

# Universidade do Algarve

Faculdade de Ciência e Tecnologia

Redes Rádio sobre Fibra:

Influência da Camada MAC do Protocolo 802.11 no  
Desempenho da Rede

Roberto Jorge Raposo da Costa

Mestrado em Engenharia Electrónica e Telecomunicações

2012

Universidade do Algarve

Faculdade de Ciência e Tecnologia

Redes Rádio sobre Fibra:

Influência da Camada MAC do Protocolo 802.11 no  
Desempenho da Rede

Dissertação orientada pela  
Prof. Doutora Maria do Carmo Medeiros

Roberto Jorge Raposo da Costa

Mestrado em Engenharia Electrónica e Telecomunicações

2012

# RESUMO

As redes de comunicação de nova geração, sejam elas por cabo ou sem fios, têm sido uma área onde os investigadores têm apostado muito e por consequência tem havido imenso desenvolvimento. As tecnologias FTTx (*Fiber To The x*) já são uma realidade em alguns países, em especial a FTTH (*Fiber To The Home*) onde se tem apostado muito nos últimos anos em Portugal. Para além de chegar às casas (edifícios), a fibra óptica já penetrou nos edifícios, sendo actualmente a sua instalação regulamentada através do manual do ITED (Prescrições e Especificações Técnicas das Infra-estruturas de Telecomunicações em Edifícios). Por outro lado, a utilização das redes sem fios tem vindo a crescer em detrimento da rede cablada. Em alguns cenários de aplicação, onde existia uma rede de fibra óptica instalada, um edifício que não seja totalmente coberto pelo router sem fios poderá beneficiar dessa cobertura, se o sinal wireless for transmitido transparentemente no domínio óptico através de fibra óptica e convertido novamente para o domínio eléctrico, num ponto remoto do edifício.

Nesta dissertação, inicialmente é elaborada uma análise à tecnologia Rádio sobre Fibra, evidenciando-se as vantagens e desvantagens da sua aplicação. São também apresentados alguns dos possíveis cenários de aplicação da mesma com alguns exemplos reais. O padrão IEEE 802.11 é exposto, dando-se especial atenção à sua camada MAC, as suas principais funções e os seus modos de funcionamento. Por fim, são analisadas eventuais influências da camada MAC do IEEE802.11 no funcionamento e performance das redes Radio sobre Fibra.

O Modelo de Simulação utilizado nesta dissertação é apresentado e são também apresentados alguns dos conceitos principais e benefícios da utilização. O sistema que se pretende desenvolver e simular é também apresentado assim como o simulador utilizado na elaboração deste trabalho. O seu modo de funcionamento é explicado, assim como a sua estrutura.

Por fim, são simulados alguns cenários utilizando o simulador de eventos OMNeT++ onde se pretende verificar o desempenho de um sistema RoF, fazendo variar o comprimento de uma fibra óptica que liga dois equipamentos a trocar mensagens entre si.

**Palavras-chave:** Rádio sobre Fibra, wireless, camada MAC, IEEE 802.11, atraso de propagação, mensagens, comunicação.

# SUMMARY

New generation communication networks, whether they are wired or wireless, have been an area where researchers have invested much time and by consequence there has been a lot of development. FTTx (*Fiber To The x*) technologies are already a reality in some countries, especially FTTH (*Fiber To The Home*), in which Portugal has been investing for some years.

Besides reaching into houses (buildings), fiber optics has already been used in buildings and currently its installation is regulated by the ITED rules. On the other hand, the use of wireless networks has been growing in comparison to wired networks. In some application scenarios, where there was a fiber optic network installed, a building that is not fully covered by the wireless router can benefit from that coverage if the wireless signal is transparently transmitted in the optical domain using fiber optic and being converted back to the electrical domain at a remote point in the building.

This thesis starts with an overview from the Radio over Fiber technology, searching for some advantages and disadvantages of its application. There are also presented some of the possible application scenarios, with some real examples. The IEEE 802.11 standard is exposed giving special focus to its MAC layer, its main functions and operation modes. Finally, some possible influences of the IEEE 802.11 MAC layer in the performance of Radio over Fiber networks are taken into consideration.

The Simulation Model is also addressed in this thesis, some key concepts are presented along with some benefits of using it. The system to be developed and simulated is also presented, as well as the simulator used in the preparation of this work. Moreover, its working operation is explained as well as its structure.

Finally, some scenarios are simulated using the OMNeT++ event simulator where we expect to check the performance of a RoF system, by changing the length of an optical fiber connecting two devices that exchange messages with each other.

**Keywords:** Radio over Fiber, wireless, MAC layer, IEEE 802.11, propagation delay, messages, communication.

# AGRADECIMENTOS

A terminar esta tese de Mestrado resta-me registar os meus agradecimentos às pessoas que de forma directa ou indirecta contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Sou muito grato aos meus pais, por todo o apoio e incentivo que me deram durante todos estes anos, especialmente ao meu pai, a quem dedico este trabalho e infelizmente não pode presenciar esta etapa da minha vida. À minha mãe e irmã, pelos incentivos e força que me foram dando durante os tempos mais difíceis da jornada académica, o tempo que me dedicaram e o amor e alegria que partilharam comigo. À minha namorada que sempre me apoiou, deu força, coragem e motivação para eu conseguir alcançar os meus objectivos propostos e esteve sempre ao meu lado nos meus momentos difíceis.

A todos os meus colegas e amigos que fiz durante o meu percurso académico, especialmente os meus colegas da Versus Tuna, os quais me proporcionaram muitos bons momentos de lazer e de descontração que foram fundamentais para sobreviver durante estes anos todos.

A todos os meus professores que durante o curso contribuíram para o enriquecimento dos meus conhecimentos e da minha formação pessoal e profissional. Agradeço em especial à minha orientadora, a Professora Doutora Maria do Carmo Medeiros pela oportunidade que me deu de trabalhar com este tema e o apoio e suporte necessário para a concretização deste trabalho.

Agradeço ainda a oportunidade que tive em realizar um estágio na Visabeira, o que não só contribuiu para um enriquecimento a nível pessoal, cultural e profissional como me forneceu um contacto directo com o mundo das telecomunicações na rede fixa e rede móvel, acompanhando de perto todo o seu processo de criação e desenvolvimento.

O meu profundo e sentido agradecimento a todas estas pessoas que contribuíram para a concretização desta dissertação, estimulando-me intelectual e emocionalmente.

# CONTEÚDO

Resumo .....	iii
Summary .....	iv
Agradecimentos.....	v
Conteúdo .....	vi
Índice de Figuras .....	viii
Índice de Tabelas .....	x
Abreviaturas .....	xi
1. Introdução .....	1
1.1. Sistemas de Comunicações Móveis.....	3
1.2. Motivação .....	6
1.3. Ferramentas Utilizadas.....	6
1.4. Estrutura da Tese .....	7
2. Tecnologia Rádio sobre Fibra .....	8
2.1. Vantagens da tecnologia RoF .....	11
2.2. Limitações da tecnologia RoF .....	12
2.3. Cenários de Aplicação da Tecnologia RoF .....	12
2.3.1. Road Vehicle Communication (RVC).....	13
2.3.2. Fiber to the Antenna (FTTA) .....	15
2.3.3. Áreas Rurais .....	18
2.3.4. Rede Metropolitana de Lisboa .....	18
2.3.5. Fiber to the Home (FTTH).....	21
3. IEEE 802.11 Wireless LAN .....	24
3.1. Frames do IEEE 802.11 .....	25
3.1.1. Frames de Controlo .....	26
3.2. Camada MAC do IEEE 802.11 .....	27
3.2.1. Distributed Coordination Function .....	28

	Conteúdo
3.2.2. Point Coordination Function .....	30
3.2.3. Funções de Gestão .....	31
3.2.4. Influência do MAC 802.11 nas redes RoF.....	33
4. Modelo de Simulação .....	35
4.1. O Simulador Adoptado .....	38
4.1.1. Estrutura do Modelo.....	39
4.2. Metodologia da Simulação .....	42
4.2.1. Mobile Host .....	43
4.2.1.1. Traffic Generator.....	44
4.2.2. Remote Antenna Unit.....	45
4.2.3. Central Station .....	47
4.2.4. Fibra (canal).....	47
5. Simulações e Resultados.....	49
5.1. Teste ao Gerador de Tráfego .....	49
5.2. Parâmetros definidos nas Simulações .....	51
5.3. Cenário I – 1 Host.....	52
5.4. Cenário II – 5 Host's .....	54
6. Conclusões .....	56
7. Referências Bibliográficas.....	58

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Relação entre os Standards (Mobilidade vs Taxas de Transferência) [1] .....	1
Figura 1.2 - Exemplo de uma ligação entre dois terminais móveis.....	3
Figura 1.3 - Diagrama de blocos de uma BTS [4].....	4
Figura 1.4 - Ilustração de um site BTS (a) e um Shelter ou contentor (b) .....	4
Figura 1.5 - Relação entre os alarmes e o Centro de Supervisão .....	5
Figura 2.1 - Esquema ilustrativo de uma rede Rádio sobre Fibra.....	9
Figura 2.2 - Diagrama de blocos ilustrando uma rede WLAN sobre fibra [8].....	9
Figura 2.3 - Atenuação em cabo coaxial (a) e em Fibra Óptica (b) [13] .....	11
Figura 2.4 - Road Vehicle Communication System baseado na tecnologia RoF [14].....	13
Figura 2.5 - Arquitectura de um sistema RVC baseado na tecnologia RoF [14].....	14
Figura 2.6 - Sistemas de comunicações móveis convencionais e FTTH [16].....	15
Figura 2.7 - Exemplos de Remote-radio heads com ligações de fibra óptica [16].....	16
Figura 2.8 - Antenas colocadas no topo de uma estrutura metálica.....	16
Figura 2.9 - Evolução da arquitectura da BTS [18].....	17
Figura 2.10 - Planta geral do Metro de Lisboa com a localização das RU [20] .....	19
Figura 2.11 - Antena Logarítmica Periódica (Kathrein) instalada na estação de Picoas [20] .....	19
Figura 2.12 - Antena Interior Omnidireccional (Kathrein) instalada na estação de Picoas [20] .....	19
Figura 2.13 - Diagrama de utilização das Fibras Ópticas do Metro de Lisboa [20].....	20
Figura 2.14 - Esquema de uma possível rede FTTH/GPON [25] .....	22
Figura 2.15 - Exemplo de uma rede integrada, com as tecnologias FTTH e RoF [21] .....	22
Figura 3.1 - Modelo OSI e o IEEE 802.11 .....	24
Figura 3.2 – Formato das frames do IEEE 802.11 .....	26
Figura 3.3 – Formato de uma frame ACK [27].....	26
Figura 3.4 – Formato de uma frame RTS [27].....	27
Figura 3.5 – Formato de uma frame CTS [27].....	27
Figura 3.6 - Arquitectura do MAC [27] .....	27
Figura 3.7 - Funcionamento do modo DCF com RTS/CTS/ACK [27].....	28
Figura 3.8 - Aumento exponencial do CW [27].....	29
Figura 3.9 - Mecanismo básico de acesso ao meio [27].....	29
Figura 3.10 - Problema do Hidden Node .....	30

---

Figura 3.11 - Funcionamento do modo PCF [27].....	31
Figura 3.12 – Fases da ligação entre uma estação e um AP no IEEE 802.11 [27] .....	33
Figura 3.13 - Throughput in the RTS-CTS Access Method [30] .....	34
Figura 4.1 - Interface gráfica (GUI) do OMNeT++ .....	38
Figura 4.2 – Representação gráfica da rede Tic Toc [35].....	40
Figura 4.3 – Processo de construção e execução de uma simulação em OMNeT [36] ....	41
Figura 4.4 – Modelo que se pretende simular em OMNeT++.....	42
Figura 4.5 – Módulo Mobile Host criado no OMNeT.....	43
Figura 4.6 - Relação entre a distribuição de Poisson e Exponencial.....	44
Figura 4.7 - Exemplo ilustrativo do tamanho dos pacotes e intervalo entre eles .....	45
Figura 4.8 – Remote Antenna Unit criado no OMNeT .....	46
Figura 4.9 – Central Station criado no OMNeT.....	47
Figura 5.1 - Pacotes criados pelos Mobile Hosts.....	49
Figura 5.2 – Contagem de pacotes gerados pelo Host[0] .....	50
Figura 5.3 – Probability Density para os pacotes gerados no Host[0] .....	50
Figura 5.4 – Cumulative Density para os pacotes gerados no Host[0] .....	50
Figura 5.5 - Mensagens enviadas entre os módulos (1 Host com fibra de 8km).....	53
Figura 5.6 - Resumo de mensagens enviadas por 1 host numa fibra de 8km.....	53
Figura 5.7 - Mensagens enviadas entre os módulos (5 Hosts com fibra de 8km).....	54
Figura 5.8 – Resumo das mensagens enviadas por 5 hosts com uma fibra de 8km.....	55
Figura 5.9 – Variação do throughput registado na CS numa simulação (5hosts com uma fibra de 8km).....	55

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1 - Tipos de sinais rádio que podem ser transmitidos em RoF [3].....	8
Tabela 4-1 - Vantagens e desvantagens da utilização de simulação [32].....	37
Tabela 4-2 – Definição dos módulos e das ligações entre estes (Tic Toc) [35].....	40
Tabela 5-1 – Parâmetros definidos nas simulações .....	51
Tabela 5-2 – Resultados das simulações com 1 Host.....	52
Tabela 5-3 – Resultados das simulações com 5 Hosts .....	54

# ABREVIATURAS

1G	First Generation
2G	Second Generation
3G	Third Generations
ACK	Acknowledgement
AP	Access Point
BBU	Base Band Unit
BS	Base Station
BSC	Base Station Controller
BTS	Base Transceiver Station
CO	Central Office
CS	Central Station
CSMA/CA	Carrier-Sence Multiple Access with Collision Avoidance
CFP	Contention Free Period
CTS	Clear To Send
CW	Contention Window
dB	Decibel
DCF	Distributed Coordination Function
DIFS	Distributed Coordination Function Inter-frame Space
DSL	Digital Subscriber Line
EAM	Electro-absorption Modulator
EAT	Electro-absorption Transceiver
EIFS	Extended Inter-frame Space
EMI	Electro Magnetic Interference
E/O	Electrical-to-Optical (conversion)
FCS	Frame Check Sequence
FTTA	Fiber to the Antenna
FTTH	Fiber to the Home
GB	Gigabyte
GPON	Gigabit Passive Optical Network
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile communications
GUI	Graphical User Interface

---

HDTV	High Definition Television
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IF	Intermediate Frequency
IFS	Inter-frame Space
IPTV	Internet Protocol Television
ISP	Internet Service Provider
kbps	kilobit per second
Km	Kilometre
LAN	Local Area Network
LD	Laser Diode
LLC	Logical Link Control
MAC	Medium Access Control
MAN	Metropolitan Area Network
Mbps	Megabit per second
mm-wave	Millimeter-wave
MPDU	MAC Protocol Data Unit
MSC	Mobile Switching Center
MSDU	MAC Service Data Unit
MU	Mobile Unit
NAV	Network Allocation Vector
nm	Nanometre
O/E	Optical-to-Electrical (conversion)
ODF	Optical Fiber Distribution Frame
OLT	Optical Line Terminal
ONT	Optical Network Terminal
OSI	Open Systems Interconnection
PAN	Personal Area Network
PIFS	PCF Inter-frame Space
PC	Point Coordinator
PCF	Point Coordination Function
PD	Photodiode
PDA	Personal Digital Assistant
PON	Passive Optical Network
PHY	Physical
PLCP	Physical Layer Convergence Protocol
RAU	Remote Antenna Unit

---

RBS	Radio Base Station
RF	Radio Frequency
RIN	Relative Intensity Noise
RNC	Radio Network Controller
RoF	Radio-over-Fiber
RRH	Remote Radio Head
RRU	Remote Radio Unit
RTS	Ready To Send
RVC	Road Vehicle Communication
SFP	Small Form-factor Pluggable
SIFS	Short Inter-frame Space
SMS	Short Message Service
SSB	Single Sideband
SSID	Service Set Identifier
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VCS	Virtual Carrier Sence
VOIP	Voice over Internet Protocol
WLAN	Wireless Local Area Network
WEP	Wired Equivalent Privacy

# 1. INTRODUÇÃO

O número de utilizadores de redes móveis e redes sem fios tem vindo a apresentar um crescimento enorme nos últimos anos [1], existe cada vez mais utilizadores com acesso a telemóveis ou mesmo computadores portáteis. Este crescimento faz com que os ISPs (*Internet Service Providers*) sintam a necessidade de acompanhar o crescimento do número de utilizadores e consigam satisfazer as necessidades da maior parte destes.

Os avanços tecnológicos e a competição entre operadoras também tiveram o seu contributo para este crescimento. Os sistemas de comunicação de primeira geração (1G – *First Generation*), que apenas eram destinados a fornecer aplicações de voz e serviços *circuit-switched*, evoluíram até ao GSM (*Global System for Mobile communications*) que é ainda hoje o mais utilizado a nível de redes móveis e permite uma cobertura não só nacional como também internacional. Os sistemas GSM permitem comunicação de dados, embora as taxas de transferência sejam limitadas a algumas dezenas de kbps. Actualmente nos sistemas WLAN (*Wireless Local Area Network*) as taxas de transferência já são na ordem dos Mbps, sendo possível atingir taxas de 54 Mbps para o IEEE 802.11a/g.

O aumento do número de “hotspots” em locais públicos foi surpreendente e as WLAN chegaram inclusive até às casas dos utilizadores através dos modems de acesso xDSL (*Digital Subscriber Line*) e cabo.

A Figura 1.1 apresenta a relação entre alguns dos vários padrões em termos de mobilidade (área de cobertura) e a velocidade das transferências de dados.

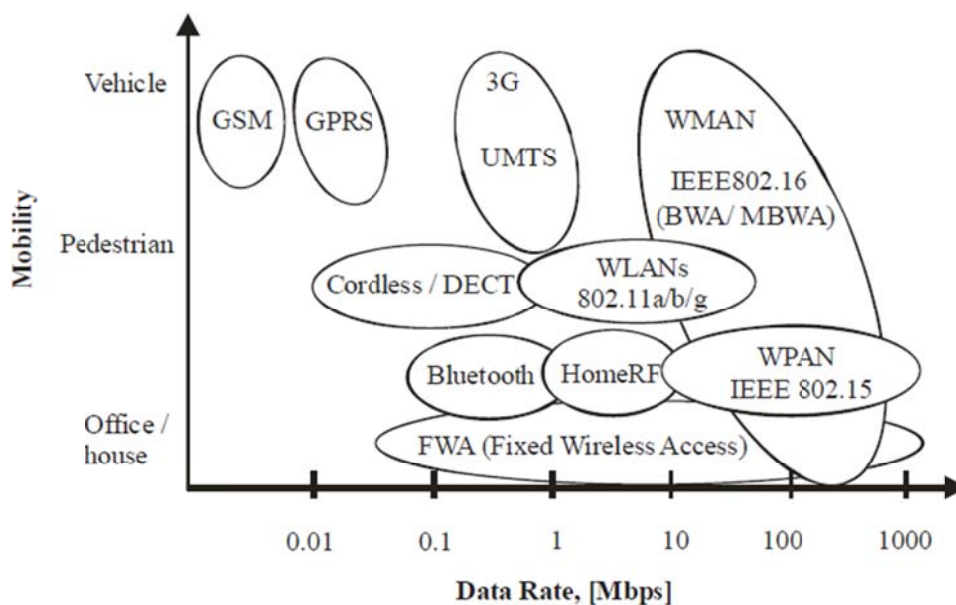


Figura 1.1 - Relação entre os Standards (Mobilidade vs Taxas de Transferência) [1]

---

Nos últimos anos o uso da tecnologia WLAN tem vindo a aumentar significativamente, tornando-se assim um componente crítico nas redes de computadores. O seu crescimento deve-se ao facto do IEEE 802.11 ser reconhecido como padrão assim como as especificações WLAN. Deste modo o IEEE 802.11 WLAN tornou-se muito popular por oferecer mobilidade e os serviços essenciais de rede aos utilizadores [1,2].

Relativamente às LAN (*Local Area Network*), as WLAN oferecem vantagens tais como a mobilidade e facilidade de instalação. Os utilizadores podem se mover fisicamente quando utilizam um dispositivo móvel (computador portátil, PDA, ou telemóvel) continuando a aceder à rede desde que recebam um sinal rádio suficientemente forte para descodificar correctamente as frames recebidas. No que diz respeito à instalação das redes, a instalação de uma LAN é uma operação muito mais demorada e até mesmo complexa se a LAN alterar a sua configuração física. Por outro lado, o tempo de instalação de uma WLAN é reduzido pois não há a necessidade de instalar os cabos como nas LAN. Além disso a maior parte dos produtos WLAN são compatíveis com o IEEE 802.11 e a maior parte dos fornecedores de WLAN IEEE 802.11 seguem o padrão. Os dispositivos WLAN estão inclusive a ser incorporados em telemóveis.

Apesar de durante muitos anos as comunicações rádio terem sido a forma predominante da técnica de comunicação, recentemente estas tornaram-se problemáticas uma vez que o espectro está cada vez mais lotado. Por outro lado, os sistemas de comunicações ópticas estão a expandir-se oferecendo larguras de banda muito superiores tanto em fibras como para aplicações, concorrendo directamente com os *links* de microondas. [3]

Uma abordagem alternativa que tem sido estudada é a possibilidade de entregar sinais RF (*Radio Frequency*) a partir de um número de *Base Stations* (BS) para um equipamento centralizado ou *Central Station* (CS) utilizando fibras ópticas como meio de transmissão. A estes sistemas chamamos de sistemas *Radio Over Fiber* (RoF) ou sistemas de Rádio sobre Fibra.

## 1.1. SISTEMAS DE COMUNICAÇÕES MÓVEIS

Uma comunicação é composta por um emissor, um receptor e um canal de transmissão. No caso das radiocomunicações móveis o Emissor/Receptor são os terminais móveis e o canal considera-se como todos os elementos entre emissor e receptor. Entre esses dois terminais existem várias ligações que permitem o estabelecimento da comunicação (Radiofrequência, Fibra óptica, Feixes Hertzianos, etc...) e para que esta seja estabelecida é necessário garantir a ligação entre todos os sistemas e um sincronismo entre os elementos. A Figura 1.2 ilustra um exemplo de uma ligação entre dois terminais móveis.

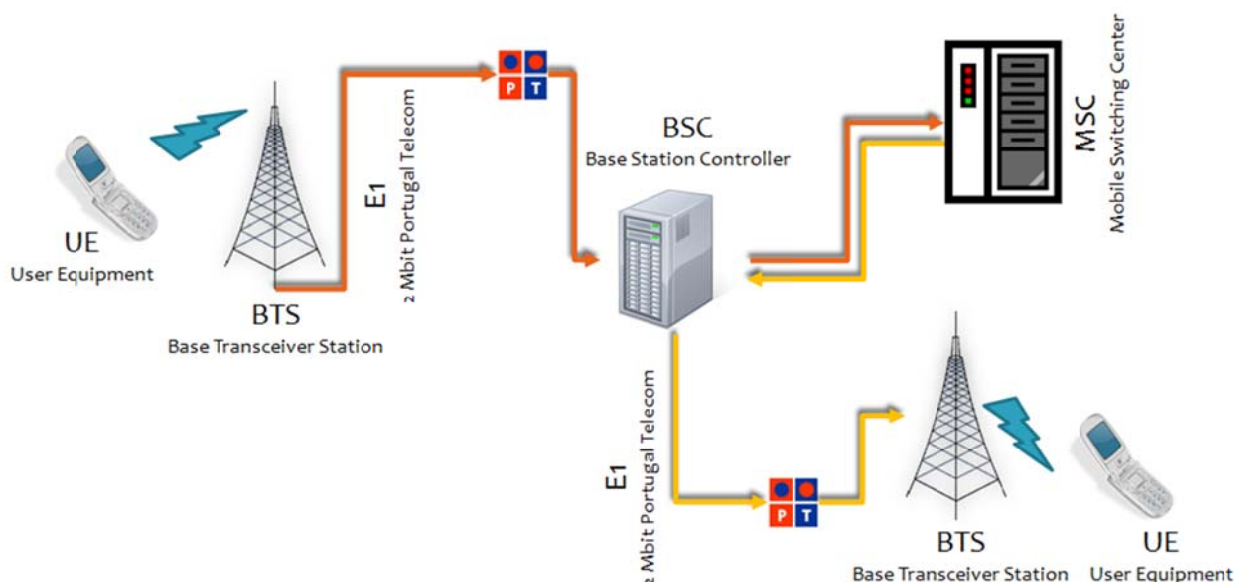


Figura 1.2 - Exemplo de uma ligação entre dois terminais móveis

A BTS (*Base Transceiver Station*) ou RBS (*Radio Base Station*) (Figura 1.3) tem como função principal estabelecer o interface rádio entre a estação base e os terminais móveis. Está conectada a uma ou mais antenas, que normalmente se encontram no topo de uma estrutura metálica ou edifício, por uma ligação de cabo coaxial. As antenas podem ser *single band* (GSM ou UMTS – Universal Mobile Telecommunications System), *multi band* ou ainda antenas omnidireccionais. A BTS comunica com a BSC (*Base Station Controller*) através de ligações E1 podendo estas ser por cabo coaxial ou fibra óptica.

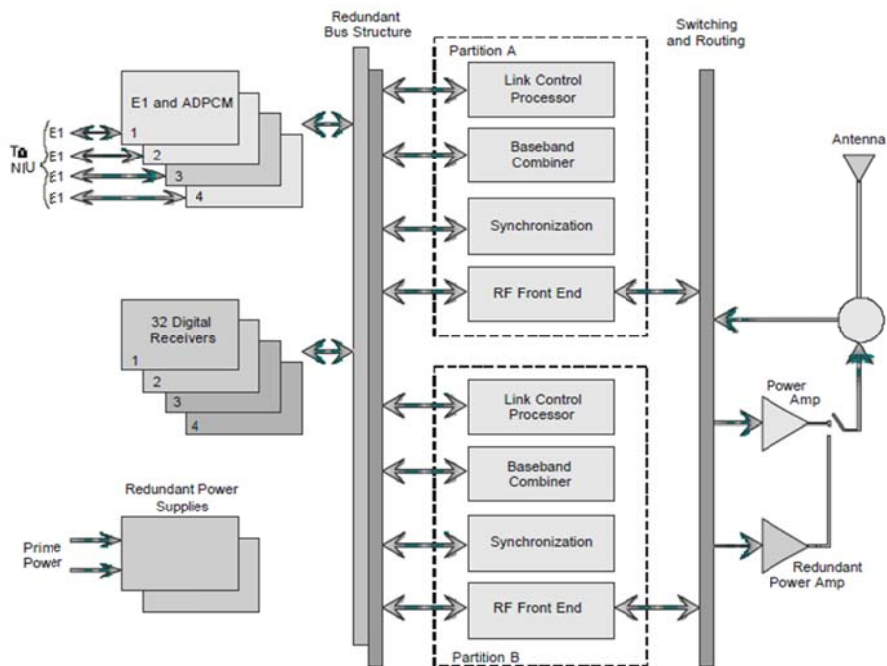
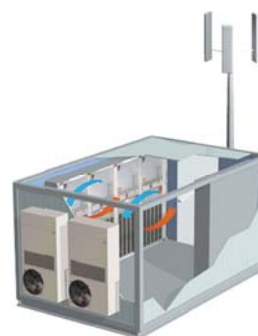


Figura 1.3 - Diagrama de blocos de uma BTS [4]

Nos sistemas de comunicações móveis todos os equipamentos de transmissão e de energia ficam alojados no interior de contentores (*Shelters*). Em alguns casos podem também ficar alojados no interior de edifícios ou num quarto de um edifício. Os contentores (Figura 1.4) são alimentados através de energia AC, podendo esta ser da rede pública de energia ou através de geradores.



(a) BTS site



(b) Shelter ou contentor

Figura 1.4 - Ilustração de um site BTS (a) e um Shelter ou contentor (b)

Os equipamentos rádio funcionam com energia DC, para tal é necessário um conversor de energia AC/DC denominado de Rectificador. O Sistema de energia DC é constituído por 3 blocos principais: Módulo de controlo/alarmes, Módulos de rectificação e Baterias. A principal função dos Módulos de Rectificação é a conversão de tensão AC em

tensão DC. É a partir destes módulos que é gerada a energia para carregar as baterias e alimentar os equipamentos rádio. As baterias acumulam energia DC e no caso de uma falha AC são estas que assumem a função de fornecer energia aos equipamentos. A autonomia das mesmas é resultante de vários factores (capacidade, temperatura no interior do contentor, consumo do equipamento).

Todos os equipamentos de transmissão geram calor, na maioria das vezes em quantidade que só é possível controlar através de sistemas de Ventilação e Ar Condicionado. Sem a ajuda do Ar Condicionado, a temperatura no interior do contentor poderá atingir valores demasiado altos para o correcto funcionamento dos equipamentos rádio e também alterar a performance e durabilidade das baterias.

É da maior importância para os operadores de telecomunicações, manter as suas infra-estruturas funcionais pois são o suporte de toda a rede. Para tal, os contentores estão equipados com um conjunto de alarmes (alarmes externos), que são transmitidos para o Centro de Supervisão do operador (Figura 1.5) no caso de falha ou avaria de algum destes elementos.

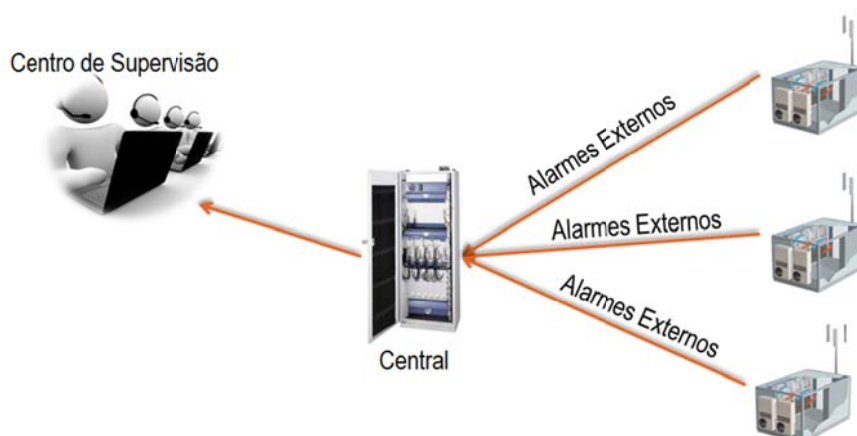


Figura 1.5 - Relação entre os alarmes e o Centro de Supervisão

A BSC é o equipamento que funciona com as redes de Segunda Geração (2G – *Second Generation*) enquanto a RNC (*Radio Network Controller*) é o equipamento responsável pelas redes de Terceira Geração (3G – *Third Generation*). As BSC e as RNC são responsáveis por controlar as estações base (BTS/RBS), nomeadamente o processo de handover's entre BTS/RBS e a centralização de software para as mesmas. [5]

O MSC (*Mobile Switching Center*) é o elemento central de uma rede, é o responsável pela gestão das comunicações entre Emissor/Receptor (identificar o tipo de chamada, a origem e o destino) e realizar tarefas como comutação de chamadas ou encaminhamento de chamadas entre utilizadores, base de dados e controlo de utilizadores (atribuição de serviços/perfis aos utilizadores), taxação, interligação de sistemas como *VoiceMail* e SMS (*Short Message Service*) center. [5]

---

Todos os equipamentos descritos acima são parte integrante de um sistema de comunicações móvel e fundamentais para o seu correcto funcionamento. As descrições apresentadas servem para explicar de forma simplificada e resumida as funções e funcionamento dos mesmos.

De notar que a transmissão digital de sinais rádio, através de fibra, não é o conceito de rádio sobre fibra. Nos sistemas rádio sobre fibra analógicos o sinal rádio é transmitido transparentemente através do sistema de transmissão por fibra óptica, não sendo realizado processamento a nível dos dados.

## 1.2. MOTIVAÇÃO

Desde o início do curso as disciplinas da área de Redes despertaram-me interesse e fui desenvolvendo um gosto especial por esta área. Sempre que tinha oportunidade fazia os possíveis para poder frequentar as disciplinas que eram leccionadas nesta área, em especial as de Redes de Telecomunicações e Redes Móveis. Quando me foi apresentada a hipótese de trabalhar neste tema não hesitei, embora fosse algo novo para mim aceitei o desafio com vontade de aprender mais sobre a área e de conhecer uma nova tecnologia que se está a afirmar e a expandir. O facto da área das telecomunicações estar em constante actualização e desenvolvimento também me alicia, pois todos os dias temos algo novo para aprender.

Tive a oportunidade de realizar um estágio numa empresa do Grupo Visabeira, o que me proporcionou a oportunidade de acompanhar de perto a implementação e funcionamento de alguns elementos abordados nesta tese, nomeadamente a área das Redes Móveis e Soluções Wireless e a Rede Fixa, com o projecto GPON (*Gigabit Passive Optical Networks*). Considero que este estágio enriqueceu a minha formação pessoal e veio contribuir de forma positiva para os conteúdos desta tese aumentando a minha motivação, interesse e gosto pela área das telecomunicações.

## 1.3. FERRAMENTAS UTILIZADAS

A principal ferramenta utilizada no desenvolvimento deste trabalho foi o simulador de redes *OMNet++*. Foi utilizada a versão 4.1 com o pacote *INET Framework*, que oferece modelos para diversos protocolos como o TCP e o 802.11.

Foi também utilizado para o tratamento de alguns dados e criação de alguns gráficos a poderosa ferramenta MATLAB 7.9.0 (R2009b).

## 1.4. ESTRUTURA DA TESE

O restante conteúdo desta tese está dividido em cinco capítulos conforme apresentado abaixo:

- No Capítulo 2 é abordada a tecnologia Rádio sobre Fibra. É explicado o que é a tecnologia, como funciona, que equipamentos são utilizados e que tipos de sinais podem ser transmitidos. É apresentada uma breve descrição das técnicas de transporte utilizadas, são exploradas algumas das suas vantagens e limitações. Por fim são expostos alguns dos possíveis cenários de aplicação desta tecnologia.
- O Capítulo 3 é focado na camada MAC do IEEE 802.11. Começa com uma apresentação do padrão IEEE 802.11, o seu modelo OSI, as suas principais características e funções. São explorados mais ao pormenor os dois mecanismos de acesso do MAC e as suas funções de gestão. Por fim é analisado se a camada MAC do IEEE 802.11 tem algum tipo de influência no funcionamento e na performance das redes Rádio sobre Fibra.
- O Capítulo 4 é dedicado ao modelo de simulação. Começa com uma definição de simulação e a apresentação de alguns dos seus conceitos principais, são apresentadas algumas vantagens e desvantagens da utilização de simulações. De seguida é apresentado o Simulador utilizado e é explicado como este funciona e está estruturado. O capítulo termina apresentando o sistema que se pretende simular e cada um dos elementos que foram criados para as simulações realizadas.
- No capítulo 5 são realizadas algumas simulações, fazendo variar parâmetros definidos, são apresentados uma colecção de resultados obtidos para os vários cenários escolhidos.
- Para terminar, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões sobre todo o trabalho realizado, os resultados obtidos nas simulações e as principais contribuições para a realização desta tese.

## 2. TECNOLOGIA RÁDIO SOBRE FIBRA

Rádio sobre Fibra (*Radio over Fiber*) é uma tecnologia onde é possível o transporte de sinais RF através de fibras ópticas entre uma localização central (CS) e um conjunto de unidades de antenas remotas (RAUs – *Remote Antenna Units*) afastadas da CS, para suportar várias aplicações e serviços *wireless* [3,6]. Estes sistemas são importantes em várias aplicações, incluindo as comunicações móveis e WLANs. A evolução dos sistemas ópticos contribuiu para o aumento da investigação e desenvolvimento destas redes. Utilizando RoF é possível transmitir qualquer tipo de sinal rádio (Tabela 1) através de fibra óptica.

Frequency Band	Service Type
0.8 GHz	Cellular, 2G System
1.8 – 1.9 GHz	2G System
2 GHz	UMTS/3G System
2.4 GHz	Wireless LANs (IEEE 802.11 b/g)
2.6 GHz	S-DBM
3.4 GHz	4G System (TBD)
5 GHz	Wireless LANs (IEEE 802.11 a)
18/19 GHz	Indoor Wireless LANs
28 GHz	Fixed Wireless Access (LMDS)
38 GHz	Fixed Wireless Pico Cellular
58 GHz	Indoor Wireless LANs
62 – 66 GHz	Mobile

Tabela 2-1 - Tipos de sinais rádio que podem ser transmitidos em RoF [3]

A área de cobertura das RAUs é definida pelo raio das células (Figura 2.1), o tamanho destas tem influência no desempenho e capacidade das redes RoF. Para aumentar a reutilização de frequências e suportar o aumento do número de utilizadores móveis em redes rádio, as células podem ser subdivididas em unidades menores, chamadas de microcélulas. As microcélulas além de aumentarem a capacidade podem ainda reduzir o consumo de energia e o tamanho dos aparelhos celulares [6,7]. Os sinais rádio em cada célula, transmitidos entre os utilizadores móveis e as RAUs, são enviados para a CS através de fibra óptica. Cada RAU é equipada com conversores E/O (Eléctrico para Óptico), O/E (Óptico para Eléctrico) e amplificadores [2,3,7]. Os sinais rádio são recuperados a partir do sinal óptico através de detecção directa.

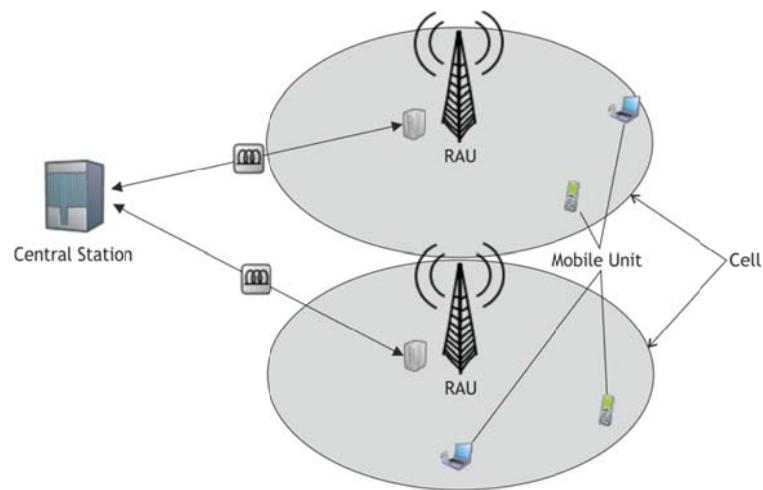


Figura 2.1 - Esquema ilustrativo de uma rede Rádio sobre Fibra

Nos sistemas de comunicação WLAN sobre fibra, as operações sobre os sinais RF tais como conversão de frequências, modulação e multiplexagem são realizadas na CS e imediatamente alimentadas na antena [8,9]. O funcionamento das RAUs é simplificado significativamente, pois apenas necessitam de efectuar conversões optoelectrónicas e amplificações [2,3,6-8]. A Figura 2.2 apresenta uma rede WLAN sobre fibra e os seus componentes.

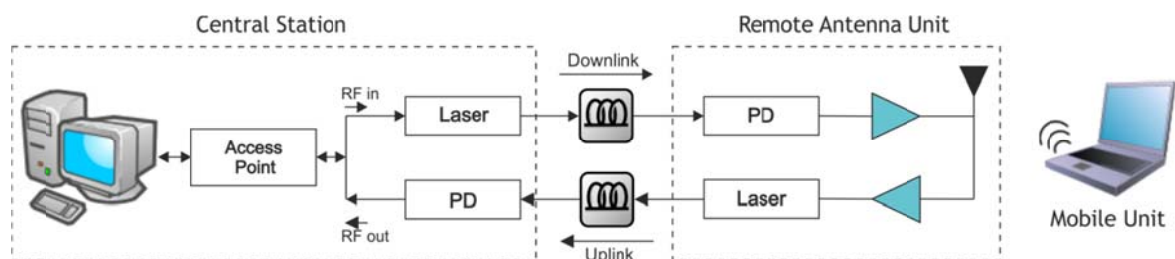


Figura 2.2 - Diagrama de blocos ilustrando uma rede WLAN sobre fibra [8]

Para o *Downlink*, o sinal RF é modulado pelo laser da CS e o sinal óptico resultante é enviado pelo caminho óptico até à RAU, onde é convertido para RF por um *Photodiode* (PD), amplificado e enviado para a MU (*Mobile Unit*). No caso do *Uplink*, o sinal proveniente da MU é recebido na RAU, amplificado e modulado pelo laser sendo depois enviado para a CS através do caminho óptico e por fim detectado pelo seu PD e transferido para o AP (*Access Point*) [8]. O caminho óptico entre a CS e as RAUs deve comportar-se como um sistema transparente e não deve modificar o formato do sinal rádio, mas sim garantir a sua entrega com a maior performance possível [9].

Relativamente às técnicas de transporte dos sinais nos sistemas RoF, têm sido investigadas várias técnicas e classificadas em quatro categorias:

- External modulation;
- Optical Heterodyning;
- Optical transceiver;
- Up and down conversion.

A *External Modulation* é realizada por um modulador externo de alta velocidade como um EAM (*Electro-absorption modulator*). A sua configuração é simples mas apresenta algumas desvantagens tais como os efeitos de dispersão da fibra e grandes perdas de inserção. Para reduzir os efeitos de dispersão é utilizada fibra óptica SSB (*single sideband*). [3,11,12]

Na técnica *Optical Heterodyning* dois ou mais sinais ópticos são transmitidos simultaneamente e no receptor são gerados novos sinais combinando as frequências dos sinais recebidos de acordo com as propriedades da função seno, em que um é a soma das frequências e o outro a diferença. Estas novas frequências resultantes são chamadas *heterodynes* e geralmente apenas uma delas é desejada, a frequência mais alta depois da modulação e a frequência mais baixa após a desmodulação. [3,11,12]

Um *Optical Transceiver* é a forma mais simples de implementar uma RAU quando utiliza um EAT (*electro-absorption transceiver*). Serve tanto como conversor O/E para o *downlink* e E/O para o *uplink*. São transmitidos dois comprimentos de onda ao longo da fibra óptica desde a CS até à RAU, em que um deles é modulado com os dados do utilizador na transmissão *downlink* e o outro é modulado com os dados na transmissão *uplink*, entre a RAU e a CS. [3,11]

Na técnica *Up and down conversion* os sinais IF (*Intermediate Frequency*) são transmitidos através da fibra óptica em vez dos sinais RF. Existem duas técnicas utilizadas, conversão eléctrica e conversão óptica. Na transmissão dos sinais IF o efeito de dispersão da fibra é quase nulo mas no entanto esta técnica implica custos superiores na implementação das RAU. [3,11,12]

## 2.1. VANTAGENS DA TECNOLOGIA RoF

Com RoF é possível centralizar todas as operações sobre os sinais RF numa localização partilhada [8] e utilizar fibra óptica que oferece baixa atenuação (0.3 dB/km para comprimentos de onda de 1500 nm e 0.5 dB/km para 1310 nm) para distribuir os sinais até às RAUs. O uso de fibras ópticas permite aumentar as distâncias de transmissão e a largura de banda utilizadas, ao mesmo tempo reduzindo as potências de transmissão requeridas e as perdas por atenuação [2,7]. Como as transmissões nas fibras ópticas são realizadas sob a forma de luz, estas são imunes a Interferências Electromagnéticas e imunes à interceptação, o que garante privacidade e segurança nas comunicações. [10]

Na Figura 2.3 é possível verificar algumas das diferenças entre cabo coaxial e fibra óptica, nomeadamente ao peso e à atenuação.

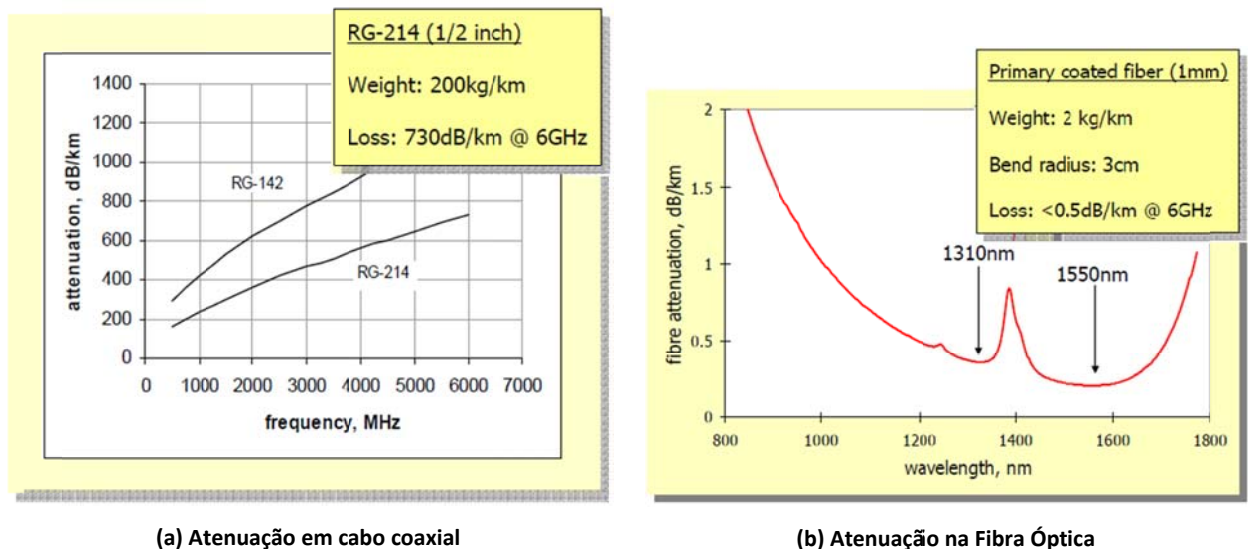


Figura 2.3 - Atenuação em cabo coaxial (a) e em Fibra Óptica (b) [13]

Ao centralizar as funções de processamento de sinal RF num local estamos a permitir a partilha de equipamento, alocação dinâmica de recursos e um plano de manutenção e operação facilitado e simplificado [7]. O funcionamento das RAUs é simplificado significativamente, pois apenas necessitam de efectuar conversões optoelectrónicas e amplificações [2,8]. Como consequência da centralização das operações mais complexas num local e a simplificação das RAUs temos uma redução do consumo de energia. [10]

As redes RoF proporcionam ainda uma transparência no que diz respeito às técnicas de modulação e suportam vários formatos digitais e os padrões *wireless* com uma relação custo-eficácia [9].

A tecnologia RoF pode ser utilizada para permitir a cobertura em áreas denominadas “*Dead-Zones*”, tais como túneis, obstáculos criados pelo homem, regiões de difícil acesso (áreas montanhosas), etc [7]. Permite ainda um controlo sobre a área de cobertura que se pretende obter, pois com a utilização de RAUs nos locais pretendidos os sinais serão transmitidos apenas onde são úteis.

Uma vez que a conectividade Wireless é geralmente a preferida pelos utilizadores finais por ser flexível e de fácil acesso, a RoF pode ser vista como uma extensão natural das redes de acesso *Fiber to the Home*.

## **2.2. LIMITAÇÕES DA TECNOLOGIA RoF**

Uma vez que a tecnologia RoF utiliza modulação analógica e detecção de luz, factores tais como ruído e distorções são factores importantes a ter em conta nas redes RoF. As fontes de ruído nas redes RoF podem ser o RIN (*Relative Intensity Noise*) do laser, o ruído térmico do amplificador, o ruído do PD e a dispersão da fibra. Em alguns casos a dispersão da fibra pode limitar os comprimentos das fibras e causar uma variação na fase ou limitar a largura de banda.

Outras limitações da tecnologia ROF estão relacionadas com os protocolos de acesso ao meio, que podem não suportar o atraso induzido pela fibra. Nesta dissertação iremos considerar o MAC (*Medium Access Control*) do IEEE 802.11. Ao introduzir um caminho óptico entre a CS e as RAU para suportar uma WLAN é necessário ter em conta o atraso de propagação extra introduzido pela fibra, uma vez que este pode influenciar os limites de tempo exigidos pelos protocolos de acesso ao meio [6,8,9]. Quando o atraso da fibra é muito elevado, este pode degradar a performance do sistema e em alguns casos em que a rede é muito sensível, pode até mesmo causar falhas na rede [6].

## **2.3. CENÁRIOS DE APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA RoF**

Alguns dos possíveis cenários de aplicação da tecnologia RoF são apresentados e descritos brevemente de seguida.

### 2.3.1. ROAD VEHICLE COMMUNICATION (RVC)

O RVC (*Road Vehicle Communication*) é uma rede de infra-estrutura instalada ao longo das estradas a pensar nos sistemas de transportes futuros. Para permitir uma largura de banda elevada para o tráfego, de modo a satisfazer os serviços de voz, dados e até vídeo em tempo real aos utilizadores, foi sugerida uma implementação RoF. Este sistema é caracterizado por possuir células muito pequenas, mas por outro lado necessita de muitas *Base Stations* instaladas para fornecer cobertura ao longo da estrada e mobilidade dos utilizadores.

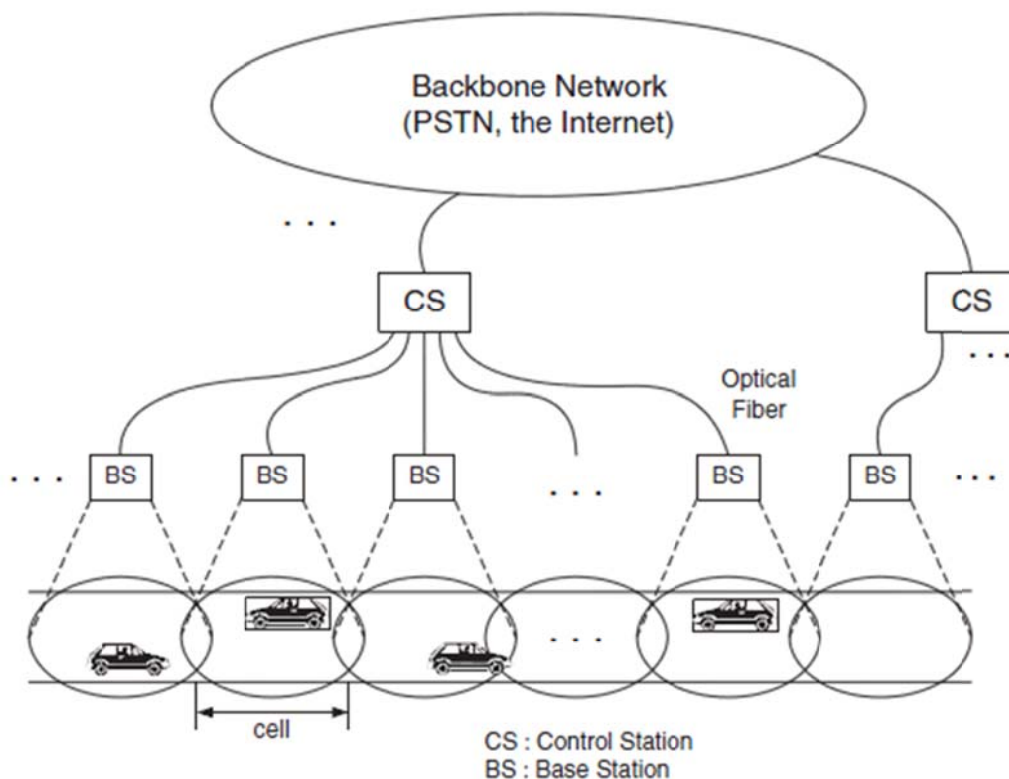


Figura 2.4 - Road Vehicle Communication System baseado na tecnologia RoF [14]

Na Figura 2.4 é apresentado um sistema RVC baseado na tecnologia RoF, em que uma CS está interligada a diversas BS instaladas ao longo de uma estrada via fibra óptica. A CS está por sua vez ligada à Internet ou a uma rede pública de telefone. Cada BS cobre uma determinada área a que se dá o nome de célula e assume-se que existe uma área em que células adjacentes se sobrepõem. Uma vez que este sistema é desenhado para bandas *millimeter-wave (mm-wave)*, os tamanhos das células deverão ser reduzidos sendo deste modo necessário um grande número de células para fornecer uma cobertura ao longo da estrada. [14]

Nas transmissões entre a CS e os *Mobile Hosts* o procedimento é idêntico ao já explicado anteriormente. Nesta arquitectura a CS tem um *transceiver* para cada BS a que está ligada, esse é composto por um *laser diode* (LD), um PD e um modem para transmitir e receber os dados no domínio RF. Na Figura 2.5 é apresentado um esquema da arquitectura da rede.

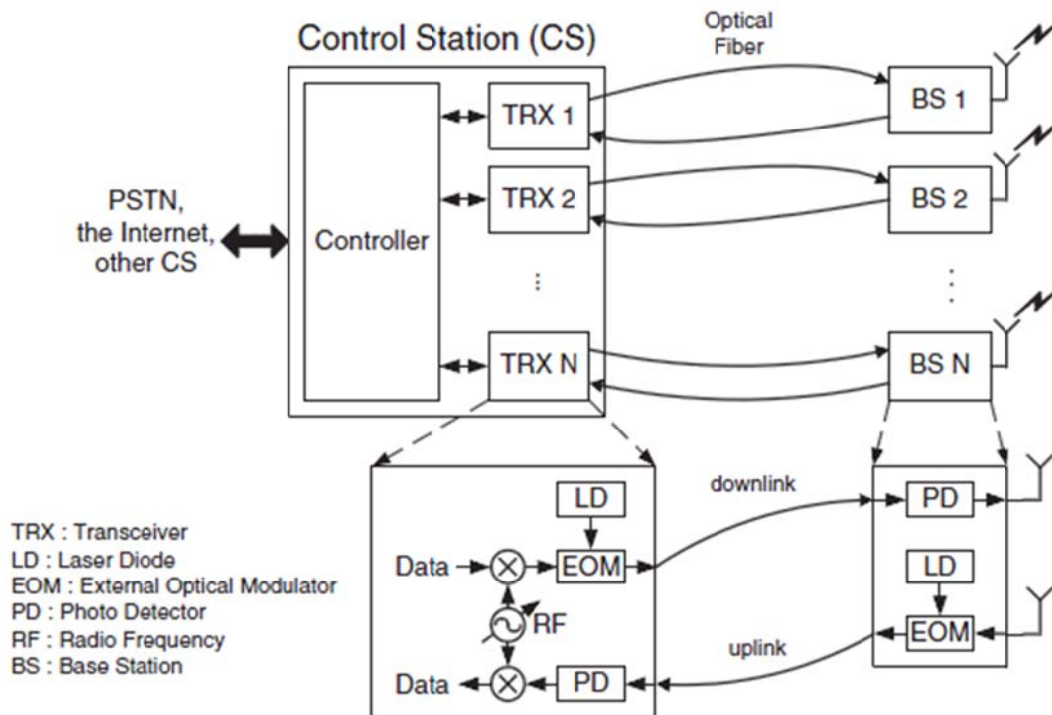


Figura 2.5 - Arquitectura de um sistema RVC baseado na tecnologia RoF [14]

O maior desafio desta implementação é garantir um sistema de *handover* rápido e eficiente. Imaginando que este sistema é instalado numa auto-estrada onde circula um veículo a 100km/h e a célula tem como raio 100m, então o utilizador irá solicitar um *handover* a cada 3.6 segundos. Tendo em conta que a área de sobreposição prevista entre duas células é de 10m, o processo de *handover* deve ser concluído em 0.36 segundos. [14]

Foi realizado um estudo sobre os custos da implementação deste sistema entre Cairo – Alexandria fornecendo uma cobertura *wireless* em cerca de 200km [15], comparando os mesmos com o cenário da implementação de um sistema convencional para o mesmo fim. No estudo realizado são apresentadas as diferenças monetárias entre a instalação como proprietário do equipamento e o aluguer do sistema, para ambos os cenários.

Os resultados mostram que é uma solução mais econômica para o operador da rede alugar um sistema RoF já instalado. Mostra também que para um fornecedor de serviços é mais rentável instalar um sistema RoF, devido aos seus baixos custos de operação e manutenção e à capacidade de recuperar rapidamente o capital investido do que alugar um destes sistemas.

### 2.3.2. FIBER TO THE ANTENNA (FTTA)

As redes móveis são uma área importante na aplicação da tecnologia RoF, uma vez que o constante aumento de utilizadores móveis provoca uma pressão nos operadores para oferecer a capacidade de satisfazer as necessidades dos mesmos. O aparecimento das redes de nova geração (3G) permite aos utilizadores velocidades mais elevadas, o Wimax como alternativa promete taxas a rondar os 72 Mb/s sendo comparado com ligações de internet via cabo.

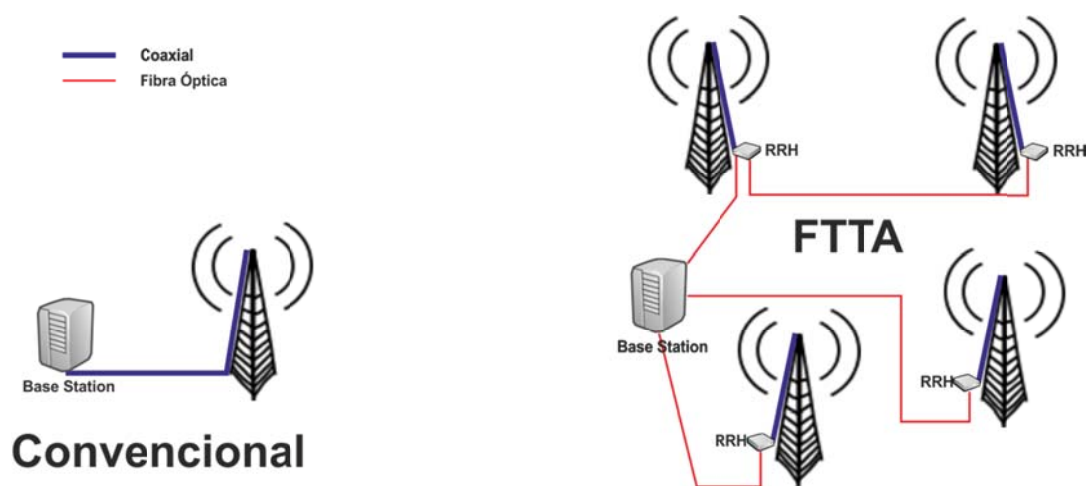


Figura 2.6 - Sistemas de comunicações móveis convencionais e FTTA [16]

Nos sistemas de comunicação móveis convencionais as ligações entre a BS e a antena utilizavam cabos de cobre, mas ao longo dos anos estes sistemas deixaram de ser competitivos e apresentar uma boa relação custo-eficiência. Nos sistemas convencionais a BS tem a função de modular os dados na banda de frequências alocada e posteriormente amplificar os sinais de alta frequência, os sinais resultantes são transmitidos via cabo coaxial para a antena que os emite para a célula rádio (Figura 2.6). A distância de transmissão via cabo coaxial está limitada a 50m dado que estes têm uma alta tendência para falhas, causando um impacto negativo na área de cobertura da célula e no *throughput*. Podem ser utilizados cabos coaxiais com menores atenuações, mas

estes são mais caros e demoram mais tempo a instalar devido ao seu diâmetro. Geralmente uma BS fornece entre 3 a 6 antenas cobrindo entre 60° ou 120° dos sectores da célula rádio. [16]



Figura 2.7 - Exemplos de Remote-radio heads com ligações de fibra óptica [16]

Nos sistemas de comunicação móvel FTTA, todas as operações sobre altas frequências e electrónica de potência são efectuadas numa *Remote Radio Head* (RRH) perto da antena. A RRH é ligada à BS através de fibra óptica (Figura 2.7). Todas as operações de controlo e processamento de sinal continuam a decorrer na BS onde existe um *transceiver* SFP (*Small Form-factor Pluggable*) responsável pela conversão E/O. O sinal óptico é transmitido com taxas de transferência típicas de 1 GB/s para a RRH que efectua a conversão O/E através de um segundo módulo SFP, seguindo-se a modulação de alta frequência do sinal e respectiva amplificação. O sinal RF é transmitido para a antena através do cabo coaxial sendo finalmente emitido por esta. [16]



Figura 2.8 - Antenas colocadas no topo de uma estrutura metálica

As antenas geralmente são colocadas no topo de estruturas metálicas ou edifícios (Figura 2.8), torna-se portanto mais cómodo trabalhar com um cabo mais leve e de

diâmetro reduzido. Uma vez que os cabos de fibra óptica têm dimensões e peso relativamente inferiores aos cabos coaxiais, a operação de instalação de um sistema FTTH torna-se mais rápida e fácil do que um sistema convencional. [7,16,17] A fibra óptica oferece ainda a possibilidade da distância entre a BS e a RRH ser entre 15 a 20km [16], é imune a descargas eléctricas e raios. Uma vez que a BS pode estar instalada a uma distância considerável do site, isto implica uma redução nos custos do aluguer do espaço necessário para o site ou mesmo para as RRH ou antenas. Actualmente todas as novas instalações de sistemas 3G utilizam *Fiber To The Antenna*, os sistemas GSM ainda continuam a ser instalados segundo a arquitectura convencional. [16]

A BS não sofreu muitas alterações nos últimos 20 anos, no entanto recentemente começaram a desenvolver algumas alterações na sua estrutura, começando a utilizar uma *Base Band Unit (BBU)* e uma *Remote Radio Unit (RRU)* ou RRH. O objectivo é retirar todas as funções sobre os sinais RF (*transceiver*, amplificação e filtragem) da BS e colocar os mesmos nessa unidade remota. A interface entre a unidade RF e BBU foi alterada de cabo coaxial para fibra óptica, removendo assim os 2-3 dB de perdas do cabo coaxial. A RRU é colocada no topo da estrutura metálica ou edifício, o mais perto da antena possível enquanto a BBU permanece dentro do *shelter* da BTS. [18]

Prevê-se que no próximo passo da evolução desta tecnologia, as RRU sejam integradas nas antenas criando assim um sistema de antenas denominado de *Integrated Radio Antenna* (Figura 2.9). [18]

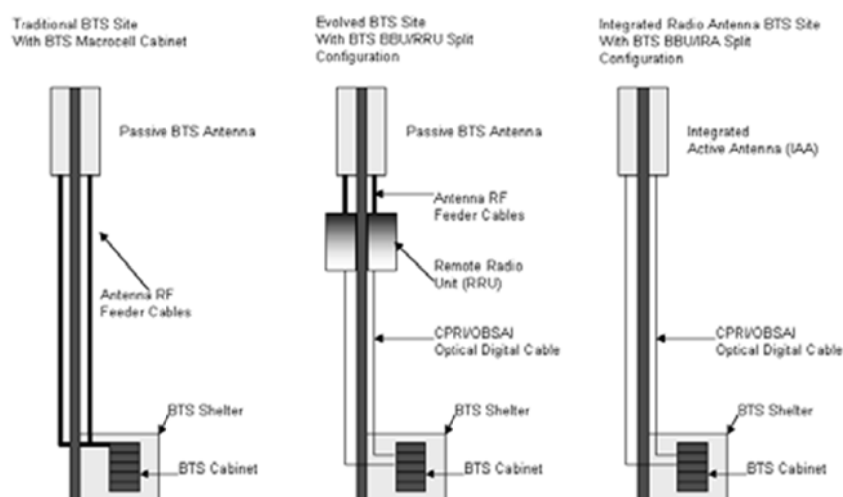


Figura 2.9 - Evolução da arquitectura da BTS [18]

A FTTH pode ser vista como uma nova geração dos sistemas de comunicação móveis que fornece suporte para sistemas de alta velocidade da terceira e quarta geração.

### 2.3.3. ÁREAS RURAIS

A maior parte das considerações sobre redes são focadas em áreas urbanas e densamente populadas no entanto nos últimos tempos tem vindo a aumentar o número de utilizadores com ligações *dial-up* à internet em áreas rurais. Uma vez que a criação de infra-estruturas para cobertura *broadband* apresenta custos elevados e a quantidade de tráfego gerado nestas áreas é muito menor comparada com as áreas urbanas, uma cobertura *Wireless* passaria por ser a melhor opção. O uso da tecnologia RoF para estas áreas tem sido apresentado como uma alternativa para as *Broadband Wireless Access Networks* devido à sua arquitectura de rede *cost-effective*. [19]

### 2.3.4. REDE METROPOLITANA DE LISBOA

O sistema de cobertura do Metro de Lisboa utiliza fibra óptica como meio de transporte dos sinais das salas técnicas dos operadores até às unidades remotas instaladas nas várias estações. Com excepção das unidades remotas instaladas a meio dos túneis (Figura 2.10), todo o transporte por fibra óptica é assegurado por fibras que são propriedade do Metro de Lisboa. Os equipamentos dos operadores (*Master Units* e *Remote Units*) fazem sempre a sua interligação com as fibras do Metro de Lisboa nas salas técnicas ou de telecomunicações de cada estação. Em cada sala técnica do Metro de Lisboa foram instalados ODF's (*Optical Fiber Distribution Frame*) para efectuar as ligações entre as fibras dos equipamentos e as fibras do Metro de Lisboa.

Para minimizar o número de fibras ópticas utilizadas, várias unidades remotas partilham a mesma fibra através de *couplers* ópticos. Estes estão instalados dentro dos ODF's dos operadores nos *racks* de fibra óptica do Metro de Lisboa. No total, apenas são utilizadas duas fibras do Metro de Lisboa (sendo que na maioria do projecto apenas é utilizada uma fibra). Em várias situações há fibras nas quais foram feitas fusões nos ODF's do Metro para dar continuidade até à próxima estação (Carnaxide, Alto dos Moinhos, Picoas, Marquês do Pombal, Ameixoeira e Chelas).

Na Figura 2.11 é possível ver uma antena do tipo Logarítmica Periódica instalada na estação de Picoas, na Figura 2.12 é apresentada uma antena interior Omnidireccional também instalada na estação de Picoas.

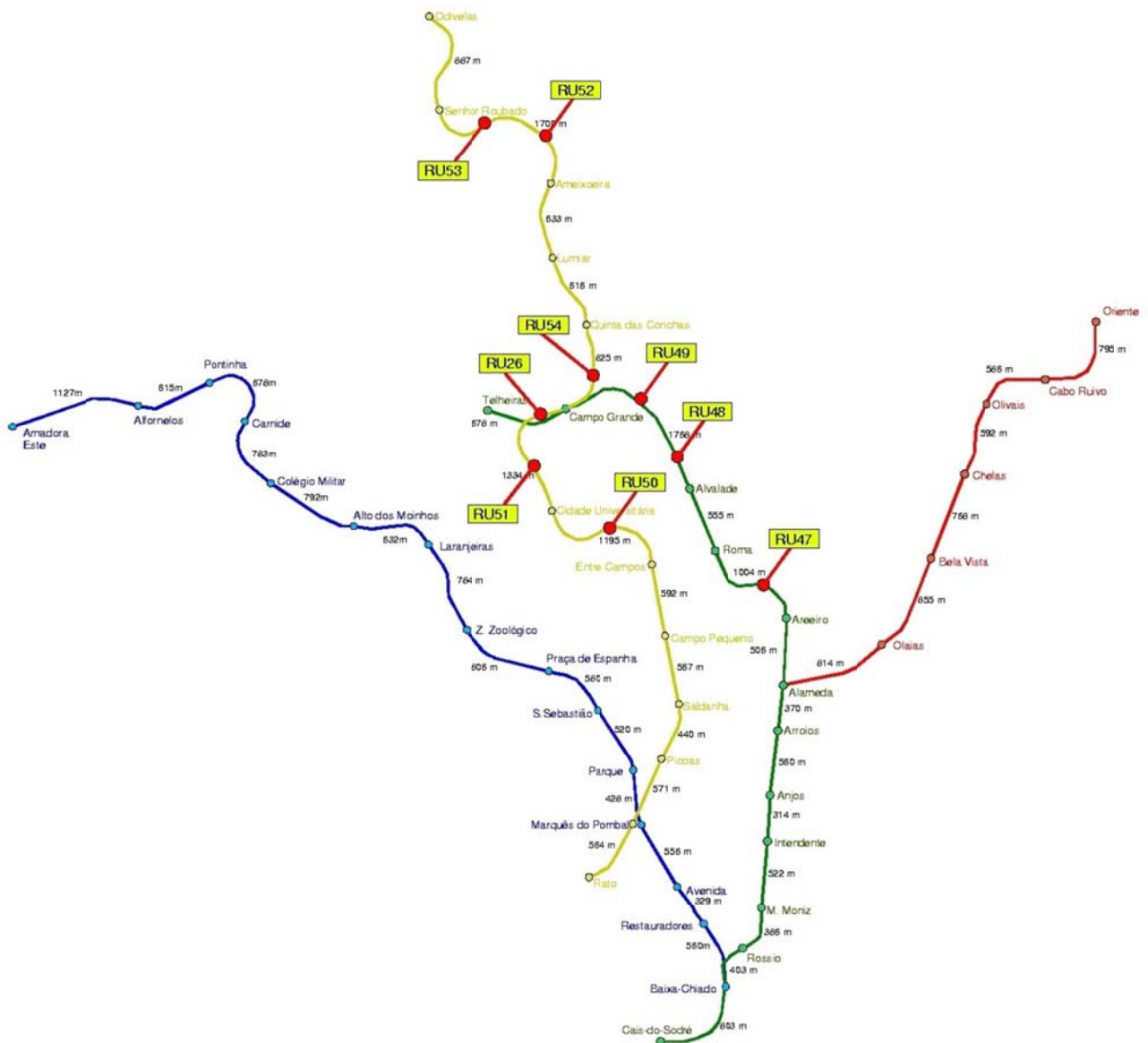


Figura 2.10 - Planta geral do Metro de Lisboa com a localização das RU [20]



Figura 2.11 - Antena Logarítmica Periódica (Kathrein) instalada na estação de Picoas [20]



Figura 2.12 - Antena Interior Omnidirecional (Kathrein) instalada na estação de Picoas [20]

Na Figura 2.13 é apresentado um diagrama de utilização das duas fibras. Sempre que os equipamentos (*Master Units* e *Remote Units*) não estão nas salas técnicas do

Metro de Lisboa, foram passados cabos de fibra óptica entre os equipamentos e os ODFs do Metro. Nestes cabos foram feitas fusões dentro de *fiber boxes* instaladas fora dos *racks* de fibra do Metro e ligados por *pig-tails* aos ODFs. Para as unidades remotas a meio de túneis foram passados cabos de fibra óptica desde as salas técnicas do Metro. [20]

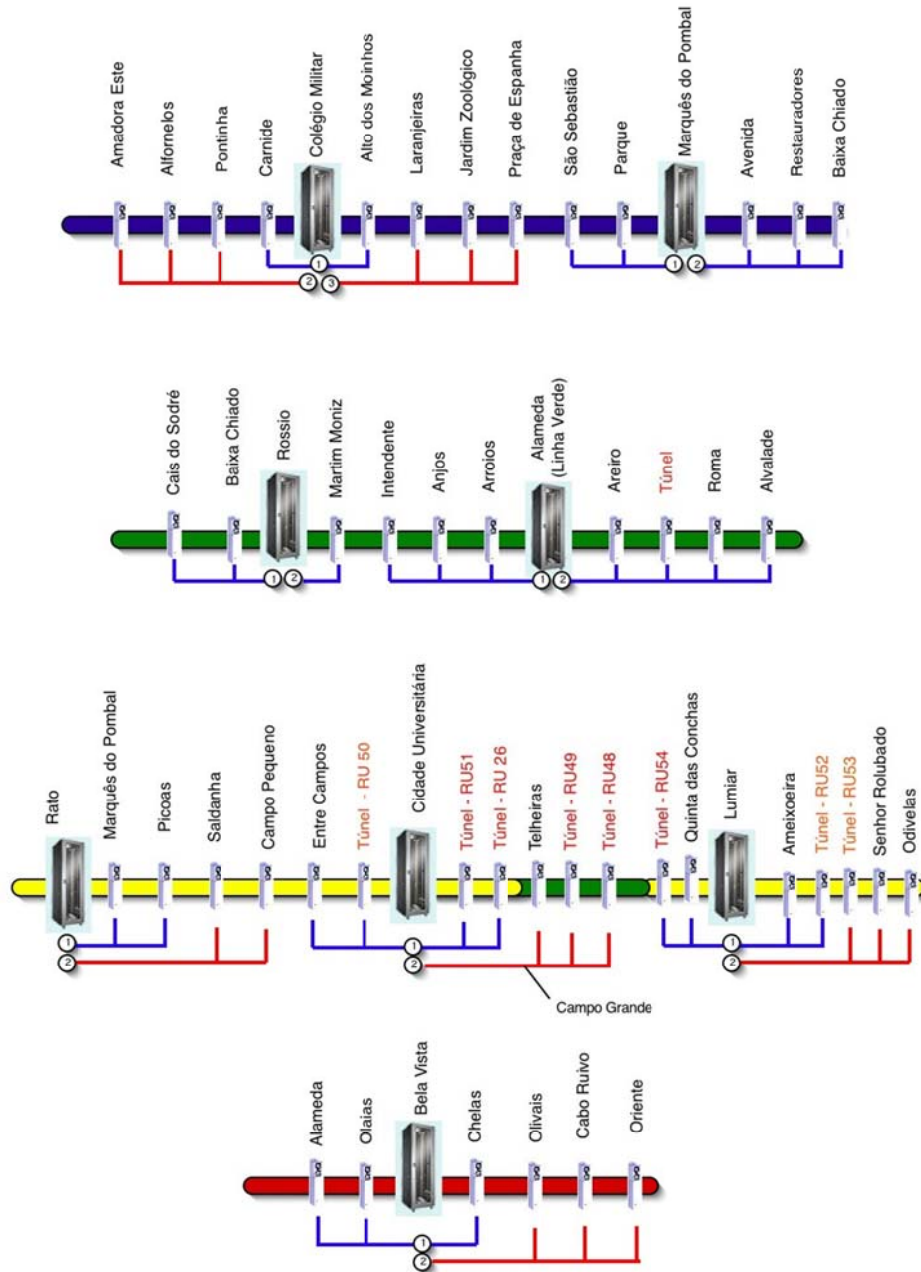


Figura 2.13 - Diagrama de utilização das Fibras Ópticas do Metro de Lisboa [20]

A cobertura de parte do troço de túnel entre a Cidade Universitária e Campo Grande é responsabilidade da RU26 (Figura 2.10). O acesso a estas unidades é bastante condicionado, uma vez que as mesmas se encontram no interior dos túneis só podem ser acedidas fora do horário de funcionamento do metro e mediante autorização do Metro e da TMN. [20]

### 2.3.5. FIBER TO THE HOME (FTTH)

Durante muito tempo o meio de transmissão utilizado na designada *last mile* para as comunicações fixas, seja nos serviços de voz ou de dados foi o cobre (através de cabo coaxial ou par entrançado). Com vários estudos e demonstrações em campo, previu-se que esta última componente de uma infra-estrutura de comunicações fosse alterada para fibra óptica, dando lugar à tecnologia FTTx, onde se inclui o *Fiber to the Home* entre outros. A FTTH, ou também conhecida como rede GPON (*Gigabit Passive Optical Network*) são redes de fibra óptica que vêm substituir as ligações de cobre existentes até às casas dos utilizadores. A introdução destas redes de nova geração foi iniciada pela necessidade de ultrapassar as limitações do cobre em termos de largura de banda a custos razoáveis e atendendo ao crescente número de utilizadores nas áreas de acesso e dos serviços fornecidos a estes, como por exemplo o IPTV (*Internet Protocol Television*) e o HDTV (*High Definition Television*). [21]

A implementação de redes ópticas tem algumas vantagens quando comparadas às redes de cobre, tais como [22,23]:

- Apesar da fibra óptica exigir um investimento maior, os cabos de fibra óptica podem durar mais de 50 anos;
- A fibra apresenta uma transparência relativamente ao tipo de dados e taxas de transmissão, para aumentar a largura de banda basta alterar/substituir o equipamento terminal;
- A fibra pode chegar aos 5-10 Mbps e suportar aplicações VoIP (Voice over Internet Protocol), HDTV e outros serviços;
- É menos susceptível a interferências eléctricas;
- Apresenta uma atenuação, ou perda de sinal, muito menor reduzindo a necessidade de equipamentos de regeneração do sinal e amplificadores.

A rápida propagação da Internet está a acelerar o crescimento das redes de comunicações ópticas e a demanda por mais largura de banda tem impulsionado a investigação em tecnologias de telecomunicações. A diversidade dos serviços fornecidos exige redes com rotas dinâmicas, comutação de pacotes de dados e alta velocidade. [21]

As redes FTTH são do tipo ponto-multiponto, utilizando *splitters* ópticos passivos para dividir o sinal por várias fibras. A razão de splitagem normal é de 1:64 podendo também ser reduzida para 1:32 e já é possível chegar a 1:128 mas não é habitual utilizar este último. O facto de estas redes serem passivas, não necessitam de alimentação

eléctrica, dispensam a utilização de armários nos grandes centros populacionais que são sempre difíceis de licenciar pelos municípios.

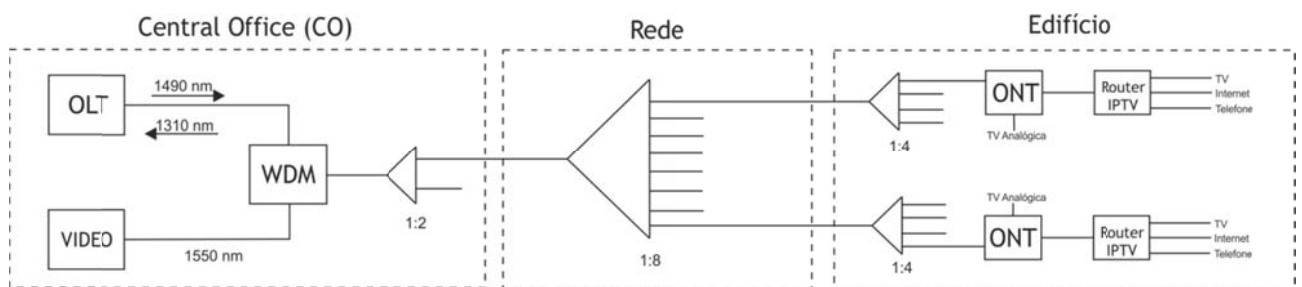


Figura 2.14 - Esquema de uma possível rede FTTH/GPON [25]

A rede de acesso (Figura 2.14) contém um *Optical Line Terminal* (OLT) que fica no *Central Office* (CO), a fibra óptica é o meio de transporte da informação sendo a fibra monomodo a mais utilizada. O *Optical Network Terminal* (ONT) é o elemento óptico que fica situado no utilizador final onde é feita a divisão dos serviços pretendidos pelo utilizador. Entre o OLT e os ONTs visto que se pretende cobrir uma determinada área será necessário utilizar um repartidor de sinal óptico (um *power splitter*) que poderá servir até 64 utilizadores por repartidor. [21,22,24,25]

O GPON é reconhecido pelo padrão ITU-T G.984 e ficou definido que os dados binários, voz ou vídeo, no sentido *downstream* utilizam o comprimento de onda 1490 nm e no sentido *upstream* 1310 nm. O comprimento de onda de 1550 nm iria ser utilizado por vídeo analógico no sentido *downstream*. [21,22,24,25]

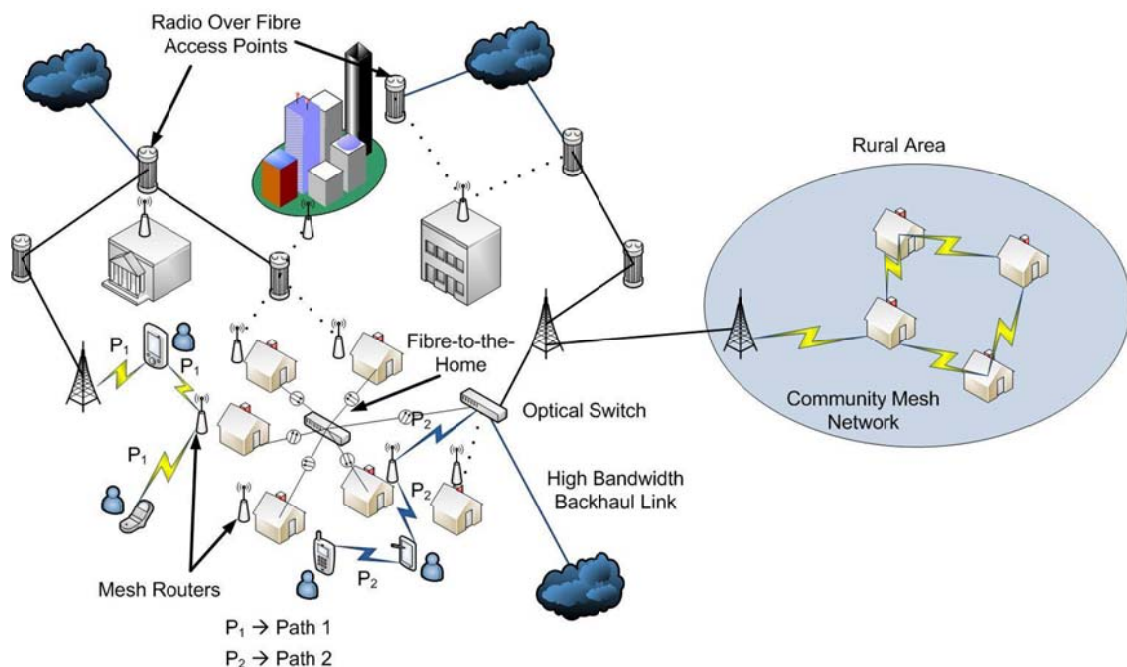


Figura 2.15 - Exemplo de uma rede integrada, com as tecnologias FTTH e RoF [21]

Em Portugal empresas como a PT, CLIX/Optimus, Vodafone, ZON, DStelecom e a Visabeira são intervenientes activos neste tipo de redes. A DStelecom no interior Norte e Sul do país e a Visabeira para o interior centro. Podemos afirmar que Portugal está na vanguarda desta tecnologia ao nível da Europa.

As redes FTTH/GPON podem também ser integradas com redes wireless e RoF, na Figura 2.15 é apresentado um exemplo de uma rede integrada com estas tecnologias.

### 3. IEEE 802.11 WIRELESS LAN

O IEEE802.11 WLAN está incluído como um dos padrões IEEE802 LAN que fazem parte dos padrões de LAN e MAN (*Metropolitan Area Network*) concentrando-se na camada 1 e 2 do modelo de referências OSI (*Open Systems Interconnection*) [26]. A Figura 3.1 apresenta as camadas do modelo OSI e a incorporação do IEEE802.11 nestas. O IEEE802.11 é oficialmente o padrão IEEE para Wireless LAN, nas especificações MAC (*Medium Access Control*) e PHY (*Physical Layer*) define os protocolos necessários para apoiar as redes de área local. O principal serviço do 802.11 é entregar as MSDUs (*MAC Service Data Units*) entre as *Logical Link Control* (LLC) do emissor e receptor.

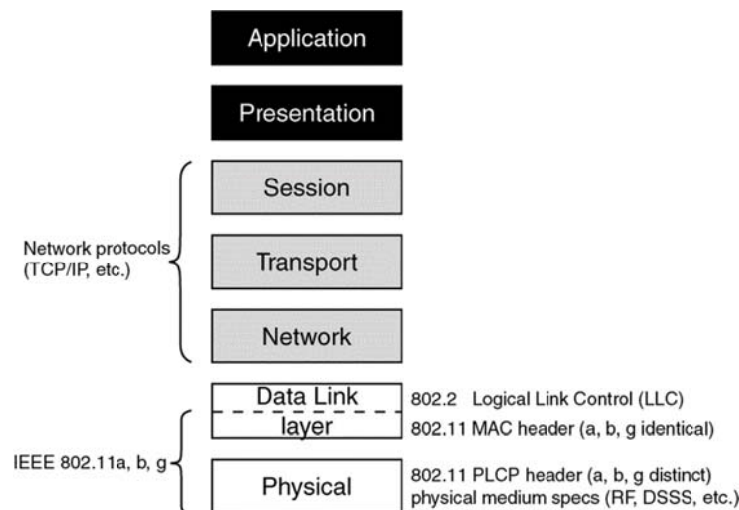


Figura 3.1 - Modelo OSI e o IEEE 802.11

O IEEE 802.11 fornece funcionalidades MAC e PHY para conectividade sem fios de estações fixas, portáteis e móveis que se descolam a certas velocidades dentro de uma área local. O padrão IEEE 802.11 inclui as seguintes características específicas [27,28]:

- Suporta o serviço de entrega assíncrono e em tempo limitado;
- Continuidade do serviço em áreas alargadas, por meio de um sistema de distribuição (como a Ethernet);
- Taxas de transmissão de 2 Mbps a 54 Mbps (variando dependendo da extensão do padrão original utilizada - 802.11a/b/g);
- Suporta a maioria das aplicações existentes no mercado;
- Serviços *Multicast* e *Broadcast*;
- Gestão de serviços de rede;
- Serviços de autenticação.

O IEEE 802.11 está direccionado para ambientes interiores e exteriores, tais como escritórios, bancos, hospitais, centros comerciais, etc. [27]

Relativamente ao padrão com fios, o padrão IEEE 802.11 WLAN considera os recursos sem fios e fornece ainda as seguintes funcionalidades adicionais:

**Gestão de Energia** – Como a maioria das placas de rede WLAN estão disponíveis no formato PCMCIA type II, estas podem ser utilizadas como dispositivos portáteis. No entanto estes dependem de baterias para alimentar os circuitos electrónicos no seu interior. Além disso, quando estas são utilizadas em dispositivos móveis portáteis o consumo de energia é um dos problemas mais críticos a ser superado. O IEEE 802.11 fornece serviços de gestão de energia para economizar bateria. Estes permitem que os dispositivos IEEE 802.11 WLAN alternem para o modo de baixo consumo quando não estão a transmitir ou receber dados. Na verdade a camada MAC é quem define estas funções, desligando a interface rádio se não existir actividade num período de tempo específico ou definido pelo utilizador. [27,28]

**Segurança** – Os sinais wireless transmitidos por um dispositivo WLAN podem ser interceptados por utilizadores dentro da mesma área, logo devem ser protegidos para manter a privacidade. O IEEE 802.11 fornece mecanismos de segurança para encriptar as frames e também fornece serviços de autenticação que são utilizados quando uma estação se junta à WLAN. [27,28]

### 3.1. FRAMES DO IEEE 802.11

Cada frame do IEEE802.11 tem um cabeçalho (*header*), um comprimento variável (*frame body*) que contém informação específica ao tipo de frame e uma *Frame Check Sequence* (FCS). As frames podem ser de controlo, de dados ou de gestão. A frame é precedida por um preâmbulo, e um cabeçalho *Physical Layer Convergence Protocol* (PLPC) como se pode verificar na Figura 3.2.

Os dois primeiros bytes do cabeçalho são utilizados pelo *frame control field* que consiste num número de subcampos com informação sobre a frame, nomeadamente a versão do protocolo, o tipo de frame, se a gestão de energia está activa, etc. Os campos dos endereços guardam os endereços de origem e de destino da frame. O *sequence control field* é utilizado para ordenar os fragmentos das mensagens e para identificar

possíveis frames duplicadas. O *Frame Check Sequence* é utilizado para verificação e detecção de erros. [27]

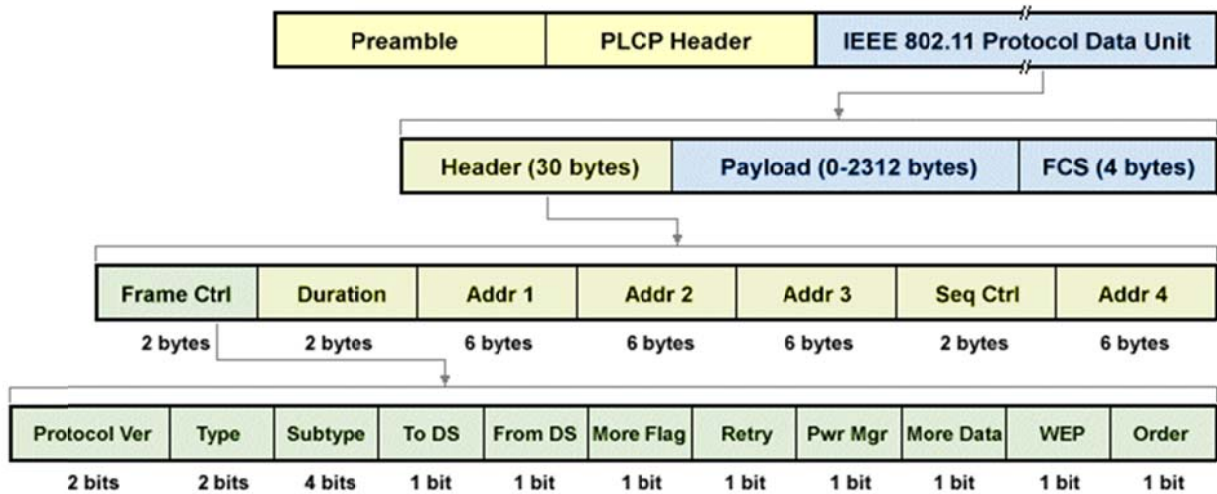


Figura 3.2 – Formato das frames do IEEE 802.11

### 3.1.1. FRAMES DE CONTROLO

As frames de controlo do IEEE802.11 são descritas abaixo.

**Acknowledgement (ACK)** – Ao receber uma frame de dados (assumindo que não foram detectados erros), o receptor envia uma frame deste tipo para o emissor. Se o emissor não recebe o ACK dentro de um período de tempo definido, reenvia a frame. A Figura 3.3 ilustra o formato desta frame.

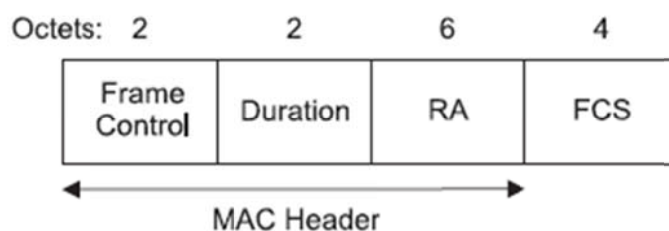


Figura 3.3 – Formato de uma frame ACK [27]

**Request to Send (RTS)** – Um dispositivo que pretende transmitir dados pode enviar uma frame RTS antes de iniciar o envio dos dados para o destino, aguardando por uma resposta *Clear to Send* (CTS) por parte do dispositivo de destino. Estas mensagens são utilizadas para prevenir colisões. A Figura 3.4 mostra o formato de uma frame RTS, em

que RA é o endereço do dispositivo de destino (*Receiver Address*) e TA é o endereço do dispositivo de origem (*Transmitter Address*).

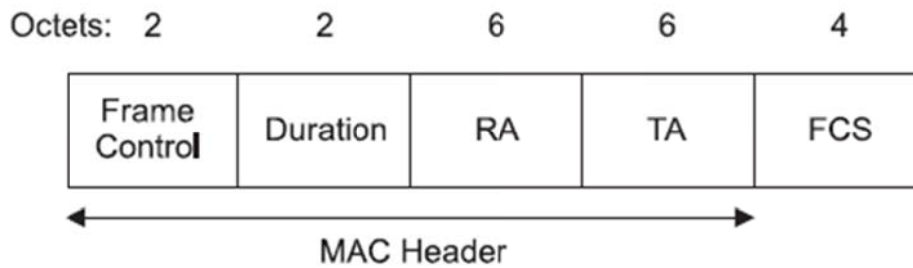


Figura 3.4 – Formato de uma frame RTS [27]

**Clear to Send (CTS)** – Esta frame é uma resposta à RTS, indicando que a anterior foi recebida e que o dispositivo pode iniciar a transmissão de dados. Esta frame inclui um intervalo de tempo em que as restantes estações irão ficar impedidas de transmitir dados até que a estação termine de receber os dados da estação que enviou o RTS.

O formato de uma frame CTS é exposto na Figura 3.5.

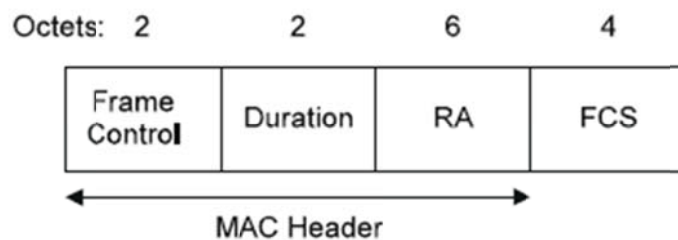


Figura 3.5 – Formato de uma frame CTS [27]

### 3.2. CAMADA MAC DO IEEE 802.11

O MAC do IEEE802.11 WLAN dispõe de dois mecanismos de acesso (Figura 3.6), *Distributed Coordination Function* (DCF) e *Point Coordination Function* (PCF).

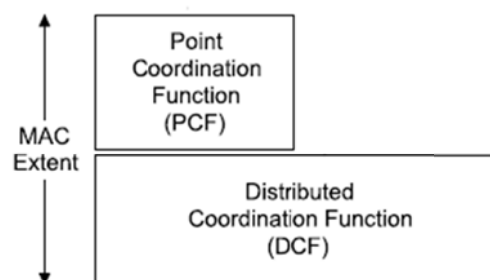


Figura 3.6 - Arquitetura do MAC [27]

### 3.2.1. DISTRIBUTED COORDINATION FUNCTION

O DCF funciona baseado no CSMA/CA (*Carrier-sense Multiple Access com Collision Avoidance*) e é o protocolo de acesso primário. O comportamento das estações no modo DCF quando é transmitido um DATA frame entre o emissor e receptor é apresentado na Figura 3.7 [27]. O Emissor envia um DATA frame para o receptor quando recebe a informação que o meio está disponível (inactivo durante um tempo maior ou igual ao período *Distributed Coordination Function Inter-Frame Space* - DIFS). Ao receber o DATA frame, o receptor responde com uma frame ACK (*Acknowledgement*) depois do período *Short Inter-Frame Space* (SIFS). Se outras estações receberem o DATA frame, estas definem um *Network Allocation Vector* (NAV) usando o valor do cabeçalho da DATA frame como duração e são impedidas de aceder ao meio durante esse tempo. A utilização do NAV para impedir as estações de aceder ao meio é chamada *Virtual Carrier Sence* (VCS). [27-29]

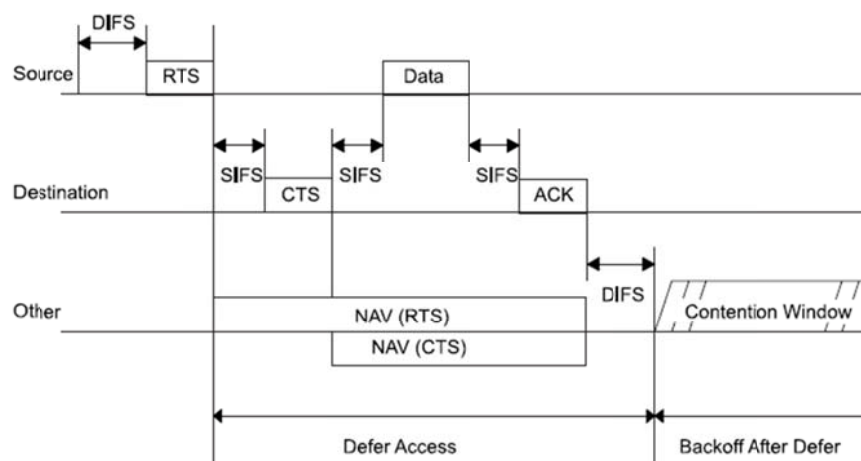


Figura 3.7 - Funcionamento do modo DCF com RTS/CTS/ACK [27]

Se uma estação transmitiu um DATA frame e ainda não recebeu a frame ACK correspondente, esta pode retransmitir a DATA frame até ao limite de retransmissão ser atingido. Antes de cada retransmissão, é efectuado um *backoff* cujo valor é aleatório e definido pela seguinte expressão  $Backoff\ Time = Random(0, CW)$  em que CW é o valor actual da janela de contenção (*contention window*). A Figura 3.8 [27] mostra que o tamanho da janela é aumentado cada vez que uma transmissão falha. Este aumento ocorre porque a estação pretende evitar colisões com frames transmitidas pelas outras



O intervalo SIFS é o menor dos intervalos apresentados, como se pode verificar na Figura 3.9 [27]. Para além destes existe ainda o EIFS (*Extended Inter Frame Space*), definido como o mais longo IFS, as estações utilizam este quando uma frame é recebida mas não consegue ser decodificada correctamente devido às condições do canal ou outras razões.

O mecanismo de acesso básico em DCF (Figura 3.9) é efectuado através de troca de frames DATA e ACK, mas devido à existência do problema do *Hidden Node* este mecanismo não é suficiente para transmitir com sucesso as frames. O problema do *Hidden Node* (Figura 3.10) é um problema muito comum em comunicações sem fios, ocorre quando uma estação A ao comunicar com um AP transmite DATA frames e estas entram em conflito com as frames transmitidas pela estação B, que se encontra fora do raio de alcance da estação A, resultando em colisões. Para reduzir o insucesso devido a colisões e evitar o problema do *Hidden Node*, o IEEE 802.11 possui frames de controlo RTS e CTS que são trocadas entre o emissor e receptor, como se pode ver na Figura 3.7, estas foram apresentadas em detalhe nas Figuras 3.3 a 3.5. [27-29]

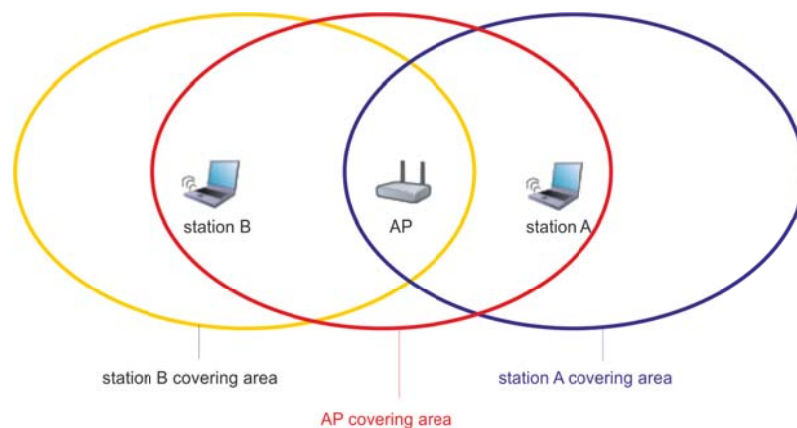


Figura 3.10 - Problema do Hidden Node

### 3.2.2. POINT COORDINATION FUNCTION

Este modo de acesso opcional do MAC do IEEE 802.11 só é utilizado em redes configuradas no modo infra-estrutura. As frames transmitidas entre as estações e o AP no modo PCF são controladas pelo PC (*Point Coordinator*) implementado no AP e disponível durante um período de tempo particular denominado de *Contention Free Period* (CFP) [27-29].

Na troca de frames entre estações e um AP no modo PCF (Figura 3.11), o AP começa por transmitir um *Beacon* e depois uma frame CF-Poll ou DATA+CF-Pool se

pretende iniciar o CFP. Na recepção das frames Poll, as estações que receberam estas frames através do AP transmitem uma frame DATA+CF-ACK como confirmação que receberam a frame CF-Poll e para transmissão de dados. Se o AP pretende efectuar novamente a operação poll, transmite outra frame CF-Poll no período SIFS após ser finalizada a troca de dados. Como no modo PCF o AP pode controlar as trocas de frames enviando frames de polling antes das transmissões de outras frames, as estações que as recebem configuram os seus valores do NAV e ficam impedidas de aceder ao meio. Para terminar um CFP, o AP envia uma frame do tipo CF-end e as estações removem os seus NAV previamente estabelecidos. A operação de pooling não tem nenhum valor pré definido e é independente da implementação [27-29].

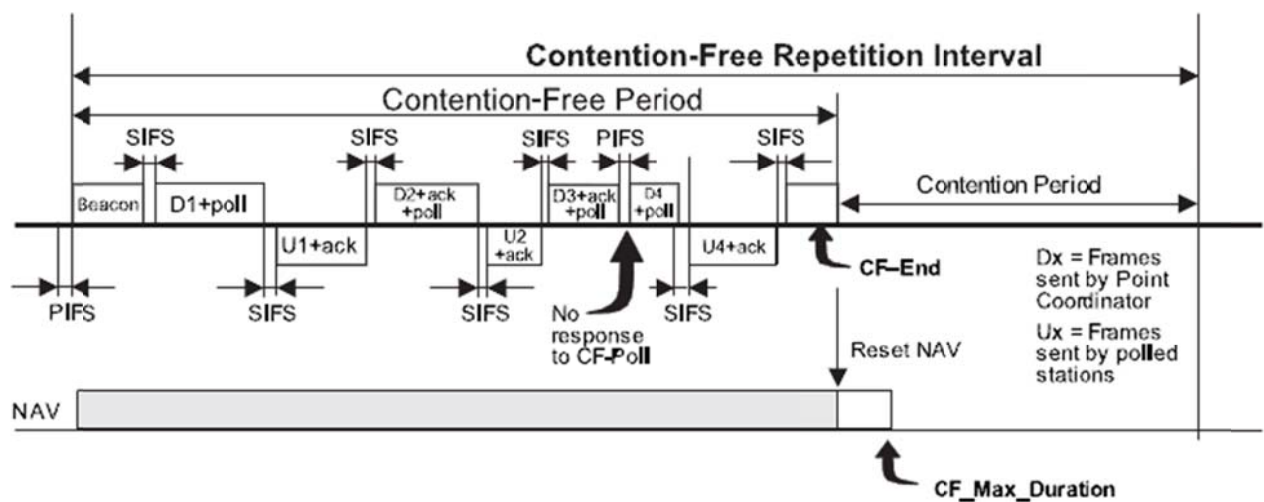


Figura 3.11 - Funcionamento do modo PCF [27]

No modo PCF espera-se que não ocorra colisões durante o CFP, assim como se espera que o CFP funcione perfeitamente quando apenas existe um AP a funcionar isolado de outros APs. Isto é, se os APs adjacentes interferirem nas trocas de frames de um AP, o PCF pode não funcionar correctamente pois este assume que não ocorrem colisões e que consegue controlar todas as frames transmitidas [27-29].

### 3.2.3. FUNÇÕES DE GESTÃO

O MAC do IEEE 802.11 possui funções de gestão que permitem a troca de informação entre um AP e estações através de uma ligação segura. São utilizadas funções de gestão básicas para configurar uma ligação fidedigna entre um AP e uma

---

estação ou estações. Estas funções são a pesquisa de APs ou estações próximas, Autenticação para uma comunicação segura e Registo/Associação numa rede.

Quando uma estação pretende aderir a uma rede gerida por um AP deve começar por efectuar uma pesquisa para saber o canal de operação do AP e o tipo de opções que este suporta. A operação de pesquisa pode ser uma “*Active Scan*” ou uma “*Passive Scan*” dependendo do modo em que a estação está configurada. No modo *Active Scan*, é enviado uma frame do tipo *Probe request* que inclui o *Service Set Identifier* (SSID) e informação sobre as taxas de transferências suportadas na estação. O SSID é um ID único atribuído ao AP. A estação fica a aguardar a resposta do AP ao pedido efectuado durante um período de tempo, essa resposta contém informação sobre a capacidade do AP. A estação continua a enviar frames *Probe request* em canais diferentes até terminar a *Active Scan*. Uma estação a funcionar no modo *Passive Scan*, muda o seu canal de operação e aguarda pelas frames *beacon*, que são frames de controlo transmitidas periodicamente pelos APs. Ao receber as frames, a estação guarda a informação contida nas frames e altera os seus canais de operação até o que termine o *Passive Scan* [27-29].

Após finalizar o processo de pesquisa, segue-se o processo de autenticação em que é enviada uma frame de autenticação para o AP. O Processo de autenticação pode ser classificado como sistema aberto ou em sistema de Chave partilhada. A autenticação em sistema aberto envolve uma autenticação em duas etapas e as frames de dados não são encriptadas após o processo de autenticação. No sistema de chave partilhada utiliza WEP (*Wired Equivalent Privacy*), são trocadas quatro frames entre a estação e o AP em que as últimas duas frames são encriptadas pela chave WEP. As frames de dados entre a estação e o AP são também encriptadas.

Ao ocorrer com êxito o processo de autenticação, a estação prossegue com o processo de registo/associação. A estação envia uma frame ao AP a pedir para ser associada a este e aguarda pela resposta do AP ao pedido. No pedido de associação é enviada informação sobre a estação, tal como as taxas de transferências suportadas, mecanismos de gestão de energia, etc. Se este processo for finalizado com sucesso, podem ser iniciadas as transmissões de dados entre a estação e o AP. [27-29]

A Figura 3.12 [27] ilustra as operações descritas previamente.

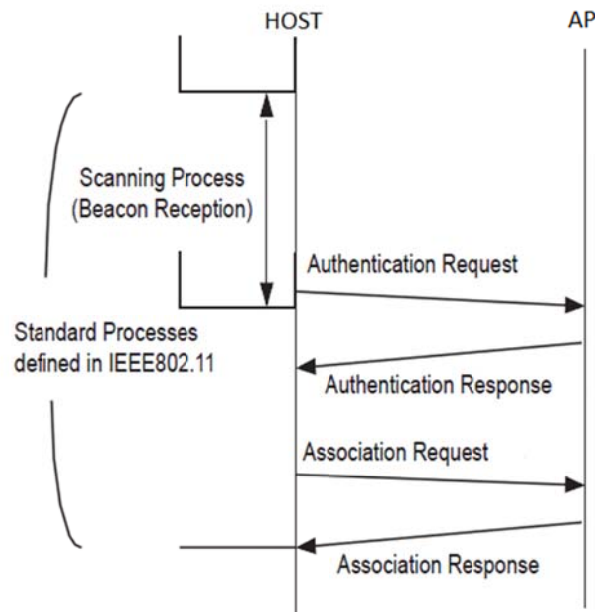


Figura 3.12 – Fases da ligação entre uma estação e um AP no IEEE 802.11 [27]

### 3.2.4. INFLUÊNCIA DO MAC 802.11 NAS REDES RoF

Como já foi referido anteriormente, a utilização de uma fibra no sistema introduz um atraso de propagação no mesmo, uma vez que todos os pacotes que irão atravessar o caminho óptico vão estar afectados por esse atraso. Este atraso de propagação é crítico quando se utiliza o mecanismo RTS-CTS pois existem mais pacotes afectados.

Em [30] é apresentada uma equação que calcula o atraso de propagação de cada pacote que atravessa o caminho óptico, onde  $c$  é a velocidade da luz e  $n$  o índice de refração da fibra. A existência de fibra óptica introduz um atraso extra de  $2\tau$  (em que  $\tau$  é o atraso de propagação da fibra) na camada MAC [6,9,30]. Deste modo sem alterar os parâmetros por defeito do IEEE 802.11,  $2\tau$  não deve exceder os  $20\mu\text{s}$ , isto é um *slot time*.

Segundo o estudo realizado em [30] cada atraso de  $10\mu\text{s}$  é equivalente a 194.81m de fibra óptica.

$$v_p = \frac{c}{n} = \frac{3 \times 10^8}{1.54} = 194.81 \text{ m}/\mu\text{s} \quad \text{Equação 1}$$

Segundo o modelo matemático criado em [30], o comprimento máximo de fibra que pode ser incorporado num sistema 802.11b sem alterar os seus parâmetros por defeito é de 1948m. É possível utilizar comprimentos superiores mas para transmitir os pacotes com sucesso é necessário alterar os valores por defeito do 802.11b, ou seja aumentar o

tempo de espera para receber os pacotes CTS ou ACK (*timeout*). Aumentando o valor do *timeout* em 20 $\mu$ s a distância máxima aumenta para 3896m e seguindo a tendência para aumentar o mesmo foi atingida uma distância máxima de 7792m que corresponde a um *timeout* de 394 $\mu$ s [30].

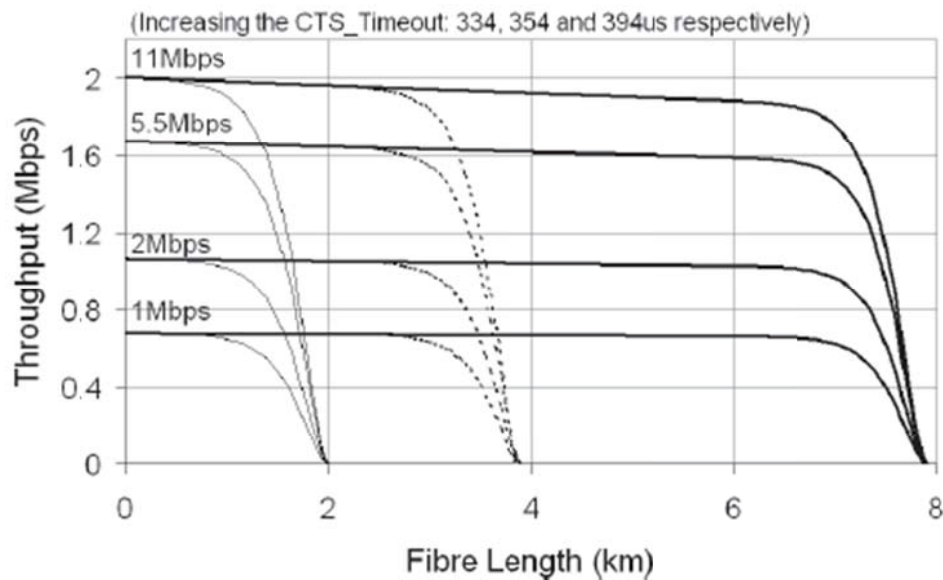


Figura 3.13 - Throughput in the RTS-CTS Access Method [30]

A figura 3.13 apresenta a relação entre os *timeouts* e o comprimento da fibra, verifica-se também um decréscimo do *throughput* conforme aumenta o comprimento da fibra no sistema. Num sistema de 11Mbps cujo *timeout* está definido em 394 $\mu$ s o *throughput* diminui de 2 Mbps para 1.88Mbps após 6Km de fibra.

## 4. MODELO DE SIMULAÇÃO

Em computação, a simulação é uma tentativa de modelar uma situação real num computador para poder ser estudada e verificar o comportamento do sistema. Para se realizar uma simulação é necessário construir um modelo computacional que corresponda à situação real que se pretende simular.

A simulação pode ser utilizada para mostrar os efeitos de diversas condições e ambientes, sendo também utilizada quando o sistema em questão é perigoso (por exemplo sistemas em ambientes nucleares ou de guerra), está projectado mas não implementado ou simplesmente ainda não existe. A simulação permite a análise das capacidades e comportamentos de um sistema sem exigir a construção e/ou implementação do mesmo [31].

Pode-se entender que a simulação é um processo que engloba a construção do modelo e o método experimental que se segue a este procurando:

- Descrever o comportamento do sistema;
- Construir teorias e hipóteses considerando as observações efectuadas;
- Utilizar o modelo para prever o comportamento do sistema, isto é, os efeitos produzidos por alterações nas variáveis ou nos métodos empregues na operação.

Numa simulação existem vários elementos, alguns destes serão descritos brevemente de seguida [32]:

**Modelo:** O modelo é a representação do sistema real. Existe a preocupação sobre o nível de detalhe do modelo, este deverá ser complexo o suficiente para responder às questões levantadas mas não demasiado complexo. Existe também a preocupação sobre quais deverão ser os limites do sistema;

**Evento:** Um evento é uma ocorrência que altera o estado do sistema, existem eventos internos e externos;

**Variáveis de estado:** As variáveis de estado do sistema são a colecção de toda a informação necessária para definir o que ocorre no sistema a determinado ponto no tempo;

**Entidade:** Uma entidade representa um objecto que requer uma definição explícita. Uma entidade pode ser dinâmica se esta se move pelo sistema ou estática no sentido em que serve outras entidades;

**Atributos:** Uma entidade pode ter atributos que pertençam apenas a essa entidade e devem ser considerados como valores locais;

**Recursos:** Um recurso é uma entidade que presta serviço a entidades dinâmicas;

**Actividade:** Uma actividade é um período de tempo cuja duração é conhecida antes do início da actividade. A duração pode ser uma constante, um valor aleatório de uma distribuição estatística, o resultado de uma equação, um parâmetro de entrada do sistema ou calculado com base nos estados do sistema;

**Delay:** O *delay* é um atraso de duração indeterminada causado por uma combinação de condições do sistema. Por exemplo quando uma entidade entra numa fila de espera, o tempo que esta permanece na fila pode ser desconhecido inicialmente uma vez que pode depender de outros eventos que ocorrem.

As simulações são referidas como eventos discretos ou contínuos, dependendo do modo como as variáveis de estado do sistema mudam. Na prática uma simulação utiliza variáveis de estado contínuas (são alteradas de forma contínua, normalmente numa função em que o tempo é uma variável) e variáveis discretas (mudam de estado instantaneamente em pontos distintos no tempo) [31]. Com os valores guardados nas variáveis de estado do sistema é possível descrever um histórico do comportamento do sistema, esse histórico é observado para se retirar conclusões sobre o funcionamento do sistema real que é representado. Após construído o modelo de simulação é accionado num modelo probabilístico, isto é os dados serão gerados pelo próprio sistema, ou num modelo determinístico, onde alguns dados são fornecidos/definidos como parâmetros de entrada, simulando o comportamento dinâmico do sistema.

Ao repetir o processo de simulação para diversas configurações e parâmetros é possível identificar uma estrutura para o sistema óptimo pretendido.

Na Tabela 4.1 são apresentadas algumas vantagens e desvantagens da utilização da simulação [32].

- 
- ✓ Choose correctly
  - ✓ Compress and expand time
  - ✓ Understand why
  - ✓ Explore possibilities
  - ✓ Diagnose problems
  - ✓ Identify constraints
  - ✓ Develop understanding
  - ✓ Visualize the plan
  - ✓ Build consensus
  - ✓ Prepare for change
  - ✓ Invest wisely
  - ✓ Train the team
  - ✓ Specify requirements
- 
- ✗ Model building requires special training
  - ✗ Simulation results may be difficult to interpret
  - ✗ Simulation modeling and analysis can be time consuming and expensive
  - ✗ Simulation may be used inappropriately

**Tabela 4-1 - Vantagens e desvantagens da utilização de simulação [32]**

O uso de simulação tem os seus prós e contras, como por exemplo a criação de um modelo que representa com precisão o sistema a ser modelado uma vez que os sistemas reais podem ser muito complexos. Esta desvantagem pode ser ultrapassada utilizando pacotes de software de simulação adequados já desenvolvidos, que são genericamente chamados de simuladores [32]. Existem inúmeros simuladores disponíveis para determinados modelos reais, como por exemplo simuladores de voo, simuladores de redes, simuladores automóveis, etc.

## 4.1. O SIMULADOR ADOPTADO

O simulador adoptado na realização deste trabalho foi o OMNeT++ [33] com o pacote adicional INET Framework [34] que contém modelos para diversos protocolos de rede fixa e wireless incluindo o IEEE 802.11.

O OMNeT++ é um simulador de eventos discretos *open-source* cuja principal área de aplicação é a simulação de redes de comunicação, embora seja também utilizado com sucesso em outras áreas. O OMNeT++ apresenta uma abordagem orientada a objectos que permite ao utilizador obter modelos bem estruturados e reutilizáveis. O seu *Graphical User Interface* (GUI) proporciona também aos utilizadores uma vista mais pormenorizada de todos os elementos da simulação e fornece algum feedback detalhado sobre o que ocorre durante uma simulação permitindo o controlo sobre os parâmetros da simulação.

O OMNeT++ corre em sistemas MAC OS X, Linux e Windows (XP, 2K, Vista, 7) nas versões 32-bit.

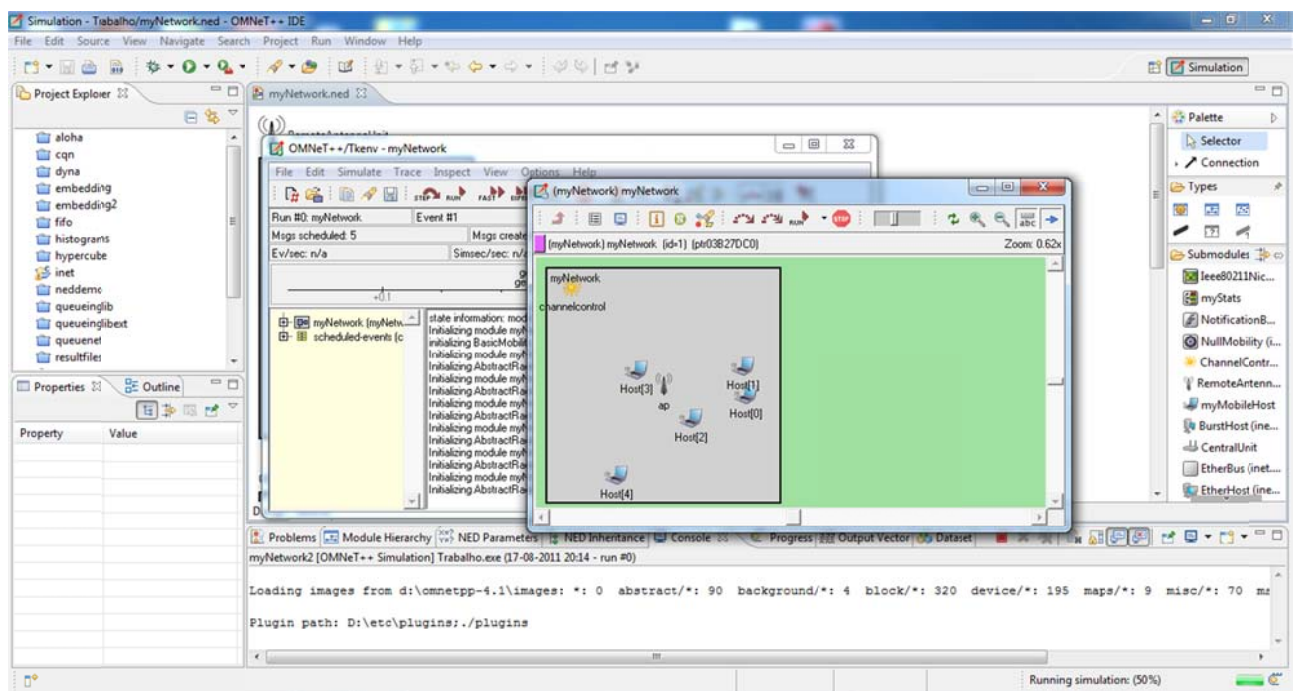


Figura 4.1 - Interface gráfica (GUI) do OMNeT++

Um modelo OMNeT++ é composto por módulos agrupados hierarquicamente. Os módulos comunicam entre si através de mensagens, que podem ser estruturas de dados complexas ou simples. Estas mensagens podem ser enviadas directamente para um destino ou através de um caminho definido. Os módulos podem ter os seus próprios parâmetros, estes são utilizados para definir o comportamento do próprio módulo e definir

parâmetros para a topologia do modelo utilizado. Os módulos ao mais baixo nível da hierarquia são programados em C++.

#### 4.1.1. ESTRUTURA DO MODELO

O OMNeT++ possui algumas ferramentas eficientes que permitem descrever a estrutura do sistema actual. Algumas dessas funcionalidades são:

- Hierarquia de módulos;
- Instanciação dos módulos;
- Comunicação entre módulos via mensagens;
- Parametrização flexível dos módulos;

Em OMNeT++ os módulos são usualmente referidos como “*networks*”. O módulo ao nível mais alto é reconhecido como o “*system module*”, este contém submódulos que por sua vez podem ter outros submódulos.

Os módulos comunicam entre si através de mensagens, na simulação de uma rede as mensagens podem ser representadas por *frames*, pacotes ou outro tipo e estas podem conter estruturas de dados complexas ou simples. Os módulos podem enviar as mensagens directamente para um destino ou então seguindo um caminho definido, através dos *gates* e das ligações definidas no sistema. Os *gates* são a interface de *input* e *output* dos módulos. Deste modo as mensagens são enviadas pelo *output gate* de um módulo e recebidas no *input gate* de um módulo. As ligações (*links*) entre módulos são criadas fazendo corresponder um *output gate* de um módulo a um *input gate* de outro módulo. Na tabela 4.2 são apresentados os comandos para ligar os gates dos módulos, definindo a rota das mensagens trocadas. Estes foram retirados do exemplo/tutorial do clássico *Tic Toc* disponível em [35].

```
network Tictoc10
{
  submodules:
    tic[6]: Txc10;
  connections:
    tic[0].out++ --> { delay = 100ms; } --> tic[1].in++;
    tic[0].in++ <-- { delay = 100ms; } <-- tic[1].out++;

    tic[1].out++ --> { delay = 100ms; } --> tic[2].in++;
    tic[1].in++ <-- { delay = 100ms; } <-- tic[2].out++;

    tic[1].out++ --> { delay = 100ms; } --> tic[4].in++;
```

```

tic[1].in++ <-- { delay = 100ms; } <-- tic[4].out++;

tic[3].out++ --> { delay = 100ms; } --> tic[4].in++;
tic[3].in++ <-- { delay = 100ms; } <-- tic[4].out++;

tic[4].out++ --> { delay = 100ms; } --> tic[5].in++;
tic[4].in++ <-- { delay = 100ms; } <-- tic[5].out++;
}

```

Tabela 4-2 – Definição dos módulos e das ligações entre estes (Tic Toc) [35]

Na Figura 4.2 é possível verificar como os comandos apresentados na Tabela 4.2 são representados graficamente no GUI do OMNeT++.

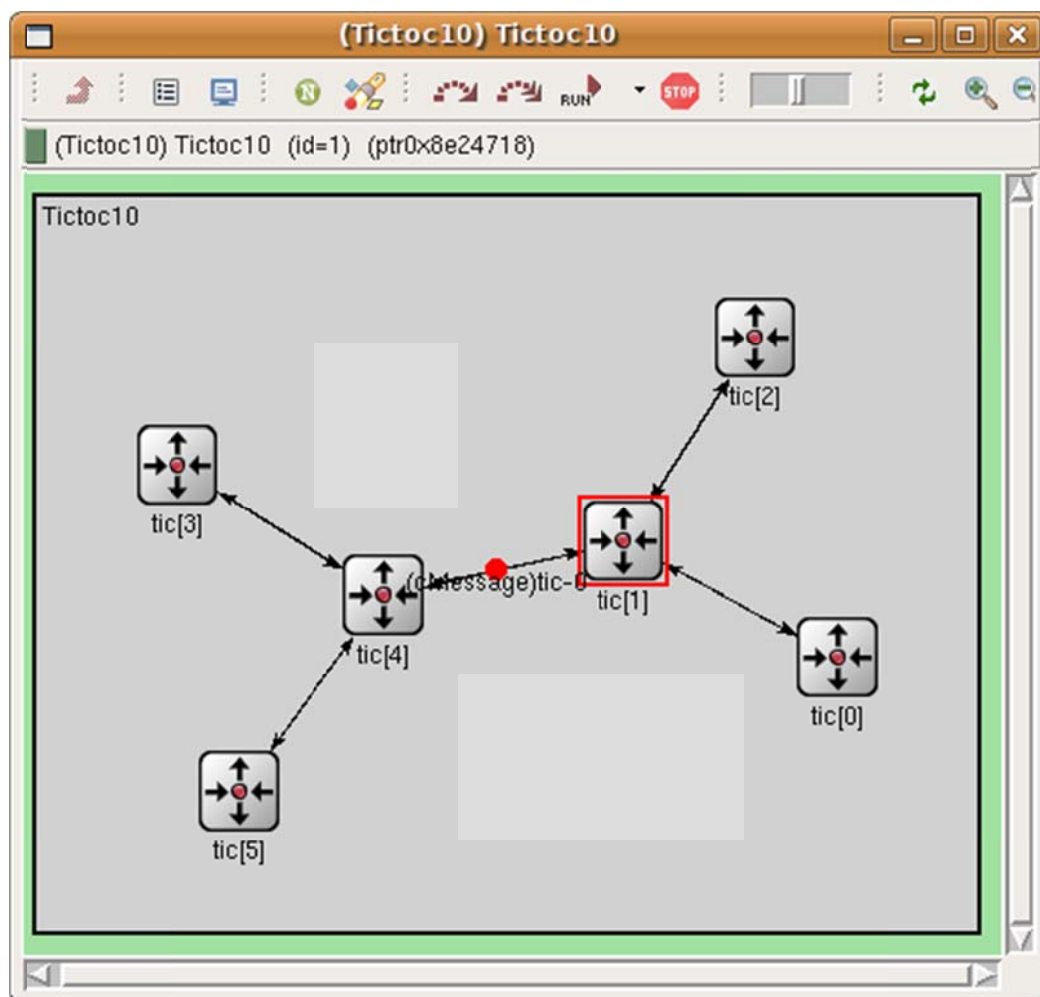


Figura 4.2 – Representação gráfica da rede Tic Toc [35]

Os módulos podem ter parâmetros definidos e estes podem ser associados de várias formas, como por exemplo através dos ficheiros de configuração. Estes parâmetros podem ser utilizados para definir o comportamento do módulo e para parametrizar o

modelo. Os *links* podem ter três parâmetros definidos para facilitar a modulação das redes de comunicações: *propagation delay*, *bit error rate* e *data rate*. Estes podem ser definidos para cada *link* individualmente ou em tipos de *links* que podem ser utilizados através de todo o modelo. Na Tabela 4.2 é possível verificar que foi definido um atraso de 100ms nos *links* entre os módulos.

A estrutura e topologia de um modelo OMNeT++ é definida com um ficheiro de texto (NED) que contem as declarações dos módulos e as descrições destes, as ligações e a definição da rede. Um ficheiro NED pode conter os seguintes componentes: directivas para importar módulos já existentes, definições dos canais, dos módulos e da rede.

Os objectos da simulação (mensagens, módulos, filas de espera) são representados em classes C++ que têm vindo a ser desenvolvidas para que de uma forma eficiente seja criada uma poderosa ferramenta de simulação. As seguintes classes fazem parte da livreria de classes da simulação: *modules*, *gates*, *connections*, *parameters*, *messages*, *container class (queue, array)*, *data collection classes*, *statistic and distribution classes (histograms)* entre outras. Na Figura 4.3 é apresentada uma visão geral do processo de construção e execução de programas de simulação em OMNeT.

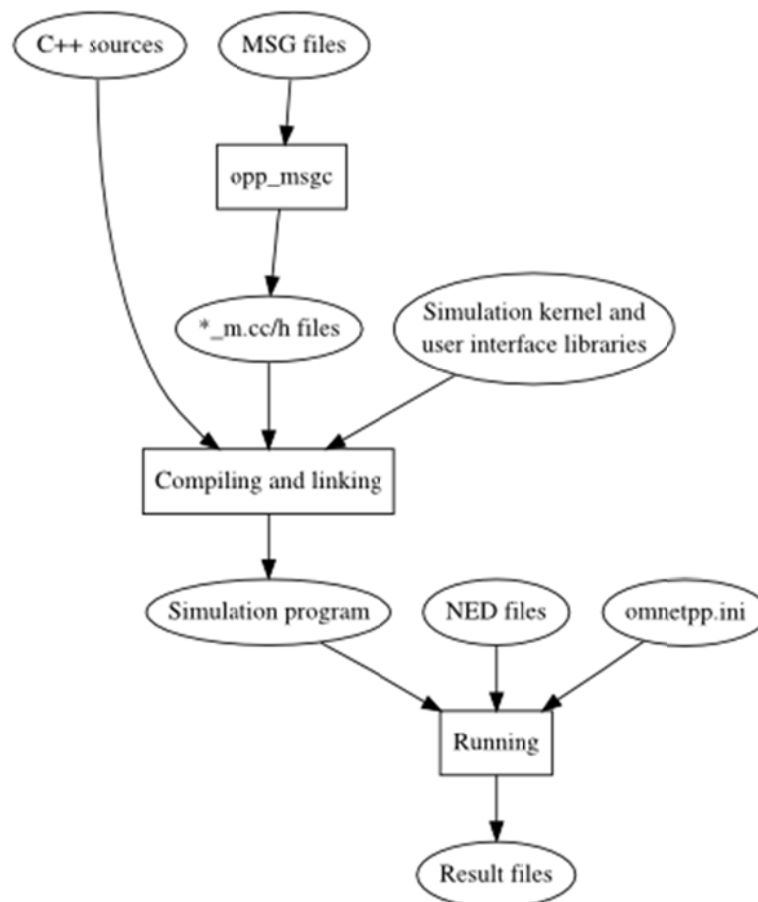


Figura 4.3 – Processo de construção e execução de uma simulação em OMNeT [36]

Os resultados obtidos no funcionamento do modelo de simulação dependem do comportamento dos seus módulos. Em OMNeT++ estes comportamentos são definidos por algoritmos implementados em C++, tirando partido das vantagens da linguagem de programação e da livreria de classes do OMNeT++.

## 4.2. METODOLOGIA DA SIMULAÇÃO

A modulação e o *design* de redes de computadores sempre foram uma área importante tanto para quem se dedica à investigação como para quem trabalha com estas na prática. Os custos da implementação e manutenção das redes têm impulsionado a necessidade de desenvolver modelos eficientes e métodos de optimização de modo a reduzir custos.

Nos últimos anos as redes sofreram diversas alterações causadas pelo rápido desenvolvimento de novas tecnologias e serviços, grande aumento do volume de tráfego gerado, procura pela disponibilidade dos serviços e tentativas de integrar diferentes tipos de tecnologias e serviços. Isto aumenta o desafio que os *designers* de redes têm de ultrapassar.

Neste trabalho foi proposto estudar os efeitos que a camada MAC do IEEE802.11 tem nas comunicações entre uma estação remota e um AP. Pretende-se verificar se o atraso induzido pelos mecanismos do MAC e da existência de um canal óptico no sistema têm algum tipo de influência na performance do sistema, levando por exemplo a falhas de comunicação ou percas de sincronismo entre as estações. Na Figura 4.4 é apresentado um esquema do modelo que se pretende simular em OMNeT++.

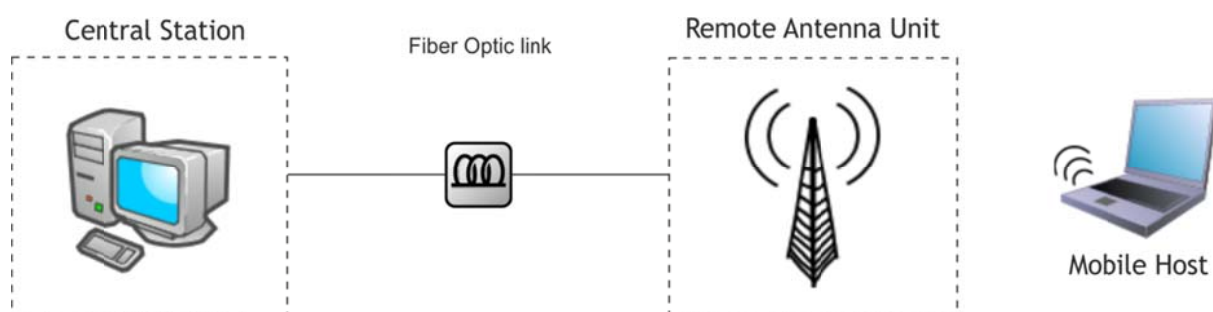


Figura 4.4 – Modelo que se pretende simular em OMNeT++

O modelo de simulação criado é composto pelos três módulos primários que são apresentados na Figura 4.4.

- *Mobile Host*,
- *Remote Antenna Unit*,
- *Central Station*.

Estes módulos por sua vez são compostos por outros módulos (submódulos) seguindo as propriedades hierárquicas fornecidas pelo OMNeT. A ligação entre a CS e a RAU é definida por um canal de fibra óptica com parâmetros definidos.

#### 4.2.1. MOBILE HOST

O módulo *Mobile Host* utilizado foi adaptado dos modelos existentes e disponíveis no pacote INET Framework para o OMNeT++ [37]. Na Figura 4.5 é apresentada a estrutura do módulo *Mobile Host*, as suas funcionalidades são implementadas com os seguintes submódulos descritos abaixo.

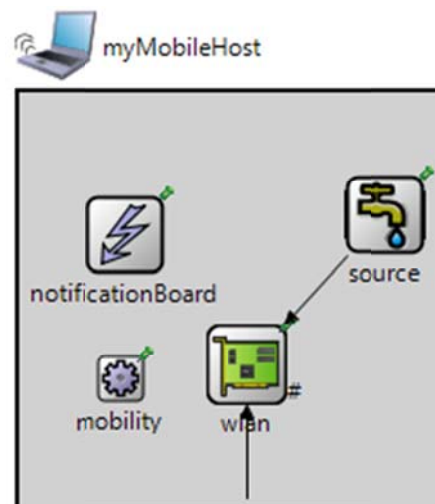


Figura 4.5 – Módulo Mobile Host criado no OMNeT

**notificationBoard** serve para informar os outros módulos sobre eventos tais como mudanças nas tabelas de *routing*, estados das interfaces, estado do canal *wireless*, posição do *host*, etc.

**mobility** serve para definir a posição do *host* ou o percurso que este irá descrever. Neste caso é utilizado para definir o módulo com posição fixa.

**source** é responsável pelo tráfego que cada *Host* gera. O tráfego gerado é enviado para a placa de rede que por sua vez o irá enviar através da sua interface de *output* para os seguintes módulos.

**wlan** é uma placa de rede 802.11 simples para modo infra-estrutura cujas operações não suportam *handover*. As camadas inferiores (ou submódulos) desta são responsáveis por encapsular/desencapsular as *frames* e mensagens de controlo, atribuir os endereços de destino e de origem nas *frames* e o número de sequência das mesmas. Existe ainda a camada física do MAC onde é através desta que é estabelecida a comunicação com as outras estações (*hosts* ou *APs*).

O tráfego gerado pelo Gerador de Tráfego (*source*) é enviado para a interface da placa de rede (*wlan*). É gerada a frame 802.11 com os endereços de origem, de destino e com o número sequencial que são adicionados aos dados recebidos. As frames são introduzidas na lista de espera e transmitidas pela interface de saída da placa de rede (*wlan*). Todos os *Hosts* utilizados foram definidos como estáticos.

#### 4.2.1.1. TRAFFIC GENERATOR

O gerador de tráfego utilizado foi adaptado de um gerador de tráfego para o modelo Ethernet e IEEE 802.11 disponível no pacote INET Framework para o OMNeT++ [37]. Este foi escolhido por ser compatível com os modelos da Layer 2 e MAC do 802.11.

Os parâmetros do gerador de tráfego foram ajustados de modo a que o tráfego gerado seguisse um processo de *Poisson*. Na distribuição de *Poisson* obtemos uma estimativa da quantidade de eventos  $\lambda$  que irá decorrer em determinado intervalo de tempo. Os eventos gerados nessa distribuição são independentes (não dependem do tempo decorrido desde o ultimo evento) e não têm memória.

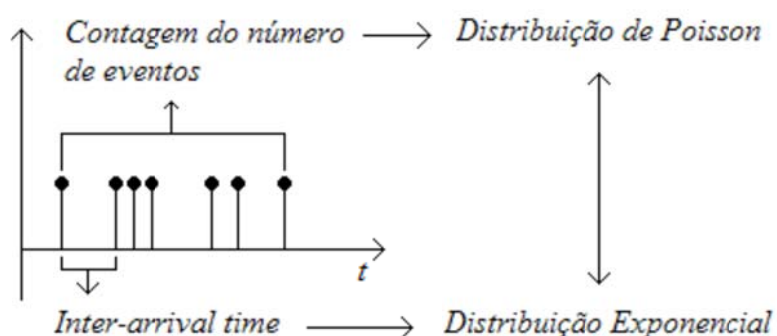


Figura 4.6 - Relação entre a distribuição de Poisson e Exponencial

A distribuição de *Poisson* está relacionada com a distribuição exponencial (Figura 4.6) (esta última analisa inversamente o problema, ou seja estima um intervalo de tempo para a ocorrência do evento) o que nos permite saber que o tempo entre eventos (*inter-arrival time*) segue uma distribuição exponencial de parâmetro  $\lambda$ . [38]

Relativamente ao tamanho dos pacotes gerados, estes são criados seguindo uma distribuição exponencial de média  $1/\mu$ . O tamanho dos pacotes está limitado a 2346 Bytes porque esta versão da implementação do MAC 802.11 não suporta fragmentação de pacotes. Assim todos os pacotes cujo tamanho gerado exceder os 2300 Bytes serão ajustados para 2300 Bytes. Na Figura 4.7 é ilustrado o tamanho dos pacotes e o intervalo entre o envio de pacotes.

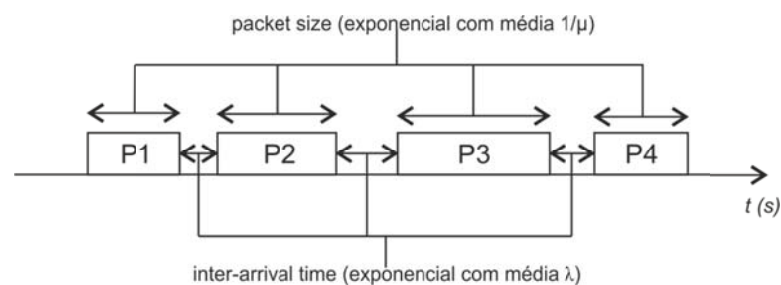


Figura 4.7 - Exemplo ilustrativo do tamanho dos pacotes e intervalo entre eles

Resumindo, o gerador de tráfego será configurado com os seguintes parâmetros:

- Intervalo entre envio de pacotes:  $\text{exponencial}(\lambda)$ ;
- Tamanho dos pacotes:  $\text{exponencial}(1/\mu)$ ;

#### 4.2.2. REMOTE ANTENNA UNIT

O módulo *Remote Antenna Unit* implementado consiste num AP 802.11, foi também adaptado dos modelos existentes e disponíveis no pacote INET Framework para o OMNeT++ [37]. Na Figura 4.8 é apresentada a estrutura do módulo *Remote Antena Unit*, as suas funcionalidades são implementadas com os seguintes submódulos apresentados em detalhe abaixo. Os módulos *mobility* e *notificationBoard* são os mesmos utilizados no módulo *Mobile Host*.

**stats** é responsável por registar estatísticas referentes ao tráfego recebido na RAU, nomeadamente o número de pacotes e o *throughput*. Este módulo é também a *output gate* e o responsável por enviar as mensagens para o módulo seguinte.

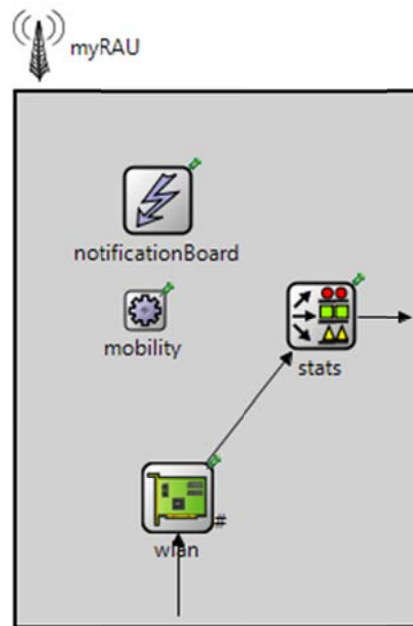


Figura 4.8 – Remote Antenna Unit criado no OMNeT

**wlan** é uma placa de rede 802.11 de um AP simples configurado para modo infraestrutura cujas operações não suportam *handover*. Tal como no *Mobile Host*, as camadas inferiores (ou submódulos) desta são responsáveis por encapsular/descapsular as frames e mensagens de controlo, atribuir os endereços de destino e de origem nas frames e o número de sequência das mesmas. Existe também a camada física do MAC, que é responsável por estabelecer a comunicação com as outras estações (*hosts* ou APs).

Esta versão não implementa *beacons*, *probes*, acções de autenticação ou associação entre as estações e o AP, por este modo não suporta *handover*. Também não muda de canal, isto é mantém sempre o mesmo canal que é definido no início da simulação.

As frames 802.11 recebidas pela placa de rede são transmitidas para o módulo seguinte, passando primeiro por um módulo intermédio (*stats*) onde são recolhidas estatísticas referentes aos dados transmitidos (*throughput*, número de pacotes por segundo).

### 4.2.3. CENTRAL STATION

O módulo *Central Station* implementado (Figura 4.9) apenas consiste num submódulo que recolhe estatísticas do tráfego recebido e apaga as mensagens. Este módulo apenas recebe as mensagens enviadas pelo Mobile Host, recolhe dados para fins estatísticos e elimina as mensagens.

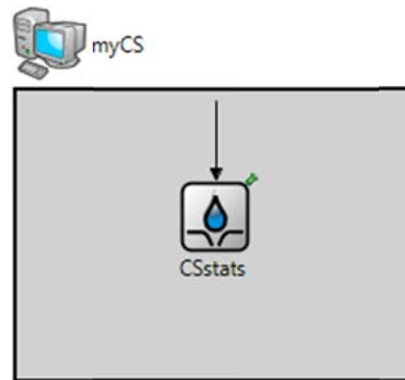


Figura 4.9 – Central Station criado no OMNeT

**CSstats** tal como o seu homólogo, é responsável por registar estatísticas referentes ao tráfego recebido (número de pacotes e o *throughput*). Este módulo também tem a responsabilidade de eliminar as mensagens que recebe, uma vez que estas não serão enviadas para mais nenhum elemento.

### 4.2.4. FIBRA (CANAL)

Para simular uma ligação de fibra óptica foi criado um canal configurado com alguns parâmetros definidos. Os sinais não se propagam instantaneamente nos meios de transmissão, isto é propagam-se com uma velocidade  $v$  finita.

Por exemplo numa transmissão por rádio a velocidade de propagação é próxima da velocidade da luz (300.000 Km/s). Utilizando cabos as velocidades de propagação são inferiores. A fibra óptica monomodo permite atingir cerca de 2/3 da velocidade da luz (66%), ou seja cerca de 198.000 Km/s. Nos cabos de cobre a velocidade de propagação situa-se entre 40% a 50% da velocidade da luz.

Deste modo podemos calcular o atraso de propagação resultante ao percorrer uma distância  $d$  pela seguinte relação apresentada na Equação 2:

$$Delay = \frac{d}{c \times 66\%} = \frac{d}{0,66 \times 3 \times 10^8} \quad \text{Equação 2}$$

O canal fibra implementado em OMNeT é definido sendo uma fibra monomodo, configurado com os seguintes parâmetros:

- Distância: (m);
- Atraso de propagação: calculado conforme a Equação 2 (s);

## 5. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Uma vez que o nosso sistema se encontra implementado em OMNeT, serão apresentados neste capítulo os resultados de algumas simulações efectuadas com o nosso sistema. Mas antes de iniciar as simulações é necessário garantir que os componentes estão a funcionar correctamente, ou seja têm o comportamento esperado.

### 5.1. TESTE AO GERADOR DE TRÁFEGO

Antes de iniciar as simulações é necessário confirmar que o Gerador de Tráfego funciona correctamente, isto é, está realmente a criar tráfego seguindo a distribuição pretendida. Foi criada uma simulação com 5 *Mobile Hosts* a comunicar com a RAU. Os *Mobile Hosts* são todos iguais e o Gerador de Tráfego foi configurado para criar pacotes com um tamanho médio de 500 Bytes e um intervalo entre o envio de pacotes segundo uma distribuição exponencial com  $\lambda=1s$ .

O OMNeT++ permite a possibilidade de guardar variáveis em vectores ou escalares e a partir destas criar gráficos ou até exportar os valores para serem analisados ou trabalhados em outros softwares. Os gráficos apresentados de seguida foram criados directamente no OMNeT++ 4.1. Na Figura 5.1 é possível ver o número de pacotes criado por cada um dos *Mobile Hosts* na simulação efectuada.

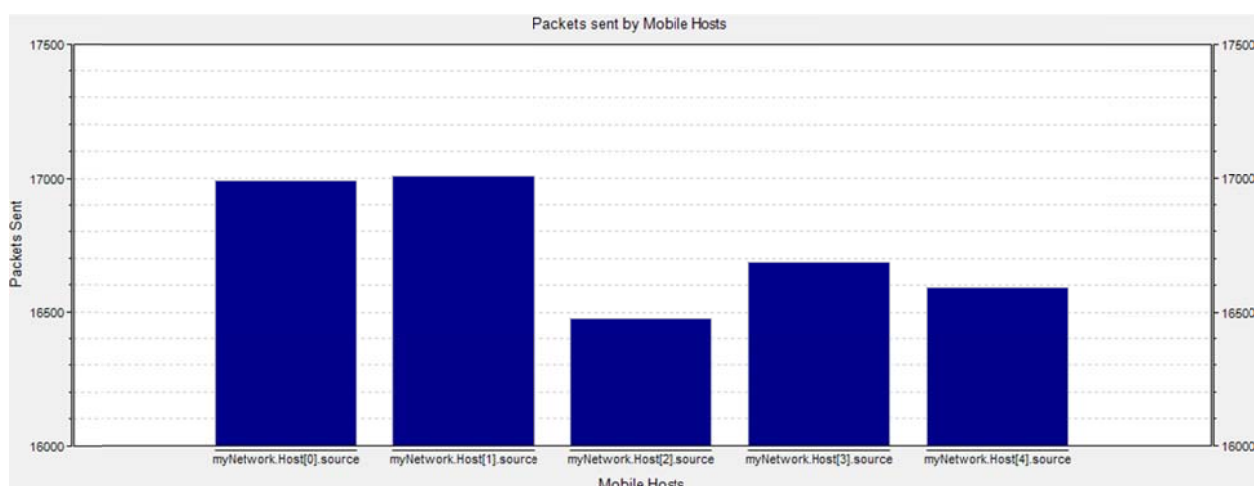


Figura 5.1 - Pacotes criados pelos Mobile Hosts

Dado que as configurações efectuadas são a nível global (afectam todos os *Hosts*, Geradores de Tráfego, etc) para analisar detalhadamente o tráfego gerado pelos *Mobile Hosts* escolhemos por exemplo o *Host[0]* e verificamos o comportamento do mesmo.

Na Figura 5.2 verificamos o gráfico relativo à contagem de pacotes, sendo estes agrupados por intervalos. O OMNeT++ permite ainda apresentar o gráfico dos resultados na forma de “*probability density*” (Figura 5.3) e na forma de “*cumulative density*” (Figura 5.4).

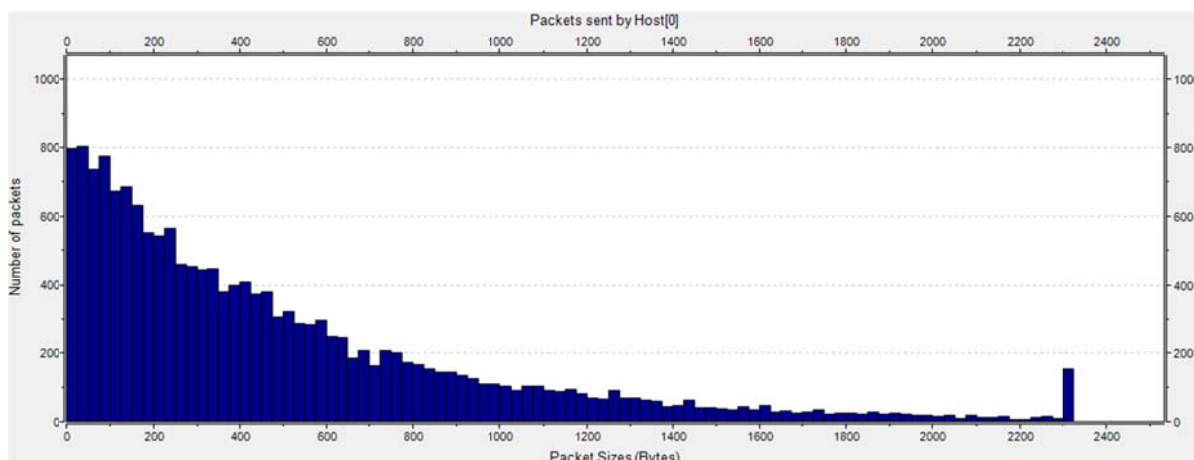


Figura 5.2 – Contagem de pacotes gerados pelo Host[0]

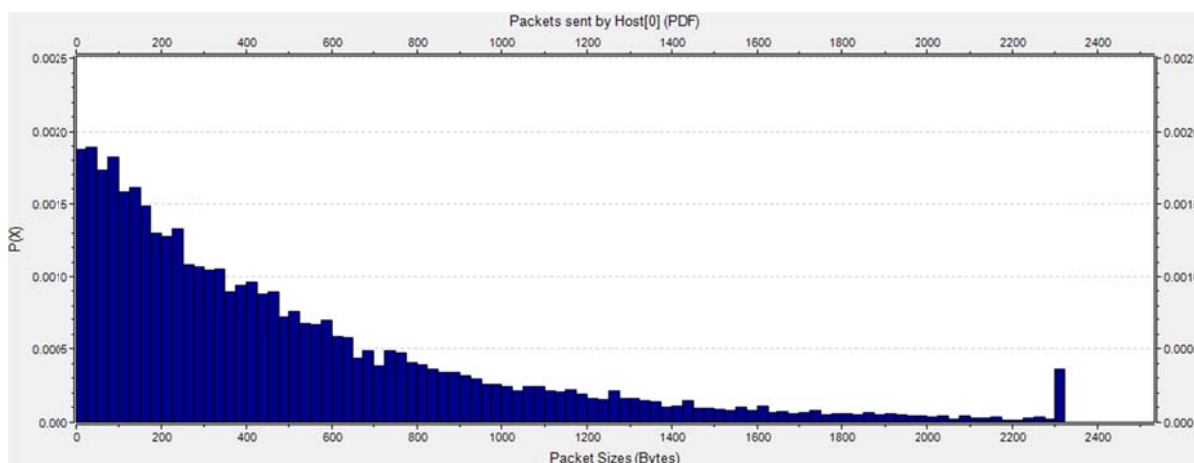


Figura 5.3 – Probability Density para os pacotes gerados no Host[0]

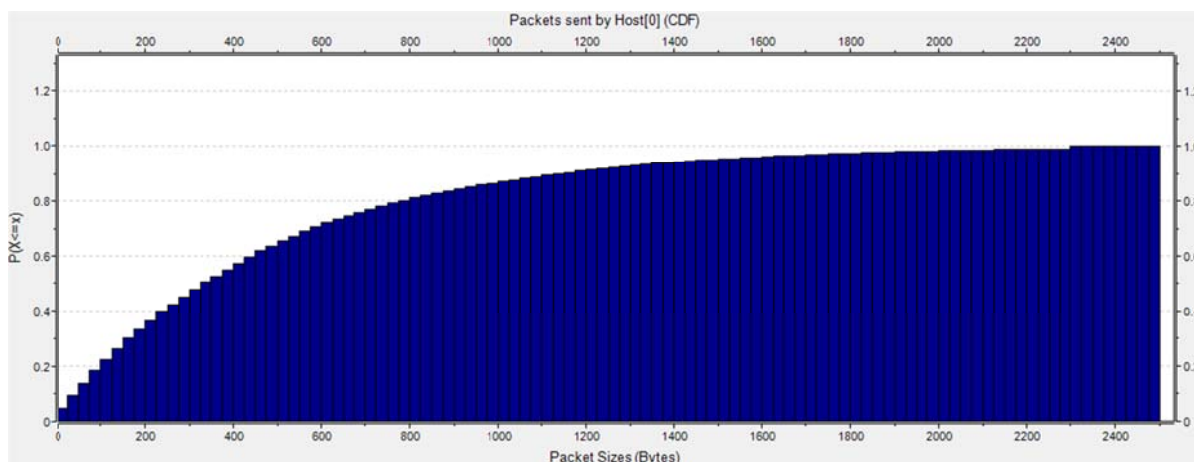


Figura 5.4 – Cumulative Density para os pacotes gerados no Host[0]

Em primeiro lugar é importante referir que o “pico” que ocorre nos gráficos das Figuras 5.2 e 5.3 é devido ao tamanho dos pacotes ser forçado a 2300 Bytes quando o gerador produz pacotes com dimensão superior a esta, como foi explicado previamente. Verifica-se também que os gráficos das Figuras 5.2 e 5.3 são semelhantes, variando apenas nos valores do eixo dos Y em que no primeiro é apresentada a frequência de ocorrências e no segundo apresentada a PDF.

Com os resultados apresentados nos gráficos das Figuras 5.3 e 5.4 podemos facilmente verificar as semelhanças com os gráficos teóricos da distribuição exponencial [37] e assim concluir que o Gerador de Tráfego está correctamente configurado e a criar o tráfego pretendido.

## 5.2. PARÂMETROS DEFINIDOS NAS SIMULAÇÕES

Abaixo são apresentados os principais parâmetros definidos para correr as simulações.

Parâmetro	Valor
Air propagation delay ( $\delta$ )	0.1 $\mu$ s
Carrier Frequency of the channel	2.4 Ghz
Channel Bitrate	11 Mbps
Network max power	20 mW
Signal attenuation threshold	-110 dBm
Message size	Exponential ( $\lambda = 500B$ )
Message inter-arrival time	Exponential (5 $\mu$ s)
Max message size	2300 B
Velocidade da luz na fibra	$0.66 \times 3 \times 10^8$
Mobile Hosts	1 – 5
Tamanho da fibra	500m – 2km – 4km – 6km – 8km

Tabela 5-1 – Parâmetros definidos nas simulações

O *throughput* na RAU e CS é calculado pela seguinte equação:

$$\text{Throughput} = \frac{\text{nbits da mensagem}}{\text{tempo}} \text{ (Mb/s)} \quad \text{Equação 3}$$

Os parâmetros referentes aos mecanismos do IEEE 802.11 não foram alterados.

### 5.3. CENÁRIO I – 1 Host

Neste cenário pretende-se simular o comportamento do sistema com apenas 1 *Host* a comunicar com a RAU. Fazendo variar a distância entre a RAU e a CS verificamos qual o impacto do atraso induzido pelo comprimento da fibra no *throughput* da CS.

Fibra (m)	Delay (s)	Throughput (Mbps)	
		RAU	CS
500m	2,52 $\mu$ s	3,26877	3,26846
2km	10,1 $\mu$ s	3,26877	3,26840
4km	20,2 $\mu$ s	3,26877	3,26834
6km	30,3 $\mu$ s	3,26877	3,26827
8km	40,4 $\mu$ s	3,26877	3,26820

Tabela 5-2 – Resultados das simulações com 1 Host

Alguns dos parâmetros definidos para as simulações encontram-se expostos na Tabela 5-1, como se pode verificar o valor escolhido para o *Inter-arrival time* foi de 5 $\mu$ s.

Na Tabela 5-2 é apresentado o atraso calculado para cada uma das Fibras utilizadas, assim como os resultados obtidos para cada caso. Verifica-se que o atraso calculado para uma Fibra de 500m era de 2,52 $\mu$ s (Equação 2), o que é inferior ao *inter-arrival time* definido. Deste modo e uma vez que o atraso induzido pela fibra é inferior ao intervalo entre o envio das mensagens, espera-se assim que todas ou quase todas as mensagens cheguem ao destino.

O *throughput* registado na RAU mantém-se constante para todas as fibras utilizadas conforme era esperado, pois conforme os parâmetros definidos as mensagens chegaram sempre ao mesmo tempo a este elemento. A variação do *throughput* registou-se foi na CS, conforme também era previsto uma vez que o atraso existente no canal da fibra iria influenciar os tempos de chegada das mensagens a este elemento. No entanto a variação do *throughput* na CS não ocorreu conforme se esperava. Era esperado que numa fibra de 8Km cujo atraso induzido era de 40,4 $\mu$ s o *throughput* diminuísse significativamente. Apenas se registou um decréscimo de 0,00026 Mbps relativamente ao valor obtido na fibra de 500m.

É necessário compreender que pela forma que o *throughput* está a ser calculado (Equação 3), apenas são contabilizadas as mensagens que chegam à CS. Ou seja

conforme os valores do atraso se forem muito superiores ao intervalo de envio de mensagens, algumas destas irão ser descartadas por não terem lugar nas filas de espera.

Uma vez que não foram alterados parâmetros referentes ao MAC IEEE 802.11, os parâmetros escolhidos para estas simulações podem eventualmente não ter sido os melhores, levando deste modo a que os resultados obtidos sejam ligeiramente diferentes dos que eram esperados.

Na Figura 5.5 é apresentado um diagrama (*Sequence Chart*), com esta ferramenta é possível verificar os eventos, actividades e trocas de mensagens ocorridos durante a simulação. São apresentadas algumas dessas mensagens (*request*, *ack*) assim como os eventos ocorridos (SIFS). Na Figura 5.6 é então possível ver um resumo das mensagens, como por exemplo o número de mensagens enviadas pelo *host*, as que foram descartadas da lista de espera, o tamanho da lista de espera e as que chegaram à RAU.

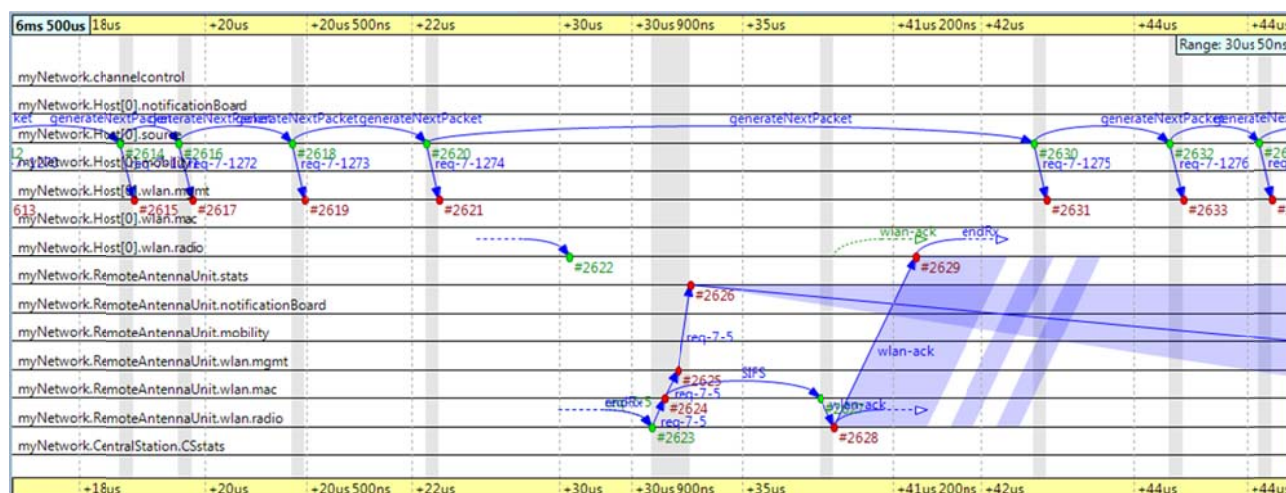


Figura 5.5 - Mensagens enviadas entre os módulos (1 Host com fibra de 8km)

Browse Data

Here you can see all data that come from the files specified in the Inputs page.

All (24 / 24) Vectors (9 / 9) Scalars (21 / 21) Histograms (1 / 1)

Folder	File name	Config na...	R	Run id	Module	Name	Count	Mean	StdDev	Varian
/Trabalho/results/	myNetwork-0....	myNetwork	0	myNetwork-0...	myNetwork.Host[0].source	Packets Size	96607	493.39865641206126	475.08...	22570...
/Trabalho/results/	myNetwork-0....	myNetwork	0	myNetwork-0...	myNetwork.Host[0].wlan.mgmt	queue drop count	96196	1.0	0.0	0.0
/Trabalho/results/	myNetwork-0....	myNetwork	0	myNetwork-0...	myNetwork.Host[0].wlan.mgmt	queue length	808	9.450495049504951	0.7384...	0.5452...
/Trabalho/results/	myNetwork-0....	myNetwork	0	myNetwork-0...	myNetwork.Host[0].wlan.mac	RadioState	3194	0.7495303694427051	0.8292...	0.6876...
/Trabalho/results/	myNetwork-0....	myNetwork	0	myNetwork-0...	myNetwork.RemoteAntennaUnit.wlan.mac	RadioState	3194	0.7495303694427051	0.8292...	0.6876...
/Trabalho/results/	myNetwork-0....	myNetwork	0	myNetwork-0...	myNetwork.Host[0].wlan.mac	State	5590	3.569051878354204	0.7334...	0.5379...
/Trabalho/results/	myNetwork-0....	myNetwork	0	myNetwork-0...	myNetwork.RemoteAntennaUnit.wlan.mac	State	4790	1.1661795407098121	2.6085...	6.8047...
/Trabalho/results/	myNetwork-0....	myNetwork	0	myNetwork-0...	myNetwork.RemoteAntennaUnit.stats	Throughput	399	3223422.08745188	330391...	1.0915...
/Trabalho/results/	myNetwork-0....	myNetwork	0	myNetwork-0...	myNetwork.CentralStation.CSstats	Throughput	399	3217803.2595558898	291345...	8.4882...

Figura 5.6 - Resumo de mensagens enviadas por 1 host numa fibra de 8km

## 5.4. CENÁRIO II – 5 HOST'S

Para este cenário o número de *Hosts* a comunicar com a RAU foi aumentado para 5. Pretende-se com isto verificar o comportamento do sistema quando vários *hosts* tentam comunicar com o mesmo equipamento. O RTS/CTS é utilizado, tal como no caso anterior, mas este agora vai colocar determinados *hosts* em espera para transmitir as mensagens, aumentando também assim o número de eventuais mensagens descartadas devido a transmissões em curso. Foram utilizados os mesmos comprimentos para as fibras e os resultados obtidos nas simulações estão apresentados na Tabela 5-3.

Fibra (m)	Delay (s)	Throughput (Mbps)	
		RAU	CS
500m	2,52 $\mu$ s	3,6266	3,5849
2km	10,1 $\mu$ s	3,6266	3,5848
4km	20,2 $\mu$ s	3,6266	3,5846
6km	30,3 $\mu$ s	3,6266	3,5845
8km	40,4 $\mu$ s	3,6266	3,5843

Tabela 5-3 – Resultados das simulações com 5 Hosts

Tal como no cenário anterior, apenas se verificou variação no *throughput* registado na CS. Esta deve-se à influência do atraso causado pela fibra acrescido ao atraso das transmissões dos *hosts* por estarem em espera. No entanto para uma fibra de 8Km apenas se verificou uma diminuição de 0,0006 Mbps no *throughput*. Este valor foi superior ao obtido no cenário anterior, como era de esperar pois temos mais elementos activos no sistema e temos também que contabilizar os atrasos induzidos pelas listas de espera.



Figura 5.7 - Mensagens enviadas entre os módulos (5 Hosts com fibra de 8km)

Na Figura 5.7 é apresentado um *Sequence Chart* com alguns dos eventos, actividades e trocas de mensagens ocorridos numa simulação (backoff, timeout, request, ack).

**Browse Data**

Here you can see all data that come from the files specified in the Inputs page.

All (64 / 64) Vectors (29 / 29) Scalars (65 / 65) Histograms (5 / 5)

runID filter module filter statistic name filter

Folder	File name	Config na...	R	Run id	Module	Name	Count	Mean	StdDev	Var
/Trabalho/results/	myNetwork2-...	myNetwor...	0	myNetwork2-...	myNetwork.Host[1].source	Packets Size	48505	495.0587568291929	474.96...	225
/Trabalho/results/	myNetwork2-...	myNetwor...	0	myNetwork2-...	myNetwork.Host[2].source	Packets Size	48877	496.0547496777626	477.06...	227
/Trabalho/results/	myNetwork2-...	myNetwor...	0	myNetwork2-...	myNetwork.Host[3].source	Packets Size	48285	490.1996065030548	471.33...	222
/Trabalho/results/	myNetwork2-...	myNetwor...	0	myNetwork2-...	myNetwork.Host[4].source	Packets Size	49135	495.67469217462093	477.16...	227
/Trabalho/results/	myNetwork2-...	myNetwor...	0	myNetwork2-...	myNetwork.Host[0].source	Packets Size	49037	492.7562452841732	470.89...	221
/Trabalho/results/	myNetwork2-...	myNetwor...	0	myNetwork2-...	myNetwork.Host[1].wlan.mgmt	queue drop count	48455	1.0	0.0	0.0
/Trabalho/results/	myNetwork2-...	myNetwor...	0	myNetwork2-...	myNetwork.Host[2].wlan.mgmt	queue drop count	48822	1.0	0.0	0.0
/Trabalho/results/	myNetwork2-...	myNetwor...	0	myNetwork2-...	myNetwork.Host[0].wlan.mgmt	queue drop count	48989	1.0	0.0	0.0
/Trabalho/results/	myNetwork2-...	myNetwor...	0	myNetwork2-...	myNetwork.Host[3].wlan.mgmt	queue drop count	48217	1.0	0.0	0.0
/Trabalho/results/	myNetwork2-...	myNetwor...	0	myNetwork2-...	myNetwork.Host[4].wlan.mgmt	queue drop count	49082	1.0	0.0	0.0
/Trabalho/results/	myNetwork2-...	myNetwor...	0	myNetwork2-...	myNetwork.Host[3].wlan.mgmt	queue length	122	9.172131147540984	1.4584...	2.1
/Trabalho/results/	myNetwork2-...	myNetwor...	0	myNetwork2-...	myNetwork.Host[4].wlan.mgmt	queue length	92	9.065217391304348	1.6428...	2.6
/Trabalho/results/	myNetwork2-...	myNetwor...	0	myNetwork2-...	myNetwork.Host[2].wlan.mgmt	queue length	96	9.083333333333334	1.6135...	2.6

Figura 5.8 – Resumo das mensagens enviadas por 5 hosts com uma fibra de 8km

Na Figura 5.8 é apresentado um resumo das mensagens enviadas numa simulação, tal como na Figura 5.6 é possível verificar o número de mensagens enviadas por cada *host*, as que foram descartadas da lista de espera e o tamanho da lista de espera.

Os parâmetros de simulação em ambos os cenários foram os mesmos, sendo apenas alterado o número de *hosts* envolvidos na comunicação. Verifica-se que o tamanho das filas de espera foi reduzido pelo OMNeT.

Na Figura 5.9 é apresentado a variação do throughput registada na CS numa simulação.

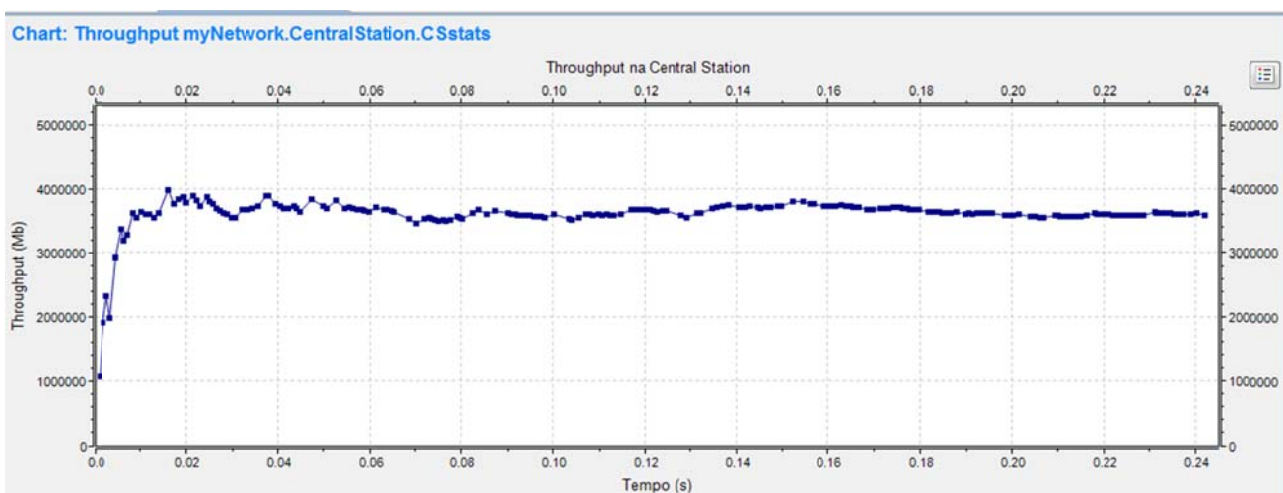


Figura 5.9 – Variação do throughput registado na CS numa simulação (5hosts com uma fibra de 8km)

## 6. CONCLUSÕES

Rádio sobre Fibra é uma tecnologia eficiente que permite integrar o domínio *wireless* com o domínio óptico, possibilitando o transporte de sinais RF através de fibras ópticas entre uma CS e um conjunto de RAUs afastadas da CS. Durante os últimos anos foram realizadas diversas pesquisas sobre as limitações físicas deste tipo de sistemas, o que tem contribuído para o desenvolvimento da tecnologia. O comprimento da fibra entre a CS e a RAU irá influenciar o desempenho do sistema, uma vez que é induzido um atraso às comunicações. Este atraso acrescido aos atrasos dos mecanismos do MAC do IEEE 802.11 (RTS/CTS, filas de espera, etc.) pode causar um impacto negativo no sistema, reduzindo a sua performance ou até mesmo causando falhas na rede.

Nesta tese foi proposto estudar o desempenho de um sistema RoF (Figura 4.4), com recurso ao simulador de eventos OMNeT++. Foram analisados cenários com apenas um *host* e com vários *hosts* a comunicar com a RAU verificando o impacto dos atrasos induzidos pelas diferentes fibras no *throughput* registado na CS. No cenário I (com apenas 1 *host*) verificou-se uma redução no *throughput* registado, embora fosse esperada uma redução maior. No cenário II (com 5 *hosts*) também se registou um decréscimo no *throughput* da CS, embora também fosse esperada uma redução mais significativa quando se utiliza uma fibra de maior comprimento.

Relativamente aos resultados obtidos, esperava-se que ao aumentar o tamanho das fibras, de 500m para 8Km resultasse numa variação mais significativa do *throughput*. A variação existiu, apenas não foi com valores muito elevados. Tendo em conta os parâmetros definidos (Tabela 5-1), o tamanho médio das mensagens estava definido para 500Bytes, o máximo limitado a 2300Bytes e os tempos definidos na ordem dos  $\mu$ s. Tendo em conta estes parâmetros podemos aceitar os valores obtidos para o do *throughput*. Verificou-se também que o OMNeT alterava os tamanhos das filas de espera (Figura 5.6 e Figura 5.8), conforme o caso. Os parâmetros do IEEE 802.11 não foram alterados pelo programador, de forma que se ocorreram alterações nestes estas foram efectuadas pelo próprio OMNeT.

Confirma-se que a introdução de um canal óptico entre a CS e uma RAU induz um atraso nas trocas de mensagens de um sistema. Este atraso pode provocar a perda de mensagens (Figura 5.7) e uma redução no *throughput*, como foi verificado nas simulações realizadas. Este atraso depende do comprimento do canal óptico utilizado na ligação entre os equipamentos. Relativamente às mensagens descartadas, estas são influenciadas pelo intervalo entre envio de mensagens (*inter-arrival time*), a capacidade das filas de

espera, dos mecanismos do MAC (como por exemplo o RTS/CTS) e também pelo atraso que é induzido pela fibra uma vez que não será enviada uma nova mensagem até que a mensagem anterior chegue ao seu destino.

Para finalizar e atendendo ao que foi exposto nesta tese, pode-se dizer que a tecnologia Rádio sobre Fibra tem potencial para se afirmar dada a simplicidade dos seus equipamentos e os bons resultados apresentados. Pode ser aplicada em diversos cenários, alguns destes foram apresentados nesta tese. Esta é também muito mais eficiente em termos de gestão de recursos relativamente aos sistemas convencionais

---

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] *Broad Band Wireless Communication System*. Thomson, November 9<sup>th</sup> 2010. Disponível em: <http://www.coreelectronics.info/coreelectronics/broad-band-wireless-communication-systems-2.html>
- [2] J. Guillory, S. Meyer and B. Charbonnier, “*Radio over Fiber for an optimal 60 GHz Home Area Network*”, Orange Labs, January 2010.
- [3] H. Harun, S. M. Idrus and A. B. Mohammad, “*Optical Front-end Receiver Design for Radio over Fiber System*”, The 5<sup>th</sup> Student Conference on Research and Development, 2007.
- [4] *Base Transceiver Station release 1.0*, Airlink 8000, January 2000.
- [5] *GSM Architecture*, Nokia Networks Oy, Finland 2002.
- [6] S. Sari, B. Kalantari-Sabet, J. C. Attard and J. E. Mitchell, “*Radio Over Fibre Networks*”.
- [7] Hoon, Kim. *Radio-over-Fiber Technology for Wireless Communication Services*. Samsung Electronics, Oct 13 2005. Disponível em: [http://www.tspd.com.tw/images/fbfiles/files/ROF\\_for\\_wireless\\_comm\\_Hoon\\_Kim\\_pdf](http://www.tspd.com.tw/images/fbfiles/files/ROF_for_wireless_comm_Hoon_Kim_pdf).
- [8] A. Das, A. Nkansah, N. J. Gomes and M. Mjeku, “*Effects on IEEE 802.11 MAC Throughput in Wireless LAN Over Fiber Systems*”, in *Journal of Lightwave Technology*, vol 25, no 11, November 2007.
- [9] M. Garcia Larrodé, A. M. J. Koonen and P.F.M. Smulders, “*Impact of Radio-over-Fiber Links on the Wireless Access Protocols*”.
- [10] Pardeep Kaur, R.S. Kaler, “*Radio over Fiber Networks*”, *Proceedings of National Conference on Challenges & Opportunities in Information Technology*, March 2007.
- [11] Ken-Ichi Kitayama, “*Architectural Considerations of Fiber-Radio Millimeter-Wave Wireless Access Systems*”, 2000.
- [12] Lech Smoczynski, Marian Marciniak, “*A comparison of different Radio over Fibre system concepts with regard to applications in mobile internet and multimedia*”.
- [13] David Wake, “*Recent Trends in Radio over Fibre for Wireless Access*”, *Microwave Photonics*.
- [14] Hong Bong Kim, Marc Emmelmann, Berthold Rathke and Adam Wolisz, “*A Radio over Fiber Network Architecture for Road Vehicle Communication Systems*”, in *Proc of IEEE Vehicular Technology Conference*, 2005.

- [15] A. I. Mashhour and J. E. Mitchell, *“Radio-over-Fibre Business Assessment for Road Vehicle Communications”*.
- [16] Martin Strasser, *“FTTA Fiber-To-The-Antenna – Technology Change in Mobile Communications”*, HUBER+SUHNER Switzerland.
- [17] *“Fiber To The Antenna - FTTA solutions for radio base stations”*, Ericsson Network Technologies AB, EN/LZT 108 1089 Rev A.
- [18] Earl J. Lum, *“The Evolution of the BTS Market: Towards 4G Technology”*, in CS MANTECH Conference, May 17<sup>th</sup>-20<sup>th</sup>, 2010, Portland, Oregon, USA.
- [19] Hong Bong Kim and Adam Wolisz, *“A Radio over Fiber based Wireless Access Network Architecture for Rural Areas”*, in Proc. Of 14<sup>th</sup> IST Mobile and Wireless Communications Summit, Dresden, Germany, June 2005.
- [20] Catarina Cabral, *“Comunicações Móveis GSM & 3G para o Metro de Lisboa”*, TMN, 2006.
- [21] Hamed Al-Raweshidy, *“Optical Fibre Technologies and Radio over Fibre Strategic Research for Future Networks”*, eMobility Technology Platform, 11/2/2010.
- [22] Hamed Al-Raweshidy, *“RoF Strategic Research for Future Networks”*, Wireless Networks & Communications Centre, Brunel University, Londo, eMobility, Brussels 15/01/2010.
- [23] *“Guidelines For FTTH Deployment In Greenfield Developments”*, Converge Networks, Australia.
- [24] John Bartell, *“GPON Tutorial”*, September 20<sup>th</sup> 2009, disponível em: <http://www.fttxtra.com/ftth/gpon/gpon-tutorial/>, último acesso em 27/07/2011.
- [25] Cláudio Gonçalves, *“GPON/FTTH”*, Relatório de Projecto 2008/2009, Centro de Competências Exactas e da Engenharia, Universidade da Madeira.
- [26] Overview and Guide to the IEEE 802 LMSC, March 2008, disponível em: <http://www.ieee802.org/IEEE-802-LMSC-Overview-and-Guide-01.pdf>
- [27] *Part 11: Wireless Lan Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, 1999. Available: ANSI/IEEE Std 802.11.
- [28] Shojiro Takeuchi, *“Performance Improvement of IEEE802.11 Wireless Lan Networks”*, Graduate School of Science and Engineering at Waseda University, Feb 2006.
- [29] Bob O’Hara and Al Petrick, *“IEEE 802.11 Handbook – A Designer’s Companion”*, Published by Standards Information Network IEEE Press, 1999.

- [30] B. Kalantarisaheb and J. E. Mitchell, “MAC Constrains on the Distribution of 802.11 using Optical Fibre”, in Proceedings of the 9<sup>th</sup> European Conference on Wireless Technology, September 2006.
- [31] Roger D. Smith, “Simulation Article”, in Encyclopedia of Computer Science 4<sup>th</sup> Edition, July 2000, New York, disponível em: <http://www.modelbenders.com/encyclopedia/encyclopedia.html>
- [32] Álvaro Barradas, “Quality of service in optical burst switching networks: Chapter 6 - Simulation Model”, PhD thesis, Universidade do Algarve, 2009.
- [33] András Varga, OMNeT++ release 4.1, 06/14/2010, <http://www.omnetpp.org/>
- [34] INET Framework for OMNeT++ 4.0/4.1 release 20100723, disponível em: <http://inet.omnetpp.org/>
- [35] Tic Toc Tutorial for OMNeT++, disponível em: <http://www.omnetpp.org/doc/omnetpp/tictoc-tutorial/part3.html>
- [36] OMNeT++ User Manual, disponível em: <http://www.omnetpp.org/doc/omnetpp/manual/usman.html>
- [37] INET Framework for OMNeT++ release 20100723 , disponível em: <http://inet.omnetpp.org/doc/INET/neddoc/index.html>
- [38] Exponential Distribution, [http://en.wikipedia.org/wiki/Exponential\\_distribution](http://en.wikipedia.org/wiki/Exponential_distribution)