17,5cm)	-27,54	-26,80	0,7400	T3(17,5cm)	-28,35	-26,80	1,55
T4(27cm)	-30,22	-29,86	0,3600	T4(27cm)	-28,41	-29,86	1,45
T5(44,5cm)	-33,69	-36,30	2,6100	T5(44,5cm)	-38,18	-36,30	1,88
T6(57cm)	-35,64	-32,45	3,19	T6(57cm)	-36,38	-32,45	3,93
Valor médio do desvio teoria-prática			2,26	Valor médio do desvio teoria-prática			2,38

Verifica-se que a diferença média teoria- prática com os dois modelos é um pouco mais de 2 dB.

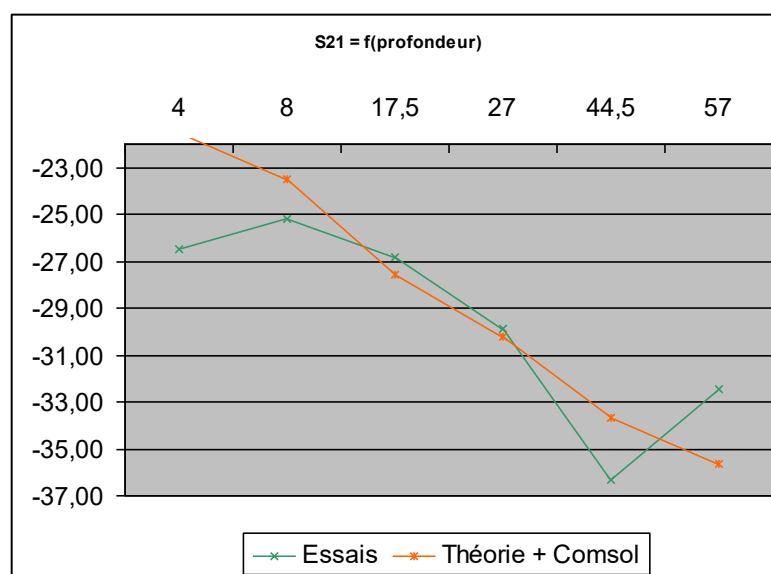


Figura 26: S_{21} como uma função da profundidade, emissão a 20 centímetros (Modelo 1).

3.3 Observações sobre os Resultados

Observa-se que a diferença entre teoria e testes foi de cerca de 2 dB. Existem várias causas possíveis que podem explicar essa diferença, incluindo:

- Nos modelos Comsol utilizados foram desprezadas as reflexões nas bordas, então a localização dos pontos construtivos e destrutivos não é muito precisa;
- Comparado com o modelo da estrada (modelo 1), espera-se diferenças menores se os testes forem

feitos numa estrada real;

- O modelo do banco de testes (modelo 2), apesar de ser mais representativo da real situação dos ensaios, em geral, não melhorou os resultados. Entretanto, ele ajuda a explicar casos anômalos, como os altos valores de S_{21} no tubo 5;

- Os parâmetros eléctricos dos materiais utilizados no modelo não são totalmente confiáveis. O BBS e o GB3 foram encontrados em uma tese do LCPC, mas não foram confirmados experimentalmente. Os parâmetros eléctricos do GNT foram estimados a partir de outras referências.

4. Testes funcionais em UHF

Estimado o total de perdas no meio, pode-se deduzir os limites de funcionamento de sistemas RFID UHF existentes.

4.1 Medida da potência mínima de ativação dos tags

O objetivo destes testes é de encontrar a potência mínima de emissão para ativar um tag, com a antena emissora a 60 centímetros de altura sobre o banco de testes;

4.1.1 Material utilizado

Para realizar estes ensaios, utilizou-se :

1. Antena de emissão do tipo corneta (figura 27) de ganho 6dBi



Figura 27

2. Sonda espião (figura 28) para captar a resposta do tag.

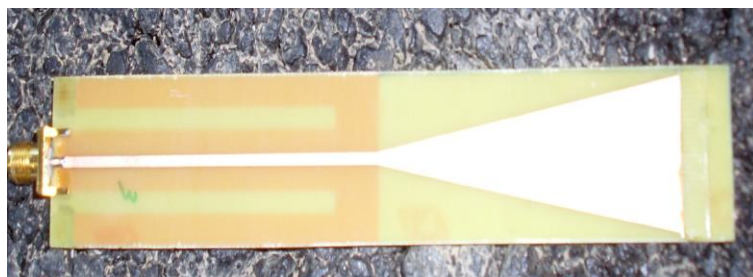


Figure 28

3. Gerador de sinais RF R&S SMIQ-B15 (figura 29) para alimentar a antena de emissão.



Figura 29: Gerador de sinais

4. Analisador de espectro Tektronic RSA 3408A (Figura 30)



Figura 30

6. Banco de testes representativo do asfalto (figura 31)

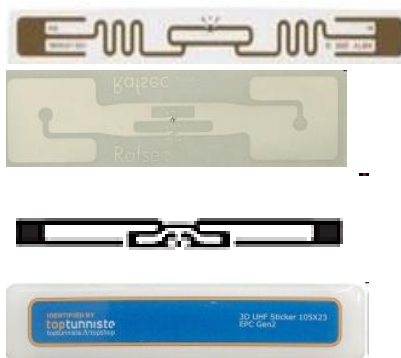


Figura 31

7. Tags UHF

Fabricantes:

- Alien ;
- Rafsec semi dipole
- Avery
- Toptuniste



4.1.2 Procedimento experimental

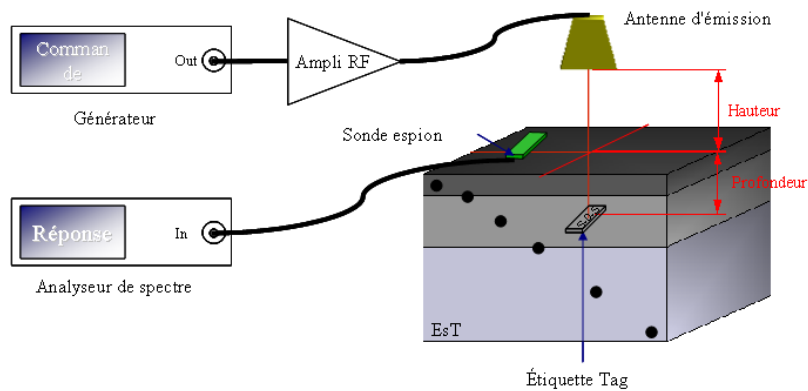


Figure 32. Esquema da montagem realizada

1. O gerador de sinais é conectado ao amplificador;
2. A antena corneta é conectada ao amplificador e colocada a 60 cm do banco;
3. A sonda espião é ligada ao analisador de espectro;
4. Os tags são colocadas nos tubos (Figura 32).

Inicialmente, coloca-se um tag no primeiro tubo mais próximo da superfície e observa-se a sua resposta no analisador de espectro. Então se reduz a potência do gerador até que a resposta da tag não seja mais capturada, ou seja, o sinal que chega ao tag não será suficiente para ativá-lo. Em seguida, repete-se este teste com outros tags em diferentes profundidades.

4.1.3 Resultados dos testes

A potência do gerador é aumentada pelo amplificador de 40 dB. Então, a potência que chega à antena é superior a 40dB.

As tabelas a seguir mostram os valores de potência mínimo para ativar cada tag nos diferentes tubos:

Tabela 12 : tag Alien

Tubo (Profundidades)	Potência do gerador (em dBm)	Potência emitida (em mWEIRP)
T1(4cm)	-28,00	63,36
T2(8cm)	-26	100,44
T3(17,5cm)	-27	79,8
T4(27cm)	-24	159,2
T5(44,5cm)	-18,5	564
T6(57cm)	-19	400

Tabela 13 : tag Avery

Tubo (Profundidades)	Potência do gerador (em dBm)	Potência emitida (em mWEIRP)
T1(4cm)	-27,50	71,131
T2(8cm)	-25	126,491
T3(17,5cm)	-26,5	89,549
T4(27cm)	-22,5	224,937
T5(44,5cm)	-19	503,570
T6(57cm)	-20	400,000

Tabela 14 : tag Rafsec

Tubo (Profundidades)	Potência do gerador (em dBm)	Potência emitida (em mWEIRP)
T1(4cm)	-26,00	100,475
T2(8cm)	-23,5	178,673
T3(17,5cm)	-25,5	112,735
T4(27cm)	-22	252,383
T5(44,5cm)	-17	798,105
T6(57cm)	-18	633,957

Tabela 15 : tag Toptuniste

Tubo (Profundidades)	Potência do gerador (em dBm)	Potência emitida (em mWEIRP)
T1(4cm)	-25,50	112,735
T2(8cm)	-24,5	141,925
T3(17,5cm)	-25,5	112,735
T4(27cm)	-21,5	283,178
T5(44,5cm)	-16,5	895,488
T6(57cm)	-17	798,105

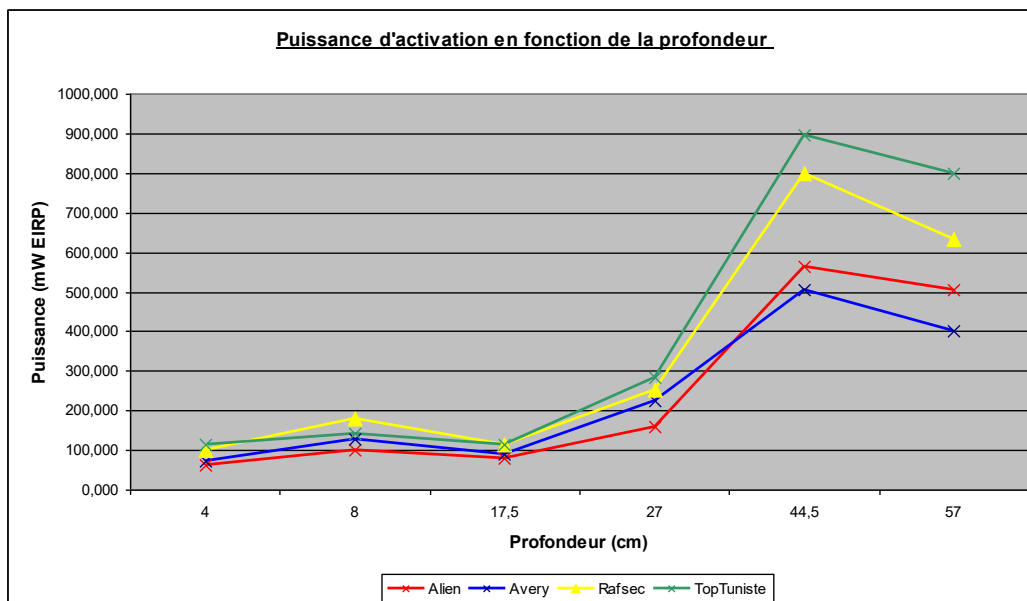


Figura 33: Potência de ativação em função da profundidade, para os diferentes tags utilizados.

A figura 31 agrupa os resultados de todas as tabelas.

De acordo com as normas, sabe-se que a potência máxima emitida pela antena vale 3,3 WERP.

Observa-se que para os quatro tags estudados, a potência mínima para ativá-los sempre satisfaz a norma.

É interessante notar que no tubo 5, precisa-se de mais energia para ativar as tags. Isso confirma a existência de um ponto de destruição neste tubo, como esperado a partir de testes e simulações do S21.

Pode-se observar também a diferença de desempenho entre os diferentes fabricantes. Em particular que o tag Alien necessita de menos energia para ser ativado.

4.1.4 Densidade de potência no tag

Em seguida, é interessante calcular a densidade de potência e o campo elétrico que chegam ao tag, quando o leitor emite a energia mínima para ativá-lo.

A densidade de potência é dada por $S = \frac{P_t G_t e^{-2\alpha R}}{4\pi R^2}$. Só falta acrescentar as perdas de reflexão, para isso, pode-se utilizar os coeficientes de reflexão (Γ) encontradas com Comsol e multiplicar a expressão anterior por $(1 - \Gamma^2)$.

Depois de calcular a densidade de potência, encontra-se o campo elétrico: $E = \sqrt{S\eta}$ onde η é

a impedância intrínseca do meio. Então, seguindo esse raciocínio, tem-se os seguintes resultados:

Tubo (Profundidades)	Potência do gerador (em dBm)	Densidade de potência no tag (W/m^2)	Campo elétrico no tag (V/m)
T1(4cm)	-28,00	1,132E-02	1,400
T2(8cm)	-26	8,117E-03	1,185
T3(17,5cm)	-27	5,844E-03	0,955
T4(27cm)	-24	8,470E-03	1,149
T5(44,5cm)	-18,5	7,246E-03	1,056
T6(57cm)	-19	1,110E-02	1,308
Média		8,684E-03	1,175

Tabela 16 : Tag Alien

Tubo (Profundidades)	Potência do gerador (em dBm)	Densidade de potência no tag (W/m^2)	Campo elétrico no tag (V/m)
T1(4cm)	-27,50	1,271E-02	1,483
T2(8cm)	-25	1,022E-02	1,330
T3(17,5cm)	-26,5	6,557E-03	1,011
T4(27cm)	-22,5	1,196E-02	1,366
T5(44,5cm)	-19	6,458E-03	0,997
T6(57cm)	-20	8,819E-03	1,165
Média		9,454E-03	1,225

Tabela 17 : Tag Avery

Tubo (Profundidades)	Potência do gerador (em dBm)	Densidade de potência no tag (W/m^2)	Campo elétrico no tag (V/m)
T1(4cm)	-26,00	1,795E-02	1,762
T2(8cm)	-23,5	1,443E-02	1,580
T3(17,5cm)	-25,5	8,255E-03	1,135
T4(27cm)	-22	1,342E-02	1,447
T5(44,5cm)	-17	1,023E-02	1,255
T6(57cm)	-18	1,398E-02	1,467
Média		1,305E-02	1,441

Tabela 18 : Tag Rafsec

Tubo (Profundidades)	Potência do gerador (em dBm)	Densidade de potência no tag (W/m ²)	Campo elétrico no tag (V/m)
T1(4cm)	-25,50	2,014E-02	1,867
T2(8cm)	-24,5	1,147E-02	1,408
T3(17,5cm)	-25,5	8,255E-03	1,135
T4(27cm)	-21,5	1,506E-02	1,533
T5(44,5cm)	-16,5	1,148E-02	1,330
T6(57cm)	-17	1,760E-02	1,646
Média		1,400E-02	1,486

Tabela 19 : Tag Toptuniste

Estas tags são normalmente ativados com um campo de aproximadamente 1V /m no ar, o que

corresponde a uma densidade de potência: $S = \frac{E^2}{\eta} = \frac{1}{377} = 2,65mW / m^2$

No betume essa densidade de potência mínima aumentará, visto que o comprimento de onda é menor nesse meio e, portanto, a efetividade da antena do tag em capturar a energia é inferior.

Entretanto, o campo elétrico mínimo continua a ser de aproximadamente 1V / m, mesmo no meio, porque quando calcula-se $E = \sqrt{S \cdot \eta}$, a densidade de potência aumenta, mas a impedância do meio é menor.

Por isso nas tabelas, os campos estão perto de 1V / m.

O campo no tubo 5 deve ser maior, porque precisa-se de mais potência para ativar o tag nesta posição.

Como o tag Alien tem o melhor desempenho, seu campo de ativação é menor.

4.2 Testes com um sistema RFID completo

Por último, será testado o funcionamento de um sistema RFID UHF real.

4.2.1 Material utilizado

1. Leitor Alien ALIEN ALR-8780 EPC Class 1



Figura 34

2. Antenas ALR-8610-AL ALR-8610-AC



Figura 35

3. Computador portatil com o software Alien RFID

4. Tag Rafsec Gen2 Short Dipole



4.2.2 Procedimento experimental

Primeiro, liga-se o leitor Alien ao computador com o software Alien. Em seguida, conecta-se as antenas Alien ao leitor e, finalmente, o tag Rafsec é colocado quinto do tubo do banco (44,5 cm de profundidade).

Então, varia-se a altura da antena transmissora e ajusta-se no software o mínimo de energia para ativar o tag.

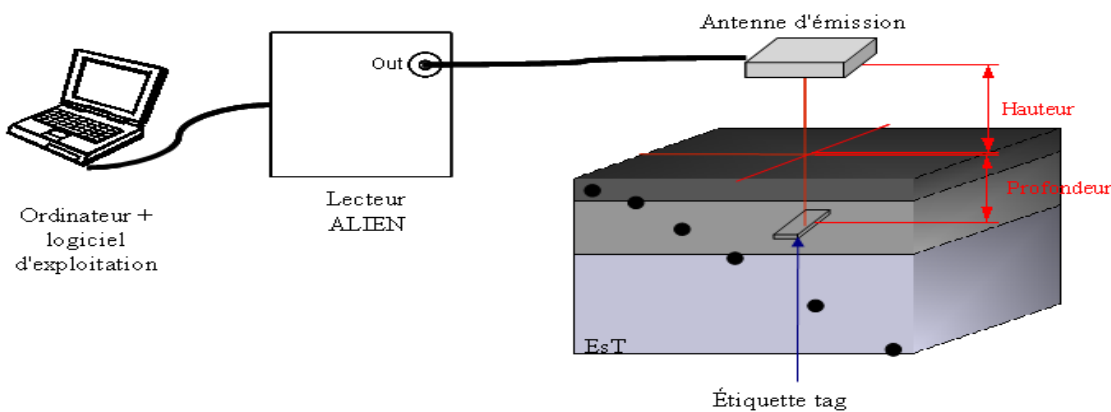


Figura 36:Esquema do procedimento realizado

4.2.3 Resultados dos testes

Os resultados obtidos são agrupados na tabela 20

PEIRP (W)	Altura da antena de emissão com relação à superfície do banco
0.082	30
0.207	40
0.519	53
1.3	57

Tabela 20

Percebe-se que a 30 cm acima da bancada, a potência mínima de ativação é muito baixa, e mesmo a 57 cm de altura, a potência é quase um terço do máximo permitido pela norma (3,3 WEIRP).

5. Referências

- [1] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, third edition, John Willey & Sons, Inc., New York, 2005
- [2] D.Dobkin, *The RF in RFID*, Newnes Elsevier, 2008
- [3] B.Lepine, *070327_RFID-UHF_1r0*, CEA, 2008]
- [4] RFTLab, *Introduction au principe de fonctionnement de la RFID.pdf*, ESISAR, 2006]

Conclusão

Este projeto possibilitou um entendimento mais profundo do sistema RFID em geral. Em seguida, aplica-lo num estudo bem específico, a propagação num meio complexo, o asfalto. Permitiu não somente revisar conceitos importantes no que diz respeito à propagação de ondas eletromagnéticas, ao funcionamento de antenas e à interação entre a onda e o canal de transmissão, mas também analisar na prática o sistema RFID em operação e poder comparar experimentos e teoria.

Os resultados experimentais obtidos estão em sua maioria em conformidade com o esperado pela teoria e pelas simulações. Observou-se que, em BF e HF, a RFID não é perturbada pelo asfalto, como esperado visto que os materiais da estrada são não-magnéticos. As antenas do tag e do leitor também não são desadaptadas quando em contato com o asfalto. Nestas frequências, obteve-se, portanto um desempenho idêntico no ar e no asfalto.

Em UHF, por se tratar de um problema de propagação de ondas eletromagnéticas, outros parâmetros entraram em jogo, como a absorção do meio, devido à sua condutividade, e as reflexões entre camadas. A diferença entre teoria e experimento não foi negligível, da ordem de 2dB. Entretanto, considerando-se a dificuldade de se elaborar um modelo similar à realidade e o fato de os ensaios não terem sido realizados em uma câmara anecoica, até que estes resultados parecem satisfatórios. Os testes funcionais comprovaram que o sistema funciona com relativa “folga”, embora haja uma clara perda de desempenho com relação ao ar.

Finalmente, no que diz respeito às aplicações futuras, este trabalho mostrou que é absolutamente viável implantar tags na estrada. A profundidades de até 30 cm, pode-se optar inclusive pela BF ou HF, se não houver uma grande solicitação de taxa de transmissão. Em UHF, essa profundidade pode ultrapassar 1 metro.