

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Felipe Guimarães Camilo

**Sistema de monitoração Wireless  
Aplicação em pequenos Túneis**

São Paulo  
2010

Felipe Guimarães Camilo

## **Sistema de monitoração Wireless**

### **Aplicação em pequenos Túneis**

Trabalho de formatura apresentado à  
Escola Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do título de Graduação  
em Engenharia

Área de Concentração: Sistemas  
Eletrônicos

Orientador: Sergio Takeo Kofuji

São Paulo  
2010

# **FOLHA DE APROVAÇÃO**

Felipe Guimaraes Camilo

Sistema de monitoração Wireless, Aplicação em pequenos Túneis

Trabalho de formatura apresentado à  
Escola Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do título de Graduação  
em Engenharia

Área de Concentração: Sistemas  
Eletrônicos

Orientador: Sergio Takeo Kofuji

Aprovado em :

Banca Examinadora

Prof. Dr.\_\_\_\_\_

Instituição:\_\_\_\_\_ Assinatura:\_\_\_\_\_

Prof. Dr.\_\_\_\_\_

Instituição:\_\_\_\_\_ Assinatura:\_\_\_\_\_

Prof. Dr.\_\_\_\_\_

Instituição:\_\_\_\_\_ Assinatura:\_\_\_\_\_

Prof. Dr.\_\_\_\_\_

Instituição:\_\_\_\_\_ Assinatura:\_\_\_\_\_

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, meus sinceros agradecimentos ao professor Dr.Sr. Sergio Takeo de nossa Escola, pela disponibilidade, receptividade e interesse em tornar-se meu orientador em meu retorno do Diploma Duplo na Itália.

Deixo também aqui, meus sinceros agradecimentos ao meu orientador do Politecnico di Torino, professor Dr.Sr. Marcello Chiaberge, uma vez que, meu projeto de formatura no Brasil trata-se da continuidade do projeto iniciado na Itália. À ele, pela excelente oportunidade de desenvolvê-lo na empresa MINTEOS de Turim, de forma a aprimorar e aplicar meus conhecimentos em uma solução voltada às necessidades do mercado.

Agradeço também aos meus colegas da MINTEOS, que me deram suporte e auxilio quando precisei.

Por fim, em especial à minha familia e namorada que sempre me apoiaram nessa fase importante de minha formação acadêmica e de minha vida.

## **RESUMO**

A proposta deste Trabalho é apresentar três aplicações diferentes de sensores wireless para monitoração ambiental (florestas, tuneis e ambientes fechados), incluindo especificações técnicas para cada caso (freqüência, consumo e potência) e também apresentar o projeto e seu desenvolvimento para uma destas aplicações (tuneis).

## **ABSTRACT**

Nowadays, the necessity of preserving the environment is mandatory for our planet. Human being damaging interferences in nature, such as forests destruction, have to be controlled as they are bringing serious consequences for Global Warming for instance. Beyond that, many human communities are living in risk places, very much susceptible to nature hazards, what represents an imminent danger to theirs habitants.

Main questions are: how to watch over thousands of forests square meters to prevent fire? How to maintain, under surveillance, millions of kilos of earth and snow, to avoid landslide and avalanches? Technology is certainly an important tool to help and, that is one of engineering goals – apply it to prevent and solve critical problems. One way of preventing catastrophes under control, can be based on continuously monitoring the nature environment with wireless sensors that can capture information “real time” and transmit the captured data thought the internet, with the objective to be processed and analyzed. This monitoring system provides an easy and on time response to any “nature change” considering parameters like temperature, acceleration, Co2 concentration enabling that “Control or Diagnostic Centers” make decisions, alert the population and implement urgent solutions, preventing even bigger material damages and human losses.

The proposition of this Thesis is to present three different applications of wireless sensors for environment monitoring, including technical specifications for each case (frequency, consuming, and power) and also the complete project and development for one of these applications.

# **Lista de Figuras**

Figura 1.1 868MHz divisão em sub bandas.....	20
Figura 1.2: desenho do modelo de 2 raios.....	24
Figura 1.3: Variação de potencia CW normalizada com altura 12m ao longo do percurso r.....	27
Figura 1.4: Variação de potencia CW normalizada com altura 6m ao longo do percurso x.....	27
Figura 1.5: Variação de potencia CW normalizada de todas as frequencias com alturas de TX no percurso r.....	28
Figure 1.6: Variação de potencia CW normalizada de todas as frequencias com alturas de TX no percurso x.....	29
Figura 1.7: Grafico das perdas com percurso desobstruido.....	34
Figure 1.8: Grafico das perdas com percurso obstruido.....	35
Figura 1.9: Grafico das perdas com junção T.....	36
Figura 1.10: Grafico das perdas com junção L.....	37
Figura 1.11: Corte transversal do tunel.....	38
Figura 1.12: Comparação da performance a 868MHz em diferentes distâncias.....	41
Figura 1.13: Comparação da performance a 2.45GHz em diferentes distâncias .....	41
Figura 1.14 –comparação 2cm vs. 11cm .....	42
Figura 1.15: Exemplo de uma represa.....	44
Figura 1.16: Túnel dentro da represa.....	45
Figura 1.17: Túnel dentro da represa.....	46
Figura 1.18: Quasar-UK 2.4GHZ Modulo.....	50
Figura 1.19: Quasar-UK 2.4GHZ Modulo.....	51
Figura 2.1 – Gateway/Receiver .....	52
Figure 2.2 – Microcontrolador ATtiny261.....	54
Figure 2.3 – AVR AVRISP kII.....	57
Figure 2.4 – Esquemático da antena.....	58
Figure 2.5 – “Radiation Pattern” da antena RX.....	59
Figure 2.6- Foto da antena RX.....	59

Figure 2.7 – Antena RX Padrão de Radiação .....	61
Figura 2.8- Transceiver 2.4 GHz e transmissor a 433MHz.....	61
Figura 2.9: Transceiver 2.4 GHz e transmissor a 433MHz ao lado.....	62
Figura 2.10: Transceiver 2.4 GHz e transmissor a 433MHz com a embalagem.....	62
Figura 2.11: modulo montado com a antena RUBBR DUCK .....	64
Figure 3.1 – Esquemático do projeto final.....	64
Figure 3.2 –Medidas com e sem a antena.....	66
Figura 3.3 Testes efetuados nos corredores da POLI-ELETTRICA.....	67
Figura 3.4 medida sinal RSSI com antenas frente a frente e sem obstaculos.....	68
Figura 3.5 medida sinal RSSI com antenas frente a frente e com obstaculos.....	69

# **Lista de Tabelas**

Tabela 1 – Limite das portas da antena em modo de transmissão.....	14
Tabela 2 - Limite das portas da antena em modo de recepção .....	14
Tabela 3 - Limite de potência no modo ativo .....	15
Tabela 4 – Limite de potência do receptor ou transmissor no modo de espera .....	15
Tabela 5 – Limites de imunidade da transmissão RF .....	16
Tabela 6 – Limite de erros de frequência .....	16
Tabela 7 - Limite de nível de potência.....	17
Tabela 8 – Limite de potencia do canal adjacente .....	17
Tabela 9 – Potência limite de emissão espúria para o transmissor .....	18
Tabela 10 – Potência limite de emissão espúria para o receptor .....	19
Tabela 11 – 868MHz divisão em sub bandas .....	21
Tabela 12 – Opções de módulos .....	48/49
Tabela 13 – Opções de antenas.....	55
Tabela 14 – Opções de antenas para o TX .....	56
Tabela 15 – Opções de antenas para o RX .....	58
Tabela 16 – Antena RX - características .....	60

# Sumário

1	Introdução.....	11
1.1	Contexto.....	13
1.2	Regulamento das frequências e seu usos.....	14
1.2.1	EN 301 783.....	14
1.2.2	EN 300 220.....	16
1.2.3	Congestionamento nas bandas livres .....	20
1.2.3.1	Banda 433MHz.....	20
1.2.3.2	Banda 868MHz.....	20
1.2.3.3	Banda 2.4GHz.....	22
1.3	Modelando o percurso.....	23
1.3.1	Modelo de espaço livre.....	23
1.3.2	Modelo dos dois raios.....	25
1.3.3	Previsão de perdas na floresta.....	26
1.3.4	Previsão de perdas para ambientes fechados.....	31
1.3.5	Previsão de perdas para túneis.....	32
1.3.5.1	Túneis de pequena dimensões.....	31
1.3.5.2	Túneis de grande dimensões.....	39
1.4	Aplicação na empresa Minteos.....	44
2	Projeto .....	48
2.1	Definição do Módulo RF para o Túnel.....	48
2.2	Principais componentes do circuito .....	51
2.2.1	Esquemático do Gateway/Receptor.....	51
2.2.2	Características Técnicas do Módulo “ <i>Transceiver</i> ”.....	52
2.2.3	Demais componentes do circuito.....	53
2.2.3.1	Microcontrolador.....	53
2.2.3.2	Programador.....	55
2.2.3.3	Antenas.....	56
2.2.3.4	Fotos do Projeto .....	61
2.2.4	“ <i>Firmware</i> ” do Microcontrolador.....	64
3	Testes em Laboratório na Itália.....	64
4	Testes no Brasil.....	67
5	Conclusão .....	71
6	Apêndice.....	72
6.1	Amostragem do “ <i>firmware</i> ” desenvolvido.....	73
6.2	Referências .....	82

# 1. Introdução

Hoje em dia, a necessidade de preservar o meio ambiente é vital para nosso planeta. A degradação da natureza causada pelo ser humano, como por exemplo, a destruição de florestas, precisa ser controlada, uma vez que traz sérias consequências para o aquecimento global. Além disso, muitas comunidades estão vivendo em áreas de risco, extremamente suscetíveis a desastres naturais, representando um perigo para seus habitantes.

Inúmeras questões precisam ser respondidas. Como vigiar milhares de metros quadrados de florestas para prevenir os incêndios? Como manter sobre vigilância milhões de quilos de terra ou neve para evitar deslizamentos e avalanches?

Tecnologia é sem dúvida uma ferramenta importante para ajudar, e esse é um dos objetivos da engenharia – aplicá-la para prevenir e resolver problemas. Uma das formas de prevenir as catástrofes pode ser baseada na continua monitoração da natureza através de sensores wireless, que podem capturar as informações em tempo real e transmitir os dados através da internet para serem processados e analisados. Este monitoramento , por exemplo, pode fornecer uma resposta simples e instantânea para qualquer “mudança” da natureza, considerando parâmetros como temperatura, aceleração, concentração de Co<sub>2</sub>, habilitando o centro de diagnósticos para que ele tome as decisões necessárias, alertando assim a população e implementando as soluções urgentes, prevenindo danos materiais e perdas humanas ainda maiores.

Meus estudos incluem três frequências pré definidas relacionadas com bandas de aplicações amadoras na Europa: 433MHz, 868MHz e 2.4GHz.

Sua primeira parte consiste de uma pesquisa baseada em documentos científicos (“*papers*”) e de resultados de testes feitos para os três mercados alvo da empresa MINTEOS: túneis, ambientes fechados e florestas.

Com base nestes estudos o objetivo foi identificar a freqüência mais apropriada para cada um destes três mercados, para então dar seqüência ao desenvolvimento de uma solução completa para um mercado alvo determinado. O mercado de Túneis de Pequena Dimensão foi definido como objetivo para a solução completa.

Os estudos incluem também a pesquisa dos módulos RF e Antenas disponíveis no mercado, considerando as características técnicas que são pré-requisitos para a qualidade e confiabilidade da transmissão wireless para este ambiente de Túneis e, sobretudo considerando os custos envolvidos, isto é, os preços dos componentes a serem escolhidos para a solução.

## 1.1 Contexto

Um canal de rádio entre uma unidade transmissora  $u$  e uma receptora  $r$  é estabelecido somente se a potência do sinal recebido  $r$  for superior a certo “*threshold*”, denominado sensitividade de “*threshold*”. Formalmente existe uma ligação entre  $u$  e  $r$  se a potência recebida  $P_r$  é maior que a sensitividade  $T$  (sensitividade de “*threshold*”) e então  $P_r \geq T$ . O exato valor de  $T$  depende das características do transceiver e da taxa de transferência dos bits: para um dado link de rádio, quanto mais alta a taxa de dados maior o valor de  $T$  implicando em uma necessidade maior de potência recebida.

A potência recebida depende da potência  $P_t$  usada pelo transmissor  $u$  e do “*path loss*”, que modela a degradação do sinal de radio em função da distância . Sendo  $PL(u,r)$  o “*path loss*”, entre  $u$  e  $r$  podemos escrever:

$$P_r = \frac{P_t}{PL(u,r)}$$

Então a ocorrência do canal entre dois nós da rede pode ser calculada se o “*path loss*” é conhecido.

## 1.2 Regulamento das frequências e seus usos

Mesmo que as frequências pertencentes à faixa de uso amador não requeiram licenças, os dispositivos utilizados nestas frequências são regidos por leis e regulamentos que variam de país para país ficando sob a jurisdição dos órgãos de regulamentação.

O “*European Telecommunications Standards Institute (ETSI)*” executa os testes e aprova os padrões europeus.

As regulamentações das frequências especificam aspectos de rádio como o espectro permitido e potência para sistemas RF que impactam nas especificações técnicas dos equipamentos.

As bandas de freqüência disponíveis consideradas neste trabalho são 433MHz, 868MHz e 2.4GHz, sendo que, na Europa, as bandas 433MHz e 2.4GHz fazem parte do padrão EN 301 783 e a banda 868MHz do EN 300 220. [6]

### 1.2.1 EN 301 783

É o regulamento que padroniza o uso de bandas de freqüências radio amadoras nas faixas de 420MHz ate 440MHz e 2.3GHz ate 2.4GHz. Os equipamentos usados dentro desta banda devem preencher os requisitos técnicos descritos nesse capítulo. [6]

“*Antenna Port Limits*”

Correspondem a quaisquer emissões da antena do equipamento, funcionando em modo transmissor ou receptor, ou qualquer emissão fora da banda definida pela largura de banda em modo transmissor.

Tabela 1: Limite das portas da antena em modo de transmissão [6]

#### **Antenna port limits in transmit mode**

<b>Frequency range</b>	<b>Test Limits</b>	<b>Remarks</b>
0,15 MHz to 1,7 MHz	-36 dBm or -60 dBc whichever is higher	
1,7 MHz to 35 MHz	-36 dBm or -40 dBc whichever is higher	
35 MHz to 50 MHz	-40 to -60 dBc or -36 dBm whichever is higher	(note 1)
50 MHz to 1 000 MHz	-36 dBm or -60 dBc whichever is higher	
> 1 000 MHz	-30 dBm or -50 dBc whichever is higher	(note 2)

NOTE 1: The limit in dBc decreases linearly with the logarithm of frequency in the range 35 MHz to 50 MHz.  
 NOTE 2: For measurement at frequencies greater than 40 GHz no test limits are specified.

Tabela 2: Limite das portas da antenna em modo de recepção [6]

#### **Antenna port limits in receive or transmit standby mode**

<b>Frequency Range</b>	<b>Test Limits</b>	<b>Remarks</b>
0,15 MHz to 1 000 MHz	-57 dBm	
> 1 000 MHz	-47 dBm	(note)

NOTE: For measurement at frequencies greater than 40 GHz no test limits are specified.

Limites de emissões colaterais irradiadas

Tabela 3: Limite de potência no modo ativo[6]

**Enclosure port limits in active mode**

Frequency range	Test limits	Remarks
30 MHz to 35 MHz	-36 dBm or -40 dBc whichever is higher	
35 MHz to 50 MHz	-40 to -60 dBc or -36 dBm whichever is higher	(note 1)
50 MHz to 1 000 MHz	-36 dBm or -60 dBc whichever is higher	
> 1 000 MHz	-30 dBm or -50 dBc whichever is higher	(note 2)

NOTE 1: The limit in dBc decreases linearly with the logarithm of frequency in the range 35 MHz to 50 MHz.

NOTE 2: For measurement at frequencies greater than 40 GHz no test limits are specified.

Tabela 4: Limite de potência do receptor ou transmissor no modo de espera [6]

**Enclosure port limits in receive or transmit standby mode**

Frequency Range	Test Limits	Remarks
30 MHz to 1 000 MHz	-57 dBm	
> 1 000 MHz	-47 dBm	(note)

NOTE: For measurement at frequencies greater than 40 GHz no test limits are specified.

Limites de imunidade do sinal RF

Tabela 5: Limites de imunidade da transmissão RF [6]

**Conducted RF immunity limits**

Environmental phenomena	Operating frequency range of EUT	Characteristics of the unwanted signal	Units
RF conducted immunity	< 30 MHz	90 80 0,15 - 1 000	dB $\mu$ V emf % AM (400 Hz) MHz
	> 30 MHz	80 80 0,15 - 1 000	dB $\mu$ V emf % AM (400 Hz) MHz

## 1.2.2 EN 300 220

É o regulamento que padroniza o uso de dispositivos de rádio com largura de banda de 868MHz a 870MHz e os equipamentos utilizados dentro desta banda devem cumprir os requisitos técnicos descritos nesse capítulo. [6]

### Erro de frequência

O erro da frequência não deve exceder os valores da tabela em condições normais ou extremas.

Tabela 6: Limite de erros de frequência

Channel Spacing	Frequency Error Limit (KHz)	Frequency Error Limit (KHz)
	300-500MHz	500-1000MHz
10/12.5KHz	+/- 1(b)	No value specified
	+/- 1.5(m)	No value specified
	+/- 2.5(p)	No value specified
20/25KHz	+/- 2(b)	+/- 2.5(b)
	+/- 2(m)	+/- 2.5(m)
	+/- 2.5(p)	+/- 3(p)

Nota: (b)=estação fixa; (m)= estação móvel; (p) = estação portátil

### Potência da portadora (Conduzida)

Isto se aplica para equipamentos com conector externo de antena permanente. A potência de saída da portadora não deve exceder os seguintes valores:

Tabela 7: Limite de nível de potência

Power Class	Power Level (mW)
5a	0.025
7a	5
8	10
9	25
11	100
12	500

#### Potência Irradiada Efetiva

Aplica-se para equipamentos com uma antena integral ou dedicada e tem os mesmos limites acima.

#### Potência do canal adjacente

A potência do canal adjacente não deve exceder:

Tabela 8: Limite de potencia do canal adjacente

	channel Separation < 20KHz	channel Separation > 20KHz
Normal Test Conditions	10uW	200nW
Extreme Test Conditions	32uW	640nW

#### Alcance da modulação para equipamentos de banda larga (>25 khz)

O alcance da modulação da largura de banda inclui todas as bandas laterais associadas acima do nível apropriado de emissões espúrias e o erro de frequência ocorrido sob condições de testes extremos. O limite de emissão espúria é de 250nW.

#### Emissões Espúrias

A medida deve ser feita sem modulação aplicada: para os transmissores operando em níveis de frequências abaixo de 470MHz, a medida deve ser feita acima de 9KHz até 4GHz. Para os equipamentos operando acima de 470MHz, o limite superior é 12.75GHz. A potência de qualquer emissão espúria conduzida ou irradiada não deve exceder os seguintes valores

Tabela 9: Potência limite de emissão espúria para o transmissor[6]

State	47MHz to 74MHz 87.5MHz to 118MHz 174MHz to 230MHz 470MHz to 832MHz	bellow 1000MHz	Frequencies above 1000MHz
Operating	4nW	250nW	1uW
Standby	2nW	2nW	20nW

Estabilidade de frequência para condições de pequena voltagem, para equipamentos alimentados por baterias, é necessário que o transmissor fique no canal quando a voltagem cai abaixo do menor nível de voltagem. [6]

#### Radiação espúria recebida

As radiações espúrias do receptor são emissões causadas pelo equipamento e antena. Para os receptores operando abaixo da frequência de 470MHz, a medida deve ser feita acima de 9KHz até 4GHz. Para equipamentos operando acima de 470MHz, o limite superior é 12,75GHz. A potência para qualquer emissão espúria, conduzida ou irradiada não deve exceder os seguintes valores:

Tabela 10: Potência limite de emissão espúria para o receptor

	< 1000MHz	>1000MHz
Spurious Limits	2nW	2nW

## 1.2.3 Congestionamento nas Bandas Livres e Pequenos Módulos de Rádio FrequênciA.

Cada vez mais os dispositivos eletrônicos estão se tornando sem fio. Estamos rodeados deles e cada vez mais nos tornando dependentes deles. Entre eles por exemplo os telefones sem fio, sensores, internet sem fio e uma variedade de produtos com “bluetooth”.

### 1.2.3.1 Banda de 433MHz

A banda de 430-440 MHz é uma banda livre na Europa e em vários países e por isso apresenta um problema a ser considerado que é o seu congestionamento. Na Europa o congestionamento vem se tornando cada vez mais problemático.

Bandas de rádio estreitas não são projetadas para ter resistência à interferência de canal adjacente ou co-existência. O uso desta frequência deve ser sujeita a um regulamento especial como mencionado acima (EN 301 783) e os equipamentos devem seguir os requisitos exigidos, com o objetivo principal de reduzir o congestionamento.

### 1.2.3.2 Banda de 868MHz

O regulamento para a banda 868MHz é mais restritiva do que para a de 433MHz. Por isso temos menos problemas de interferência. Essa banda é dividida em várias sub-bandas que são reservadas para funções particulares [6]:

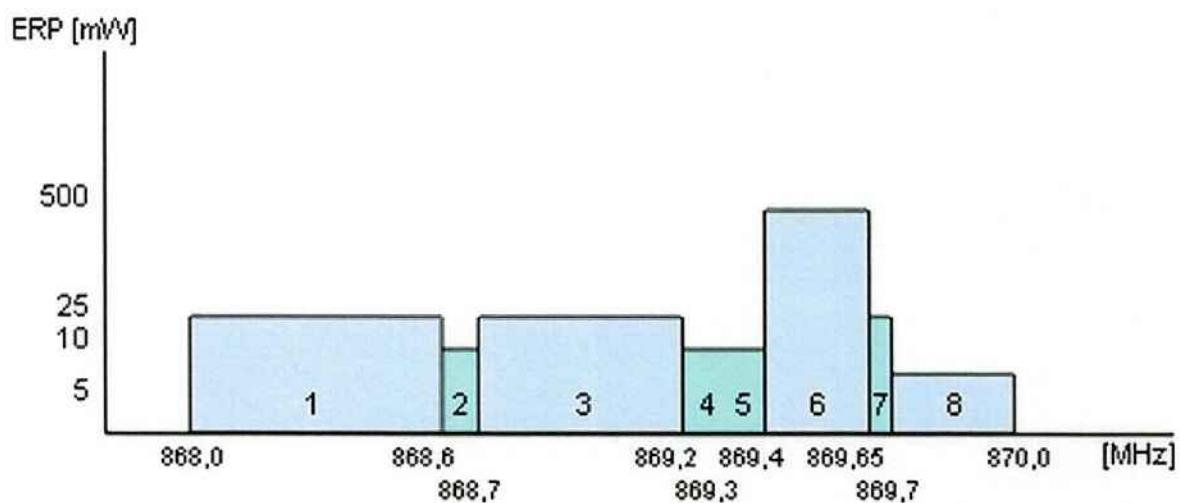


Figura 1.1 868MHz divisão em sub bandas

Tabela 11: 868MHz divisão em sub bandas

sub-band	usage	channel grid	duty cycle
1	common	broadband	< 1%
2	alarm	25 hHz	< 0.1%
3	common	broadband	< 0.1%
4	alarm	25 kHz	< 0.1%
5	free		
6	common	25 kHz / broadband	< 10%
7	alarm	25 kHz	< 10% - 100%
8	common	broadband	< 10% - 100%

### 1.2.3.3 Banda 2.4GHz

A banda de 2.4GHz tornou-se muito popular. Todos os dispositivos que usam essa banda devem cumprir alguns requisitos e ser construídos para operar na presença de outro dispositivo funcionando na mesma banda. Mesmo atendendo aos requisitos, cada vez com mais dispositivos

operando nessa banda, ela tornou-se tão ocupada que o desempenho e a confiabilidade das transmissões acabaram por ser questionadas. Por isso outras exigências técnicas foram adicionadas de modo a reduzir o problema de interferência.

Os produtos devem atender a regulamentação EN 301 783 e também conter características adicionais como filtragem do sinal e “*frequency hopping*” (FHSS).

## 1.3 Modelando o Percurso

Utilizando-se o modelo do “*Path Loss*” como base, é possível determinar os parâmetros críticos para uma transmissão sem fio tais como, maior distância possível na comunicação, potência transmitida e sensibilidade do receptor. Isto minimiza a necessidade de repetição dos testes em campo, em caso de mudanças nas características do transmissor ou receptor. Modelar o “*Path Loss*” sempre foi uma das tarefas mais difíceis para um projetista de um sistema sem fio. Os mecanismos que regulam os sinal da propagação de rádio podem ser agrupados em 3 categorias: reflexão, difração e dispersão. Reflexão ocorre quando a onda eletromagnética atinge a superfície de um objeto com dimensões muito maiores que o comprimento de onda. Difração ocorre quando existe um objeto com pontas afiadas entre o transmissor e o receptor. Dispersão ocorre quando muitos objetos pequenos estão entre o transmissor e o receptor. [5]

Os modelos básicos são:

### 1.3.1 Modelo de Espaço Livre

Este modelo é usado para prever a propagação do sinal de rádio quando o “*path loss*” entre o transmissor e o receptor está livre e sem obstruções. Sendo  $P_r(d)$  a potência do sinal recebido pelo receptor localizado a uma distância  $d$  do transmissor, temos:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \gamma^2}{L d^2 (4\pi)^2}$$

Onde  $G_t$  é o ganho do transmissor,  $G_r$  o ganho do receptor,  $L$  o fator de perdas do sistema não relacionado à propagação, e  $\gamma$  o comprimento de onda em metros. Esse modelo ilustra o caso onde existe apenas o caminho direto entre o transmissor e o receptor, por isso frequentemente é impreciso [5].

### 1.3.2 Modelo dos Dois Raios

Para melhorar a precisão, este modelo considera dois caminhos de propagação: o percurso direto e o refletido no solo entre o transmissor e o receptor.

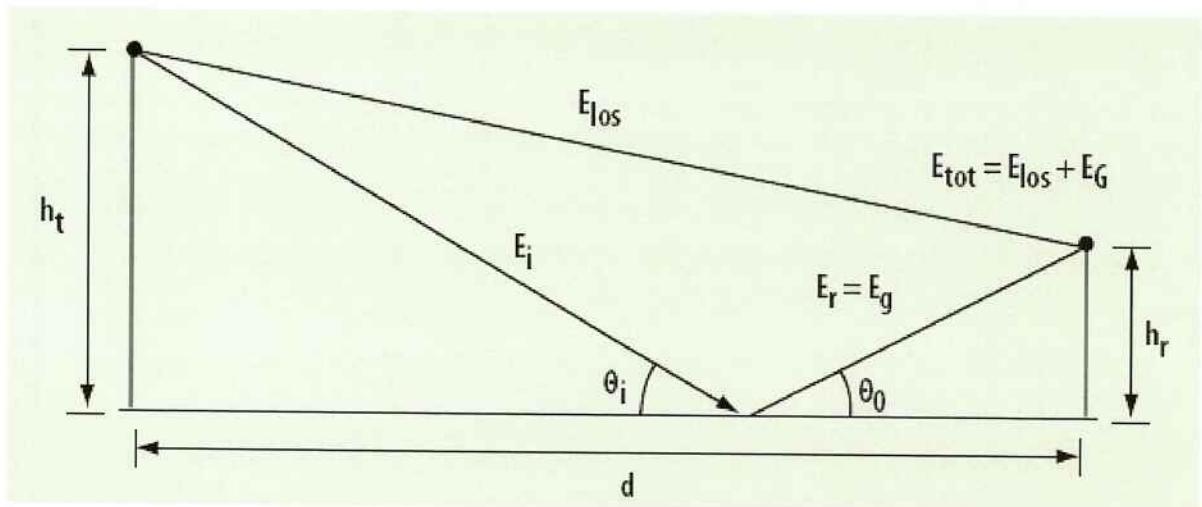


Figura 1.2: desenho do modelo de 2 raios [5]

Nesse modelo a potência recebida em função da distância é dada pela seguinte fórmula:

$$P_r = PtGtGr \frac{ht^2hr^2}{d^4} [5]$$

Onde  $ht$  é a altura da antena do transmissor e  $hr$  a altura da antena do receptor. Se a distância entre o emissor e o receptor é relativamente grande ( $d \gg \sqrt{hthr}$ ), e abstraindo as características dos módulos de rádio, podemos escrever a formula simplificada a seguir:

$$\Pr(d) = Ct \frac{pt}{d^4} [5]$$

Onde  $Ct$  (t de “two-ray”) é uma constante e depende da característica do radio[5].

### 1.3.3 Previsão das Perdas na Floresta

Atualmente não existe um modelo simples para prever o “*path loss*” para florestas sendo que um modelo foi criado com base em testes realizados em uma floresta na Dinamarca, que segue descrito abaixo:

$$Pmdl(r) = Gtx \ Grx e^{-\alpha r} \frac{1}{r^d} \left( \frac{\gamma}{4\pi r} \right)^2 [1]$$

Onde  $Gtx$  é o ganho da antena do transmissor,  $Grx$  é o ganho da antena do receptor,  $\alpha$  e  $r$  são parâmetros do meio ambiente. Para escrever a sua fórmula é mais conveniente escrever a perda total da seguinte maneira:

$$Lf = L0 + Lant + Lv\&gt;eg (dB) [1]$$

Onde L0 representa as perdas em espaço livre, Lant representa a perda devida à perda das antenas do transmissor e receptor (TX/RX), Lveg é a perda devida à vegetação e configuração do terreno, e é obtida pela formula do Pmdl(r) convertida em dB

Para freqüências entre 120MHz e 2400MHz e com distância entre TX-RX maior que 100m, os parâmetros são:

$$d = 2.3 + 0.8(25 - 3.6 \frac{Htx}{Hf})e^{-3.7E - 3 \circ f(MHz)} \quad [1]$$

A exponencial inicial  $\alpha$  foi modelada como uma sobreposição de dois parâmetros.

Sendo Hf a média da altura das arvores da floresta

$$\alpha h = 0.43 \left[ 32 - 0.1 \log \left( \frac{Htx}{Ht} \right) e^{\frac{500}{f(MHz)}} \right] \quad [1]$$

e

$$\alpha h = 0 \text{ for } fMHz > 500MHz$$

Sendo Ht a média da altura dos troncos das árvores

$$\alpha a = 0.43E - 2 \left\{ -13.9 + 7 \log fMHz - 0.06 e^{6 - 0.3 \frac{fMHz}{2000}} \right\} [dB/m]$$

e

$$\alpha a = 0 \text{ if the calculated } \alpha a < 0$$

As medidas foram tomadas a partir de três transmissores com alturas diferentes, mudando as suas posições ao longo dos caminhos r e x.

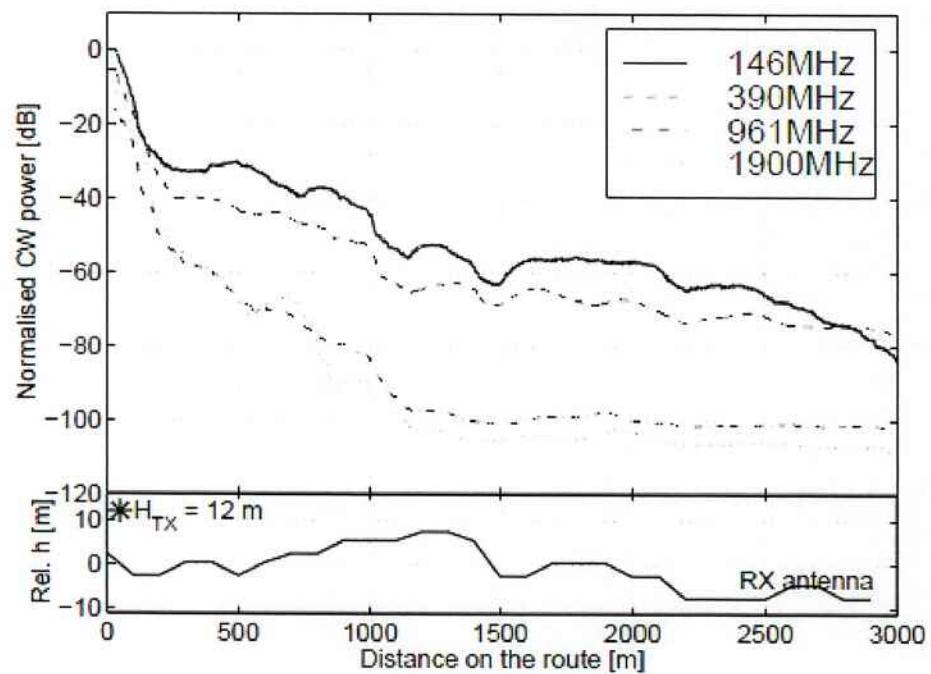


Figura 1.3: Variação de potência CW normalizada com altura 12m ao longo do percurso r[1]

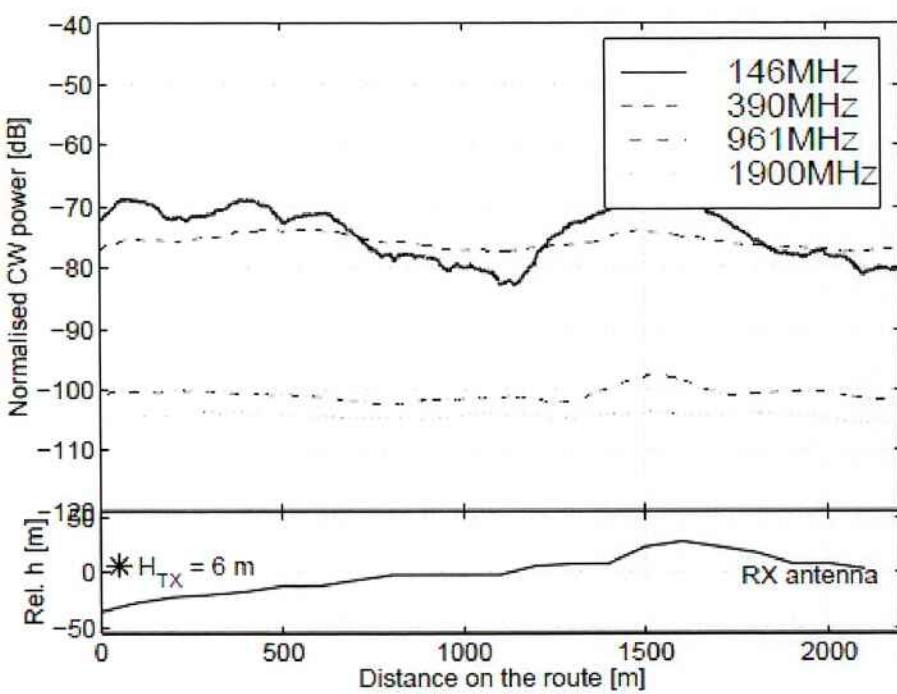


Figura 1.4: Variação de potência CW normalizada com altura 6m ao longo do percurso x[1]

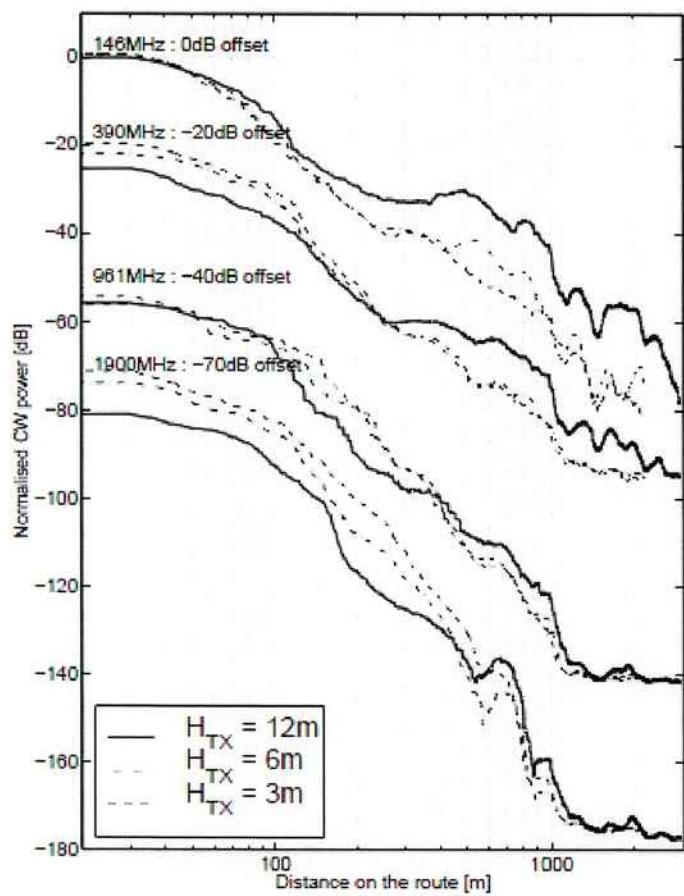


Figure 1.5: Variação de potencia CW normalizada de todas as frequencias com todas alturas de TX ao longo do percurso r[1]

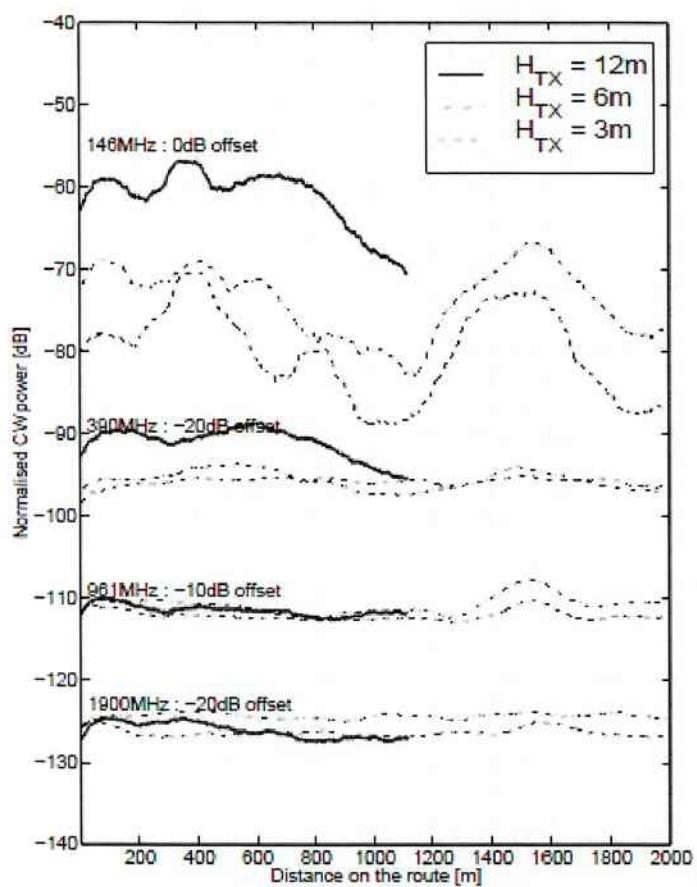


Figure 1.6: Variação de potência CW normalizada de todas as frequências com todas alturas de TX ao longo do percurso x[1]

Deste modo foi desenvolvido um modelo simples para medir as perdas na transmissão em florestas. O modelo se aplica para ondas polarizadas verticalmente.

### 1.3.4 Previsão das Perdas em Ambientes Fechados

A propagação em ambientes fechados é muito mais complexa do que em lugares abertos devido ao aumento do número de obstáculos, os quais tem dimensões mais próximas ao comprimento de onda do sinal propagado, e onde há presença de vários tipos de paredes e pavimentos que são somados à complexidade dos cálculos. Como resultado, muitos modelos de perda foram desenvolvidos para descrever a transmissão nestes ambientes e seus efeitos multiplicativos que causam a atenuação no sinal transmitido. O que mais importa não é apenas o cálculo das perdas médias (o que permite o cálculo da potência media recebida), mas também a descrição das diferentes componentes de atenuação que combinadas impactam nas ondas propagadas e no seu nível de potência. [2]

$$L_{total} = 20 \log(f) + N \log(d) + L_f(n) - 28dB \quad [2]$$

Onde N é o índice de decaimento de potência, f a frequência em MHz, Ltotal O valor das perdas totais, d a distância em metros (d > 1m), Lf(n) é o fator de perda devido à penetração no solo e n é o número de andares entre o transmissor e receptor. Para um valor zero de Lf, o transmissor e o receptor são considerados no mesmo nível. E para N=20, esse modelo é idêntico ao modelo de espaço livre para ambientes externos. O estudo em ambientes fechados requer um N=18 para um caminho com perdas entre o transmissor e o receptor (um expoente de “path loss” igual a 1.8). Propagações em torno de cantos e paredes requerem um N=40. No caso de percursos longos, os percursos refletidos podem interferir e resultam novamente em N=40. [2]

### 1.3.5 Previsão das Perdas em Túneis

#### 1.3.5.1 Túneis de pequena dimensão(raio<2,5m)

A propagação de ondas eletromagnéticas em pequenos túneis subterrâneos tipicamente vem sendo modelada como uma guia de onda grande e imperfeita. Basicamente uma guia de onda é uma estrutura com paredes condutivas que suportam ondas transversas elétricas (TE) e transversas e magnéticas (TM). Essas ondas criam campos elétricos e magnéticos perpendiculares à direção de propagação. Guias de onda retangulares e circulares são frequentemente melhores que linhas de transmissão para aplicações de microondas por causa da diferença significativa de potência perdida, que é bem menor nas guias de onda. [3]

O concreto reforçado no túnel, no entanto, não suporta a teoria que as paredes se comportariam como condutores quase perfeitos. Na verdade a parede age mais como um isolante do que como condutor. Uma fronteira de dielétrico existe, onde a divisão entre a energia refletida novamente para o túnel e aquela que escapa através de refração. Em freqüências de transmissão menores, o sinal penetra mais fundo no solo que circunda o túnel. A atenuação devido à refração é diretamente proporcional ao quadrado do comprimento de onda

Quanto mais o diâmetro do túnel cai, cada vez menos modos de maior ordem de TE e TM são excitados na condução. A seção das guias de onda normalmente é projetada para ter dominância de menor ordem para diminuir as perdas. Quanto maior o modo da onda, maior a atenuação e a diferença de fase nesse modo. A atenuação dos modos é inversamente proporcional ao cubo da seção do túnel.

O modo dominante da guia de onda terá a menor frequência de corte. Abaixo dessa frequência de corte, uma onda fixa existe quando nenhuma energia é propagada ao longo do sistema. Para uma guia de onda circular, o comprimento de onda de corte é o diâmetro multiplicado por 1,71 para o modo dominante TE11. Para túneis usados para esse efeito, o diâmetro interior foi 1,61m. Considerando-se primeiramente uma guia de onda circular, a frequência de corte é aproximadamente  $(3 \times 108\text{m/s}) (1.06\text{m})(1.71)$  ou 165.5 MHz. Expandindo para o concreto exterior e assumindo uma constante dielétrica de valor 6, a frequência de corte do túnel é reduzida por um fator de 16 até 67,5 MHz.

Usando o modelo de guia de onda, a expectativa é que as perdas sigam o modelo de propagação de um túnel híbrido, aumentando as perdas com o aumento da distância entre o transmissor e o receptor. Até certa distância entre o transmissor e o receptor, é conhecida como distância “*perto*”, na qual o expoente do modelo de espaço livre é igual a 2. Na região “*longe*”, as propriedades de guia de onda fazem com que o expoente caia para o valor unitário.

No caso de junções de forma T e L nos túneis, o modelo foi modificado usando análise modal das guias de onda. O comportamento pode ser dividido em três seções e a primeira começa modelando as perdas no começo da junção. Indo do canal principal para um canal lateral o efeito é um forte declínio na potência do sinal para uma distância próxima à junção. Os efeitos da conversão são rapidamente dissipados chegando a uma distância de estabilização, que marca o fim das perdas causadas pela junção. As perdas variam moderadamente depois desse ponto e a partir do NLOS “*log-distance law behavior*”, Lee e Bertoni usaram um modelo híbrido de conversão para prever 50 dB e 42 dB de perdas de acoplamento para as junções L e T respectivamente, para uma frequência de 900MHZ em um túnel de 4m de diâmetro.

Usando um dipolo, existirão perdas significativas na potência do sinal devido à ineficiência do acoplamento dessas antenas para o modo de guia de onda. As perdas de inserção decaem com a crescimento do comprimento de onda, porque o tamanho da antena ocupa uma porção grande se comparado ao comprimento de onda do sinal.

Resultados para as medidas de perdas no caso de um túnel desobstruído reto, tendo 5 pés de distância inicial entre o transmissor e o receptor:

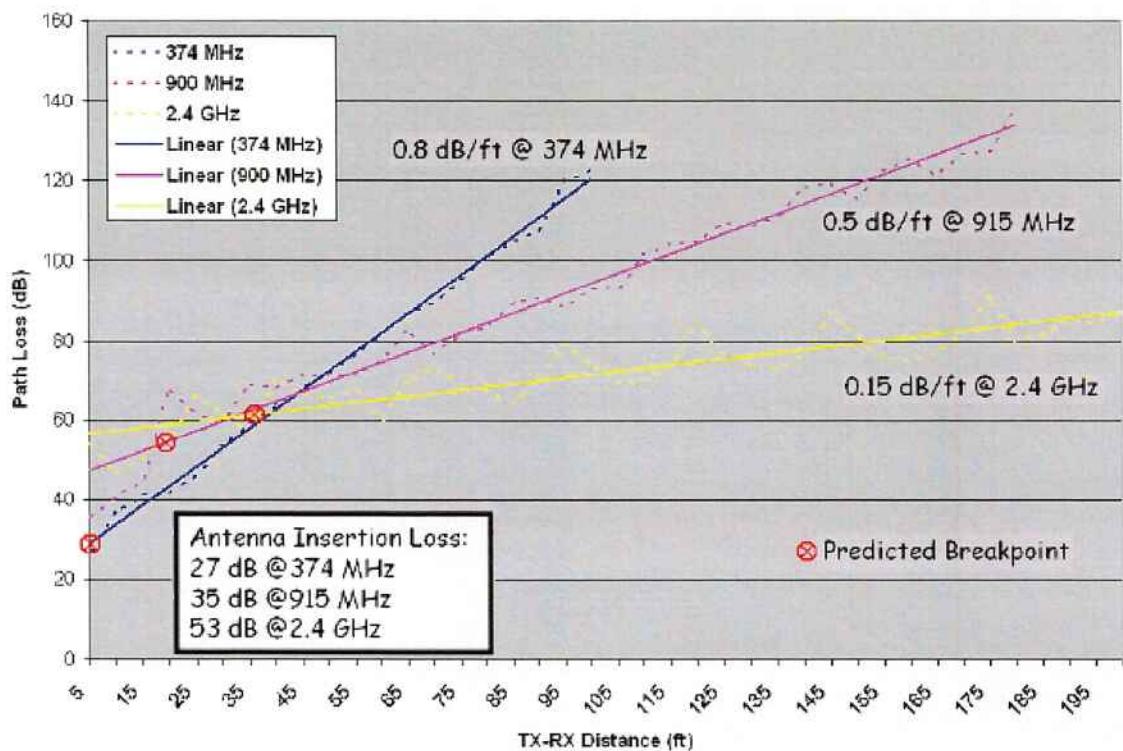


Figure 1.7: Gráfico das perdas com percurso desobstruído reto[3]

Resultados para as medidas de perdas no caso de um túnel obstruído reto, tendo 50 pés de distância inicial entre o transmissor e o receptor:

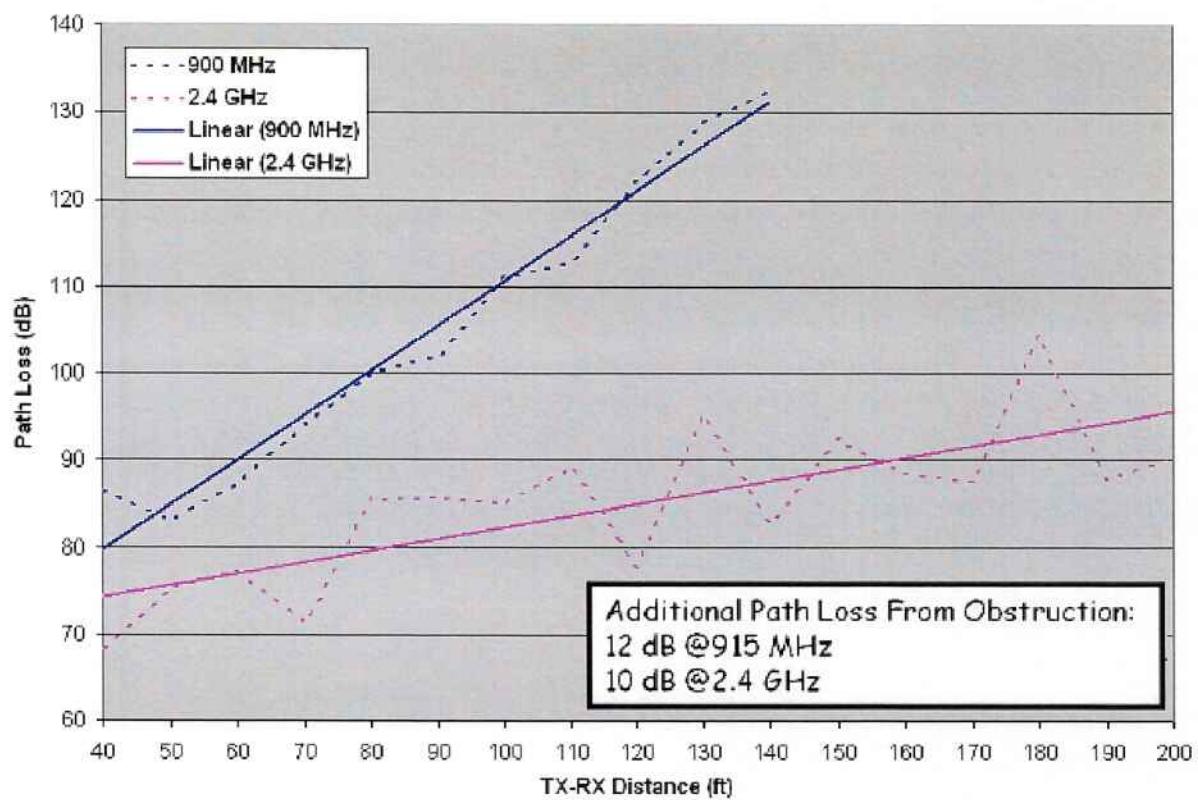


Figure 1.8: Gráfico das perdas com percurso obstruído[3]

Resultados para as medidas de perdas no caso de um túnel com junção T tendo 30 pés de distância inicial entre o transmissor e o receptor:

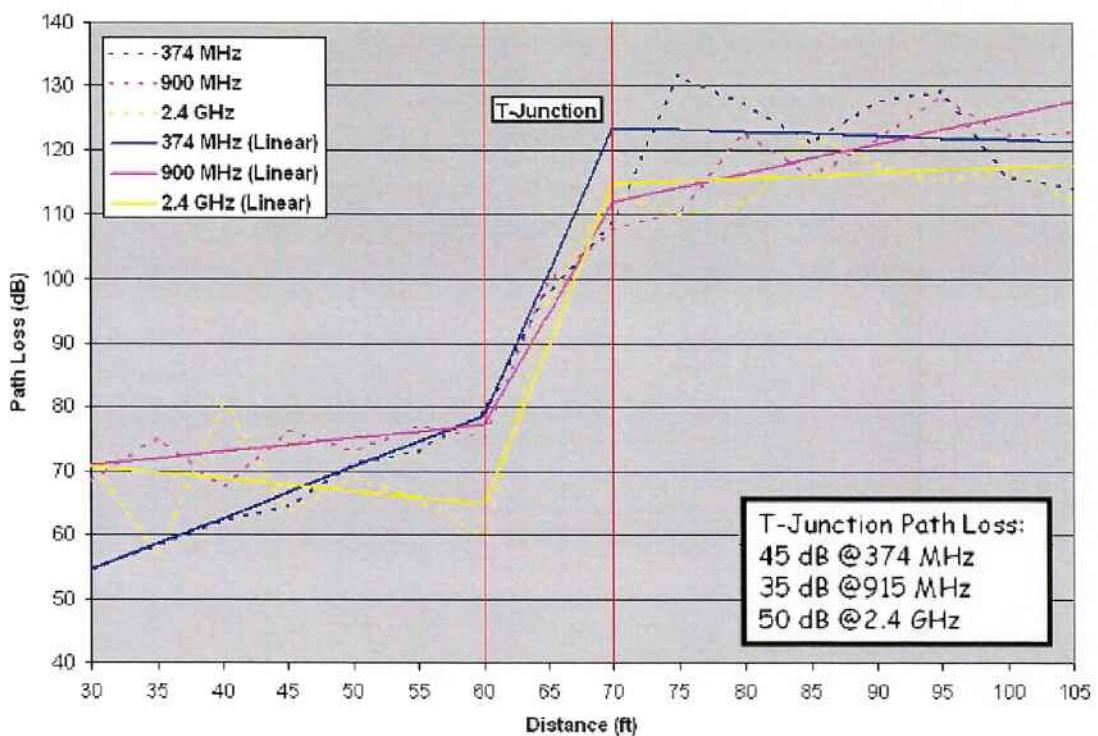


Figure 1.9: Gráfico das perdas com junção T[3]

Resultados para as medidas de perdas no caso de um túnel com junção L tendo 5 pés de distância inicial entre o transmissor e o receptor:

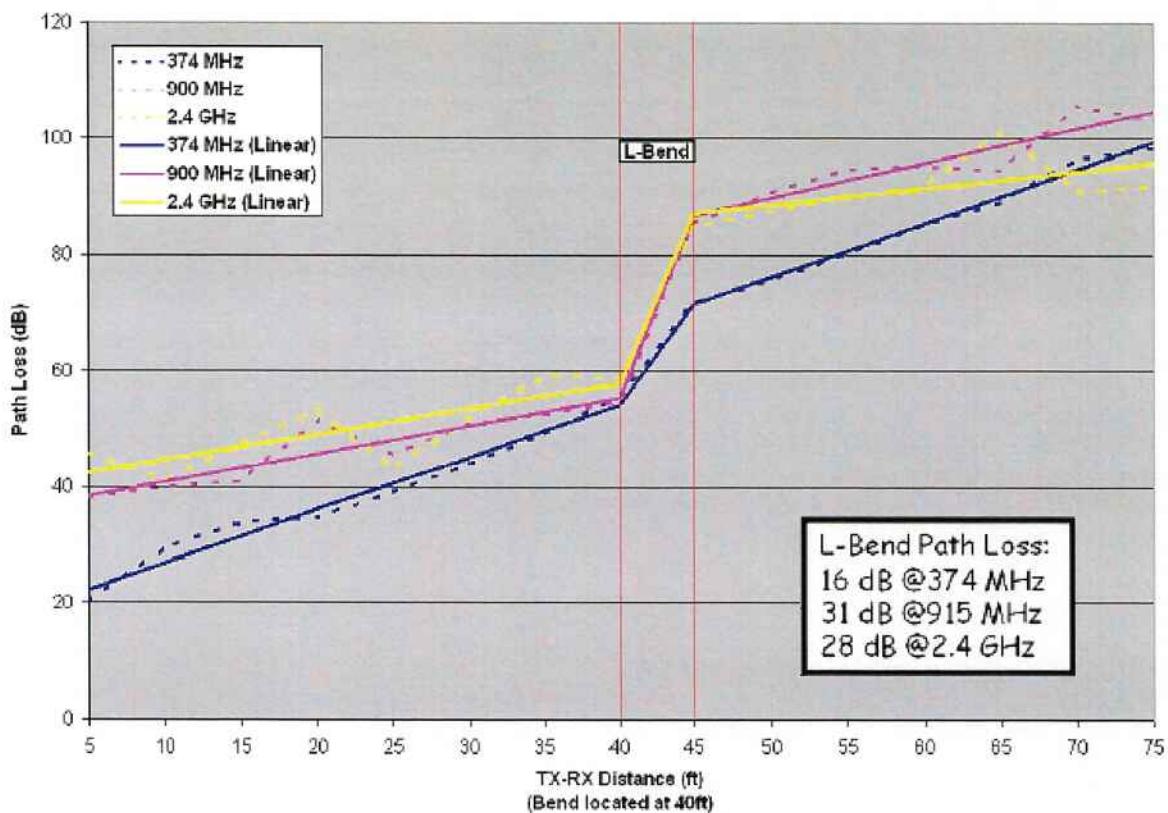


Figure 1.10: Gráfico das perdas com junção L[3]

Os dados obtidos pelos testes foram muito importantes para selecionar a frequência de operação do projeto. Dentro do túnel, o aumento da frequência até 2.4GHz produziu uma melhora significativa das perdas. Entretanto, fora do túnel, usar uma frequência mais alta implica em ter uma perda maior devido à absorção. A frequência de 915 MHz produz um alcance necessário tanto para túneis como para áreas urbanas. O pequeno alcance do sinal de 374MHz no túnel cria dúvidas sobre a viabilidade de usar a frequência de 433MHz para esse ambiente. O pequeno diâmetro do túnel é o fator determinante, o uso da banda UHF seria mais apropriado em túneis com diâmetro grande.

### 1.3.5.2 Túneis de grande dimensão (raio>2,5m)

Para implementar de maneira eficiente uma rede de sensores sem fio (wireless) em túneis de grande dimensão é necessário saber o modelo de propagação para cada frequência dentro do túnel. Neste estudo foram obtidos dados para freqüências de 868MHz 2.45GHz em túneis de grande diâmetro.

As medidas foram efetuadas com as freqüências de 868MHz 2.45GHz dentro de um túnel de trem, que media 3.6m de diâmetro. Os transmissores foram posicionados perto da parede do túnel, a uma altura de 2m (Ys), 0.05m (Xs) da parede orientada verticalmente. A posição do transmissor foi representada pelas coordenadas como  $T(Xs,Ys,Zo)$ . A posição do receptor foi representada como  $R(x,Ts,z)$ , onde z é a distância ao longo do túnel com ponto de referência Zo. Para efeito de comparação, um transmissor foi montado também com uma antena a 2m de altura no centro do túnel.

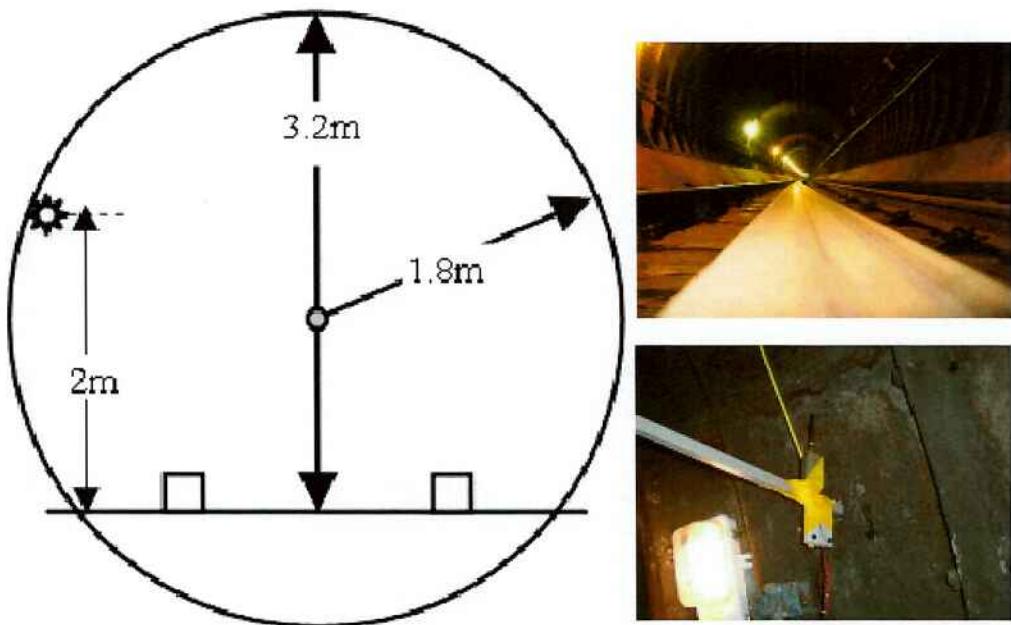


Figura 1.11: Corte transversal do tunel

Duas técnicas de medidas foram aplicadas e serão descritas abaixo:

- a. Uma técnica de baixa resolução (LR) onde as medidas são conduzidas em intervalos de 2m, 5m e 10 dependendo da separação entre o receptor e da frequência operacional. A cada medida de frequência, o transmissor é movido aleatoriamente dentro de uma área de um metro quadrado, enquanto as 100 amostras são gravadas. Usando uma técnica de perdas causada pelos múltiplos caminhos nos permite fazer uma média das perdas do percurso e estimar o seu valor.
- b. Uma técnica de alta resolução (HR), na qual o receptor é movido lentamente e continuamente pelo túnel enquanto a potência do sinal recebido é gravada usando um intervalo de amostragem de 0.5s . Esse método nos permite usar detalhadamente as informações das medidas do percurso em relação à distância. Comparando com a técnica LR as medidas demonstram que ainda existem perdas de potência no sinal.

Foram feitas seis medidas para cada frequência, que estão descritas na tabela a seguir:

	Set	Tx	Rx	Measurements
i	Centre to Centre (C-C): both transmitter and receiver are deployed at equal distance (noted as $X_C$ ) to both side walls	$(X_C, Y_S, Z_0)$	$(X_C, Y_S, z)$	LR & HR
ii	Side to Centre (S-C)	$(X_S, Y_S, Z_0)$	$(X_C, Y_S, z)$	LR & HR
iii	Side to Same Side 2cm (S-SS 2cm): receiver is 2cm away from the wall with transmitter mounted (noted as Wall S)	$(X_S, Y_S, Z_0)$	$(X_H, Y_S, z)$	LR
iv	Side to Same Side 11cm (S-SS 11cm): receiver is 11cm away from Wall S	$(X_S, Y_S, Z_0)$	$(X_H, Y_S, z)$	HR
v	Side to Opposite Side 2cm (S-OS 2cm): receiver is 2cm away from the wall opposite to Wall S	$(X_S, Y_S, Z_0)$	$(X_V, Y_S, z)$	LR
vi	Side to Opposite Side 11cm (S-OS 11cm): receiver is 11cm away from the wall opposite to Wall S	$(X_S, Y_S, Z_0)$	$(X_V, Y_S, z)$	HR

O caminho de perdas nesse caso foi definido como:

$PL(dBm) = Ptx(dB) + Gtx(dB) + Grx(dB) - Prx(dBm) + P_{cable\_loss}(dB)$ , onde  $Ptx(dB)$  é a potência transmitida;  $Prx(dBm)$  é a potência recebida;  $P_{cable\_loss}(dB)$  representa as perdas no cabo, que acrescentam 1.5dB de perda a 868MHz e 2.0 dB a 2.45GHz;  $Gtx(dB)$  e  $Grx(dB)$  são os ganhos transmitidos e recebidos pelas antenas do transmissor e receptor respectivamente (ambos 2dB).

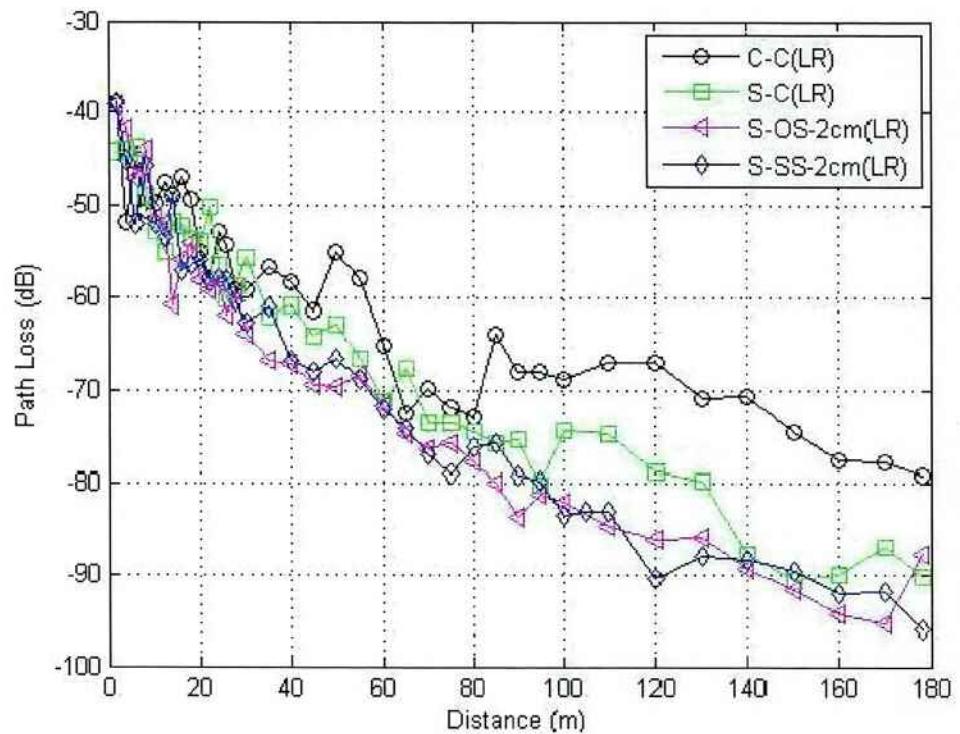


Figura 1.12: Comparação da performance a 868MHz em diferentes distâncias

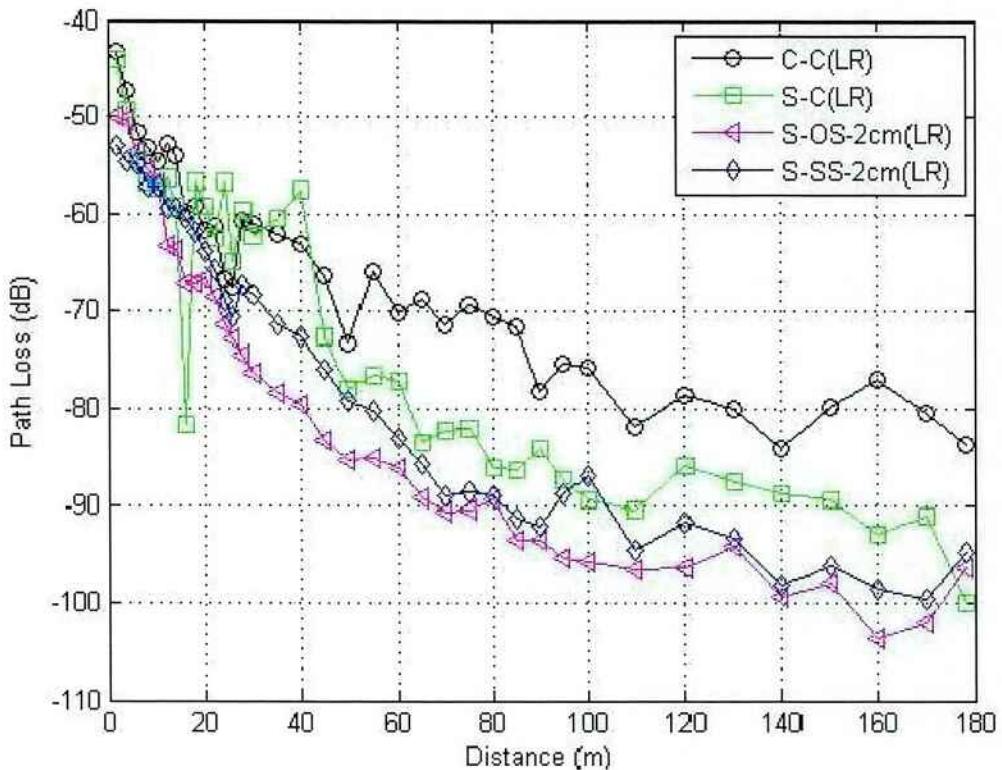


Figura 1.13: Comparação da performance a 2.4GHz em diferentes distâncias

Das medidas LR apresentadas na figura acima pode -se verificar que o valor de PL (“*path loss*”) aumenta mais rapidamente na região do principio do túnel e no fim. O valor de PL piora com antenas montadas na lateral, especificamente na ordem C-C, S-C, S-SS, S-OS. Em outras palavras, é necessário um uso maior de potência para transmitir com antenas montadas na lateral para se obter os mesmos resultados do caso C-C. Em termos da frequência de transmissão, a frequência de 868MHz tem um desempenho melhor que a de 2.45GHz devido ao menor comprimento de onda i.e., 12 cm comparado a 35 cm. A comparação entre as técnicas LR e HR para o cenário C-C e para as freqüências a 868MHz e 2.45GHz mostraram uma grande coerência. Como podem ser visto na tabela acima, os cenários S-SS e o S-OS<sub>C</sub> foram identificados para antenas no receptor com espaçamentos de 2cm e 11cm.

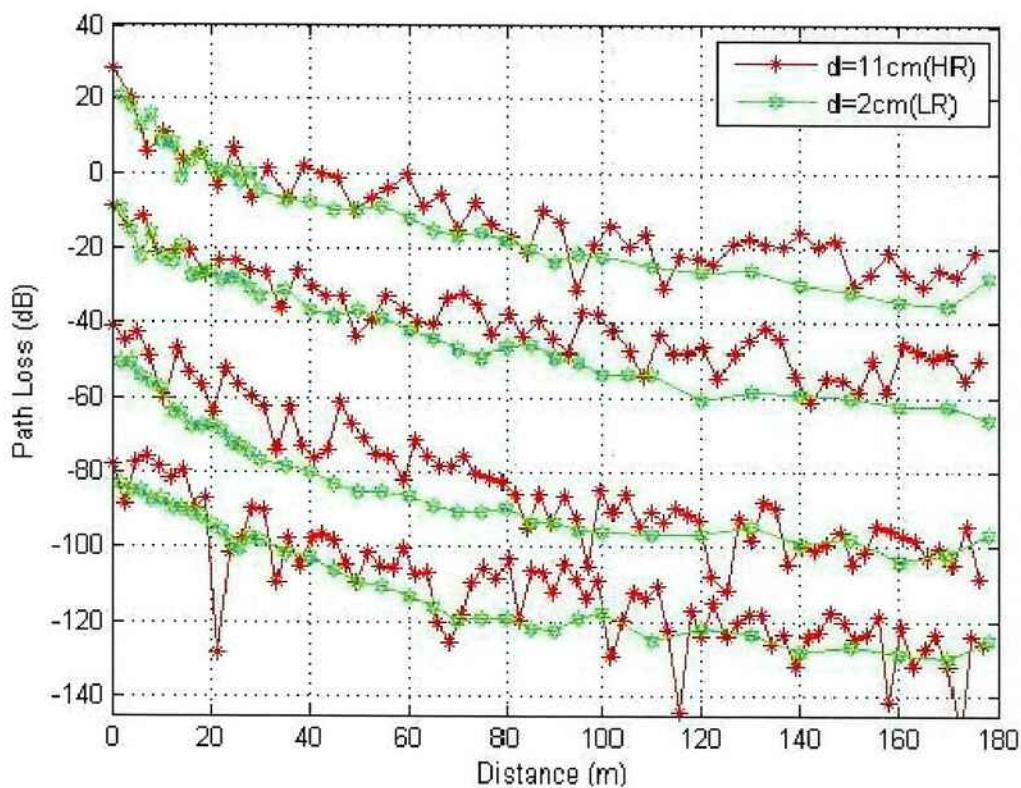


Figura 1.14: (S-OS-2cm) vs. (S-OS-11cm) a 868MHz; b. (S-SS-2cm) vs. (S-SS-11cm) a 868MHz; c. (SOS-2cm) vs. (S-OS-11cm) a 2.45GHz; d. (S-SS-2cm) vs. (SSS- 11cm) a 2.45GHz

Para as medidas mostradas acima, pode-se observar que em geral o espaçamento de 11cm nos dá melhores resultados comparados ao espaçamento de 2cm. Em outras palavras, o cenário da antena do receptor perto da parede, em geral, traz resultados piores. Note que, para ficar mais claro no gráfico, foram plotados apenas os valores de “*offset*” de +60dB, +30dB, 0dB e -30dB. Pode-se concluir portanto, que em um túnel de grande dimensões as perdas aumentam com antenas posicionadas nas laterais do túnel, e também aumentam com o aumento da frequência.

## 1.4 Aplicação na empresa Minteos

Na Europa as represas normalmente tem 3 tuneis (nao alagados), um na base, um no meio e outro no topo, ao longo desses tuneis que sao posicionados os sensores de inclinação que serao conectados aos trasmissores desenvolvidos nesse trabalho.

O objetivo principal da empresa MINTEOS é utilizar este projeto em túneis dentro de represas, para substituir o uso de cabos que sao mais custosos, de modo a transmitir os dados de inclinação e pressão coletados pelos sensores posicionados ao longo do túnel, usando a transmissão a 2.4GHz, frequência definida através dos estudos como sendo a mais apropriada. Deste modo será feita a monitoração do nível da água para prevenir e evitar acidentes. Os túneis da represa são estruturas elípticas com 1.7m no eixo maior e 1m no eixo menor.

A construção da represa é mostrada na figura a seguir:

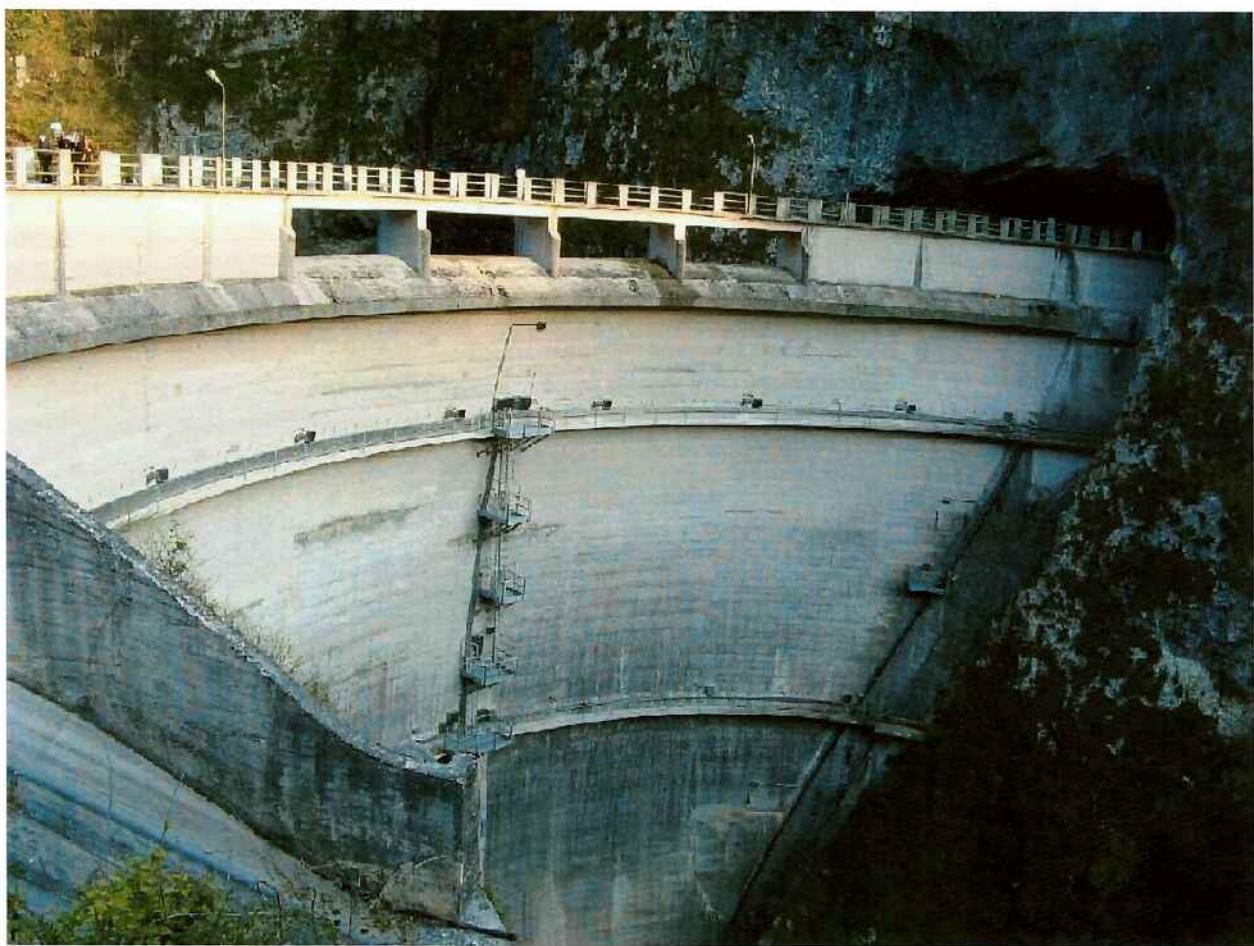


Figura 1.15: Exemplo de uma represa

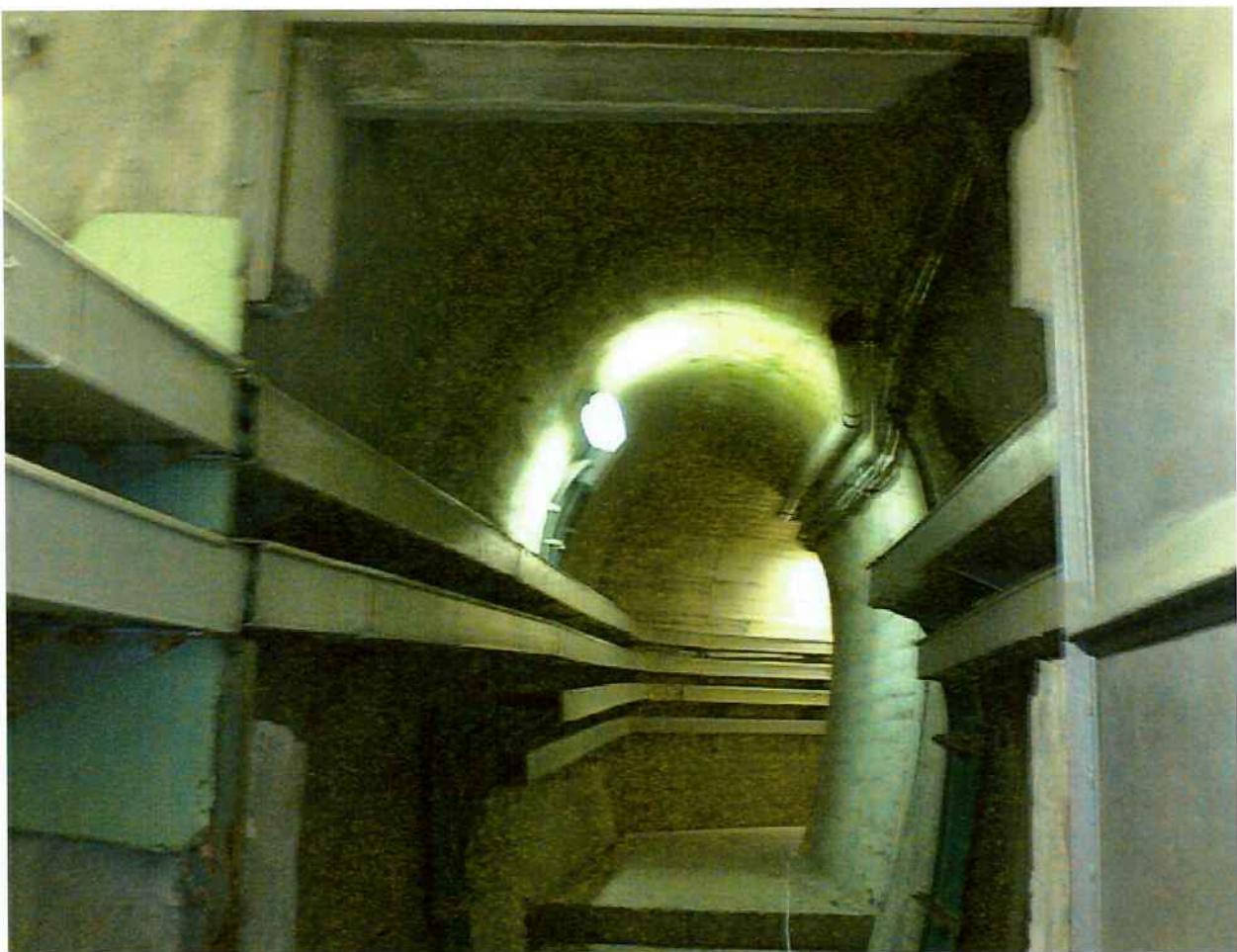


Figura 1.16: Túnel dentro da represa

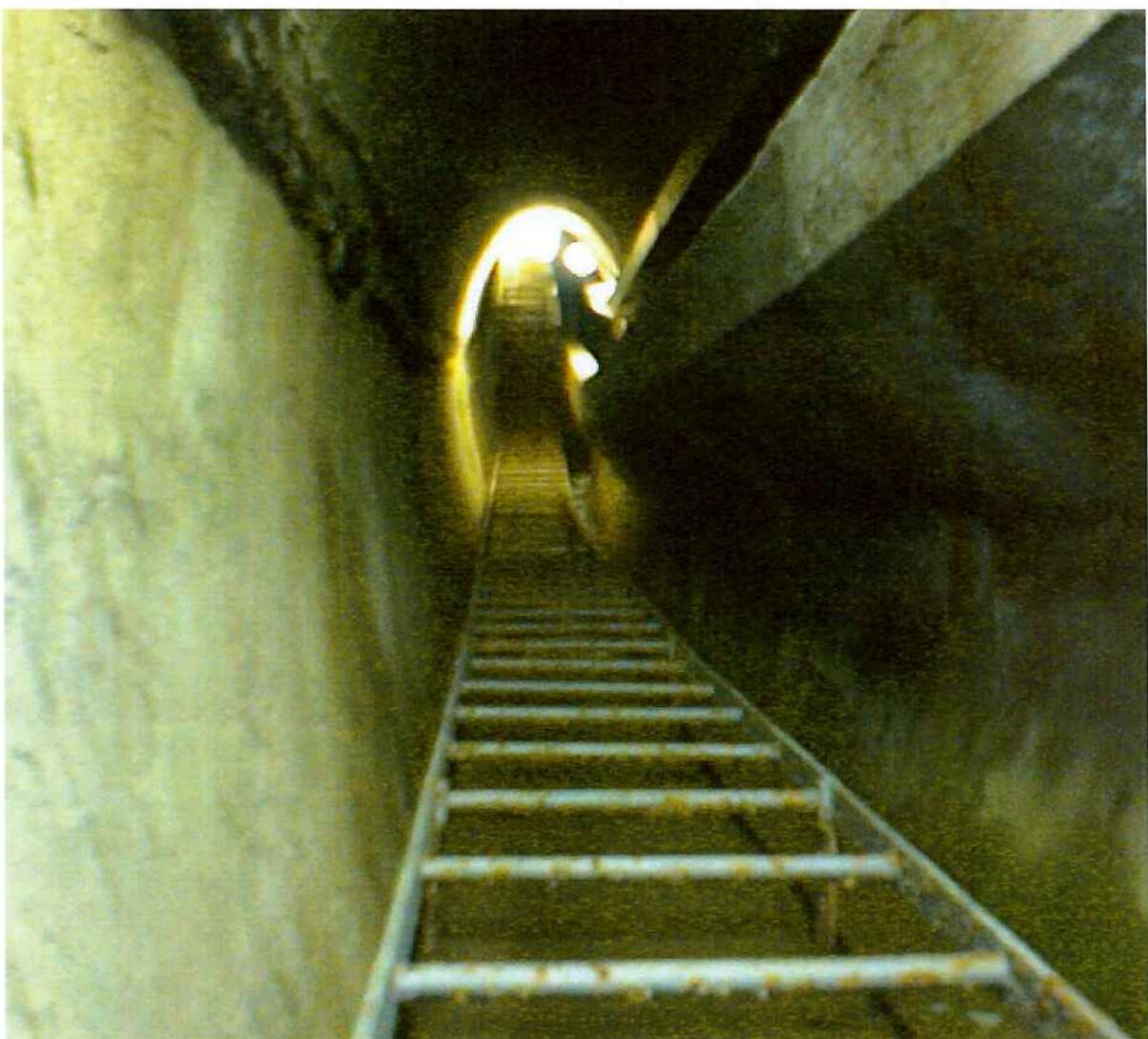


Figura 1.17: Túnel dentro da represa

## 2. Projeto

### 2.1 Definição do Módulo RF para o Túnel

Após decidir pelo uso da frequência de 2.4GHz para os túneis estreitos, o passo seguinte foi a escolha do modulo transmissor-receptor (“*transceiver*”). A decisão foi baseada em fatores determinantes como preço e características técnicas. Como a empresa Minteos emprega uma grande quantidade de sentinelas, termo usado para referir-se aos “*transceivers*” posicionados ao longo dos túneis, seu preço unitário torna-se fundamental para viabilizar um projeto adequado comercialmente. Portanto, o preço não poderia ser elevado e o limite foi estipulado em de 15€ para o módulo.

Com relação às características técnicas, a busca e escolha de módulos com as características de “*Frequency Hopping Spread Spectrum*” (FHSS), RSSI (the “*Received Signal Strength Indicator*”) e interface SPI(“*Serial Peripheral Interface*”) tornou-se essencial. O “*Frequency Hopping Spread Spectrum*” (FHSS) não apenas torna o sinal mais resistente à interferência, mas também possibilita o compartilhamento dessa banda com muitos tipos de transmissões convencionais com o mínimo de interferência, uma característica essencial para a banda 2.4GHz que já é muito congestionada. RSSI (the “*Received Signal Strength Indicator*”) calcula a potência do sinal recebido e por fim a interface SPI(“*Serial Peripheral Interface*”), para que o módulo possa conectar-se ao microcontrolador.

As tabelas abaixo mostram as opções pesquisadas:

Tabela 12: Opções de módulos

Brand	MeshNetics
Model	MNzb-900-BO
Frequency	868MHz
Output power (max)	11dBm
Range in line of sight	6km
Current consumption (Pon)	26mA
Current consumption (Poff)	6mA

Brand	Maxfor Technology Inc
Model	MTO-OME 1000
Frequency	2.4GHZ
Output power (max)	0dBm
Range in line of sight	150m
Current consumption (Pon)	8mA
Current consumption (Poff)	15uA

Brand	Jennic Ltd
Model	JN5148
Frequency	2.4GHz
Output power (max)	20dBm
Range in line of sight	4km
Current consumption (Pon)	110mA
Current consumption (Poff)	23mA

Brand	Freescale
Model	MC13191
Frequency	2.4GHz
Output power (max)	4dBm
Range in line of sight	400m
Current consumption (Pon)	15mA
Current consumption (Poff)	20uA

<b>Brand</b>	Quazar UK
<b>Model</b>	QFM-TRX2-24G
<b>Frequency</b>	2.4GHz
<b>Output power (max)</b>	1dBm
<b>Range in line of sight</b>	150m
<b>Current consumption (Pon)</b>	21.6mA
<b>Current consumption (Poff)</b>	1.4uA

O Módulo Receptor/Transmissor escolhido, por apresentar todas as características principais mencionadas acima ,foi o FM-TRX2-24G da Quasar-UK. Ele contém o chip RF CC2500 da Texas, que é um “*Low Power RF Transceiver*” [8].

- Complete RF Transceiver
- Low current consumption.
- Wide Operating voltage 1.8 – 3.6 Volts
- Easy integration to application.
- Efficient SPI interface
- Operating temperature : - 40°C ~ +85°C
- Onboard Data Encryption
- Automatic collision avoidance
- 'Wake on Radio' feature
- Operating Frequency: 2.4 – 2.483 GHz
- Programmable Output Power
- High Sensitivity
- Data rate 1.2 – 500 kbps



Figura 1.18: Quasar-UK 2.4GHZ Modulo[8]

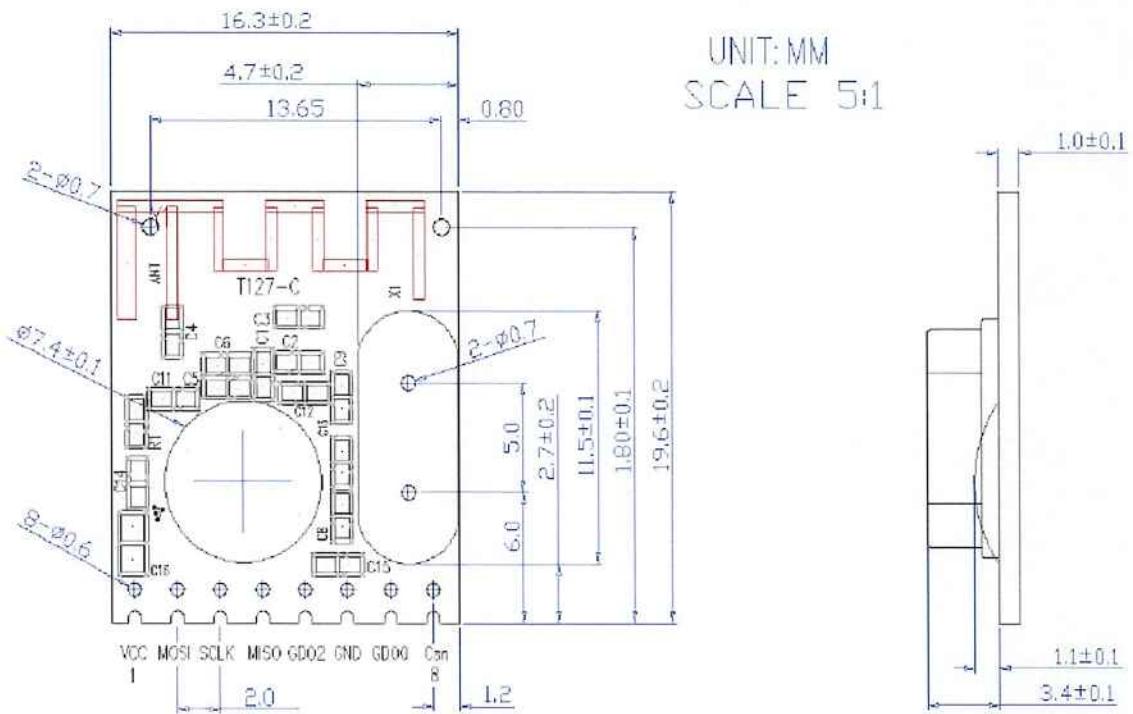


Figura 1.19: Quasar-UK 2.4GHZ Módulo[8]

## 2.2 Principais componentes do circuito

### 2.2.1 Esquemático do Gateway/Receptor

Este é o receptor de 433MHz, a ser conectado ao computador para permitir os testes sem interferência, que serão mostrados no item 3 deste trabalho.

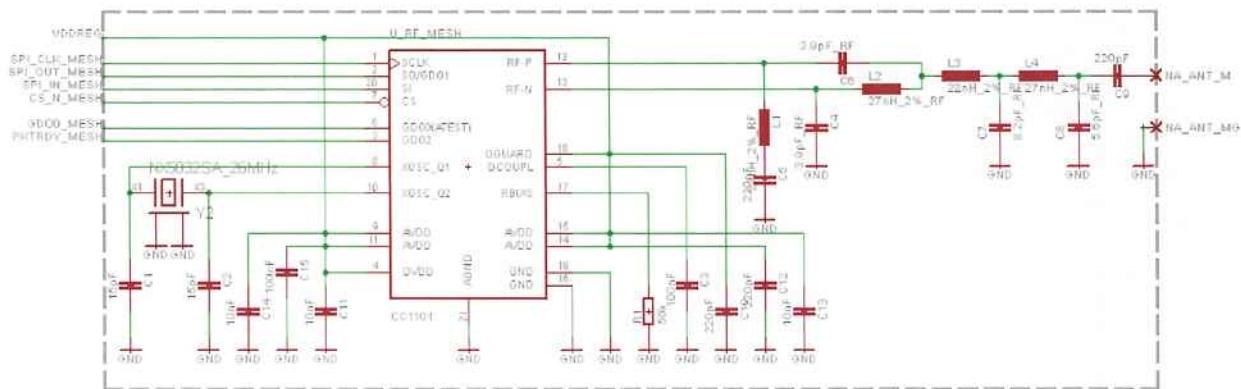


Figura 2.1 Gateway/Receiver

## 2.2.2 Características Técnicas do Módulo “Transceiver”

- True single chip 2.4 GHz RF transceiver
- Frequency range: 2400-2483.5 MHz
- High sensitivity (-101 dBm at 10 kbps, 1% packet error rate)
- Programmable data rate up to 500 kbps
- Low current consumption (13.3 mA in RX, 250 kbps, input 30 dB above sensitivity limit)
- Programmable output power up to 0 dBm
- Excellent receiver selectivity and blocking performance
- Very few external components:
- Completely on-chip frequency synthesizer, no external filters or RF switch needed
- Programmable baseband modem
- Ideal for multi-channel operation
- Configurable packet handling hardware
- Suitable for frequency hopping systems due to a fast settling frequency synthesizer
- Optional Forward Error Correction with interleaving
- Separate 64-byte RX and TX data FIFOs
- Efficient SPI interface: All registers can be programmed with one “burst” transfer
- Digital RSSI output

## 2.2.3 Demais componentes do circuito

### 2.2.3.1 Microcontrolador

A unidade microcontroladora usada para comandar o Módulo RF é o Microcontrolador ATtiny261 que possui as seguintes características [7]:

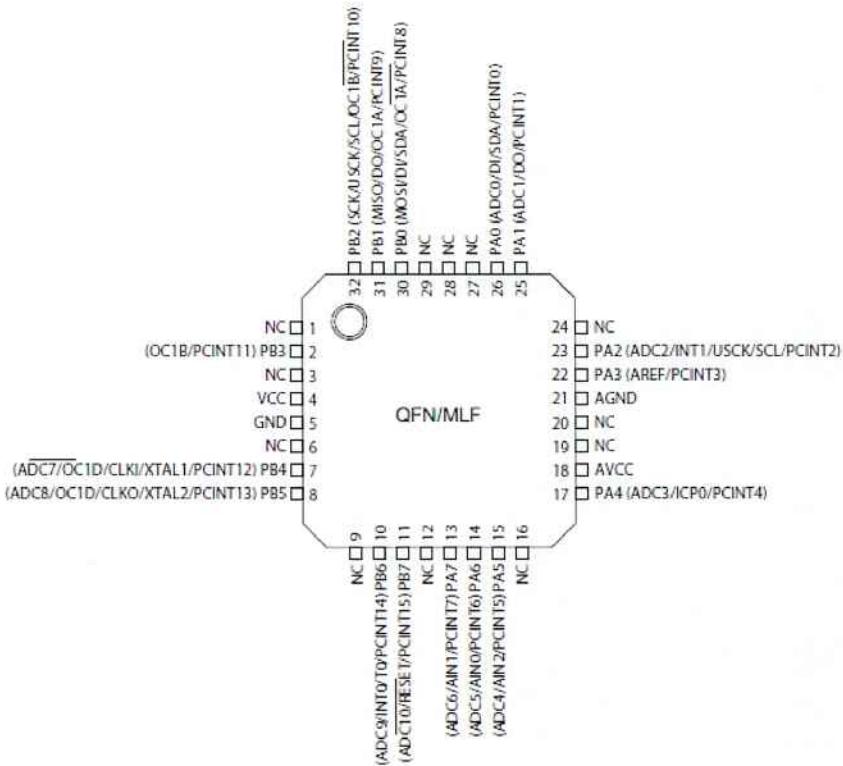


Figura 2.2: Microcontrolador ATtiny261

- High Performance, Low Power AVR® 8-Bit Microcontroller
- Advanced RISC Architecture
  - 123 Powerful Instructions – Most Single Clock Cycle Execution
  - 32 x 8 General Purpose Working Registers
  - Fully Static Operation
- Non-volatile Program and Data Memories

- 2/4/8K Byte of In-System Programmable Program Memory Flash
- Endurance: 10,000 Write/Erase Cycles
- 128/256/512 Bytes In-System Programmable EEPROM
- Endurance: 100,000 Write/Erase Cycles
- 128/256/512 Bytes Internal SRAM
- Data retention: 20 years at 85°C / 100 years at 25°C
- Programming Lock for Self-Programming Flash Program & EEPROM Data Security
- Peripheral Features
  - 8/16-bit Timer/Counter with Prescaler
  - 8/10-bit High Speed Timer/Counter with Separate Prescaler
  - 3 High Frequency PWM Outputs with Separate Output Compare Registers
  - Programmable Dead Time Generator
  - 10-bit ADC
    - 11 Single-Ended Channels
    - 16 Differential ADC Channel Pairs
    - 15 Differential ADC Channel Pairs with Programmable Gain (1x, 8x, 20x, 32x)
    - On-chip Analog Comparator
    - Programmable Watchdog Timer with Separate On-chip Oscillator
    - Universal Serial Interface with Start Condition Detector
  - Special Microcontroller Features
    - Debug WIRE On-chip Debug System
    - In-System Programmable via SPI Port
    - External and Internal Interrupt Sources
    - Low Power Idle, ADC Noise Reduction, Standby and Power-Down Modes
    - Enhanced Power-on Reset Circuit
    - Programmable Brown-out Detection Circuit
    - Internal Calibrated Oscillator
    - On-Chip Temperature Sensor
  - I/O and Packages
    - 16 Programmable I/O Lines
    - Available in 20-pin PDIP, 20-pin SOIC and 32-pad MLF
  - Operating Voltage:
    - 1.8 – 5.5V for ATtiny261V/461V/861V
    - 2.7 – 5.5V for ATtiny261/461/861
  - Speed Grade:
    - ATtiny261V/461V/861V: 0 – 4 MHz @ 1.8 – 5.5V, 0 – 10 MHz @ 2.7 – 5.5V
    - ATtiny261/461/861: 0 – 10 MHz @ 2.7 – 5.5V, 0 – 20 MHz @ 4.5 – 5.5V
  - Industrial Temperature Range
  - Low Power Consumption
    - Active Mode (1 MHz System Clock): 300 µA @ 1.8V
    - Power-Down Mode: 0.1µA at 1.8V

### 2.2.3.2 Programador



**AVR AVRISP mkII**

Figura 2.3 – AVR AVRISP kII

O AVR® In-System Programmer mkII combinado com o AVR Studio® pode programar os novos microcontroladores AVR 8-bit RISC com interface SPI, como o que foi usado neste projeto.

### 2.2.3.3 Antenas

A escolha da antena demandou um estudo para a verificação das características procuradas para essa aplicação. As melhores antenas que tinham as características necessárias foram:

Table 13: Opções de antenas

Frequenze	Aplicazione	Antenna uTX	Antenne GW
2.4GHz	Tunnels	Patch/yagi	Straight /Helicoidal Assail Mode
868MHz High power	Ponte Radio	Patch/yagi and dipole lambda/2	Patch/yagi and dipole lambda/2
868MHz Low power	Forest/Indoor	Helicoidally normal mode	Dipole lambda/2
433MHz	Forest	Helicoidally normal mode	Dipole lambda/2

Uma antena muito diretiva é a ideal para túneis, tanto para o TX (transmissor) como para o RX (receptor). Entretanto, como o TX precisa ser posicionado dentro do túnel, sua dimensão não pode ser grande e os cálculos abaixo demonstram que, uma antena “*Helicoidally Assail Mode*” teria dimensões muito grandes.

Frequency	2400	Hertz * $10^6$
Turns	3	turns (at least 3)
C/ $\Lambda$	1	Circumference/Wavelength (0.75 - 1.33)
D/ $\Lambda$	1	Reflector Diameter/Wavelength (0.8 - 1.1)
S/ $\Lambda$	0.25	Turn Pitch/Wavelength (0.2126 - 0.2867)

**Wavelength ( $\Lambda$ )**: 124.917 mm

**Winding Diameter**: 39.762 mm

**Winding Circumference**: 124.917 mm

**Winding Spacing**: 31.229 mm

**Winding Length**: 386.283 mm

**Reflector Diameter**: 124.917 mm

**Boom Length**: 93.687 mm

**Gain**: 8.923 dBic

**Half-Power Beamwidth**: 60.044 deg

Não existe uma antena pequena de alto ganho e diretiva para a frequência de 2.4GHz, e não seria viável integrar uma antena de dimensão grande ao Transmissor TX. Essas restrições trouxeram a necessidade de um novo estudo baseado em outros tipos de antenas mostradas na tabela abaixo:

Tabela 14: Opções de antenas para o TX

2.4GHz/uTX			
Brand	Nearson Inc	Nearson Inc	Embedded Antenna
Antenna	S181XX-2450	S151XX-2450S	FBKR35068-RS-KR
Gain	2dB	5dB	2 dB
Match	yes (50 ohm)	yes (50 ohm)	yes (50 ohm)
Cost	12 €	9.60 €	5.5 \$
Dimensions	5 cm	8 cm	14 cm

A antena escolhida para o TX foi a antena “RUBBR DUCK 2.4GHz” da “Nearson Inc”. Ela não é muito diretiva, no entanto tem um bom ganho, baixo custo e um tamanho apropriado para esse projeto.

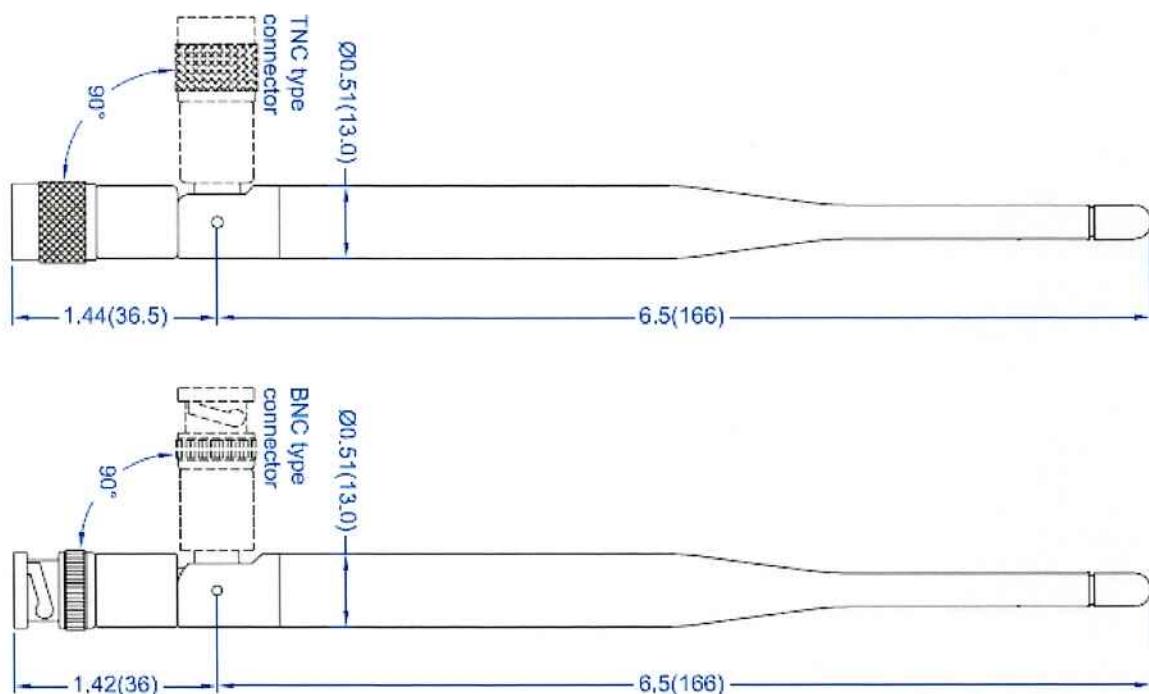
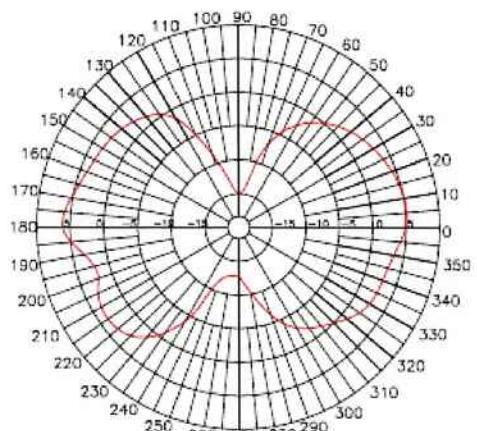


Figura 2.4 Esquemático da antena

E-Plane Pattern @ 2.45GHz



H-Plane Pattern @ 2.45GHz

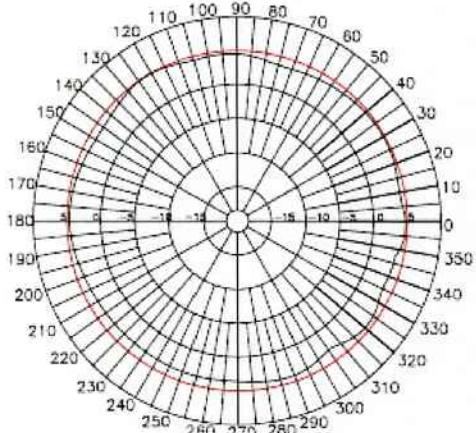


Figura 2.5 “Radiation Pattern” da antena RX

Para o Receptor (RX), o tamanho da antena não é um problema, uma vez que é posicionada fora do túnel. Este fato possibilitou uma pesquisa considerando apenas o custo e as características técnicas necessárias, cujo resultado encontra-se na tabela abaixo:

Tabela 15: Opções de antenas para RX

2.4GHz/GW	ARC wireless solutions	Antenna Factor	Aurel	Solwise
Brand	ARC wireless solutions			
Antenna	Panel antenna	yagi	Panel antenna	yagi
Gain	16dB	9.5dB	10 dB	16 dB
Match	si (50 ohm)	si (50 ohm)	si (50 ohm)	si (50 ohm)
Cost	29 dollari	69 dollari	35 dollari	31 £
dimension	26 cm x 26 cm x 12 cm		18cm x 13 cm x 4 cm	62cm

As duas opções com alto ganho e baixo custo são as antenas da “ARC Wireless” e “Solwise”. Considerando-se que, os produtos da ARC devem ser importados dos EUA, o que aumenta os custos de entrega, a melhor opção para o projeto em termos de custo total resultou no produto da “Solwise UK” proveniente da Inglaterra, a antena denominada NET-WL-ANT15YN”, que é uma antena “yagi” muito diretiva, descrita logo abaixo:



NET-WL-ANT15YN

Figura 2.6: Foto da antena RX

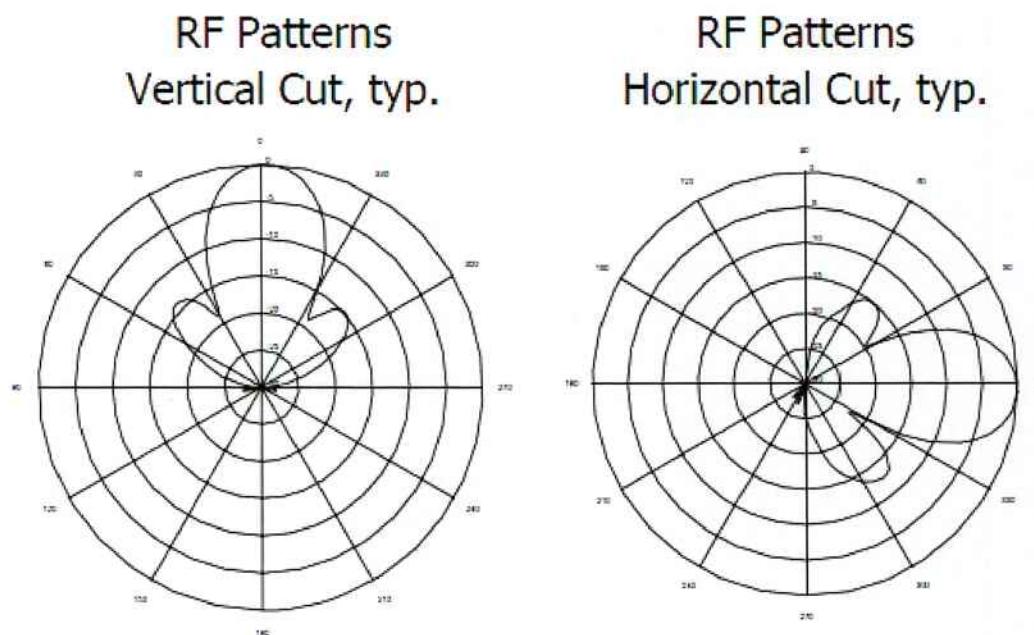


Figura 2.7: Antena RX Padrão de Radiação

Tabela 16: Antena RX - características

ANT14YN Specifications	
Electrical Specification:	
Frequency range	2400-2500 MHz
VSWR	<1.5
Input Impedance	50 Ohms
Gain	14dBi
Front to back ratio	approx 16dB
Polarization	Horizontal or Vertical
Beamwidth (3dB)	30°
Max power	100W
Lightning Protection	DC Ground
Connector Type	N Female
Antenna Mount	U-bolt mount included
Mechanical Specification:	
Element	14
Length	620mm
Weight	450g
Rated Wind Velocity	210Km/h
Diameter of the installation pole	30-50mm

## 2.2.3.4 Fotos do Projeto

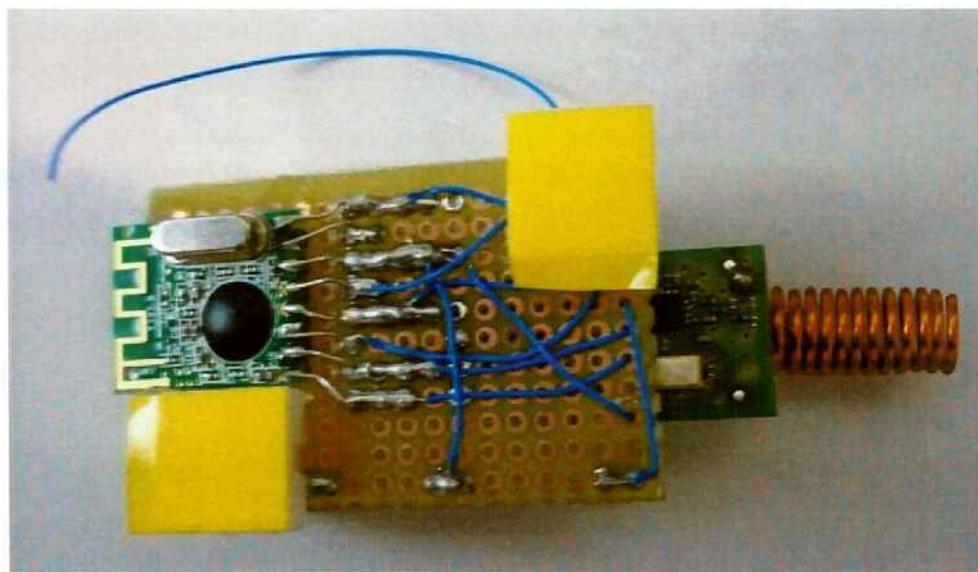


Figura 2.8: Transceiver 2.4 GHz e transmissor a 433MHz



Figura 2.9: Transceiver 2.4 GHz e transmissor a 433MHz ao lado



Figura 2.10: Transceiver 2.4 GHz e transmissor a 433MHz com a embalagem



Figura 2.11 Módulo montado com a antena RUBBR DUCK

## 2.2.4 “Firmware” do Microcontrolador

Um dos desafios mais importante deste projeto foi o desenvolvimento do “firmware” do Microcontrolador. O “firmware” foi desenvolvido especialmente para essa projeto em linguagem C e pode ser considerado o cérebro do módulo. Com um total de 50 páginas, uma amostragem do “firmware” está ilustrada no item 5 do anexo.

## 3. Testes em Laboratório na Itália

Os testes foram realizados com o objetivo de medir os valores RSSI (the “Received Signal Strength Indicator”) que calcula a potência do sinal recebido para a o modulo de 2.4GHz em condições diferentes. Para impedir a interferência do computador, todo o teste foi realizado utilizando uma “ponte” para receber o valor RSSI calculado na transmissão a 2.4GHz e transmitir este resultado através da frequência a 433MHz para o receptor em 433MHz conectado ao computador. Desta maneira não existe interferência do computador na transmissão a 2.4GHz, tornando as medidas confiáveis.

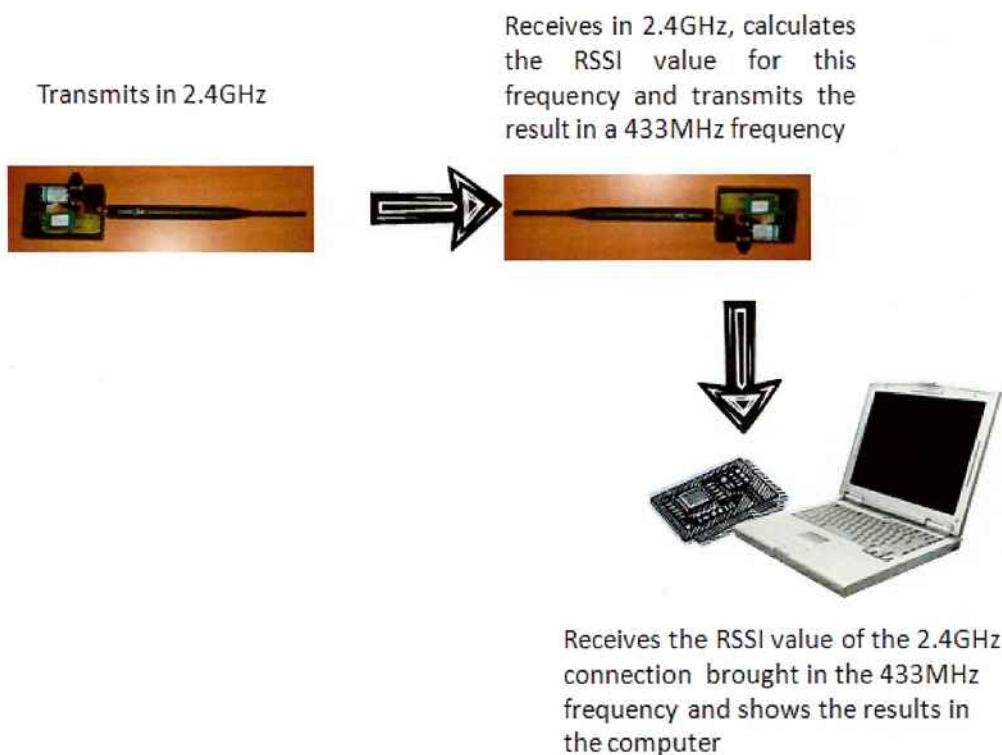


Figura 3.1 Esquemático do projeto final

Os primeiros testes foram efetuados no laboratório da empresa, em uma sala com obstáculos, tais como cadeiras no percurso entre o Transmissor TX e o Receptor RX, distantes 15m. Neste teste, o transmissor possuía um antena “RUBBR DUCK” acoplada e o receptor a antena PCB do módulo. O teste foi feito para averiguar o funcionamento do “firmware” e a eficácia da antena. O resultado encontra-se mostrado abaixo:

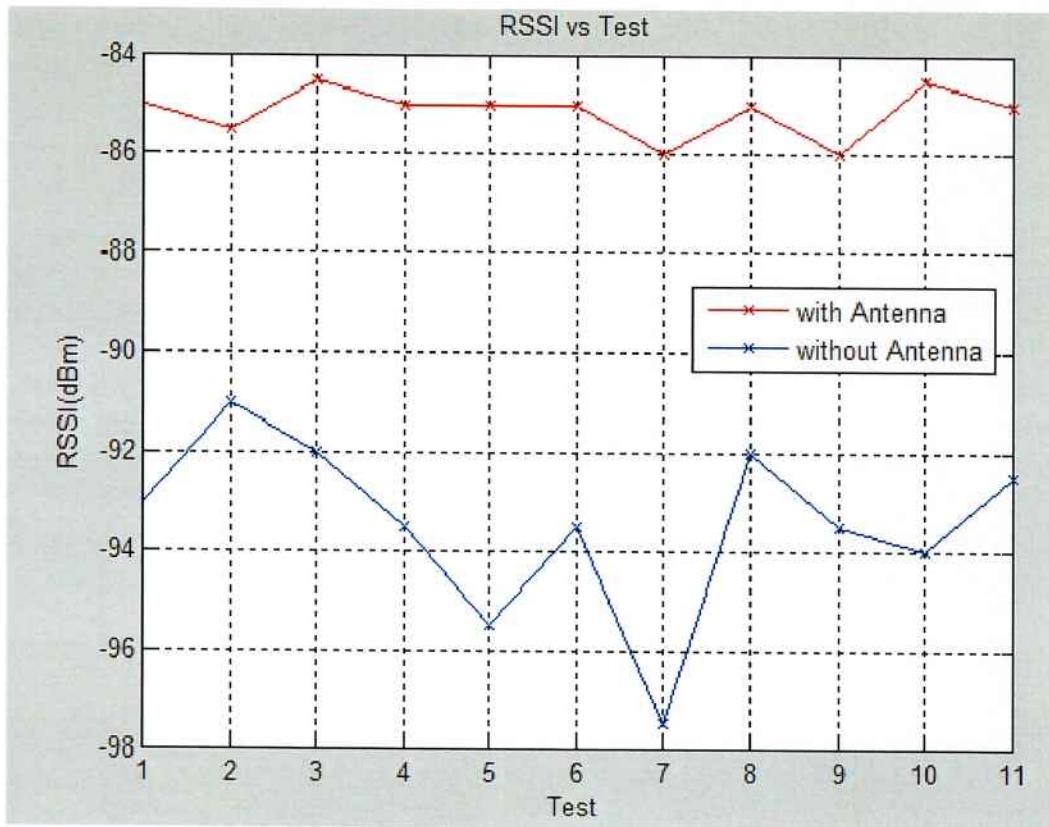


Figura 3.2 Linha vermelha(superior) com antena, linha azul (inferior) sem antena

Os resultados confirmam que o ganho nominal da antena foi adicionado à potencia do sinal recebido e que o protótipo esta pronto para estudos em campo.

## 4. Testes no Brasil

No Brasil os testes foram feitos com a seguinte antena de características geométricas nos corredores da POLI-ELETTRICA :

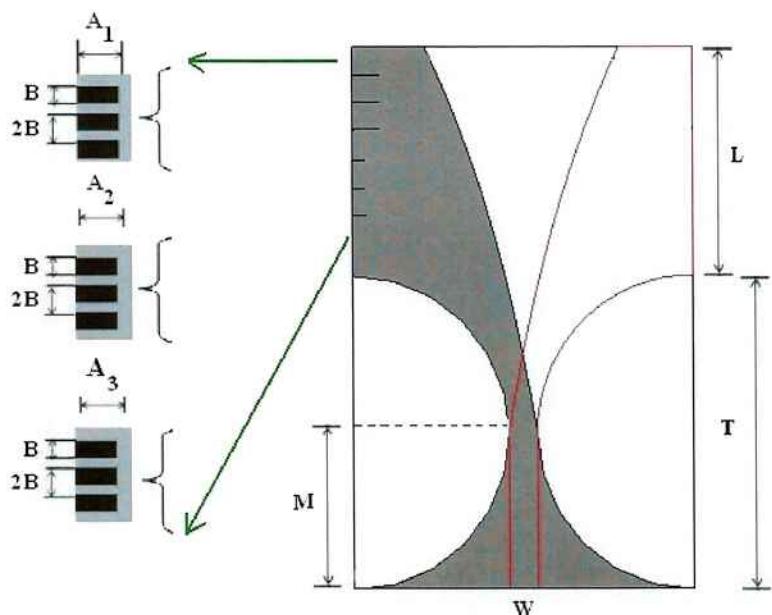


Figura 3.3 Geometria proposta da antena Antipodal Vivaldi UWB

$$L = 10 \text{ mm}, M = 7.5 \text{ mm}, T = 15 \text{ mm}, W = 2 \text{ mm} \text{ e } B = 1 \text{ mm} .$$

B = Largura da abertura

L = Largura do plano de irradiação

W = Largura da linha de transmissão microstrip

M = Comprimento da de transmissão microstrip

**T** = Eixo maior da Elipse.

A estrutura tem as seguintes dimensões:

Comprimento : 250 mm

Largura : 134 mm

Espessura : 0.75 mm

o substrato escolhido para a fabricação da antena foi o R03003.



Figura 3.4 Testes efetuados nos corredores da POLI-ELÉTRICA

As medidas do valor RSSI foram feitas variando-se a distância entre emissor (TX) e receptor (RX) de 1 até 10 metros nas situações:

-frente a frente sem obstáculos

- frente a frente com obstáculos

Com os resultados obtidos obteve-se o seguintes graficos:

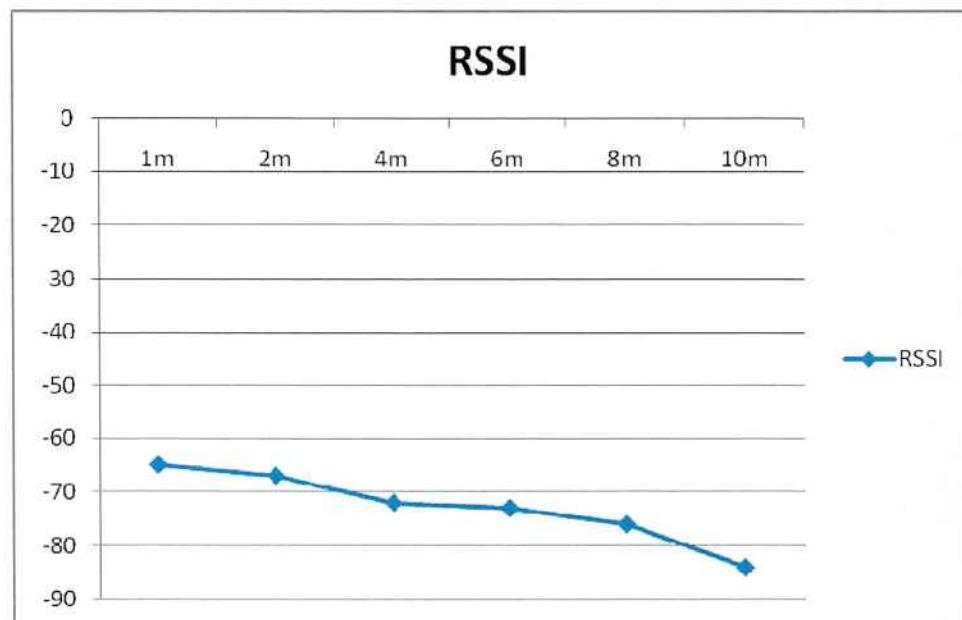


Figura 3.5: Medida sinal RSSI com antenas frente a frente e sem obstáculos

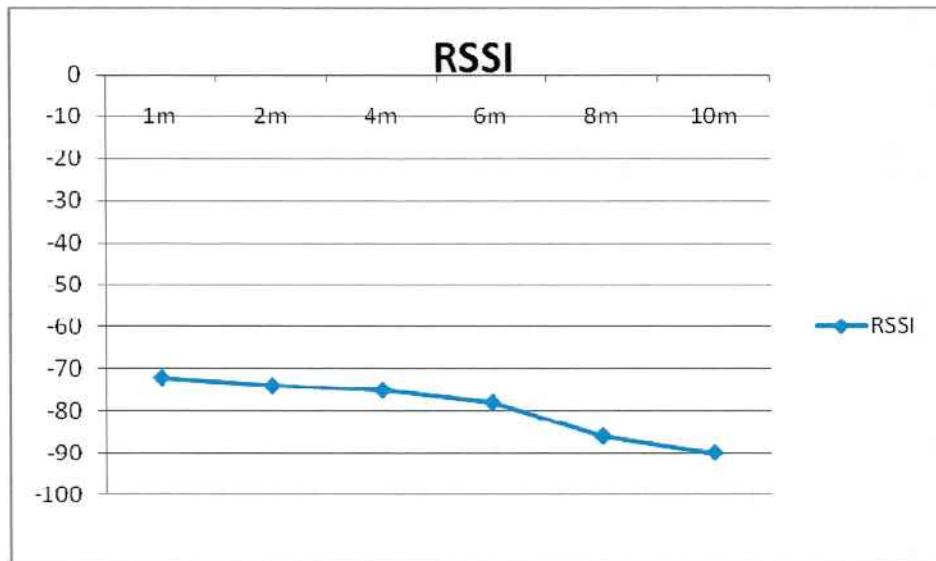


Figura3.6 : Medida sinal RSSI com antenas frente a frente e com obstáculos

Verifica-se portanto que a antena feita nos laboratorios do LSI tem um ganho maior que as medidas na Italia, isso deve-se à diferença consideravel de tamanho entre as duas antenas. E' possivel notar também a consideravel queda do sinal RSSI com o posicionamento de um obstaculo entre o TX e RX.

## 5. Conclusão

Esta conclusão fornece uma visão geral do escopo do trabalho. Primeiramente o objetivo foi a pesquisa e o desenvolvimento de um estudo sobre os modelos de perda de transmissão sem fio em três ambientes importantes para a empresa Minteos: túneis, florestas, e ambientes fechados, levando-se em conta as bandas de frequências livres na Europa. Em seguida, a aplicação em pequenos túneis foi escolhida como o objetivo para desenvolver uma solução de transmissão sem fio confiável, de custo adequado para este ambiente.

O projeto foi desenvolvido baseado nas premissas de relação custo benefício e especificações técnicas avaliadas durante a fase de pesquisa e estudos, e foi construído com componentes avaliados e selecionados para o cumprimento das mesmas. O projeto constituiu-se fundamentalmente de: módulo RF 2.4GHz da Quasar-UK, “firmware” desenvolvido para o modulo RF na linguagem C e as antenas, transmissora RUBBR DUCK 2.4GHz e receptora NET-WL-ANT15YN. Os resultados finais foram confirmados pelos testes no laboratório e evidenciaram que o projeto está pronto para os testes em campo.

Além do resultado técnico, a oportunidade de melhorar e aplicar meus conhecimentos aprendidos em sala aula, somados ao estudo para a programação do “firmware”, foram muito importantes para o desenvolvimento de minhas habilidades e o trabalho me proporcionou experiência em uma empresa, onde o cliente é prioridade e o custo e o prazo são fundamentais para qualquer projeto.

# 6 Apêndice

## 6.1 Amostragem do “firmware” desenvolvido

Main:

```
#include <inttypes.h>
#include "utx.h"
#include <avr/sleep.h>
#include "wi_utx_cc.h"
#include "wi_utx.h"

/***
 * Return the sensor ID.
 *
 * @return sensor ID
 */
uint16_t
utx_sensor_id_get(void)
{
    return (12 << 8) | 34;
}

/***
 * Return the data to be sent out periodically. The data should
 * be encoded on the lowest 11 bits of the return value (i.e.,

```

```

* they should fit the 0x7F mask).

*
* @return          encoded data
*/
uint16_t
utx_hb_contents_get(void)
{
    uint16_t data = 0;
    data = 0x0321;      /* Sample value */
    return data;
}

int
main(void)
{
    /* uTX library initialization */
    utx_init(UTX_WSN_TYPE_DEVEL);

    DDRA |= _BV(PINA0);
    PORTA |= _BV(PINA0);
    /* initialization cc2.4 Ghz */
    wi_utx_spi_master_init();
    wi_utx_cc_init();
    wi_utx_cc_power_up();
    utx_timer_init();
}

```

```

#if MODE_UTX_RX

/* Re-set the device FIFO and the radio state */
wi_utx_cc_strobe(WI_UTX_CC_SFRX);
wi_utx_cc_strobe(WI_UTX_CC_SRX);

#endif

while (1) {

    utx_flags &= ~UTX_1S_TICK_FLAG;           /* Reset the flag we will be waiting for */
    do {
        set_sleep_mode(SLEEP_MODE_PWR_DOWN);   /* Set sleep type to power down */
        sleep_mode();                         /* Start the sleep */

        utx_watch_dog_reset();                /* Reset the WDT after wake up */
    } while ((utx_flags & UTX_1S_TICK_FLAG) == 0); /* Wait for the proper flag */

    utx_tx_message_set((wi_utx_cc_field_fifo_rx[1] << 8) | wi_utx_cc_field_fifo_rx[0]);
}

#endif

```

```

{
    uint8_t i = 0;

    for (i = 0; i < 4; i++)
        wi_utx_cc_write_byte_at_addr(1, WI_UTX_CC_FIFO);

    }

/* ...and send it */

wi_utx_cc_strobe(WI_UTX_CC_STX);

/* Wait for FIFO underflow (i.e., message sent) */

while ((wi_utx_cc_status_read() & 0x70) != 0x00) ;

utx_watch_dog_reset();      /* We're still alive */

/* Reset the TX FIFO */

wi_utx_cc_strobe(WI_UTX_CC_SFTX);

#endif

}

return 0;
}

```

UTX

```

/*
 * Type definitions

```

```
*/
```

```
typedef struct wi_utx_cc_setup_s {  
    uint8_t address;  
    uint8_t value;  
} wi_utx_cc_setup_t;  
  
volatile uint8_t wi_utx_cc_field_fifo_rx[4];/* Received field message */  
  
/* CC setup */  
  
#define WI_UTX_CC_SETUP_VALUES 31 /* How many values we have to set */  
  
static const wi_utx_cc_setup_t wi_utx_cc_setup_values[WI_UTX_CC_SETUP_VALUES] = {  
    /* High Z GDO0 */  
    { WI_UTX_CC_IOCFG0, 46 },  
    /* RF output power */  
    { WI_UTX_CC_PATABLE, 0xFE },  
    /* RF frequency */  
    { WI_UTX_CC_FREQ2, 0x5D }, /*set the frequency at 2438MHz*/  
    { WI_UTX_CC_FREQ1, 0x93 }, /**/  
    { WI_UTX_CC_FREQ0, 0xB1 },  
    /* Data rate */  
    { WI_UTX_CC_MDMCFG4, 0x86 },  
    { WI_UTX_CC_MDMCFG3, 0x83 },
```

```
{ WI_UTX_CC_MDMCFG2,0x00 },  
{ WI_UTX_CC_MDMCFG1,0x22 },  
{ WI_UTX_CC_MDMCFG0,0xF8 },  
{ WI_UTX_CC_CHANNR,0x00 },  
{ WI_UTX_CC_DEVIATN,0x44 },  
{ WI_UTX_CC_FREND0,0x10 },  
{ WI_UTX_CC_FREND1,0x56 },  
{ WI_UTX_CC_MCSM0, 0x18 },  
{ WI_UTX_CC_FOCCFG,0x16 },  
{ WI_UTX_CC_BSCFG,0x6c },  
{ WI_UTX_CC_AGCTRL2,0x03 },  
{ WI_UTX_CC_AGCTRL1,0x40 },  
{ WI_UTX_CC_AGCTRL0,0x91 },  
{ WI_UTX_CC_FSCAL3, 0xA9 },  
{ WI_UTX_CC_FSCAL2, 0x0A },  
{ WI_UTX_CC_FSCAL1, 0x00 },  
{ WI_UTX_CC_FSCAL0, 0x11 },  
/* Frequency synthesizer calibration control */  
{ WI_UTX_CC_FSTEST, 0x59 },  
/* Various test settings */  
{ WI_UTX_CC_TEST2, 0x88 },  
{ WI_UTX_CC_TEST1, 0x31 },  
{ WI_UTX_CC_TEST0, 0x0B },  
/* Set packet format */
```

```

{ WI_UTX_CC_PKTCTRL0,0x12 },
{ WI_UTX_CC_IOCFG0,0x0C },
{ WI_UTX_CC_IOCFG2,0x0B },

};

/*
 * Local function prototypes
 */

static uint8_t wi_utx_spi_master_transfer(uint8_t byte_w);

static inline void wi_utx_cc_deselect(void);

static inline void wi_utx_cc_select(void);

static void wi_utx_cc_spi_off(void);

static void wi_utx_cc_spi_on(void);

static uint8_t wi_utx_cc_read_byte_from_addr(uint8_t addr);

static void wi_utx_cc_power_down(void);

static void wi_utx_cc_reset(void);

static void wi_utx_cc_setup(void);

#if MODE_UTX_RX

static void cc_field_packet_retrieve(void);

static void wi_utx_cc_burst_read_from_addr(uint8_t addr, uint8_t n, uint8_t *vect);

#endif

```

```
/**  
 * Initialize the SPI port as master  
 */  
  
void  
wi_utx_spi_master_init(void)  
{  
    /* Set SSn, MOSI, and SCK as outputs */  
    WI_UTX_HAL_DDRSPI |= _BV(WI_UTX_HAL_SSn);  
    WI_UTX_HAL_DDRSPI |= _BV(WI_UTX_HAL_MOSI);  
    WI_UTX_HAL_DDRSPI |= _BV(WI_UTX_HAL_SCK);  
    /* Set MISO as input */  
    WI_UTX_HAL_DDRSPI &= ~_BV(WI_UTX_HAL_MISO);  
}
```

```
/**  
 * Transmit the given data as master and receive slave data  
 * on the SPI port  
 *  
 * @param byte      byte to write to SPI  
 *  
 * @return         byte read from SPI  
 */
```

```
-----//-----  
/* CC SPI communication header */  
  
#define WI_UTX_CC_HDR_RW_W          0  
#define WI_UTX_CC_HDR_RW_R          1  
#define WI_UTX_CC_HDR_HEAD_RW       7  
#define WI_UTX_CC_HDR_BURST_OFF     0  
#define WI_UTX_CC_HDR_BURST_ON      1  
#define WI_UTX_CC_HDR_BURST        6  
#define WI_UTX_CC_HDR_ADDRMASK      0x3F
```

## 6.2 Referências

- [1] I.Z KOVACS P.C.F EGGERS,K. OLESEN, **Radio Channel Characteristics for Forest Environment in the VHF and UHF Frequency Bands**, Aalborg University
- [2] DIENESH TUMMALA, B.S., **Indoor Propagation Modeling at 2.4GHz for IEEE 802.11 Networks**
- [3] ERIK KJELDSEN, MARSHALL HOPKINS, **An Experimental Look at RF Propagation in Narrow Tunnels**, Scientific Research Corporation (SRC) Atlanta, Georgia
- [4] MENG Y.H LEE, **Study of Propagation Loss Loss Prediction in Forest Environment**, Ng School of Electrical and Electronic Engineering Nanyang Technological University 50 Nanyang Avenue, 639798, Singapore
- [5] PAOLO SANTI, **Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks**, Instituto di Informatica e Telematica del CNR, Italy.
- [6] European Radio communications Committee (ERC) within the European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT)
- [7] CC2500 Texas instruments datasheet
- [8] 2.4GHz RADIO TRANSCEIVER MODULE – Quasar uk datasheet