



Daniel Filipe Lopes Redondo

Licenciatura em Ciências da Engenharia Eletrotécnica
e de Computadores

**Desempenho de técnicas de acesso distribuído em
sistemas de comunicação sem fios de múltipla receção**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Dr. Rodolfo Alexandre Duarte Oliveira,
Prof. Auxiliar, Universidade Nova de Lisboa



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março, 2015

Desempenho de técnicas de acesso distribuído em sistemas de comunicação sem fios de múltipla receção

Copyright © de Daniel Filipe Lopes Redondo, da FCT/UNL e da UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Para os meus pais.

Agradecimentos

Ao professor, orientador e amigo Rodolfo Oliveira por todo o apoio e paciência prestados, pelas reuniões tardias, por estar sempre disposto a ajudar-me nas alturas de maior complicação, por sempre arranjar disponibilidade para todas as dúvidas que surgiram não só ao longo desta dissertação mas também ao longo de todo o meu percurso académico. Um grande obrigado por toda a atenção e por ter sido incansável na ajuda a superar todas as adversidades que surgiram neste período.

Um grande obrigado à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa por ter assegurado todos os meios e condições ao longo do meu percurso académico.

Agradeço à Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo apoio prestado através dos projetos ADIN (PTDC/EEI-TEL/2990/2012) e MANY2COMWIN (EXPL/EEI-TEL/0969/2013).

A todos os meus amigos, pelo apoio incondicional e por sempre acreditarem no meu sucesso, por toda a força, por todos os momentos de descontração e por toda a alegria e ânimo que me transmitiram.

Finalmente, agradeço há minha família que sempre me apoiou nos meus sonhos e que fez com que nunca me faltasse nada para os concretizar e fazendo-me feliz, acima de tudo. Um agradecimento especial aos meus Pais, por todo o seu esforço e dedicação, por quererem sempre o melhor para mim, por estarem sempre presentes quando mais preciso. Mesmo quando por momentos poderia ser melhor filho, eles foram e serão sempre os melhores Pais. É graças a eles que consigo concluir mais uma etapa na minha vida e é a eles que dedico todo o meu trabalho. Nunca uma página será grande o suficiente para transmitir o quão agradecido estou, mas fica um profundo Obrigado por tudo o que têm feito por mim.

Resumo

Nas redes sem fios tradicionais, os nós recetores permitem apenas uma única receção individual. Contudo com o aumento do número de dispositivos móveis nas redes sem fios, tem-se explorado novas técnicas que permitem múltiplas receções em simultâneo (*Multipacket Reception*) (MPR), tais como CDMA, OFDMA e MU-MIMO. Estas técnicas permitem melhorar o desempenho dos sistemas, aumentando também os débitos de transferências de dados. Apesar deste desenvolvimento, os protocolos de controlo de acesso ao meio não estão desenhados para suportar múltiplas receções, admitindo ainda os pressupostos originais. Isto faz com que se estejam a desperdiçar recursos do canal, não aproveitando ao máximo as capacidades que os sistemas MPR têm para oferecer.

Nesta dissertação estuda-se a condição de receção com sucesso de múltiplas transmissões. Isto permite obter um modelo para caracterizar o número de transmissões recebidas com sucesso tendo em conta o número de nós que transmitem em simultâneo e modelando também a probabilidade de receção com sucesso individual. A partir desta caracterização, é verificado o desempenho de cinco protocolos MAC diferentes com suporte para múltiplas receções em simultâneo. Realizando uma avaliação integrada (tendo em conta o nível físico e o nível MAC) para os diferentes protocolos estudados, realiza-se uma avaliação comparativa relativamente ao débito atingido por cada um deles. Propõem-se por fim dois novos protocolos MAC com suporte para múltiplas transmissões em simultâneo para que se faça um melhor aproveitamento das capacidades permitidas pelos sistemas MPR, atingindo também melhores débitos.

Palavras-chave: Múltipla Receção de Pacotes, Comunicação sem fios, Protocolo de Controlo de Acesso ao Meio, Avaliação Comparativa.

Abstract

In traditional wireless networks, the receivers only allow a single reception at a time. However, with the increase of mobile terminals in wireless networks, new techniques that allow multiple receptions simultaneously (Multipacket Reception), like CDMA, OFDMA and MU-MIMO, are being explored. These technics increase the system performance at the physical layer as well as the throughput of the wireless communication systems. Despite of this improvement, Medium Access Control (MAC) protocols have not been adapted to allow multiple receptions and they are still following the original assumptions. This wastes channel resources, and does not take advantage of the full capabilities of MPR systems.

This dissertation studies the successful receiving condition of multiple and simultaneous transmissions. This allows the derivation of a model that characterizes the number of transmissions received with success, modelling also the individual probability of successful reception. Based on this characterization, the performance of five different MAC protocols with support for multiple and simultaneous transmissions is investigated. Performing an integrated evaluation (Physical and MAC layers) for each of the protocols, a comparative evaluation is presented for the throughput achieved by each one of them. Finally, two new MAC protocols with support for MPR are proposed to explore the capabilities of MPR systems and improve the network performance in terms of throughput.

Keywords: Multipacket Reception, Medium Access Control Protocol, Comparative evaluation, Wireless Communications.

Conteúdo

Agradecimentos	vii
Resumo.....	ix
Abstract	xi
Conteúdo	xiii
Índice de figuras	xvii
Índice de Tabelas.....	xix
Acrónimos	xxi
Simbologia	xxiii
1. Introdução	1
1.1 Introdução	1
1.2. Motivação.....	2
1.3. Objetivos e contribuições.....	2
1.4. Estrutura da Dissertação	4
2. Trabalho Relacionado.....	5
2.1. Opportunistic MAC Protocol	5
2.1.1. Definição da probabilidade p_t	7
2.2. Asynchronous MAC Protocol.....	8

2.2.1. Definição da probabilidade p_t	10
2.3. Multi-Round Contention Random-Access	10
3. Recepção de Múltiplos Pacotes	13
3.1. Condição de recepção	13
3.2. Probabilidade de Recepção Individual	14
3.2.1. Caracterização teórica do cálculo de p_s	14
3.2.2. Caracterização do número médio de pacotes recebidos	16
3.2.3. Validação	16
3.2.3.1. Desvanecimento Rápido	17
3.2.3.2. Desvanecimento Lento	18
3.2.3.3. Perdas de Propagação	18
3.2.3.4. Efeitos de propagação em simultâneo	20
3.2.4. Coroa	20
3.2.4.1. Validação	21
4. Avaliação de Desempenho	25
4.1. Introdução	25
4.2. Otimização dos parâmetros p e ω	27
4.3. Cenário de simulação	28
4.4. Avaliação comparativa	30
4.4.1. SPR + MPR	30
4.4.2. IEEE 802.11	31
4.4.3. Protocolo MAC oportunístico	31
4.4.4. Protocolo MAC assíncrono	32
4.4.5. MPR+MPR	32
4.5. Resultados	32
4.5.1. Protocolo A: SPR+SPR	32
4.5.2. Protocolo B: 802.11	35
4.5.3. Protocolo C: MAC oportunístico	37
4.5.4. Protocolo D: MAC assíncrono	38
4.5.5. Protocolo E: MPR+MPR	39
4.6. Avaliação comparativa dos protocolos	41
5. MAC baseado na distribuição espacial dos nós	43
5.1. Introdução	43
5.2. Controlo das potências de transmissão	44

5.2.1. Resultados	45
5.3. Controlo da probabilidade de acesso.....	45
5.3.1. Resultados	46
5.4. Análise das abordagens propostas.....	48
6. Conclusões.....	49
6.1. Considerações finais.....	49
6.2. Trabalho futuro	52
Bibliografia.....	53

Índice de figuras

Figura 2.1 – Exemplo de operação proposto [JL11].	7
Figura 2.2 – Exemplo de operação proposto (a) MAC síncrono [JKL12]; (b) MAC assíncrono [JKL12].	9
Figura 2.3 – Contenção multi-ronda para a norma IEEE 802.11 proposto em [ZHA10].	11
Figura 3.1 – Topologia em coroa.	20
Figura 3.2 – Número médio de nós a transmitir com sucesso para diferentes coroas.	22
Figura 4.1 – Exemplo de ronda de comunicação para protocolos com fase de negociação e de transmissão.	26
Figura 4.2 – Débito (S) obtido pela equação (4.8) em função de p e ω .	28
Figura 4.3 – Número médio de nós recebidos com sucesso segundo o modelo físico considerado.	29
Figura 4.4 – Média do nº de nós recebidos com sucesso.	33
Figura 4.5 – Débito protocolo SPR+MPR.	33
Figura 4.6 – Nº de colisões durante a fase de negociação com, e sem, otimização de parâmetros.	34
Figura 4.7 – Comparação de débito com e sem otimização de parâmetros.	35
Figura 4.8 – Débito protocolo 802.11.	36
Figura 4.9 – Débito protocolo 802.11 com suporte MPR.	36
Figura 4.10 – Comparação do débito para o protocolo MAC 802.11 com e sem suporte MPR.	37
Figura 4.11 – Débito protocolo MAC oportunístico [JL11].	38
Figura 4.12 – Débito protocolo MAC assíncrono [JKL12].	38
Figura 4.13 – Média do nº de nós recebidos com sucesso.	39

Figura 4.14 – Débito protocolo MPR+MPR.....	40
Figura 4.15 – Comparação de débito com e sem otimização de parâmetros.....	40
Figura 4.16 – Comparação entre os diferentes protocolos MAC considerados.....	42
Figura 5.1 – Débito observado para protocolo proposto.	45
Figura 5.2 – Débito observado pelo protocolo proposto na segunda abordagem.	47
Figura 5.3 – Débitos obtidos para vários valores de γ	48

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 – Validação probabilidades – Desvanecimento rápido.....	18
Tabela 3.2 – Validação probabilidades – Desvanecimento lento.....	18
Tabela 3.3 – Validação probabilidades – Perdas de propagação.	19
Tabela 3.4 – Probabilidades observadas os três efeitos de propagação em simultâneo.	20
Tabela 3.5 – Validação probabilidades da topologia considerada.	22
Tabela 4.1 – Parâmetros utilizados no cenário considerado.....	29

Acrónimos

ACK *Acknowledge* (Confirmação)

CDF *Comulative Density Function* (Função Densidade Cumulativa)

CDMA *Code Division Multiple Access*

CTS *Clear To Send* (Pedido Para Transmissão)

CW *Contention Window*

IC Intervalo de Confiança a 95%

MAC *Medium Access Control* (Controlo de Acesso ao Meio)

MIMO *Multiple-Input-Multiple-Output*

MPR *Multipacket Reception* (Receção de Múltiplos Pacotes)

MU-MIMO *Multi-User MIMO*

OSS *Optimal Stopping Strategy* (Estratégia de Paragem Ótima)

PDF *Probability Density Function* (Função densidade de probabilidades)

RTS *Request to Send* (Pedido para Enviar)

SIC *Successive Interference Cancellation*

SINR *Signal-to-Interference-plus-noise-Ratio*

SPR *Single Packet Reception* (Receção Individual de Pacotes)

WLAN *Wireless Local Area Network* (Redes Locais Sem Fios)

Simbologia

α – Variável aleatória que representa a condição de receção

b – Limiar de decisão para condição de receção com sucesso

b' – Limiar de decisão modificado

c – Número total de nós candidatos

C_g – Número médio de nós, pertencentes a um grupo g , com cuja duração seja inferior a τ_{max}

D_1 – Raio genérico de um círculo interior de uma coroa onde os nós se encontram uniformemente distribuídos

D_2 – Raio genérico de um círculo exterior de uma coroa onde os nós se encontram uniformemente distribuídos

D – Raio máximo do círculo onde os nós se distribuem uniformemente

δ – Componente de ruído no canal

e – Número de Neper

F_p – Número aleatório entre 0 e 1, escolhido de acordo com uma distribuição uniforme

$f_\alpha(t)$ – Função característica da variável α

$F_{P_i}(x)$ – Função densidade cumulativa da variável aleatória P_i

$f_{P_i}(x)$ – Função densidade de probabilidades da variável aleatória P_i

Λ – Soma de todas as potências recebidas pelo recetor adicionadas da componente de ruído

γ – Parâmetro regulável entre 0 e 1

γ_i – Potência do i – ésimo que define *Signal-to-Interface-Plus-Noise-Ratio*

h_i – Coeficiente do canal entre o i – ésimo nó e o recetor
 j – Unidade imaginária
 K – Número de nós a enviar pedidos de transmissão
 k – Número de nós a transmitir num *slot*
 l – Comprimento de um pacote
 L – Variável aleatória do comprimento do pacote
 M – Capacidade de receção de transmissões em simultâneo
 $M_{[X]}(t)$ - Função Geradora de momentos para a variável $[X]$
 η – Coeficiente de perdas de propagação
 n – Número de nós a iniciar transmissão
 N_g – Número de nós pertencentes ao grupo g
 N_{T_x} – Número de transmissões iniciadas e transmitidas em simultâneo
 N_0 – Componente de ruído no recetor
 P_{Ti} – Potência de transmissão do i – ésimo nó
 P_r – Probabilidade de receção
 p – Probabilidade de acesso a um dos *slots* da fase de negociação
 p_t – Probabilidade de um nó iniciar transmissão à segunda oportunidade
 p_s – Probabilidade receção com sucesso
 P_i – Potência recebida no recetor por parte do i – ésimo
 $P_R\{x\}$ – Probabilidade do evento x
 R_{T_x} – Número de transmissões esperadas a serem recebidas com sucesso
 r_g – Ritmo de transmissão dos nós que pertencem a um grupo g
 s – Vetor de transmissão
 T_{ACK} – Tempo de pacote de *Acknowledgement*
 T_{CTS} – Tempo de pacote *Clear-to-Send*
 T_x – Tempo de transmissão na fase de transmissão
 τ – Variável aleatória de duração de transmissão
 τ_{max} – Máxima duração de transmissão
 τ_i – Duração de transmissão do i – ésimo nó

X – Variável aleatória representante da distância entre o nó recetor e o nó emissor

X_i – Variável aleatória representante do número de nós vencedores em cada ronda de contenção i

x_i – Número de nós vencedores em cada ronda de contenção i

ω – Número de *slots* disponíveis numa fase de negociação

y – Vetor de receção

Z – Variável aleatória representante da potência



Introdução

1.1 Introdução

A comunicação entre dispositivos tem sofrido uma grande evolução ao longo dos anos, procurando acompanhar as necessidades dos utilizadores, alcançando melhores desempenhos e tornando os sistemas de comunicações mais eficazes. O aumento do número de dispositivos e as desvantagens óbvias da utilização de cabos têm acelerado o desenvolvimento das redes sem fios.

Um dos pontos mais desafiantes deste tipo de redes consiste no controlo de acesso ao meio dos dispositivos que pretendem transmitir. Um dos desafios mais recentes consiste em permitir várias receções em simultâneo, possibilitado por várias técnicas desenvolvidas no nível físico. Aos sistemas que permitem várias receções em simultâneo dá-se o nome de sistemas de Receção de Múltiplos Pacotes (*Multipacket Reception*) (MPR). Nos últimos anos, várias técnicas MPR têm sido aplicadas em sistemas infraestruturados, os quais permitem um controlo de acesso ao meio através de uma filosofia centralizada. Apesar disto, estas técnicas de transmissão são também vantajosas em sistemas não infraestruturados. Nestes casos, é também necessário um controlo de acesso ao meio realizado de uma forma descentralizada. Nesta dissertação pretende-se caracterizar o desempenho destas técnicas.

Algumas das técnicas MPR de maior relevância são o caso da técnica *Code Division Multiple Access* (CDMA), *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access* (OFDMA), *Successive Interference Cancellation* (SIC) e *Multi-User Multiple-Input-Multiple-Output* (MU-MIMO). Todas estas técnicas possuem a capacidade de decodificar múltiplos pacotes em simultâneo por parte do recetor [GVS89]. A técnica CDMA permite que existam várias transmissões em simultâneo no mesmo canal através de um esquema de codificação ortogonal em que é atribuído um código a cada transmissão [HAP97]. Estes códigos são usados para identificar cada uma das transmissões. Na receção, é aplicada uma correlação do sinal recebido com o código utilizado na transmissão. Se esta correlação for alta, então é possível fazer a decodificação da transmissão, sendo a mesma recebida com sucesso. Neste caso, o número de transmissões em simultâneo recebidas com sucesso depende do número de códigos atribuídos.

No caso da técnica OFDMA, esta é usada para permitir múltiplas transmissões no mesmo canal e consiste na atribuição de diferentes portadoras aos diferentes nós transmissores [PAY04]. Esta técnica tem sido bastante utilizada em sistemas *Multiple-Input-Multiple-Output* (MIMO), sistema que consiste na transmissão e na receção de vários sinais de dados no mesmo canal de rádio.

No caso da técnica SIC, os sinais são processados de forma iterativa, como o próprio nome indica. Nesta técnica os sinais que são descodificados são subtraídos do sinal codificado recebido inicialmente, e só em seguida é descodificada a próxima transmissão [WAY2007]. Este procedimento é realizado sequencialmente, necessitando por vezes que existam retransmissões para descodificar os sinais que não são recebidos com sucesso.

Recentemente, foi também introduzida a técnica *Multi-User Multiple-Input-Multiple-Output*, ou simplesmente MU-MIMO [ERF12]. Com esta técnica é também possível a receção de múltiplas receções em simultâneo. Através das múltiplas antenas de receção e deteção dos utilizadores envolvidos na transmissão, é possível ao nó recetor fazer a deteção das múltiplas transmissões que foram efetuadas em simultâneo.

Algo comum a estas técnicas é o facto de permitirem que se atinjam melhores débitos que as técnicas antecessoras em que apenas se considera possível a receção de uma única receção de cada vez. Além disto, devido à massificação de dispositivos móveis, torna-se necessária a implementação de sistemas que permitam a receção com sucesso de múltiplas receções em simultâneo.

1.2. Motivação

Apesar do desenvolvimento que se tem feito no âmbito dos sistemas MPR, a aplicação destes trabalhos tem sido feita essencialmente ao nível da deteção dos múltiplos sinais transmitidos simultaneamente. Nas técnicas descritas anteriormente, apesar de ser possível a deteção e receção de múltiplas transmissões em simultâneo, os protocolos de acesso ao meio continuam com os pressupostos originais, admitindo apenas receções individuais.

Uma vez que as capacidades dos sistemas MPR ainda não estão aproveitadas de uma forma eficaz, torna-se necessário desenvolver novos protocolos e novas técnicas de acesso ao meio. Pretendem-se desenvolver técnicas de controlo distribuído em redes não infraestruturadas, podendo-se fazer o controlo de várias transmissões em paralelo, garantido desta forma um acesso ao meio controlado, o qual permite um aproveitamento mais eficaz das capacidades dos sistemas de receção de múltiplos pacotes.

1.3. Objetivos e contribuições

Sabendo que o sucesso de uma transmissão não pode ser dissociado das condições físicas do canal de transmissão sem fios, um dos aspetos mais importantes que se deve ter em conta são os efeitos de propagação do sinal. Uma vez que um sinal é atenuado ao longo do canal devido às diferentes características do meio, a potência do sinal recebido varia temporalmente. Este facto tem grande influência no sucesso da receção. Pretende-se com esta dissertação realizar um estudo sobre a

influência dos efeitos de propagação, de forma a poder analisar o desempenho de um sistema de receção de múltiplos pacotes. Desta forma, será possível caracterizar um sistema genérico MPR, conseguindo modelar o número de transmissões recebidas com sucesso e, tendo em conta o número de transmissões efetuadas, propondo também um modelo para a probabilidade de sucesso de cada receção. Para tal, são propostos modelos teóricos que serão validados através de simulações, permitindo uma caracterização do desempenho do nível físico.

O segundo objetivo desta dissertação consiste em realizar um estudo sobre a influência que a posição relativa entre os nós transmissores e o nó recetor tem no número de nós recebidos com sucesso. Pretende-se desta forma considerar várias distâncias a que os nós se encontram do recetor, investigando para cada uma delas o número de transmissões recebidas com sucesso. Assim é possível caracterizar a influência da distância no número de receções com sucesso e verificar se é possível permitir um acesso ao meio a um grupo de nós que, dada a sua distância ao recetor, permita obter melhores débitos.

Pretende-se também com esta dissertação fazer uma avaliação comparativa entre vários protocolos MAC já propostos, para sistemas MPR sem coordenação centralizada, nomeadamente ao nível do débito atingindo por cada um deles. Para atingir o objetivo pretendido, considera-se o modelo do nível físico proposto e realizam-se simulações para verificar os débitos atingidos por cada protocolo. Além disto, pretende-se verificar as características mais relevantes e que permitem aos protocolos atingir melhores ou piores desempenhos, identificando quais as características que se deverão ter em conta para o desenvolvimento de protocolos de acesso ao meio.

Por fim, são propostos dois protocolos de acesso ao meio que permitem um controlo de acesso ao meio com suporte para múltiplas transmissões em simultâneo, pretendendo aproveitar de uma forma mais eficaz as capacidades dos sistemas MPR distribuídos, proporcionando melhores desempenhos para este tipo de sistemas. O primeiro protocolo consiste em fazer um controlo das potências de transmissão de uma forma distribuída. No segundo não é utilizado controlo de potência. É considerado um controlo das probabilidades de acesso tendo em conta a distância a que os nós se encontram do nó recetor. Pretende-se desta forma evitar que exista uma grande discrepância entre as potências recebidas e verificando se existem nós que, dada a sua posição relativamente ao recetor, contribuam para o aumento do desempenho dos sistemas MPR e aumentando também o débito atingido pelos mesmos.

O trabalho realizado nesta dissertação contribui desta forma para o estado da arte dos sistemas MPR, realizando-se a validação de um modelo genérico com suporte para múltiplas receções em simultâneo considerando um canal do tipo *flat fading* onde se considera a existência de desvanecimento rápido e lento, e também a existência de perdas de propagação. É também realizada a validação, através de simulações, do modelo de caracterização da probabilidade individual de receção com sucesso. Contribui-se também com uma análise da influência da distância, entre os nós transmissores e o nó recetor, no número de transmissões recebidas com sucesso.

Este modelo de nível físico estudado e caracterizado nesta dissertação no capítulo 3 é depois utilizado na realização de uma análise de desempenho de vários protocolos MAC distribuídos, entre os quais se fez a implementação e respetivas simulações de dois protocolos proposto em [JL11] e [JKL12]. É feita em seguida uma análise comparativa dos diferentes protocolos distribuídos de controlo de acesso ao meio, utilizando o modelo MPR proposto e validado previamente.

Por fim, esta dissertação contribui com a proposta de dois novos protocolos MAC para sistemas MPR distribuídos e posterior caracterização do seu desempenho, tendo em conta a distribuição espacial dos nós.

1.4. Estrutura da Dissertação

Dividida em seis capítulos, esta tese inicia-se fazendo uma introdução e descrição dos objetivos que se pretendem atingir e as contribuições deste trabalho. No capítulo 2 é feita a descrição de alguns protocolos MAC que suportam múltiplas receções em simultâneo de forma a mostrar algum do trabalho realizado no controlo do acesso ao meio. A caracterização da receção de múltiplos pacotes tendo conta os efeitos de propagação no nível físico, assim como a caracterização da probabilidade de receção individual com sucesso e o estudo sobre a influência da distância, entre os nós emissores e os nós recetores, no número de transmissões recebidas com sucesso, simultaneamente, é feita no capítulo 3. No capítulo seguinte é realizada uma análise comparativa entre cinco protocolos de controlo de acesso ao meio onde se assume o nível físico do tipo MPR. Nesta análise é feita uma comparação relativamente ao débito atingido por cada um, mostrando também diferentes características e abordagens tomadas para o suporte de múltiplas receções em simultâneo. No capítulo 5 são propostos dois protocolos MAC, tendo em conta a distribuição espacial dos nós em que num dos protocolos é feito um controlo das potências de transmissão e noutro é feito um controlo das probabilidades de acesso. Introduce-se assim um controlo de acesso ao meio que permite aproveitar e revelar as verdadeiras capacidades de um sistema MPR. Em modo de conclusão, enumeram-se as considerações finais e propostas para trabalho futuro no capítulo 6, o qual finaliza esta dissertação.



Trabalho Relacionado

Nos últimos anos, de forma a poder responder à elevada quantidade de dispositivos móveis e de redes sem fios, têm-se explorado sistemas de receção de múltiplos pacotes, permitindo um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis [SWGLA10]. De forma a tornar isto possível, é necessário que se realizem modificações nas técnicas existentes, de modo a permitir a existência de múltiplas transmissões em simultâneo.

Um dos principais desafios dos sistemas MPR consiste no desenho das técnicas de controlo de acesso ao meio, principalmente para redes não infraestruturadas, dada a sua natureza distribuída dos algoritmos que nela são executados.

Desta forma, este capítulo descreve três protocolos MAC com suporte para múltiplas receções em simultâneo, mostrando-se diferentes soluções e diferentes desempenhos para o controlo de acesso ao meio deste tipo de redes.

2.1. Opportunistic MAC Protocol

Nos protocolos que se encontram atualmente implementados, muitos deles fazem o controlo de acesso ao meio através de duas fases: uma fase de negociação e uma fase de transmissão. Na fase de negociação os nós que pretendem transmitir enviam pedidos ao nó recetor através do envio de pacotes de Pedido para transmissão (*Request To Send*) (RTS). Terminando esta fase, é enviado pelo recetor um pacote, que todos os nós irão receber, indicando os nós que receberam autorização para iniciar transmissão. Este pacote é designado de Permissão Para Transmitir (*Clear To Send*) (CTS). Inicia-se em seguida a fase de transmissão. Nesta fase, apenas os nós que receberam aprovação para transmitir (designados de nós vencedores), iniciam a transmissão da sua trama de dados. No caso de o recetor suportar receção de múltiplas transmissões em simultâneo, então na fase de transmissão todos os nós vencedores irão transmitir simultaneamente, acabando esta fase apenas quando a duração da transmissão de maior duração acabar. Terminada esta ronda, inicia-se uma nova fase de negociação e repete-se o ciclo.

Admitindo que os nós enviam tramas com tamanhos diferentes, e admitindo que o recetor consegue receber M receções em simultâneo, se, por exemplo, estiverem a decorrer M transmissões, então quando uma delas acabar continuarão a decorrer $M - 1$ transmissões. Quando a seguinte transmissão terminar, continuam a decorrer $M - 2$ transmissões, etc. Admitindo que o recetor apenas é capaz de receber M transmissões em simultâneo, e sabendo que uma nova fase só se inicia quando a transmissão mais longa terminar, então, assim que um nó acabar de transmitir, existe uma vaga que pode ser aproveitada por outro nó transmissor. Pode-se desta forma estar sempre a aproveitar o facto de o recetor poder receber em paralelo M transmissões. Como isto não sucede, então estão-se a desperdiçar as capacidades de um sistema que permite receber múltiplas receções em simultâneo. De forma a contrariar isto, Jung *et al.* propõe em [JL11] um protocolo que permite realizar um aproveitamento mais eficiente do canal, atribuindo uma nova oportunidade de transmissão a outros nós que não tenham ganho o acesso na fase de negociação, preenchendo assim as vagas disponíveis no canal e tirando o máximo rendimento do mesmo.

Assume-se neste protocolo a existência de um recetor com M antenas, capaz de receber M sinais em simultâneo, e emissores com apenas uma antena. Represente-se o sinal recebido pelo recetor, composto pelas emissões de N nós, por

$$y = Hs + \delta, \quad (2.1)$$

onde $s = [s_1, s_2, \dots, s_N]^T$ e $y = [y_1, y_2, \dots, y_M]^T$ representam os vetores de transmissão e receção, respetivamente, δ representa o ruído do canal e H pode ser escrito como

$$H = [h_1, h_2, \dots, h_N], \quad (2.2)$$

onde $h_i = [h_{1i}, h_{2i}, \dots, h_{Mi}]^T$ representa os coeficientes do canal entre o i -ésimo nó e o recetor com M antenas.

De forma a dar oportunidade aos nós que não conseguiram ganhar acesso ao canal, Jung *et al.* dividiu este protocolo em quatro etapas:

- 1) Numa primeira fase os nós que pretendem transmitir observam o canal de transmissão e iniciam um contador de contenção conforme especificado na norma IEEE 802.11n *Distributed Coordination Function* (DCF). Desta forma, cada nó atrasa a transmissão por um tempo aleatório. O nó com menor tempo de contenção iniciará assim o processo de transmissão através do envio de um pacote RTS. Defina-se por K o número de nós que enviam pacotes de RTS em simultâneo.
- 2) Recebendo os K pacotes RTS, o recetor calcula o número de vagas disponível no canal através de $(M - K)$, em que M representa o limite de transmissões em simultâneo que o recetor consegue receber com sucesso. Em seguida é enviado um pacote CTS informando quais os nós vencedores e o número de vagas que existe no canal.
- 3) Aquando da receção do pacote CTS, o grupo de nós vencedores inicia a transmissão de dados. Ao mesmo tempo, os outros nós candidatos (que não estão no grupo vencedor) podem também começar a transmitir com uma probabilidade p_t caso a duração das suas transmissões não seja superior à duração da transmissão mais longa (denominada τ_{max}) do grupo de nós vencedores:

$$\tau_{max} = \max_{i \in k}(\tau_i), \quad (2.3)$$

onde τ_i representa a duração de transmissão do i – ésimo nó.

$$\tau_i < \tau_{max}$$

- 4) Uma vez terminadas todas as transmissões, é devolvido pelo recetor um pacote de confirmação (*Acknowledge*) (ACK) informando assim os nós envolvidos que as suas transmissões foram recebidas com sucesso.

Na figura 2.1 é mostrado um exemplo de operação proposto. Neste caso, assume-se $M = 2$. O primeiro nó a transmitir, designado por $Tx1$, envia um pacote RTS na primeira oportunidade de transmissão. Uma vez recebido o pacote CTS enviado pelo nó recetor (na figura designado por AP), o nó $Tx3$ decide iniciar também a sua transmissão, sem enviar pacote RTS. Ficam assim os dois nós a transmitir simultaneamente, aproveitando o facto de se suportarem duas receções em simultâneo neste sistema.

No caso de existirem colisões, neste protocolo é usado o mesmo método de contenção detalhado no protocolo IEEE 802.11 DCF, em que o nó aguarda uma janela de contenção e repete posteriormente a transmissão.

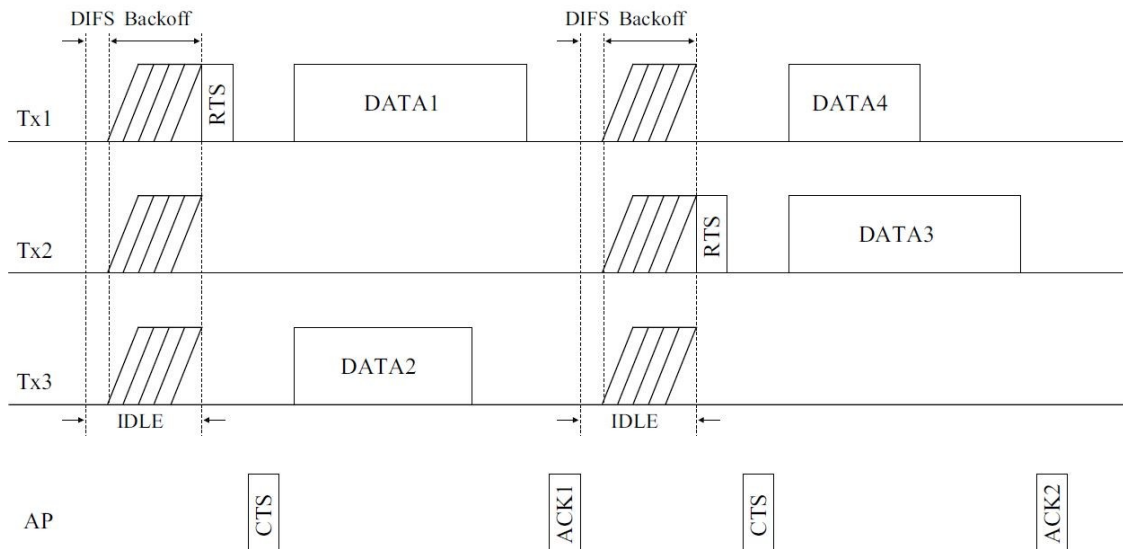


Figura 2.1 – Exemplo de operação proposto [JL11].

2.1.1. Definição da probabilidade p_t

Para definir a probabilidade de transmissão p_t , Jung, *et al.* consideram que o tamanho dos pacotes assume uma distribuição geométrica, com média de $1/q$ e com uma probabilidade

$$P_R\{L \leq l\} = 1 - (1 - q)^l, \quad (2.4)$$

onde L é a variável aleatória do comprimento do pacote, l é o comprimento do pacote e q o parâmetro da distribuição geométrica. A função da distribuição da duração de transmissão τ é dada por

$$P_R\{t \leq \tau\} = P_R\{L \leq r_g \tau\} = 1 - (1 - q)^{r_g \tau}. \quad (2.5)$$

Nesta equação, r_g é o ritmo de transmissão dos nós que pertencem ao grupo $g \in G$, onde G é o conjunto de grupos criados de acordo com os ritmos de transmissão de cada nó. O número esperado de nós com duração de transmissão inferior a τ_{max} de um dado grupo $g \in G$ é assim dado por

$$C_g = N_g(1 - (1 - q)^{r_g \tau}), \quad (2.6)$$

onde N_g é o número de nós pertencentes ao grupo $g \in G$. Assim, o número de total de nós candidatos (c) é dado pela soma de todos os nós de todos os grupos (em que cada grupo possui ritmos de transmissão diferentes) cujo tempo de transmissão seja inferior a τ_{max} , ou seja:

$$c = \sum_{g \in G} C_g. \quad (2.7)$$

Uma vez sabendo o número total de nós candidatos, é possível calcular p_t através de

$$p_t = \begin{cases} \frac{\gamma(M-K)}{c}, & K < M \\ 0, & K \geq M \end{cases}, \quad (2.8)$$

em que γ é parâmetro regulável com valores entre 0 e 1. Ajustando γ para valores próximos de 1, os nós candidatos transmitem de uma forma agressiva, o que poderá levar a que existam demasiadas colisões uma vez que se preenchem rapidamente as $M - K$ vagas disponíveis. Pelo contrário, se γ for ajustado para um valor muito baixo, os nós vão conter-se demasiado e o canal irá estar subaproveitado. De notar que existe aqui um compromisso entre a ocupação do canal e a ocorrência de colisões.

Baseando-se neste valor de p_t , os nós candidatos decidem ou não transmitir os seus pacotes de acordo com esta probabilidade. Note-se que enquanto os nós vencedores iniciam imediatamente a transmissão de dados, os nós candidatos apenas são autorizados a transmitir com probabilidade p_t , valor que é difundido no pacote CTS enviado pelo recetor.

2.2. Asynchronous MAC Protocol

De forma semelhante ao protocolo anterior, considerando uma fase de negociação e uma fase de transmissão, os mesmos autores propõem em [JKL12] um novo protocolo, para sistemas de redes locais sem fios (*Wireless Local Area Network*) (WLAN). Este trabalho [JKL12] considera um recetor com capacidade MPR (utilizando a técnica MU-MIMO), de forma a dar uma oportunidade de transmissão aos nós que não conseguiram efetuar o seu pedido com sucesso na fase de negociação. Contudo, este retira a restrição da máxima duração permitida em cada ronda de comunicação. Ou seja, em vez de se dar oportunidade apenas aos nós cuja duração de transmissão termine antes da máxima duração do grupo de nós vencedores, agora todos os nós são nós candidatos, independentemente da duração da sua transmissão. Contudo, os nós transmitem apenas com uma determinada probabilidade e desde que existam vagas no canal para se realizar tal transmissão. É assim proposto um protocolo de controlo acesso ao meio assíncrono, permitindo aos nós iniciarem uma nova transmissão assincronamente sempre que o recetor informe que existem vagas disponíveis no canal.

À semelhança do assumido em [JL11], considera-se que existe um recetor localizado no centro da rede e os nós transmissores se encontram à sua volta, uniformemente distribuídos. Assume-se

também que todos os nós possuem sempre pacotes para transmitir e que o tamanho dos mesmos se rege por uma distribuição geométrica. Considera-se que o recetor tem M antenas e cada emissor possui apenas uma. O sinal recebido, composto pelas N transmissões, pode ser descrito por

$$y = Hs + \omega, \quad (2.9)$$

onde $s = [s_1, s_2, \dots, s_N]^T$ e $y = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T$ representam os vetores de transmissão e receção, respetivamente, ω representa o ruído do canal e H pode ser escrito como

$$H = \begin{pmatrix} h_{1,1} & \cdots & h_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M,1} & \cdots & h_{M,N} \end{pmatrix}, \quad (2.10)$$

onde $h_{m,n}$ representa o coeficiente do canal entre o n – ésimo nó e a m – ésima antena recetora.

De forma a fazer o melhor aproveitamento possível do canal, considera-se neste protocolo a existência de um canal de *feedback* separado de forma a permitir que o recetor informe quando as transmissões são recebidas com sucesso e o número de vagas existentes no canal. Desta forma, assim que um nó acabar a sua transmissão, rapidamente os nós que pretendem transmitir sabem que existe uma vaga disponível, podendo iniciar a sua transmissão com uma dada probabilidade.

O procedimento proposto é o seguinte:

- 1) Quando os nós verificam que o canal está livre, é iniciada uma janela de contenção de acordo com o protocolo IEEE 802.11 DCF. O nó com a menor janela inicia a sua transmissão.
- 2) Uma vez recebido o RTS desse pacote, o recetor transmite um pacote CTS, informando o nó que deve iniciar a transmissão e informando também os restantes nós candidatos relativamente ao número de vagas disponíveis no canal.
- 3) Os nós candidatos calculam assim uma probabilidade p_t de acordo com as informações do canal e o número de nós que estão a competir pelas vagas existentes. Os nós decidem posteriormente se devem ou não transmitir com a probabilidade p_t .
- 4) Uma vez recebida uma das transmissões paralelas que estejam a decorrer, o recetor envia imediatamente um pacote de *Acknowledge*, atualizando também o novo número de vagas disponível no canal.
- 5) Recebendo este pacote, os nós calculam um novo p_t de acordo com o novo número de vagas e decidem novamente se transmitem ou não de acordo com essa probabilidade, sem esperar que as transmissões que estejam a decorrer acabem.

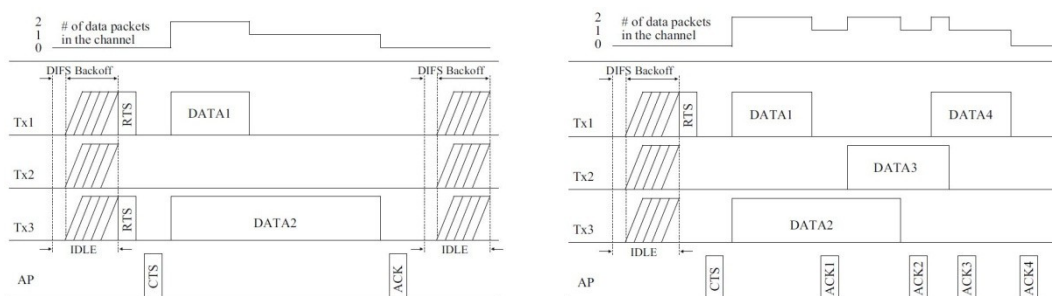


Figura 2.2 – Exemplo de operação proposto (a) MAC síncrono [JKL12]; (b) MAC assíncrono [JKL12].

Na figura 2.2 pode-se observar o funcionamento do protocolo proposto. Em 2.2 (a), mostra-se a operação de um protocolo de acesso ao meio síncrono. Admitindo que $M = 2$, e que $Tx1$ e $Tx3$ escolheram o mesmo tempo que contenção, então ambos enviam o pacote RTS em simultâneo. Recebendo o pacote CTS, ambos iniciam a transmissão, também em simultâneo. Como se pode observar, a duração da transmissão de $Tx1$ é bastante inferior à de $Tx3$. Assim, o nó $Tx2$ terá de esperar que $Tx3$ termine para poder enviar o seu pedido ao recetor, mesmo sabendo que são suportadas duas transmissões em simultâneo. Isto demonstra a ineficiência que existe neste protocolo síncrono.

Utilizando o protocolo proposto em [JKL12], é exemplificado na figura 2.2 (b) que se consegue fazer um aproveitamento mais eficaz. Sempre que existam vagas para transmissão, os nós podem começar a transmitir de uma forma assíncrona, evitando ter de esperar que os nós com maior duração de transmissão acabem. No exemplo, $Tx1$ inicia a transmissão na primeira oportunidade através do envio do pacote RTS. $Tx3$ inicia imediatamente a seguir a sua transmissão visto existir uma vaga. Logo que $Tx1$ acabe de transmitir, é transmitido um pacote de *Acknowledgment* e os nós ficam informados da existência de uma nova vaga. Desta forma, $Tx2$ inicia a sua transmissão assincronamente, e $Tx1$ volta novamente a aceder assim que $Tx3$ acabe.

2.2.1. Definição da probabilidade p_t

Como referido anteriormente, a probabilidade dos nós transmitirem, p_t , é atualizada consoante as condições de utilização do canal. Definindo a capacidade de receção do canal como M , sabe-se que num dado instante existem disponíveis $(M - K)$ vagas no canal, em que K representa o número de transmissões que estejam a decorrer no canal. Neste caso se existirem mais que $(M - K)$ nós candidatos a tentar, então todos eles irão colidir. Contudo, se o número de nós a tentar transmitir for muito inferior ao número de vagas disponíveis então não se está a explorar ao máximo as capacidades da técnica MPR. Desta forma, o número de nós que pretendem iniciar transmissão deve aproximar-se do número de vagas do canal. A probabilidade p_t é definida como

$$p_t = \begin{cases} (M - K)/(N - K), & K < M \\ 0, & K \geq M \end{cases} \quad (2.11)$$

Com esta probabilidade calculada e atualizada consoante o estado do canal, os nós decidem de uma forma eficiente se transmitem ou não a sua trama de dados.

2.3. Multi-Round Contention Random-Access

Nesta secção é apresentado um protocolo proposto por Zhang, *et al.* em [ZHA10], para WLAN com K nós transmissores e um nó recetor com capacidade para receber M transmissões em simultâneo. Neste protocolo apesar da ronda de comunicação se compor por uma fase de negociação e uma fase de transmissão, é proposta uma abordagem diferente para a receção dos pacotes RTS dos nós que pretendem transmitir. Nos protocolos descritos anteriormente, a duração da fase de negociação é fixa, ou seja, existe um número fixo de *slots* onde os nós podem enviar os seus pacotes RTS. Contrariamente, aqui é estudado o tempo de paragem ótimo na fase de negociação, *i.e.*, o número

ótimo de *slots* RTS que o recetor aguarda até enviar o pacote CTS. Deste modo, as rondas de comunicação não tem uma duração fixa uma vez que a fase de negociação tem uma duração determinada pela chamada Estratégia de Paragem Ótima (*Optimal Stopping Strategy*) (OSS).

Baseando-se nos métodos de contenção considerado na norma IEEE 802.11, o acesso ao canal é feito através do mecanismo de RTS/CTS em que os nós que pretendem transmitir aguardam um tempo de contenção antes de iniciarem a sua transmissão. Para este protocolo, considera-se que os nós candidatos enviam pacotes RTS com uma probabilidade p_t .

Neste protocolo são permitidas $0 \leq X_i \leq M$ transmissões em simultâneo, onde X_i representa o número de nós vencedores em cada ronda de contenção, em que i representa o número da ronda de contenção. Assim, para cada ronda $i = 1, 2, \dots, n$, em que n é a última ronda de contenção (valor este definido pela OSS), existem x_i nós vencedores. Quando a contenção terminar, os nós vencedores de cada ronda de contenção, ou seja, os $\sum_{i=1}^n x_i$ nós, podem iniciar transmissão. Todos os nós iniciam transmissão no caso de $\sum_{i=1}^n x_i \leq M$ visto que só podem existir M transmissões em paralelo. Se na fase de negociação existirem mais que M nós, então são seleccionados aleatoriamente M para iniciar a transmissão.

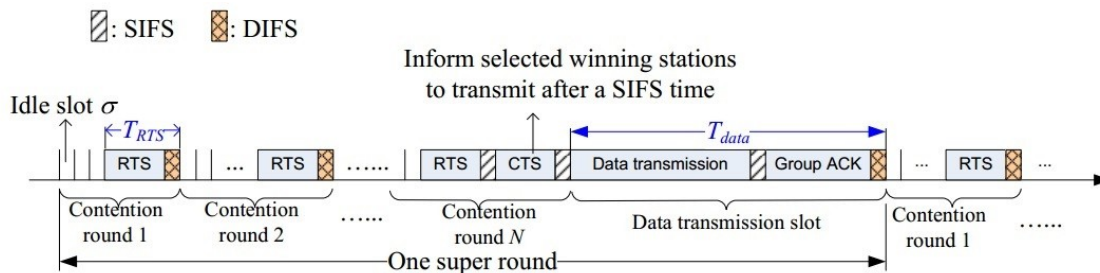


Figura 2.3 – Contenção multi-ronda para a norma IEEE 802.11 proposto em [ZHA10].

Na figura 2.3 é ilustrada uma ronda de comunicação para o protocolo proposto. Quando existe um grande número de nós candidatos, K , então assume-se que o número de transmissões existentes num *slot* genérico segue uma distribuição de Poisson com o parâmetro $\lambda = p_t \cdot K$. Ou seja, a probabilidade de ter k nós a transmitir num dado *slot* é dada por

$$P_R\{k\} = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}. \quad (2.12)$$

Se não existirem mais de M nós a transmitir simultaneamente, então todos esses nós são marcados como nós vencedores. Caso contrário considera-se que houve colisão e todas as transmissões são descartadas. Desta forma, o número de nós vencedores por cada ronda de contenção, X_i , segue a distribuição

$$P_R\{X_i = k\} = \begin{cases} \frac{\lambda^k}{k!(e^\lambda - 1)} & 1 \leq k \leq M \\ \sum_{n=M+1}^{\infty} \frac{\lambda^n}{n!(e^\lambda - 1)} & k = 0 \\ 0 & k > M \end{cases} \quad (2.13)$$

Desta forma, o número esperado de nós vencedores por ronda de contenção é dado por

$$E[X] = \frac{\lambda}{(1-e^{-\lambda})} \sum_{k=0}^{M-1} \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}. \quad (2.14)$$

Observado o resultado da contenção por parte do nó recetor, este decide se se deve ou não terminar a ronda de contenção de acordo com a OSS. Se decidir terminar a ronda, então se o número de nós vencedores for inferior a M todos irão ser seleccionados para transmitir. No caso de ser superior a M então serão escolhidos aleatoriamente M nós, do conjunto de nós vencedores. A decisão dos nós que foram seleccionados para transmitir é transmitida através do pacote CTS.

Receção de Múltiplos Pacotes

Neste capítulo é apresentado um modelo de um nível físico com suporte para múltiplas receções em simultâneo. Para tal são considerados vários efeitos de propagação, propondo modelos teóricos para cada um e validando os mesmos através de simulações utilizando [MAT12], sendo este software usado para todas as simulações. Desta forma é possível caracterizar o nível físico para posterior aplicação e avaliação dos protocolos de controlo de acesso ao meio analisados no capítulo 4.

É também realizado neste capítulo um estudo sobre a influência da localização relativa dos nós relativamente ao recetor no número de nós que são recebidos com sucesso, verificando-se se existe um grupo de nós que, dada a sua posição permitem obter um melhor desempenho do sistema.

3.1. Condição de receção

Considere-se uma topologia constituída por um nó recetor, capaz de receber múltiplos pacotes em simultâneo, transmitidos por n nós que se distribuem uniformemente em seu redor numa área circular máxima de raio D , em que D adota unidades genéricas de distância.

Assume-se que a receção de pacotes em MPR é feita com sucesso se a potência que define o *Signal-to-Interference-plus-noise-ratio* (SINR) recebido for superior a um determinado limiar de decisão (usualmente designado por b), como assumido em [NEW06]. Uma vez que a condição de receção com sucesso depende da potência recebida de cada nó transmissor, os efeitos de propagação que condicionam a potência do sinal transmitido devem ser considerados na análise da técnica MPR. Os efeitos de propagação considerados nesta dissertação são:

- **Desvanecimento lento:** Nesta situação, o sinal sofre uma variação de amplitude com a duração de múltiplos símbolos;
- **Desvanecimento rápido:** Contrariamente ao efeito anterior, nesta situação o sinal recebido sofre uma rápida variação de amplitude com duração inferior ao período de um símbolo;
- **Perdas de propagação:** Neste caso, a atenuação na potência do sinal é função da distância entre as antenas de transmissão e de receção, de um fator de atenuação (coeficiente de perdas de propagação), dos ganhos das antenas e da frequência de transmissão.

Utilizando estes efeitos de propagação, consegue-se ter vários cenários fazendo com que os valores da potência dos sinais na receção sigam distribuições diferentes consoante a intensidade dos efeitos que ocorrem nos cenários em estudo. Para representar os efeitos de propagação, são utilizadas diferentes distribuições probabilísticas, representando assim o efeito de atenuação. Para o efeito de desvanecimento rápido assumiu-se a distribuição de *Rayleigh*. Para desvanecimento lento seleccionou-se a distribuição de *Log-normal*. Por fim, para representar as perdas de propagação foi utilizada uma distribuição que considera que os nós se distribuem numa dada área de uma forma uniforme e que a sua potência é atenuada de acordo com a distância entre os nós emissores e o nó recetor.

3.2. Probabilidade de Receção Individual

3.2.1. Caracterização teórica do cálculo de p_s

Tendo em conta a existência de N_{max} nós transmissores, admita-se que a potência de receção de cada nó i é dada por P_i . Esta potência recebida varia consoante a distância entre o nó transmissor e o nó recetor de acordo com a distribuição utilizada. Dito isto, considere-se as potências P_i recebidas de cada nó emissor ($i = 1, 2, \dots, N_{max}$) como variáveis aleatórias (VA), independentes e identicamente distribuídas.

Assim, a potência total recebida no recetor, designada por Λ , gerada pelas transmissões dos n nós será definida por

$$\Lambda = \left(\sum_{i=1}^{N_{max}} P_i \right) + N_0, \quad (3.1)$$

em que N_0 é a componente do ruído no recetor.

É importante ter conhecimento sobre as potências dos sinais transmitidos por cada nó, para que posteriormente se verifique a condição de receção com sucesso.

Num recetor com capacidade para múltiplas receções em simultâneo, a condição de receção com sucesso é formada pela observação da relação entre a potência do sinal recebido P_i com as restantes potências recebidas adicionadas do ruído. Esta relação é definida por

$$\gamma_i = \frac{P_i}{\Lambda - P_i}. \quad (3.2)$$

Desta forma, o sinal do nó i é recebido com sucesso se a relação anterior for superior ao limiar de decisão, definido por b [Cov72],[NEW06]. A condição de receção com sucesso é assim dada por

$$\gamma_i > b, \quad (3.3)$$

que por sua vez resulta em

$$\frac{P_i}{\Lambda - P_i} > b. \quad (3.4)$$

Ou seja,

$$P_i > \frac{b}{b+1} \Lambda. \quad (3.5)$$

Considerando

$$b' = \frac{b}{b+1}, \quad (3.6)$$

a condição de recepção com sucesso é finalmente definida de uma forma geral através de

$$P_i > b' \Lambda. \quad (3.7)$$

O limiar b é um parâmetro determinado por diversos fatores, como o tipo de modulação e sensibilidade do recetor. Tipicamente em sistemas SPR, b assume valores entre $1 < b < 10$ e em sistemas MPR os valores são de b são dados por $b < 1$ [HAL97]. Em sistemas CDMA, quando b é muito próximo de zero, significa que o fator de espalhamento é muito elevado. Isto denota um número elevado de *chips* por símbolo, permitindo a existência de mais códigos ortogonais e, por consequência, mais nós transmissores a comunicarem em simultâneo. Analogamente, um valor b elevado representa um sistema CDMA com um fator de espalhamento reduzido.

Sabendo a condição de recepção com sucesso, a probabilidade de recepção com sucesso de um nó é dada por

$$p_s = P_R\{P_i > b' \Lambda\}, \quad (3.8)$$

então

$$\begin{aligned} p_s &= 1 - P_R\{P_i \leq b' \Lambda\} \\ &= 1 - P_R\{P_i - b' \Lambda \leq 0\}. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Para resolver a equação anterior considere-se P_i como uma VA e defina-se a mesma de acordo com a função de densidade de probabilidades (*Probability Density Function*) (PDF) de uma dada distribuição em função da distância, designada de $f_{P_i}(x)$. A esta PDF encontra-se associada uma função de densidade cumulativa (*Cumulative Density Function*) (CDF) ($F_{P_i}(x)$) através da relação:

$$f_{P_i}(x) = \frac{d}{dx} (F_{P_i}(x)). \quad (3.10)$$

Uma vez que p_s depende das variáveis aleatórias P_i e Λ , define-se esta probabilidade através do desenvolvimento da Função Geradora de Momentos (*Moment-Generating Function*) (MGF) de cada variável aleatória. Desta forma, a MGF da VA P_i é dada por

$$M_{P_i}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} [e^{tx} f_{P_i}(x)] dx \quad (3.11)$$

Relativamente à VA Λ , se se desprezar o efeito de N_0 pode-se admitir sem perda de generalidade que

$$\Lambda \approx \left(\sum_{i=1}^{N_{max}} P_i \right). \quad (3.12)$$

A MGF de uma soma de variáveis aleatórias é equivalente à multiplicação dos momentos, ou seja,

$$M_{\Lambda}(t) = M_{P_1}(t) \cdot M_{P_2}(t) \cdot \dots \cdot M_{P_{N_{max}}}(t). \quad (3.13)$$

Uma vez que se assume que as variáveis aleatórias são representadas por VA independentes e identicamente distribuídas, a MGF de Λ é dada por:

$$M_{\Lambda}(t) = [M_{P_i}(t)]^n. \quad (3.14)$$

Assim, admitindo que a condição de recepção com sucesso $P_i - b' \Lambda = \alpha$, então obtém-se a condição:

$$\alpha = \frac{P_i b + P_i - b \Lambda}{b+1} = \frac{P_i}{b+1} - b' \sum_{n=1; n \neq i}^{N_{max}} P_n = \frac{P_i}{b+1} - b' P_{\beta}. \quad (3.15)$$

Onde $P_{\beta} = \sum_{n=1; n \neq i}^{N_{max}} P_n$.

Uma vez definida esta condição, a MGF de α é dada por

$$M_{\alpha}(t) = M_{P_i} \left(\frac{t}{b+1} \right) \cdot M_{P_{\beta}}(-b't). \quad (3.16)$$

Dado que as potências envolvidas no somatório que define P_{β} são independentes entre si, tem-se que

$$M_{\alpha}(t) = M_{P_i} \left(\frac{t}{b+1} \right) \cdot \prod_{j=1; j \neq i}^n M_{P_j}(-b't). \quad (3.17)$$

A função característica da variável α , designada por $\varphi_{\alpha}(t)$, é a função geradora de momentos da mesma variável avaliada no eixo imaginário. Esta função pode ser vista como uma transformada de Fourier da função densidade de probabilidades. Pode-se assim desta forma deduzir a função característica através da transformada de Fourier inversa da PDF da respetiva variável. Desta forma, sabendo que a função geradora de momentos da variável α se encontra relacionada com a respetiva função característica através da expressão

$$\varphi_{\alpha}(t) = M_{j\alpha}(t) = M_{\alpha}(jt), \quad (3.18)$$

em que se considera j como a unidade imaginária, então a função característica da variável α é definida por

$$\varphi_{\alpha}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{jvx} f_{\alpha}(x) dx. \quad (3.19)$$

Desta forma é possível obter a função densidade de probabilidades da variável α , ou seja $f_{\alpha}(x)$, através da inversa da função característica. Isto é,

$$f_{\alpha}(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_{\alpha}(jt) e^{-jxt} dt. \quad (3.20)$$

Uma vez obtida a função $f_{\alpha}(x)$, a probabilidade de recepção com sucesso de uma transmissão, entre N_{max} nós transmissores concorrentes, tendo em conta a distribuição da potência recebida de cada um dos nós, é dada por

$$\begin{aligned} p_S &= 1 - P_R\{\alpha \leq 0\} \\ &= 1 - \int_{-\infty}^0 f_{\alpha}(x) dx \end{aligned} \quad (3.21)$$

3.2.2. Caracterização do número médio de pacotes recebidos

Para calcular o número de transmissões admita-se que inicialmente existem N_{Tx} nós a transmitir em simultâneo, então o número de nós esperados a serem recebidos com sucesso (denominado por R_{Tx}) pelo recetor é dado por

$$R_{Tx} = p_S \cdot N_{Tx}. \quad (3.22)$$

3.2.3. Validação

Para validar o modelo teórico do cálculo da probabilidade p_S consideram-se os três efeitos de propagação descritos no início do capítulo. Considera-se um limiar de decisão fixo para a condição de recepção com sucesso de $b = 0.02$.

De modo a validar o modelo teórico desenvolvido, são realizadas simulações em MATLAB [MAT12]. Para a realização das mesmas, admite-se a existencia de N_{max} nós que iniciam transmissão em simultâneo. Admitindo a existência dos efeitos de propagação considerados, as potências de recepção

de cada um dos nós segue a respetiva distribuição $f_{P_i}(x)$. As potências de recepção são assim representadas através da atribuição de n números aleatórios entre 0 e 1, valor designado por F_p , obtendo em seguida a respetiva potência de recepção através da inversa da CDF da distribuição considerada. Este método é designado de transformação de Smirnov [DEV86]. Obtidas as n potências de recepção, é verificada a condição de sucesso da equação (3.7), verificando-se assim o número de transmissões que foram recebidas com sucesso e obtendo a respetiva probabilidade de recepções com sucesso. Repetindo este processo um milhão de vezes, é possível verificar o número total de transmissões recebidas com sucesso, que, ao dividir pelo número total de transmissões efetuadas permite obter uma probabilidade de recepções recebidas com sucesso. Repetindo o processo descrito anteriormente para vários números de nós, e para os efeitos considerados nesta dissertação, verifica-se se o modelo teórico é validado ou não.

3.2.3.1. Desvanecimento Rápido

A primeira distribuição a ser utilizada representa a presença de desvanecimento rápido no meio de comunicação. Para representar este efeito, considera-se a distribuição de Rayleigh definida pela seguinte PDF,

$$f_{P_i}(x, \sigma) = \frac{x^2}{\sigma^2} e^{-x^2/(2\sigma^2)}. \quad (3.23)$$

A potência é aproximada por uma distribuição exponencial dado que,

$$Rayleigh(X, \sigma^{-1/2}) \approx Exp\left(\frac{X^2}{2}, \sigma\right).$$

Assim, a potência recebida quando existe o efeito de RL é representada pela distribuição exponencial (neste trabalho assume-se $\sigma = 1$). Dessa forma, a distribuição efetivamente utilizada para a representação do desvanecimento rápido é dada por

$$f_{P_i}(x) = e^{-x}. \quad (3.24)$$

Esta tem como CDF a função $F(x)$ apresentada por

$$F_{P_i}(x) = 1 - e^{-x}. \quad (3.25)$$

Para a representação das funções considere-se uma distância máxima de $D = 10$ na qual os N_{max} nós se encontram uniformemente distribuídos. Utilizando em seguida a inversa da CDF multiplicada pelas potências de transmissão de cada nó (P_{Ti}) é possível obter as potências de recepção para a realização de simulações. A potência de recepção de cada nó i é assim definida por

$$P_i = \log\left(\frac{1}{1-F_p}\right) \cdot P_{Ti}. \quad (3.26)$$

onde F_p é um número aleatório entre zero e um, escolhido de acordo com uma distribuição uniforme, e definindo como unitárias as potências de transmissão, P_{Ti} .

Obtidas todas as potências de transmissão, é possível obter o valor de Λ para a condição de sucesso $P_i > b'\Lambda$, em que Λ tem o valor

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n P_i. \quad (3.27)$$

Uma vez que b (e, por consequência, b') é um limiar de decisão constante, a condição $P_i > b'\Lambda$ facilmente se verifica ser verdadeira ou falsa.

Assim sendo, realizando simulações para cada número de nós n , considerando $D = 10$ e $b = 0.02$, é possível determinar o número médio de transmissões recebidas em simultâneo que foram recebidas com sucesso, que ao dividir pelo número total de transmissões efetuadas permite obter a probabilidade (p_s) de recepções com sucesso.

Observe-se na tabela seguinte os valores de p_s obtidos através das simulações e modelo teórico para vários número de nós, assim como o intervalo de confiança (IC) das simulações com um índice de confiança de 95%.

n	p_s teórico	p_s simulação	IC
5	0.9213	0.9235	[0.9225 ; 0.9245]
10	0.8442	0.8370	[0.8360 ; 0.8379]
15	0.7615	0.7576	[0.7568 ; 0.7585]
20	0.6723	0.6862	[0.6854 ; 0.6869]
25	0.6178	0.6221	[0.6214 ; 0.6228]
30	0.5601	0.5632	[0.5626 ; 0.5638]

Tabela 3.1 – Validação probabilidades – Desvanecimento rápido.

Tal como é possível verificar, comparando o modelo teórico à simulação, os valores encontram-se bastante próximos, verificando-se assim uma validação do modelo teórico desenvolvido.

3.2.3.2. Desvanecimento Lento

Utilizando agora uma distribuição *log-normal* para representar o efeito de desvanecimento lento, segue-se um processo semelhante ao descrito anteriormente para que se possam obter novos resultados e estabelecer bases de comparação.

Esta distribuição é representada por

$$f_{P_i}(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]}. \quad (3.28)$$

Considere-se na distribuição $\sigma = 3/A$ onde $A = 10/\log(10)$ e $\mu = 0$. Utilizando novamente a transformação de Smirnov para definir as potências dos sinais de transmissão e calcular o número médio de transmissões simultâneas recebidas com sucesso e as respetivas probabilidades de recepções com sucesso para cada número de nós. Na tabela seguinte é possível verificar a validação dos valores de p_s .

n	p_s teórico	p_s simulação	IC
5	0.9987	0.9986	[0.9985 ; 0.9987]
10	0.9783	0.9796	[0.9792 ; 0.9800]
15	0.9284	0.9286	[0.9280 ; 0.9292]
20	0.8529	0.8516	[0.8509 ; 0.8523]
25	0.7641	0.7629	[0.7622 ; 0.7636]
30	0.6736	0.6731	[0.6724 ; 0.6737]

Tabela 3.2 – Validação probabilidades – Desvanecimento lento

3.2.3.3. Perdas de Propagação

Considerando agora a existência de perdas de propagação, é necessário encontrar a função densidade de probabilidades que representa a atenuação existente e respetiva probabilidade.

Considere-se que os nós transmissores se encontram uniformemente distribuídos num círculo de raio máximo D , centrado no recetor.

Para esta topologia, a PDF de uma distância x entre o nó recetor e emissor é dada por

$$f_{P_i}(x) = \frac{2\pi x}{\pi D^2} = \frac{2x}{D^2}, \quad 0 \leq x \leq D. \quad (3.29)$$

A esta PDF encontra-se associada uma CDF, dada pela expressão

$$F_{P_i}(x) = \frac{x^2}{D^2}. \quad (3.30)$$

Admitindo que a potência do sinal recebido pelo recetor a uma distância x é atenuada por,

$$(1 + x)^{-\eta}, \quad (3.31)$$

esta potência será máxima quando x tiver o valor mínimo, e mínima quando x for máximo, sendo que o domínio x definido no intervalo $[(1 + D)^{-\eta}, 1]$. Este domínio está corrigido de forma a não serem admitidas distâncias nulas.

Considerando as variáveis aleatórias Z e X que representam a potência e a distância, respetivamente, sabe-se que $Z = (1 + X)^{-\eta}$, com

Desta forma tem-se:

$$\begin{aligned} F_Z(z) &= P_R\{Z \leq z\} \\ &= P_R\{(1 + X)^{-\eta} \leq z\} \\ &= P_R\left\{[(1 + X)^{-\eta}]^{-\frac{1}{\eta}} > z^{-\frac{1}{\eta}}\right\} \\ &= P_R\{1 + X > z^{-1/\eta}\} \\ &= P_R\{X > z^{-1/\eta} - 1\} \\ &= 1 - F_X(z^{-1/\eta} - 1). \end{aligned} \quad (3.32)$$

É possível obter a CDF que se pretende, sendo definida por

$$F_Z(z) = 1 - \frac{(z^{-1/\eta} - 1)^2}{D^2}. \quad (3.33)$$

Derivando esta expressão em ordem a z obtém-se

$$f_{P_i}(z) = \frac{2}{D^2\eta} \left(z^{-2/\eta-1} - z^{-1/\eta-1} \right). \quad (3.34)$$

Estabelecidas as funções pretendidas é possível seguir um processo análogo às duas distribuições anteriores e assim verificar as probabilidades para o modelo teórico e de simulação.

Neste trabalho adota-se um coeficiente de perdas de propagação de $\eta = 2$ e $D = 10$ para representar o raio da área circular onde os nós se encontram uniformemente distribuídos.

n	p_s teórico	p_s simulação	IC
5	0.9946	0.9944	[0.9940 ; 0.9948]
10	0.9668	0.9669	[0.9659 ; 0.9678]
15	0.8921	0.8944	[0.8929 ; 0.8959]
20	0.7577	0.7594	[0.7576 ; 0.7612]
25	0.6064	0.6023	[0.6007 ; 0.6039]
30	0.4808	0.4799	[0.4787 ; 0.4811]

Tabela 3.3 – Validação probabilidades – Perdas de propagação.

Na tabela 3.3 é possível observar os valores de p_s obtidos pelo modelo teórico e através de simulações. Visto que os valores de p_s obtidos se encontram bastante próximos e dentro do intervalo de confiança é possível validar os modelos obtidos teoricamente.

3.2.3.4. Efeitos de propagação em simultâneo

Seguindo um processo análogo ao utilizado anteriormente, considera-se aqui a existência de três efeitos de propagação diferentes, que irão influenciar as potências de recepção de cada nó. Dada a validação dos três efeitos, procede-se com resultados simulados, obtendo potências recebidas de modo análogo ao descrito nas seções anteriores, ou seja, utilizando o método de transformação de Smirnov. As probabilidades observadas encontram-se na tabela 3.4.

n	p_s simulação	IC
5	0.7938	[0.7857 ; 0.8019]
10	0.6195	[0.6186 ; 0.6204]
15	0.4989	[0.4885 ; 0.5093]
20	0.4131	[0.3991 ; 0.4271]
25	0.3488	[0.3385 ; 0.3591]
30	0.2991	[0.2899 ; 0.3083]

Tabela 3.4 – Probabilidades observadas os três efeitos de propagação em simultâneo.

3.2.4. Coroa

Uma vez obtidas as probabilidades de sucesso p_s , considerando uma distribuição uniforme dos nós como modelo de partida, considera-se agora que os nós se encontram uniformemente distribuídos numa coroa, sendo o centro da mesma a localização do nó recetor e admitindo como raios genéricos D_1 e D_2 , em que se assume unidades genéricas de distância. Pretende-se com esta distribuição verificar a influência da distância a que os nós se encontram do recetor na probabilidade de recepção com sucesso, p_s .

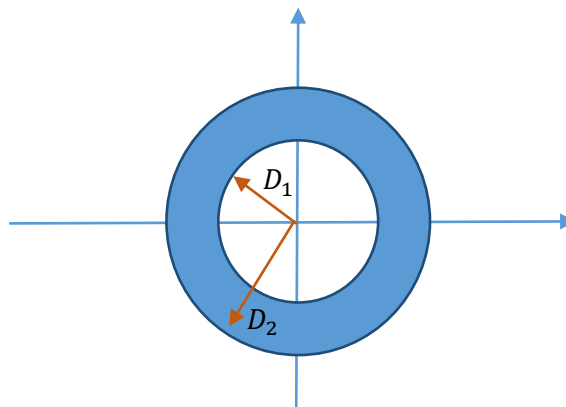


Figura 3.1 – Topologia em coroa.

Admitindo que os nós estão concentrados numa coroa ao invés de um círculo é possível contemplar um cenário mais geral (que engloba também o cenário das seções anteriores onde se considera uma distribuição uniforme – admitindo $D_1 = 0$). Neste cenário é possível obter uma melhor compreensão sobre a influência que a distância entre os nós emissores e o nó recetor têm na probabilidade de recepção sucesso. É possível obter tal compreensão através da variação dos raios da coroa, tal como será mostrado adiante. Considere-se apenas a existência de perdas de propagação

uma vez que os efeitos de atenuação não são dependentes da distância, e como tal não apresentam diferenças nesta topologia.

Para encontrar as probabilidades de sucesso de forma análoga ao cenário onde se considera uma distribuição circular uniforme, é necessário introduzir algumas modificações no modelo.

Para considerar uma distribuição uniforme dentro de uma coroa, o modelo é descrito por:

$$f_{P_i}(x) = \frac{2\pi x}{(\pi D_2^2 - \pi D_1^2)} = \begin{cases} \frac{2x}{D_2^2 - D_1^2}, & D_1 \leq x \leq D_2 \\ 0, & x < D_1 \text{ e } x > D_2 \end{cases}, \quad (3.35)$$

$$F_{P_i}(x) = \int_{D_1}^x f(x) dx = \begin{cases} 0, & x \leq D_1 \\ \frac{x^2 - D_1^2}{D_2^2 - D_1^2}, & D_1 \leq x \leq D_2 \\ 1, & x \geq D_2 \end{cases}, \quad (3.36)$$

$$Z = (1 + X)^{-\eta}, \quad (3.37)$$

$$F_Z(z) = P_R\{Z \leq z\} = P_R\{X \leq z^{-1/\eta} - 1\}. \quad (3.38)$$

$$F_Z(z) = \frac{(z^{-1/\eta} - 1)^2 - D_1^2}{D_2^2 - D_1^2}. \quad (3.39)$$

Derivando esta expressão em ordem a z obtém-se

$$f_{P_i}(z) = \frac{2}{\eta} \frac{(z^{-2/\eta} - z^{-1/\eta})}{D_2^2 - D_1^2}. \quad (3.40)$$

Obtidas as funções de densidade e cumulativa, é possível encontrar as probabilidades desejadas.

3.2.4.1. Validação

De modo a realizar as simulações para cada número de nós, n , considera-se que os mesmos se encontram distribuídos uniformemente numa coroa circular de raios genéricos D_1 e D_2 . Para validação do modelo teórico descrito na secção anterior considera-se $D_1 = 0$ e $D_2 = 10$, um coeficiente de perdas de atuação de $\eta = 2$ e um limiar de decisão de $b = 0.02$. Começa-se pela seleção de n números aleatórios. Estes números são utilizados para simular as potências recebidas de cada nó emissor no nó recetor. Isto é realizado utilizando os números aleatórios na inversa da função de densidade cumulativa do efeito das perdas de propagação. Este processo é designado de transformação de Smirnov [DEV86]. Apenas é considerado o efeito de perdas de propagação uma vez que este efeito é o único cuja atenuação varia com a distância entre o nó emissor e o nó recetor. Em seguida, obtidas as n potências de recepção, através da condição de recepção com sucesso da equação (3.7), é possível verificar quantas transmissões foram recebidas em simultâneo.

Repetindo o processo descrito no parágrafo anterior um milhão de vezes, o que permite saber o número total de transmissões que foram simuladas e, obtendo o número total de transmissões que se considera terem sido recebidas com sucesso, é possível obter a probabilidade de recepção com sucesso, valor este que será comparado com o valor obtido teoricamente.

Na tabela seguinte é possível verificar que os valores obtidos através de simulações são semelhantes aos obtidos através do modelo teórico, podendo-se assim considerar que o modelo teórico

caracteriza de forma aproximada as probabilidades de receção com sucesso para esta distribuição espacial.

n	p_s teórico	p_s simulação	IC
5	0.9942	0.9943	[0.9939 ; 0.9947]
10	0.9681	0.9679	[0.9670 ; 0.9688]
15	0.8952	0.8940	[0.8925 ; 0.8955]
20	0.7587	0.7581	[0.7563 ; 0.7599]
25	0.6026	0.6027	[0.6011 ; 0.6043]
30	0.4810	0.4808	[0.4796 ; 0.4820]

Tabela 3.5 – Validação probabilidades da topologia considerada.

Uma vez validada esta nova distribuição espacial, é possível considerar diferentes cenários e verificar o número de transmissões recebidas com sucesso tendo em conta a distribuição espacial dos nós, estudando desta forma a influência da distância, entre os nós transmissores e o nó recetor, no número de receções recebidas com sucesso. Consideram-se desta forma três cenários:

- $D_1 = 0, D_2 = 20$;
- $D_1 = 0, D_2 = 10$;
- $D_1 = 10, D_2 = 20$.

Desta forma, é possível simular diferentes densidades de nós, e assim mostrar as diferenças existentes nas probabilidades de sucesso quando se consideram diferentes coroas. Considerando um limiar de decisão $b = 0.05$, a distribuição do número médio de pacotes recebidos com sucesso tem a seguinte forma:

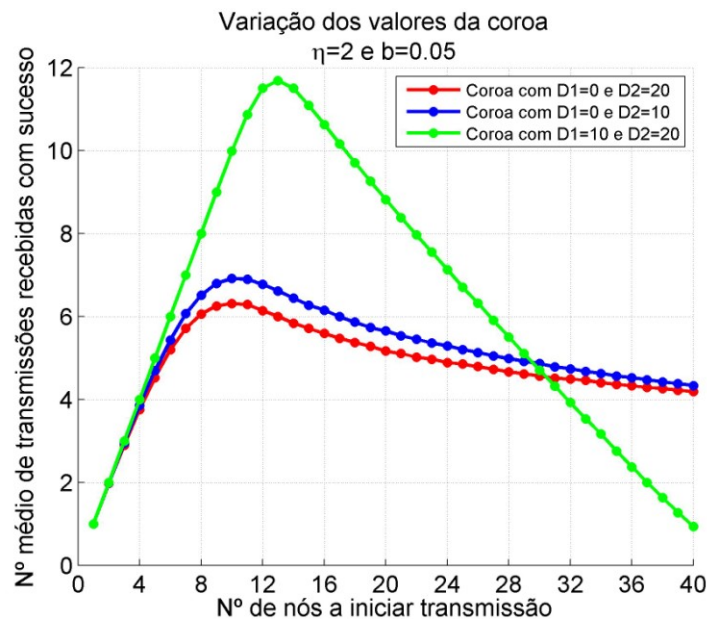


Figura 3.2 – Número médio de nós a transmitir com sucesso para diferentes coroas.

Na figura anterior é possível observar o que se descreveu anteriormente. Quando se considera uma distribuição uniforme e circular, admitta-se $D_1 = 0$ e $D_2 = 20$, os nós encontram-se distribuídos uniformemente por todo o círculo. Como tal, existirão nós bastante próximos do recetor mas existirão também nós bastante afastados. Isto leva a que existam grandes discrepâncias entre as potências recebidas. A potência dos nós que estejam o mais longe possível do recetor tornam-se quase insignificantes quando comparadas com a potência de um nó que esteja muito próximo do recetor.

Tal como observado na equação (3.5), como a diferença entre as potências recebidas é muito alta, o número médio de nós a ser recebido com sucesso será consideravelmente baixo.

Ao considerar uma distribuição uniforme e circular com $D_1 = 0$ e $D_2 = 10$, a distância máxima a que os nós agora se podem encontrar é inferior à considerada anteriormente (onde se tinha $D_2 = 20$). Isto, por consequência, faz com que as potências mínimas recebidas sejam superiores às potências mínimas do caso anterior, uma vez que os nós estão mais perto. Desta forma, a discrepância que existe entre a potência máxima e mínima será menor. Isto é suficiente para que o número de nós que são recebidos com sucesso seja superior ao caso anterior.

No último cenário considerado, uma coroa com $D_1 = 10$ e $D_2 = 20$, é possível observar que o número de nós recebidos é, para determinado número de nós a competir, consideravelmente superior aos dois casos anteriores. Pelo efeito de *pathloss* estudado na secção 3.2.2.3, a potência recebida dos nós é tanto menor quanto maior for a distância entre o nó emissor e o nó recetor. O que acontece neste caso é que ao cingir os nós a distâncias mais elevadas, as potências recebidas dos nós serão todas consideravelmente mais baixas, diminuindo bastante a discrepância que existe entre a potência máxima e mínima que são recebidas. Desta forma, as potências recebidas no recetor são mais próximas em termos do seu valor, o que, pela condição de recepção com sucesso considerada na equação (3.5), permite que o número de nós a ser recebido com sucesso aumente consideravelmente face aos casos anteriores. Pode-se aqui observar que o número de transmissões recebidas com sucesso aumenta bastante com o número de nós que iniciam a transmissão, até que se atinge um máximo, quando o número de nós a competir é aproximadamente 12. A partir desse máximo, quanto maior for o número de nós a transmitir, menor o número de transmissões recebidas. Isto pode ser explicado através da observação da condição de recepção com sucesso da equação (3.5). Como as potências recebidas são muito semelhantes, o número de transmissões recebidas com sucesso será maior. Contudo, se existirem muitos nós a ser recebidos, o denominador da condição de recepção com sucesso aumentará bastante em comparação com as potências individuais, o que faz com que as potências recebidas no recetor não sejam suficientes para verificar a condição de recepção com sucesso.

4

Avaliação de Desempenho

4.1. Introdução

Estudados os efeitos de propagação no capítulo anterior, é possível caracterizar a capacidade de recepção de vários cenários de MPR. Com isto, aplica-se o modelo de nível físico descrito no capítulo 3 a vários protocolos MAC, de forma a avaliar o seu desempenho. Tendo em conta que existem várias filosofias e protocolos de controlo de acesso ao meio, este capítulo apresenta e compara alguns dos cenários, aplicando o modelo de nível físico descrito no capítulo 3, de forma a analisar o desempenho de cada e analisando as suas características, realizando uma avaliação comparativa e mostrando as diferentes vantagens e desvantagens que cada modelo introduz.

Como referido anteriormente, existem várias abordagens para realizar o controlo de acesso ao meio. O que normalmente se tem considerado para o desenho de protocolos MAC consiste em ter uma fase de negociação e uma fase de transmissão de dados. Assim, numa ronda de comunicação os N_{max} nós que pretendem transmitir iniciam a fase de negociação. Para tal, os N_{max} nós que querem transmitir enviam um pacote RTS, com probabilidade p , num dos ω slots disponíveis na fase de negociação. Este é o mecanismo utilizado pelos nós para enviarem um pedido de transmissão. Esta é uma técnica que evita que todos os nós que queiram transmitir iniciem imediatamente a transmissão dado que dessa forma se iriam gerar colisões e desperdiçar recursos do canal. Uma vez passados os ω slots da fase de negociação, todos os pedidos são registados, e é enviado um pacote CTS. É através deste pacote (que todos os nós recebem) que os mesmos sabem se foram selecionados e que têm permissão para transmitir. Inicia-se em seguida uma fase de transmissão em que os nós que receberam permissão do recetor transmitem a sua trama de dados. A fase de transmissão tem a duração T_x incorporando também a duração do slot de ACK. A figura 4.1 representa este tipo de protocolos, exemplificando uma ronda comunicação. Admitindo que nos ω disponíveis existem três nós vencedores, quando for enviado pelo nó recetor o pacote CTS, admitindo que na fase de transmissão se suportam múltiplas receções em simultâneo, então na fase de transmissão os três nós vencedores transmitem em simultâneo. Quando terminar o tempo de transmissão T_x , então é

enviado pelo recetor um nó de ACK para informar os nós que transmitiram que a sua transmissão foi recebida com sucesso.

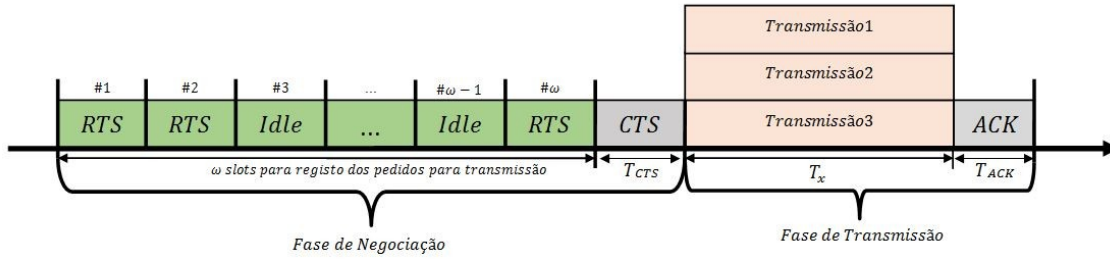


Figura 4.1 – Exemplo de ronda de comunicação para protocolos com fase de negociação e de transmissão.

Para definir o débito, considere-se que N é uma variável aleatória (VA) que representa o número de nós disponível para enviar pacotes RTS, realizando assim o pedido para transmitir,

$$N \in \{0, 1, \dots, N_{max}\}. \quad (4.1)$$

Considere-se X uma variável aleatória que representa os *slots* da fase de negociação, ou seja

$$X \in \{0, 1, \dots, \omega\}. \quad (4.2)$$

A probabilidade de um nó transmitir um pacote RTS no *slot* $k \in \{0, 1, \dots, \omega\}$ é dada pela distribuição geométrica

$$P_R\{X = k\} = p \times (1 - p)^{k-1}, \quad (4.3)$$

onde p é a probabilidade de um nó aceder num dos ω *slots*.

Sabendo que cada nó apenas pode enviar um RTS num dos ω *slots* da fase de negociação, a probabilidade de N nós acederem num *slot* k é dada pela distribuição binomial

$$P_R\{N = n, X = k\} = \binom{N_{max}}{n} \times [P_R\{X = k\}]^n \times [1 - P_R\{X = k\}]^{N_{max}-n}. \quad (4.4)$$

Utilizando a equação (4.3), obtém-se

$$P_R\{N = n, X = k\} = \binom{N_{max}}{n} [p \times (1 - p)^{k-1}]^n [1 - p \times (1 - p)^{k-1}]^{N_{max}-n}. \quad (4.5)$$

Desta forma, o número de nós médio de RTS recebidos com sucesso em cada *slot* k é dado por

$$\alpha_k(m) = \sum_{i=1}^m i \cdot P_R\{N = i, X = k\}, \quad (4.6)$$

em que m é a capacidade de transmissões em simultâneo que o canal suporta.

Desta forma, o número de nós médio a passar à fase de negociação é dado por

$$E_a = \sum_{k=1}^{\omega} \alpha_k(m). \quad (4.7)$$

Seja N_{T_x} o número de nós que enviaram pacotes RTS, tendo em conta o nível físico considerado no capítulo 3, sabe-se pela equação (3.26) que apenas serão recebidos com sucesso R_{T_x} . Sabendo que a duração da fase de transmissão tem a duração T_x , o débito obtido pelos nós é definido por

$$S = \frac{R_{T_x} T_x}{\omega + T_{CTS} + T_x + T_{ACK}}. \quad (4.8)$$

Tendo em conta o que foi descrito anteriormente, é possível verificar que o valor do débito varia diretamente com a probabilidade p e com o tamanho da janela ω . Desta forma, pretende-se também verificar neste capítulo quais os valores de p e ω que permitem obter o maior débito, otimizando o

modelo. Consegue-se assim ter o modelo nas melhores condições possíveis, extraindo sempre o máximo de débito permitido.

Nas secções seguintes, realiza-se uma avaliação comparativa entre vários protocolos de acesso ao meio de forma a analisar e comparar o seu desempenho relativamente ao débito que cada um permite atingir. Os protocolos analisados serão designados de:

- 1) Protocolo SPR+MPR
- 2) Protocolo semelhante à norma IEEE 802.11
- 3) Protocolo MAC oportunístico
- 4) Protocolo MAC assíncrono
- 5) Protocolo MPR+MPR

Caracteriza-se de seguida a otimização dos parâmetros p e ω e realiza-se também uma análise comparativa dos débitos obtidos por cada um dos protocolos. São também descritas algumas das características particulares de cada protocolo, para que se possa obter uma melhor compreensão não só do que os distingue entre si, mas também como se comportam tendo em conta as mesmas condições.

4.2. Otimização dos parâmetros p e ω

Tal como foi verificado anteriormente, existem vários protocolos que fazem o controlo de acesso ao meio através de uma fase de negociação onde os nós realizam os seus pedidos e uma fase de transmissão, onde os nós vencedores transmitem, tal como exemplificado na figura 4.1. Os pedidos são enviados pelos nós com uma probabilidade p nos ω slots disponíveis na fase de negociação. Tendo em conta a equação do débito (4.8), admitindo que T_x , a duração do slot de Acknowledge, e a duração do slot T_{CTS} têm um valor constante, verifica-se que o débito obtido pelos nós varia apenas com o tamanho da janela e com o número de nós aceites na fase de negociação, R_{T_x} .

Pela equação (3.26), R_{T_x} é dado pela multiplicação do número de nós que inicia transmissão em simultâneo, N_{T_x} , e pela probabilidade p_s . O número de nós esperados a iniciar transmissão é dado pela equação (4.7), ou seja, $N_{T_x} = E_A$. Ao analisar equação (4.7), e tendo em conta as equações de (4.3) a (4.6), é possível observar que o número de nós esperado a iniciar transmissão varia com a probabilidade p . Considerando o nível físico do capítulo 3 (admitindo $b = 0.16$) é possível obter o valor de p_s . Obtém-se assim pela equação (3.26) o número de nós que efetivamente são recebidos com sucesso. Desta forma, é possível concluir que S é uma função das variáveis p e ω , $S(p, \omega)$. Considerando $T_x = 20$ e $T_{ACK} = T_{CTS} = 1$, representando-se a função de S na figura 4.2, é possível observar a evolução do débito consoante a variação de p e ω .

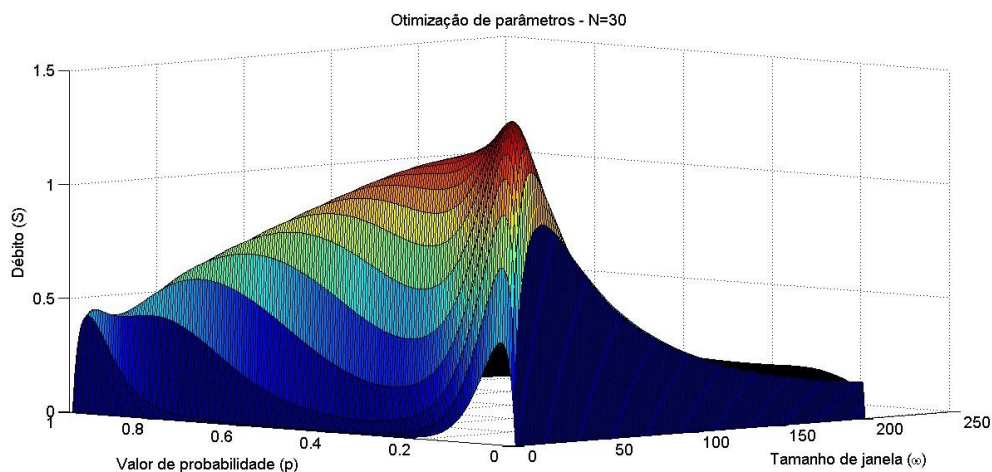


Figura 4.2 – Débito (S) obtido pela equação (4.8) em função de p e ω .

Esta figura permite verificar que para um determinado número de nós existe um débito máximo ($N = 30$ para o caso considerado), concluindo que existe um p e um ω ótimos que permitem atingir esse débito. Isto permite concluir que quando se considera uma janela de negociação fixa e uma probabilidade de acesso constante e independente do número de nós, então não se está a obter o máximo rendimento que é possível obter. Neste caso, se se admitir que em vez de ter o tamanho da janela de negociação e a probabilidade p com valores fixos se tiverem valores dinâmicos, ou seja, se para cada número de nós se utilizarem os valores ótimos, então é possível aumentar o débito da rede.

4.3. Cenário de simulação

Para que se possa realizar uma análise comparativa entre os diferentes protocolos, é necessário considerar condições semelhantes para os mesmos e assim obter resultados que representem o seu comportamento no mesmo cenário. Para tal, considere-se um cenário em que existe um ponto de acesso capaz de realizar múltiplas receções em simultâneo, e N_{max} nós que pretendem transmitir se encontram distribuídos uniformemente num círculo com distância $D = 10$.

Nas diferentes secções do capítulo 3 foram estudados alguns efeitos de propagação, nomeadamente:

- Desvanecimento rápido;
- Desvanecimento lento;
- Perdas de propagação;

A existência destes efeitos de propagação no nível físico influenciam o cálculo da probabilidade p_s , como verificado e validado no capítulo 3. Para o presente cenário, considere-se assim um nível físico que tem em conta estes efeitos de propagação. Para cada um deles foram utilizados os seguintes parâmetros:

	Desvanecimento rápido	Desvanecimento lento	Perdas de Propagação
Parâmetros utilizados	- $D = 10$ - $\sigma = 1$	- $\sigma = \frac{3}{10^{\frac{1}{\log(10)}}}$ - $\mu = 0$	- $D_1 = 0$ - $D_2 = 10$ - $\eta = 2$

Tabela 4.1 – Parâmetros utilizados no cenário considerado.

Considere-se que as transmissões dos nós que são recebidas com sucesso têm em média uma duração de $T_x = 20$.

Uma vez calculada a probabilidade associada, e sabendo que existem N_{T_x} transmissões em simultâneo, então pela equação (3.26) sabe-se que serão recebidas com sucesso R_{T_x} transmissões. Num protocolo MPR, é necessário ter conhecimento do número de transmissões em simultâneo que o recetor recebe com sucesso.

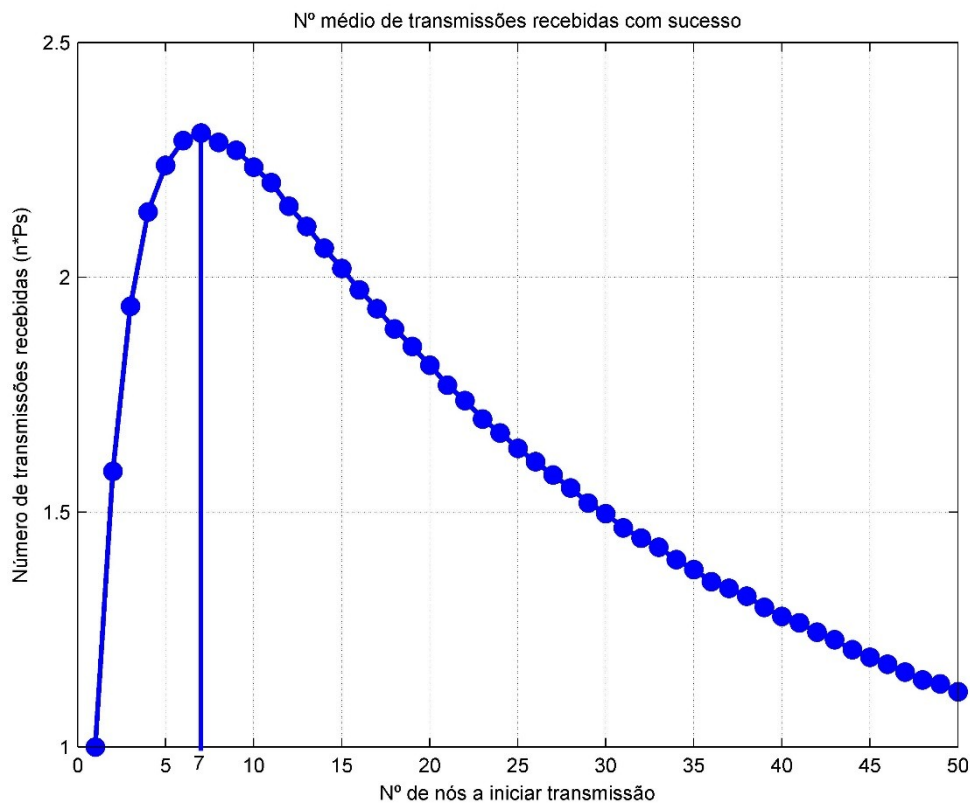


Figura 4.3 – Número médio de nós recebidos com sucesso segundo o modelo físico considerado.

Na figura 4.3 está representado o número de transmissões recebidas com sucesso para cada número de transmissões iniciadas. Para obter esta figura, obtendo a probabilidade de receção com sucesso individual através de simulação, tendo em conta $b = 0.16$, ao multiplicar cada número de nós pela respetiva probabilidade, é possível obter uma caracterização do número de transmissões recebidas com sucesso, tendo em conta o número de transmissões iniciais. Desta forma, pelas condições do nível físico considerado, e descrito nesta secção, observa-se que o número de transmissões recebidas com sucesso é máximo quando existem 7 nós a realizar transmissões em simultâneo. Desta forma pode-se assim admitir neste cenário uma capacidade de MPR de 7 transmissões em

simultâneo. Esta capacidade, designada por $MPR_{capability}$, representa o número de transmissões que permitem ao recetor obter o maior rendimento, ou seja, representa o número de transmissões simultâneas que permite o maior número de receções com sucesso. Como tal, para os protocolos analisados considere-se neste cenário $MPR_{capability} = 7$. Desta forma, é possível admitir que os protocolos com capacidade de múltiplas receções em simultâneo estejam sempre nas melhores condições e que permitam um débito ótimo.

4.4. Avaliação comparativa

4.4.1. SPR + MPR

Neste protocolo assume-se uma fase de negociação SPR e uma fase de transmissão MPR. Na fase de negociação, cada um dos N_{max} nós envia um pacote RTS num dos ω slots disponíveis. Estes pedidos são enviados para o recetor com uma probabilidade p . Desta forma, poderão existir vários pedidos num dado slot, contudo, como a fase de negociação apenas suporta SPR, isto significa que os pedidos de transmissão (pacotes RTS), apenas são recebidos pelo recetor com sucesso no caso de existir apenas um pedido por slot. Ou seja, caso exista mais do que um pedido num dado slot da fase de negociação, então todos os pedidos (que foram enviado no slot) são descartados. Terminada a fase de negociação, o recetor verifica quantos pedidos recebeu com sucesso e envia um pacote CTS com a informação dos nós que foram autorizados a realizar a transmissão na fase seguinte. Como já foi visto na equação (4.6), sabe-se que em média existem α_k nós a enviar pedidos com sucesso no slot k . Desta forma, o número de nós esperado que envia pedidos com sucesso em toda a fase de negociação é dado pela equação (4.7) com $m = 1$, uma vez que a transmissão tem sucesso quando só acede um único nó num slot.

Na fase de transmissão considera-se a utilização da receção de múltiplos pacotes em simultâneo. Assim, os nós vencedores têm a possibilidade de transmitir a sua trama de dados (que se admite ter uma duração igual para todos os nós). Sabendo que em média estão autorizados a transmitir E_A nós na fase de transmissão, este será o número de transmissões em simultâneo que irão decorrer. Tendo em conta o que foi estudado no capítulo anterior, em termos de SINR recebido, sabe-se que quando se tem N_{Tx} nós a transmitir em simultâneo, apenas serão recebidos com sucesso $R_{Tx} \leq N_{Tx}$ transmissões. Este valor é dado pela equação (3.26) do capítulo 3. Uma vez que se admite que a fase de transmissão tem duração constante, T_x , então, pela equação (4.8), é possível calcular o débito deste protocolo.

Além do débito de transmissão que este protocolo alcança, pretende-se caracterizar a relação que existe entre o número de nós a enviar pedidos na fase de negociação e o número de nós que efetivamente passam à fase de transmissão, e também o número de nós que são efetivamente recebidos com sucesso pelo recetor. Desta forma, é possível obter uma melhor compreensão sobre o comportamento do protocolo e perceber as suas limitações.

4.4.2. IEEE 802.11

Neste protocolo não é usada uma fase de negociação e uma fase de transmissão da mesma forma que no protocolo anterior. Sendo utilizado apenas SPR, apenas pode transmitir um nó de cada vez. Desta forma, o mecanismo de contenção da norma 802.11 permite diminuir as colisões entre transmissões. Cada nó tem uma janela de contenção (*Contention Window*) aleatória (admita-se que esta contenção tem a duração de *CW slots*). Isto significa que um nó apenas tenta transmitir o seu pedido ao fim desses *CW slots*. Assim, em cada *slot* existem três cenários possíveis: Se existir um só nó cuja janela de contenção atinja o valor zero, então esse nó envia o seu pedido para transmitir através de um pacote RTS e aguarda pela resposta do recetor para iniciar a sua transmissão; os nós cuja janela de contenção ainda não tenha atingido zero, decrementam-na uma unidade, ou seja $CW = CW - 1$; se existirem vários nós cuja janela de contenção seja zero, todos irão transmitir, o que irá gerar colisões, uma vez que neste protocolo não se considera um modelo do nível físico de tipo MPR. Neste último caso todos esses nós duplicam o valor da sua janela de contenção inicial, ou seja $CW = CW \times 2$.

Quando suceder o primeiro caso e existir apenas um nó a realizar o seu pedido, é enviado pelo recetor um pacote CTS e o nó autorizado inicia a sua transmissão.

É aqui possível verificar o débito atingido neste protocolo assim como, analogamente ao protocolo SPR+MPR, o número de nós que passam à fase de transmissão e também o número de transmissões que efetivamente são recebidas com sucesso pelo recetor.

4.4.3. Protocolo MAC oportunístico

Como visto na secção 2.1, no protocolo MAC oportunístico [JK11], é utilizado um modelo semelhante ao 802.11. Contudo, este permite múltiplas receções em simultâneo, tomando uma abordagem diferente no que toca à janela de contenção de forma a poder aproveitar ao máximo as capacidades do canal. Isto é feito dando a oportunidade para transmitir a nós que não tenham enviado o seu pedido. Para tal, cada fase de transmissões é iniciada através de um mecanismo de contenção semelhante ao utilizado no protocolo 802.11. Os nós que obtiverem permissão para transmitir (obtida no pacote CTS) podem começar a transmitir a sua trama de dados. Uma vez que uma nova fase de pedidos só se pode iniciar posteriormente ao término da transmissão com maior duração, então o canal irá estar subaproveitado. Desta forma Jung, *et al.* propõem este protocolo de modo a que outros nós se possam adicionar ao canal, desde que não se ultrapasse o limite determinado pelo recetor e, desde que a duração da sua transmissão seja inferior à transmissão com maior duração, entre os nós que fizeram o pedido e foram autorizados a transmitir.

No protocolo, admite-se que existe um limite máximo de transmissões em simultâneo, ou seja, uma vez ultrapassado este limite, todas as transmissões irão colidir, impossibilitando assim a sua receção. Contudo, o número de receções com sucesso poderá ser definida apenas pelo nível físico, e não pelo limite teórico de MPR. Ou seja, o que a capacidade MPR pretende mostrar é que é para este valor que se consegue retirar o melhor rendimento do canal tendo em conta as condições físicas do mesmo. Uma vez ultrapassado o limite da capacidade MPR, quanto maior for o número de receções

em simultâneo menor será o número de recepções recebidas com sucesso, neste caso não existirão vantagens em tentar receber um número de transmissões acima do limite porque o desempenho será inferior.

4.4.4. Protocolo MAC assíncrono

Como descrito no capítulo 2, o protocolo MAC assíncrono [JKL12] tenta aproveitar as capacidades do canal de uma forma mais eficaz de modo a que se tenha sempre que possível o maior número de nós permitidos a transmitir em simultâneo. Este protocolo permite que outros nós se adicionem ao canal de forma a preencher todas as vagas que existam. Uma vez iniciada uma fase de transmissão, os nós cujo RTS não foi recebido com sucesso poderão agora começar a transmissão com uma probabilidade p_t . Contudo, não existem restrições relativamente à duração da maior transmissão que esteja a decorrer. Ou seja, neste modelo os nós poderão adicionar-se ao canal qualquer que seja a duração da sua trama de dados. Além disto, os nós realizam o acesso ao meio de uma forma assíncrona, podendo iniciar a sua transmissão em qualquer momento, desde que existam vagas para tal.

4.4.5. MPR+MPR

À semelhança do protocolo SPR+MPR, este funciona com uma fase de negociação e uma fase de transmissão. Contudo, é utilizada recepção simultânea de pacotes em ambas as fases. Assim, na fase de negociação, considera-se que é possível receber mais que um pedido RTS em cada *slot*. Como tal, sabendo que existem N_{T_x} nós que enviaram RTS, num dado *slot* dos ω *slots* possíveis da fase de negociação, pela equação (3.26), sabe-se que apenas irão efetivamente ser recebidos com sucesso R_{T_x} nós. O número total de nós que transmite a sua trama de dados é o somatório de todos os nós que tiveram os seus pedidos recebidos com sucesso.

A fase de transmissão funciona de forma análoga ao considerado anteriormente.

4.5. Resultados

4.5.1. Protocolo A: SPR+SPR

De forma a proporcionar as melhores condições possíveis para este protocolo, e sabendo pela secção 4.1 que existem valores de p e ω (que representam a probabilidade de um nó enviar um pacote RTS e o tamanho da janela de negociação, respetivamente) que otimizam o débito deste protocolo, especifica-se um cenário em que para cada número de nós se utilizam os valores ótimos de p e ω . Desta forma, obtém-se o máximo de rendimento possível. Além disto considera-se também a existência de um *slot* de CTS, um *slot* de *Acknowledge* e um tempo de transmissão de $T_x = 20$.

Na figura 4.4 é possível observar o número médio de nós que passam à fase de negociação, e o número médio de nós que são efetivamente recebidos com sucesso pelo nó recetor, tendo em conta o número de nós concorrentes que inicia transmissão.

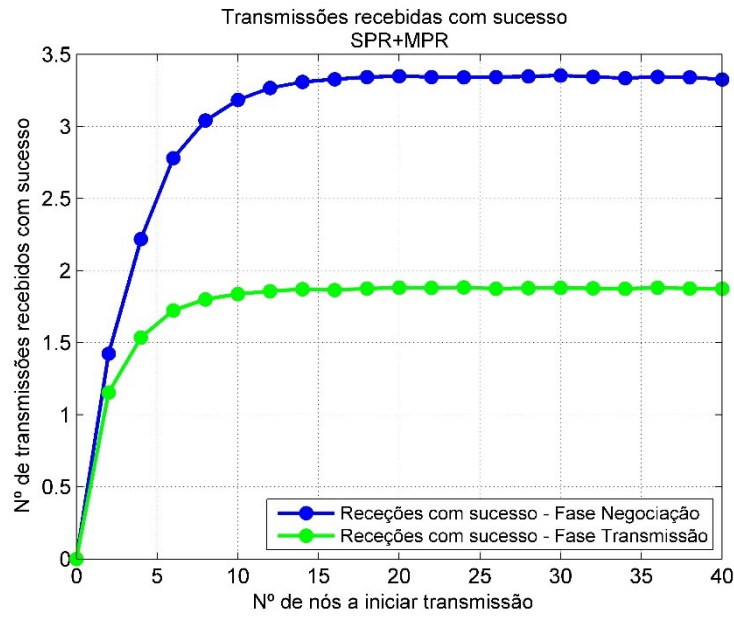


Figura 4.4 – Média do nº de nós recebidos com sucesso.

Por fim, na figura 4.5 é possível verificar o débito observado neste protocolo para cada número de nós.

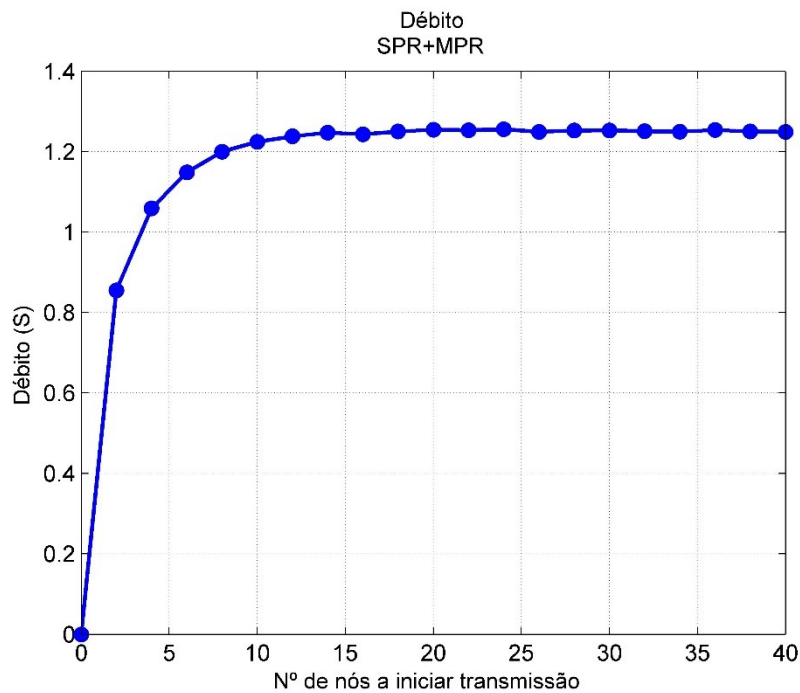


Figura 4.5 – Débito protocolo SPR+MPR.

É possível verificar a vantagem em utilizar valores de p e ω ótimos ao invés de valores fixos. Ao manter a probabilidade de acesso fixa, quanto maior for o número de nós N_{max} , maior o número de nós que competem em cada *slot* para envio de pacotes RTS na fase de negociação. Isto conduz ao aumento de colisões visto que na fase de negociação apenas existe SPR. Na figura 4.6 é possível observar este comportamento, quando não se considera otimização de parâmetros, considere-se neste caso $p = 0.05$ e $\omega = 20$. Considerando estes parâmetros, o número total de pedidos que

colidem ao longo de toda a fase de negociação é bastante superior ao que acontece quando existe otimização de parâmetros. Desta forma verifica-se facilmente que um valor de probabilidade de envio de pedidos fixo não é eficaz, desperdiçando-se capacidade do canal.

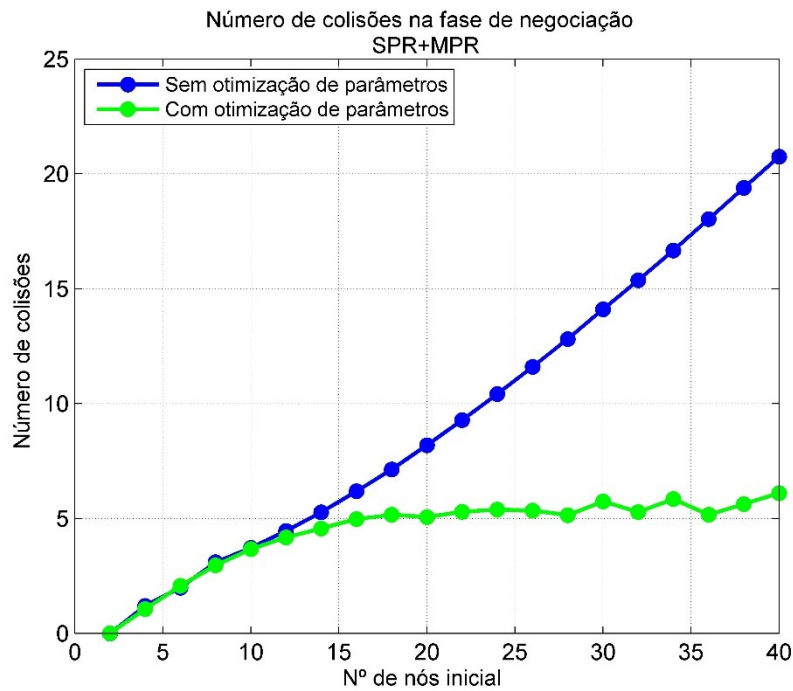


Figura 4.6 – Nº de colisões durante a fase de negociação com, e sem, otimização de parâmetros.

Com o aumento do número de nós, os valores ótimos de p tendem a diminuir de forma a evitar o acesso massivo dos nós aos *slots*, e, inversamente, o tamanho da janela da fase de negociação tende a aumentar, para que existam *slots* suficientes para evitar que existam, em média um número de nós a aceder em cada *slot* superior à capacidade do canal, o que no caso de SPR significa $m = 1$. Na figura 4.7 é possível observar a diferença que existe ao nível de débito para o protocolo em questão, utilizando valores de p e ω ótimos em comparação com a utilização de uma parametrização fixa igual à usada na figura 4.6.

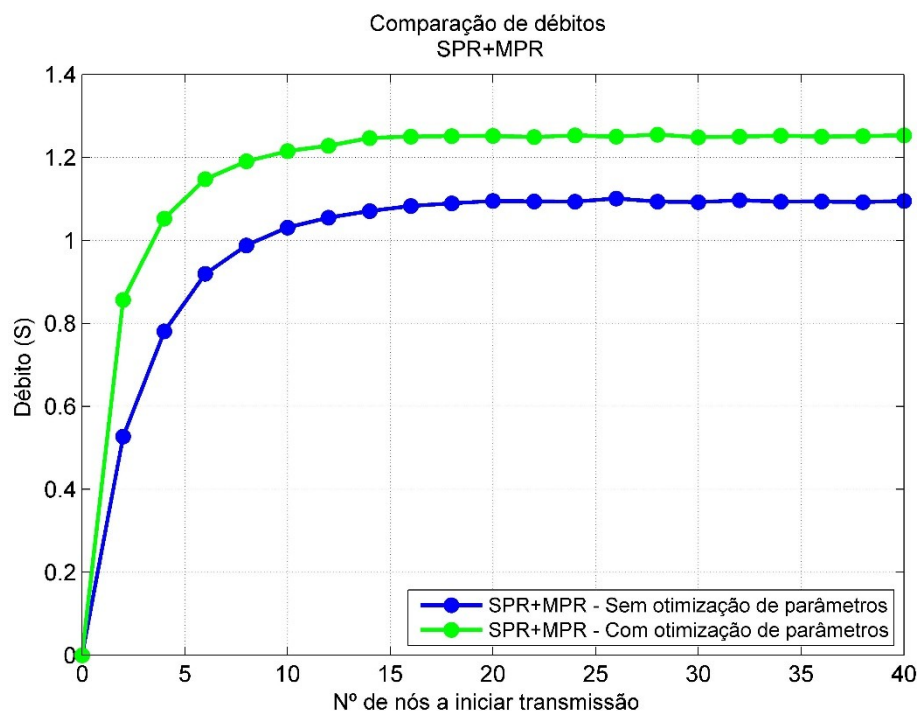


Figura 4.7 – Comparação de débito com e sem otimização de parâmetros.

4.5.2. Protocolo B: 802.11

Segundo a norma 802.11, e como descrito anteriormente, este protocolo tem sido amplamente utilizado como uma base para desenvolvimento de novos protocolos. Como foi referido, este protocolo não tem capacidade para suportar múltiplas receções em simultâneo. Desta forma, o acesso ao meio neste protocolo é feito através do envio de pacotes RTS por parte dos nós transmissores, e de “permissões” para transmitir, dadas pelo recetor. Visto não suportar MPR, admite-se que quando são recebidos vários pedidos em simultâneo, os mesmo colidem e os pedidos são descartados. Para que os nós não enviem massivamente pedidos para transmissão, é utilizada uma janela de contenção, fazendo os nós aguardar um determinado tempo antes de enviarem o pedido. Servindo este protocolo como uma base de comparação para os restantes, torna-se imperativo aproximar o cenário de simulação com o que se encontra atualmente previsto na norma 802.11. Desta forma, considera-se assim uma janela de contenção, designada por CW (*Contention Window*), sendo $CW = 32$. Os nós candidatos aguardam um tempo aleatório entre 0 e $CW - 1$ para iniciar a sua transmissão. Uma vez enviado o pedido, havendo sucesso e admitindo que neste cenário têm pacotes para ser enviados, então o mesmo inicia um novo processo de contenção, aguardando novamente o tempo de contenção que lhe foi atribuído. No caso de ter havido insucesso, o respetivo nó duplicará a sua janela de contenção inicial. De forma a respeitar o que é utilizado normalmente neste protocolo, considera-se também um tempo de duração da trama de dados de $T_x = 55$. Na figura 4.8 é possível observar o débito que se consegue atingir para um determinado número de nós.

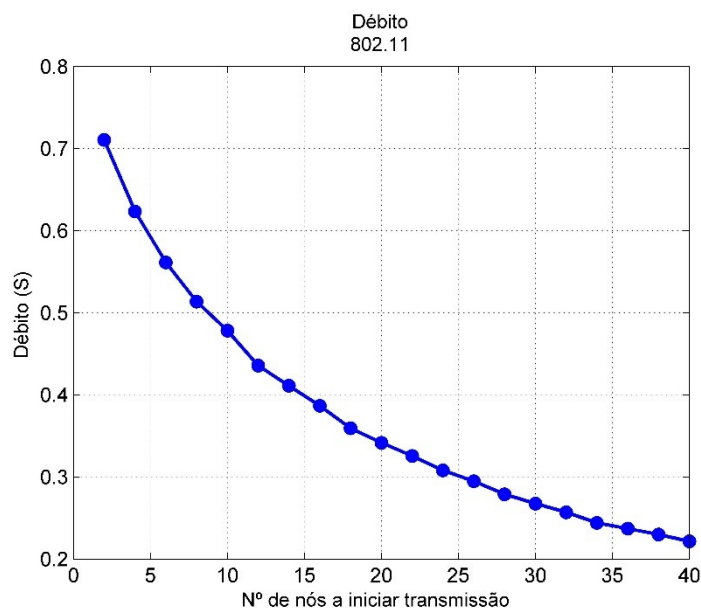


Figura 4.8 – Débito protocolo 802.11.

4.5.2.1. Protocolo 802.11 com suporte para MPR

Uma vez que se estão a estudar protocolos com suporte para receção de múltiplas receções em simultâneo, visto que o 802.11 tradicional apenas suporta SPR, é importante verificar qual o comportamento deste protocolo no caso de o recetor suportar MPR, ou seja, admitindo que o recetor é capaz de receber múltiplas receções em simultâneo. Considere-se assim o mesmo modelo visto anteriormente, com as mesmas parametrizações, mas cujo sucesso agora acontece quando existem um ou mais nós a enviar pedidos de RTS. Observe-se assim na figura 4.9 o débito que se atinge com este protocolo.

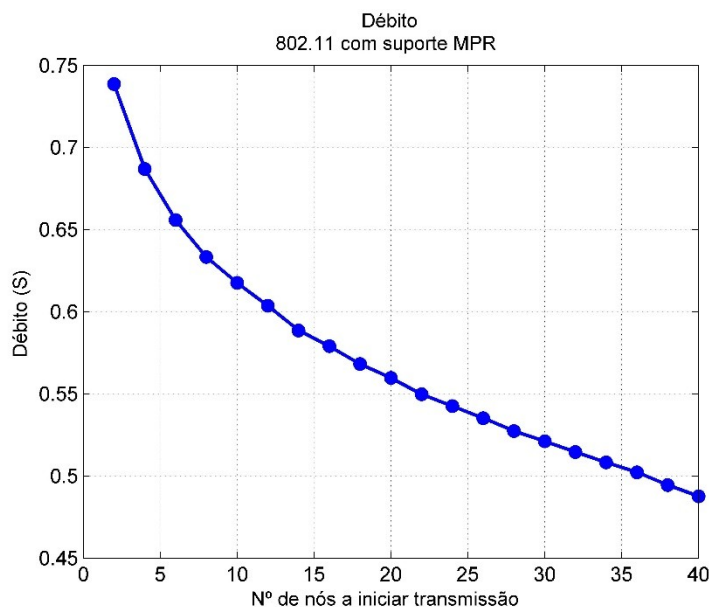


Figura 4.9 – Débito protocolo 802.11 com suporte MPR.

Comparando os dois protocolos observados nesta secção, protocolo MAC semelhante à norma 802.11 com e sem suporte MPR, é possível verificar que o primeiro permite atingir um débito

consideravelmente superior ao último. Este resultado é expectável pois se se consegue receber mais pedidos de transmissão, o número de receções com sucesso aumenta, o que por sua vez leva a um aumento do débito atingido.

Na figura 4.10 é possível observar o comportamento comparativo.

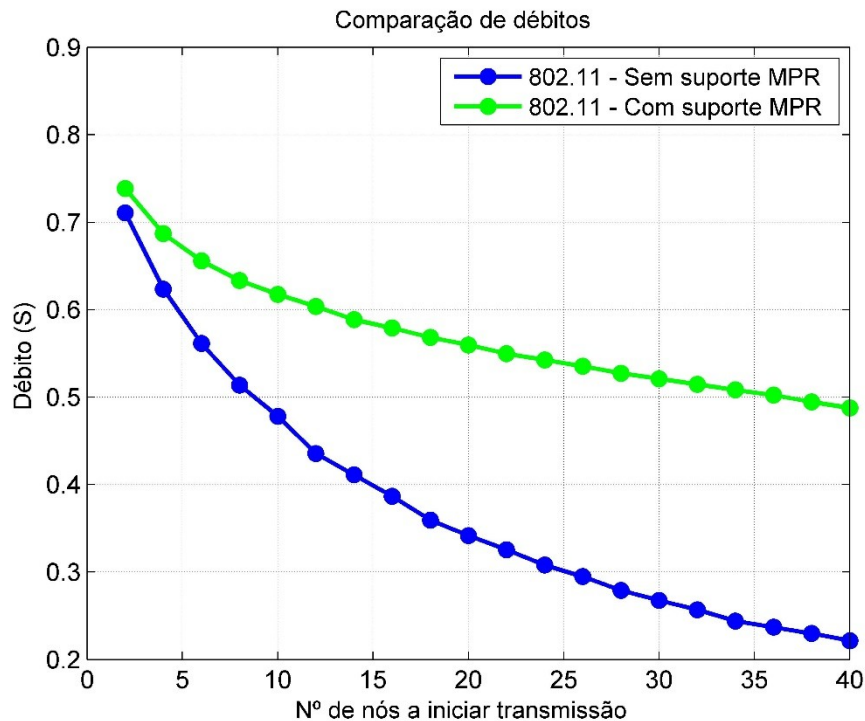


Figura 4.10 – Comparação do débito para o protocolo MAC 802.11 com e sem suporte MPR.

4.5.3. Protocolo C: MAC oportunístico

De forma a permitir que outros nós além dos nós vencedores se adicionem ao canal de forma a aproveitar ao máximo as capacidades do sistema MPR, é atribuída uma segunda oportunidade aos nós que não obtiveram autorização para transmitir à primeira oportunidade. Tendo em conta os parâmetros específicos deste protocolo, considera-se que o tamanho dos pacotes a transmitir assumem uma distribuição geométrica com $20 = 1/q$, $\gamma = 0.8$, e uma vez que se considera neste cenário apenas um grupo de nós, então $n_g = N_{max}$. Não se estando a ter em conta o ritmo de transmissão, admite-se aqui que todos os nós transmitem ao ritmo máximo, como tal $r_g = 1$. Simulando o protocolo, é possível observar na figura 4.11 o débito permitido para cada número de nós a iniciar transmissão. Este protocolo foi implementado em [MAT12] e realizadas simulações para obtenção de resultados.

É verificável que este protocolo permite atingir débitos bastante superiores ao descrito nas seções anteriores deste capítulo. Eventualmente atingindo um máximo com o aumento do número de nós, nota-se uma tendência de estabilização com o mesmo. Isto deve-se ao facto de apesar de se darem segundas oportunidades aos nós candidatos, existir uma limitação da capacidade do canal.

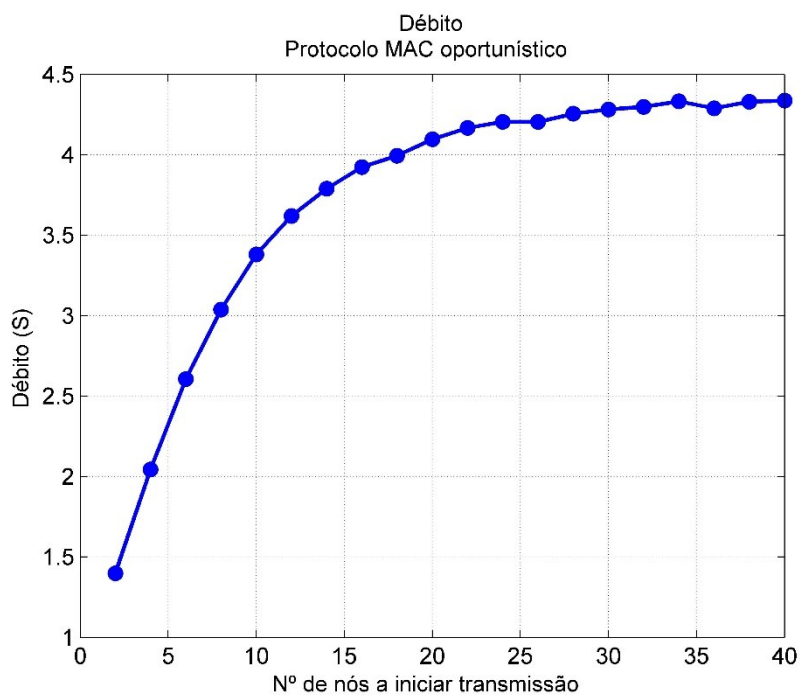


Figura 4.11 – Débito protocolo MAC oportunístico [JL11].

4.5.4. Protocolo D: MAC assíncrono

Este protocolo analogamente ao estudado na secção anterior, permite atribuir uma segunda oportunidade aos nós que não conseguiram autorização para transmitir à primeira oportunidade contudo não apresentado a restrição da duração das transmissões. Este protocolo foi implementado em [MAT12] e realizadas simulações para obtenção de resultados. Verifique-se assim na figura 4.12 o débito atingido para o protocolo desenvolvido em [JKL12].

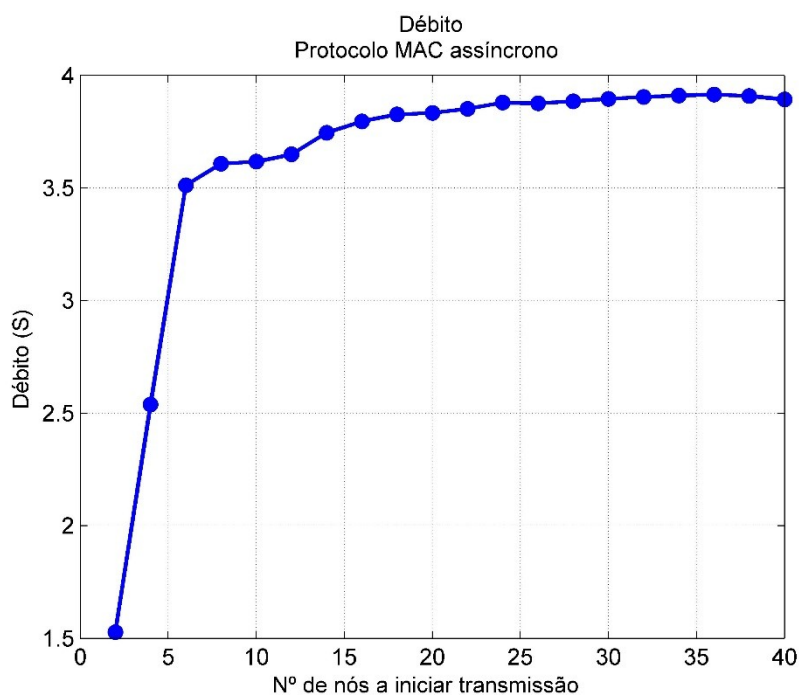


Figura 4.12 – Débito protocolo MAC assíncrono [JKL12].

Tal como acontece em [JL11], neste protocolo nota-se também alguma estabilização do aumento do débito com o número de nós. Contudo, este permite atingir débitos significativamente mais elevados que o anterior. Algo que é expectável tendo em conta que neste protocolo os nós acedem assincronamente sem a restrição da duração sua transmissão ter de ser inferior à máxima duração da transmissão que esteja a decorrer. Isto permite que os nós se adicionem mais rapidamente ao canal, preenchendo também de uma forma mais eficiente todas as vagas disponíveis, aproveitando ao máximo a capacidade do canal.

4.5.5. Protocolo E: MPR+MPR

À semelhança do que se considerou para SPR+MPR, considera-se aqui os valores ótimos de p e ω para cada número de nós e assim ter sempre as melhores condições de transmissões possível para todos os nós. Além disto, considera-se também a existência de um *slot* de CTS, um *slot* de *Acknowledge* e um tempo de transmissão de $T_x = 20$.

Na figura 4.13 é possível observar o número de nós que passam a fase de negociação e o número de nós que cuja transmissão é recebida com sucesso na fase de transmissão.

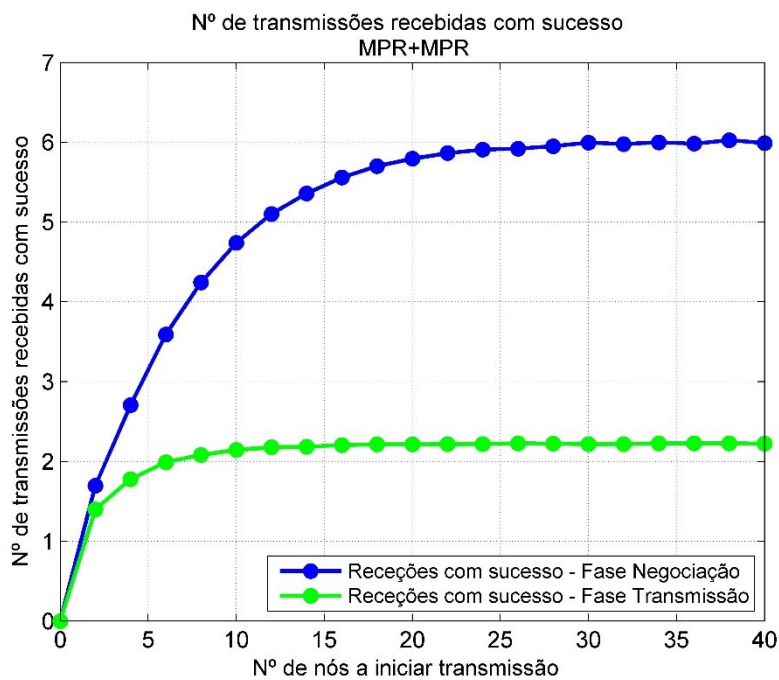


Figura 4.13 – Média do nº de nós recebidos com sucesso.

Por fim, na figura 4.14 é possível verificar o débito atingido para cada número de nós transmissores.

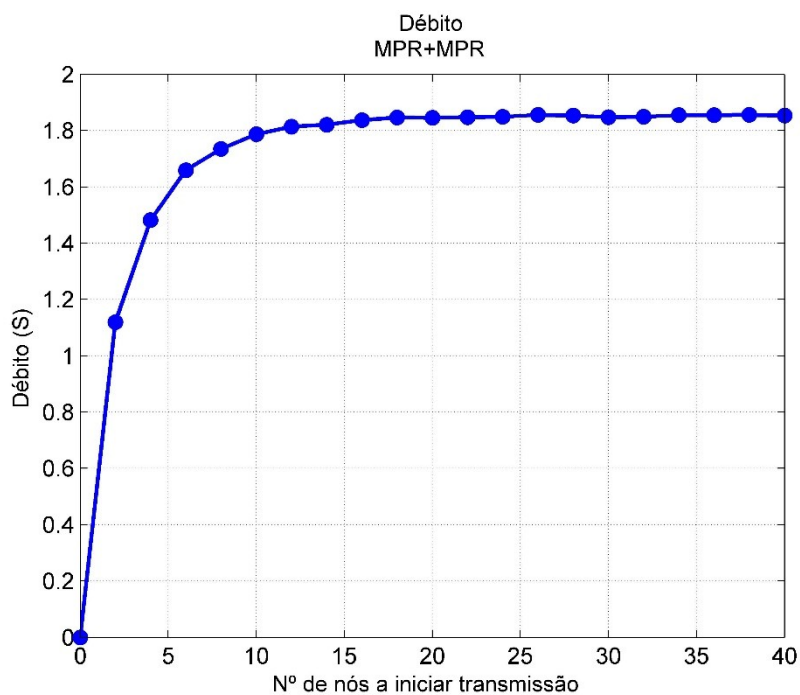


Figura 4.14 – Débito protocolo MPR+MPR.

Tal como observado na secção 4.5.1. a vantagem de utilizar os valores de p e ω ótimos torna-se clara quando se compara o débito atingido com a parametrização ótima com o débito atingido para valores de ω e p fixos. Admitindo uma janela de negociação com tamanho $\omega = 20$ e $p = 0.05$, na figura 4.15 é possível observar que com os parâmetros ótimos se atingem valores de débito bastante superiores. Além disto, é possível fazer um melhor aproveitamento do canal.

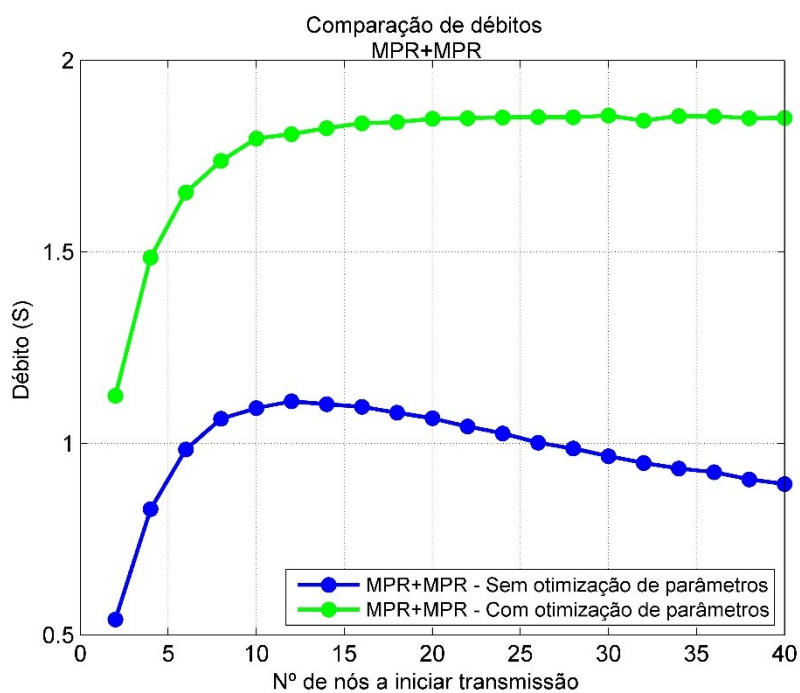


Figura 4.15 – Comparação de débito com e sem otimização de parâmetros.

No que diz respeito à otimização de p , acontece algo semelhante ao descrito em 4.5.1. Ou seja, com o aumento do número de nós disponíveis para transmitir, se se mantiver a probabilidade de envio de

pedidos constante, então o número de pedidos irá ser constantemente maior, o que leva a que exista um número cada vez mais elevado de colisões, pois o número médio de nós por cada *slot* da fase de negociação será também superior. Uma vez que no presente protocolo se tem uma fase de negociação que suporta MPR, ter um número médio de nós superior a um em cada *slot* não é tão grave como protocolo descrito na secção 4.4.1, pois o objetivo deste protocolo é precisamente suportar mais transmissões em paralelo. Contudo, pelo nível físico utilizado, sabe-se que quando se tem N_{Tx} nós a transmitir, apenas R_{Tx} serão recebidos com sucesso. Esta relação é dada pela equação (3.26) através de p_s . Como foi descrito no capítulo 3, quanto maior for o número de nós a transmitir, menor é a probabilidade de todas as transmissões serem recebidas com sucesso. Como tal, o que acontece neste protocolo com o aumento do número de nós é que com o aumento do número de pedidos, gera-se um grande número de colisões, o que leva a que haja um fraco aproveitamento das capacidades do canal.

Neste protocolo, para evitar um excesso de nós a iniciar transmissões é feito um ajuste da probabilidade p . Quanto maior for o número de nós, menor a probabilidade dos mesmo enviarem os respetivos pedidos para transmissão. Isto leva a que existam menos nós a enviar pedidos, contudo aproveitando de uma forma mais eficaz a capacidade do canal.

Relativamente ao tamanho da janela ω , contrariamente ao que sucede em SPR+MPR, em que ω aumenta consoante o número de nós, visto que existe uma capacidade máxima do canal, quanto maior for o número de nós disponível, mais rapidamente se atinge a mesma e como tal, não será necessário aumentar da janela consoante o aumento do número de nós. Desta forma, uma janela pequena será o suficiente para que hajam nós suficientes para atingir a capacidade máxima do canal.

4.6. Avaliação comparativa dos protocolos

Uma vez estudados os protocolos individualmente, é possível analisá-los de forma a perceber quais os que apresentam melhor desempenho. Na figura 4.16 é possível observar os débitos de transferência de todos os protocolos estudados anteriormente. De notar que apesar dos protocolos possuírem algumas diferenças entre si, pretende-se aqui aproximar ao máximo as condições de funcionamento dos mesmos para que se verifique e se compare o seu desempenho.

Comparando os débitos dos protocolos observados nas secções anteriores, é possível verificar que existem diferentes desempenhos. Este facto mostra a importante relevância que as características de cada protocolo apresentam.

Uma vez que o protocolo descrito em 4.4.2 não suporta nenhum tipo de MPR e todos os outros admitem um recetor capaz de múltiplas receções em simultâneo, é previsível que este apresente um débito inferior aos demais.

No que diz respeito aos protocolos que possuem uma janela de negociação, é possível observar que o protocolo que apresenta uma fase de negociação MPR em conjunto com uma fase de transmissão MPR apresenta débitos superiores quando comparado com SPR+MPR. A vantagem deve-se ao facto de ser possível receber vários pedidos por *slot*. Desta forma, a capacidade máxima que o canal suporta é rapidamente atingida, o que se traduz num aproveitamento mais eficaz do canal, levando também a um maior débito.

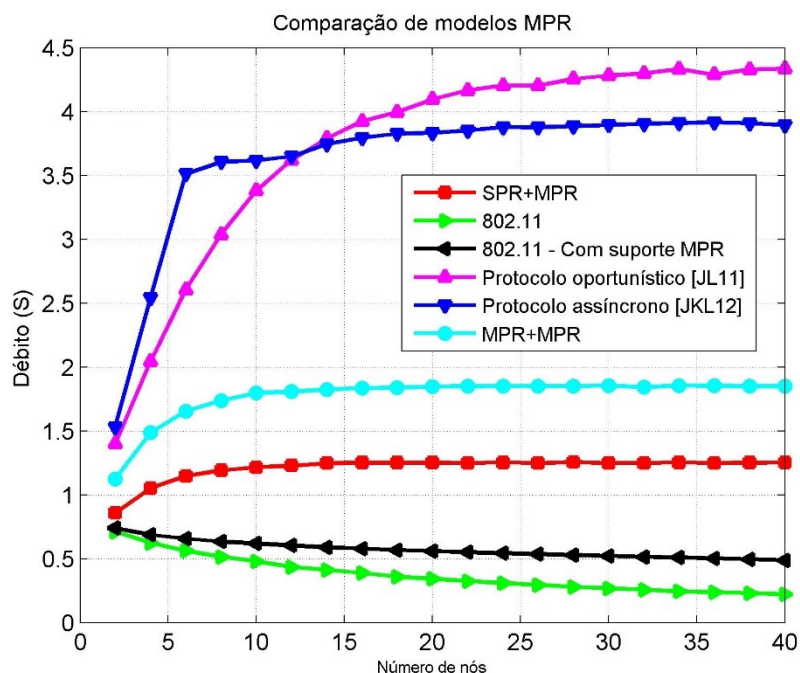


Figura 4.16 – Comparação entre os diferentes protocolos MAC considerados.

Nos protocolos desenvolvidos recentemente por Jung, *et al.* foram introduzidas características que permitem uma segunda oportunidade aos nós que não ganharam acesso ao canal. Isto introduz uma vantagem, permitindo que o número de nós a transmitir seja mais elevado relativamente ao considerado nos protocolos descritos anteriormente. Apesar do protocolo MAC assíncrono [JKL12] permitir um débito consideravelmente superior ao protocolo MAC oportunístico [JL11] para um baixo número de nós, o primeiro atinge o seu máximo para um número de nós mais baixo e estabilizando para um número de nós superior. Pelo contrário, em [JL11] existe um aumento gradual do débito com o número de nós, estabilizando apenas para um número de nós bastante elevados. Isto mostra que apesar do protocolo MAC assíncrono não possuir a restrição da máxima duração de transmissão que permite aos nós receber uma segunda oportunidade, isto faz com que para um número muito elevado de nós se acabe por exceder a capacidade máxima do canal, o que leva a que exista um grande número de colisões e todas as transmissões sejam descartadas por consequência. Como tal, a restrição imposta por Jung, *et al.* em [JL11] apesar de ter como consequência um débito inferior quando comparado com [JKL12] para um número de nós mais baixo, quando o número de nós aumenta a mesma torna-se uma vantagem, evitando assim que o aumento de nós candidatos se torne demasiado elevado e se ultrapasse a capacidade do canal.

5

MAC baseado na distribuição espacial dos nós

5.1. Introdução

Uma constante que existe nos protocolos estudados no capítulo 4 consiste no facto dos nós se encontrarem distribuídos uniformemente em torno de um nó recetor. Comportando-se todos os nós de forma semelhante, os seus pedidos são realizados através do envio de pacotes RTS com igual probabilidade. Como tal, um nó que esteja muito distante do recetor transmite pedidos com a mesma probabilidade que um nó que esteja bastante perto.

Como observado no capítulo 3, a potência recebida no recetor varia com a distância a que o nó emissor se encontra. De acordo com o efeito de perdas de propagação descrito na secção 3.2.3.3, os nós muito próximos do recetor são recebidos com uma potência superior à dos nós mais distantes.

Tendo em conta que um recetor com capacidade MPR recebe múltiplas receções em simultâneo, caso existam potências muito elevadas e potências muito baixas a serem recebidas, então os sinais com potências mais elevadas irão dominar a receção, sobrepondo-se aos sinais com menor potência e impossibilitando uma receção com sucesso dos mesmos, como se pode observar pela equação (3.5). Isto prejudica o desempenho do sistema MPR uma vez que existe um grande número de transmissões que não são recebidas com sucesso devido à grande discrepância que existe entre as potências.

Para os nós iniciarem as suas transmissões é necessário enviarem pacotes RTS para o recetor durante a fase de negociação. Desta forma, o recetor consegue verificar qual a potência transmitida por cada nó, nos casos em que não ocorrem colisões.

De uma forma geral, e tendo em conta o que foi estudado no capítulo 3 relativamente aos efeitos da distância na potência do sinal, as discrepâncias entre as potências dos nós tende a diminuir se os nós estiverem aproximadamente à mesma distância do recetor. Por corolário, quanto mais díspares forem

as distâncias entre os nós e o recetor, maior a diferença entre existirá entre as potências. De forma a aumentar o número de receções recebidas com sucesso, interessa ao recetor receber as transmissões dos nós cujas potências sejam o menos dispares possível evitando que existam nós com potências muito elevadas a competir com nós com potências muito baixas.

Na figura 3.8, quando se considera uma coroa com $D1 = 10$ e $D2 = 20$ em que os nós se encontram distribuídos uniformemente dentro da mesma, é possível observar que nesta coroa o número de transmissões recebidas com sucesso é bastante superior quando comparado com uma distribuição circular uniforme com parametrização $D1 = 0$ e $D2 = 10$. Isto deve-se ao efeito de propagação de *pathloss* que mostra que quanto mais distantes os nós estiverem do recetor, menor será a sua potência. Contudo, apesar de a potência ser menor, todos os nós apresentam uma potência mais uniforme. Desta forma, existem menos nós a dominar o canal, o que leva que menos transmissões sejam recebidas sem sucesso e mais transmissões sejam recebidas com sucesso, aumentando assim o desempenho do sistema.

Para que se aproveite a capacidade de um sistema MPR deve-se assim evitar uma grande discrepância entre as potências recebidas no nó recetor. Surge aqui a necessidade de um protocolo de controlo de acesso ao meio que permita atingir tal objetivo. Como tal, propõe-se neste capítulo dois protocolos MAC baseados no protocolo SPR+MPR considerado em 4.4.1. O primeiro considerando um controlo das potências de transmissão, e o segundo através do controlo das probabilidades de acesso, tendo em conta a localização dos nós emissores.

5.2. Controlo das potências de transmissão

De forma a evitar as discrepâncias nas potências recebidas, e sendo do conhecimento do recetor as potências recebidas de cada nó, obtidas através dos pedidos RTS que foram efetuados com sucesso, é possível conhecer qual o nó que enviou com a potência mínima, e a respetiva potência. Desta forma, uma vez que o recetor terá de enviar um pacote CTS com a informação dos nós que podem iniciar a sua transmissão, pode-se também incluir a informação desta potência nesse pacote. Assim, quando todos os nós tiverem recebido este pacote, saberão que existem outros a transmitir a potências mais baixas. Designando por P_i a potência recebida no recetor do i –ésimo nó, com $i \in \{1 \dots N_{max}\}$, então a potência mínima recebida é dada por

$$P_{min} = \min(P_i). \quad (5.1)$$

Propõe-se assim neste protocolo que todos os nós vencedores transmitam à potência mínima indicada pelo recetor. Isto permite que se consiga posteriormente receber as transmissões dos nós vencedores com todas as potências na mesma ordem de grandeza. Desta forma, é possível evitar as discrepâncias de potências que faziam com que as transmissões fossem descartadas prematuramente.

Conseguindo-se fazer um melhor aproveitamento do sistema MPR considerado, este protocolo permite assim dotar o recetor de um conhecimento das potências dos nós emissores que pretendem transmitir. Ao selecionar a menor potência transmissão, o recetor atinge um maior número de

transmissões recebidas com sucesso. Consegue-se assim aproveitar de uma forma mais eficaz as capacidades MPR do recetor através do aumento da semelhança entre as diferentes potências de envio dos nós.

5.2.1. Resultados

Tendo em conta o modelo descrito na secção anterior, para que se obtenha uma melhor avaliação do desempenho obtido por este protocolo, quando comparado com o seu antecessor, é necessário considerar as mesmas condições adotadas na secção 4.4.1. De forma a simplificar a implementação do protocolo, contudo sem perda de generalidade, admita-se assim uma janela fixa de tamanho $\omega = 20$ e uma probabilidade de acesso constante para todos os nós de $p = 0.05$. Tendo conta a equação (3.5), admita-se como limiar de decisão da condição de sucesso $b = 0.16$. Na figura 5.1 é possível observar o débito obtido para cada número de nós quando comparado ao seu antecessor, ou seja, o protocolo SPR+MPR considerado na secção 4.4.1., utilizando uma parametrização fixa, e não ótima.

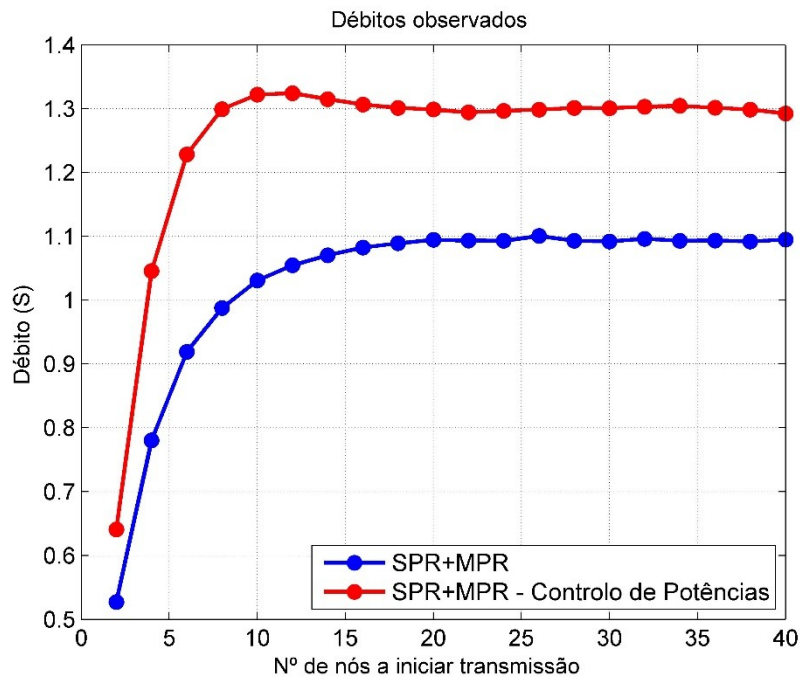


Figura 5.1 – Débito observado para protocolo proposto.

Tal como se pode observar, o débito atingido pelo protocolo proposto é superior ao obtido no protocolo SPR+MPR sem controlo de potência, confirmando-se assim as vantagens que existem no controlo dos nós que acedem ao meio. Estes resultados permitem mostrar a influência de fazer um melhor aproveitamento do canal e motivar o desenho de um protocolo MAC com suporte para MPR.

5.3. Controlo da probabilidade de acesso

No segundo protocolo, para que evitar a discrepância entre as potências recebidas no recetor e obter um melhor controlo dos nós que acedem, consideram-se diferentes probabilidades de acesso para as

diferentes distâncias a que os nós se encontram. Ou seja, sabendo que os nós se encontram a uma dada distância do recetor, e tendo sido verificado no capítulo 3.2.4. a influência da distribuição espacial dos nós no número de transmissões recebidas com sucesso, se o recetor atribuir diferentes probabilidades de acesso aos nós consoante a distância a que os mesmos se encontram do recetor, então é possível seleccionar os nós que permitem atingir melhores débitos.

Tendo em conta que o objetivo principal consiste em obter o maior débito possível, para que tal aconteça é necessário que não exista uma grande discrepância entre as potências recebidas no recetor, pois os nós com potências mais baixas poderão não ser recebidos corretamente no caso de serem sobrepostos pelos sinais de maior potência. Pelos efeitos de propagação estudados, sabe-se que para distâncias muito pequenas existe uma grande variação entre as potências e que quanto maior a distância, menor será a potência recebida. Desta forma, para que seja possível fazer uma seleção dos nós que terão maior probabilidade de serem recebidos com sucesso, pretende-se assim dar preferência de acesso aos nós que se encontrem mais longe do recetor, permitindo que esses nós possam aceder com uma maior probabilidade comparativamente com os nós que se encontrem a outras distâncias. Por corolário, os nós que se encontram a distâncias mais curtas terão uma probabilidade de acesso mais baixa, conseguindo-se assim restringir um pouco os nós que irão introduzir grandes discrepâncias nas potências recebidas.

Em seguida, tendo-se em conta os efeitos de propagação considerados no capítulo 3, é possível verificar no recetor quais as potências recebidas de cada nó, e verificar pela equação (3.5) quais as transmissões que são recebidas com sucesso.

5.3.1. Resultados

Para efeitos de simulação do protocolo proposto, considere-se um sistema com uma janela de negociação de $\omega = 20$ e um limiar de condição de sucesso, utilizado na equação (3.5) de $b = 0.16$. Considere-se também que os nós se encontram a uma distância D entre 1 e 10, em que 1 representa a menor distância que existe entre o nó e o recetor, e 10 representa a maior distância.

Tal como descrito anteriormente, as probabilidades de acesso variam consoante a distância a que o nó se encontra. Como tal, considere-se assim a função que representa as probabilidades de acesso em função da distância como

$$p(D) = \left(1 - \frac{1}{D}\right)^5 \cdot \gamma, \quad (5.2)$$

em que γ representa um factor ajustável entre 0 e 1 que serve para controlar o acesso dos nós ao meio. Para valores mais próximos de 1, os nós transmitem de uma forma mais agressiva, gerando por consequência mais colisões. Quanto menor for o valor de γ , mais restrito será o acesso ao meio. Para o presente caso, considera-se $\gamma = 0.1$. Esta função gera um conjunto de probabilidades de acesso que permite aos nós que estejam mais distantes do nó recetor aceder com uma maior prioridade que os nós que estejam mais perto. Tenta-se desta forma diminuir a discrepância entre as potências recebidas, pois os nós que estão localizados mais longe do recetor irão ser recebidos com uma potência mais baixa. Se os nós que estão mais longe acedem ao meio com maior probabilidade,

então existem também mais transmissões que são recebidas com potências mais baixas e, por sua vez, mais uniformes o que reduz a discrepância entre as potências.

Na figura 5.2 é possível observar o débito que se atinge com o protocolo proposto em comparação com protocolo SPR+MPR descrito em 4.4.1.

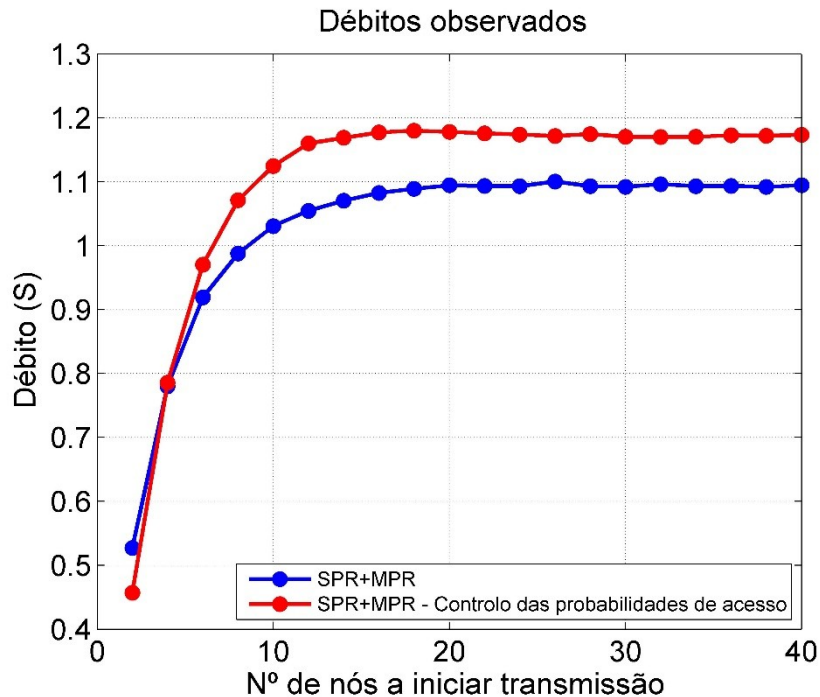


Figura 5.2 – Débito observado pelo protocolo proposto na segunda abordagem.

É aqui possível observar que o facto de cingir o acesso aos nós mais distantes, através das probabilidades de acesso, obtidas pela equação (5.2), permite obter melhores resultados. Isto deve-se ao facto de quando se cinge os acessos aos nós mais distantes, as potências que chegam ao recetor serão mais baixas. Contudo, como as mesmas são, em média, mais semelhantes, um maior número de transmissões poderá ser recebido com sucesso, permitindo assim o aumento do débito que se pode observar.

De forma a representar o compromisso que existe na escolha do parâmetro γ (por um lado não restringir demasiado o acesso dos nós, por outro evitar que se transmita de uma forma agressiva e se gerem colisões), observe-se na figura 5.3 o débito observado para diferentes valores de γ .

É possível observar que o débito atingido para $\gamma = 0.1$ é bastante superior aos casos em que se considera γ com valores mais altos. Visto que quanto maior for este valor, mais agressiva será a maneira com que os nós transmitem, irá ser gerado um grande número de colisões, algo que se acentua quando o número de nós a concorrer aumenta. Para valores mais baixos de γ , os nós transmitem de forma mais contida, o que permite atingir débitos superiores.

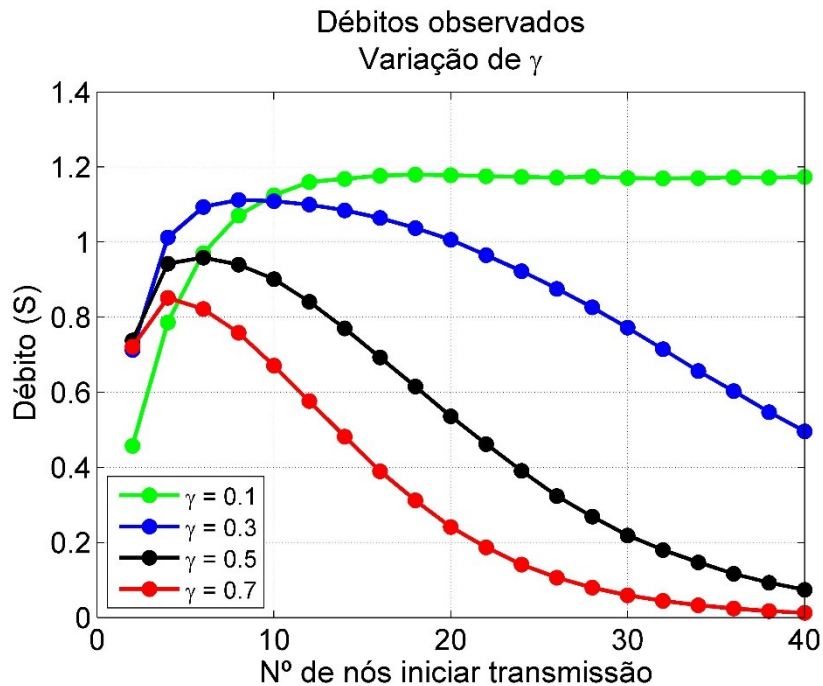


Figura 5.3 – Débitos obtidos para vários valores de γ .

5.4. Análise das abordagens propostas

Uma vez que o que se pretende atingir com este protocolo de acesso ao meio é evitar que exista uma grande discrepância entre as potências recebidas no recetor, optou-se por atingir este objetivo através do desenho de dois protocolos de acesso ao meio. No primeiro protocolo isto é feito através de um controlo de potências. Uma vez que o recetor terá de receber pedidos através dos pacotes RTS, é possível ao mesmo saber quais as potências que recebeu de cada nó transmissor. É também possível conhecer a menor potência recebida na fase de negociação. Assim, o recetor poderá fazer um pedido aos nós vencedores para iniciarem a sua transmissão com a menor potência que foi recebida, sendo esta informação enviada através do pacote CTS. Eliminam-se assim as grandes discrepâncias nas potências recebidas.

Por outro lado, no segundo protocolo não é realizado um controlo de potência, mas sim um controlo das probabilidades de acesso. Atribuindo a cada distância uma dada probabilidade de acesso, é possível ao recetor atribuir um acesso preferencial a alguns nós tendo a distância a que os mesmo se encontram. Uma vez que o que interessa ao recetor é receber as potências o mais semelhantes possível, e sabendo pelo estudado no capítulo 3 que as potências são mais semelhantes para distâncias superiores, é assim possível atribuir a estes nós uma probabilidade de acesso mais elevada, permitindo por consequência o aumento do número de recepções recebidas com sucesso, o que por sua vez conduz a um aumento do débito.

6

Conclusões

6.1. Considerações finais

Ao longo desta dissertação, têm sido abordados os sistemas de receção de pacotes múltiplos, começando pela caracterização do número de transmissões recebidas em simultâneo com sucesso. Admite-se um sistema MPR capaz de receber múltiplas transmissões em simultâneo e a existência de N_{max} nós que transmitem para o recetor. Os nós transmissores encontram-se distribuídos uniformemente. Desta forma, o sinal recebido é composto pela soma de todos os sinais transmitidos, que interferem entre si. Para que se possa determinar se uma transmissão é recebida com sucesso ou não, começa-se por estabelecer a condição de receção com sucesso. Construindo um modelo teórico para o nível físico, o qual considera os efeitos de propagação desvanecimento rápido, desvanecimento lento e perdas de propagação, é possível conhecer o modo como as potências de transmissão que são atenuadas pelos mesmos. Sabendo estas potências, é possível definir a condição de receção de sucesso como a relação entre a potência de um nó e a soma das potências interferentes. Se esta relação for superior a um determinado limiar, então a transmissão é recebida com sucesso. Desta forma, é possível caracterizar o número de transmissões que são recebidas com sucesso tendo em conta o número inicial de nós. Consequentemente, é possível caracterizar a probabilidade de receção individual. Estes modelos teóricos são validados pelos resultados das simulações.

É também estudado nesta dissertação o impacto da distribuição espacial dos nós, de modo a ter em conta a posição relativa entre os mesmos e a localização do recetor. Utilizando um modelo teórico e posterior validação através de simulações, é possível observar a influência que a distância a que os nós se encontram do recetor tem no número de transmissões recebidas com sucesso e, consequentemente, na probabilidade de receção com sucesso. Desta forma, é possível permitir um acesso ao meio a um conjunto de nós que, dada a sua distância ao recetor, permite um aumento do desempenho do protocolo.

Aplica-se em seguida o modelo de receção do nível físico a vários protocolos MAC, de forma a poder fazer uma avaliação comparativa entre os mesmos tendo em conta os débitos atingidos por cada um. Isto permite identificar quais os protocolos que permitem melhores desempenhos, sendo também possível comparar as características individuais de cada um. Como base de comparação para os modelos MPR, é realizado um estudo sobre a norma 802.11, verificando o débito atingido e considerando a hipótese da norma suportar MPR.

É também estudado um protocolo que consiste num sistema com uma fase de negociação que apenas suporta SPR e uma fase de transmissão com suporte para MPR. Na primeira fase os nós candidatos registam os seus pedidos através do envio de um pacote RTS num dos *slots* da fase de negociação. Visto apenas se suportar SPR nesta fase, apenas é permitido um único pacote RTS em cada *slot*, caso contrário todos os pedidos irão ser descartados. Os nós vencedores transmitem em simultâneo na fase de transmissão. De um modo análogo é também estudado o protocolo onde se admite MPR na fase de negociação. Neste caso, é possível a receção de vários pacotes RTS em cada *slot*. A fase de transmissão é semelhante ao protocolo anterior.

De forma a otimizar este protocolo, é estudada nesta dissertação a hipótese de existir uma probabilidade de acesso e um tamanho da janela da fase de negociação que permitam otimizar o débito atingido. Ao fazer variar destes parâmetros, verificou-se que existem efetivamente valores ótimos que permitem uma otimização do débito. Isto é também verificado nos protocolos SPR+MPR e MPR+MPR, onde se verifica que com a otimização de parâmetros se conseguem atingir débitos superiores ao que se obtém para valores não otimizados.

Além dos protocolos anteriores, são apresentados mais dois protocolos, desenvolvidos por Jung, *et al.*, que permitem aos nós iniciar as suas transmissões de uma forma assíncrona, ou seja, iniciando a transmissão durante uma fase de comunicação, evitando ter de esperar pelo término das transmissões decorrentes. Além da sua apresentação, estes são implementados, realizando simulações de modo a caracterizar o seu desempenho. No primeiro protocolo, designado de protocolo MAC oportunístico, os nós podem iniciar as suas transmissões com a restrição da duração das mesmas ser inferior à maior duração da transmissão decorrente. O segundo protocolo, designado de protocolo MAC assíncrono, não considera esta restrição, permitindo aos nós que se adicionem assincronamente sem nenhuma espera adicional. Nos dois protocolos, os nós iniciam as suas transmissões com uma probabilidade que é atualizada consoante a utilização do canal: quanto menor o número de vagas no canal, menor a probabilidade dos nós iniciarem a transmissão.

Realizando a comparação entre os cinco protocolos estudados, é possível observar que os protocolos MAC desenvolvidos por Jung, *et al.* [JL11] e [JKL12] atingem maiores débitos que os restantes, aproveitando de uma forma mais eficaz as capacidades do sistema MPR. Contudo, é possível observar diferentes características: no protocolo assíncrono, para um número de nós sensivelmente baixo, este apresenta um débito superior. No entanto, quanto maior for o número de nós, o protocolo oportunístico começa a atingir débitos superiores ao protocolo oportunístico. Mostra-se desta forma que apesar da restrição imposta por este protocolo, relativamente à duração da transmissão dos nós ser inferior à maior transmissão decorrente, esta acaba por ser uma vantagem quando o número de nós concorrentes é mais elevado, evitando desta forma que o número de nós a iniciar

transmissão e a ocupar o canal seja de tal forma elevado que se excedam as capacidades do canal. De notar que nos dois protocolos desenvolvidos por Jung, *et al.* apesar de atingirem débitos bastante superiores aos restantes protocolos MAC, isto não se deve exclusivamente ao protocolo de controlo de acesso ao meio uma vez que se admite que no nível físico é possível que os nós transmissores se adicionem ao canal. Contudo, as técnicas de nível físico atuais não se encontram aprimoradas o suficiente para permitir que isto aconteça. Como tal, para efeitos de avaliação entre comparação protocolos, deve-se ter em conta que estes dois protocolos introduzem alguma desvantagem relativamente aos restantes protocolos analisados que atingem os débitos observados apenas devido ao controlo de acesso ao meio.

Um dos principais problemas observados em sistemas MPR reside na grande discrepância entre as potências recebidas no recetor, o que faz com que os sinais com potências mais baixas sejam completamente sobrepostos pelos que têm potências maiores. Pela condição de receção com sucesso, isto impede que muitos desses nós não sejam recebidos com sucesso. Para resolver este problema, são propostos nesta dissertação dois protocolos de acesso ao meio com suporte para múltiplas receções em simultâneo, baseando-se as mesmas no protocolo SPR+MPR estudado em 4.4.1. Um dos protocolos consiste no controlo das potências de transmissão. Sabendo que o recetor conhece as potências de transmissão recebidas de cada nó, pois recebe um pacote RTS de cada nó, é possível verificar a mínima potência que foi recebida. Ao informar os nós desta potência, os mesmos ficam a saber que existem potências inferiores à sua a ser recebidas. Os nós vencedores podem assim transmitir a potência referida pelo recetor, e assim não existirá uma discrepância tão grande entre as potências.

O segundo protocolo não utiliza controlo de potência, mas faz o controlo das probabilidades de acesso ao meio. Visto que cada nó se encontra a uma dada distância do recetor, ao dar acesso preferencial aos nós que se encontrem mais longe, haverá mais nós a transmitir a uma potência mais baixa, o que baixa a discrepância entre as potências. Este acesso preferencial tem em conta o desempenho global do sistema, ao permitir que os nós mais distantes transmitam com mais probabilidade, é possível receber com sucesso mais transmissões, o que permite atingir um maior débito.

Ao comparar os protocolos MAC propostos com os protocolos MAC desenvolvidos por Jung, *et al.*, estes últimos atingem débitos superiores. Contudo, como descrito anteriormente, os resultados observados devem-se não só ao protocolo MAC mas também ao nível físico, partindo do pressuposto que existem técnicas que permitam aos nós adicionar-se ao canal, o que, de acordo com as técnicas de nível físico para sistemas MPR, ainda não é possível realizar. Desta forma, para analisar de uma forma mais eficaz os protocolos propostos, realiza-se uma comparação com o protocolo SPR+MPR em que os mesmos se basearam. É possível observar que se consegue atingir débitos superiores ao que se conseguia previamente. Isto permite revelar as vantagens da utilização de um protocolo de acesso ao meio com suporte para múltiplas receções em simultâneo, revelando-se assim as verdadeiras capacidades de um sistema MPR.

6.2. Trabalho futuro

Nesta dissertação foram propostos dois novos protocolos de controlo de acesso ao meio tendo em conta a distribuição espacial dos nós. Como trabalho futuro devem ser desenvolvidas novas metodologias de controlo de acesso ao meio. Visto que com os protocolos propostos, tendo em conta a distribuição dos nós, é possível mostrar que se pode fazer um melhor aproveitamento das capacidades do sistema MPR, importa assim continuar a desenvolver não só estas filosofias de controlo de acesso de acesso ao meio mas também novas técnicas de receção de múltiplos pacotes para que se consigam obter ainda melhores desempenhos e também obter um maior número de soluções para um desafio que está nos seus primórdios.

Algumas das técnicas a considerar consistem na utilização das parametrizações ótimas no caso dos protocolos com fase de negociação e de transmissão. Foi mostrado nesta dissertação que ao utilizar os valores ótimos do tamanho da janela de negociação e da probabilidade de acesso aos respetivos *slots* é possível obter melhores desempenhos. Como tal, devem ser estudadas técnicas do cálculo destas parametrizações ótimas em tempo real de forma a poder obter sempre as melhores condições possíveis, obtendo desta forma melhores desempenhos e também um melhor aproveitamento dos sistemas MPR.

Bibliografia

- [Cov72] T. Cover. "Broadcast channels". Em: IEEE Transactions on Information Theory 18.1 (jan. de 1972), pp. 2–14.
- [DEV86] L. Devroye. "Non-Uniform Random Variate Generation". E: New York: Springer-Verlag. (1986), pp. 27–35.
- [ERF12] M. Esslaoui, F. Riera-Palou e G. Femenias. "A fair MU-MIMO scheme for IEEE 802.11ac". Em: IEEE International Symposium on Wireless Communication. (2012), pp. 1049-1053.
- [GVS89] S. Ghez, S. Verdu e S. Schwartz. "Optimal decentralized control in the random access Multipacket channel". Em: IEEE Transactions on Automatic Control 34.11 (nov. de 1989), pp. 1153–1163.
- [HAL97] B. Hajek, K. A. E R. LaMaire. "On the capture probability for a large number of stations". Em: IEEE Transactions on Communications 45.2 (fev. De 1997), pp. 254–260.
- [HaP97] S. Hara, R. Prasad. "Overview of multicarrier CDMA". Em: IEEE communication Magazine (1997), pp,126-133.
- [JL11] D. Jung e H. Lim. "Opportunistic MAC Protocol for Coordinating Simultaneous Transmissions in Multi-User MIMO Based WLANs". Em: IEEE Communications Letters 15.8 (ago. de 2011), pp. 902–904.
- [JKL12] D. Jung, R. Kim e H. Lim. "Asynchronous Medium Access Protocol for Multi-User MIMO Based Uplink WLANs". Em: IEEE Transactions on Communications 60.12 (dez. de 2012), pp. 3745–3754.
- [NEW06] G. Nguyen, A. Ephremides e J. Wieselthier. "On Capture in Random-Access Systems". Em: IEEE International Symposium on Information Theory (2006), pp. 2072–2076.
- [PAY04] G. Parsaee, A. Yarali. "OFDMA for the 4th generation cellular networks". Em: Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (Vol. 4) (2004), pp. 2325-2330.
- [SWGLA10] H. Sadjadpour, Z. Wang e J. J. Garcia-Luna-Aceves. "The capacity of wireless ad hoc networks with multi-packet reception". Em: IEEE Transactions on Communications 58.2 (fev. de 2010), pp. 600–610.
- [WAY2007] S. Weber, J. Andrews, X. Yang. "Transmission Capacity of Wireless Ad Hoc Networks With Successive Interference Cancellation". Em: IEEE Transactions on Information Theory 53.8 (ago. de 2007), pp. 2779-2814.
- [Zha10] Y. Zhang. "Multi-round contention in wireless LANs with multipacket reception". Em: IEEE Transactions on Wireless Communications 9.4 (abr. de 2010), pp. 1503–1513.
- [MAT12] MATLAB 8.0, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States. (2012)