

## Sistemas de Transmissão/Recepção sem Fios por Raios Infravermelhos

Rui S. R. Almeida<sup>(1)</sup>, José L. J. F. Santo, Rui L. Aguiar, António M. R. Tavares

<sup>1</sup>PT Inovação, S.A.

**Resumo** - Este artigo apresenta resultados da caracterização, optimização e teste, de dois sistemas de comunicação sem fios por raios infravermelhos. Apesar de se basearem na mesma tecnologia, os sistemas analisados, encontram-se orientados para diferentes aplicações.

Numa primeira parte deste artigo é apresentado um sistema de comunicação local, cujo receptor óptico utiliza técnicas de diversidade angular. Este receptor óptico foi desenvolvido no âmbito do projecto IRWLAN<sup>1</sup>. São apresentados resultados de alguns testes ao desempenho deste receptor, incluindo a medição da RSR, taxa de erros, alcance e sensibilidade ao ruído provocado pela luz ambiente.

Numa segunda parte deste artigo, é descrito um “setup” de teste e medições para a caracterização de um sistema de transmissão ponto-a-ponto em linha de vista, e para a análise do canal de transmissão óptico, neste caso.

**Abstract** - This paper describes the results obtained in the characterisation, optimisation and test, of two wireless infrared communication systems. Although both systems are based on the same technology they are used on different applications.

On the first part of this paper an wireless optical indoor communication system, that uses angle diversity techniques on the reception is presented. This optical receiver was developed in the IRWLAN project. Some practical results of this receiver, such as SNR measurements, BER, range and sensitivity to ambient light noise are presented.

On the second part of this paper, a test and measurement setup for the characterisation of a line-of-sight, point-to-point, outdoor optical system and its transmission channel are presented.

### I. INTRODUÇÃO

O rápido desenvolvimento dos dispositivos electrónicos veio permitir uma grande redução nos níveis de consumo energéticos, dimensões físicas e peso, dos sistemas computacionais e de comunicação. Os computadores portáteis e os dispositivos de comunicação móveis são uma consequência directa desta evolução. Associados a

estes, surge também a noção de mobilidade dos utilizadores, bem como, de flexibilidade de instalação e reconfiguração das redes de comunicação que os interligam.

Para satisfazer esta necessidade crescente de mobilidade dos utilizadores, as redes de comunicação sofreram uma mutação, o que levou ao aparecimento do conceito de “Redes de Área Local Sem Fios” (WLAN).

Actualmente as duas tecnologias mais utilizadas em redes de área local sem fios são a rádio frequência e os infravermelhos. Apesar de distintas, estas duas tecnologias possuem potencialidades semelhantes.

Nos últimos anos foi possível assistir a um conjunto significativo de desenvolvimentos na área dos infravermelhos, tais como por exemplo: o estabelecimento de redes locais com múltiplas estações base; taxas de transmissão adaptativas; utilização de técnicas de diversidade angular na recepção do sinal; velocidades de transmissão superiores a 10Mbps; utilização de tecnologias mistas que envolvem rádio frequência e infravermelhos; aparecimento de tecnologias híbridas de cabo e sem fios; caracterização do canal de transmissão óptico e do ruído ambiente; novos transdutores optoelectrónicos; e protocolos para redes de transmissão sem fios, mais eficientes [3,5,10,12,13,15,16,17].

Estes desenvolvimentos, aliados ao elevado custo das ligações comerciais, às restrições de espectro de frequências, coexistência de sistemas e a confidencialidade, inerentes à tecnologia de rádio frequência, revestiram de interesse a utilização da tecnologia óptica sem fios, tanto para sistemas de transmissão em ambientes interiores, como para sistemas de transmissão exteriores, ponto-a-ponto e em linha de vista.

### II. DIVERSIDADE NA RECEPÇÃO

A transmissão de sinal por infravermelhos em espaço livre, ao nível da camada física, é baseada na modulação de intensidade e na detecção directa, tal como na transmissão de sinal por fibra óptica [15,16]. A modulação da intensidade é obtida variando a corrente de polarização de um LED ou de um díodo LASER. Quanto à detecção directa, esta é efectuada por um fotodíodo PIN

<sup>1</sup> Projecto IRWLAN – *Advanced Technologies for Infrared Wireless LANs* - Projecto PRAXIS 2/2.1/TIT/1578/95.

ou APD, os quais produzem uma corrente eléctrica proporcional à potência óptica incidente.

Nos primeiros sistemas difusos de comunicação por infravermelhos, os receptores eram baseados num único colector óptico com campo de vista alargado. Esta configuração do receptor não privilegia nenhum ângulo de observação em particular, sendo mais apropriada para ambientes onde o sinal e o ruído são isotrópicos. No entanto, sistemas de comunicação que têm como suporte a tecnologia de infravermelhos são fortemente dependentes das condições que são apresentadas, em determinado momento, pelo canal óptico. O principal factor de degradação desses sistemas advém do ruído provocado pela luz solar e artificial. Este ruído tem uma forte dependência espacial e temporal, sendo mais intenso junto às janelas expostas a luz solar e sob as lâmpadas incandescentes (direccionais).

Para combater a degradação imposta pelo ruído quântico gerado pela luz ambiente, seria conveniente aumentar a área de detecção efectiva do receptor [1]. No entanto, fotodíodos com elevadas áreas de recepção têm a si associados grandes capacidades de junção. Como tal, o aumento da área activa de recepção provocará uma diminuição da largura de banda do receptor [15,16]. Mais, devido à natureza direccional quer do ruído, quer do sinal, a Relação Sinal Ruído (RSR) do receptor, irá variar significativamente com o ângulo de observação. É então obvio que, se o receptor recebe ruído e sinal de direcções distintas, a RSR será optimizada se o campo de vista do receptor for estreitado e orientado.

Estes dois factores conduziram à ideia de utilizar múltiplos colectores, cada um com um campo de vista reduzido e orientado sob um determinado ângulo. Esta técnica é usualmente designada por diversidade angular na recepção. Além da utilização desta técnica, foi proposto que cada colector possuísse uma estimativa da sua RSR, por forma a permitir posteriormente a utilização de uma estratégia combinatória de sinais, que maximizasse a RSR à saída [5,7].

O receptor proposto, que obedece aos princípios de funcionamento descritos, é designado por *Receptor Sectorizado*. A sua estrutura geral encontra-se representada na Figura 1 onde o conjunto “front-end”, estimador de RSR e amplificador de ganho variável, é designado por sector. Em virtude dos requisitos dinâmicos da topologia de rede e do carácter variante do canal de transmissão, este receptor oferece melhorias significativas no desempenho e robustez dos sistemas de comunicação por infravermelhos [2,6,7,18].

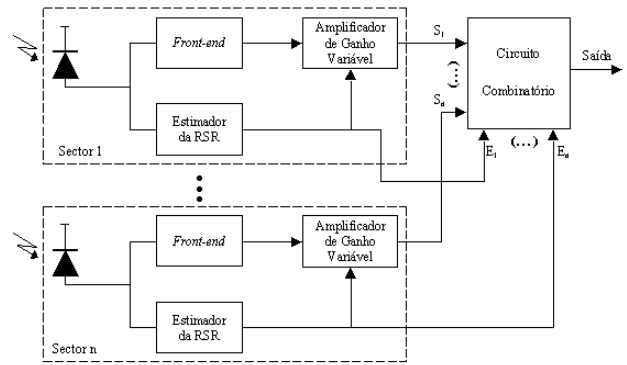


Figura 1 – Estrutura geral de um Receptor Sectorizado.

No geral, os sistemas por infravermelhos utilizam uma região do espectro electromagnético em que a radiação provocada pela luz solar, lâmpadas fluorescentes e incandescentes, é muito grande [3,4,9,11]. Como tal, existe uma redução da sensibilidade do receptor óptico, originada pelas diferentes fontes de luz (provocam ruído quântico, devido à natureza aleatória do processo de detecção). A luz solar e as fontes de luz artificial provocam ruído quântico, pela razão anterior, sendo que as fontes de luz artificial provocam ainda interferência devido às variações periódicas da intensidade desta luz.

Para o correcto funcionamento deste tipo de receptor, é necessário que a estimação da RSR reflecta, da melhor forma possível, as variações na distribuição espacial e temporal do sinal recebido e do ruído provocado pela iluminação ambiente.

Para além do ruído quântico, já mencionado, existem ainda três tipos de ruído que afectam as ligações por infravermelhos no espaço livre:

- i) Interferência electromagnética: devido a indução provocada por fontes externas (principalmente a que provém da rede de alimentação). No caso do receptor em questão, a interferência electromagnética externa pode ser atenuada, e quase eliminada, se se tomarem algumas precauções no desenho e concepção do receptor sectorizado, como sejam: a blindagem do “front-end” óptico, a filtragem das alimentações e a utilização de percursos diferenciais no *front-end* do receptor [15,16].
- ii) Ruído térmico: é gerado no próprio receptor, sendo produzido pelos componentes electrónicos do *front-end* óptico.
- iii) Interferência óptica: provém da iluminação artificial. Esta interferência é devida essencialmente à iluminação artificial gerada pelas lâmpadas fluorescentes originando Interferência entre Símbolos (IES). Neste caso uma aproximação importante foi considerar que a interferência provocada pelas fontes de iluminação artificial se mantinha constante durante o bit “slot”. Assume-se então que com codificação e filtragem apropriada o problema de interferência óptica fica resolvido.

Em suma, no presente trabalho, para a análise do desempenho do receptor sectorizado foi necessário

considerar duas formas de ruído, o ruído quântico que é função da luz ambiente e da área activa do fotodíodo, e o ruído térmico que é gerado pelos componentes do receptor e, por essa razão, é praticamente independente do canal físico de transmissão.

### III. ESTRATÉGIAS DE COMBINAÇÃO

A utilização de técnicas de diversidade angular na recepção, levou ao aparecimento do receptor sectorizado. O receptor sectorizado baseia-se na combinação dos sinais à saída de cada sector, obtendo-se um único sinal à saída do receptor que respeita a técnica de combinação adoptada. Para efectuar a combinação dos sinais provenientes dos diferentes sectores, existem três estratégias diferentes: *Equal-Gain*, *Maximal-Ratio* e *Best-Sector* (ou *Selection-Combining*) [14]. As características dos métodos combinatórios referidos encontram-se descritas em [6,7].

#### A. Receptor *Equal-Gain*

Num receptor do tipo *Equal-Gain*, todos os sectores têm igual ganho. No caso geral, se assumirmos que o receptor possui N sectores, a RSR à saída do receptor, será dada por

$$\left(\frac{i}{\sigma}\right)_{EG} = \frac{\sum_{s=1}^N i_s}{\sqrt{\sum_{s=1}^N \sigma_s^2}} \quad (1)$$

Onde  $i_s$  é o valor médio do sinal e  $\sigma_s$  é o valor *rms* do ruído, referentes à entrada do sector  $s$  do receptor sectorizado.

Uma vantagem associada a este tipo de estratégia é que, mesmo quando todos os sectores recebem a mesma quantidade de sinal e o mesmo ruído quântico provocado pela luz ambiente, é possível melhorar a RSR de 1,5dB com a duplicação do número de sectores [7]. Os receptores que se baseiam nesta estratégia são utilizados quando é necessário um aumento da área activa dos fotodíodos sem diminuição da largura de banda do receptor óptico.

#### B. Receptor *Best-Sector*

Num receptor do tipo *Best-Sector*, apenas o sector com melhor RSR é escolhido para formar o sinal de saída do receptor. No caso geral, se assumirmos que o receptor possui N sectores, a sua RSR à saída do receptor, será dada por

$$\left(\frac{i}{\sigma}\right)_{BS} = \max_N \left[ \frac{i_s}{\sqrt{\sigma_s^2}} \right] \quad (2)$$

Para implementar um receptor deste tipo, é necessário determinar uma estimativa da RSR presente à entrada de cada sector. Este tipo de estimativa requer a utilização de técnicas de estimação da RSR complexas [7,15,16]. A estrutura geral de um receptor *Best-Sector* é apresentada na Figura 2. No caso de um receptor sectorizado do tipo

*Best-Sector* é necessário um “front-end” por sector, um circuito que estime a RSR em cada sector e um circuito de selecção que determine o sector com melhor RSR.

#### C. Receptor *Maximal-Ratio*

Num receptor do tipo *Maximal-Ratio*, os sinais provenientes de cada sector do receptor, são ponderados por um ganho que é proporcional a relação  $i_s/\sigma_s^2$ , referida à entrada de cada sector. Posteriormente, os sinais de todos os sectores são somados, para assim se obter o sinal à saída do receptor. Esta estratégia de combinação é aquela que maximiza a RSR do receptor sectorizado. Esta maximização é uma consequência que advém do facto do ruído quântico e do ruído térmico do receptor serem não correlacionados. Sendo assim, no caso geral, se o receptor possui N sectores, a sua RSR à saída, será dada por

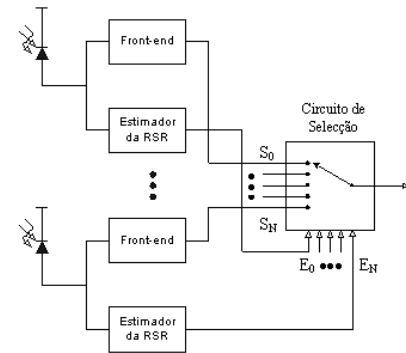


Figura 2 – Estrutura de um receptor do tipo *Best-Sector*.

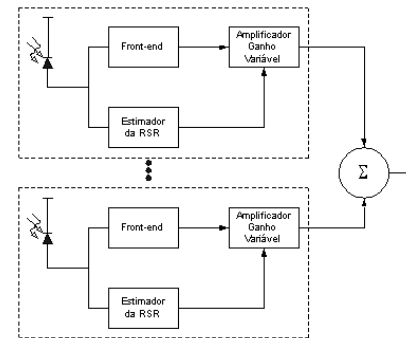


Figura 3 – Estrutura de um receptor do tipo *Maximal-Ratio*.

$$\left(\frac{i}{\sigma}\right)_{MR} = \sqrt{\sum_{s=1}^N \left(\frac{i_s}{\sigma_s}\right)^2} \quad (3)$$

A estrutura geral de um receptor *Maximal-Ratio* é apresentada na Figura 3. Tal como no caso do receptor *Best-Sector*, é necessário um “front-end” por sector e um circuito que estime a RSR em cada sector. Para além disto, é necessário um AGV e um circuito somador.

### IV. SECTOR ÓPTICO

De todas as estratégias de combinação linear de sinal estudadas, a que parece apresentar maior complexidade, é a *Maximal-Ratio*. No entanto, esta não difere muito da

opção *Best-Sector*. Em ambas as estratégias é requerido um “front-end” óptico e um circuito estimador de ruído, por sector. A maior complexidade da estratégia *Maximal-Ratio* advém do dimensionamento e implementação do amplificador de ganho variável, ao contrário da estratégia *Best-Sector* em que é simples implementar um circuito de selecção.

Assume então particular interesse o dimensionamento e estudo do receptor sectorizado com a estratégia *Maximal-Ratio*, já que será fácil e rápido alterar a estrutura deste receptor, para a utilização de qualquer uma das outras estratégias de combinação.

Tal como já tinha sido visto anteriormente (Figura 3), um sector do receptor óptico sectorizado que se baseie na estratégia *Maximal-Ratio* é composto por, um “front-end”, seguido de um AGV e por um circuito estimador da RSR “vista” por esse sector. A Figura 4 ilustra a estrutura utilizada na implementação de um sector óptico.

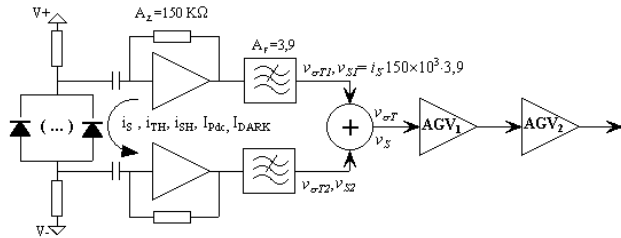


Figura 4 – Estrutura de um sector do Receptor Sectorizado.

Esta estrutura utiliza dois amplificadores de transimpedância complementares e de baixo ruído [1], por forma a que à saída do receptor, o ruído provocado pela interferência electromagnética seja nulo.

Na sua configuração inicial, o “front-end” óptico utilizava uma matriz de fotodíodos PIN com pequena área activa de recepção. Esta configuração foi alterada, depois de se ter verificado que o ruído térmico referido à entrada do “front-end” era largamente superior ao ruído quântico gerado pela matriz de fotodíodos. Na impossibilidade de reduzir o ruído térmico do “front-end” já implementado [6], optou-se por aumentar a área activa e recepção colocando apenas um fotodíodo VTH2091. No limite, se o ruído térmico for desprezável quando comparado com o ruído quântico, a RSR referida à entrada do “front-end” aumenta com a raiz quadrada da área activa de recepção [1]. O aumento da área activa de recepção não alterou significativamente a largura de banda do “front-end”.

Para efectuar a estimativa do ruído quântico, foi utilizado um fotodíodo BPW34FA junto ao fotodíodo VTH2091. Considerando que os fotodíodos estão suficientemente próximos, por forma a que a distribuição de iluminação ambiente seja idêntica em ambos, e utilizando um amplificador de transimpedância, foi possível obter um sinal proporcional à corrente DC produzida no fotodíodo VTH2091 e, consequentemente, ao ruído quântico gerado neste.

Seguindo a estratégia *Maximal-Ratio*, o ganho de cada sector deverá ser proporcional ao valor médio do sinal, e

inversamente proporcional à variância do ruído do receptor. Sendo assim, o ganho será dado por

$$G = k \cdot \frac{\langle i_s \rangle}{\sigma_{SH}^2 + \sigma_{TH}^2} \quad (4)$$

O sinal e o ruído quântico possuem uma forte dependência espacial, o que faz com que a gama dinâmica obtida pela expressão (4) seja muito elevada. Torna-se então difícil a implementação do ganho de cada sector. Medições efectuadas [5,8] indicam que, em salas com diversos tipos de iluminação ambiente, a corrente de polarização do fotodíodo, ou seja, a corrente DC que o percorre, pode variar entre 10µA/cm<sup>2</sup> e 1mA/cm<sup>2</sup>. Isto faz com que o valor rms do ruído quântico, reflectido à entrada do “front-end”, se situe entre  $\sigma_{SH,MIN} = 3,30nA$  e  $\sigma_{SH,MAX} = 32,98nA$ . Por outro, lado medições efectuadas com todos os sectores do receptor óptico sectorizado, permitiram determinar que a média do valor rms do ruído térmico, reflectido para à entrada do “front-end”, é de  $\sigma_{TH} = 15,49nA$ .

Por forma a cobrir a gama dinâmica das variações do sinal e do ruído do “front-end”, optou-se por dividir o ganho do AGV por dois andares colocados em cascata [5], como é mostrado na Figura 4.

O ganho de cada AGV, é dado por:

$$G_{AGV1} = \frac{K_1}{v_{\sigma_T}} \quad (5) \quad \text{e} \quad G_{AGV2} = K_2 \cdot \langle v_{0,AGV1} \rangle \quad (6)$$

Com esta subdivisão dos ganhos verifica-se que o sinal à saída do AGV<sub>1</sub>, é proporcional à RSR [5]. Esta estratégia permite que o ganho do AGV<sub>2</sub> seja proporcional à RSR, o que fará com que apenas seja limitado pela RSR máxima e mínima que se pretenda considerar.

Nos sistemas de transmissão ópticos é usual considerar um critério de qualidade que tem por base a sensibilidade do receptor que é definida como a potência mínima necessária para obter um Bit Error Rate (BER) de 10<sup>-9</sup>. No caso presente, este BER corresponde a uma RSR de referência (RSR<sub>REF</sub>), referida à entrada do receptor, com valor 6/√2. Este valor deve-se ao facto do receptor ser diferencial com dois percursos complementares. Este valor de referência foi utilizado no dimensionamento do AGV<sub>2</sub>.

Como o sinal à saída do AGV<sub>1</sub> é proporcional à RSR referida à entrada do receptor e admitindo como valores mínimos e máximos da RSR, respectivamente, RSR<sub>REF</sub>/4 e 4×RSR<sub>REF</sub>, dentro dos quais se pretende que o ganho do AGV<sub>2</sub> deva variar linearmente, obtém-se a gama dinâmica de funcionamento requerida para o AGV<sub>2</sub>, 24dB.

Finalmente, tendo em conta as diferenças em área activa e atenuação óptica entre os dois fotodíodos utilizados (BPW34FA e VTH2091), foi possível determinar o ganho total da cascata dos dois AGVs que é dado por:

$$G_{AGV} = G_{AGV1} \cdot G_{AGV2} = K_1 \cdot K_2 \cdot \frac{\langle v_{0,AGV1} \rangle}{v_{\sigma_T}} \quad (7)$$

onde:

$v_{0,AGV1}$  – é o sinal a saída do AGV<sub>1</sub>;

$K_1$  – constante associada ao ganho do primeiro AGV;  
 $K_2$  – constante associada ao ganho do segundo AGV;  
 $v_{\sigma_T}$  – valor rms do ruído total reflectido à saída do “front-end”.

V. RESULTADOS (RECEPTOR ÓPTICO SECTORIZADO)

As várias técnicas de diversidade angular consideradas foram testadas num ambiente laboratorial onde foi possível recriar dois ambientes típicos de iluminação artificial. A sala que serviu de base às medições efectuadas foi uma sala de aulas (sala 128) do Departamento de Electrónica e Telecomunicações da Universidade de Aveiro.

As paredes da sala possuem uma coloração creme e o tecto está pintado a branco. O chão da sala está forrado com placas de cor cinzento claro. No tecto da sala estão 6 pares de lâmpadas fluorescentes tubulares de 36 W de potência e 120 cm de comprimento, com diferentes tempos de vida. Ainda no tecto existem calhas metálicas que sustentam 9 lâmpadas incandescentes direccionais PHILIPS R95. Estas lâmpadas possuem uma abertura de radiação de 20° e uma potência de 100 W. A sala utilizada tem 291 cm de altura e as lâmpadas fluorescentes encontram-se encostadas ao tecto, no entanto, a face das lâmpadas incandescentes encontra-se a 15 cm deste. A sala foi totalmente isolada por forma a que, a iluminação natural não introduzisse factores de degradação no

desempenho do receptor óptico sectorizado, permitindo a análise do ruído induzido pela iluminação artificial.

A planta da sala pode ser vista na Figura 5. Nessa planta, para além de ser possível verificar as medidas da sala, é possível localizar as lâmpadas incandescentes e fluorescentes (através da projecção do seu centro, para o chão da sala), visualizar os eixos e direcções consideradas e visualizar a posição dos sectores do receptor sectorizado, em relação ao eixo da sala. O receptor sectorizado foi colocado numa plataforma móvel, que permitiu a sua fácil deslocação ao longo da sala; isto fez com que os fotodíodos ficassem a cerca de 100 cm de altura. As projecções das lâmpadas incandescentes para o chão da sala, encontram-se representadas como cruces na Figura 5, enquanto que as lâmpadas fluorescentes são representadas por um rectângulo que possui uma cruz (a representar o centro de cada par de lâmpadas fluorescentes). Junto a cada cruz está a posição de cada lâmpada (ou par de lâmpadas, no caso das lâmpadas fluorescentes) relativamente ao centro da grelha, seguindo a nomenclatura (x,y) da figura, com os valores expressos em cm. Para além disto, no caso das lâmpadas incandescentes é também indicado o valor da corrente induzida num fotodíodo VTH2091, nessa posição, bem como a localização do máximo de radiação da lâmpada e a corrente que este induz no fotodíodo. Finalmente é ainda indicado na Figura 5 o centro da sala, local onde foi colocado o emissor óptico.

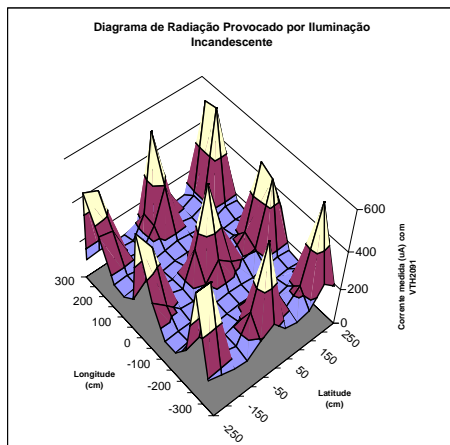


Figura 6 – Distribuição espacial da corrente DC induzida no fotodíodo devido à iluminação artificial incandescente.

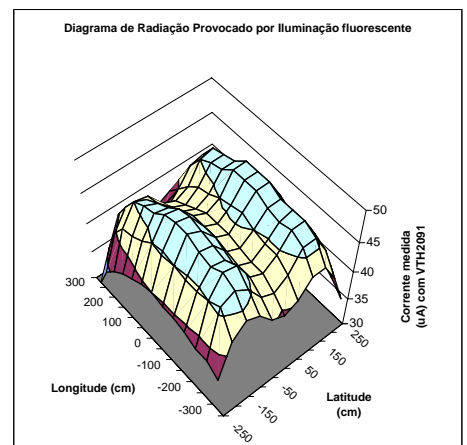


Figura 7 – Distribuição espacial da corrente DC induzida no fotodíodo devido à iluminação artificial fluorescente.

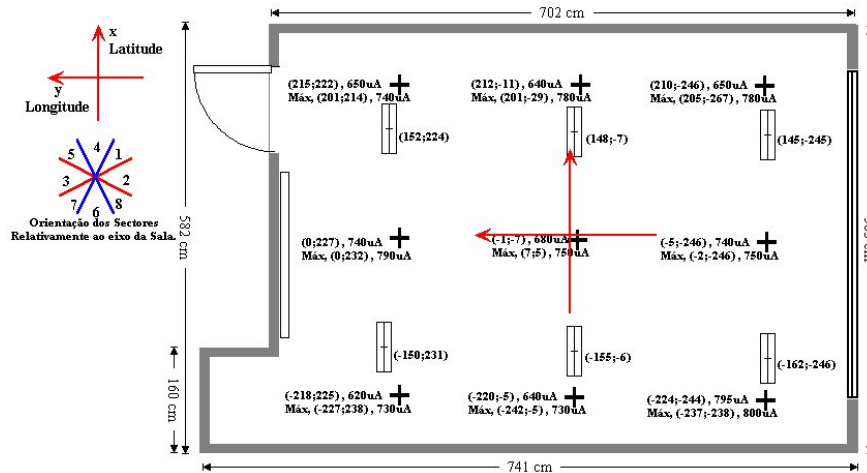


Figura 5 – Esquema da sala utilizada para as medições com o Receptor Óptico Sectorizado

#### A. Distribuição espacial da corrente gerada no fotodíodo

As figuras 6 e 7 ilustram as medições efectuadas para a distribuição da corrente induzida no fotodíodo VTH2091, em condições em que apenas existe iluminação artificial, proveniente das lâmpadas incandescentes direccionais e das lâmpadas fluorescentes, respectivamente.

Dado que a variância do ruído quântico gerado no fotodetector é proporcional à corrente DC induzida pela iluminação ambiente, as medições ilustradas nas figuras 6 e 7 permitem extrapolar a distribuição espacial do ruído quântico gerado pelo fotodíodo devido à iluminação artificial. Isto permite concluir que o ruído quântico é mais intenso sob as lâmpadas incandescentes direccionais, o que está de acordo com o que já tinha sido anteriormente verificado [1,8].

No caso da iluminação fluorescente, uma primeira análise aos resultados mostrou uma discrepância com outros estudos sobre a distribuição espacial do ruído [4,6,8]. Nesses estudos são descritas medições da distribuição espacial do ruído ambiente, através da medição da corrente induzida num fotodíodo numa sala com iluminação artificial fluorescente e incandescente. No caso das lâmpadas fluorescentes havia sido verificado que o ruído era mais intenso entre estas [8], o que não acontece nos resultados aqui apresentados para este tipo de iluminação. Para perceber o porquê desta diferença de comportamentos foi necessário efectuar algum trabalho de pesquisa. Para tal analisou-se a sala de testes utilizada para os estudos efectuados em [4,6,8], que se localiza no Instituto de Telecomunicações. Foi assim possível verificar que a caixa que envolve as lâmpadas fluorescentes, possui reflectores prateados, os quais provocam componentes especulares, que provavelmente fazem com que a radiação se concentre entre as lâmpadas fluorescentes. Na sala de testes utilizada para as medições deste relatório, a caixa que envolve as lâmpadas fluorescentes não possui qualquer superfície reflectora. Apenas existe uma tampa em plástico quase transparente a envolver as lâmpadas fluorescentes. A estrutura física da caixa que envolve as lâmpadas, faz com que os máximos

de ruído quântico se encontrem sob as lâmpadas fluorescentes, tal como pode ser visto na Figura 7.

#### B. Distribuição espacial do sinal

A distribuição espacial do sinal no interior da sala foi obtida através de medições efectuadas com um receptor óptico idêntico aos utilizados no receptor sectorizado. O receptor foi colocado a um metro do chão da sala e orientado verticalmente para o tecto da sala.

Como se pode ver pela Figura 8, o sinal é mais intenso quando se está mais perto do emissor. Este facto está de acordo com o diagrama de radiação do emissor, que provoca um espalhamento de radiação infravermelha não uniforme e em forma de duna.

#### C. Distribuição espacial da RSR

A Figura 9 mostra a distribuição espacial da RSR presente à saída do receptor não sectorizado, em condições de iluminação incandescente. As Figuras 10, 11 e 12 apresentam os gráficos da distribuição espacial da RSR do receptor sectorizado para as estratégias *Equal-Gain*, *Best-Sector* e *Maximal-Ratio*, para as mesmas condições de iluminação..

Como se pode verificar pelas Figuras 9, 10, 11, e 12, para todas as formas de recepção os mínimos da RSR coincidem com os máximos de ruído provocados pelas lâmpadas incandescentes direccionais (Figura 6). O facto anterior também foi verificado para o caso da iluminação fluorescente, sendo mais visível para as Estratégias *Equal-Gain*, *Best-Sector* e *Maximal-Ratio* do que para o receptor Não-Sectorizado.

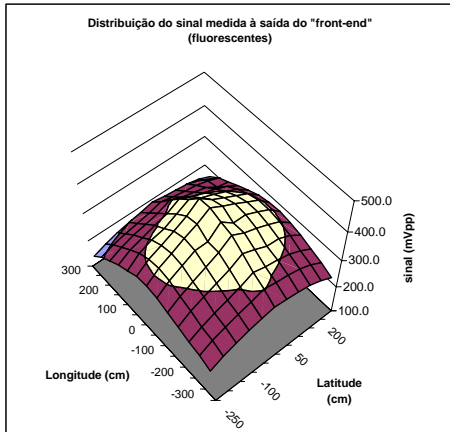


Figura 8 – Distribuição sinal medida à saída do *front-end*.

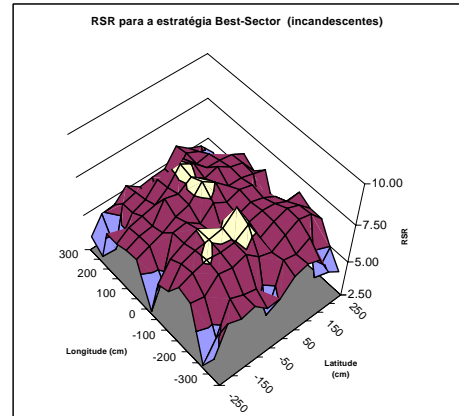


Figura 11 – Distribuição da RSR à saída do receptor *Best-Sector*, em condições de iluminação incandescente.

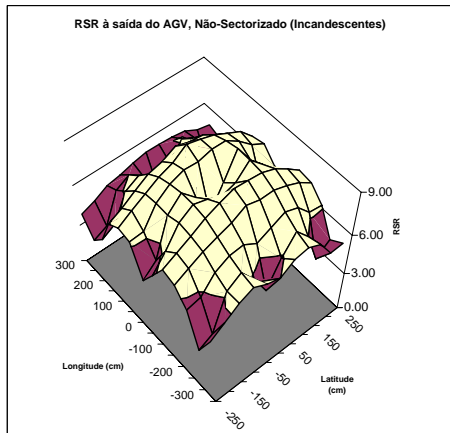


Figura 9 – Distribuição da RSR à saída do receptor Não-Sectorizado, em condições de iluminação incandescente.

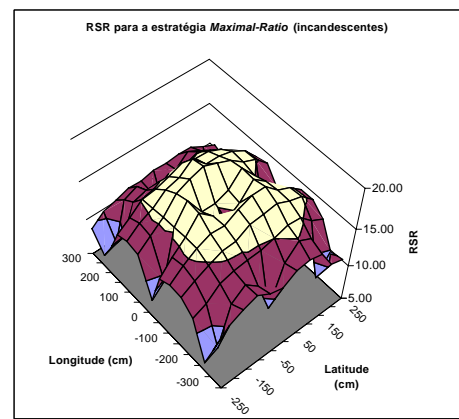


Figura 12 – Distribuição da RSR à saída do receptor *Maximal-Ratio*, em condições de iluminação incandescente.

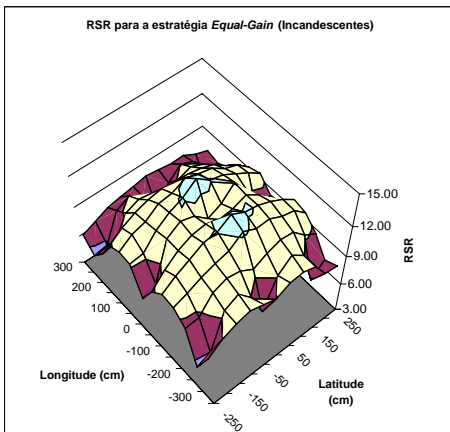


Figura 10 – Distribuição da RSR à saída do receptor *Equal-Gain*, em condições de iluminação incandescente.

No caso das estratégias de combinação foi possível verificar que a estratégia *Maximal-Ratio* é aquela que maximiza a RSR à saída do receptor, para ambos os tipos de iluminação artificial (o que está de acordo com os resultados apresentados em [5,6,7,8,19]). Apesar das distribuições da RSR apresentadas, para as estratégias *Equal-Gain* e *Maximal-Ratio*, serem semelhantes em termos de máximos e mínimos localizados (como se pode verificar nas figuras 10 e 12) há um factor de qualidade que distingue a estratégia *Maximal-Ratio*. De facto, o valor mínimo da RSR medida no caso da estratégia *Maximal-Ratio* é superior a qualquer das outras estratégias analisadas. A Tabela 1 apresenta a gama dinâmica e o valor mínimo da RSR para cada uma das estratégias, consoante o tipo de iluminação ambiente. A gama dinâmica é a diferença entre o valor máximo e o valor mínimo da RSR medida à saída do receptor.

O facto da gama dinâmica da variação da RSR para a estratégia *Best-Sector* ser inferior às estratégias *Equal-Gain* e *Maximal-Ratio*, para qualquer das condições de iluminação, deve-se ao facto dos níveis de RSR medidos serem muito baixos em toda a sala para o caso do receptor *Best-Sector*. Os baixos valores da RSR medidos para a estratégia *Best-Sector* tem justificação no número de sectores utilizados (oito) ser inferior ao número de lâmpadas incandescentes.

O factor mais importante a comparar para as diversas estratégias é o valor mínimo da RSR encontrado dentro da sala de teste. A estratégia *Maximal-Ratio* é aquela que apresenta um valor mínimo de RSR superior a qualquer uma das outras formas de recepção.

Finalmente é necessário referir que os valores da RSR mínimos são superiores no caso da iluminação fluorescente, o que pode ser justificado se se tiver em conta que o ruído quântico provocado por este tipo de lâmpadas é inferior ao provocado pelas lâmpadas incandescentes.

## VI. LIGAÇÃO ÓPTICA PONTO-A-PONTO

De uma forma semelhante ao implementado para sistemas difusos, também se pretendia caracterizar uma ligação ponto a ponto, por raios infravermelhos, em ambientes exteriores. Esta secção apresenta, ainda que de uma forma breve, a constituição da ligação óptica e do *setup* de teste utilizado para a caracterização dessa ligação.

### A. Ligação óptica ALL-2M

A ligação óptica ponto-a-ponto analisada trata-se de um sistema comercial, denominado *ALL-2M*, produzido pela ENT (Empresa Nacional de Telecomunicações). O sistema encontra-se dimensionado para funcionar a uma taxa de transmissão de 2 Megabits por segundo, podendo atingir cerca de um quilómetro de alcance.

O meio de propagação utilizado neste tipo de sistemas exteriores, é a atmosfera terrestre. Este meio pode apresentar condições muito adversas para a propagação quer de feixes luminosos (por exemplo, raios infravermelhos), quer de ondas electromagnéticas. Para o caso da transmissão por raios infravermelhos os factores climáticos são determinantes no desempenho do sistema, pois a luz é facilmente refractada e reflectida em certas condições atmosféricas.

Num sistema de transmissão por infravermelhos deste tipo o emissor e o receptor têm de se encontrar em linha de vista. Por este facto o sistema apresenta algumas limitações na sua instalação. Em virtude dos raios de infravermelhos não atravessarem obstáculos opacos, o campo de visão tem de se encontrar sempre livre de modo a que a linha de vista esteja permanentemente assegurada para que não haja quebra na transmissão.

O sistema é constituído por dois módulos, um exterior e um outro interior. O módulo exterior é constituído por um

emissor do tipo LASER, e por um receptor constituído por um fotodiodo do tipo PIN. Este módulo é o responsável pelo estabelecimento da ligação óptica, uma vez que é através dele que os emissores e receptores são acondicionados de modo a que se vejam mutuamente, e assim permitir a linha de vista entre o emissor e o receptor. Quanto ao módulo interior, este é responsável pela interface entre o módulo exterior e o mundo externo ao sistema, ao qual este se deve encontrar ligado, sendo constituído por uma carta de interface. O módulo é responsável por converter a codificação *Manchester* em codificação HDB3 para o exterior do sistema, e vice versa.

### B. "Setup" de teste do sistema

O principal objectivo deste trabalho foi a caracterização do desempenho da ligação quando sujeita a diferentes condições climáticas, por instalar o sistema num local onde as condições do meio de transmissão utilizado não fossem controladas pelo homem. O sistema foi assim instalado na Universidade de Aveiro, estabelecendo uma ligação óptica entre os edifícios do Instituto de Telecomunicações e do Departamento de Electrónica e de Telecomunicações. Para uma correcta caracterização do desempenho do sistema foi necessário obter, quer os dados relativos à ocorrência de erros, quer os dados meteorológicos, através dos quais foi possível aferir a correlação do desempenho com as respectivas condições climáticas.

A ocorrência de erros no sistema foi medido recorrendo a um equipamento de medida de BER da "Ando", que permite a contagem de erros em intervalos de tempo programáveis. O intervalo de tempo escolhido foi de um minuto, ou seja, ao fim de um minuto o contador de erros é colocado a zero, contando-se o número de erros ocorridos entretanto.

Por outro lado, para a obtenção dos dados meteorológicos recorreu-se a uma estação meteorológica que se encontra instalada na Universidade de Aveiro, junto ao Instituto de Telecomunicações. Esta estação fornece dados referentes à humidade relativa, temperatura absoluta, pluviosidade, velocidade e direcção do vento. Como se verá mais adiante estes resultados serão bastante úteis no que diz respeito à caracterização do sistema que se pretendia efectuar.

Apesar de todos estes dados meteorológicos existe um dado que a estação não consegue fornecer, e que é de extrema importância para o desempenho do sistema. Esse

	Iluminação Incandescente		Iluminação Fluorescente	
	RSR mínima	Gama dinâmica	RSR mínima	Gama dinâmica
Não-Sectorizado	3,01	6,22	5,11	5,8
<i>Equal-Gain</i>	5,41	7,65	6,15	8,58
<i>Best-Sector</i>	2,73	5,69	4,87	5,94
<i>Maximal-Ratio</i>	6,44	12,02	8,06	9,95

Tabela 1 – Resumo dos Resultados Experimentais (*Receptor Óptico Sectorizado*).



dado é a ocorrência, ou não, de nevoeiro. Para fazer face a esta situação recorreu-se a uma *webcam* recolhendo imagens do exterior de 20 em 20 minutos, sendo assim possível visualizar as imagens e averiguar a ocorrência de nevoeiro em situações atmosféricas propícias à sua ocorrência.

### C. Automatização do "setup" de medida

Para que fosse possível o acesso a toda a informação medida de uma forma contínua, era necessário guardá-la automaticamente. Para o efeito foi utilizada a linguagem de programação "Labview"[21], através da qual foi possível desenvolver um programa que efectuava a recolha automática e continua do número de erros medidos pelo equipamento "Ando". A recolha dos dados meteorológicos foi realizada de uma forma automática através de um módulo de software desenvolvido para esse efeito, que guardava as condições meteorológicas referentes a cada medição de taxa de erros.

Os dados relativos ao número de erros foram recolhidos recorrendo a um PC que se encontrava ligado ao módulo receptor do "Ando", através de um cabo GPIB. Com esta ligação foi possível, controlar remota e automaticamente o equipamento usando os programas desenvolvidos em "Labview". Por sua vez a estação meteorológica foi acedida por modem. Esta tem instalada uma memória, o que permite o armazenamento dos dados meteorológicos referentes a três dias. Assim, para ter acesso a esses dados, apenas foi necessário efectuar a sua recolha em intervalos de tempo espaçados (um dia), para análise posterior.

Com a recolha automática dos dados, foi possível a monitorização contínua do sistema, sem que existissem interrupções, possibilitando assim a caracterização deste, a qualquer hora do dia, de uma forma completamente automática, contínua e autónoma. Deste modo, a análise e o tratamento da informação foram efectuadas posteriormente, da forma mais cómoda possível.

Na Figura 12, encontra-se uma representação simplificada do sistema em causa.

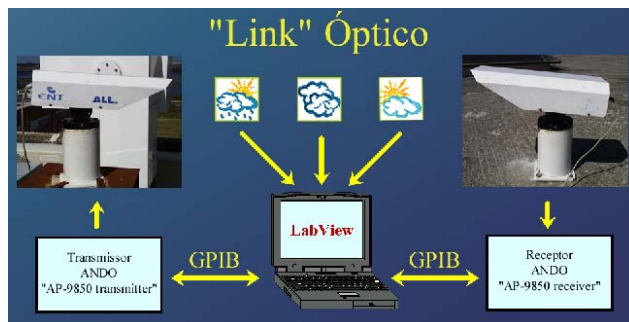


Figura 12 – Diagrama de blocos do sistema de teste montado.

## VII. RESULTADOS (LIGAÇÃO ATMOSFÉRICA)

Os dados recolhidos, quer através da estação meteorológica, quer através do equipamento de medição de taxas de erros foram analisados por forma a permitir a verificação da existência de correlação entre estes. Quanto aos dados recolhidos pela "Web Cam", estes foram apenas analisados visualmente, para se detectar a presença de nevoeiro.

Numa primeira abordagem é necessário construir tabelas com os dados recolhidos. As tabelas são construídas dia a dia, para que se faça uma análise diária do desempenho do "Link" óptico. Desta forma consegue-se ter uma perspectiva mais detalhada do que se passa ao longo dos dias de monitorização do sistema.

Para que a análise seja mais eficaz, foram desenhados gráficos, onde são cruzados o número de erros ocorridos e cada um dos dados meteorológicos disponíveis da estação. Esta representação gráfica permite efectuar uma análise qualitativa muito rapidamente. O facto de se sobreporem gráficos é uma ajuda preciosa para a análise dos resultados.

A análise dos resultados também recorreu à correlação cruzada entre os dados meteorológicos e o número de erros ocorridos. Esta correlação permite averiguar até que ponto se verifica uma relação causa-efeito entre a ocorrência de erros e as condições climatéricas.

Depois de efectuar a correlação entre os vários dados verificou-se existir uma forte correlação entre a pluviosidade (e humidade relativa) e o número de erros, como era esperado.

Outro facto verificado, foi que quando chove, e a direcção do vento está contra as lentes dos módulos exteriores, devido ao facto de estas ficarem molhadas, o número de erros aumenta. Por esse mesmo motivo, mesmo quando pára de chover assiste-se à ocorrência de erros, durante um certo período.

Por outro lado verificou-se um facto um pouco estranho, já que existe uma forte correlação entre a velocidade do vento (mesmo sem chuva) e a ocorrência de erros. Era sabido que o vento também poderia afectar a transmissão de informação, mas os resultados obtidos foram um pouco surpreendentes, já que a correlação existente entre os valores do número de erros e da velocidade do vento foi bastante significativa.

Pode-se referir ainda, que quando está nevoeiro a ocorrência de erros é maior, o que indica que há uma dependência entre o número de erros e a presença de nevoeiro. Não é possível, no entanto, quantificar esta dependência através da correlação cruzada, uma vez que a verificação da ocorrência de nevoeiro é um dado qualitativo.

Nas figuras 13 e 14 podem ser vistos, a título de exemplo, gráficos referentes ao cruzamento dos vários dados recolhidos, em dias em que se verificaram condições atmosféricas adversas para o sistema de comunicação, com resoluções temporais de 10 minutos. No gráfico da Figura 13 pode ser visto o número de erros,

numa manhã de nevoeiro, e como é facilmente observável o número de erros ocorridos é elevado: o desempenho do sistema é afectado fortemente pelo nevoeiro, que surgiu durante a noite e as primeiras horas da manhã. Na Figura 14 encontra-se um gráfico que diz respeito à ocorrência de erros, num dia em que houve pluviosidade. Como se pode observar o desempenho do sistema é fortemente afectado pela presença de chuva.

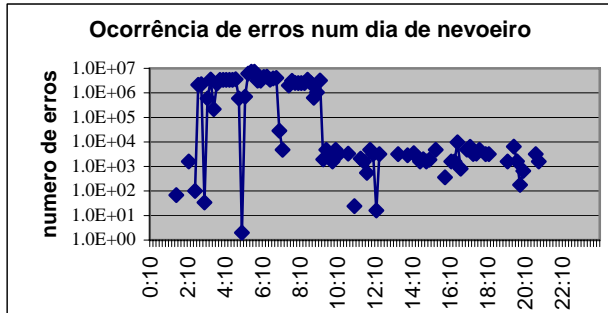


Figura 13 – Gráfico de erros, num dia com nevoeiro

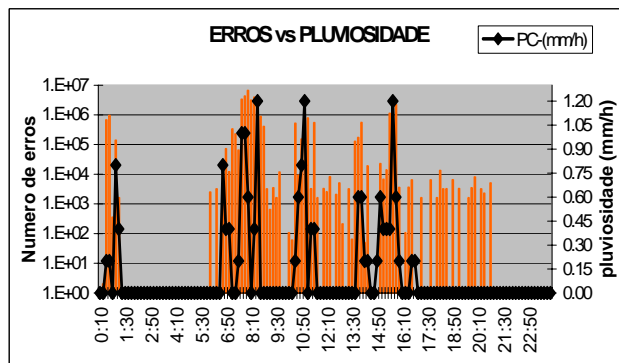


Figura 14 – Erros versus pluviosidade.

Para terminar pode-se dizer que existiu alguma surpresa na correlação existente entre o número de erros e a velocidade do vento, uma vez que nada fazia prever tal facto. Por outro lado, já se esperava uma forte correlação entre a pluviosidade e nevoeiro e a presença de erros, como aliás se verificou experimentalmente. De todos os factores climatéricos medidos a temperatura absoluta é o que menos influência tem no desempenho do sistema.

### VIII. CONCLUSÕES

A optimização e integração do receptor sectorizado mencionado foram concluídas com sucesso. Durante a fase de testes, foram concluídas todas as medições desejadas, tendo sido efectuadas medições do nível de ruído provocado pela iluminação artificial; medições da RSR e medições do desempenho (BER), com apenas um sector óptico e para as três estratégias de combinação linear conhecidas, *Equal-Gain*, *Maximal-Ratio* e *Best-Sector*.

Através das medições, efectuadas foi possível verificar noções teóricas como por exemplo, a direccionalidade quer do ruído, quer do sinal; a variação da RSR com ângulo de observação; a maximização da RSR à saída do receptor, aquando da utilização da estratégia de

combinação *Maximal-Ratio*. Finalmente, foi possível verificar que a utilização de técnicas de diversidade angular na recepção, oferece melhorias significativas na performance dos sistemas de comunicação por infravermelhos.

Por sua vez foi também instalada uma ligação óptica atmosférica e criado um ambiente de teste automatizado para esta ligação. Verificou-se que o sistema apresenta bom desempenho quando sujeito a condições climatéricas que não sejam muito adversas, ou seja sem chuva intensa, sem nevoeiro, e sem ventos fortes. Para o caso de se estar na presença de condições climatéricas adversas, o comportamento do sistema revela algumas limitações. Por estes motivos, pode-se dizer que o sistema em estudo apresenta um desempenho fortemente condicionado pelas condições atmosféricas, mesmo em distâncias de ligação curtas.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a disponibilidade de instalações e a compreensão de todos os utilizadores do DET, e do IT. O apoio prestado pela ENT foi essencial para a instalação e teste da ligação atmosférica. Em questões de medição atmosférica, o apoio da Prof. Maria Dolores Manso Orgaz foi inestimável.

### REFERÊNCIAS

- [1] A. M. R. Tavares, A. C. Moreira, C. R. Lomba, L. V. Moreira, R. T. Valadas, A. O. Duarte, "Experimental Results of a 1Mbps IR Transceiver for Indoor Wireless Local Area Networks", COMCON V - International Conference on Advances in Communication & Control, Crete, Greece, Jun. 1995.
- [2] A. M. R. Tavares, R. T. Valadas, A. O. Duarte, "Performance of an Optical Sectorized Receiver for Indoor Wireless Communication Systems in Presence of Artificial and Natural Noise Sources", in *Wireless Data Transmission*, Proc. SPIE 2601, Philadelphia, Pennsylvania, Oct. 1995.
- [3] A. M. R. Tavares, R. T. Valadas, "Medição e Modelação do Diagrama de Radiação de Lâmpadas Direcctionais", Departamento de Electrónica e Telecomunicações, Universidade de Aveiro, Relatório Interno, Setembro 1995.
- [4] A. M. R. Tavares, R. T. Valadas, "Medições da Distribuição espacial do Ruído Ambiente", Departamento de Electrónica e Telecomunicações, Universidade de Aveiro, Relatório Interno, Setembro 1995.
- [5] A. M. R. Tavares, R. T. Valadas, A. M. O. Duarte, "Design and Implementation of a Maximal-Ratio Angle-Diversity Receiver for Optical Wireless Communications Systems", *Proceeding of SPIE's International Symposium on Voice, Video and Data Communications-Wireless Technologies and Systems: Millimeter wave and Optical*, Vol. 3232, Dallas, Tx, USA, Nov. 1997.
- [6] A. M. R. Tavares, R. T. Valadas, "Optical configuration of the sectored receiver", Deliverable R1.2 from IRWLAN Project - PRAXIS 2/2.1/TIT/1578/95, Instituto de Telecomunicações, Pólo de Aveiro, May, 1999.

- [7] A. M. R. Tavares, R. T. Valadas, "Signal-to-Noise-Ratio Estimation and Combining Techniques", Deliverable R1.3 from IRWLAN Project - PRAXIS 2/2.1/TIT/1578/95, Instituto de Telecomunicações, Pólo de Aveiro, May, 1999.
- [8] A. M. R. Tavares, R. T. Valadas, "Experimental evaluation of the implemented sector", Deliverable R3.2 from IRWLAN Project - PRAXIS 2/2.1/TIT/1578/95, Instituto de Telecomunicações, Pólo de Aveiro, May, 1999.
- [9] C. J. Georgopoulos, "Light Interference in Infrared instrumentation and sensing systems operating in confined spaces", Cambridge Symposium on Optical Engineering, Cambridge, Massachusetts, Nov. 1994.
- [10] C. Lomba, R. T. Valadas, A. Duarte, "Propagation Losses and Impulse Response of the Indoor Optical Channel: A Simulation Package", In International Zurich Seminar on Digital Communication, "Mobile Communications, Advance Systems and Components", Zurich, Mar. 1994.
- [11] F. R. Gfeller, U. Barst, "Wireless In-House Data Communications Via Diffuse Infrared Radiation", Proc. Of the IEEE, Vol. 67, No.11, Nov. 1979.
- [12] F. R. Gfeller, P. Bernasconi, W. Hirt, C. Elisii, B. Weiss, "Dynamic Cell Planing for Wireless In-House Data Transmission", Proceedings of the 1994 International Zurich Seminar on Digital Communication, "Mobile Communications, Advance Systems and Components", Zurich, Mar. 1994.
- [13] F. R. Gfeller, W. Hirt, M. Lange, B. Weiss, "Wireless Infrared Transmission: How to Reach All Office Space", Proceedings of the IEEE, Vehicular Technology Conference, "VTC '96", Apr. 1996.
- [14] M. Schwartz, W. R. Bennett, S. Stein, "Communication Systems and Techniques", McGraw-Hill, 1996.
- [15] R. L. A. Aguiar, A. M. R. Tavares, J. L. Cura, E. Vasconcelos, L.N. Alves, R. T. Valadas, D. M. Santos, "Electronic Circuits for Wireless Optical LANs - I", Revista do Departamento de Electrónica e Telecomunicações, UA., Vol. 2, No. 6, Set. 1999.
- [16] R. L. A. Aguiar, A. M. R. Tavares, J. L. Cura, E. Vasconcelos, L.N. Alves, R. T. Valadas, D. M. Santos, "Electronic Circuits for Wireless Optical LANs - II", Revista do Departamento de Electrónica e Telecomunicações, UA., Vol. 2, No. 6, Set. 1999.
- [17] R. T. Valadas, A. C. Moreira, A. O. Duarte, "Hybrid (Wireless Infrared / Coaxial) Ethernet Local Area Networks", Proceedings of the IEEE Conference on Wireless LAN Implementation, Dayton, Ohio, Sep. 1992.
- [18] R. T. Valadas, A. M. O. Duarte, "Sectored Receivers for Indoor Wireless Optical Communication Systems", In PIMRC'94 – The Fifth IEEE Internatonal Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Sep. 1994.
- [19] R. T. Valadas, "Redes de Comunicação de Área Local Não-Cabladas por Raios Infravermelhos", Tese de Doutoramento, Departamento de Electrónica e Telecomunicações, Universidade de Aveiro, Novembro 1995.
- [20] E. Fisher, C. W. Jensen, "Pet and IEEE 488 bus (GPIB)", Osborne/McGraw-Hill, 1980.
- [21] "Labview Basics Course Manual", National Instruments, Fevereiro 1996
- [22] Johnson Gary W., "Labview a graphical programming, practical applications in instrumentation and control", MacGraw-Hill, 2ª ed, 1997.