

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Avaliação de Desempenho de Uma Rede Wi-Fi Sobre Fibra Ótica Usando ns-3

Pedro Miguel Silva Saraiva

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Manuel Ricardo

Co-orientador: Doutor Luís Pessoa

30 de Junho de 2014

A Dissertação intitulada

“Avaliação de Desempenho de Uma Rede Wi-Fi Sobre Fibra Ótica Usando ns-3”

foi aprovada em provas realizadas em 17-07-2014

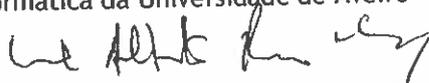
o júri



Presidente Professor Doutor Abel Jorge Antunes da Costa
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Professor Doutor Paulo Miguel Nepomuceno Pereira Monteiro
Professor Associado do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e
Informática da Universidade de Aveiro



Professor Doutor Manuel Alberto Pereira Ricardo
Professor Associado do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de
Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projeto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extratos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são corretamente citados.



Autor - Pedro Miguel Silva Saraiva

Resumo

A tecnologia Rádio sobre Fibra, ou *Radio over Fiber (RoF)* em Inglês, é uma tecnologia emergente, por onde certamente passará o futuro das comunicações móveis.

Esta permite dar resposta à necessidade de uma solução centralizada e sustentável para um cenário de distribuição de serviço *Wi-Fi*, onde é possível o transporte do sinal até quilómetros de distância de uma estação central. Esta estação central é a responsável pela gestão da lógica de toda a rede, onde se ligam todos os restantes nós. A utilização de fibra ótica oferece um nível de atenuação extremamente baixo bem como uma imunidade a interferências electromagnéticas. De uma forma mais específica, este documento analisa como se comporta o protocolo de acesso ao meio (*Medium Access Control – MAC*) do standard de comunicações sem fios IEEE 802.11g ao nível de gestão de uma rede em que podem existir injustiças de acesso ao meio por parte de cada uma das estações ligadas a essa rede, devido às diferenças de tempo de propagação do sinal em fibras óticas que têm comprimentos diferentes.

Para tal análise, utiliza-se o simulador de redes *Network Simulator 3 (ns3)*, no qual se propõe um método de implementação deste cenário, que servirá de base para os testes a realizar em contextos tais como a existência de uma grande diferença de comprimentos de fibras óticas que ligam diferentes estações ao ponto de acesso central. Um dos principais resultados deste trabalho prende-se com a verificação de que os algoritmos de débito adaptativo presentes no mercado não são ajustáveis ao cenário proposto, sendo evidenciado, por outro lado, um desempenho notável quando estes algoritmos não são usados. É também verificado que o método de transmissão *Request-to-Send/Clear-to-Send (RTS/CTS)* consegue, na maior parte das vezes, melhores resultados do que o seu concorrente em acesso básico.

Abstract

Radio Over Fiber (RoF) is an emerging technology, that will be certainly embraced by the Mobile Communications world.

RoF is able to respond to the demand of a centralized and sustainable solution for a Wi-Fi service distribution scenario, giving us the possibility of carrying the radio signal over long distances, from a central office to its destiny. The central office, where all the other stations are connected, is responsible for all the logical management of the network. Optical Fiber links give us the advantage of having low attenuation while being immune to electromagnetic interference. More specifically, this article makes an analysis of how the Medium Access Control layer of the IEEE 802.11g behaves when it is faced with unfairness regarding the attempts on occupying the transmission medium by different stations, due to the different propagation delay time caused by optical links that have different lengths.

For such analysis, the Network Simulator 3 (ns3) will be used, where a solution regarding the simulation of a Radio over Fiber environment, will be proposed, since the simulator doesn't have support for such technology yet. This implementation will help us simulating such scenarios where there is a considerable difference between fiber links lengths that connect multiple stations to a central access point. It will be shown that rate control algorithms are worthless for the proposed scenario. It is also revealed that the Request-to-Send/Clear-to-Send mechanism is more efficient most of the times, than the basic access method.

Agradecimentos

É com bastante prazer que dedico este canto às pessoas que me foram indicando o caminho durante o desenvolvimento e escrita desta dissertação, contribuindo assim para que se levantassem certos momentos de neblina. Ao Filipe Ribeiro, ao Luís Pessoa, ao Rui Campos e ao João Oliveira, as pessoas do INESC Porto que comigo partilharam o seu conhecimento, o meu obrigado por todo o apoio e disponibilidade demonstrada.

E claro, aos meus pais, por terem fornecido as condições para que eu conseguisse desfrutar e viver esta experiência.

Pedro Saraiva

*“A alegria de ver e compreender
é a mais bela dádiva da natureza.”*

Albert Einstein

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Contexto	1
1.2	Motivação	2
1.3	Objectivos	2
1.4	Contribuição	3
1.5	Estrutura da Dissertação	3
2	Estado da Arte	5
2.1	Introdução a uma possível abordagem arquitetónica	5
2.2	O IEEE 802.11	6
2.2.1	A Camada MAC	6
2.3	O Problema de <i>Nó Escondio Inter-RAU</i>	10
2.3.1	Acesso Básico vs RTS/CTS	11
2.3.2	Simulações em trabalhos do estado da arte	12
3	Solução Proposta	17
3.1	Simulador a usar: ns3	17
3.2	Arquitetura do sistema a considerar	18
3.3	Estratégia a adotar	19
4	Fase Experimental	23
4.1	Alterações a aplicar	23
4.1.1	Alterações ao <i>Script</i>	23
4.1.2	Alterações em Modelos	25
4.2	Simulações e Resultados	28
4.2.1	ArfWifiManager	30
4.2.2	MinistrelWifiManager	34
4.2.3	ConstantRateWifiManager	39
4.2.4	OnoeWifiManager	43
4.2.5	Colisões	48
4.3	Discussão dos Resultados	51
5	Conclusões e Trabalho Futuro	53
5.1	Contribuições	53
5.2	Trabalho Futuro	54
	Referências	55

Lista de Figuras

1.1	Diagrama do cenário principal.	2
2.1	Arquitetura de Rede [1].	5
2.2	Mecanismo de Acesso [2] - Os diferentes <i>Inter-Frame Spaces</i> a serem aplicados antes e depois de uma tentativa de envio de uma trama, assim como a exposição do tempo de <i>backoff</i> , também denominado de “tempo de contenção”.	7
2.3	Exemplo de transmissão de um pacote em CSMA/CA [3].	9
2.4	Terminais Escondidos - O terminal C está escondido do A [3].	9
2.5	Uso do RTS/CTS [3].	10
2.6	Exemplo de casos em que o atraso imposto por comprimentos de fibra diferentes afeta o desempenho do sistema [4].	11
2.7	O tempo vulnerável em Acesso Básico e em RTS/CTS [4].	12
2.8	Parâmetros do Sistema [4].	13
2.9	Débito normalizado numa fibra quando $n=1$. Linhas a tracejado indicam os métodos tradicionais (<i>without F</i>). As linhas preenchidas representam o modelo que está a ser simulado (<i>with F</i>). [4]	14
2.10	Efeitos da fibra consoante o número de estações presentes. As linhas preenchidas representam os cálculos do modelo analítico do estudo em questão, os asteriscos correspondem aos valores simulados [4].	15
2.11	Comparação do efeito da existência do canal de fibra ótica com $n=1$. Linhas preenchidas representam o Acesso Básico, enquanto as linhas a tracejado representam o modo RTS/CTS [4].	16
3.1	Logótipo do simulador ns3 [5].	17
3.2	Arquitetura a considerar.	19
3.3	Exemplo da criação de um objeto <i>WifiChannel</i> que em conjunto com o objeto <i>WifiPhy</i> definem o meio de propagação.	20
3.4	Equivalente à Figura 3.2 a aplicar no ns3.	21
4.1	Gráfico que representa a evolução do débito em Mbit/s, usando CSMA/CA e o algoritmo ARF, à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.	31
4.2	Gráfico que representa a evolução de pacotes perdidos à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.	32

4.3	Gráfico que representa a evolução do débito em Mbit/s, usando RTS/CTS e o algoritmo ARF, à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.	33
4.4	Gráfico que representa a evolução de pacotes perdidos à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.	34
4.5	Gráfico que representa a evolução do débito em Mbit/s, usando CSMA/CA e o algoritmo Ministrel, à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.	36
4.6	Gráfico que representa a evolução de pacotes perdidos à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.	36
4.7	Gráfico que representa a evolução do débito em Mbit/s, usando RTS/CTS e o algoritmo Ministrel, à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.	38
4.8	Gráfico que representa a evolução de pacotes perdidos à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.	39
4.9	Gráfico que representa a evolução do débito em Mbit/s, usando CSMA/CA e taxa de débito constante, à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.	40
4.10	Gráfico que representa a evolução de pacotes perdidos à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.	41
4.11	Gráfico que representa a evolução do débito em Mbit/s, usando RTS/CTS e débito constante, à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.	42
4.12	Gráfico que representa a evolução de pacotes perdidos à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.	43
4.13	Diagrama de blocos representativo do funcionamento do Onoe [6].	44
4.14	Gráfico que representa a evolução do débito em Mbit/s, usando CSMA/CA e o algoritmo Onoe, à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.	45
4.15	Gráfico que representa a evolução de pacotes perdidos à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.	46
4.16	Gráfico que representa a evolução do débito em Mbit/s, usando RTS/CTS e o algoritmo Onoe, à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.	47

4.17	Gráfico que representa a evolução de pacotes perdidos à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.	48
4.18	Todos os gráficos de débito apresentados, utilizando o mecanismo CSMA.	52
4.19	Todos os gráficos de débito apresentados, utilizando o mecanismo RTS/CTS.	52

Lista de Tabelas

3.1	Tabela com os diferentes tipos de fibra e os respectivos índices de refração e velocidade de propagação [7].	18
4.1	Parâmetros do sistema.	30
4.2	Valores de débito da STA1 (fixa nos 110m) e STA2 em Mbit/s usando CSMA/CA e o algoritmo ARF.	31
4.3	Valores de débito da STA1 (fixa nos 110m) e STA2 em Mbit/s usando RTS/CTS e o algoritmo ARF.	33
4.4	Valores de débito da STA1 (fixa nos 110m) e STA2 em Mbit/s usando CSMA/CA e o algoritmo Ministrel.	35
4.5	Valores de débito da STA1 (fixa nos 110m) e STA2 em Mbit/s usando RTS/CTS e o algoritmo Ministrel.	37
4.6	Valores de débito da STA1 (fixa nos 110m) e STA2 em Mbit/s usando CSMA/CA e débito constante.	40
4.7	Valores de débito da STA1 (fixa nos 110m) e STA2 em Mbit/s usando RTS/CTS e débito constante.	42
4.8	Valores de débito da STA1 (fixa nos 110m) e STA2 em Mbit/s usando CSMA/CA e o algoritmo Onoe.	45
4.9	Valores de débito da STA1 (fixa nos 110m) e STA2 em Mbit/s usando RTS/CTS e o algoritmo Onoe.	47
4.10	Tabela com o número de colisões de pacotes nos sentidos indicados. Estes valores referem-se ao mecanismo CSMA/CA em Débito Constante.	49
4.11	Tabela com o número de colisões de pacotes nos sentidos indicados. Estes valores referem-se ao mecanismo RTS/CTS em Débito Constante.	50

Abreviaturas e Símbolos

AP	Access Point
ARF	Auto Rate Fallback
API	Application Programming Interface
CO	Central Office
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
DAS	Distributed Antenna System
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LLC	Logical Link Control
MAC	Media Access Control
Mbit/s	Megabit Per Second
NS3	Network Simulator 3
OSI	Open Systems Interconnection
PHY	Physical
RAU	Remote Antenna Unit
RoF	Radio over Fiber
RTS/CTS	Request-to-Send / Clear-to-Send
STA	Station
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
WLAN	Wireless Local Area Network
WLAN-RoF-DAS	WLAN-RoF-Distributed Access System

Capítulo 1

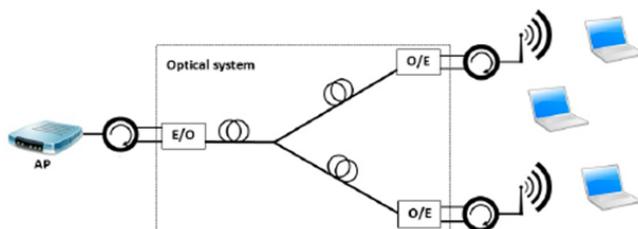
Introdução

1.1 Contexto

A tecnologia Rádio sobre Fibra (*ou Radio Over Fiber RoF*), surge no âmbito da evolução das necessidades de débitos dos consumidores, devido ao desenvolvimento das tecnologias que têm como base a Internet e as redes de comunicação em geral. No âmbito da tecnologia WiFi este movimento despoletou o interesse nas janelas espectrais não apenas nos 2.4GHz, mas também nos 5GHz e 60GHz, onde a largura de banda é maior e, como consequência, também os débitos atingidos. [8].

A arquitetura deste tipo de sistemas caracteriza-se pela centralização da complexidade dos pontos de acesso da rede, ou seja, transferiram-se para um *Central Office*(CO). Considerando um ponto de acesso, ou *Access Point* (AP), de transmissão de sinais WiFi, a sua única função é a de transmitir o sinal rádio previamente enviado por um AP Central (localizado no *Central Office*) através de um link de Fibra Ótica em direção à estação (STA) correspondente, tornando-se assim numa simples antena de transmissão [9]. Estas antenas denominam-se de unidade de antena remota ou *Remote Antenna Unit - RAU*. Estas limitam-se a converter o sinal ótico em elétrico (e vice versa) e a transmiti-lo. Nesta situação específica, todos os componentes complexos que numa arquitetura convencional se encontrariam no AP, como por exemplo a gestão de ligações, escolha de débito, potência de transmissão, entre outros, estão centralizados no AP Central. Generalizando, se considerarmos que em vez de um RAU, existem vários, com diferentes comprimentos de fibra ótica até ao AP Central, estamos perante o cenário a abordar neste documento.

Figura 1.1: Diagrama do cenário principal.



A tecnologia RoF está também a ser amplamente estudada no âmbito das comunicações GSM, LTE e semelhantes, num cenário denominado por *Cloud RAN(C-RAN)*, mas este documento irá dedicar-se exclusivamente ao estudo da tecnologia Rádio sobre Fibra para transmissão de sinais WiFi. [10]

1.2 Motivação

Os motivos que levam a um grande interesse no desenvolvimento da tecnologia *RoF* são de várias ordens [11].

O facto de ser usada fibra na transmissão destes sinais, diminui consideravelmente a atenuação ao longo de vários quilómetros comparado com a transmissão sem fios. A sua complexidade é diminuída em grande escala, devido à centralização das funções num único *central office*. Na perspetiva económica, os custos gerais de manutenção são reduzidos em grande escala devido à utilização de tecnologias mais simples nos pontos de acesso e de um menor consumo de potência por parte dessas mesmas tecnologias. Para finalizar, a tecnologia RoF é transparente no que diz respeito aos protocolos usados, ou seja, não tem limitações ao uso de protocolos diferentes, podendo assim acompanhar a evolução dos standards de comunicação sem fios mesmo noutras bandas de espectro. Este fator assume particular importância tendo em conta que possibilita aumentar a confiança do investimento ao reduzir a incerteza em relação à evolução futura dos standards.

Estas são as principais razões que estimulam um grande interesse na instalação desta tecnologia.

1.3 Objectivos

Este documento irá essencialmente analisar a performance do protocolo de acesso ao meio, ou *Medium Access Control (MAC)* do *Standard IEEE 802.11*. Para tal será utilizado o Simulador de Redes Network Simulator 3 (ns3) devido à sua aproximação realista e completa ao modelo 802.11. Para atingir esse objectivo, os procedimentos são:

- Procurar estudos já feitos na área.
- Familiarização com o software ns3.
- Elaboração de um modelo em ns3 que seja realista em relação ao cenário proposto.
- Simular o sistema em conformidade com os objetivos a cumprir.
- Recolher dados, realizar comparações em diferentes cenários e retirar conclusões.

1.4 Contribuição

Este documento tem como objectivo a recolha de informação sobre o desempenho do MAC do 802.11 para servir de guia a trabalho futuro no tema nomeadamente propostas de solução para melhoramentos ao nível MAC do 802.11 adaptado ao contexto da Rádio sobre Fibra. Estes melhoramentos podem ser realizados ao nível do ns3, tirando partido da estratégia usada neste trabalho para fazer uma aproximação ao cenário *RoF* neste software.

1.5 Estrutura da Dissertação

Para além da introdução, esta dissertação contém mais 4 capítulos. No capítulo 2, é apresentado o estado da arte, assim como será feita a introdução de alguns conceitos para melhor compreensão do documento. No capítulo 3, será explicada a arquitetura do sistema a considerar, assim como será introduzido o raciocínio para a sua implementação em simulador. O capítulo 4 tratará da configuração do sistema e respetivas simulações, e finalmente o capítulo 5 concluirá este documento com as principais conclusões e propostas de trabalho futuro.

Capítulo 2

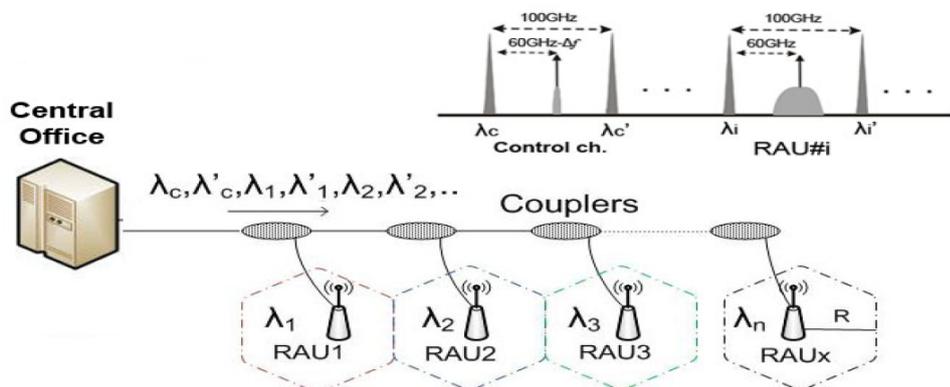
Estado da Arte

Neste capítulo será feito um levantamento de pesquisa já feita no âmbito da tecnologia Rádio sobre Fibra, assim como estudos de desempenho a casos semelhantes ao mencionado neste documento. Serão também introduzidos conceitos sobre o funcionamento do MAC do 802.11, para melhor compreensão das simulações aqui apresentadas.

2.1 Introdução a uma possível abordagem arquitetônica

Embora o cenário considerado neste documento não esteja inteiramente alinhado com a exploração do máximo das potencialidades da tecnologia Rádio sobre Fibra, como por exemplo caso a gama de frequências utilizada fosse na ordem dos 60GHz, será no entanto abordada uma arquitetura que poderá ser considerada no futuro, no âmbito de outras gamas espectrais ou protocolos [1] [9].

Figura 2.1: Arquitetura de Rede [1].



Como já foi referido anteriormente, os RAU's são os elementos responsáveis pela conversão do sinal óptico para rádio e vice-versa, sem a necessidade de algum esquema avançado de processamento de sinal, deixando toda a camada de decisão e inteligência para o *central office* (CO).

Com isto, pode-se afirmar que todas as capacidades de uma LAN podem ser oferecidas a todos os utilizadores da rede, mesmo estando localizados em células de RAU's diferentes, existindo ainda a vantagem de não existirem problemas de *handoff* pois o canal em que o sinal é transmitido é sempre o mesmo. Passa-se então a explicar uma possível abordagem. Todos os canais de *downlink* e de *uplink* são criados no CO, nomeadamente os pares de comprimentos de onda $\{\lambda_1, \lambda'_1\}$, $\{\lambda_2, \lambda'_2\}$... $\{\lambda_n, \lambda'_n\}$, em que cada par de comprimento de onda λ_i transporta tráfego *downlink* em *Single Side Band* (SSB)/ Banda Lateral Única (BLU), numa portadora central, enquanto que cada λ'_i transporta tráfego *uplink* de volta para o CO. O par $\{\lambda_c, \lambda'_c\}$ corresponde a operações de controlo de largura de banda. λ_c é usado para fins de atribuição de comprimento de onda a usar por cada RAU, enquanto que λ'_c vai atualizando o CO sobre as necessidades de tráfego de cada RAU.

2.2 O IEEE 802.11

O Standard IEEE 802.11 engloba especificações para as duas camadas inferiores do *Open Systems Interconnection* (OSI), ou seja, as camadas MAC e a Física. Neste capítulo será dado destaque ao primeiro, resumindo o seu funcionamento e organização nos pontos que são de interesse para o estudo proposto neste documento.

2.2.1 A Camada MAC

A camada MAC é uma subcamada da camada de ligação de dados (número 2 do OSI). A sua função passa essencialmente por realizar endereçamento e mecanismos de controlo, permitindo assim a comunicação em acesso múltiplo (partilhando o mesmo recurso) entre nós de uma mesma rede. Esta funciona como um ponto de ligação entre a camada física (PHY) e a camada de controlo lógico da ligação (LLC). Os conceitos abordados de seguida, assim como as imagens explicativas apresentadas são baseados na informação obtida em [2], [3] e [12].

2.2.1.1 Inter Frame Spaces & Algoritmo de Exponential Backoff

Para melhor compreensão dos métodos explicados nos subcapítulos seguintes, é importante introduzir o conceito de *Inter Frame Spaces* e de *Exponential Backoff Algorithm*. Estes conceitos correspondem a unidades temporais usadas nos diferentes mecanismos de acesso, ajudando à sua organização e funcionamento. De seguida apresenta-se uma descrição dos principais termos relacionados com os conceitos mencionados.

SIFS (Short Interframe Space) – É usado para separar transmissões que pertencem a um único diálogo e corresponde à *Inter Frame Space* mais pequena. Este valor é fixo, e calcula-se de forma a que uma estação emissora volte ao modo de receção e seja capaz de decodificar um pacote a receber. O valor de um SIFS é diferente em cada alteração feita ao 802.11. O seu valor no 802.11g/n é de 10 μ s.

PIFS (Point Coordination Interframe Space) – É usado pelo Access Point (Point Coordinator, neste caso), para ganhar acesso ao meio antes de qualquer outra estação. Este valor é igual a um SIFS mais um Slot Time (explicado em seguida). No 802.11g/n é de 19 ou 30 μs .

DIFS (Distributed Interframe Space) – É usado por uma estação que deseja iniciar uma nova transmissão. É calculada como um PIFS mais um Slot Time. No 802.11g/n é de 28 ou 50 μs .

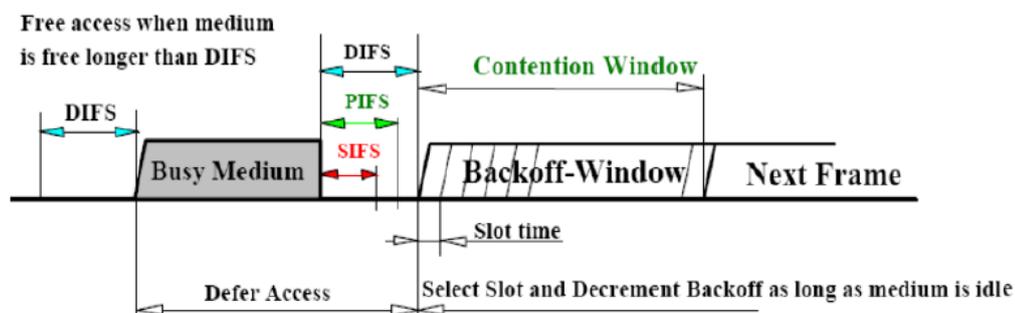
EIFS (Extended Interframe Space) - Corresponde a um *Interframe Space* mais longo usado por uma estação que recebeu um pacote que não conseguiu reconhecer. Este tempo é necessário para prevenir que a estação, que não reconheceu a informação da duração do *Network Allocation Vector* (mecanismo que define o tempo de espera das outras estações), colida com um pacote futuro que pertença à comunicação a decorrer.

O *Backoff* é um método usado na contenção entre as estações quando estas pretendem aceder ao meio. Este consiste na escolha, por parte de cada estação, de um número aleatório entre 0 e um dado valor limite, e esperar por esse número de *Slots* antes de aceder ao meio, avaliando sempre se outra estação acedeu ao meio nesse período de tempo.

O *Slot Time* é calculado de forma a que uma estação seja sempre capaz de determinar se uma outra estação acedeu ao meio no início do slot anterior. É duas vezes o tempo que um pulso eléctrico demora a viajar a distância teórica máxima entre dois nós.

O facto de ser Exponential Backoff significa que cada vez que uma estação escolhe um *Slot* e acontece uma colisão, esta irá aumentar o limite máximo para a escolha de um número aleatório (referido atrás, no *Backoff*) de forma exponencial. O algoritmo é usado quando (1) uma estação analisa o meio antes da primeira transmissão de um pacote e o meio está ocupado, (2) após uma retransmissão e (3) depois de uma transmissão bem-sucedida. O único caso em que o mecanismo não é usado é quando a estação decide enviar um novo pacote e o meio esteve livre por mais do que DIFS.

Figura 2.2: **Mecanismo de Acesso** [2] - Os diferentes *Inter-Frame Spaces* a serem aplicados antes e depois de uma tentativa de envio de uma trama, assim como a exposição do tempo de *backoff*, também denominado de “tempo de contenção”.



2.2.1.2 CSMA/CA

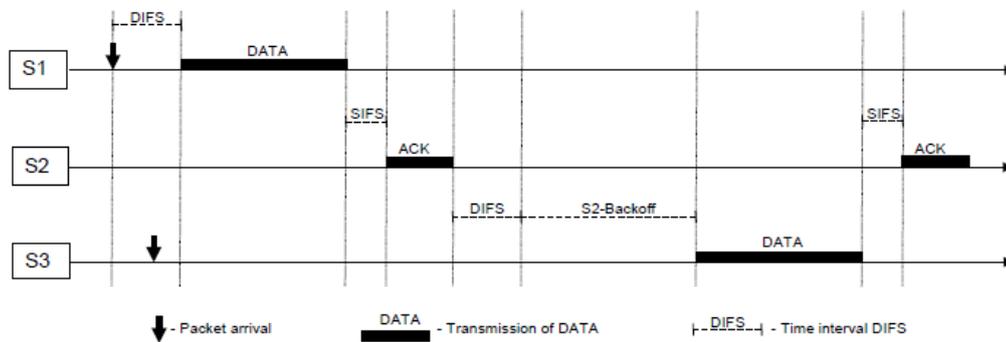
A camada de acesso ao meio define dois tipos de acesso, o *Distributed Coordination Function* e o *Point Coordination Function*, sendo o primeiro definido como o método de acesso básico. Este é basicamente o protocolo conhecido por *Carrier Sense Multiple Access* com o mecanismo de *Collision Avoidance* (CSMA/CA).

Um protocolo CSMA funciona do seguinte modo: Uma estação que deseja transmitir analisa o meio. Se este estiver ocupado, ou seja, se outra estação estiver a transmitir, então a estação adia a sua transmissão para um período posterior. Caso contrário, a estação está livre para transmitir. Este tipo de protocolos são interessantes para ambientes não muito sobrecarregados, pois permitem às estações transmitirem com pouco atraso, mas existe sempre a hipótese de duas estações analisarem o meio ao mesmo tempo e de, por esse motivo, ocorrerem colisões. Estas colisões terão de ser identificadas para que a camada MAC possa transmitir de novo. No caso da *Ethernet*, esta colisão é identificada pelas estações emissoras que recorrem a uma fase de retransmissão baseada num algoritmo de *exponential random backoff*, ou seja, um mecanismo de *Collision Detection* (CD). No entanto este não pode ser usado numa rede sem fios pois a sua implementação teria que suportar um rádio em modo *Full Duplex*, capaz de transmitir e receber ao mesmo tempo, algo que iria aumentar os custos significativamente. Adicionalmente, deve-se assumir o facto de que num ambiente partilhado nem todas as estações se “ouvem”, como acontece no caso da *Ethernet*.

Para colmatar os problemas descritos anteriormente, foi desenvolvido o método de *Collision Avoidance* (CA) em simultâneo com um *Acknowledge* (ACK), que funciona da seguinte forma:

- A estação que deseja transmitir analisa o meio, caso este esteja ocupado adia a transmissão com base num intervalo aleatório de backoff. Caso esteja livre, após um tempo específico (DIFS), esta pode transmitir.
- A estação verifica o campo CRC (*Cyclic Redundancy Check*) do pacote recebido e, caso este não tenha erros, envia um ACK. Caso o emissor não receba o ACK continuará a retransmitir até receber um ACK, ou desiste após várias tentativas.
- Para evitar o fenómeno de *channel capture*, onde o emissor “captura” o direito de transmissão durante demasiado tempo, este deve esperar um tempo de *backoff* aleatório entre dois pacotes consecutivos, mesmo que o meio esteja livre após o tempo de DIFS.

Figura 2.3: Exemplo de transmissão de um pacote em CSMA/CA [3].

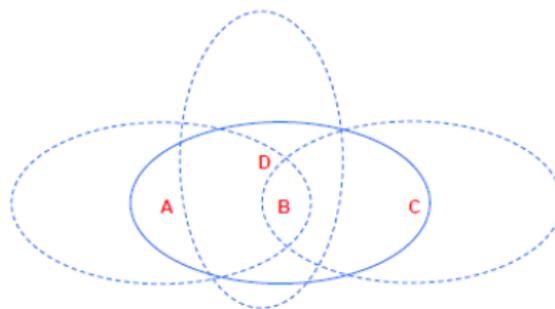


2.2.1.3 RTS/CTS

Para diminuir a probabilidade de colisão entre duas estações, devido ao facto de estas não se conseguirem “ouvir”, é definido um mecanismo com o nome de *Virtual Carrier Sense*. Antes de se passar à explicação deste método, analisa-se como funciona o mecanismo RTS/CTS:

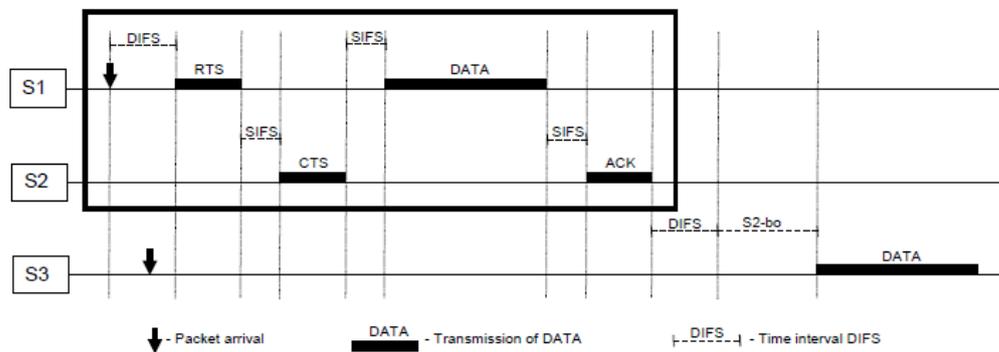
Para alguns cenários, onde são usados pacotes longos ou a probabilidade de existirem terminais “escondidos” é significativa, a eficiência do CSMA/CA pode ser aumentada através do mecanismo *Request to Send - Clear to Send (RTS/CTS)*. Este consiste no envio de uma pequena mensagem RTS para o receptor. Quando este a recebe, responde com uma nova curta mensagem CTS. Assim, o emissor envia o pacote, sendo este confirmado pelo receptor através de um ACK.

Figura 2.4: Terminais Escondidos - O terminal C está escondido do A [3].



Assim, todas as estações ao receberem um RTS e/ou um CTS, ativam o seu *Virtual Carrier Sense* (também conhecido como NAV, *Network Allocation Vector*), para a duração da transmissão. Este mecanismo reduz a probabilidade de colisão na área do receptor relativamente a uma estação “escondida” do transmissor, pois uma terceira estação ouve o CTS e considera o meio ocupado até ao fim da transmissão ativa. Este período compreende também o tempo necessário para a transmissão do ACK por parte do receptor.

Figura 2.5: Uso do RTS/CTS [3].

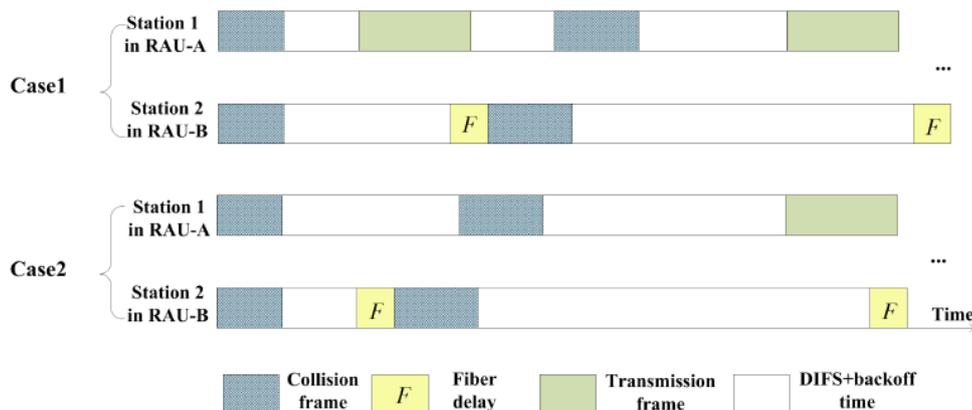


2.3 O Problema de Nó Escondido Inter-RAU

Nos estudos já feitos sobre os problemas existentes em configurações de Rádio sobre Fibra [4], estes referem-se ao facto de as estações sofrerem do efeito de *Hidden Node*, ou "Nó Escondido", em que estas não se escutam enquanto transmitem para o mesmo meio, com o nome de *Inter-RAU Hidden Node Problem*. Os detalhes a considerar para efeitos de estudo no contexto do cenário *RoF* serão expostos nesta secção.

O facto de as estações estarem a comunicar através de RAU's diferentes, em distintos locais, faz com que os utilizadores em cada RAU não se apercebam das intenções de utilização do respectivo canal por parte dos outros utilizadores. De facto, num ambiente de rede sem fios sobre fibra em acesso distribuído, (WLAN-Radio over Fiber-Distributed Access System - *WLAN-RoF-DAS*), com comprimentos de fibra diferente, as estações em RAU's com um link de fibra maior terão de esperar um determinado tempo de propagação maior, o que faz com que as estações na RAU com o link mais pequeno tenham maiores oportunidades de ocupar o canal. As diferentes probabilidades de acesso ao meio podem ser percebidas na Figura 2.6.

Figura 2.6: Exemplo de casos em que o atraso imposto por comprimentos de fibra diferentes afeta o desempenho do sistema [4].



Na Figura 2.6 pode-se observar, no Caso 1, o envio de uma trama pela Estação 1 presente no RAU-A após o fim do seu tempo de *backoff*. No entanto, uma colisão que devia ter ocorrido com uma trama enviada pela Estação 2 não aconteceu devido ao atraso provocado pela fibra de maior comprimento em RAU-B. Do mesmo modo, no Caso 2, quando a estação em RAU-B consegue o acesso ao canal em primeiro lugar, pode falhar a oportunidade de transmitir, por culpa de uma colisão, devido ao atraso F imposto pela fibra ótica. Facilmente se chega à conclusão de que as estações em RAU-A sofrem menos interferências devido à maior proximidade para com o Ponto de Acesso Central, logo conseguem um melhor desempenho. Este fator causa um desequilíbrio de débitos entre os RAU's.

2.3.1 Acesso Básico vs RTS/CTS

O mecanismo de RTS/CTS é um método de reserva para solucionar problemas de "Nó Escondido", com custo de diminuição do débito. Alguns estudos apontam para o melhor desempenho deste método inclusive num ambiente WLAN-RoF-DAS. Neste trabalho será abordada a questão de desequilíbrio de débito na situação de diferentes comprimentos de fibra, com os mecanismos RTS/CTS e CSMA/CA.

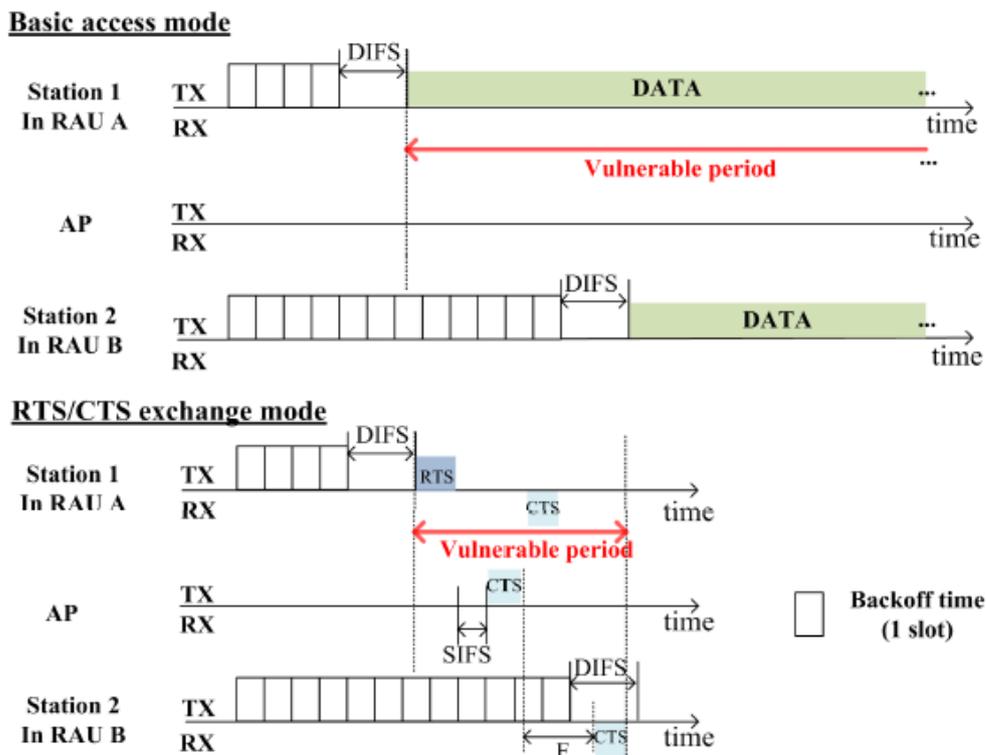
Defina-se um período vulnerável T_v , que corresponde ao intervalo entre o início de transmissão de uma estação num determinado RAU e o momento em que outras estações presentes num outro RAU recebem um ACK ou um CTS do AP. As colisões entre estações em RAU's diferentes tendem a acontecer durante este período de vulnerabilidade. T_v pode ser definido de duas formas:

$$T_{vbasic} = DATA + ACK + SIFS + F$$

$$T_{vRTS} = RTS + CTS + SIFS + F$$

Este período vulnerável é exposto através da seguinte representação gráfica.

Figura 2.7: O tempo vulnerável em Acesso Básico e em RTS/CTS [4].



No modo RTS/CTS uma estação consegue identificar o estado do meio após receber um CTS, enquanto que em Acesso Básico isso apenas sucede após a recepção de um ACK. Como uma trama RTS é muito mais pequena que uma *maximum data frame* (o tamanho máximo suportado por uma trama), o período vulnerável no modo RTS/CTS é muito mais pequeno que no modo de Acesso Básico, especialmente quando o número de estações aumenta. Isto significa que o problema do *Inter-RAU Hidden Node* é maior em CSMA/CA do que em RTS/CTS. Pode ainda mencionar-se que o período de transmissão de uma trama RTS incluindo os *F Slots* de espera é, em média, menor que o período de envio de *data frames* em Acesso Básico, o que nos leva a concluir que o impacto do atraso causado pela fibra é menos perceptível no modo RTS/CTS que no do seu concorrente.

2.3.2 Simulações em trabalhos do estado da arte

Os trabalhos de investigação sobre este tema, já fizeram algumas abordagens teóricas mas poucos são os que já realizaram simulações para retirar conclusões. No entanto, será dada relevância a algumas considerações já retiradas de simulação em ambiente *Matlab*. O estudo que de seguida se apresenta inclui uma prévia abordagem analítica, porém será dada maior relevância aos resultados simulados.

Os seguintes gráficos têm como base uma simulação onde se admitem 2 RAU's com o mesmo número n de estações em cada um, onde $n=1$. É aplicado ao estado de *Backoff* do RAU-B um

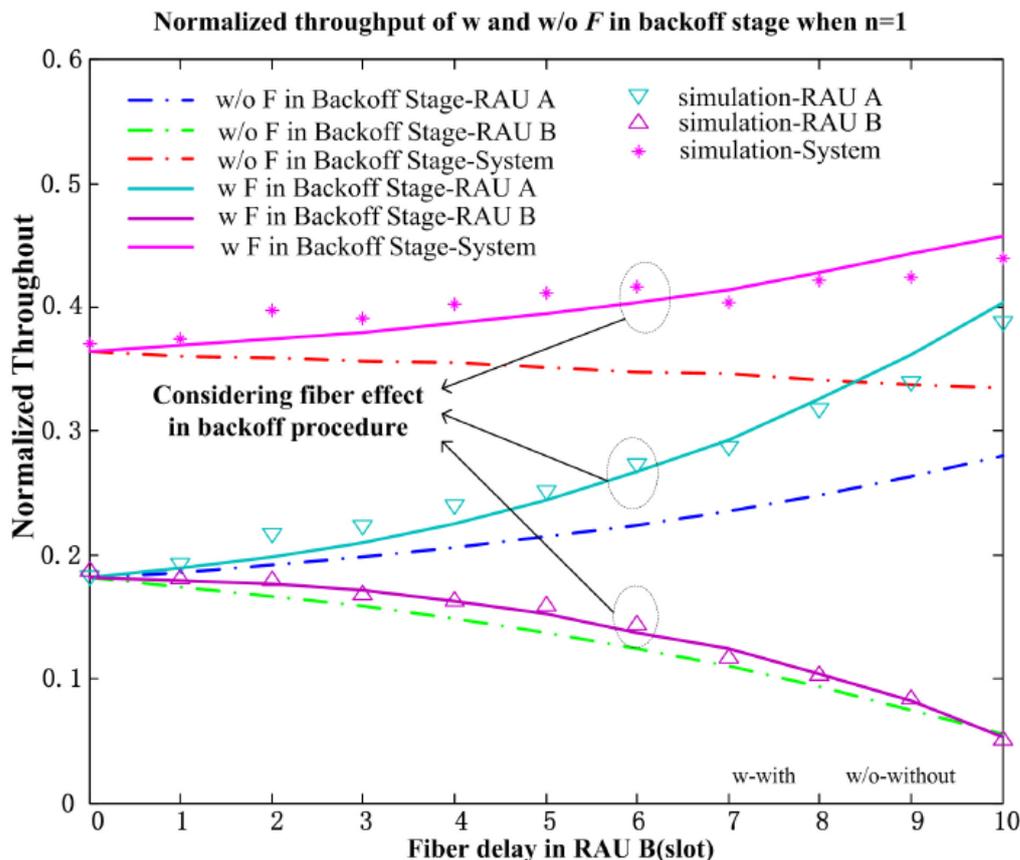
atraso F cada vez maior, em que o valor deste é N vezes o *SlotTime*, com N compreendido entre 1 e 10. O canal será saturado com cada trama a possuir o máximo de comprimento permitido. Os parâmetros utilizados foram os seguintes:

Figura 2.8: Parâmetros do Sistema [4].

Parameters	Value
Slot Time (σ)	$9 \mu s$
DIFS	$28 \mu s$
SIFS	$10 \mu s$
PHY header	$20 \mu s$
ACK timeout	$100 \mu s$
CTS timeout	$100 \mu s$
RTS Frame	16×8 bits
CTS Frame	14×8 bit
ACK Franme	14×8 bit
Paketlength	12312bits
Transmission Rate	54×10^6 bps
M	7
CWmin	15
CWmax	1023
Wireless delay	$1 \mu s$
Fiber delay	0~10 slot time

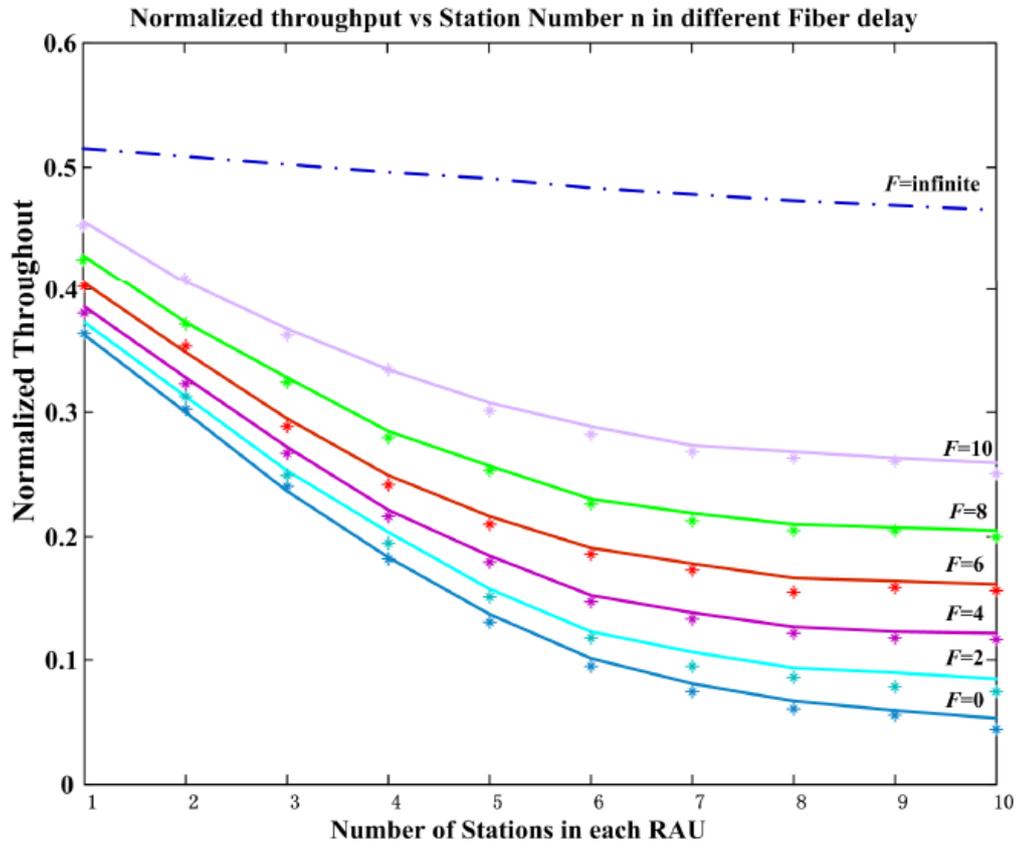
2.3.2.1 Acesso Básico

Figura 2.9: Débito normalizado numa fibra quando $n=1$. Linhas a tracejado indicam os métodos tradicionais (*without F*). As linhas preenchidas representam o modelo que está a ser simulado (*with F*). [4]



Na Figura 2.9, pode observar-se que quando o atraso provocado pela fibra (F) aumenta, o débito normalizado total cresce gradualmente e é possível visualizar uma maior discrepância entre o débito dos dois RAU's, o que leva à conclusão de que o fator F influencia bastante nas probabilidades de colisão nos dois grupos (RAU-A, RAU-B) considerados, ou seja, o grupo com a fibra mais longa sofre de maior interferência causada pelos restantes grupos, e as estações localizadas nesse grupo têm mais dificuldade em ocupar o canal. O contrário acontece nos grupos em que a fibra é mais curta. É também visível o aumento de transmissões com sucesso de todo o sistema, que se deve essencialmente à existência de desigualdades de acesso entre os dois grupos, o que não é o pretendido pois procura-se a “justiça” entre os dois tipos de acesso.

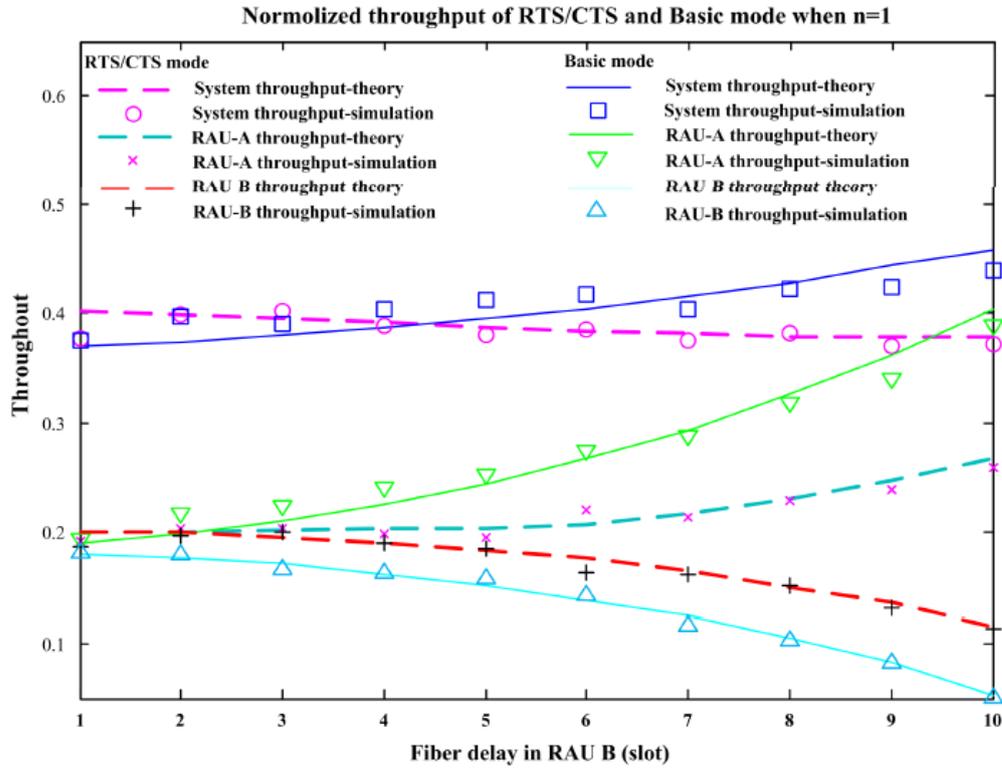
Figura 2.10: Efeitos da fibra consoante o número de estações presentes. As linhas preenchidas representam os cálculos do modelo analítico do estudo em questão, os asteriscos correspondem aos valores simulados [4].



A Figura 2.10 representa o efeito no débito total do sistema à medida que o número de estações cresce em cada RAU. Pode observar-se que com o aumento de F , o débito aumenta. Porém, se F tender para infinito o problema do *Inter-RAU Hidden Node* desaparece, e o débito no RAU-B torna-se nulo. Deste modo, todo o débito é devido à contribuição do RAU-A, sendo igual ao débito em redes WLAN comuns, onde todas as estações estão ao alcance e não existe o problema do *Hidden Node*.

2.3.2.2 RTS/CTS

Figura 2.11: Comparação do efeito da existência do canal de fibra ótica com $n=1$. Linhas preenchidas representam o Acesso Básico, enquanto as linhas a tracejado representam o modo RTS/CTS [4].



A Figura 2.11 representa uma simulação usando o método RTS/CTS em contraste com o de Acesso Básico, assumindo, como já antes referido, um *payload* saturado e onde cada pacote representa o máximo comprimento possível utilizado por uma trama. Ao comparar os débitos entre os dois métodos, percebe-se que o RTS/CTS é mais eficaz no que diz respeito aos problemas de *Inter-RAU Hidden Node* e de diferentes comprimentos de fibra, pois as diferenças de débito não são tão acentuadas. Analogamente ao que acontece no Acesso Básico, assim que o atraso aumenta, o intervalo de tempo de viagem de um pacote vai aumentando. Assim, as estações que estão num RAU com a fibra mais longa têm acrescida dificuldade em aceder ao canal do que as restantes presentes nas fibras mais curtas.

Capítulo 3

Solução Proposta

Este capítulo contém a proposta de software a usar, assim como a estratégia de configuração do sistema proposto, para que assim o desempenho do mesmo seja o mais realista possível.

Antes da explicação mais detalhada das alterações e implementações no software, será feita uma pequena introdução ao ns3, para que assim se perceba melhor o contexto dessas mesmas alterações.

3.1 Simulador a usar: ns3

O software a usar para simular o cenário da tecnologia Rádio sobre Fibra é o *Network Simulator 3*. O ns3 é um simulador de redes usado essencialmente para fins educacionais e investigação. Este é escrito em C++ e trata-se de um software *open-source*, com um grande número de contribuidores de várias nacionalidades que, em conjunto, fazem crescer o simulador, exponenciando as suas potencialidades, fazendo do ns3 um simulador eficaz e realista.

Figura 3.1: Logótipo do simulador ns3 [5].



O ns3 está organizado em diferentes módulos e classes que interagem entre si para, em conjunto, criar um sistema funcional. A Application Interface (API) do ns3 está devidamente documentada na respetiva página web, cabendo assim ao utilizador a tarefa do seu estudo e compreensão para juntar os blocos, alterar as configurações desses blocos e, se necessário, alterar os módulos e classes para que o *script* criado vá de encontro aos objetivos do programador. Este último aspeto é uma das componentes mais relevantes da estratégia a usar.

O simulador em si apenas disponibiliza objetos e produtos existentes no mundo real num ambiente onde podem existir protocolos que ainda não foram implementados no mundo comercial,

mas que já foram publicados em artigos científicos. É importante referir também que embora as condições físicas do meio ambiente em que nos inserimos sejam respeitadas nas definições *standard* de cada modelo, estas podem ser alteradas caso o utilizador consiga compreender onde o deve fazer, criando assim um ambiente físico fictício. Estas alterações por norma não se destinam a alterar o meio físico em jeito de curiosidade, mas sim porque podem representar uma interpretação diferente de um cenário que o simulador não suporta. Esta é mais uma informação de grande relevo na aproximação à implementação da tecnologia Rádio sobre Fibra em ns3, como se perceberá nos sub-capítulos seguintes.

A versão do simulador a usar será a mais recente à data do desenvolvimento desta dissertação, a versão 3.19.

3.2 Arquitetura do sistema a considerar

Para se conseguir estudar e simular os problemas de concorrência descritos no capítulo anterior, assim como avaliar até que ponto o meio de transmissão em fibra ótica se pode estender com alguma qualidade no 802.11, é necessário usar uma configuração do sistema que evidencie todos estes detalhes. É importante referir que alguns dos elementos desta configuração não estão presentes no simulador pois, como já foi referido, o ns3 apenas contém objetos que existem no mundo comercial (ou que sejam introduzidos por colaboradores), sendo assim necessário encontrar soluções dentro do software para que a simulação seja o mais realista possível. Estas soluções estratégicas serão devidamente assinaladas neste documento.

Para o sistema em questão, será necessário ter em conta algumas questões a nível de propagação física. Enquanto que o atraso de propagação dos sinais WiFi no ar corresponde a cerca de 3.3 ms/km, a propagação de sinal em fibra ótica constitui um atraso de aproximadamente 5 μ s/km, sendo este o valor a utilizar na simulação. Para efeitos de registo, a tabela seguinte descreve mais detalhadamente o índice de refração de cada tipo de fibra consoante o comprimento de onda utilizado e, conseqüentemente, a distância percorrida em tais condições.

Tipo de Fibra Ótica	Comprimento de Onda	Índice de Refração	Velocidade*
Brand A (G.652)	1310 nm	1.4677	204.260 m/ μ s
	1550 nm	1.4682	204.191 m/ μ s
Brand A (G.655)	1550 nm	1.468	204.218 m/ μ s
	1625 nm	1.469	204.079 m/ μ s
Brand B (G.652)	1310 nm	1.467	204.357 m/ μ s
	1550 nm	1.468	204.220 m/ μ s
Brand B (G.655)	1550 nm	1.470	203.940 m/ μ s
	1625 nm	1.470	203.940 m/ μ s

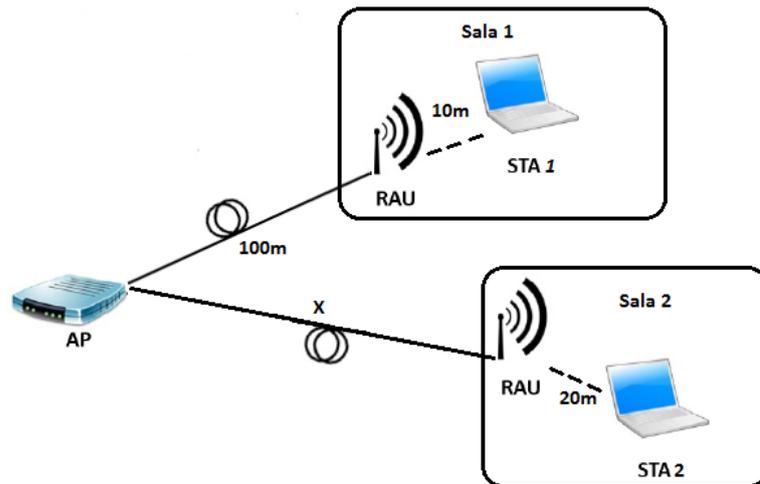
Tabela 3.1: Tabela com os diferentes tipos de fibra e os respetivos índices de refração e velocidade de propagação [7].

$$*Velocidade = Velocidade da Luz (299.792m/\mu s) / \text{Índice de Refração}$$

Adicionalmente, a atenuação devido à propagação na fibra ótica é praticamente nula quando comparada com a atenuação devido à propagação sem fios. Concretamente, o valor de atenuação corresponde a aproximadamente 0,2 dB/km.

A figura 3.2 representa a arquitetura do sistema a considerar.

Figura 3.2: Arquitetura a considerar.



Como é possível verificar na arquitetura considerada, existe um "AP" central ligado por fibra ótica a 2 RAU's que estão em 2 salas diferentes. A primeira ligação de fibra, a que liga ao RAU 1, tem um comprimento fixo de 100 metros durante toda a simulação. Na segunda ligação o comprimento entre os 100 e os 15000 metros, para assim se conseguir avaliar o desempenho do sistema e, por consequência, verificar como o MAC do 802.11 se comporta num cenário em que existe um confronto direto de acesso ao meio entre duas estações que não se ouvem (pois estão em divisões diferentes), e que poderão estar a distâncias distintas (possivelmente na ordem dos quilómetros) do AP central. Para finalizar esta descrição resta referir que a primeira estação (STA1) está a 10 metros do respetivo RAU, o RAU1, e a segunda estação encontra-se a 20 metros do RAU2.

3.3 Estratégia a adotar

Analisando-se o modo de funcionamento do software ns3, rapidamente se conclui que não é possível criar uma ligação ponto a ponto entre um objeto "AP" e um objeto "estação". Embora este tipo de ligação simule a conexão entre dois objetos através de um canal físico cablado, onde é possível alterar os atributos "delay" e "DataRate" diretamente através de uma função da API, não é possível o envio de sinais WiFi pelo mesmo. De facto assim que o objeto é definido como sem fios, o software exige que, para que os sinais de WiFi sejam transmitidos, seja criado um

objeto "*WifiChannel*", simulando desta forma um canal de transmissão destes sinais pelo ar. Mais especificamente, este modelo tem o nome de *YansWifiChannel* no simulador.

Figura 3.3: Exemplo da criação de um objeto *WifiChannel* que em conjunto com o objeto *WifiPhy* definem o meio de propagação.

```
YansWifiChannelHelper channel = YansWifiChannelHelper::Default ();
YansWifiPhyHelper phy = YansWifiPhyHelper::Default ();
```

Um outro problema que pode ser identificado por um utilizador que tenta realizar uma aproximação à tecnologia *RoF* no ns3 é o facto de que este não possui as antenas de transmissão de sinais, os RAU's. Finalmente, e atendendo à arquitetura proposta, resta garantir que as duas estações não se escutem, simulando assim o cenário em que estão colocadas em duas divisões diferentes.

Resumindo encontram-se 3 problemas a resolver no contexto das possibilidades que o software oferece:

- ▷ Encontrar uma solução para simular uma ligação de fibra minimamente realista entre o AP central e os RAU's.
- ▷ Solucionar a não existência do elemento *RAU* no simulador.
- ▷ Garantir que as estações não se ouvem.

Para solucionar os problemas levantados, chegou-se à conclusão que, sendo o ns3 um software que permite a alteração das condições de propagação (alterando os módulos específicos para o efeito), a solução será a imposição de um atraso nas comunicações entre o AP e as estações equivalente à propagação do sinal em fibra ótica ($5 \mu\text{s}/\text{km}$), durante "*X*" quilómetros, alterando assim a velocidade a que o sinal se transmite. Desta forma soluciona-se tanto o problema da simulação da fibra ótica assim como a não existência do elemento RAU. Sendo este último um componente bastante simples, considera-se que a contribuição deste elemento para um atraso adicional que eventualmente poderia existir seja de 0.

Em relação à exigência de que as duas estações não se escutem, o método não é muito diferente do anterior. No mesmo módulo em que se procede à alteração da velocidade de propagação entre objetos, define-se um valor de atraso exagerado (no mínimo ligeiramente superior ao tempo de simulação) entre as duas estações, para que assim os sinais nunca cheguem em tempo útil ao seu destino. Sendo assim tem-se para cada ligação *AP-STA*:

$$Delay_1 = \alpha_1 + \beta_1 \quad (1)$$

$$Delay_2 = \alpha_2 + \beta_2 \quad (2)$$

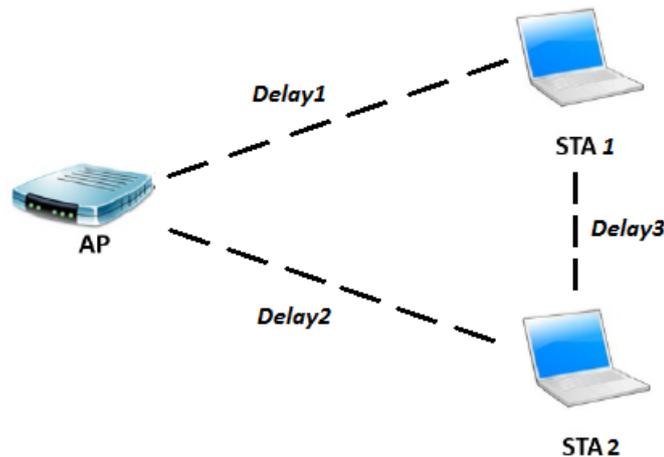
E para cada ligação *STA-STA*:

$$Delay_3 = \gamma \quad (3)$$

Em que α_1 e α_2 correspondem ao atraso imposto pela fibra de "X" quilómetros, e β_1 e β_2 referem-se ao atraso de propagação no ar correspondente à distância entre o RAU e a estação respetiva. Finalmente, γ representa o atraso a impôr para que as duas estações não se escutem.

Desta forma, pode considerar-se uma alteração à Figura 3.2 para o seu equivalente a implementar no ns3:

Figura 3.4: Equivalente à Figura 3.2 a aplicar no ns3.



Assim, é suficiente definir no ns3 a posição das estações 1 e 2, por exemplo, a 10 m e 20 m do AP respetivamente. O simulador ao receber estes valores, depois das alterações ao modelo de propagação, fará os cálculos para que a velocidade com que o sinal rádio se propaga entre eles seja o equivalente ao de este viajar num canal de fibra ótica com um comprimento a definir. Neste caso a ligação AP-STA1 será equivalente a uma distância fixa de 110 m e a conexão AP-STA2 será equivalente a uma distância "X" variável entre os 110 m e os 15020 m. Esta modificação tornará possível a chegada do sinal com valores de potência de transmissão aceitáveis, o que não seria possível caso se colocasse o STA2 a uma distância de, como um dos exemplos a simular, 10 km do AP. Nesta situação, nem o sinal seria recebido, nem o valor de delay para simular fibra seria o correto.

Para finalizar esta proposta de aproximação à Rádio sobre Fibra em ns3, impõe-se uma atenuação de 0 dB/km no canal de propagação, criando assim um canal ideal. Esta alteração serve para simplificar o valor de referência de atenuação em fibra ótica, que é de 0.2 dB/km.

Todos estes processos e alterações serão detalhados, a nível do código a considerar e módulos a alterar, no capítulo seguinte.

Capítulo 4

Fase Experimental

Neste capítulo procede-se à descrição da implementação prática das ideias referidas no capítulo anterior, das simulações a efetuar e respetivas características, assim como de alguns detalhes adicionais não mencionados anteriormente, que surgem durante a aplicação das ideias apresentadas.

4.1 Alterações a aplicar

4.1.1 Alterações ao *Script*

Como já foi evidenciado no capítulo anterior, a configuração base desta rede a considerar no simulador será a existência de um AP e de duas estações (STA1 e STA2), que irão competir pelo acesso ao meio. A variante do *Standard* a utilizar será o *802.11g* pois trata-se de uma das soluções mais populares no mercado, tendo assim uma grande robustez no ns3.

Durante a implementação de todo este sistema existem 2 tipos de decisões principais, sendo estas (1) as escolhas de configuração no *script*, onde os objetos são colocados em interação para assim criar uma rede funcional, e (2) as alterações a aplicar nos modelos específicos, para se obter o comportamento da arquitetura Rádio sobre Fibra na simulação. Começando ao nível do *script*, e colocando de parte as inicializações básicas para se obter uma rede que contenha um AP e duas estações, existem algumas decisões a tomar ao nível da escolha de modelos. Uma delas é a questão da mobilidade da rede, ou seja, o software permite escolher de que forma as estações variam no espaço ao longo da simulação. No caso da simulação em causa pretende-se que as estações estejam em pontos fixos do espaço, como já mencionado no capítulo anterior. Para tal recorre-se ao "*ns3::ConstantPositionMobilityModel*", e assim se definem as posições dos 3 elementos da simulação. No excerto de código seguinte é possível perceber a colocação do AP na posição (20.0, 0.0, 0.0) e os STA1 e STA2 nas posições (10.0, 0.0, 0.0) e (40.0, 0.0, 0.0) ficando assim a 10m e 20m de distância do AP respetivamente.

```
//Set AP's Position
```

```

MobilityHelper mobility;
Ptr<ListPositionAllocator> positionAlloc =
    CreateObject<ListPositionAllocator> ();
positionAlloc->Add (Vector (20.0, 0.0, 0.0));
mobility.SetPositionAllocator (positionAlloc);
mobility.SetMobilityModel ("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
mobility.Install (apCentral);

//Set STA's Position

MobilityHelper mobility1;
Ptr<ListPositionAllocator> positionAlloc1 =
    CreateObject<ListPositionAllocator> ();
positionAlloc1->Add (Vector (10.0, 0.0, 0.0));
positionAlloc1->Add (Vector (40.0, 0.0, 0.0));
mobility1.SetPositionAllocator (positionAlloc1);
mobility1.SetMobilityModel ("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
mobility1.Install (staNodes);

```

Os próximos modelos a serem modificados passam pelo modelo responsável pelas perdas no canal, a atenuação, e o modelo responsável pelo atraso introduzido no canal. Estes são os principais parâmetros da configuração *RoF* pretendida. Relativamente ao modelo da atenuação utiliza-se o "*ns3::MatrixPropagationLossModel*", onde é possível definir a atenuação existente entre dois pontos, que neste caso é tratado como um canal ideal. O modelo de *delay* corresponde a "*ns3::ConstantSpeedPropagationDelayModel*" que é simplesmente inicializado com as definições por defeito, pois este trata-se do modelo a alterar (realizando mudanças no próprio ficheiro que o define) para se seguir a estratégia definida no Capítulo 4. Esta implementação pode observar-se no seguinte código:

```

//Create propagation loss matrix

Ptr<MatrixPropagationLossModel> lossModel =
    CreateObject<MatrixPropagationLossModel> ();
lossModel->SetDefaultLoss (0); // (no link)
lossModel->SetLoss (apCentral.Get (0)->GetObject<MobilityModel>(),
    staNodes.Get (0)->GetObject<MobilityModel>(), 0,true); // set loss 0
    <-> 1 to 0 dB
lossModel->SetLoss (staNodes.Get (1)->GetObject<MobilityModel>(),
    apCentral.Get (0)->GetObject<MobilityModel>(), 0,true); // set loss
    0 <-> 2 to 0 dB

//Set Speed Propagation Delay

```

```
Ptr<ConstantSpeedPropagationDelayModel> delay =
    CreateObject<ConstantSpeedPropagationDelayModel> ();
```

A última configuração de relevo a apresentar corresponde à especificação da variante do *Standard* a usar, assim como à escolha do algoritmo de controlo de débito. Tal como anteriormente referido seleciona-se a variante 802.11g. Quanto ao algoritmo de escolha de débito serão utilizados os 4 presentes no ns3 que também se encontram em produtos comerciais: (1) "Arf", (2) "Ministrel", (3) "Constant Rate" e (4) "Onoe". No código seguinte é possível visualizar como se especifica a seleção do *Standard* e do primeiro algoritmo a ser usado.

```
WifiHelper wifi;
wifi.SetStandard (WIFI_PHY_STANDARD_80211g);
wifi.SetRemoteStationManager ("ns3::ArfWifiManager");
```

4.1.2 Alterações em Modelos

4.1.2.1 Modelo *wifi-mac.cc*

As alterações em modelos envolvem um pouco mais de pesquisa e compreensão sobre o que implicam essas mesmas alterações. Comece-se por analisar modificações de pormenor, embora de grande relevância para os resultados a obter. O código seguinte está presente em "*src/wifi/model/wifi-mac.cc*", o qual representa o ficheiro que define a camada MAC do WiFi.

```
void
WifiMac::Configure80211g (void)
{
    SetSifs (MicroSeconds (10));
    SetSlot (MicroSeconds (20));
    SetEifsNoDifs (MicroSeconds (10 + 304));
    SetPifs (MicroSeconds (10 + 20));
    SetCtsTimeout (MicroSeconds (10 + 304 + 20 +
        GetDefaultMaxPropagationDelay ().GetMicroSeconds () * 2));
    SetAckTimeout (MicroSeconds (10 + 304 + 20 +
        GetDefaultMaxPropagationDelay ().GetMicroSeconds () * 2));
}
```

Percebe-se facilmente que este excerto de código define os diferentes "*Interframe Spaces*", tempos de *Slot* e *timeouts* de ACK e CTS. É também importante referir que estes dois últimos dependem de um *DefaultMaxPropagationDelay*. A alteração a aplicar aqui baseia-se na mudança do valor de *Slot Time*. Isto porque o ns3 assume por defeito o *Slot Time* com um valor de 20 μ s, pois esse trata-se do valor a definir quando existe a necessidade de compatibilidade com o 802.11b. Como neste caso se aborda unicamente o 802.11g, reduz-se o *SlotTime* para 9 μ s, assim

como todas as referências ao mesmo valor de $20 \mu s$ que surgem na configuração, pois referem-se ao mesmo parâmetro:

```
void
WifiMac::Configure80211g (void)
{
    SetSifs (MicroSeconds (10));
    SetSlot (MicroSeconds (9));
    SetEifsNoDifs (MicroSeconds (10 + 304));
    SetPifs (MicroSeconds (10 + 9));
    SetCtsTimeout (MicroSeconds (10 + 304 + 9 +
        GetDefaultMaxPropagationDelay ().GetMicroSeconds () * 2));
    SetAckTimeout (MicroSeconds (10 + 304 + 9 +
        GetDefaultMaxPropagationDelay ().GetMicroSeconds () * 2));
}
```

Como já mencionado anteriormente, os valores de *timeout* a configurar dependem do parâmetro *DefaultMaxPropagationDelay* o qual, tal como o nome indica, representa o valor de atraso máximo que o sistema suporta. Este define-se no mesmo ficheiro da seguinte forma:

```
Time
WifiMac::GetDefaultMaxPropagationDelay (void)
{
    // 1000m
    return Seconds (1000.0 / 300000000.0);
}
```

Como se pretendem simulações que sejam equivalentes a distâncias superiores a 1000m, este valor tem de ser alterado. O valor alterou-se para 30000m, permitindo assim alguma margem para possíveis simulações mais extensas que 15000m (o máximo comprimento de fibra a simular). Assim:

```
Time
WifiMac::GetDefaultMaxPropagationDelay (void)
{
    // 30 000m
    return Seconds (30000.0 / 300000000.0);
}
```

4.1.2.2 Modelo *propagation-delay-model.cc*

É neste modelo, presente em "*src/propagation/model/propagation-delay-model.cc*", que se encontram os modelos de *delay* a alterar. Como já foi referido neste capítulo, o modelo a usar será o *ConstantSpeedPropagationDelayModel*. Esta escolha é baseada na essência do modelo, o qual

impõe um atraso constante ao longo da simulação, e pela função "*GetDelay*" aqui presente. Esta é usada pelo simulador para calcular o atraso a aplicar entre dois pontos, e é definida como:

```
Time
ConstantSpeedPropagationDelayModel::GetDelay (Ptr<MobilityModel> a,
        Ptr<MobilityModel> b) const
{
    double distance = a->GetDistanceFrom (b);
    double seconds = distance / m_speed;
    return Seconds (seconds);
}
```

Esta função recebe os valores das posições de dois objetos, "*a*" e "*b*", calcula a distância entre eles e divide-a pela velocidade da luz (o termo *m-speed*), retornando assim o atraso a considerar.

É aqui que se vão aplicar as alterações fulcrais para a aproximação à arquitetura Rádio sobre Fibra, usando o método mencionado no Capítulo 3. Tome-se o exemplo aqui descrito, em que o AP é definido na posição (20.0, 0.0, 0.0) e a STA2 na posição (40.0, 0.0, 0.0). O software recebe estes valores como argumentos da função *GetDelay*, e o cálculo da distância entre eles será, como é de esperar, 20 metros. O valor retornado será o quociente entre a distância obtida, 20 metros, e o valor da velocidade da luz, $3 * 10^8 m/s$.

$$Delay = distance/mspeed = 20/3 * 10^8 \quad (4)$$

Para que exista representação da fibra na simulação, esta expressão terá de sofrer alterações. Relembre-se que o tempo que o sinal demora a percorrer estes 20 metros terá de ser equivalente a este viajar durante "X" metros em fibra ótica. Assim, colocando um fator multiplicativo tanto na variável *distance* como na constante *m-speed*, é possível atingir esse cenário:

$$Delay = (\delta * distance)/(mspeed * \epsilon) \quad (5)$$

em que o fator δ transforma a distância calculada na distância pretendida para simulação, e o fator ϵ impõe a velocidade de propagação num ambiente de fibra ótica. O valor de ϵ tem de respeitar a velocidade de propagação de $5 \mu s/km$, ou seja, tem-se que $\epsilon = 0.68$.

$$1000/(0.68 * 3 * 10^8) \simeq 4.9 * 10^{-6} \quad (6)$$

Para clarificar este conceito, tome-se um exemplo a ser usado na simulação. Pretende-se que o tempo de propagação entre o STA2 e o AP seja equivalente a uma distância de 2000m, num ambiente de fibra ótica. Como anteriormente verificado, o STA2 está a uma distância de 20m do AP, portanto:

$$Delay = (\delta * 20.0)/(mspeed * 0.68) \quad (7)$$

Para finalizar a expressão apenas tem de se converter a distância inicialmente especificada em 20m numa distância de 2000m, o que é possível através do fator $\delta = 100.0$:

$$Delay = (100.0 * 20.0) / (mspeed * 0.68) \quad (8)$$

Antes de concluir e descrever as alterações a aplicar à função *GetDelay*, lembre-se que o atraso total será o atraso introduzido pela fibra mais o atraso de propagação no ar entre o RAU e a estação (expressões (1) e (2)), pelo que o atraso total será:

$$DelayTotal = (\delta * distance) / (mspeed * 0.68) + (distance / mspeed) \quad (9)$$

Na simulação, como já anteriormente especificado, tem-se a STA1 fixa nos 110m (100m de fibra mais 10m de distância sem fios entre o RAU1 e STA1) e a STA2 com distância variável ("X" metros de fibra mais 20 m de distância até à RAU2). No excerto de código seguinte é possível verificar a situação em que se tem 2000m de comprimento de fibra entre o AP e o RAU2, e também o valor exagerado de atraso imposto para que as duas estações não se escutem.

```

Time
ConstantSpeedPropagationDelayModel::GetDelay (Ptr<MobilityModel> a,
    Ptr<MobilityModel> b) const
{
    double distance = a->GetDistanceFrom (b);
    double seconds;

    if( distance == 10.0 ){
        seconds = (((10.0*distance) / (m_speed*0.68)) + (distance/m_speed));
    }
    else if(distance == 20.0 ){
        seconds = (((100.0*distance) / (m_speed*0.68)) + (distance/m_speed));
    }
    else {
        seconds = 10000.0;
    }

    return Seconds (seconds);
}

```

4.2 Simulações e Resultados

Nesta secção, apresenta-se a metodologia de cada simulação, assim como os diferentes tipos de situações a considerar. No final discutem-se os diferentes resultados.

Começa-se pela descrição do método de simulação. O ns3 oferece várias aplicações de criação de tráfego que podem ser instaladas em cada nó criado, e entre elas encontra-se a aplicação a ser usada, a *OnOff*. Esta caracteriza-se pela definição do intervalo de tempo durante o qual o utilizador deseja que sejam enviados pacotes, e o intervalo de tempo em que a aplicação não envia nenhum dado, criando um processo cíclico durante o período de simulação. Se o valor de "*OffTime*", que

corresponde ao intervalo em que não é enviado nenhum dado, for zero, então a aplicação envia pacotes durante toda a simulação. Esta realiza-se no sentido ascendente, ou seja, em *upstream*, para se poder forçar a existência de competição no acesso ao meio por cada estação.

Os restantes atributos a considerar para esta aplicação são o tipo de pacotes a enviar (UDP ou TCP), o tamanho de cada pacote, o *Data Rate*, e o tempo de início de transmissão. Nas simulações a realizar utilizam-se pacotes UDP, através do modelo "*ns3::UdpSocketFactory*", devido a uma maior simplicidade do tipo de dados em comparação com os pacotes TCP. Relativamente ao *DataRate*, considera-se um valor de 15 Mbit/s em cada estação, isto porque o débito de referência de 54 Mbit/s referente à norma 802.11g, em termos de débito real, satura aproximadamente aos 27 a 30 Mbit/s, e assim garante-se que não existe a situação em que a fila do *buffer* de recepção sature apenas com o contributo de uma estação. No que diz respeito ao tamanho de cada pacote, consideram-se pacotes com 1500 bytes. Em seguida mostra-se o exemplo da instalação e configuração da aplicação *OnOff* numa das estações, assim como a aplicação de recepção no AP, o *PacketSink*.

```
//====OnOff Application====

uint16_t cbrPort = 12345;
OnOffHelper onOffHelper1 ("ns3::UdpSocketFactory", Address
    (InetSocketAddress (apIP.GetAddress (0), cbrPort)));
onOffHelper1.SetAttribute ("PacketSize", UintegerValue (1500));
onOffHelper1.SetAttribute ("OnTime", StringValue
    ("ns3::ConstantRandomVariable[Constant=1]"));
onOffHelper1.SetAttribute ("OffTime", StringValue
    ("ns3::ConstantRandomVariable[Constant=0]"));
onOffHelper1.SetAttribute ("DataRate", DataRateValue
    (DataRate("15Mb/s")));
onOffHelper1.SetAttribute ("StartTime", TimeValue (Seconds (1.001)));

ApplicationContainer apps = onOffHelper1.Install(staNodes.Get(0));

PacketSinkHelper sink1 ("ns3::UdpSocketFactory", InetSocketAddress
    (Ipv4Address::GetAny(), cbrPort));
ApplicationContainer apps2;
apps2 = sink1.Install (apCentral.Get(0));
```

As secções seguintes dividem-se pelo tipo de transmissão a utilizar, ou seja, em acesso básico CSMA/CA ou RTS/CTS e o tipo de algoritmo de débito adaptativo. Por sua vez, a tabela seguinte descreve os parâmetros de simulação utilizados.

Parâmetro	Valor
SIFS	10 μs
Slot Time	9 μs
ACK Timeout	523 μs
CTS Timeout	523 μs
Minimum backoff window	7
Maximum backoff window	1023
Data Rate	Variável / 54Mbps (para Débito Constante)
Comprimento de Fibra Ótica	100 m - 15000 m
Tamanho do Payload (UDP)	1500 bytes
Atraso na Fibra	4.9 $\mu s/km$

Tabela 4.1: Parâmetros do sistema.

Todas as simulações são repetidas 4 vezes em cada ponto/distância considerada durante 30 segundos, alterando a semente (ou *seed*) da simulação, para que assim se obtenha uma maior variedade de amostras. O resultado das medições a considerar para cada caso será a média dos 4 valores obtidos, onde os respectivos gráficos de débito indicam, para cada valor, intervalos de confiança de 95 %. Salienta-se mais uma vez que todos os fluxos têm o sentido ascendente, ou seja, os valores apresentados são referentes ao débito que resulta do envio de pacotes das estações para o ponto de acesso.

4.2.1 ArfWifiManager

O ARF, ou *Auto Rate Fallback*, é o primeiro algoritmo considerado tratando-se de um algoritmo simples e intuitivo. O dispositivo que deseja enviar dados, começa por transmitir com o débito mais baixo possível e inicia um contador. Caso o contador chegue ao fim ou a estação consiga N transmissões com sucesso, o valor da taxa de débito é aumentado e é feito *reset* ao contador. Caso a primeira transmissão feita com o novo valor de taxa de débito falhe, esta passa automaticamente para a velocidade anterior. Isto também acontece assim que o remetente falhe duas transmissões consecutivas, portanto pode afirmar-se que este algoritmo determina o seu débito consoante o número de transmissões bem sucedidas [6].

4.2.1.1 CSMA/CA

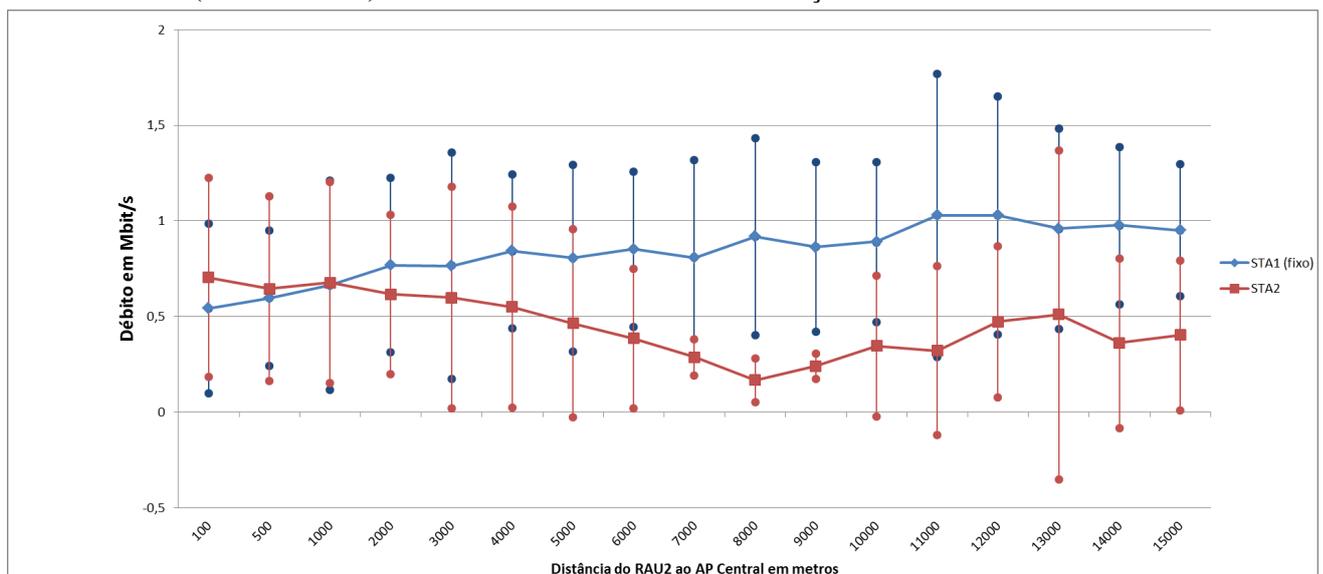
Para colocar o simulador a transmitir em modo básico, basta alterar-se o valor do parâmetro "*RtsCtsThreshold*" do modelo "*ns3::WifiRemoteStationManager*". Como o nome indica este parâmetro corresponde a um limite do tamanho de cada pacote, a partir do qual a transferência de dados passa a ser feita em RTS/CTS. Uma vez que se consideram pacotes de 1500 bytes, qualquer valor superior a este é aceitável. Considera-se então o valor de 2500 bytes. A tabela seguinte apresenta os valores de débito medidos para cada comprimento de fibra ótica.

Comprimento de Fibra	STA 1 Fixo	STA 2	Débito Total
100m	0,542	0,703	1,245
500m	0,596	0,644	1,241
1000m	0,664	0,677	1,342
2000m	0,768	0,616	1,385
3000m	0,764	0,598	1,363
4000m	0,842	0,549	1,392
5000m	0,805	0,464	1,269
6000m	0,852	0,385	1,237
7000m	0,807	0,286	1,093
8000m	0,918	0,167	1,086
9000m	0,863	0,239	1,102
10000m	0,890	0,345	1,235
11000m	1,028	0,321	1,349
12000m	1,028	0,471	1,500
13000m	0,958	0,509	1,468
14000m	0,976	0,361	1,337
15000m	0,950	0,402	1,353

Tabela 4.2: Valores de débito da STA1 (fixa nos 110m) e STA2 em Mbit/s usando CSMA/CA e o algoritmo ARF.

A variação destes valores pode ser melhor visualizada através de uma representação gráfica:

Figura 4.1: Gráfico que representa a evolução do débito em Mbit/s, usando CSMA/CA e o algoritmo ARF, à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.

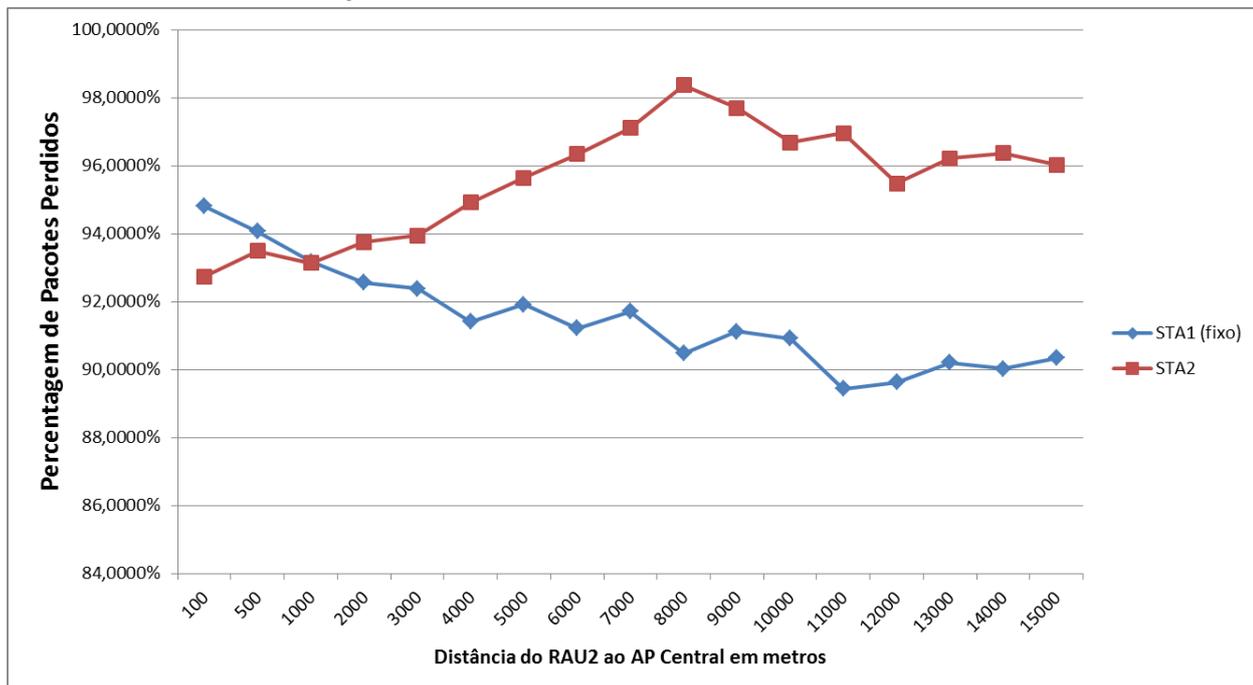


Ao analisar o gráfico, chega-se à rápida conclusão que à medida que o comprimento da fibra que liga a STA2 ao AP aumenta, esta diminui o seu débito, pois o número de vezes que consegue

aceder ao meio diminui devido ao elevado tempo de propagação das tramas, em comparação com a STA1. Em contrapartida, o débito da STA1 aumenta gradualmente pois consegue aceder ao meio mais frequentemente. É importante realçar que o débito geral do sistema nesta situação é muito baixo, tendo como pico o valor de 1.50 Mbit/s.

Outro parâmetro que releva analisar é a taxa de pacotes perdido que, como se pode ver no seguinte gráfico, toma valores bastante altos em que a maior parte assume valores acima dos 90%.

Figura 4.2: Gráfico que representa a evolução de pacotes perdidos à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.



4.2.1.2 RTS/CTS

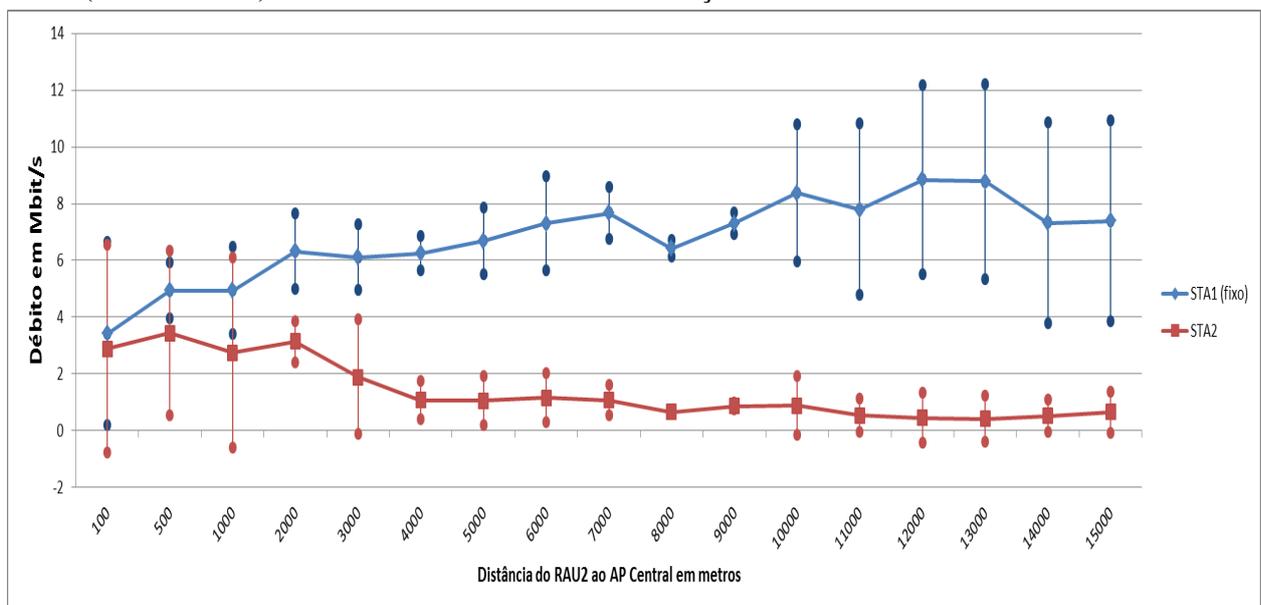
Para que as transmissões sejam feitas no modo RTS/CTS, o parâmetro referente ao tamanho de cada pacote deve ter um valor de bytes inferior ao transmitido. Caso este seja 0, a transmissão será sempre em RTS/CTS. Neste sentido, considera-se que o valor de "*RtsCtsThreshold*" será 0. Passa-se a mostrar o quadro dos resultados obtidos, assim como o respetivo gráfico.

Comprimento de Fibra	STA 1 Fixo	STA 2	Débito Total
100m	3,419	2,881	6,301
500m	4,941	3,443	8,385
1000m	4,938	2,751	7,690
2000m	6,319	3,135	9,455
3000m	6,119	1,890	8,009
4000m	6,248	1,077	7,325
5000m	6,679	1,054	7,734
6000m	7,295	1,166	8,461
7000m	7,665	1,075	8,740
8000m	6,422	0,666	7,088
9000m	7,298	0,870	8,168
10000m	8,379	0,881	9,261
11000m	7,792	0,544	8,337
12000m	8,840	0,450	9,290
13000m	8,784	0,418	9,202
14000m	7,313	0,527	7,841
15000m	7,394	0,658	8,053

Tabela 4.3: Valores de débito da STA1 (fixa nos 110m) e STA2 em Mbit/s usando RTS/CTS e o algoritmo ARF.

Gráfico nos mesmos moldes da simulação em CSMA/CA:

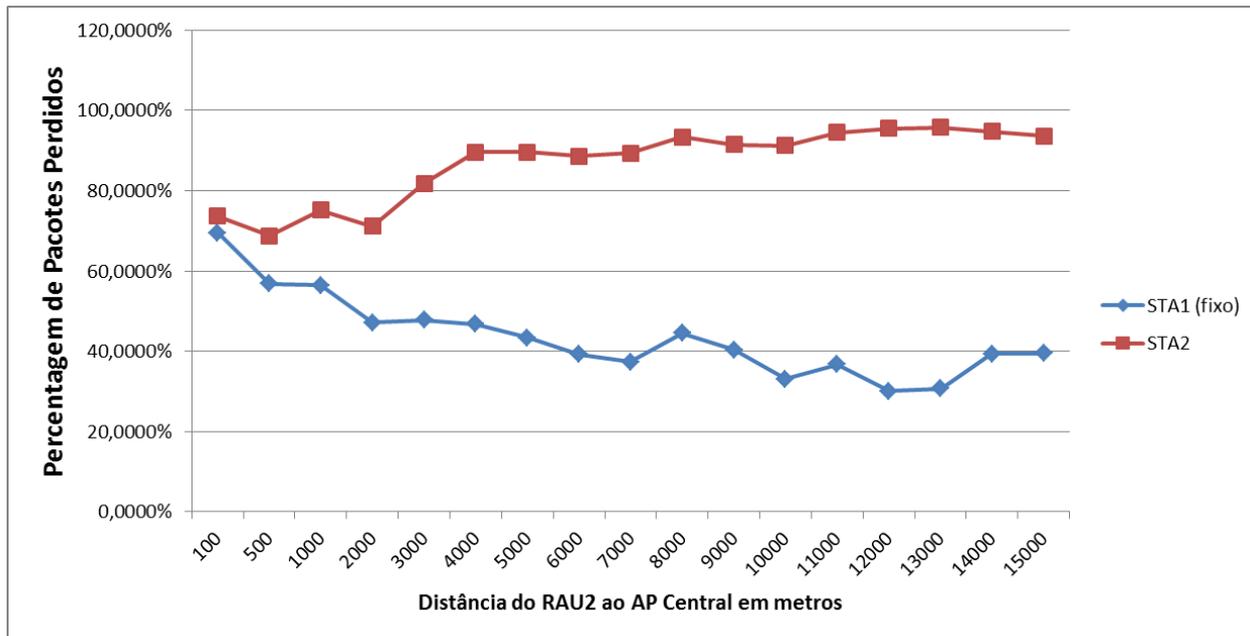
Figura 4.3: Gráfico que representa a evolução do débito em Mbit/s, usando RTS/CTS e o algoritmo ARF, à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.



A partir deste gráfico pode retirar-se a mesma conclusão que o caso em CSMA/CA, ou seja, claramente a estação fixa consegue um melhor desempenho relativamente à sua concorrente móvel

pelas mesmas razões anunciadas anteriormente. No entanto, este método de envio de dados consegue uma melhor prestação a nível de débitos, atingindo um pico de débito agregado de 9.45 Mbit/s.

Figura 4.4: Gráfico que representa a evolução de pacotes perdidos à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.



O gráfico da Figura 4.4 apresenta a taxa de pacotes perdidos obtido nesta simulação. Neste caso, e como seria de esperar devido aos débitos da STA1, a perda de pacotes enviados por esta estação diminui à medida que a STA2 se afasta. Por sua vez, esta última atinge valores na ordem dos 90%.

4.2.2 MinistrelWifiManager

O algoritmo Ministrel está dividido em 3 processos, sendo eles o mecanismo de encadeamento de novas tentativas, a decisão da taxa de débito a ser utilizada e o cálculo de estatísticas. Referenciando o primeiro processo enunciado, o mecanismo possibilita que o algoritmo reaja a pequenas variações de qualidade do canal. Este possui 4 pares de débito-tentativas com os nomes $r0/c0$, $r1/c1$, $r2/c2$ e $r3/c3$. Inicialmente é transmitido um pacote à taxa $r0$ durante $c0$ tentativas, e caso estes não sejam bem sucedidos o algoritmo transmite o mesmo pacote à taxa de $r1$ durante $c1$ tentativas e assim sucessivamente, até que o pacote seja enviado ou descartado depois de $c0 + c1 + c2 + c3$ tentativas.

Durante todo o processo podem identificar-se dois tipos de transmissão, a "normal" e a transmissão de "amostra", que correspondem a 90% e 10% da transmissão total respetivamente. Durante a transmissão "normal", os valores de débito r são determinados da seguinte forma: $r0$ é o maior valor de débito esperado, enquanto que $r1$ é o valor onde se espera que se atinja o segundo

melhor resultado. r_2 é a taxa com a maior probabilidade de sucesso e por último r_3 é definido como o débito mais baixo disponível. No que diz respeito à transmissão de "amostra", o algoritmo preocupa-se em obter estatísticas apuradas do desempenho de cada taxa de transmissão, e como tal necessita de colocar cada uma das taxas à prova, provocando os referidos 10% de tráfego de "amostra" para assim classificar cada um dos valores de r , o que acontece a cada $100ms$ [13].

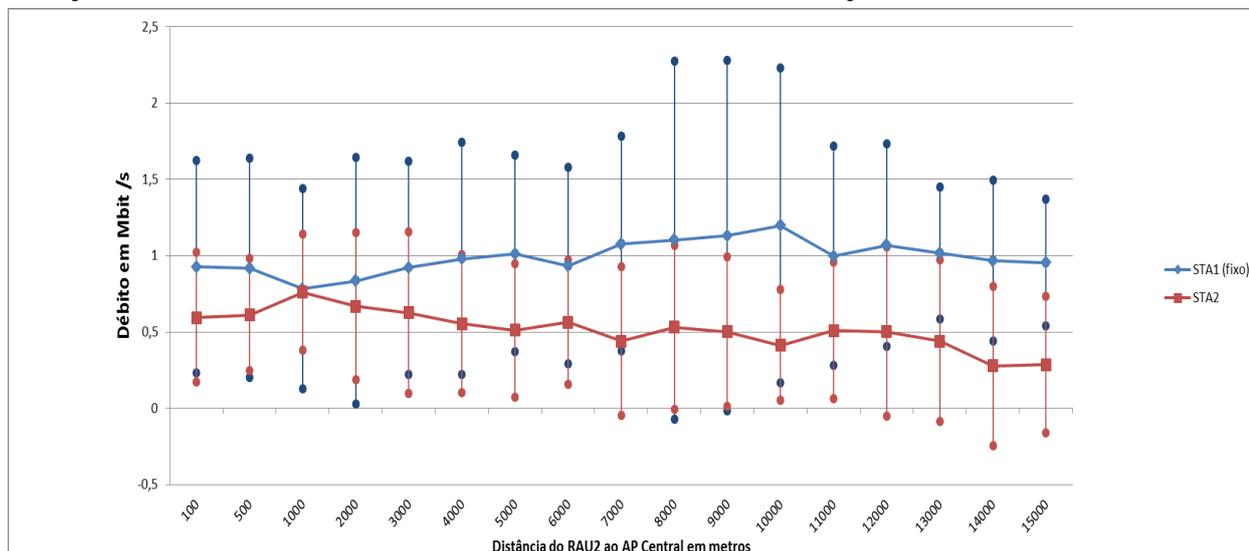
4.2.2.1 CSMA/CA

O método de transmissão em CSMA/CA é o mesmo do explicado anteriormente. Passa-se então, à descrição dos resultados obtidos neste caso.

Comprimento de Fibra	STA 1 Fixo	STA 2	Débito Total
100m	0,926	0,595	1,521
500m	0,918	0,611	1,530
1000m	0,781	0,761	1,542
2000m	0,835	0,668	1,504
3000m	0,920	0,626	1,547
4000m	0,979	0,555	1,534
5000m	1,012	0,510	1,523
6000m	0,935	0,565	1,500
7000m	1,077	0,439	1,516
8000m	1,102	0,530	1,633
9000m	1,131	0,502	1,634
10000m	1,197	0,412	1,610
11000m	0,996	0,508	1,505
12000m	1,068	0,500	1,569
13000m	1,015	0,441	1,456
14000m	0,966	0,277	1,243
15000m	0,955	0,286	1,241

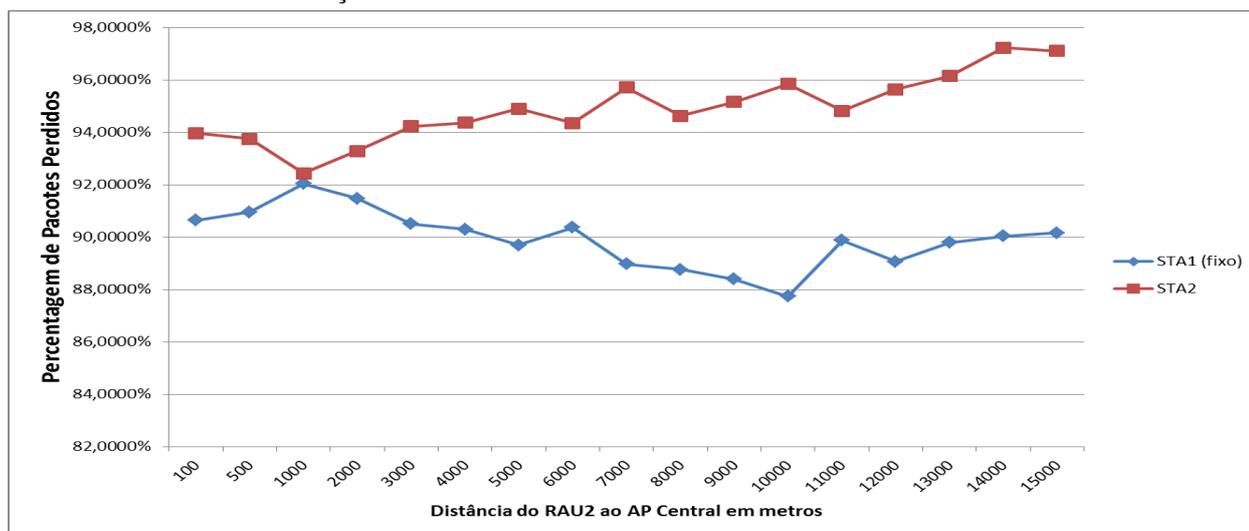
Tabela 4.4: Valores de débito da STA1 (fixa nos 110m) e STA2 em Mbit/s usando CSMA/CA e o algoritmo Ministrel.

Figura 4.5: Gráfico que representa a evolução do débito em Mbit/s, usando CSMA/CA e o algoritmo Ministrel, à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.



A conclusão a retirar desta simulação é a mesma da retirada da utilização do algoritmo ARF, ou seja, verifica-se um decréscimo no débito gerado pela STA2 devendo-se à diminuição de justiça no acesso ao meio, enquanto se verifica um aumento no débito relacionado com a STA1. A gama de valores é muito semelhante à anterior, ou seja, o débito agregado é igualmente baixo, não superando os 1,61 Mbit/s. O cenário repete-se na taxa de pacotes perdidos medida:

Figura 4.6: Gráfico que representa a evolução de pacotes perdidos à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.



Identificam-se valores percentuais muito altos, embora com uma ligeira melhoria mas pouco relevante, em confronto com o algoritmo anterior.

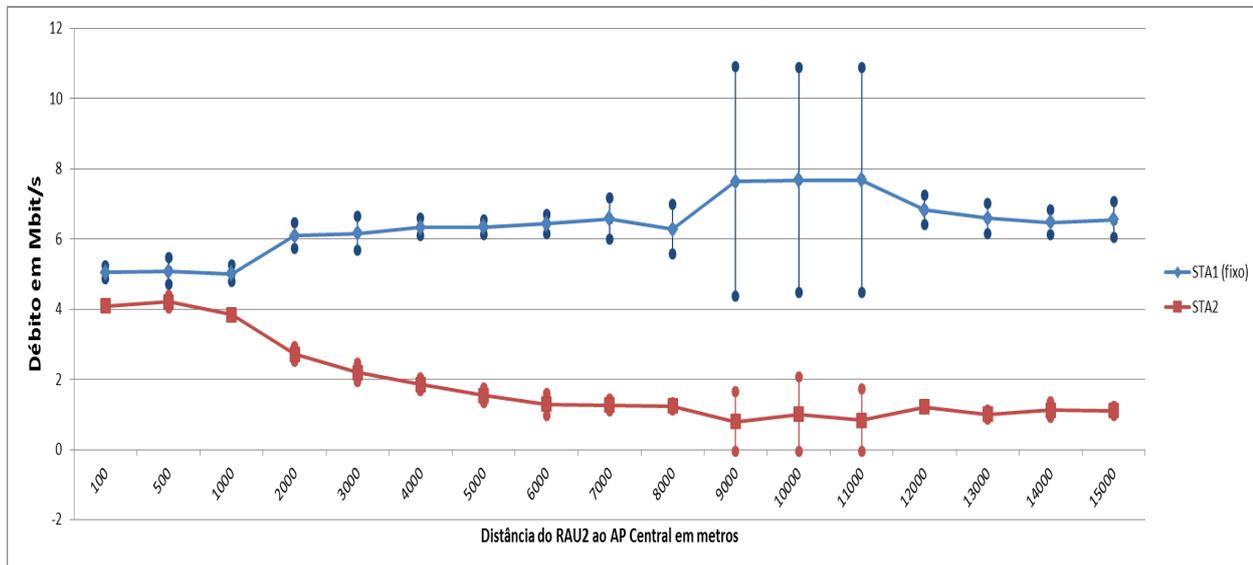
4.2.2.2 RTS/CTS

De igual forma, passa-se a apresentar os resultados para esta simulação.

Comprimento de Fibra	STA 1 Fixo	STA 2	Débito Total
100m	5,034	4,080	9,115
500m	5,072	4,209	9,281
1000m	5,007	3,836	8,843
2000m	6,084	2,718	8,802
3000m	6,149	2,189	8,338
4000m	6,328	1,845	8,173
5000m	6,332	1,540	7,873
6000m	6,421	1,283	7,705
7000m	6,569	1,260	7,829
8000m	6,274	1,231	7,505
9000m	7,629	0,792	8,422
10000m	7,667	0,996	8,663
11000m	7,668	0,830	8,499
12000m	6,822	1,204	8,026
13000m	6,582	0,994	7,577
14000m	6,471	1,123	7,595
15000m	6,544	1,103	7,647

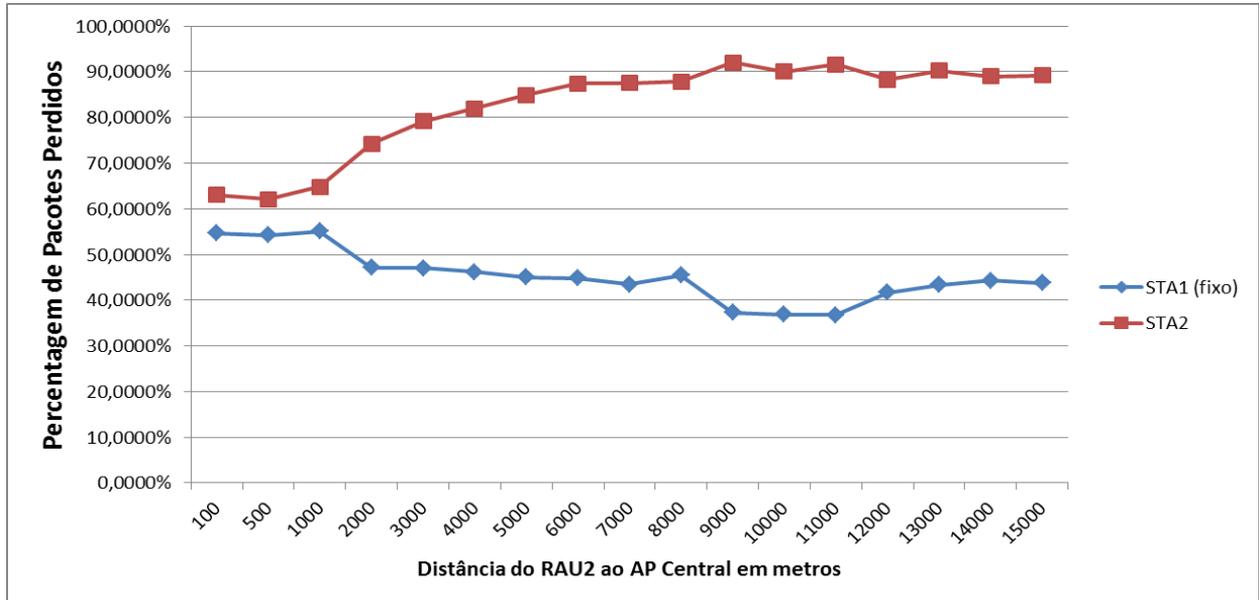
Tabela 4.5: Valores de débito da STA1 (fixa nos 110m) e STA2 em Mbit/s usando RTS/CTS e o algoritmo Ministrel.

Figura 4.7: Gráfico que representa a evolução do débito em Mbit/s, usando RTS/CTS e o algoritmo Ministrel, à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.



Neste caso, pode retirar-se a mesma conclusão que na situação em que o RTS/CTS é usado. Débitos agregados mais altos do que considerando CSMA/CA, mas a justiça de acesso ao meio continua a não se verificar, criando a diferença evidente entre os dois resultados. No entanto salienta-se que este algoritmo proporciona débitos sempre acima da linha de 1 Mbit/s à STA2, o que nem sempre se verificou no algoritmo ARF. Conclui-se novamente que o RTS/CTS é melhor globalmente, mas não é solução aceitável para o cenário proposto.

Figura 4.8: Gráfico que representa a evolução de pacotes perdidos à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.



O gráfico da percentagem de pacotes perdidos para este caso, não acrescenta nada de novo às anteriores conclusões, pois a gama de valores é a mesma do algoritmo estudado anteriormente.

4.2.3 ConstantRateWifiManager

O "*ConstantRateWifiManager*", como o nome indica, corresponde ao tipo de configuração em que a taxa de transmissão é fixa no valor mais alto possível admissível no 802.11g, ou seja, os 54 Mbit/s. No entanto, este valor nunca é o atingido pois na realidade o máximo desempenho atingido corresponde a cerca de 27 Mbit/s, considerando-se uma arquitetura típica de Wifi. De qualquer forma, o facto de o débito estar fixo neste valor, ao contrário da variabilidade apresentada pelos restantes algoritmos, corresponde a um resultado positivo comparativamente aos métodos de débito variável.

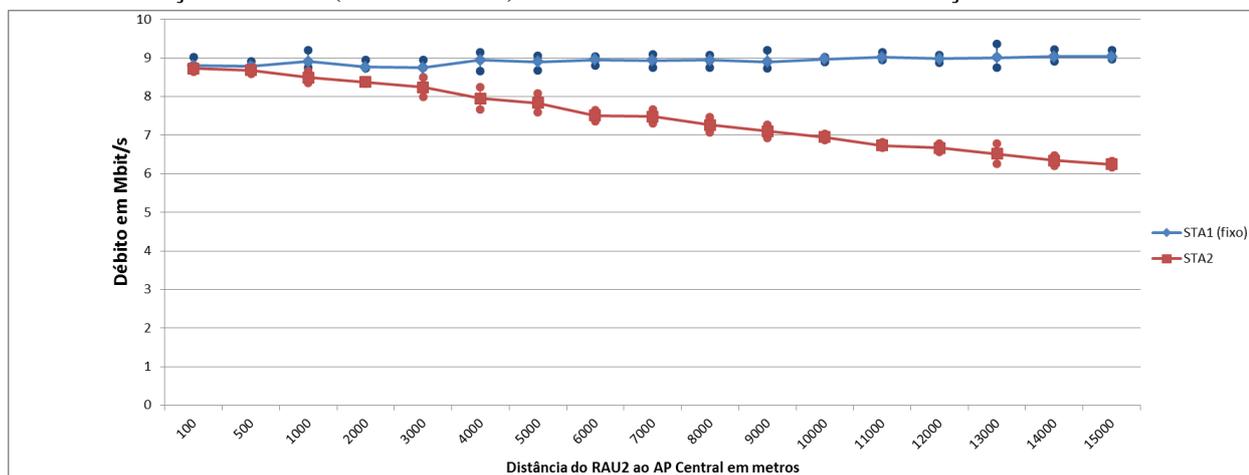
4.2.3.1 CSMA/CA

Na configuração para transmissão em modo de acesso básico procede-se de igual forma às mesmas simulações descritas anteriormente.

Comprimento de Fibra	STA 1 Fixo	STA 2	Débito Total
100m	8,799	8,724	17,524
500m	8,786	8,682	17,469
1000m	8,906	8,496	17,402
2000m	8,768	8,378	17,146
3000m	8,746	8,237	16,984
4000m	8,945	7,955	16,900
5000m	8,902	7,834	16,736
6000m	8,953	7,504	16,458
7000m	8,936	7,481	16,417
8000m	8,943	7,263	16,206
9000m	8,901	7,098	16,000
10000m	8,972	6,950	15,923
11000m	9,015	6,735	15,750
12000m	8,978	6,665	15,643
13000m	9,010	6,520	15,530
14000m	9,035	6,341	15,377
15000m	9,031	6,244	15,276

Tabela 4.6: Valores de débito da STA1 (fixa nos 110m) e STA2 em Mbit/s usando CSMA/CA e débito constante.

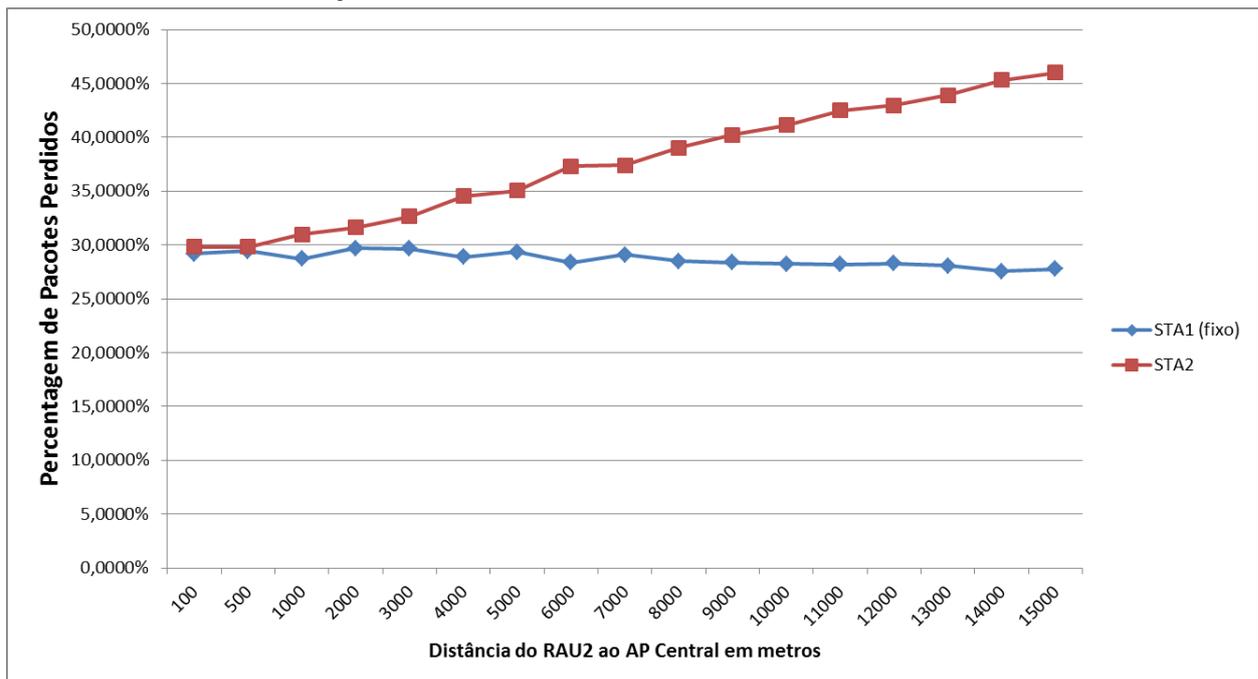
Figura 4.9: Gráfico que representa a evolução do débito em Mbit/s, usando CSMA/CA e taxa de débito constante, à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.



A primeira característica evidente neste resultado corresponde ao facto de a escala do débito deste gráfico para CSMA/CA ser bastante superior aos gráficos apresentados anteriormente. É evidente a superioridade de débito para as várias distâncias consideradas na simulação, inclusive o débito provocado pela STA2 à medida que esta se afasta. No entanto, o efeito de diminuição do débito para esta mantém-se, enquanto que o débito provocado pela STA1 continua constante ao

longo do aumento de distância, sendo evidente mais uma vez a injustiça de acesso ao meio entre as duas estações. Como consequência o débito agregado diminui, no entanto os valores apresentados, tanto para uma estação como para outra, são bastante aceitáveis comparativamente aos resultados apresentados anteriormente.

Figura 4.10: Gráfico que representa a evolução de pacotes perdidos à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.



O gráfico da evolução da porcentagem de pacotes perdidos ajuda a suportar os resultados obtidos, onde pode-se observar que para todas as distâncias consideradas os valores são inferiores a 50%. Naturalmente nota-se um acréscimo de perdas na STA2, enquanto que para a STA1 esta se mantém próxima da linha dos 30%.

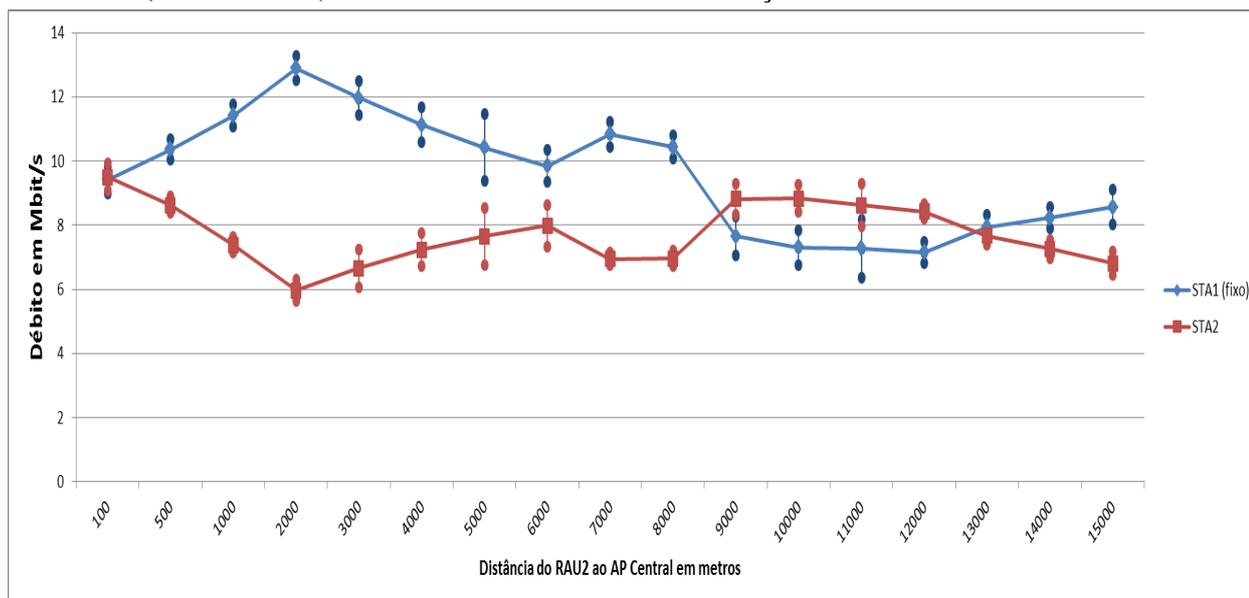
4.2.3.2 RTS/CTS

Definindo o simulador para transmitir em RTS/CTS, obtém-se os seguintes resultados.

Comprimento de Fibra	STA 1 Fixo	STA 2	Débito Total
100m	9,414	9,494	18,909
500m	10,351	8,628	18,980
1000m	11,417	7,385	18,802
2000m	12,894	5,963	18,858
3000m	11,967	6,656	18,623
4000m	11,132	7,236	18,369
5000m	10,415	7,651	18,067
6000m	9,845	7,982	17,827
7000m	10,837	6,939	17,777
8000m	10,427	6,961	17,389
9000m	7,655	8,812	16,468
10000m	7,303	8,837	16,140
11000m	7,272	8,616	15,889
12000m	7,150	8,430	15,581
13000m	7,944	7,670	15,614
14000m	8,231	7,260	15,491
15000m	8,560	6,816	15,377

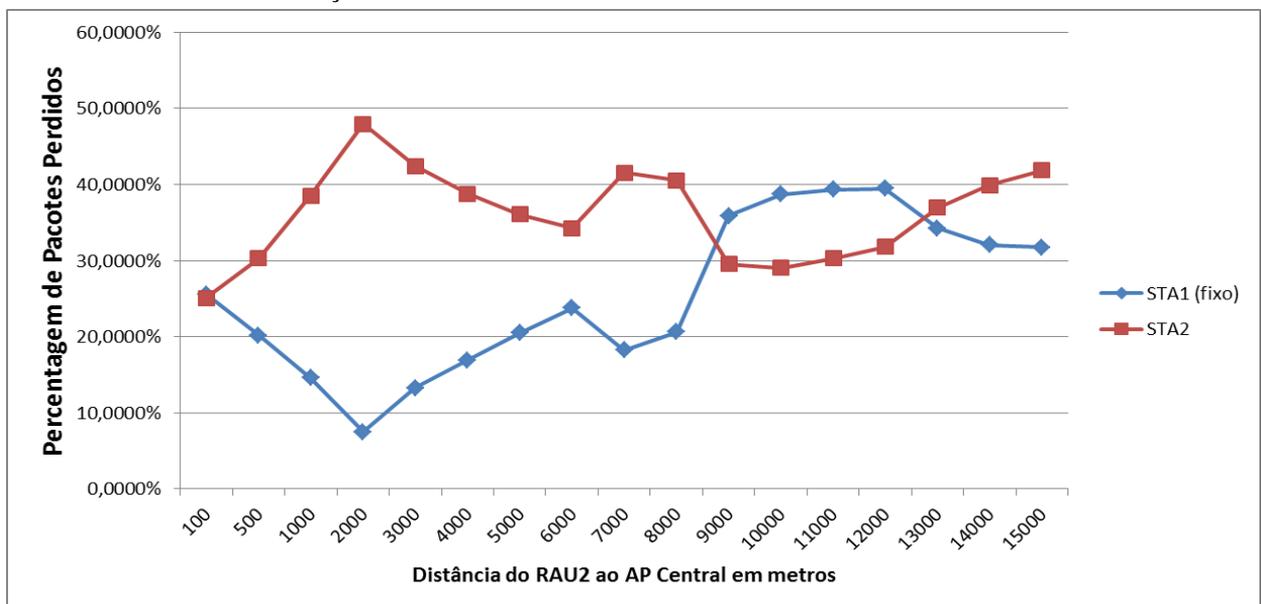
Tabela 4.7: Valores de débito da STA1 (fixa nos 110m) e STA2 em Mbit/s usando RTS/CTS e débito constante.

Figura 4.11: Gráfico que representa a evolução do débito em Mbit/s, usando RTS/CTS e débito constante, à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.



A característica mais evidente no gráfico apresentado é a simetria apresentada, onde se pode observar que o mecanismo RTS/CTS tenta manter o débito agregado constante. Embora os resultados para as distâncias menores possam sugerir que poderia existir uma grande diferença de débitos nas contribuições de cada uma das estações, estas acabam por estabilizar em valores bastante próximos, sugerindo que o mecanismo RTS/CTS em débito constante consegue ser o método de transmissão mais justo entre os anteriormente analisados. Naturalmente observa-se um decréscimo no débito geral provocado pelo aumento da distância da STA2. Analisa-se em seguida o gráfico referente à taxa de pacotes perdidos.

Figura 4.12: Gráfico que representa a evolução de pacotes perdidos à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.

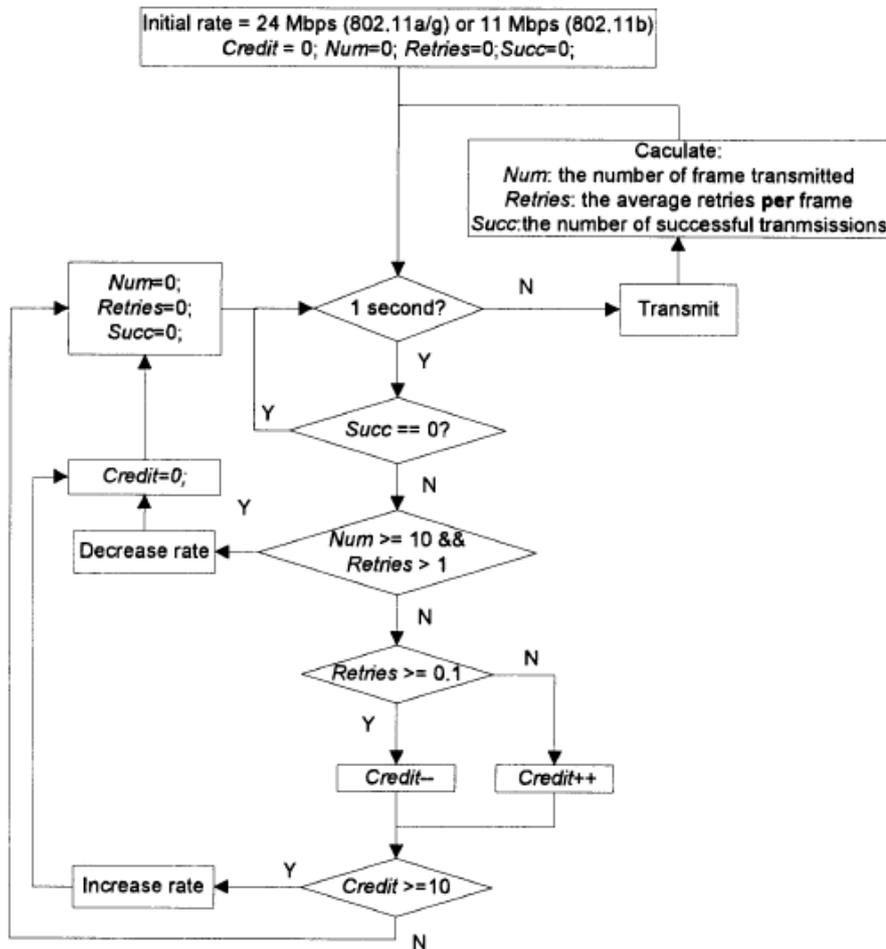


Seria de esperar o facto de se observarem valores de *Packet Loss* inferiores a 50% durante toda a simulação, e observa-se mesmo a existência de pontos onde a taxa de perda de pacotes da STA1 está abaixo dos 20%. No entanto, e tendo em conta que esta é uma das soluções mais eficazes neste cenário, a percentagem de pacotes perdidos no geral continua relativamente elevada, sugerindo que esta solução não resolve por completo o problema da diferença de acessos aos meios em conjunto com a problemática do "nó escondido".

4.2.4 OnoeWifiManager

O Onoe, o primeiro algoritmo *open source* implementado num driver Linux [6], é baseado em créditos e procura a melhor taxa de transmissão com uma taxa de perdas inferior a 50%. O débito é ajustado a cada ciclo de 1000 ms baseado em estatísticas recolhidas ao longo da transmissão. Devido ao grande ciclo, o algoritmo não é sensível a mudanças repentinas no canal.

Figura 4.13: Diagrama de blocos representativo do funcionamento do Onoe [6].



Como é possível observar através do diagrama de blocos da Fig 4.13, o algoritmo inicia-se à taxa de 24 Mbit/s, com todos os parâmetros de análise inicializados a zero. A cada segundo a taxa de sucesso de transmissão é analisada. Caso esta seja nula o algoritmo continua a tentar transmitir, caso contrário é avaliado o número de *frames* transmitidas e o número de novas tentativas de transmissão da mesma *frame*. Se o valor de *frames* transmitidas for maior ou igual a 10 e o número de retransmissões for superior a 1, então a taxa de débito é diminuída e o contador "*Credit*" é colocado a zero. Se a última situação não se verificar, e a média de retransmissões for igual ou superior a 0.1, o contador "*Credit*" é decrementado, caso contrário este último é incrementado. Apenas é verificado um aumento da taxa de débito caso o número de "créditos", nesta fase, for igual ou superior a 10.

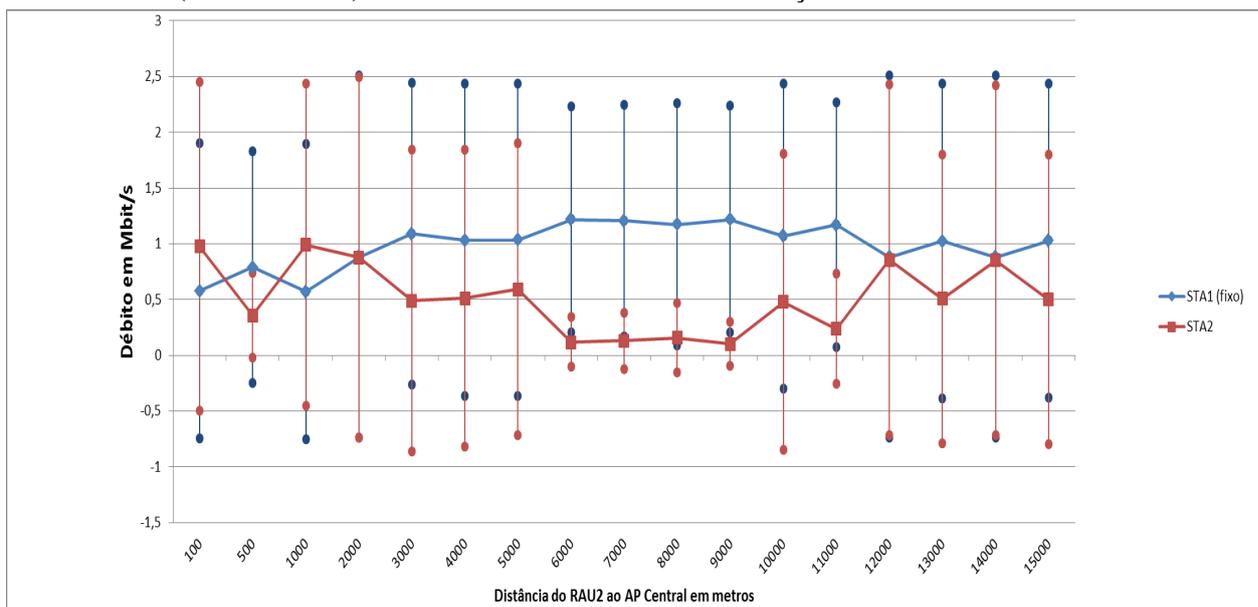
4.2.4.1 CSMA/CA

Apresentam-se os resultados da simulação usando o Onoe em modo básico.

Comprimento de Fibra	STA 1 Fixo	STA 2	Débito Total
100m	0,579	0,974	1,554
500m	0,789	0,357	1,147
1000m	0,571	0,989	1,561
2000m	0,882	0,878	1,761
3000m	1,090	0,488	1,578
4000m	1,032	0,511	1,544
5000m	1,034	0,591	1,626
6000m	1,217	0,118	1,335
7000m	1,205	0,130	1,335
8000m	1,175	0,156	1,331
9000m	1,219	0,101	1,320
10000m	1,069	0,477	1,547
11000m	1,168	0,237	1,405
12000m	0,882	0,856	1,739
13000m	1,024	0,506	1,531
14000m	0,882	0,853	1,735
15000m	1,027	0,499	1,527

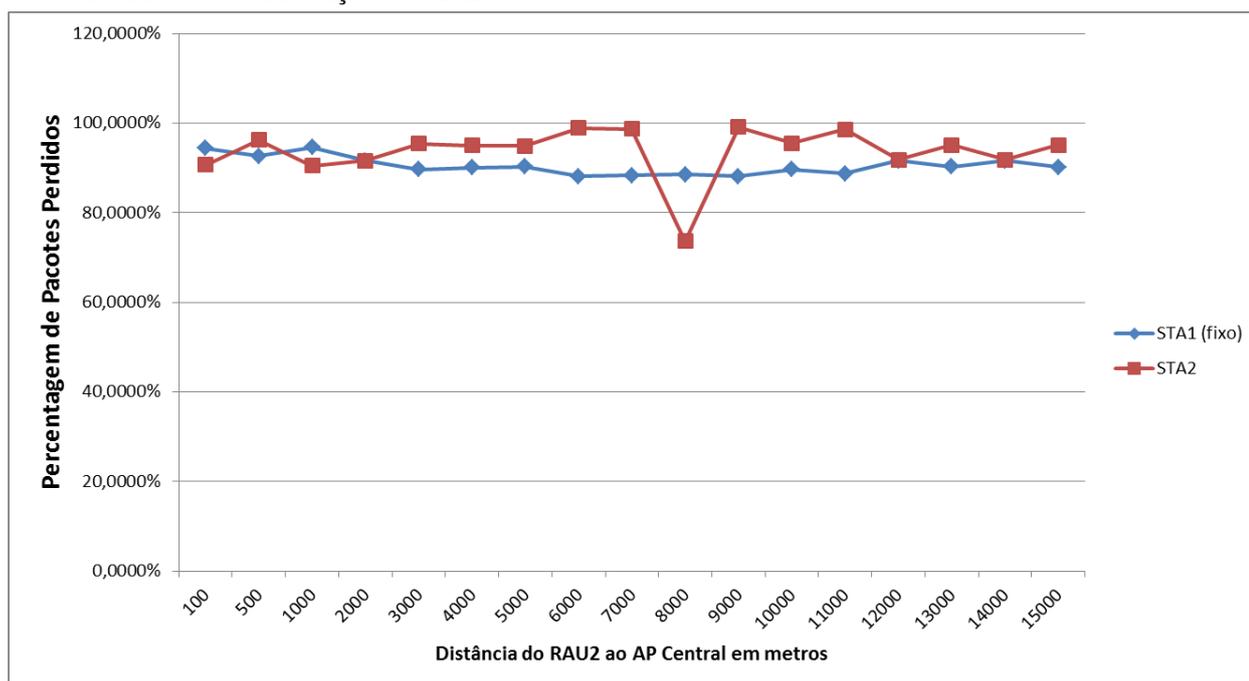
Tabela 4.8: Valores de débito da STA1 (fixa nos 110m) e STA2 em Mbit/s usando CSMA/CA e o algoritmo Onoe.

Figura 4.14: Gráfico que representa a evolução do débito em Mbit/s, usando CSMA/CA e o algoritmo Onoe, à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.



Através desta representação gráfica pode verificar-se mais uma vez o problema típico apresentado pelos diferentes algoritmos aqui apresentados, em que a STA1 ganha claramente acesso ao meio mais vezes do que a STA2. É possível a identificação de algumas variações bruscas nos débitos, justificados possivelmente pelo grande tempo de intervalo entre as avaliações da taxa de transferência utilizadas.

Figura 4.15: Gráfico que representa a evolução de pacotes perdidos à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.



Por sua vez, o gráfico de perdas de pacotes neste algoritmo é quase linear e sempre bastante alto, com valores entre os 90% e os 99%, mostrando tratar-se de uma má solução para o cenário de Rádio sobre Fibra.

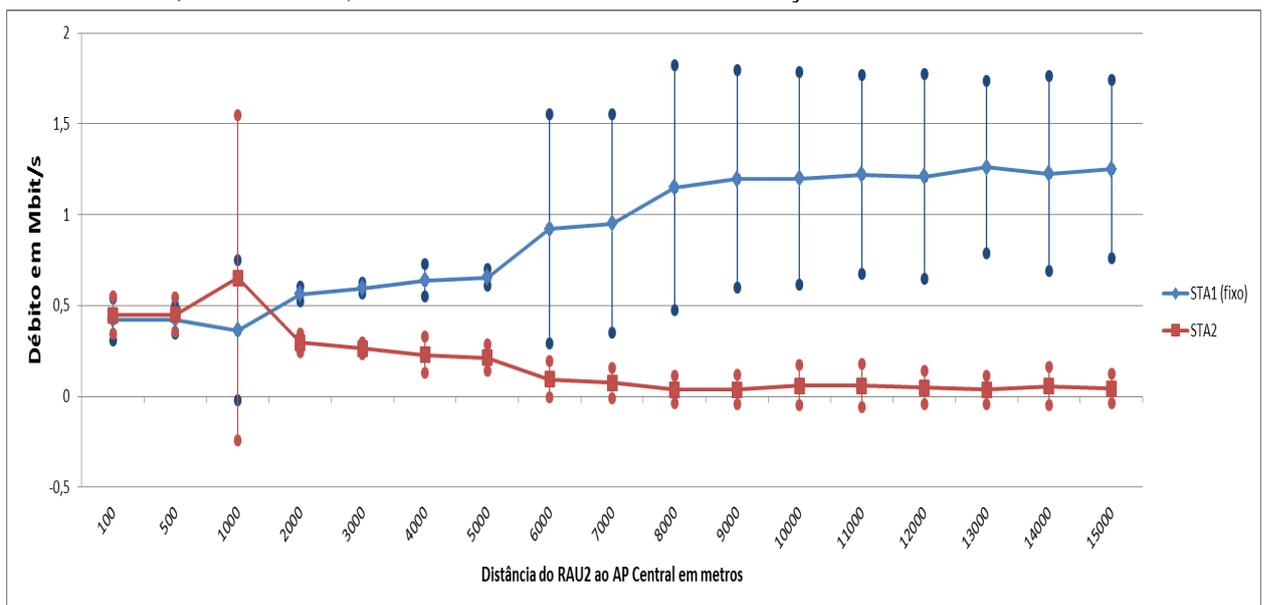
4.2.4.2 RTS/CTS

Apresentam-se os resultados obtidos nesta última simulação.

Comprimento de Fibra	STA 1 Fixo	STA 2	Débito Total
100m	0,422	0,446	0,422
500m	0,421	0,450	0,421
1000m	0,363	0,651	0,363
2000m	0,562	0,295	0,562
3000m	0,595	0,262	0,595
4000m	0,637	0,227	0,637
5000m	0,655	0,213	0,655
6000m	0,920	0,093	0,920
7000m	0,951	0,073	0,951
8000m	1,149	0,037	1,149
9000m	1,196	0,037	1,196
10000m	1,199	0,059	1,199
11000m	1,218	0,058	1,218
12000m	1,209	0,046	1,209
13000m	1,261	0,035	1,261
14000m	1,225	0,055	1,225
15000m	1,249	0,043	1,249

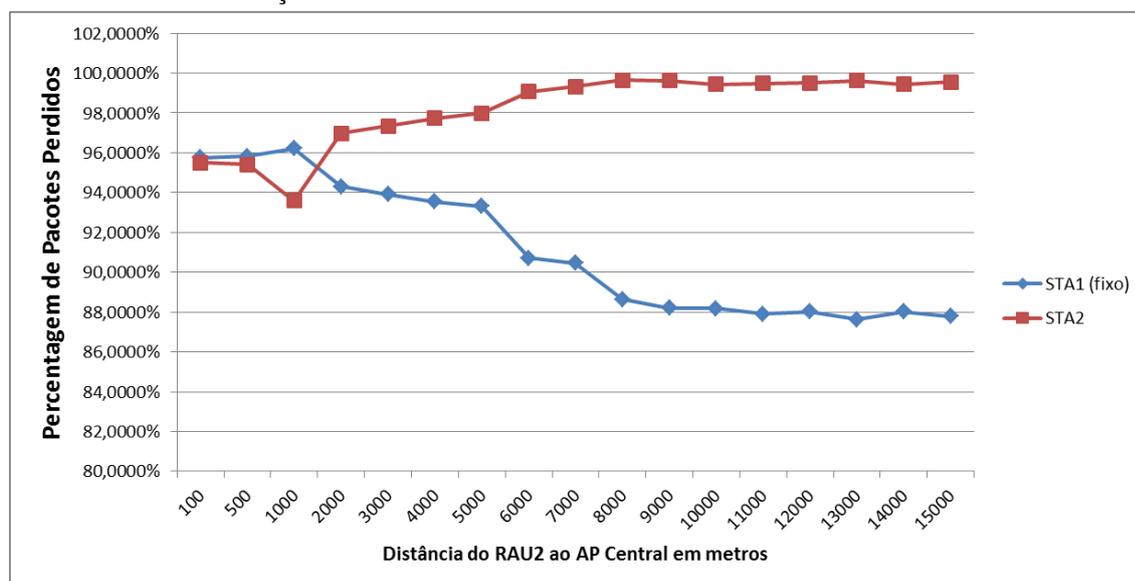
Tabela 4.9: Valores de débito da STA1 (fixa nos 110m) e STA2 em Mbit/s usando RTS/CTS e o algoritmo Onoe.

Figura 4.16: Gráfico que representa a evolução do débito em Mbit/s, usando RTS/CTS e o algoritmo Onoe, à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.



Pode observar-se nestes resultados que este se trata do algoritmo com o pior desempenho, a nível de justiça de acesso ao meio e de débitos agregados, entre todos os apresentados considerando o modo RTS/CTS. Analisando-se a escala deste gráfico, observa-se que o valor de débito mais alto medido foi de 1.49 Mbit/s, o que revela o mau desempenho deste algoritmo, onde os seus concorrentes nas mesmas condições de transmissão atingem valores de débito agregado no mínimo 8 vezes superiores.

Figura 4.17: Gráfico que representa a evolução de pacotes perdidos à medida que o comprimento da fibra aumenta. Apresenta-se em azul a contribuição da STA1 (fixa nos 110m) e a vermelho encontra-se a contribuição da STA2.



Os valores de débito apresentados são suportados pelo respetivo gráfico de perda de pacotes, onde se verificam valores de perdas para a STA1 inferiores à STA2, porém muito elevados ainda (na casa dos 88%). Por sua vez a STA2 apresenta resultados de perda de pacotes a rondar os 99%, sublinhando a má performance deste algoritmo no âmbito da arquitetura Rádio sobre Fibra em acesso distribuído.

4.2.5 Colisões

Como se pode concluir pela análise dos resultados apresentados, a perda de pacotes é bastante grande em todas as situações, inclusivamente para o cenário de débito constante, onde se encontra o melhor desempenho comparativamente com os algoritmos adaptativos. O cálculo da taxa de perda de pacotes é realizado ao nível MAC, ou seja, caso o pacote chegue a este nível (superior ao da camada física) não é considerado perdido, no entanto é possível que este tenha sido re-transmitido várias vezes devido a colisões. São precisamente essas colisões que se analisam nesta secção.

O ns3 possui um sistema de *tracing*, onde é possível chamar uma função criada pelo utilizador sempre que é accionado um determinado "gatilho" ou *trigger*. Estes estão detalhados na API do simulador, onde é feita a devida explicação de como os ativar. O parâmetro adequado para tal efeito é o "*PhyTxDrop*", que está devidamente declarado no modelo de camada física "*YansWifiPhy*". Este dispara sempre que um dispositivo descarta um pacote, ao nível físico, no momento de recepção, o que corresponde às colisões a contabilizar. É então colocado um contador para cada dispositivo, realizando-se a contabilização do número de vezes que este mecanismo é accionado.

Esta monitorização é feita usando o método de transmissão débito constante, pois trata-se do mais linear e consistente das várias distâncias consideradas na simulação. As conclusões a retirar desta medição poderão ser aplicadas aos restantes algoritmos, pois embora o débito de transmissão seja efetivamente maior neste método de transmissão, o comportamento ao nível de justiça de acesso ao meio é bastante semelhante em todos os algoritmos apresentados. As duas tabelas seguintes apresentam o número de colisões que ocorreram durante a simulação para as diferentes distâncias, em acesso básico e RTS/CTS. Foram registadas as colisões no caso em que as duas estações estão a enviar pacotes para o AP, assim como as colisões no caso em que o AP responde às estações com pacotes ACK ou CTS.

CSMA/CA

Distância	AP ->STA1	AP->STA2	STA1 e STA2 ->AP
100m	129	128	22556
500m	120	248	22484
1000m	124	244	22612
2000m	119	368	22676
3000m	122	621	22612
4000m	112	724	22414
5000m	117	855	22504
6000m	102	960	22695
7000m	109	1090	22559
8000m	95	1199	22720
9000m	191	1312	22899
10000m	206	1460	22800
11000m	190	1568	22726
12000m	119	1686	22822
13000m	113	1769	22833
14000m	94	1989	22745
15000m	109	2122	23026

Tabela 4.10: Tabela com o número de colisões de pacotes nos sentidos indicados. Estes valores referem-se ao mecanismo CSMA/CA em Débito Constante.

Através da análise dos resultados facilmente se identifica um acréscimo no número de colisões no sentido AP >STA2 quando esta se afasta do *Access Point*, assim como uma tendência para o aumento do número de colisões quando a transmissão das duas estações para o AP aumenta.

Este número de colisões é, por si só, bastante alto, considerando-se que o número de pacotes criado pelas duas estações durante esta transmissão é de cerca de 62000. No sentido AP >STA1, é também facilmente perceptível alguma variação no número de colisões, que se mantém baixo comparativamente aos restantes sentidos observados.

RTS/CTS

Distância	AP ->STA1	AP->STA2	STA1 e STA2 ->AP
100m	346	325	10688
500m	661	710	10618
1000m	289	715	10528
2000m	277	1056	10191
3000m	221	1286	9543
4000m	195	1466	9100
5000m	308	1678	8815
6000m	257	1538	8553
7000m	236	1630	8450
8000m	220	1518	8611
9000m	220	1324	8420
10000m	310	1172	8174
11000m	286	1105	8080
12000m	261	1086	7997
13000m	163	1005	8022
14000m	143	987	7953
15000m	148	971	8112

Tabela 4.11: Tabela com o número de colisões de pacotes nos sentidos indicados. Estes valores referem-se ao mecanismo RTS/CTS em Débito Constante.

A partir destes resultados pode concluir-se sobre a superioridade ao nível da eficácia do mecanismo RTS/CTS. Em primeiro lugar é perceptível a diferença de colisões quando as duas estações competem pelo meio, ou seja, quando as duas transmitem para o AP, comparativamente ao Acesso Básico. Um outro aspeto a realçar neste ponto é o facto deste número ir diminuindo à medida que a distância entre o AP e a STA2 aumenta, confirmando mais uma vez a tendência de equilíbrio deste mecanismo. No sentido AP>STA1 é evidente a diminuição do número de colisões, facilmente explicado pela maior probabilidade de acesso ao meio e pelo menor tempo de viagem que estes pacotes fazem comparativamente ao trajeto AP >STA2. O restante sentido de tráfego, embora não revele um número tão reduzido de colisões, não apresenta uma tendência para que estas aumentem, originando desta forma a referida diferença positiva por parte do RTS/CTS comparativamente ao seu concorrente.

4.3 Discussão dos Resultados

A grande conclusão a retirar das simulações realizadas é que os algoritmos adaptativos presentes no mercado não se conseguem adaptar ao cenário de Rádio sobre Fibra proposto, ou seja, uma configuração em acesso distribuído, onde não existe um equilíbrio de acesso ao meio. Por outro lado, quando a transmissão de dados é feita sem variação do débito, observa-se uma considerável melhoria tanto no débito agregado assim como no débito individual de cada estação. De qualquer forma, e mesmo esse caso de débito constante, o problema do nó escondido associado ao atraso imposto pela fibra não é resolvido pois a percentagem de pacotes perdidos continua elevada. Tendo em conta que o canal em que os pacotes viajam foi configurado como sendo ideal, ou seja sem perdas, a explicação para esse número elevado de pacotes perdidos são as colisões entre eles devido ao facto de as duas estações não se ouvirem e do atraso existente no caminho percorrido pelo pacote até à estação mais distante. Um bom exemplo desta situação corresponde ao caso em que o AP está a responder a um RTS à STA1 com um CTS e um RTS é enviado pela STA2. Estes dois pacotes, o RTS da estação 2 e o CTS do AP, irão colidir durante esse período de vulnerabilidade.

Em relação à comparação entre os métodos de transmissão, RTS/CTS ou CSMA/CA, conclui-se que o primeiro apresenta os melhores resultados, tanto a nível de débito agregado assim como individualmente. A única exceção corresponde ao caso em que se utiliza o algoritmo Onoe, onde o modo CSMA/CA consegue ter um desempenho superior ao do seu concorrente, que apresenta débitos perto de zero. De qualquer forma, apesar de ser superior o desempenho, não pode ser considerado bom. As figuras 4.18 e 4.19, apresentadas de seguida, resumem todos os gráficos de débito apresentados à mesma escala, em CSMA/CA e RTS/CTS. Cada par de STA's apresentado nas legendas corresponde aos algoritmos de débito adaptativo apresentados neste documento, pela mesma ordem em que foram expostos, de cima para baixo.

Figura 4.18: Todos os gráficos de débito apresentados, utilizando o mecanismo CSMA.

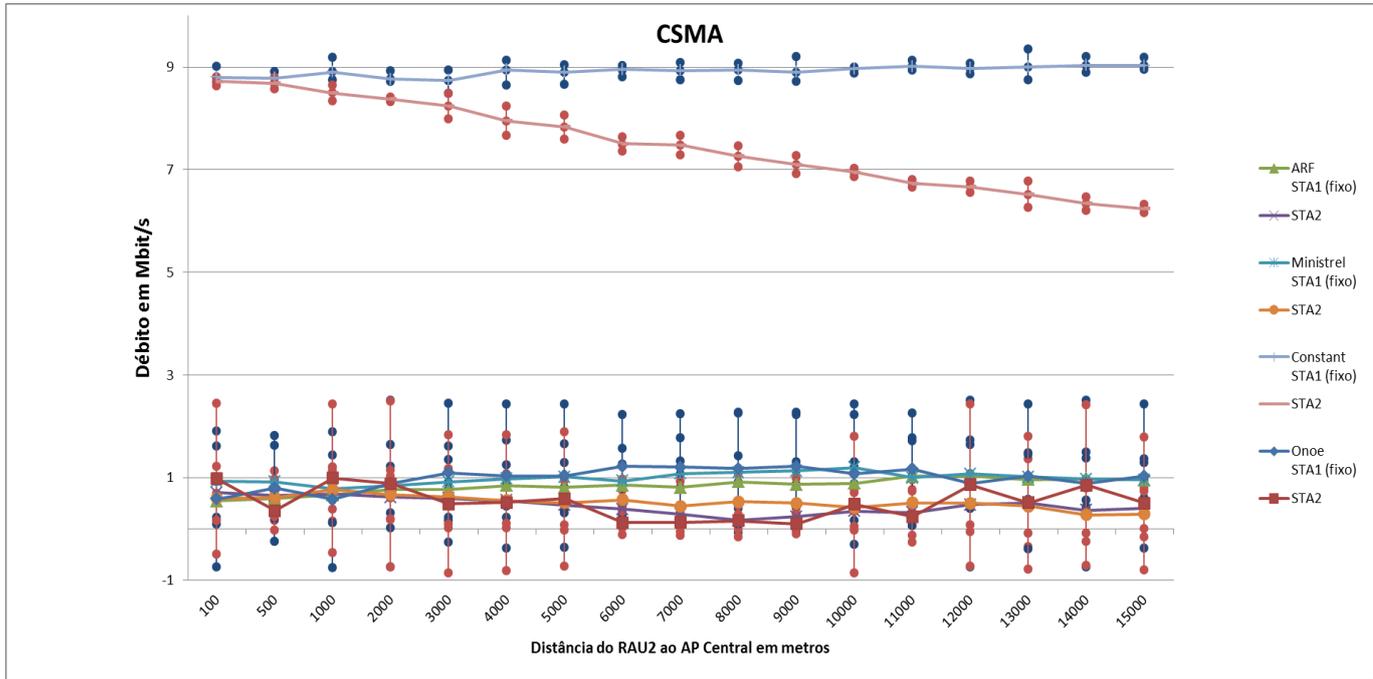
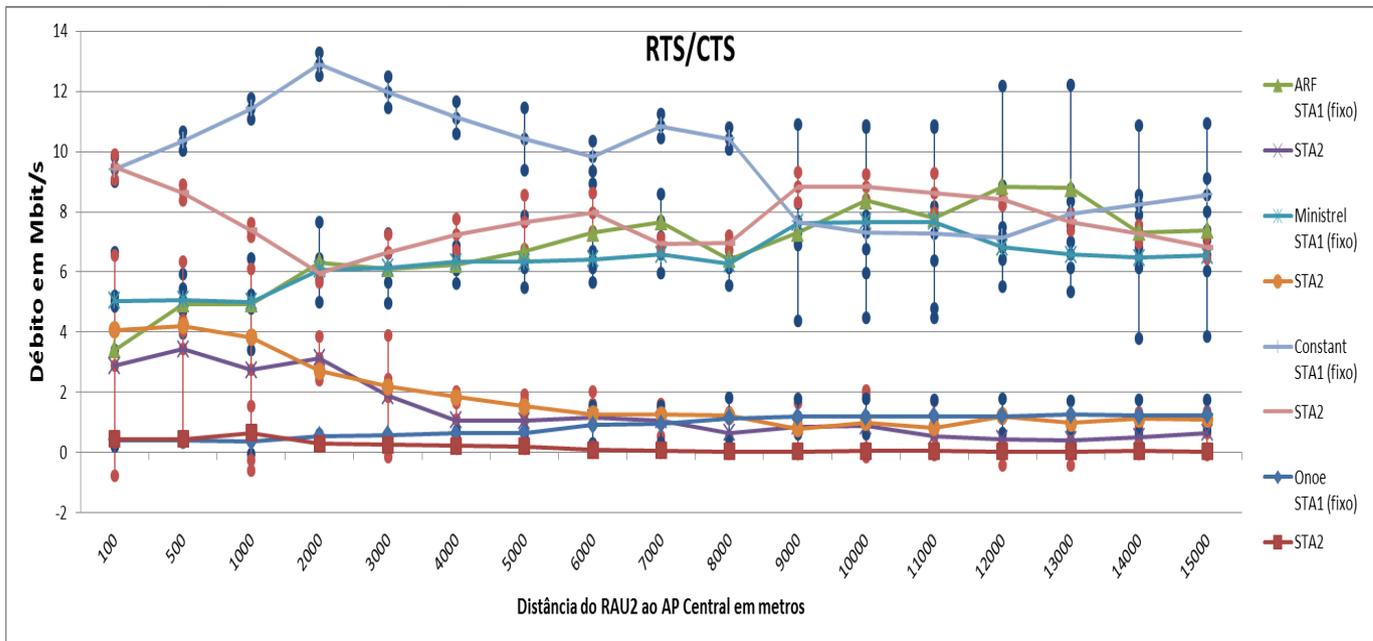


Figura 4.19: Todos os gráficos de débito apresentados, utilizando o mecanismo RTS/CTS.



Capítulo 5

Conclusões e Trabalho Futuro

O *Radio over Fiber*, ou a tecnologia Rádio sobre Fibra, é claramente um importante tópico a explorar tendo em conta todas as possibilidades de mobilidade, manutenção, desempenho e economia que esta tecnologia pode oferecer, ou seja, poderá ser a solução a adotar para uma grande variedade de configurações de rede sem fios, como por exemplo, a existência de uma rede com tamanho suficientemente grande para justificar o investimento nesta tecnologia.

Embora ainda não existam implementações ao nível MAC de gestão da rede para controlar arquiteturas como a apresentada neste documento, nem orientadas para ambientes *RoF* em geral, foi dada neste documento uma contribuição sobre como os modelos existentes hoje em dia para transmissão de sinais WiFi se comportariam caso esta configuração fosse implementada no mundo real, em diferentes condições. Também foi apresentada uma proposta de implementação deste mesmo modelo no simulador de redes ns3, cuja implementação inclui os pontos fulcrais a assumir quando se desenvolve um modelo do tipo Rádio sobre Fibra, como o atraso inserido pela presença de uma ligação de fibra ótica com determinado comprimento e baixa atenuação do sinal nesse mesmo meio.

A contribuição presente neste documento poderá motivar futuras implementações ainda mais precisas a nível de simulação, assim como uma ajuda na indicação do caminho a seguir para o desenho, ou redesenho, de algoritmos que consigam uma melhor eficiência a nível da gestão de uma rede WiFi sobre fibra ótica.

5.1 Contribuições

A análise de desempenho apresentada sobre o comportamento da camada MAC do *802.11g* na gestão de arquiteturas *RoF* em acesso distribuído, constitui uma contribuição para o desenvolvimento desta tecnologia.

Propôs-se um modelo em ns3, que segue as linhas fundamentais da transmissão de sinais Wifi num ambiente de Rádio sobre Fibra, com característica de se tratar de uma boa base de trabalho para desenvolvimentos futuros deste mesmo modelo. Conclui-se também que na grande generalidade dos algoritmos adaptativos, o RTS/CTS apresenta melhor eficiência do que o CSMA/CA,

mas por sua vez conclui-se que os algoritmos adaptativos presentes no mercado não são solução para atingir um bom desempenho do sistema. Foi também possível verificar que o uso de débitos fixos é a melhor solução, a nível de eficiência, a utilizar nesta arquitetura, tanto na transmissão em acesso básico assim como em RTS/CTS, sendo o último o método mais justo considerando a disputa pelo acesso ao meio.

5.2 Trabalho Futuro

O trabalho que poderá vir a ser realizado no futuro, tendo em conta o que foi desenvolvido ao longo desta implementação e análise, passa por:

- Melhorar o modelo em ns3, passando pela criação de modelos mais precisos de simulação da transmissão dos pacotes através de todo o canal. No caso estudado considerou-se o canal ideal, não levando em consideração a atenuação presente entre o RAU e a estação.
- Variar o cenário de simulação onde, por exemplo, se consideram menores diferenças de distâncias entre fibras e a possibilidade de se encontrarem ligados a cada RAU vários utilizadores.
- Como o RTS/CTS não resolve por completo o problema da transmissão de pacotes em ambiente *RoF*, onde o atraso e o *Hidden Node* são os principais problemas, os resultados apresentados podem servir de base para novos mecanismos de acesso ao meio como um mecanismo de acesso centralizado, onde não são as estações que competem pelo meio mas sim o ponto de acesso que gere esses acessos.
- O desenho de um algoritmo de débito adaptativo que seja compatível com o problema apresentado, tendo em conta que nenhum dos considerados teve sucesso no seu desempenho.

Referências

- [1] N. Pleros G.I. Papadimitriou G. Kalfas, P. Nikolaidis. A radio-over-fiber network with MAC protocol that provides intelligent and dynamic resource allocation, 2009.
- [2] IEEE 802.11 technical tutorial. Disponível em <http://connection8.com/i/ieee-802.11-technical-tutorial-introduction-e1679-pdf.pdf>.
- [3] Prof. Manuel Ricardo. Slides de apoio às aulas da unidade curricular “comunicações móveis”, 2013.
- [4] K. Xu H. Chen X. Lu Y. Dai F. Yin Y. Ji Y. Fan, J. Li e J. Lin. Performance analysis for IEEE 802.11 distributed coordination function in radio-over-fiber based distributed antenna systems, September 2013.
- [5] Ns3 software. <http://www.nsnam.org/documentation/>.
- [6] Shaoen Wu Saiid Biaz. Rate adaptation algorithms for IEEE 802.11 networks: A survey and comparison, 2008.
- [7] M2 Optics. Calculating optical fiber latency. <http://www.m2optics.com/blog/?Tag=fiber+optic+delay>.
- [8] Ignas Niemegeers Bao Linh Dang, R. Venkatesha Prasad. On the MAC protocols for radio over fiber indoor networks, 2006.
- [9] George Kalfas e Nikos Pleros. An agile and medium-transparent MAC protocol for 60 GHz radio-over-fiber local access networks, Agosto 2010.
- [10] M. Zhu J. Wang L. Cheng G.Chang C. Liu, L. Zhang. Novel multi-service small-cell cloud radio access network for mobile backhaul and computing based on radio-over-fiber technologies. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 17, Setembro 2013.
- [11] Isabelle Siaud Anne Marie Ulmer-Moll Benoit Charbonnier Anna Pizzinat Joffray Guillory, Sylvain Meyer e Catherine Algani. Radio over fiber architectures. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, Setembro 2010.
- [12] IEEE. IEEE std 802.11-2012. URL: <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.11.html>.
- [13] Qiang Fu Dong Xia, Jonathan Hart. Evaluation of the minstrel rate adaptation algorithm in IEEE 802.11g WLANs.