

Contribuições da Universidade de Aveiro para a Especificação da Rede de Área Local não-Cablada IEEE 802.11

Rui Valadas, Adriano Moreira, Cipriano Lomba, António Tavares, Luís Moreira,
Carlos Oliveira, Rui Aguiar, Amaro de Sousa, A. M. de Oliveira Duarte

Resumo - Este artigo introduz a rede de área local não-cablada IEEE 802.11 e descreve as principais contribuições da Universidade de Aveiro para a sua especificação.

Abstract - This paper introduces the IEEE 802.11 wireless local area network and describes the main contributions given by the University of Aveiro to its specification.

I. INTRODUÇÃO

O crescente interesse pelas redes de comunicações de área local não-cabladas [22] é consequência da utilização em larga escala dos computadores pessoais e das comunicações móveis. O computador pessoal portátil congrega computação e mobilidade numa mesma plataforma e introduz a necessidade de acesso à rede de comunicações de área local sem as restrições impostas pelo cabo.

O interesse pelas redes não-cabladas tem-se manifestado também ao nível dos organismos internacionais de normalização. Existem presentemente dois grupos de trabalho a desenvolver normas internacionais para este tipo de redes: o IEEE 802.11 [30] e o HIPERLAN [24,25].

Nos EUA, o comité executivo do projecto IEEE 802 criou, em Julho de 1990, o grupo de trabalho IEEE 802.11. O IEEE 802.11 tem como objectivo a especificação de várias camadas físicas (incluindo rádio e infravermelhos) e de uma subcamada de controle do acesso ao meio comum [30]. Presentemente estão especificadas três camadas físicas: infravermelhos (*InfraRed*), rádio utilizando espalhamento espectral com salto de frequência (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) e rádio utilizando espalhamento espectral de sequência directa (*Direct Sequence Spread Spectrum*). A primeira versão da norma foi aprovada em Novembro de 1994, a segunda em Julho de 1995 e a terceira em Janeiro de 1996.

A Universidade de Aveiro participou activamente na definição da especificação IEEE 802.11. Esta participação enquadrou-se no projecto ESPRIT.6892 POWER (*Portable Workstation for Education in Europe*), no âmbito do qual a Universidade de Aveiro teve a seu cargo

o desenvolvimento de uma rede de comunicações de área local não-cablada por raios infravermelhos. As contribuições da Universidade de Aveiro abarcaram aspectos da camada física (*Physical - PHY*) [1-20] e da subcamada de controle do acesso ao meio (*Medium Access Control - MAC*) [21]. No entanto foram mais significativos ao nível da camada física, tendo a Universidade de Aveiro proposto uma especificação completa para esta camada, que foi aceite para inclusão na norma praticamente sem alterações. Este artigo introduz a rede de área local não-cablada IEEE 802.11 e descreve as principais contribuições da Universidade de Aveiro para a sua especificação. Na secção II é feita uma descrição geral da rede IEEE 802.11. Na secção III é feita uma descrição breve da subcamada de controle do acesso ao meio. Na secção IV são introduzidas as principais características da tecnologia de infravermelhos. Na secção V é descrita a especificação da camada física de infravermelhos. Finalmente, na secção VI são apresentadas as conclusões.

II. A REDE IEEE 802.11

Na Figura 1 apresenta-se um cenário de utilização de uma rede IEEE 802.11. Neste cenário, ainda um pouco futurista, cada aluno dispõe do seu computador pessoal portátil. Durante a aula, os portáteis são interligados através da rede IEEE 802.11. A ligação em rede permite que professor e estudantes realizem trabalho cooperativo e acedam a aplicações residentes no servidor da escola. Estas facilidades são já disponibilizadas nos dias de hoje por redes cabladas, tais como a rede Ethernet ou a rede Token-Ring [36]. No entanto, o facto dos portáteis não estarem dependentes de um cabo para o acesso à rede

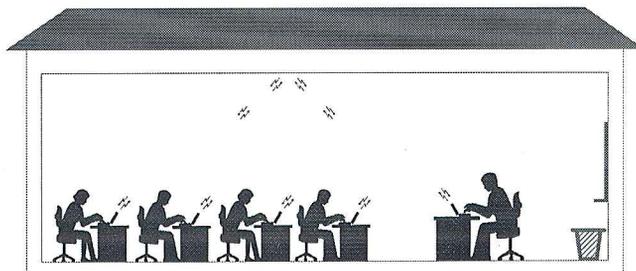


Figura 1: Cenário de utilização da rede IEEE 802.11.

permite que estas facilidades sejam disponibilizadas independentemente do local onde professor e estudantes se encontrem, permitindo criar um ambiente de trabalho mais flexível e mais eficiente. Além disso, promove uma melhor integração do trabalho realizado dentro e fora da aula.

As redes de comunicações de área local não-cabladas vieram introduzir um conjunto de novos requisitos, relativamente às suas congêneres cabladas:

- Operação sem licença prévia num conjunto alargado de países: os utilizadores desejam poder utilizar a rede livremente, em todos os locais para onde se deslocam e sem terem de se preocupar com questões de licenciamento.
- Reduzido consumo de potência: os portáteis são alimentados por bateria pelo que o consumo de potência deve ser o menor possível.
- Segurança e robustez ao nível da transmissão: os utilizadores esperam obter as mesmas características de segurança e robustez das redes cabladas, mesmo em ambientes com elevados níveis de ruído e interferência.
- Facilidade de instalação e operação: um grupo de utilizadores deverá poder instalar e operar com facilidade uma rede temporária para trabalho cooperativo (rede ad-hoc).
- Protecção do investimento: estando estas redes em rápida evolução, os utilizadores pretendem que as redes que vierem a adquirir possam acomodar futuras extensões e não se tornem rapidamente obsoletas.
- Operação em zonas geograficamente próximas num mesmo canal: não deve ser necessária qualquer coordenação explícita de frequências ou de códigos (planeamento celular), ou seja, duas redes colocadas em zonas próximas devem poder partilhar um mesmo canal; este requisito estabelece uma distinção fundamental relativamente aos sistemas de comunicações móveis celulares (por exemplo o sistema GSM) [33].

A rede IEEE 802.11 integra-se na arquitectura global das redes IEEE 802 [28], conforme representado na Figura 2. Esta particularidade tem desde logo uma consequência importante: todas as funções que são únicas às redes de área local não-cabladas são atribuídas à camada física ou à subcamada de controle do acesso ao meio.

802.2 LLC					
802.3 MAC	802.4 MAC	802.5 MAC	802.11 MAC		
802.3 PHY	802.4 PHY	802.5 PHY	IR PHY	FHSS PHY	DSSS PHY

Figura 2: Arquitectura IEEE 802.

As entidades componentes da rede IEEE 802.11 estão representadas na Figura 3. Estações (EST) que se associam para comunicar entre si formam um Conjunto Básico de Serviço (*Basic Service Set - BSS*). A área ocupada pelas estações de uma BSS é designada por Área Básica de Serviço (*Basic Service Area - BSA*) ou *célula*. As células podem sobrepor-se parcialmente, totalmente ou ser fisicamente disjuntas. A sua área de cobertura depende do ambiente de propagação e das características dos transceptores. Grandes áreas podem ser cobertas utilizando múltiplas células e, conseqüentemente, múltiplas BSS. O sistema utilizado para interligar um grupo de BSS é designado por Sistema de Distribuição (*Distribution System - DS*). O DS pode ser, por exemplo, uma rede Ethernet. A entidade que permite o acesso das estações ao DS é o Ponto de Acesso (*Access Point - AP*). De notar que o AP inclui todas as funções de uma estação (EST). O AP tem funções semelhantes às de uma *bridge* [36]. Um grupo de BSS interligadas por um DS forma um Conjunto Estendido de Serviço (*Extended Service Set - ESS*).

A rede IEEE 802.11 mais simples corresponde a uma BSS independente. Este tipo de rede é designado por *rede ad-hoc*. Uma rede que inclua um DS designa-se por *rede com infra-estrutura*.

III. BREVE DESCRIÇÃO DA SUBCAMADA MAC

Nas redes não-cabladas, para além das funções tradicionais das redes cabladas, existem um conjunto de novas funções que se destinam a fazer face às características específicas do canal de transmissão e à mobilidade das estações. A subcamada MAC da rede IEEE 802.11 inclui, para além da função básica de coordenação do acesso ao meio, as funções de fragmentação e reconstrução, associação e reassociação, sincronização temporal, gestão de consumo de potência e adaptação de velocidades de transmissão. Neste artigo apresentaremos apenas as características principais da função de coordenação do acesso ao meio. Descrições mais completas da subcamada MAC podem ser

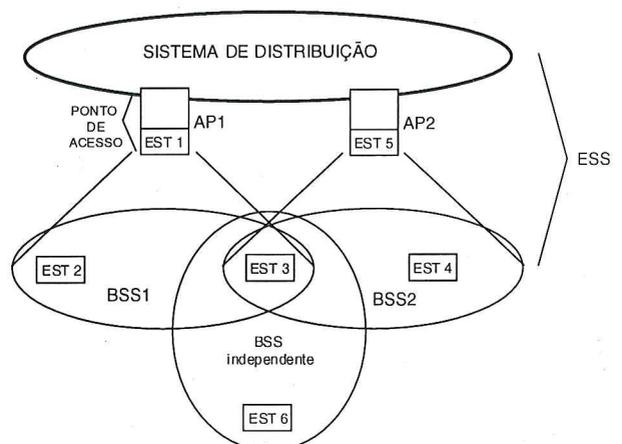


Figura 3: Componentes da rede IEEE 802.11.

encontradas em [30,41].

O acesso ao meio é baseado no protocolo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). De acordo com o CSMA/CA uma estação que tenha uma trama pronta para enviar começa por verificar o estado do canal (*Carrier Sense*). Se o canal for detectado livre por um período superior ao intervalo-entre-tramas, designado por DIFS (*Distributed Inter-Frame-Spacing*), a estação transmite imediatamente. Se for detectado ocupado a estação persiste até que o canal seja detectado livre por um período superior a DIFS. Em seguida, atrasa a transmissão de um intervalo de tempo aleatório definido por um algoritmo de recuo de tipo exponencial binário truncado semelhante ao da Ethernet, até fazer nova tentativa de transmissão (*Collision Avoidance*). O CSMA/CA é ainda enriquecido com mecanismos de confirmação positiva imediata e reserva do canal. De acordo com o mecanismo de confirmação positiva imediata, quando uma estação recebe uma trama de dados (DATA) válida que lhe foi dirigida deve confirmar a recepção dessa trama enviando à estação origem uma mini-trama ACK (*Acknowledgement*). Para garantir que a estação destino não necessite de disputar o acesso ao meio no envio da mini-trama ACK, a estação destino usa um intervalo-entre-tramas inferior a DIFS, designado por SIFS (*Short Inter-Frame Spacing*). A utilização de confirmação positiva no acesso ao meio possibilita a detecção de erros por parte da estação origem e justifica-se pelos elevados níveis de ruído e interferência do canal de transmissão. A confirmação positiva imediata só pode ser utilizada com tramas dirigidas. Em consequência, a transmissão de tramas de difusão (*broadcast*) e de grupo (*multicast*) é menos robusta. O mecanismo de reserva de canal é baseado na troca de mini-tramas RTS (*Request-To-Send*) e CTS (*Clear-To-Send*) entre a estação origem e a estação destino, antes do envio da trama de dados propriamente dita. A RTS e a CTS difundem informação sobre o intervalo de tempo em que o canal irá estar ocupado, desde o fim da RTS (ou CTS) até ao fim da ACK. Cada estação mantém um temporizador, designado por NAV (*Network Allocation Vector*), que indica o tempo remanescente de ocupação do canal. O NAV deve ser actualizado sempre que seja recebida uma RTS ou uma CTS. As estações só podem transmitir quando o NAV expirar. Deste modo, as mini-tramas RTS e CTS reservam

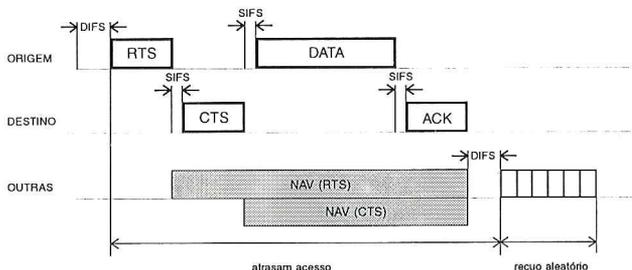


Figura 4: Mecanismo de acesso ao meio.

o acesso ao meio para a transmissão da trama de dados. A Figura 4 ilustra o mecanismo de acesso ao meio.

O mecanismo de reserva do canal permite combater o problema das estações escondidas [38]. Uma estação A que não detecta a actividade no canal produzida por uma estação B diz-se *escondida* de B. Na Figura 5 a estação B está escondida da estação A (mas não de C). A estação A transmite para C mas a estação B não detecta a actividade no canal resultante dessa transmissão. A estação B pode então transmitir interferindo com a transmissão de A. No entanto, se A e C trocarem mini-tramas, RTS e CTS, com indicação da duração da ocupação do canal, a estação B, embora não ouvindo directamente a estação A, será informada através da mini-trama CTS da duração da ocupação do canal pelas estações A e C e não irá interferir com a transmissão da trama DATA enviada por A. Note-se que este mecanismo não impede colisões entre tramas RTS enviadas simultaneamente de A e B. No entanto, esta possibilidade é menos gravosa para a utilização que é feita do canal de transmissão pois as tramas RTS têm um comprimento relativamente curto.

IV. A TECNOLOGIA DE INFRAVERMELHOS

A utilização da tecnologia de infravermelhos como suporte das redes de comunicações de área local não-cabladas foi inicialmente proposta por Gfeller [26].

A. Aspectos gerais

As ligações físicas de infravermelhos em espaço livre são baseadas em modulação de intensidade (da portadora óptica) e detecção directa, à semelhança das ligações guiadas por fibra óptica. A modulação de intensidade é obtida variando a corrente de um díodo LASER ou de um LED. A detecção directa é efectuada por fotodíodos PIN ou APD que produzem uma corrente eléctrica proporcional à potência óptica incidente. Os componentes utilizados com maior frequência são os LEDs e os fotodíodos PIN.

A radiação infravermelha apresenta propriedades muito

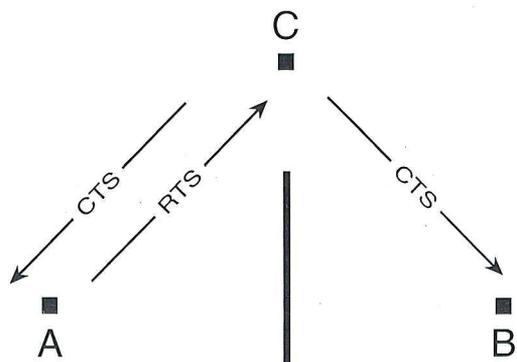


Figura 5: Utilização de mini-tramas RTS e CTS no combate ao problema das estações escondidas.

semelhantes à radiação óptica visível. As superfícies típicas dos ambientes interiores são, em geral, boas reflectoras da radiação infravermelha. Exceptuam-se as superfícies escuras (com absorção elevada) e as superfícies transparentes (com transmissividade elevada). Esta propriedade tem duas consequências importantes. Por um lado, a radiação infravermelha pode propagar-se através de múltiplas reflexões nas superfícies do ambiente de propagação. A propagação através de múltiplos percursos pode provocar interferência-entre-símbolos, sendo este fenómeno designado por dispersão multipercurso (*multipath dispersion*). Por outro lado, a colocação de obstáculos entre emissor e receptor pode provocar uma atenuação muito significativa da radiação. Este fenómeno é designado por obstrução (*shadowing*).

A largura de banda de uma ligação de infravermelhos em espaço livre é essencialmente determinada pela interferência-entre-símbolos provocada pela dispersão multipercurso. A interferência-entre-símbolos não é significativa até taxas de transmissão da ordem dos 10 Mbps [23].

As fontes de iluminação dos ambientes interiores (luz solar e luz artificial gerada por lâmpadas incandescentes e fluorescentes) radiam nos comprimentos de onda do sinal (de informação) óptico, sendo a sua intensidade no fotodetector geralmente muito superior à intensidade do próprio sinal. A luz ambiente provoca ruído quântico, devido à natureza aleatória do processo de fotodeteção. Além disso, a luz artificial provoca interferência devido às variações periódicas da intensidade de luz. Estas variações ocorrem a uma frequência dupla da frequência da rede de distribuição de energia ou à frequência de comutação dos balastros electrónicos das lâmpadas fluorescentes [34,35]. Estes tipos de ruído tomam a designação de *ruído ambiente*. Em geral, o ruído ambiente é o factor de degradação dominante das ligações físicas de infravermelhos em espaço livre.

Para além do ruído ambiente, as ligações de infravermelhos em espaço livre podem ainda ser afectadas por ruído gerado no receptor e por interferência electromagnética externa (não óptica) de vários tipos, nomeadamente a provocada pela rede de distribuição de energia. Em geral, a interferência electromagnética externa pode ser bastante atenuada através da adopção de um conjunto de medidas: blindagem do pré-amplificador e dos fotodetectores, filtragem das alimentações e utilização de percursos diferenciais no receptor [37]. O ruído do receptor tem essencialmente duas componentes: (i) ruído térmico associado à resistência de polarização do fotodetector e (ii) ruído térmico associado à resistência do canal, se o pré-amplificador for baseado num transistor de efeito-de-campo, ou ruído quântico associado à corrente de base e de colector, se o pré-amplificador for baseado num transistor bipolar.

Numa ligação em espaço livre os utilizadores estão directamente expostos à radiação infravermelha. Níveis

excessivos de radiação podem provocar lesões ao nível ocular (córnea e retina). A extensão destas lesões depende de muitos factores, incluindo a intensidade e o tempo da exposição, o comprimento de onda e as dimensões da área activa do emissor óptico. Existem normas internacionais de segurança que impõem limites aos níveis de potência óptica emitida [27]. Na prática, estas normas restringem a potência óptica emitida a algumas centenas de mW. Também a necessidade de reduzir ao máximo o consumo de potência das estações alimentadas a bateria, conjugada com a reduzida eficiência de conversão optoelectrónica dos dispositivos emissores ópticos, constitui um factor limitativo dos níveis de potência óptica emitida.

A possibilidade de obstrução da ligação e o ruído ambiente intenso impelem à utilização de níveis elevados de potência óptica emitida. No entanto, conforme discutido anteriormente, os níveis de potência óptica emitida estão à partida limitados por normas internacionais de segurança e pelo consumo de potência das estações. Daqui resulta que o sinal transmitido deve ser condicionado por forma a permitir a sua detecção com uma Relação-Sinal-Ruído o menor possível. As técnicas de modulação da posição do impulso (PPM - *Pulse Position Modulation*) são consensualmente aceites como as que oferecem melhores características para a transmissão em canais de transmissão deste tipo [2,23,40].

A utilização de múltiplos canais nas ligações físicas de infravermelhos em espaço livre (através de multiplexagem na frequência ou no comprimento de onda) é difícil de realizar com a tecnologia actualmente disponível. Por um lado, a necessidade de recorrer a técnicas de modulação eficientes em termos de potência exclui a possibilidade de multiplexagem na frequência [23]. Por outro lado, a multiplexagem no comprimento de onda obrigaria à utilização de díodos LASER e filtros ópticos de interferência e acarretaria custos elevados.

B. O transceptor de infravermelhos

O diagrama de blocos de um transceptor de infravermelhos está representado na Figura 6. Quando o transceptor recebe uma trama para transmissão da subcamada MAC acrescenta-lhe um conjunto de campos que se destinam a permitir que o receptor possa sincronizar-se com a trama recebida e executar outras funções características da camada física. Em seguida, a trama é modulada por forma a adaptar os sinais transmitidos

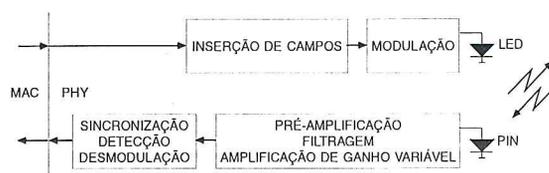


Figura 6: Transceptor de infravermelhos.

às características do canal de transmissão. Finalmente o sinal é injectado numa matriz de LEDs, que converte o sinal eléctrico em sinal óptico. No receptor o sinal óptico é convertido novamente em sinal eléctrico por uma matriz de PINs que tem a si associado um pré-amplificador de baixo ruído. O sinal é ainda filtrado e amplificado (por um amplificador com controle automático de ganho). O receptor utiliza posteriormente os campos introduzidos pela camada física para se sincronizar com a trama recebida. Após sincronização o receptor procede à detecção e desmodulação da trama recebida.

C. Classificação dos sistemas de infravermelhos

Os sistemas de infravermelhos podem classificar-se, quanto à forma como as estações estabelecem a ligação óptica entre si, em três tipos: ponto-a-ponto, quasi-difusos e difusos (Figura 7).

Nos sistemas *ponto-a-ponto* a ligação entre emissor e receptor é *em linha-de-vista*: o emissor e o receptor estão intencionalmente orientados um para o outro e existe um caminho de propagação desobstruído entre eles. Tanto o emissor como o receptor são directivos, sendo a directividade um compromisso entre o alcance da ligação e a tolerância ao alinhamento das interfaces ópticas.

Num sistema *quasi-difuso* (ou célula quasi-difusa) a ligação entre emissor e receptor é feita através de um único reflector. As ligações emissor-reflector e reflector-receptor são em linha-de-vista. O emissor e o receptor são directivos e estão intencionalmente orientados para o reflector. A função do reflector é distribuir a radiação óptica por toda a célula. O reflector pode ser activo (designa-se, neste caso, por *satélite*) ou passivo (normalmente uma zona no tecto da sala). Nas células com reflector passivo o reflector deve ter boas propriedades difusoras e reflectoras. Nas células com satélite, o sinal óptico recebido é processado electricamente (regenerado, reformatado e retemporizado) e retransmitido pelo satélite.

Num sistema *difuso* (ou célula difusa) a ligação entre emissor e receptor é feita através de múltiplas reflexões nas superfícies do ambiente de propagação. Tanto o emissor como o receptor são não-directivos e estão orientados arbitrariamente. Idealmente, o sinal óptico recebido deve ser independente da posição e orientação do receptor. A especificação IEEE 802.11 destina-se a sistemas difusos.

V. A ESPECIFICAÇÃO DA CAMADA FÍSICA DE INFRAVERMELHOS

As normas para sistemas de comunicações têm em vista especificar o sistema por forma a possibilitar a interoperabilidade de equipamentos de diferentes fabricantes. Sendo assim, a norma deve apenas conter a

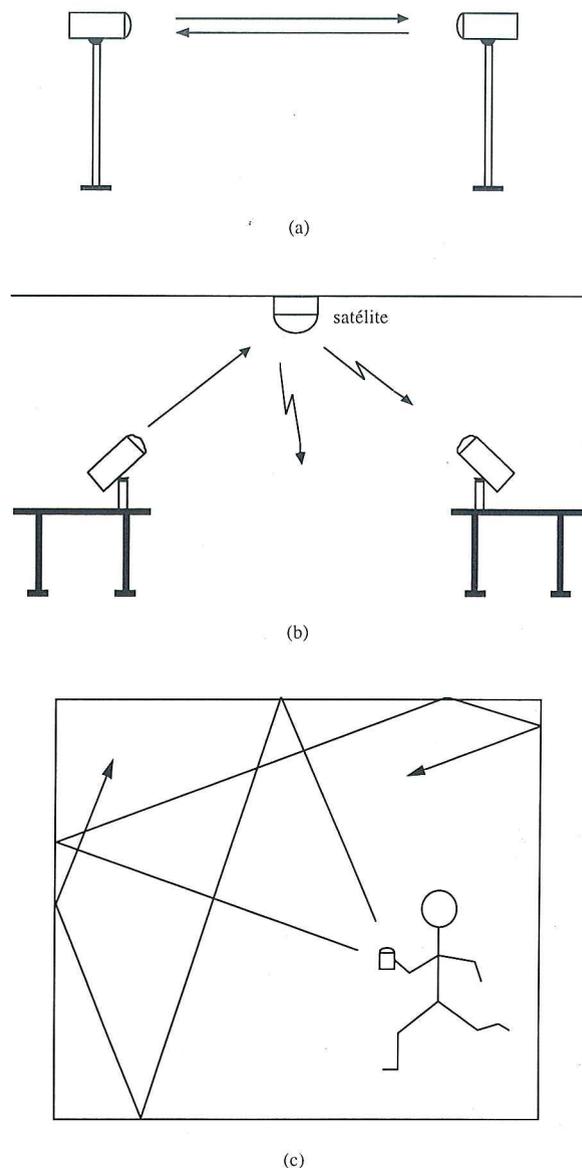


Figura 7: Modos de operação dos sistemas de infravermelhos; (a) ponto-a-ponto, (b) quasi-difuso, (c) difuso.

especificação de um conjunto mínimo de parâmetros que permitam garantir essa interoperabilidade e deve ser independente de potenciais implementações. Foi de acordo com estes princípios que foi especificada a camada física de infravermelhos da norma IEEE 802.11.

A camada física de infravermelhos suporta duas velocidades de transmissão: 1 e 2 Mbps. A especificação de duas velocidades de transmissão teve como objectivo permitir (i) uma migração suave para velocidades mais elevadas e (ii) um funcionamento assimétrico da BSS. É utilizada uma modulação diferente em cada velocidade de transmissão: 16-PPM a 1 Mbps e 4-PPM a 2 Mbps. Esta solução teve em vista garantir a manutenção do impulso elementar às duas velocidades de transmissão, minimizando-se assim a complexidade adicional introduzida pela velocidade de 2 Mbps. Assim, os circuitos do emissor e receptor podem ser praticamente

idênticos (em particular, pode ser usado o mesmo pré-amplificador nas duas velocidades de transmissão), sendo as alterações mais significativas introduzidas ao nível dos circuitos de aquisição de sincronismo [7]. Os sinais PPM a 1 e 2 Mbps estão representados na Figura 8. Note-se que na modulação PPM uma sequência de k bits é codificada numa, e apenas numa, das 2^k posições de um símbolo PPM. A duração nominal do impulso elementar (e, portanto, de cada posição do símbolo) é de 250 ns.

A. Formato da trama inicialmente proposto

Conforme referido anteriormente, o transceptor deve acrescentar à trama entregue pela MAC um conjunto de campos que permitam executar as funções características da PHY. O formato da trama da camada física inicialmente proposto pela Universidade de Aveiro está representado na Figura 10 [7]. É constituído pelos seguintes campos: SYNC (também designado por *préambulo*), SFD (*Start-of-Frame Delimiter*), DR (*Data Rate*), DCLA (*DC Level Adjustment*), MPDU (*MAC Protocol Data Unit*) e EFD (*End-of-Frame Delimiter*). Todos os campos são formados por sequências de impulsos elementares (com 250 ns de duração). Apenas o campo MPDU é transmitido com modulação PPM. Esta opção teve em vista minimizar o *overhead* introduzido pela camada física e simplificar algumas funções como, por exemplo, a extração de relógio.

O campo SYNC tem como funções principais permitir que os circuitos do receptor adquiram um sinal de relógio estável (sincronismo de posição) e que detectem a actividade no canal (*Carrier Sense*). É formado por uma sequência alternada de presença e ausência de impulsos elementares em posições consecutivas, "...10101010", o que corresponde a uma onda quadrada de 2 MHz. Outras funções (opcionais) que podem ser efectuadas durante a recepção do campo SYNC são a estimação da Relação-Sinal-Ruído, o ajuste dos circuitos de controle automático de ganho e a sectorização do receptor [5,32,39]. O campo SYNC tem um comprimento variável, entre 57 e 73 posições.

Logo que o receptor adquira o sincronismo de posição inicia a busca do campo SFD. Este processo está ilustrado na Figura 9 (indica-se entre parênteses a distância de Hamming, isto é, o número de bits de diferença entre o SFD e o SYNC em cada posição de busca). O SFD foi optimizado de modo a minimizar simultaneamente a probabilidade de imitação durante a recepção do campo SYNC e a probabilidade de erro na posição correcta (em

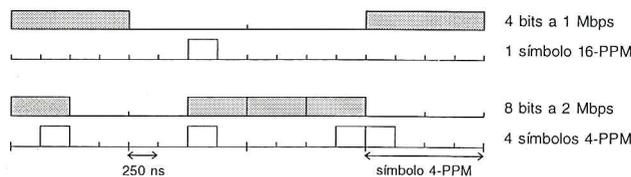


Figura 8: Sinais PPM a 1 e 2 Mbps.

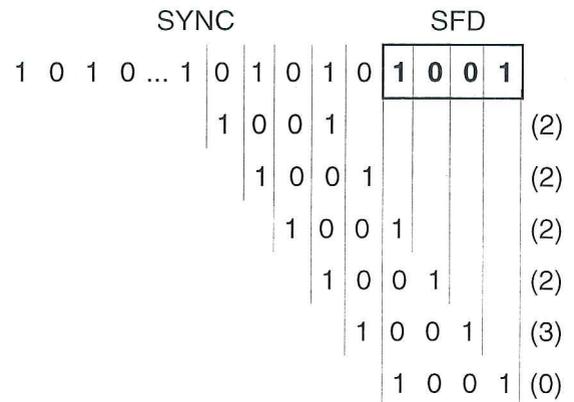


Figura 9: Processo de busca do SFD.

que o SFD foi transmitido) [8]. O SFD é formado pela sequência de 4 posições:

- 1001
- 1000
- 0100
- 0010

O campo DR indica qual a velocidade de transmissão a que irão ser transmitidos os campos subsequentes. O comprimento deste campo é de 3 posições, o que permite codificar até oito velocidades de transmissão. As sequências presentemente atribuídas são:

- 1 Mbps: 000
- 2 Mbps: 001
- 1 Mbps: 2 × símbolo '8' (16-PPM)
- 2 Mbps: 8 × símbolo '2' (4-PPM)

Após a detecção do campo DR será feita a sincronização de bit e de símbolo.

A densidade de impulsos nos campos SYNC, SFD e DR é consideravelmente superior à do campo MPDU, onde são transportados os dados entregues à camada física pela MAC. O campo DCLA tem como função permitir que os circuitos do receptor se adaptem a esta transição na densidade de impulsos. As sequências que formam este campo são [7]:

O campo EFD tem como função delimitar o fim da trama. A existência de delimitadores de fim de trama é importante porque a trama da MAC não inclui um campo que indique o seu comprimento. O receptor inicia a busca do EFD logo que começa a recepção do MPDU. A detecção do EFD é dificultada pela possibilidade de imitação durante a recepção do MPDU e pela possibilidade de erro na posição correcta. O EFD pode ser de dois tipos: implícito (baseado na ausência de impulsos) ou explícito (baseado numa sequência de impulsos particular). Dado que um sinal 16-PPM pode apresentar até 30 posições consecutivas sem impulsos, seriam necessárias pelo menos 31 posições para detectar um EFD implícito. No entanto, neste caso, um erro no MPDU, provocado pela não detecção de um impulso transmitido, poderia provocar a imitação do EFD. Seria então

SYNC	SFD	DR	DCLA	MPDU	EFD
57-73 posições	4 posições	3 posições	32 posições	número variável de octetos	16 posições

Figura 10: Formato da trama da camada física inicialmente proposto.

necessário um EFD com 46 posições de comprimento para permitir que um erro não provocasse imitação do EFD, 62 posições para permitir 2 erros e por aí adiante. Além disso, a probabilidade de erro do EFD implícito na posição correcta é muito elevada: um erro no EFD provocado pela detecção de um impulso não transmitido, assegura de imediato que o EFD não seja detectado. Poderá ser detectado mais tarde, mas nessa altura a trama já estará perdida, uma vez que a trama da MAC não possui um campo de comprimento. Por este conjunto de razões optou-se por um EFD explícito, contendo violações à regra de codificação PPM. A sequência que forma o EFD é:

- 0000011011011011

Deve ser declarado um EFD válido logo que sejam detectados os 7 impulsos na posição correcta. Este EFD é mais robusto que o EFD implícito uma vez que são necessários pelo menos 8 erros para que seja declarado um falso EFD. Também a probabilidade de erro na posição correcta é inferior porque se estão a procurar apenas 8 impulsos em posições particulares previamente conhecidas. Além disso, a utilização de um EFD explícito permite uma detecção muito mais rápida do EFD (16 posições contra um mínimo de 31 posições no caso de EFD implícito), o que contribui para uma diminuição do *overhead* introduzido pela camada física. Existe ainda a possibilidade do EFD explícito não ser detectado. Por esta razão, o mecanismo de detecção de actividade deverá indicar a ausência de impulsos no meio por um período superior a 16 μ s (64 posições).

B. Formato da trama (final)

Após ter sido avançada esta proposta para o formato da trama, verificou-se que o SFD, embora optimizado em termos da probabilidade de erro de trama, não estava de acordo com os requisitos funcionais do projecto 802 [29]. Estes requisitos obrigam à existência de uma distância de Hamming mínima de 4 no campo que delimita o início da trama. Isto significa que o SFD só poderá ser imitado durante a recepção do campo SYNC se ocorrerem 4 ou mais erros. Ora, no formato de trama inicialmente proposto, o SFD poderia ser imitado se ocorressem 2 ou mais erros, conforme ilustrado na Figura 9. Foi então necessário alterar os campos do cabeçalho da camada física [11]. Para resolver este problema consideraram-se duas soluções: utilizar um SFD mais comprido ou incluir um campo de indicasse o comprimento da trama, LENGTH, protegido por um CRC (*Cyclic Redundancy Check*). No primeiro caso, seriam necessárias pelo menos 9 posições para garantir uma distância de Hamming de 4. No segundo caso, a delimitação do início de trama seria efectuada conjuntamente pelos campos LENGTH e CRC e a trama só seria entregue à MAC após descodificação de um CRC válido. Isto garantiria uma probabilidade de falsa

detecção de início de trama muito reduzida. Além disso, o campo de comprimento permitiria delimitar o fim de trama, o que dispensaria com vantagem o EFD. Este conjunto de razões levou a que se optasse por esta última solução.

O formato da trama da camada física está representado na Figura 11. Os campos SYNC, SFD, DR, e DCLA são idênticos aos da proposta inicial. O campo LENGTH indica o número de octetos que são transmitidos no MPDU. O campo CRC protege o campo LENGTH e define o início do MPDU.

C. Diagrama de radiação do emissor

O diagrama de radiação do emissor [13] foi especificado admitindo que o emissor seria constituído por uma matriz de LEDs e que as estações estariam posicionadas num plano paralelo ao tecto e orientadas verticalmente. A especificação teve em vista (i) minimizar as perdas de propagação, (ii) permitir a operação num conjunto alargado de ambientes de propagação e (iii) garantir a observância dos limites de irradiância emitida impostos pelas normas de segurança [14].

Uma matriz emissora com os LEDs todos orientados verticalmente provoca uma concentração excessiva de irradiância em torno do emissor. Claramente, o número, a orientação, a directividade e a potência óptica dos LEDs que formam a matriz emissora são parâmetros que podem ser optimizados por forma a uniformizar a distribuição espacial da irradiância, e minimizar assim as perdas de propagação [1,3,31]. Idealmente, a irradiância deve ter um valor constante ao longo de toda a célula, ligeiramente superior à sensibilidade do receptor.

O processo utilizado para definir a especificação do diagrama de radiação é relativamente complexo. A definição procurou minimizar as perdas de propagação, considerando simultaneamente as tolerâncias associadas à diversidade dos ambientes de propagação e à própria matriz emissora (tolerâncias na orientação e características ópticas dos LEDs). A diversidade de ambientes de propagação foi considerada através da tipificação em duas classes: grandes espaços abertos e salas fechadas. Este processo é detalhado em [13].

O diagrama de radiação é especificado através da máscara representada na Figura 12. A máscara é definida por duas curvas (a cheio) correspondentes à irradiância (normalizada à potência óptica de pico) em função do ângulo entre o eixo do emissor e o eixo de um receptor de teste, para uma distância entre emissor e receptor de 1 metro. A potência óptica de pico no emissor deve ser 2W \pm 20%. As duas curvas a cheio representam os limites, inferior e superior, da irradiância medida pelo receptor de teste.

SYNC	SFD	DR	DCLA	LENGTH	CRC	MPDU
57,73 posições	4 posições	3 posições	32 posições	16 bits	16 bits	número variável de octetos

Figura 11: Formato da trama da camada física (final).

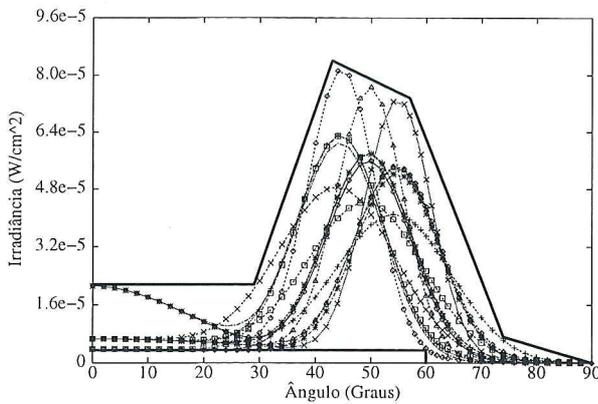


Figura 12: Máscara do diagrama de radiação do emissor.

Na Figura 12 representam-se também diagramas de radiação correspondentes a diferentes tolerâncias de uma matriz emissora implementada com 11 LEDs comercialmente disponíveis: 1 LED com orientação vertical, ângulo a-meia-potência de 41° e potência óptica de 15 mW e 10 LEDs com elevação de 50° , ângulo a-meia-potência de 9° e potência óptica de 11 mW. Consideraram-se os seguintes valores máximos para as tolerâncias: 10% para o ângulo de elevação, 25% para o ângulo a-meia-potência do LED mais estreito e 50% para o ângulo a-meia-potência do LED mais largo.

D. Campo-de-vista do receptor

O campo-de-vista do receptor é especificado em termos da percentagem de potência recebida num conjunto de ângulos de incidência (Tabela 1). O ângulo de incidência, θ_i , é definido como o ângulo entre o eixo do receptor e o sinal óptico incidente. A percentagem de potência recebida, P_R , define-se como a relação entre a potência recebida com incidência θ_i e a potência recebida com incidência normal (0°).

E. Outros parâmetros do emissor e do receptor

Os parâmetros ópticos do emissor e do receptor foram definidos por forma a possibilitar implementações de baixo custo com LEDs e fotodíodos PIN:

- Potência óptica de pico: 2 Watts \pm 20%.
- Comprimento de onda de pico: entre 850 nm e 950 nm.
- Impulso elementar:
 - largura: 250 ns \pm 10 ns;

θ_i	P_R
$\leq 20^\circ$	$\geq 65\%$
$\leq 40^\circ$	$\geq 55\%$
$\leq 60^\circ$	$\geq 35\%$
$\leq 80^\circ$	$\geq 10\%$

Tabela 1: Especificação do campo-de-vista do receptor.

- tempo de comutação (subida e descida): ≤ 40 ns;
- jitter: ≤ 10 ns.

F. Suporte de velocidade de transmissão adicional

Com o objectivo de minorar a percentagem de estações escondidas é especificado o mesmo alcance a 1 e 2 Mbps. Isto requer aproximadamente a mesma energia por símbolo a 1 e 2 Mbps. Dado que a densidade de impulsos num sinal 4-PPM é 4 vezes superior à de um sinal 16-PPM, a potência óptica média emitida a 2 Mbps é aproximadamente 6 dB superior à potência óptica média emitida a 1 Mbps. No entanto, uma vez que as tramas a 2 Mbps demoram metade do tempo a ser transmitidas resulta uma penalidade em termos de energia óptica por trama de aproximadamente 3 dB. O consumo de potência adicional associado à transmissão a 2 Mbps levou a especificar esta velocidade como opcional. Em resumo, a transmissão a 2 Mbps é opcional enquanto que a transmissão a 1 Mbps e a recepção a 1 e 2 Mbps são obrigatórias.

G. Sensibilidade do receptor

Na especificação IEEE 802.11, a sensibilidade do receptor é definida como a irradiância mínima que garante uma probabilidade de erro de trama inferior a 4×10^{-5} , para um MPDU com um comprimento de 512 octetos e um nível de ruído ambiente de 0.1 mW/cm^2 . A sensibilidade é:

- 1 Mbps: $< 2 \times 10^{-5} \text{ mW/cm}^2$
- 2 Mbps: $< 8 \times 10^{-5} \text{ mW/cm}^2$

A probabilidade de erro de trama é afectada pela probabilidade de aquisição de sincronismo durante o campo SYNC, pela probabilidade de erro na detecção dos campos SFD, DR, LENGTH e CRC e pela probabilidade de erro no campo MPDU [7]. Não é imposto qualquer limite à sensibilidade máxima do receptor, com o objectivo de garantir a interoperabilidade com receptores mais sensíveis (recorrendo, por exemplo, às técnicas de diversidade propostas em [5,32,39]).

É dada ao fabricante total liberdade na implementação do receptor, desde que seja respeitada esta especificação de sensibilidade. Por exemplo, o fabricante poderá escolher a área activa dos PINs, o tipo de detector PPM (máxima verosimilhança ou limiar [7]), as técnicas de filtragem (eléctrica e óptica) do ruído ambiente, etc.

H. Gama dinâmica do receptor

A potência óptica recebida por uma estação pode variar significativamente com a posição e orientação da estação relativamente ao emissor. O receptor deve ter então uma gama dinâmica elevada. Na especificação IEEE 802.11 a gama dinâmica define-se como a diferença entre a

irradiância máxima e a irradiância mínima que garante uma probabilidade de erro de trama inferior a 4×10^{-5} , para um MPDU com um comprimento de 512 octetos e um nível de ruído ambiente de 0.1 mW/cm^2 . A gama dinâmica do receptor deve ser maior ou igual a 30 dB.

VI. CONCLUSÕES

Neste artigo foram apresentadas as principais contribuições da Universidade de Aveiro para a especificação da rede de área local não-cablada IEEE 802.11. A Universidade de Aveiro propôs uma especificação completa para a camada física de infravermelhos que foi aceite para inclusão na norma praticamente sem alterações. Esta participação teve em vista garantir que o protótipo da rede de área local não-cablada por raios infravermelhos desenvolvida pela Universidade de Aveiro no âmbito do projecto ESPRIT.6892 POWER seria compatível com uma norma internacional.

LISTA DAS CONTRIBUIÇÕES AO IEEE 802.11

- [1] C. Lomba, R. Valadas, A. Duarte, "Propagation Losses and Impulse Response of the Indoor Optical Channel: A Simulation Package", Document IEEE P802.11 - 93/78, Wilmington, DE, USA, May 10-13, 1993.
- [2] A. Moreira, R. Valadas, A. Duarte, "Modulation / Encoding Techniques for Wireless Infrared Transmission", Document IEEE P802.11 - 93/79, Wilmington, DE, USA, May 10-13, 1993.
- [3] C. Lomba, R. Valadas, A. Duarte, "Update of Propagation Losses and Impulse Response of the Indoor Optical Channel", Document IEEE P802.11 - 93/142, Atlanta, GA, USA, September 20-23, 1993.
- [4] A. Moreira, R. Valadas, A. Duarte, "Infrared Modulation Method: 16 Pulse Position Modulation (PPM)", Document IEEE P802.11 - 93/154, Atlanta, GA, USA, September 20-23, 1993.
- [5] R. Valadas, A. Duarte, "Sectored Receivers for Indoor Wireless Optical Communication Systems", Document IEEE P802.11 - 94/66, Vancouver, BC, Canada, March 7-11, 1994.
- [6] A. Moreira, R. Valadas, A. Duarte, "IR PHY Template", Document IEEE P802.11 - 94/95, Oshawa, Ontario, Canada, May 9-12, 1994.
- [7] A. Moreira, C. Lomba, R. Aguiar, R. Valadas, A. Duarte, "IR PHY Proposal", Document IEEE P802.11 - 94/96, Oshawa, Ontario, Canada, May 9-12, 1994.
- [8] A. Moreira, A. Sousa, R. Aguiar, R. Valadas, A. Duarte, "Performance Evaluation of the IR PHY Proposal", Document IEEE P802.11 - 94/97, Oshawa, Ontario, Canada, May 9-12, 1994.
- [9] R. Valadas, B. Dobyms, "IR PHY Baseband Template", Document IEEE P802.11 - 94/130, Oshawa, Ontario, Canada, May 9-12, 1994.
- [10] R. Valadas, B. Dobyms, "Physical Layer Draft Specification for Baseband Infrared Media", Document IEEE P802.11 - 94/152, Orlando, FD, USA, July 11-14, 1994.

- [11] A. Moreira, R. Valadas, A. Duarte, "Proposed Revision of the Infrared Baseband Frame Format", Document IEEE P802.11 - 94/153, Orlando, FD, USA, July 11-14, 1994.
- [12] A. Moreira, R. Valadas, A. Duarte, "Definition of the Infrared Baseband Transmit Spectrum Mask", Document IEEE P802.11 - 94/154, Orlando, FD, USA, July 11-14, 1994.
- [13] C. Lomba, R. Valadas, A. Duarte, "Radiation Pattern Specification for the Baseband IR PHY", Document IEEE P802.11 - 94 / 173, San Antonio, Texas, USA, August 29-September 1, 1994.
- [14] C. Lomba, R. Valadas, A. Duarte, "Safety Issues of the Baseband IR PHY", Document IEEE P802.11 - 94/174, San Antonio, Texas, USA, August 29-September 1, 1994.
- [15] A. Moreira, R. Valadas, A. Duarte, "Response to the Document P802.11 - 94/151", Document IEEE P802.11 - 94/175, San Antonio, Texas, USA, August 29-September 1, 1994.
- [16] B. Dobyms, R. Valadas, R. Samdhal, "Changes to the Infrared Baseband PHY in the Draft IEEE P802.11 - 93/20b2", Document IEEE P802.11 - 94/182, San Antonio, Texas, USA, August 29-September 1, 1994.
- [17] L. Moreira, A. Moreira, R. Valadas, A. Duarte, "Measurements of the Power Spectral Density of a 16-PPM @1Mbps Optical Signal", Document IEEE P802.11 - 94/267, Incline Village, USA, 7-11 November, 1994.
- [18] R. Valadas, A. Moreira, C. Lomba, A. Tavares, L. Moreira, R. Aguiar, C. Oliveira, A. Duarte, "Changes to the Infrared Baseband PHY in the Draft IEEE P802.11 - 93/20b3", Document IEEE P802.11 - 94/256, Incline Village, USA, 7-11 November, 1994.
- [19] B. Dobyms, A. Moreira, "Still More Changes to the Infrared Baseband PHY in the Draft IEEE P802.11 - 93/20b3", Document IEEE P802.11 - 94/288, Incline Village, USA, 7-11 November, 1994.
- [20] R. Valadas, "Response to question on IR PHY CCA", Document IEEE P802.11 - 95/179, Maui, Hawaii, USA, July 10-14, 1995.
- [21] W. Diepstraten, B. Dobyms, P. Brenner, R. Valadas, "Required MAC Functions to Support Multirate PHY's", Document IEEE P802.11 - 94/164, San Antonio, Texas, USA, August 29-September 1, 1994.

OUTRAS REFERÊNCIAS

- [22] B. Bantz, F. Bauchot, "Wireless LAN Design Alternatives", IEEE Network, March/April 1994, pp. 43-53.
- [23] J. Barry, "Wireless Infrared Communications", Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [24] ETSI TC-RES; Radio Equipment and Systems, High Performance Radio Local Area Network (HIPERLAN); Services and Facilities - ETR 69 - February 1993.
- [25] ETSI TC-RES; Radio Equipment and Systems, High Performance Radio Local Area Network (HIPERLAN); System Definition Document - ETR 133 - June 1994.
- [26] F. Gfeller, U. Bapst, "Wireless In-House Data Communication via Diffuse Infrared Radiation", Proceedings of the IEEE, vol. 67, no. 11, November 1979, pp. 1474-1486.

- [27] IEC 825 - 1 : "Safety of Laser Products - Part 1: Equipment Classification, Requirements, and User's Guide", first edition, International Electrotechnical Commission, 1993.
- [28] IEEE Standards, "Overview and Architecture", 1990.
- [29] Functional Requirements, IEEE Project 802, Draft 6.10, Revised: Nov 12, 1992.
- [30] Project IEEE 802.11, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", Draft Standard, doc. P802.11 - D3, January 1996.
- [31] C. Lomba, R. Valadas, A. Duarte, "Propagation Losses and Impulse Response of the Indoor Optical Channel: A Simulation Package", 1994 International Zurich Seminar on Digital Communications, Zurich, Switzerland, March 8-11, 1994, Conference Proceedings published in: Lecture Notes in Computer Science 783 (Springer Verlag, Heidelberg, 1994), pp. 285 - 297.
- [32] C. Lomba, R. Valadas, A. Duarte: "Sectored Receivers to Combat the Multipath Dispersion of the Indoor Optical Channel", Proceedings of the 1995 Sixth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Communications, PIMRC'95, Toronto, Canada, September 27-29, 1995, pp. 321 - 325.
- [33] A. Mehrotra, "Cellular Radio", Artech House, 1994.
- [34] A. Moreira, A. Tavares, R. Valadas, A. Duarte, "Modulation methods for wireless transmission systems - Performance under ambient light noise and interference", Proceedings of the SPIE First International Symposium on Photonics Technologies and Systems for Voice, Video, and Data Communications - Wireless Data Transmission, Volume 2601, Philadelphia, Pennsylvania, USA, October 23-26, 1995, pp. 226 - 237.
- [35] A. Moreira, R. Valadas, A. Duarte: "Characterisation and Modelling of Artificial Light Interference in Optical Wireless Communication Systems", Proceedings of the 1995 Sixth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Communications, PIMRC'95, Toronto, Canada, September 27-29, 1995, pp. 326 - 331.
- [36] A. Tanenbaum, "Computer Networks", Prentice-Hall, 1988.
- [37] A. Tavares, A. Moreira, C. Lomba, L. Moreira, R. Valadas, A. Duarte: "Experimental Results of a 1 Mbps IR Transceiver for Indoor Wireless Local Area Networks", Proceedings of the COMCON 5 - 5th International Conference on Advances in Communications and Control, Rithymna, Crete, Greece, June 26-30, 1995, pp. 717-727.
- [38] F. Tobagi, L. Kleinrock, "Packet Switching in Radio Channels: Part II - The Hidden Terminal Problem in Carrier Sense Multiple-Access and the Busy-Tone Solution", IEEE Transactions on Communications, vol. COM-23, nº 12, December 1975, pp. 1417-1433.
- [39] R. Valadas, A. Duarte, "Sectored Receivers for Indoor Wireless Optical Communication Systems", Proceedings of the Fifth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Communications, PIMRC'94, The Hague, The Netherlands, September 18-22, 1994, pp. 1090-1095.
- [40] R. Valadas, V. Sequeira, C. Lomba, A. Moreira, A. Duarte, "System Aspects in Infrared Communications", in Report EUR 14932 EN, European Commission, WINS Wireless In-House Network Studies, ESPRIT project 5631, edited by A. Duarte e G. Veiga.
- [41] R. Valadas, "Redes de Comunicações de Área Local não-Cabladas por Raios Infravermelhos", Tese de Doutoramento, Departamento de Electrónica e Telecomunicações, Universidade de Aveiro, Novembro de 1995.