



**Gonçalo Ferreira Lourenço**

Licenciado em Ciências da Engenharia Electrotécnica  
e de Computadores

## **Redes de Acesso Aleatório com Capacidade de Receção de Múltiplos Pacotes**

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

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

Júri:

Presidente: Doutor Rui Miguel Henriques Dias Morgado Dinis

Arguente: Doutor Nuno Manuel Branco Souto

Vogal: Doutor Rodolfo Alexandre Duarte Oliveira



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro, 2014**



## **Redes de Acesso Aleatório com Capacidade de Receção de Múltiplos Pacotes**

Copyright © Gonçalo Ferreira Lourenço, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm 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 objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



*Aos meus pais.*



# Agradecimentos

Ao Professor Rodolfo Oliveira pela sua dedicação, rigor, motivação e paciência. Pelo contágio no gosto pela investigação nas telecomunicações. Pelos desafios e pelas ferramentas que me deu para encarar os problemas ao longo deste ano. E claro, pela sua total disponibilidade, que mesmo sobrelotado de trabalho nunca me deixou sem resposta.

À Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo apoio prestado através dos projetos NEUF (PTDC/EEA- TEL/120666/2010), ADIN (PTDC/EEI-TEL/2990/2012) e MANY-2COMWIN (EXPL/EEI-TEL/0969/2013).

Ao Pedro Ferreira, Diogo Gameiro e Rui Silva por toda a ajuda, motivação e partilha de noites de estudo na faculdade. Pela vossa amizade nos momentos de responsabilidade (Pedro), preguiça (Gameiro) e animação (Rui Silva).

Ao Fábio Favinha que tanto me ensinou e apoiou no NEEC, EESTEC e tantos outros desafios dentro e fora da FCT. Ao Daniel Marques pelos momentos de desespero partilhados no gabinete 3.5. E ao Miguel Fernandes pela amizade, companhia e pelos almoços e jantares (que não pagou). Boa sorte para o Doutoramento!

À Sofia Lourenço pela amizade, cumplicidade e momentos passados em família e amigos.

Ao Henrique Cabral por tudo o que me ensinou, pela oportunidade e confiança. Por me mostrar o que realmente tem, e merece, valor.

À minha mãe pela compreensão e liberdade de escolha, pelas noites não dormidas e por nunca me ter faltado nada.

Ao meu pai pelo esforço e paciência comigo, e pelo engenho e 'saber fazer' que dele herdei.

Ao Tiago pelos caminhos que por ti foram abertos, pela fraternidade e amizade.

Um agradecimento especial à Laura Mager por todo o carinho, paciência, apoio e inspiração. Pela motivação nos momentos mais difíceis e por nunca ter deixado de acreditar que seria possível tornar-me Engenheiro.



# Resumo

---

Com o aumento do número de dispositivos móveis, os sistemas de comunicação sem fios têm evoluído de forma a aumentar os débitos de transferência de dados. Nos sistemas de comunicação sem fios tradicionais, um nó recetor apenas permite a receção de um sinal de cada vez (Single Packet Reception - SPR). Com o aparecimento de técnicas de receção múltipla (ex. CDMA, UWB, MU-MIMO), tornou-se possível a receção de múltiplos pacotes em simultâneo (*Multipacket Reception* - MPR). Porém, os protocolos de controlo de acesso ao meio (MAC) não foram adaptados de forma a tirar partido da capacidade de MPR no recetor.

Esta dissertação aborda a condição de receção de múltiplos pacotes em simultâneo, caracterizando o número médio de pacotes recebidos, tendo em conta o número total de transmissões. A partir desta caracterização, é estudado o desempenho de três protocolos MAC. Os protocolos são baseados numa fase de negociação seguida de uma fase de transmissão. A caracterização do número médio de pacotes recebidos permite avaliar de uma forma integrada (nível físico e MAC) o desempenho dos diferentes protocolos MAC. Finalmente, a avaliação de desempenho evidencia o aumento de débito quando é utilizado MPR nas duas fases (negociação e transmissão), o que constitui um bom ponto de partida para o desenho de futuros protocolos MAC para sistemas MPR.

**Palavras-chave:** Sistemas de Receção de Múltiplos Pacotes, Protocolos de Acesso ao Meio, modelação e avaliação de desempenho.

---



# Abstract

---

With the increasing number of mobile terminals there has been a strong effort to increase the throughput of the wireless communication systems. In the traditional systems, a receiver only allows the reception of a single signal at a time (Single Packet Reception - SPR). With the development of new techniques tailored to allow multiple reception (CDMA, UWB, MU-MIMO), it became possible to receive multiple packets simultaneously (Multipacket Reception - MPR). However, the existing medium access control (MAC) protocols have not been adapted to take the advantages of the proposed MPR schemes.

This dissertation analyzes the receiving condition when MPR schemes are adopted, characterizing the average number of packets received with success when the total number of parallel transmissions are known. Based on this characterization, the performance of three medium access control protocols is studied. The protocols are based on a negotiation stage followed by a transmission stage. The characterization of the average number of successfully received packets allows an integrated assessment (physical and MAC layers) of the performance of different MAC protocols. Finally, several results presented in this work show an increase of the throughput when MPR is adopted in both stages (negotiation and transmission), which recommends this kind of protocol's design to future MPR systems.

**Keywords:** Multipacket Reception Systems, Medium Access Control Protocols, modeling and performance evaluation.

---



# Conteúdo

|                                                         |             |
|---------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Agradecimentos</b>                                   | <b>vii</b>  |
| <b>Resumo</b>                                           | <b>xi</b>   |
| <b>Abstract</b>                                         | <b>xiii</b> |
| <b>Acrónimos</b>                                        | <b>xxi</b>  |
| <b>1 Introdução</b>                                     | <b>1</b>    |
| 1.1 Introdução . . . . .                                | 1           |
| 1.2 Objetivos e Contribuições . . . . .                 | 2           |
| 1.3 Estrutura da Dissertação . . . . .                  | 4           |
| <b>2 Trabalho Relacionado</b>                           | <b>5</b>    |
| 2.1 Introdução . . . . .                                | 5           |
| 2.2 Protocolos Distribuídos de Acesso ao Meio . . . . . | 6           |
| 2.2.1 Carrier Sense Multiple-Access . . . . .           | 6           |
| 2.2.2 Opportunistic MAC Protocol . . . . .              | 8           |
| 2.2.3 Multi-Round Contention Random-Access . . . . .    | 11          |
| 2.2.4 Asynchronous Medium Access Protocol . . . . .     | 13          |
| 2.2.5 Generic Distributed Probabilistic . . . . .       | 15          |
| 2.3 Comparação dos Protocolos . . . . .                 | 20          |
| <b>3 Recepção de Múltiplos Pacotes</b>                  | <b>23</b>   |
| 3.1 Condição de Recepção . . . . .                      | 23          |
| 3.2 Probabilidade de Recepção Individual . . . . .      | 25          |
| 3.2.1 Caracterização Teórica . . . . .                  | 25          |
| 3.2.2 Validação . . . . .                               | 27          |

|          |                                                               |           |
|----------|---------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3      | Caracterização do Número Médio de Pacotes Recebidos . . . . . | 39        |
| 3.3.1    | Desvanecimento Rápido . . . . .                               | 39        |
| 3.3.2    | Desvanecimento Lento . . . . .                                | 42        |
| 3.3.3    | Perdas de Propagação . . . . .                                | 43        |
| 3.3.4    | Cenário com os três efeitos . . . . .                         | 45        |
| <b>4</b> | <b>Protocolo MAC</b>                                          | <b>47</b> |
| 4.1      | Introdução . . . . .                                          | 47        |
| 4.2      | Protocolo A: SPR+MPR . . . . .                                | 51        |
| 4.3      | Protocolo B: MPR-limitado+MPR . . . . .                       | 52        |
| 4.4      | Protocolo C: MPR+MPR . . . . .                                | 52        |
| 4.5      | Validação de Resultados . . . . .                             | 53        |
| 4.5.1    | Protocolo A: SPR+MPR . . . . .                                | 53        |
| 4.5.2    | Protocolo B: MPR-limitado + MPR . . . . .                     | 56        |
| 4.5.3    | Protocolo C: MPR + MPR . . . . .                              | 58        |
| 4.6      | Comparação dos Protocolos . . . . .                           | 60        |
| <b>5</b> | <b>Conclusões</b>                                             | <b>63</b> |
| 5.1      | Considerações Finais . . . . .                                | 63        |
| 5.2      | Trabalho Futuro . . . . .                                     | 64        |

# Lista de Figuras

|      |                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1  | Protocolo MAC proposto em [JL11]. . . . .                                                                                                                                                                                                                    | 9  |
| 2.2  | Contenção Multi-round para a norma IEEE 802.11 WLAN proposto em [Zha10]. . . . .                                                                                                                                                                             | 12 |
| 2.3  | Protocolo MAC assíncrono proposto em [JKL12]. . . . .                                                                                                                                                                                                        | 14 |
| 2.4  | Diagrama de estados do protocolo GDP proposto em [CZKM10]. . . . .                                                                                                                                                                                           | 16 |
| 2.5  | Probabilidade de transmissão e rendimento no protocolo GDP. Usando $p_{ts} = 0.2, p_{tf} = 0.05$ no <i>Standard Model</i> e $p_{ts} = 0.05, p_{tf} = 0.2$ no <i>Alternate Model</i> . Com $\alpha = 2$ e $n = 12$ num disco de raio 1. Proposto em [CZKM10]. | 18 |
| 2.6  | Cadeia de Markov com as possíveis transições de estado, a partir de (4,6), com $n_1 = 6$ e $n_2 = 10$ , proposto em [CZKM10]. . . . .                                                                                                                        | 18 |
| 3.1  | Distribuição de probabilidades obtidas com <i>Rayleigh</i> (RL) admitindo $b = 0.02$ . . . . .                                                                                                                                                               | 29 |
| 3.2  | Distribuição de probabilidades obtidas com RL admitindo $b = 0.01$ . . . . .                                                                                                                                                                                 | 30 |
| 3.3  | Distribuição de probabilidades obtidas com RL admitindo $b = 0.04$ . . . . .                                                                                                                                                                                 | 30 |
| 3.4  | Distribuição de probabilidades obtidas com LN admitindo $b = 0.02$ . . . . .                                                                                                                                                                                 | 32 |
| 3.5  | Distribuição de probabilidades obtidas com LN admitindo $b = 0.01$ . . . . .                                                                                                                                                                                 | 32 |
| 3.6  | Distribuição de probabilidades obtidas com LN admitindo $b = 0.04$ . . . . .                                                                                                                                                                                 | 33 |
| 3.7  | Distribuição de probabilidades obtidas com PL admitindo $b = 0.02$ . . . . .                                                                                                                                                                                 | 35 |
| 3.8  | Distribuição de probabilidades obtidas com PL admitindo $b = 0.01$ . . . . .                                                                                                                                                                                 | 36 |
| 3.9  | Distribuição de probabilidades obtidas com PL admitindo $b = 0.04$ . . . . .                                                                                                                                                                                 | 36 |
| 3.10 | Distribuição de probabilidades obtidas em LN com limiar $b = 0.02$ . . . . .                                                                                                                                                                                 | 37 |
| 3.11 | Distribuição de probabilidades obtidas com limiar $b = 0.01$ . . . . .                                                                                                                                                                                       | 38 |
| 3.12 | Distribuição de probabilidades obtidas com limiar $b = 0.04$ . . . . .                                                                                                                                                                                       | 39 |

|      |                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.13 | Número médio de pacotes recebidos vs. número de pacotes transmitidos com RL . . . . .                                                                                                                                                | 41 |
| 3.14 | Número médio de pacotes recebidos vs. número de pacotes transmitidos com <i>Lognormal</i> (LN) . . . . .                                                                                                                             | 43 |
| 3.15 | Número médio de pacotes recebidos vs. número de pacotes transmitidos com <i>Path Loss</i> (PL) . . . . .                                                                                                                             | 45 |
| 3.16 | Número médio de pacotes recebidos vs. número de pacotes transmitidos com RL + LN + PL . . . . .                                                                                                                                      | 46 |
| 4.1  | Protocolo MAC baseado em [Zha10]. . . . .                                                                                                                                                                                            | 48 |
| 4.2  | Número de nós a acederem à fase de transmissão com os efeitos de propagação RL + LN + PL para Receção de Pacote Único ( <i>Single Packet Reception</i> ) (SPR)+Receção Multi-Pacote ( <i>Multipacket Reception</i> ) (MPR) . . . . . | 54 |
| 4.3  | $R_{Tx}$ na fase de transmissão com RL + LN + PL para SPR+MPR . . . . .                                                                                                                                                              | 54 |
| 4.4  | Débito na transmissão com os efeitos de propagação RL + LN + PL para SPR+MPR com 29 <i>slots</i> RTS . . . . .                                                                                                                       | 55 |
| 4.5  | Débito na transmissão com os efeitos de propagação RL + LN + PL para SPR+MPR com 9 <i>slots</i> RTS . . . . .                                                                                                                        | 56 |
| 4.6  | Número de nós a acederem à fase de transmissão com os efeitos de propagação RL + LN + PL para MPR-limitado+MPR . . . . .                                                                                                             | 57 |
| 4.7  | $R_{Tx}$ com RL + LN + PL para MPR-limitado+MPR . . . . .                                                                                                                                                                            | 57 |
| 4.8  | Débito na transmissão com RL + LN + PL para MPR-limitado+MPR . . . . .                                                                                                                                                               | 58 |
| 4.9  | Número de nós a acederem à fase de transmissão com os efeitos de propagação RL + LN + PL para MPR+MPR . . . . .                                                                                                                      | 59 |
| 4.10 | $R_{Tx}$ com RL + LN + PL para MPR+MPR . . . . .                                                                                                                                                                                     | 59 |
| 4.11 | Débito na transmissão com RL + LN + PL para MPR+MPR . . . . .                                                                                                                                                                        | 60 |
| 4.12 | Débito na transmissão dos três protocolos. . . . .                                                                                                                                                                                   | 61 |

# Lista de Tabelas

|      |                                                                                                             |    |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1  | Tabela de comparação dos protocolos propostos. . . . .                                                      | 20 |
| 3.1  | Tabela de validação de $p_s$ em RL . . . . .                                                                | 29 |
| 3.2  | Tabela de validação de $p_s$ assumindo desvanecimento do tipo LN e admitindo $b = 0.02$ . . . . .           | 31 |
| 3.3  | Tabela de validação de $p_s$ assumindo desvanecimento do tipo PL e admitindo $b = 0.02$ . . . . .           | 34 |
| 3.4  | Tabela de $p_s$ para RL+LN+PL. . . . .                                                                      | 37 |
| 3.5  | Número médio de pacotes recebidos com RL. . . . .                                                           | 40 |
| 3.6  | Tabela de validação de $E_r = n * p_s$ assumindo desvanecimento do tipo RL e admitindo $b = 0.02$ . . . . . | 40 |
| 3.7  | Número médio de pacotes recebidos com LN . . . . .                                                          | 42 |
| 3.8  | Tabela de validação de $E_r = n * p_s$ assumindo desvanecimento do tipo LN e admitindo $b = 0.02$ . . . . . | 42 |
| 3.9  | Número médio de pacotes recebidos com PL . . . . .                                                          | 44 |
| 3.10 | Tabela de validação de $E_r = n * p_s$ assumindo desvanecimento do tipo PL e admitindo $b = 0.02$ . . . . . | 44 |
| 3.11 | Número médio de pacotes recebidos com RL + LN + PL. . . . .                                                 | 46 |



# Acrónimos

**ACK** Confirmação (*Acknowledge*)

**AF** Após Falha (*After Failure*)

**AWGN** Additive White Gaussian Noise

**AP** Ponto de Acesso (*Access Point*)

**AS** Após Sucesso (*After Success*)

**CDF** Função de Distribuição Cumulativa

**CSMA** *Carrier Sense Multiple Access*

**CSMA/CA** Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

**CDMA** *Code Division Multiple Access*

**CTS** Permissão Para Envio (*Clear to send*)

**DCF** *Distributed Coordination Function*

**PDF** Função Densidade de Probabilidade

**GDP** *Generic Distributed Probabilistic*

**IC** intervalo de confiança

**IEEE** *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

**LN** *Lognormal*

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

**MIMO** *Multiple-Input and Multiple-Output*

**MPR** Recepção Multi-Pacote (*Multipacket Reception*)

**MU-MIMO** *Multi-User MIMO*

**MPU** Muitos-Para-Um

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

**PL** *Path Loss*

**RL** *Rayleigh*

**RTS** Pedido Para Envio (*Request to send*)

**SIC** *Successive Interference Cancellation*

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

**SPR** Recepção de Pacote Único (*Single Packet Reception*)

**UPM** Um-Para-Muitos

**UPU** Um-Para-Um

**UWB** Banda Ultra-Larga (*Ultra-Wideband*)

**WLANs** Redes Locais Sem Fios



# Introdução

## 1.1 Introdução

A grande popularidade das Redes Locais Sem Fios (WLANs) observada nos últimos anos, originou a necessidade de uma coordenação de dispositivos mais eficiente, capaz de organizar a comunicação entre vários dispositivos que utilizam o mesmo meio. Em 1997, o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) desenvolveu a norma 802.11, que possibilitava esta organização, permitindo a comunicação sem fios num meio partilhado por vários dispositivos. Esta norma é responsável pela presente popularidade das WLANs, sendo cada vez mais comum a presença de WLANs em residências, espaços comerciais, universidades e espaços públicos. Tendo cada vez mais sucesso, as WLANs permitem uma redução de custos para os operadores de comunicações, sendo a sua instalação cada vez mais simplificada através de técnicas do tipo "*plug and play*". Estes factos motivam e explicam a aposta e o investimento nas WLANs levada a cabo pelos diferentes operadores de comunicações e outras entidades.

Na norma 802.11 o acesso ao meio é efetuado tendo em consideração que o recetor tem capacidade de processar apenas um sinal, sendo por isso denominado de sistema de comunicações Receção de Pacote Único (*Single Packet Reception*) (SPR). Isto significa que os protocolos de Controlo de Acesso ao Meio (*Medium Access Control* - MAC), como *Carrier Sense Multiple Access* (CSMA), ALOHA, etc., foram desenhados para que num cenário onde  $n$  nós competem pelo acesso ao meio, a probabilidade de mais do que um nó aceder ao meio em simultâneo seja muito baixa.

Em 2013 foi introduzida a norma 802.11ac, a qual é capaz de receber comunicações em paralelo, permitindo a descodificação simultânea de múltiplos pacotes oriundos de diferentes fontes transmissoras, através da técnica denominada *Multi-User MIMO* (MU-MIMO). Esta norma deu resposta à necessidade de um nó recetor ser capaz de suportar um elevado número de nós a comunicar para o meio, permitindo que o recetor tenha capacidade de Receção Multi-Pacote (*Multipacket Reception*) (MPR).

Apesar da existência de técnicas de receção múltipla, os mecanismos de acesso ao meio (ex. CSMA, ALOHA, etc.) utilizados atualmente foram desenhados assumindo capacidade SPR no recetor. Dessa forma, os protocolos atualmente utilizados não foram especificados para suportar o facto de múltiplos pacotes poderem ser recebidos com sucesso, e os protocolos MAC não aproveitam todas as potencialidades introduzidas pelos esquemas MPR [CZKM10].

De forma a suportar o crescente número de nós transmissores num meio partilhado, é necessária a especificação de novos protocolos MAC que tirem partido da capacidade MPR dos nós recetores, permitindo transmissões paralelas. Os novos protocolos de acesso ao meio especificamente desenhados para os sistemas MPR irão permitir o aumento do débito de transferência de dados e o aumento da justiça de acesso ao meio.

## 1.2 Objetivos e Contribuições

Tendo conhecimento dos efeitos de propagação que condicionam o valor da potência na receção, nomeadamente as perdas por propagação (*Path Loss* (PL)) e o desvanecimento lento e rápido (*fading*), esta dissertação tem como objetivo inicial a caracterização do desempenho de um sistema de receção de múltiplos pacotes (sistema MPR), determinando o número médio de transmissões com sucesso, dado o número de nós que transmitem. O segundo objetivo deste trabalho consiste em caracterizar o desempenho de diferentes técnicas distribuídas de acesso ao meio, assumindo um sistema de nível físico do tipo MPR.

Estudando a influência dos efeitos de propagação no sucesso da transmissão de pacotes, quando vários nós transmitem em simultâneo para um recetor com capacidade de MPR, é proposto um modelo para a probabilidade individual de receção com sucesso,

tendo em consideração os efeitos de propagação e o modo com que estes atenuam a potência do sinal. Desta forma é possível determinar o número médio de pacotes recebidos com sucesso ( $r$ ) quando  $n$  pacotes são transmitidos em simultâneo. A condição de recepção assumida neste trabalho assume que a recepção de um pacote obtém sucesso se a potência que define o *Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio* (SINR) recebido for superior a um determinado limiar (*Threshold*) [NEW06].

Este trabalho caracteriza o desempenho de três protocolos Controlo de Acesso ao Meio (*Medium Access Control*) (MAC) para sistemas MPR, partindo do número médio de pacotes recebidos com sucesso dados pelo modelo do sistema MPR. Os protocolos apresentam uma ronda de comunicação dividida em duas fases. Na fase de negociação os nós realizam um pedido de reserva, após o qual o recetor informa quais os nós autorizados a transmitir. Na fase de transmissão os nós autorizados transmitem em simultâneo para um determinado recetor.

Os protocolos diferem na fase de negociação, sendo que o primeiro não utiliza comunicação MPR na recepção de pedidos de reserva, isto é, o recetor só recebe um pedido de reserva com sucesso quando é transmitido apenas um pedido. No segundo protocolo adota-se MPR limitado a um valor  $\beta$  por *slot*, na fase de negociação. Desta forma, quando o número de transmissões é superior a  $\beta$  assume-se que o número de recepções com sucesso fica limitado a  $\beta$ . No terceiro protocolo o número de transmissões recebidas com sucesso num *slot* da fase de negociação é dado pelo modelo MPR proposto nesta dissertação.

Na fase de transmissão dos três protocolos é utilizado MPR, pelo que dos  $N_{Tx}$  nós autorizados a transmitir, apenas  $R_{Tx}$  (determinado através do modelo descrito neste trabalho) transmitem com sucesso.

Por fim, é caracterizado e comparado o débito de transferência de dados atingido pelos protocolos.

### 1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos. O Capítulo 1, descreve os objetivos e contribuições do trabalho. No Capítulo 2 são resumidos alguns trabalhos já realizados nesta área, apresentando algumas propostas de protocolos MAC estudados para MPR. O estudo da Recepção de Múltiplos Pacotes é descrito no Capítulo 3, com a caracterização da Condição de Recepção, estudo da Probabilidade de Recepção Individual (modelo teórico e validação) e Caracterização do Número Médio de Pacotes Recebidos, tendo em conta os efeitos de propagação. O modelo proposto é validado através de simulações para diferentes condições de propagação e número de nós que transmitem. Este capítulo apresenta ainda uma análise do número médio de pacotes recebidos considerando diversas condições de propagação. No Capítulo 4 são apresentados os três protocolos de controlo de acesso ao meio que assumem um sistema de nível físico do tipo MPR. Diversas considerações finais, bem como a descrição de alguns pontos propostos para trabalho futuro são finalmente apresentados no Capítulo 5, o qual encerra a dissertação.



# Trabalho Relacionado

## 2.1 Introdução

O sucesso das redes sem fios observado nos últimos anos tem motivado o desenvolvimento de metodologias para o aperfeiçoamento das técnicas de transmissão. Durante décadas, existiu a preocupação de tornar eficiente a transmissão de sinais, assumindo que o sucesso na receção de tramas de dados consistia em ter apenas um dispositivo a comunicar para o meio, em sistemas *unicast* - Um-Para-Um (UPU), ou sistemas *broadcast* - Um-Para-Muitos (UPM). Nos sistemas UPU um nó emissor transmite para um nó receptor, enquanto que nos sistemas UPM um nó emissor transmite para vários receptores. Esta filosofia motivou diversos estudos de desempenho de protocolos de MAC, nomeadamente os protocolos que permitem evitar a colisão de dados quando dois ou mais dispositivos pretendem transmitir informação no mesmo instante temporal.

Na norma IEEE 802.11, é utilizado o protocolo MAC do tipo Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA), em que quando há transmissão por parte de um nó, e este deteta a existência de uma colisão, é incrementada a sua janela de contenção. O que leva, em consequência, à diminuição da probabilidade de transmissão e ao decréscimo do débito de transmissão de dados. Derivam, desta forma, injustiças relativas à prioridade de acesso ao canal de transmissão, quando comparadas as probabilidades dos nós.

Com a necessidade de aumento de desempenho das tecnologias de transmissão sem

fios, surgiu uma mudança no paradigma, nomeadamente com a introdução de sistemas de Banda Ultra-Larga (*Ultra-Wideband*) (UWB), *Multiple-Input and Multiple-Output* (MIMO) e *Code Division Multiple Access* (CDMA). Este tipo de sistemas de comunicações possuem a capacidade de decodificar múltiplos pacotes em simultâneo no recetor [GVS89]. Esta inclusão torna capaz a existência, nas WLANs, de um sistema Muitos-Para-Um (MPU), permitindo que haja um aumento da capacidade de débito na transmissão [SWGLA10], [CZKM10]. No entanto, a introdução desta tecnologia de Receção Multi-Pacote (*Multipacket Reception*) (MPR), não revela por si só um aumento no débito de transferência de dados. Os mecanismos de acesso ao meio baseados em contenção (ex. CSMA/CA na norma IEEE 802.11) não foram desenhados para acomodar MPR, e continuam a gerar débitos reduzidos e a apresentar critérios injustos na disputa pela acesso ao canal de transmissão [CZKM10].

É por isso necessário criar protocolos que permitam maximizar o débito numa rede em que os nós adaptem uma técnica de transmissão do tipo MPR, em especial nas redes não infra-estruturadas, as quais apresentam desafios mais elevados pela natureza distribuída dos algoritmos que nela são executados.

## 2.2 Protocolos Distribuídos de Acesso ao Meio

### 2.2.1 Carrier Sense Multiple-Access

Chan *et al*, em [CBT13] caracterizam a probabilidade de  $k$  nós transmitirem com sucesso, quando existem  $n$  nós a transmitir para um Ponto de Acesso (*Access Point*) (AP), utilizando o protocolo (MAC) CSMA tradicional aplicado a cenários cuja receção tem capacidade MPR. O protocolo CSMA, apresentado por Kleinrock *et al* em [KT75] foi desenvolvido com o objetivo de organizar o acesso ao meio em sistemas de WLANs com Receção de Pacote Único (*Single Packet Reception*) (SPR). O protocolo é utilizado na norma IEEE 802.11, e coordena os nós/estações que pretendem transmitir dados para um AP, de modo a evitar transmissões simultâneas de pacotes, provenientes de diferentes nós. Num sistema tradicional SPR, o AP não consegue decodificar mais do que um pacote em simultâneo, considerando os pacotes transmitidos simultaneamente como colisão, causando insucesso nas transmissões. Desta forma, antes de um nó/estação transmitir,

deve saber se está a ocorrer alguma transmissão no canal. Se o canal estiver ocupado, o nó inicia um período de contenção onde não irá causar interferência no canal. Após este período, o nó decide, consoante uma certa probabilidade, se deve transmitir ou iniciar um novo período de contenção.

Chan *et al*, em [CBT13], investigaram o desempenho do protocolo CSMA em sistemas com a tecnologia de receção MU-MIMO, que permite que o sistema tenha capacidade MPR [JL11].

Em [CBT13], considera-se uma WLAN com um número ilimitado de nós com intenção de transmitir dados para um AP. Baseando-se em [GVS88], conclui-se que, num sistema cuja receção tenha capacidade MPR, a probabilidade de um pacote ser recebido com sucesso depende apenas do número de pacotes transmitidos. Para um cenário com um número de nós infinitos, onde  $n$  pacotes são transmitidos em simultâneo, apenas  $k$  chegam corretamente ao destino. Para  $1 \leq n \leq \infty, 0 \leq k \leq n$ , a probabilidade de  $k$  nós transmitirem com sucesso, entre  $n$ , é definida por

$$C_{n,k} = P[k|n]. \quad (2.1)$$

O número esperado de pacotes recebidos com sucesso, provenientes de  $n$  nós é dado por

$$C_n \triangleq \sum_{k=1}^n k C_{n,k}, \quad (2.2)$$

sendo a capacidade do canal:

$$\mathbb{C} \triangleq \sup_n C_n, \quad (2.3)$$

representando o máximo valor que o número esperado de transmissões simultâneas com sucesso pode atingir. Assim, o número de transmissões em paralelo, está apenas limitado pela capacidade de receção do AP, o que em consequência melhora o débito de transmissão, como demonstrado em [CBT13]. No entanto, o protocolo CSMA foi otimizado para sistemas SPR, pelo que é necessário a revisão do protocolo de modo a maximizar a performance, utilizando a capacidade MPR.

### 2.2.2 Opportunistic MAC Protocol

Ao contrário do protocolo anteriormente descrito, na Secção 2.2.1, em [JL11], Jung *et al.* propõem um protocolo MAC, desenvolvido pelos autores, para WLANs com capacidade MPR MU-MIMO onde é considerado um sistema MPR de um *hop* (na comunicação emissor-recetor). Este protocolo permite não só a transmissão de dados em simultâneo a nós previamente autorizados pelo recetor (AP) na fase de transmissão, mas também a transmissão (com determinada probabilidade) por nós não autorizados, desde que a duração das suas transmissões seja inferior à duração de transmissão dos nós autorizados. A oportunidade de transmissão por nós não autorizados está, também, limitada ao número máximo de nós que podem transmitir em simultâneo na fase de transmissão. Sendo este número determinado pelo recetor.

Assumindo que o recetor tem  $M$  antenas e o emissor apenas uma, o sinal ( $y$ ) recebido das múltiplas emissões provenientes de  $N$  nós, pode ser representado pela seguinte expressão

$$y = Hs + w, \quad (2.4)$$

onde os vetores dos sinais de transmissão e receção são dadas, respetivamente, por  $s = [s_1, s_2, \dots, s_N]^T$  e  $y = [y_1, y_2, \dots, y_M]^T$ . A matriz do canal,  $H$ , é dada por  $H = [h_1, h_2, \dots, h_M]$ , e o ruído do canal é representado por  $w$ .

Este protocolo permite dar uma segunda oportunidade aos nós transmissores que não ganharam acesso ao canal para que, não obstante, seja possível transmitirem dados na mesma ronda.

Jung *et al.* dividem o funcionamento do protocolo em quatro etapas:

1. Os nós transmissores começam por observar o canal de transmissão. Se este estiver ocupado, procedem conforme especificado na norma IEEE 802.11 *Distributed Coordination Function* (DCF). Os nós iniciam um contador de duração aleatória (backoff), retraindo a transmissão durante este período de contenção. O nó emissor com menor tempo de contenção irá enviar um Pedido Para Envio (*Request to send*) (RTS) ao ponto de acesso AP. Define-se  $K$  como o número de transmissores que enviam a *frame* RTS em simultâneo. Observe-se que este valor pode ser igual ou superior a um.

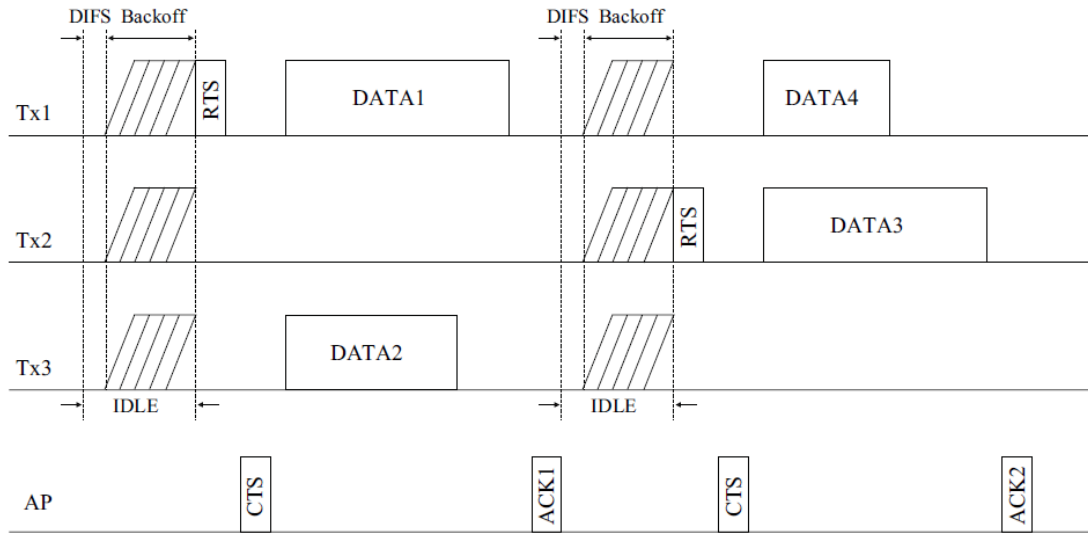


Figura 2.1: Protocolo MAC proposto em [JL11].

2. O AP recebe os  $K$  pacotes RTS, permitindo calcular o número de vagas ( $M - K$ ), que poderão ser ocupadas pelos nós transmissores com intenção de transmitir e que não enviaram os pacotes RTS.

Após a receção dos múltiplos pacotes RTS, o AP envia em *broadcast* a *frame* de Permissão Para Envio (*Clear to send*) (CTS), assim como o número de vagas disponíveis.

3. Ao receberem o pacote CTS, os  $K$  transmissores que anteriormente enviaram o pacote RTS começam o processo de transmissão de dados. Os outros nós podem, igualmente, transmitir com uma probabilidade  $p_t$  e se a sua transmissão ( $T_i$ ) terminar antes do final da transmissão mais duradoura ( $T_k$ ) dos transmissores do grupo  $K$ . Isto é,

$$T_i < T_w = \max_{i \in K}(T_k), \quad (2.5)$$

onde  $T_k$  é o período de transmissão do  $k$ -ésimo nó.

4. O AP recebe as transmissões, e devolve um pacote de Confirmação (*Acknowledge*) (ACK) que permite aos nós transmissores a confirmação de que o recetor recebeu corretamente a informação.

Tendo em conta de que o tamanho dos pacotes assume uma distribuição geométrica,

com a média de  $1/q$  e com uma probabilidade

$$P\{L \leq l\} = 1 - (1 - q)^l, \quad (2.6)$$

onde  $L$  é um valor aleatório do tamanho do pacote,  $l$  é o tamanho do pacote e  $q$  o parâmetro da distribuição geométrica, a função da distribuição da duração de transmissão  $\tau$  é dada por

$$P\{t \leq \tau\} = P = \{L \leq r_g \tau\} = 1 - (1 - q)^{r_g \tau}. \quad (2.7)$$

Na Equação (2.7),  $r_g$  é o ritmo de transmissão dos nós pertencentes a um grupo  $g \in G$ , em que  $G$  engloba grupos consoante o ritmo de transmissão dos nós transmissores.

Assim, assumindo que os nós de segunda oportunidade, que ganham direito de transmissão, pertencem ao grupo  $w$ , o número estimado de transmissores pertencentes ao grupo  $g$  e que tenham duração de transmissão  $T_i < T_k$  (representando por  $C_g^w$ ) pode ser calculado por

$$C_g^K = N_g(1 - (1 - q)^{r_g \tau^w}), \quad (2.8)$$

onde  $N_g$  é o número de nós pertencentes ao grupo  $g$ .

Deste modo, o número total de candidatos legítimos à transmissão (representando por  $c^w$ ) é determinado por  $c^w = \sum_{g \in G} C_g^w$ .

A probabilidade de existirem  $j$  transmissões entre os  $c^w$  nós, segue a distribuição binomial

$$P[X = j] = \binom{c^w}{j} p_t^j (1 - p_t)^{c^w - j}, \quad j = 0, 1, \dots, c^w, \quad (2.9)$$

onde  $X$  representa a variável aleatória binomial que indica o número de nós candidatos que decidem transmitir com a probabilidade  $p_t$ . Assim sendo, a carga de transmissão esperada ( $M(p_t)$ ) para a segunda oportunidade de transmissão é dada por

$$M(p_t) = \sum_{j=0}^{c^w} P[X = j] \cdot (j \cdot \bar{l} + k \cdot \frac{1}{q}), \quad (2.10)$$

onde  $\bar{l}$  representa o tamanho médio dos pacotes e é dado por

$$\bar{l} = \sum_{w \in G} \left( \frac{N_w}{N} \cdot \left( \sum_{g \in G} \frac{c_g^w}{c^w} \cdot \bar{l}_g^w \right) \right). \quad (2.11)$$

$N_w$  é o número de nós pertencentes ao grupo  $w$  e  $c_g^w$  é o tamanho médio do pacote dos nós vencedores pertencentes ao grupo  $g$  e é dado por

$$\bar{l}_g^w = \frac{\int_0^{\frac{r_g}{r_w} \cdot \frac{q}{q}} xq(1-q)^{x-1} dx}{1 - (1-q)^{\frac{r_g}{r_w} \cdot \frac{1}{q}}}. \quad (2.12)$$

A oportunidade ótima de transmissão é obtida por  $p_t^* = \operatorname{argmax}_{p_t \in [0,1]} M(p_t)$  (valor  $p_t$  que maximiza  $M(p_t)$ ). A probabilidade de transmissão pode ser escolhida através da expressão:

$$p_t = \frac{\gamma(M - K)}{c^w}, K < M \quad (2.13)$$

e

$$p_t = 0, K \geq M, \quad (2.14)$$

onde  $\gamma$  é um parâmetro de ajuste que permite regular a oportunidade de transmissão.

Em suma, o protocolo divide-se em fase de negociação e fase de transmissão, pelo que os nós transmissores que pretendem aceder ao meio na fase de transmissão, têm de enviar (com determinada probabilidade) um pedido de autorização (pacote RTS) na fase de negociação. No entanto, caso o número de nós autorizados a transmitir não atinja o limite da capacidade de receção do recetor, é dada a oportunidade de transmissão (com determinada probabilidade) a nós que não tenham enviado o pacote RTS, e apenas se a duração de transmissão de dados for inferior à duração de transmissão de dados dos nós transmissores autorizados previamente. Este facto permite uma segunda oportunidade de transmissão aos nós que não tenham acedido durante a fase de negociação.

### 2.2.3 Multi-Round Contention Random-Access

Zhang propõe um protocolo MAC em [Zha10] para WLANs com  $K$  nós transmissores e um AP com capacidade MPR limitado à receção de  $M$  pacotes em paralelo. Os autores estudam o tempo de paragem ótima na fase de negociação, isto é, o número ótimo de *slots* RTS que o recetor espera até o envio do pacote CTS, finalizando a fase de negociação. Ao contrário dos protocolos descritos anteriormente (Secções 2.2.1 e 2.2.2), as rondas de comunicação do protocolo MAC não têm um tempo fixo, sendo que a fase de negociação tem uma duração determinada pela Estratégia de Paragem Ótima.

A Figura 2.2 ilustra a lógica de funcionamento do protocolo. Baseando-se no mecanismo RTS/CTS da norma IEEE 802.11, o protocolo permite a transmissão de  $0 \leq X_i \leq M$  nós em simultâneo, onde  $X_i$  representa o número de nós vencedores por ronda de contenção. Para cada  $i = 1, 2, \dots, n$ , após observar  $X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n$ , em que  $n$  é o número ótimo de paragem da contenção, é terminada a contenção e são transmitidos  $\sum_{i=1}^n x_i$  pacotes no momento de transmissão (*Data Transmission*) apenas se  $\sum_{i=1}^n x_i \leq M$ . No entanto, se  $\sum_{i=1}^n x_i > M$ , serão selecionados  $M$  estações para transmitir, ou seja:

$$y_n(x_1, \dots, x_n) = \min\left(\sum_{i=1}^n x_i, M\right). \quad (2.15)$$

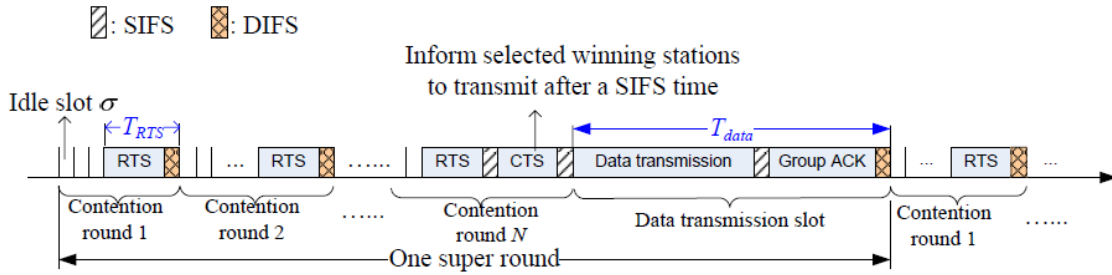


Figura 2.2: Contenção Multi-round para a norma IEEE 802.11 WLAN proposto em [Zha10].

Na Figura 2.2 está ilustrado o protocolo de contenção *multi-round* WLAN. Uma estação envia um pacote RTS após o seu temporizador de contenção atingir o valor zero, produzindo uma probabilidade de transmissão  $\tau$ . Quando o número de estações,  $K$ , é elevado, é assumido que o número de transmissões segue uma distribuição de Poisson com o parâmetro  $\lambda = K\tau$ . Ou seja,

$$P_r(k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}, \quad (2.16)$$

com  $k$  estações a transmitirem no mesmo espaço temporal.

Assim, se  $1 \leq k \leq M$ , o número de nós vencedores por ronda segue a seguinte distribuição

$$P_r\{X_i = k\} = \frac{\lambda^k}{k!(e^{-\lambda} - 1)}, \quad (2.17)$$

e para  $k = 0$

$$Pr\{X_i = k\} = \sum_{j=M+1}^{\infty} \frac{\lambda^k}{j!(e^{-\lambda} - 1)}. \quad (2.18)$$

$Pr\{X_i = k\} = 0$  caso  $k > M$ . Desta forma, o valor esperado de nós vencedores, por ronda, é dado por

$$E[X] = \frac{\lambda}{1 - e^{-\lambda}} \sum_{M-1}^{k=0} \frac{\lambda^k x^{-\lambda}}{k!}. \quad (2.19)$$

O AP observa o resultado da contenção e decide se deve ou não terminar o processo, de acordo com a sua Estratégia de Paragem Ótima (*Optimal Stopping Strategy*) (OSS). Quando este decide parar o período de contenção, são escolhidas, de modo aleatório, até  $M$  estações vencedoras para a transmissão de dados. Esta decisão é transmitida em modo *broadcast* para todas as estações, através de um pacote CTS.

Os autores definem  $\theta$  como o limiar da primeira etapa da regra *look-ahead*, isto é

$$N_1 = \min\{n \geq 1 : Z_n \geq E_{X_{n+1}}[Z_{n+1} | X_1 = x_1, \dots, X_n = x_n]\}, \quad (2.20)$$

e a regra de paragem ótima que maximiza o débito numa WLAN com MPR é dada pela seguinte expressão:

$$N^* = \min\{n \geq 1 : \sum_{i=1}^n X_i \geq \theta\}. \quad (2.21)$$

#### 2.2.4 Asynchronous Medium Access Protocol

Em [JKL12], Jung *et al.* introduzem um protocolo que permite transmissões com duração dinâmica, para sistemas WLAN com recetor com capacidade MPR (MU-MIMO). À semelhança do protocolo descrito na Secção 2.2.2, este protocolo permite dar oportunidade de transmissão de dados aos nós que não enviaram um pedido RTS na fase de negociação. No entanto, este protocolo permite que qualquer nó transmissor possa iniciar a sua transmissão de dados (com determinada probabilidade), em qualquer momento na fase de transmissão, desde que o número de transmissões em simultâneo não ultrapasse o limite determinado pelo recetor.

Assim, com o propósito de colmatar a ineficácia dos protocolos MAC tradicionais com transmissão síncrona, é proposto neste artigo uma solução assíncrona para acesso ao canal de transmissão, onde cada nó emissor decide se deve ou não transmitir, sem a

necessidade de espera pelo término das transmissões em ocorrência.

Após o período de contenção, os nós com intenção de transmitir enviam o pacote RTS para o AP com capacidade MPR. Este recebe todos os RTS dentro do limite  $M$  da sua capacidade MPR, e identifica o número de transmissões que faltam para atingir  $M$ , ou seja, o número de vagas ( $M - K$ , sendo  $K$  o número de pacotes RTS recebidos) que poderão ser preenchidas posteriormente. Em seguida o AP transmite em *broadcast* um pacote CTS com a informação do número de vagas,  $M - K$ . Ao receberem o pacote CTS, os nós que mostraram intenção de transmitir, começam a transmissão de dados. Paralelamente, os nós que não enviaram o pacote RTS poderão decidir transmitir durante este período, com uma probabilidade  $\tau$ .

Assim que termina a primeira transmissão, o AP devolve um pacote ACK que contém o número de vagas no canal de transmissão, permitindo que mais nós se possam juntar ao canal de transmissão de dados. Desta forma, um nó que não tenha enviado um pacote RTS, pode começar a sua transmissão com uma probabilidade  $\tau$  após o pacote CTS, ou após o pacote ACK. Depois da última transmissão, o canal fica inativo (Idle) e os nós transmissores efetuam novamente o período de contenção.

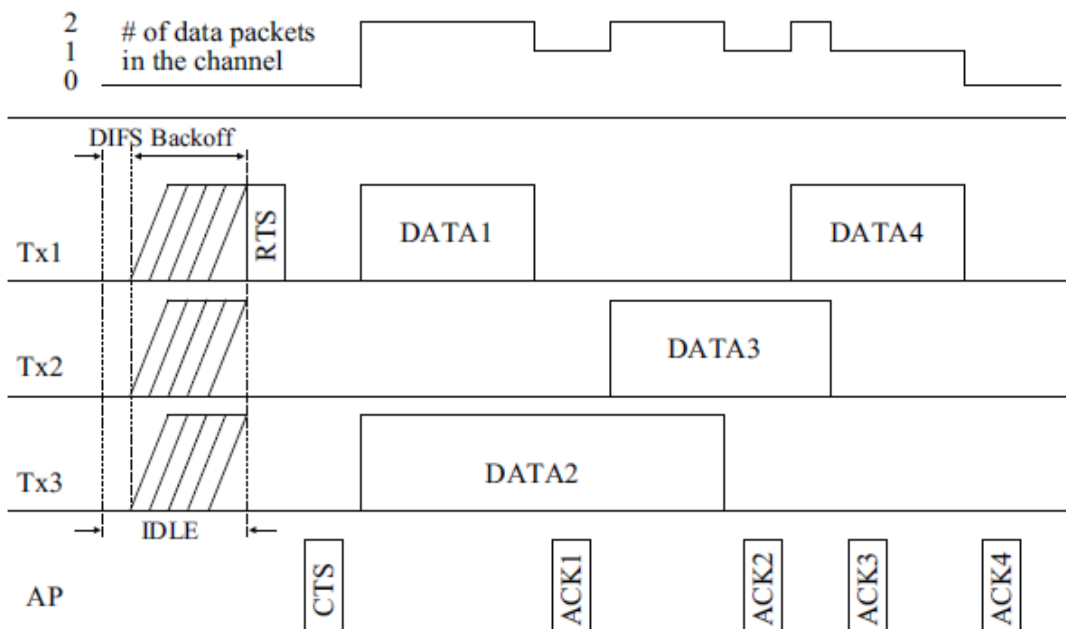


Figura 2.3: Protocolo MAC assíncrono proposto em [JKL12].

A Figura 2.3 mostra um exemplo do protocolo assíncrono a funcionar com  $M = 2$ .

Neste caso, o nó  $Tx1$  enviou o pacote RTS, e após a receção do CTS, os nós ficaram a conhecer a existência de uma vaga para transmissão, então preenchida pelo nó  $Tx3$ . O término da transmissão DATA1 origina uma vaga, que será preenchida pelo nó  $Tx2$ . Desta forma, o número de transmissões em paralelo não ultrapassará o valor  $M = 2$ .

Existindo  $i$  transmissões em simultâneo, provenientes de  $N$  nós, a probabilidade de  $M - N$  transmitirem segue a distribuição binomial

$$P[X = i] = \binom{N - K}{i} \tau_K^i (1 - \tau_K)^{N - K - i}, i = 0, 1, \dots, N - K, \quad (2.22)$$

onde  $X$  representa a variável aleatória binomial que indica o número de nós candidatos que decidem transmitir com a probabilidade  $\tau_k$ , com o valor esperado:

$$E[X] = (N - K)\tau_k. \quad (2.23)$$

Se  $\tau_k$  tiver um valor elevado, o número de candidatos que decidem transmitir será, igualmente, elevado. Isto poderá causar falhas na transmissão se o valor de nós candidatos a transmitir for superior a  $(M - K)$ . O caso oposto, em que  $\tau_k$  tem um valor muito reduzido, fará com que o canal não explore a característica MU-MIMO na receção. Jung *et al.* [JKL12] demonstram que é possível escolher um valor  $\tau_k$  apropriado, de modo a explorar a eficiência da técnica MU-MIMO. Assim sendo, os autores propõem que a probabilidade de acesso ao canal seja definida por

$$\tau_k = \begin{cases} (M - K)/(N - K), & K \leq M \\ 0, & K \geq M. \end{cases}$$

### 2.2.5 Generic Distributed Probabilistic

O protocolo proposto por Celik *et al* em [CZKM10] difere na abordagem, relativamente aos anteriores protocolos, pelo facto de considerar a distância dos nós emissores ao AP, considerando desta forma a distribuição espacial dos nós. Tradicionalmente, os nós que se encontrem mais próximos do AP têm mais sucesso na transmissão, relativamente aos nós emissores mais afastados. De forma a colmatar este problema, os autores propõem um sistema que adapta a probabilidade de acesso ao meio, pelos nós emissores, de acordo

com a distribuição dos mesmos em torno do AP.

Sejam  $n$  nós distribuídos no espaço com intenção de comunicar com apenas um AP. Os autores assumem que os pacotes têm a duração de um *slot* e que a potência de transmissão ( $P_T$ ) é constante. A potência recebida ( $P_R$ ) de um nó  $i$  a uma distância  $r_i$  é dada por

$$P_R(i) = R^2 K r_i^{-\beta} P_T, \quad (2.24)$$

onde  $R$  é a variável aleatória da distribuição de Rayleigh,  $\beta$  é o coeficiente de perdas por propagação, que varia entre 2 e 6, e  $K$  é uma constante de atenuação. Em sistemas sem desvanecimento,  $R$  assume o valor unitário.

É usado o modelo de captura SINR que é definido pela seguinte forma: na situação de  $k$  transmissões em simultâneo, o pacote do nó  $i$  é recebido com sucesso, se

$$SINR(i) = \frac{P_R(i)}{N + \sum_{j=1, j \neq i}^k P_R(j)} > z, \quad (2.25)$$

onde  $z$  é o rácio de decisão de captura e  $N$  representa o ruído.

O protocolo intitula-se de *Generic Distributed Probabilistic* (GDP). Na Figura 2.4 está representado o diagrama de estados do protocolo GDP onde se observam dois estados, após uma tentativa de transmissão: Após Sucesso (*After Success*) (AS) e Após Falha (*After Failure*) (AF). Um nó transita para o estado AS (ou AF) após a transmissão com sucesso (ou insucesso) de um pacote.

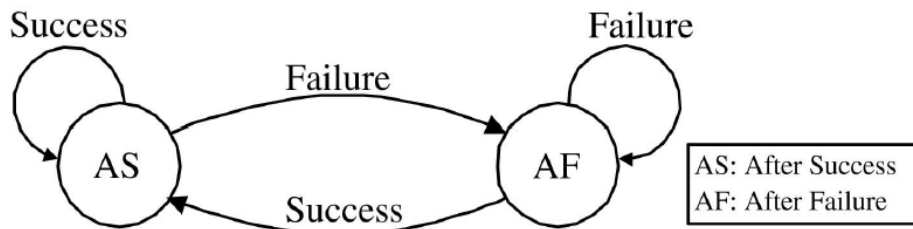


Figura 2.4: Diagrama de estados do protocolo GDP proposto em [CZKM10].

O GDP pode ser visto como um sistema Aloha de dois estados que ajusta a sua probabilidade de transmissão, de acordo com o histórico observado. Quando um nó está

no estado AS (ou AF), transmite com um probabilidade  $p_{ts}$  (ou  $p_{tf}$ ). Isto significa que um valor  $p_{ts}$  elevado corresponde a uma janela de contenção pequena, o que aumenta o número de acessos ao meio. Desta mesma forma, um valor  $p_{tf}$  pequeno corresponde a uma janela de contenção mais elevada, diminuindo ainda mais a possibilidade de acesso de um nó ao meio após ter tido insucesso.

Seja  $p_f(r)$  a probabilidade de uma transmissão falhar com o nó emissor a uma distância  $r$  do AP, a probabilidade do nó transitar do estado AS para AF é dada por  $p_{ts}p_f(r)$ . Desta forma, a probabilidade de transitar de AF para AS é dada por  $p_{tf}(1 - p_f(r))$ . Assim, o estado de um nó específico segue o processo estocástico da cadeia de Markov com dois estados, representado na Figura 2.4, sendo a probabilidade dos estados estacionários (*steady-state*) AS e AF

$$p_{AS}(r) = \frac{p_{tf}(1 - p_f(r))}{p_{ts}p_f(r) + p_{tf}(1 - p_f(r))}, \quad (2.26)$$

$$p_{AF}(r) = \frac{p_{ts}p_f(r)}{p_{ts}p_f(r) + p_{tf}(1 - p_f(r))}. \quad (2.27)$$

Em consequência, a probabilidade de transmissão a uma distância  $r$  é dada por

$$\tau(r) = p_{ts}p_{AS}(r) + p_{tf}p_{AF}(r) = \frac{p_{ts}}{1 - p_f(r) + \frac{p_{ts}}{p_{tf}}p_f(r)}. \quad (2.28)$$

Uma transmissão falha se existir pelo menos um nó entre os restantes  $n - 1$  que transmita dentro do raio  $\alpha r$ , tendo esta situação uma probabilidade de ocorrência de

$$p_f(r) = 1 - \left(1 - \int_0^{\alpha r} \tau(x)f(x)dx\right)^{n-1}. \quad (2.29)$$

Portanto, o débito de um nó à distância  $r$  do nó recetor é dado por  $S(r) = \tau(r)(1 - p_f(r))$  e o débito total é dado por  $S = n \int_0^{r_d} S(r)f(r)dr$ .

Para uma dada função de densidade  $f(r)$ ,  $p_f(r)$  e  $\tau(r)$  podem ser determinados com um sistema de equações. Assim, para exemplo de um sistema com os nós uniformemente distribuídos num disco de raio 1, com  $n = 12$ ,  $\alpha = 2$  e  $f(r) = 2r \forall r \in (0, 1)$ , os valores de  $\tau(r)$  e  $S(r)$  estão apresentados na Figura 2.5. Na figura utiliza-se o termo *Standard Model* para representar o caso quando  $p_{ts} > p_{tf}$  e *Alternate Model* quando  $p_{ts} < p_{tf}$ .

No caso de sistemas com capacidade de SPR, o *Alternate Model* demonstra resultados

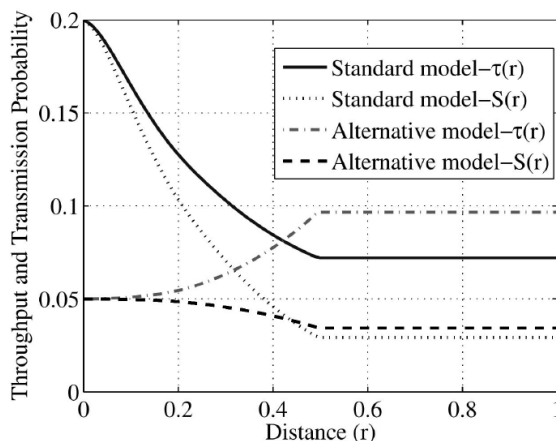


Figura 2.5: Probabilidade de transmissão e rendimento no protocolo GDP. Usando  $p_{ts} = 0.2, p_{tf} = 0.05$  no *Standard Model* e  $p_{ts} = 0.05, p_{tf} = 0.2$  no *Alternate Model*. Com  $\alpha = 2$  e  $n = 12$  num disco de raio 1. Proposto em [CZKM10].

mais justos para nós mais distantes, o que pode levar a rendimentos elevados em relação ao *Standard Model*.

Considerando agora um sistema com capacidade MPR, Celik *et al* introduzem o protocolo GDP enquadrado num modelo com dois anéis de utilizadores num sistema que utiliza o modelo de captura SINR. Sejam  $n_1$  e  $n_2$  nós distribuídos por dois anéis de raio  $r_1$  e  $r_2$ . Se  $n_2 < (r_2/r_1)^\beta(z^{-1} - c + 1)$ , as transmissões dos nós do anel de raio  $r_2$  não irão causar falhas aos pacotes transmitidos pelos nós do anel de raio  $r_1$ . Se  $(r_1/r_2)^\beta < z$ , as transmissões de um nó em  $r_2$  só poderá ser capturado com sucesso quando os nós em  $r_1$  não estiverem a transmitir.

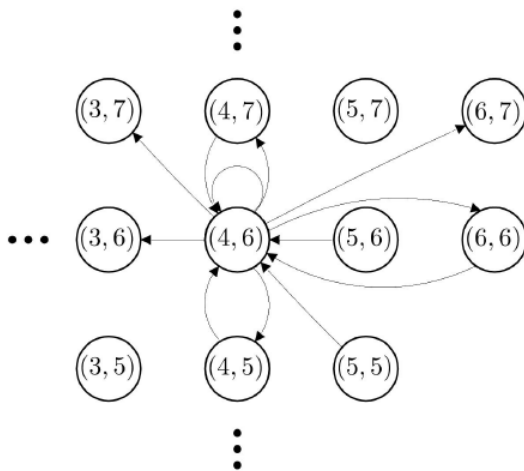


Figura 2.6: Cadeia de Markov com as possíveis transições de estado, a partir de  $(4,6)$ , com  $n_1 = 6$  e  $n_2 = 10$ , proposto em [CZKM10].

Este sistema é descrito através de uma cadeia de Markov de duas dimensões, cujos estados são representados por  $(i, j)$ , sendo  $i$  e  $j$  o número de nós nos anéis  $r_1$  e  $r_2$ , respectivamente, e que se encontram no estado AF. Deste modo, o número de estados da cadeia de Markov é  $(n_1 + 1)(n_2 + 1)$ . Na Figura 2.6, está ilustrado um exemplo de parte da cadeia de Markov com  $n_1 = 6$  e  $n_2 = 10$ , onde as setas representam a possível transição entre o estado  $(i, j)$  e  $(l, m)$ . Por consequência, a probabilidade de transição é representada por  $P_{(i,j) \rightarrow (l,m)}$ .

Quando o sistema é composto por  $n_1, n_2, \dots, n_L$  nós nos raios  $r_1, r_2, \dots, r_L$ , a probabilidade de transmissão de um nó pertencente ao raio  $r_i$  é dada por

$$\tau(r_i) = \frac{p_{ts}}{1 - p_f(r_i) + \frac{p_{ts}}{p_{if}} p_f(r_i)}, \quad (2.30)$$

$\forall i \ 1 \leq i \leq 1, 2, \dots, L$ . A probabilidade de um pacote ser capturado a uma distância  $r_i$ , na presença de  $j$  transmissões é dada por:

$$p_{c,j}(r_i | r_1, r_2, \dots, r_L; k_1, k_2, \dots, k_L) = \prod_{m=1}^L \left[ \frac{1}{1 + z \left( \frac{r_i}{r_m} \right)^\beta} \right]^{k_m}. \quad (2.31)$$

Com o rendimento de  $S = \sum_{i=1}^L n_i \tau(r_i) (1 - p_f(r_i))$ .

Desta forma os autores mostram que a probabilidade de acesso representada em (2.30) deve ser alterada de acordo com a região espacial onde o nó se encontra, o que introduz um novo conceito de adaptação da probabilidade de acesso ao meio.

## 2.3 Comparação dos Protocolos

A comparação dos protocolos MAC para sistemas com MPR é sintetizada na Tabela 2.1. Os protocolos são compostos pela fase de negociação, onde os nós emissores enviam um pacote RTS a um determinado nó recetor, e uma fase de transmissão, onde a transmissão de dados é efetuada.

| Protocolo                      | Características                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CSMA com MPR [CBT13]           | O acesso ao meio é feito através do protocolo CSMA tradicional aplicado a sistemas com MPR. É apresentado o débito e eficiência, e feita a comparação entre CSMA e ALOHA.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Opportunistic [JL11]           | Na fase de transmissão, é dada a oportunidade de transmitir dados (com determinada probabilidade) a nós que não tenham enviado o pacote RTS na fase de negociação, porém, apenas se a duração de transmissão de dados a transmitir for inferior à duração de transmissão dos nós previamente autorizados a aceder à fase de transmissão e, caso o número de nós a transmitir em paralelo não ultrapasse o limite determinado pelo recetor.                                                                                                                                                                                            |
| Multi-Round Contention [Zha10] | A duração da fase de negociação não é constante, e a sua duração vai de acordo com a Estratégia de Paragem Ótima. O número de nós autorizados a aceder ao meio na fase de transmissão é limitado a $M$ .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Asynchronous MAC [JKL12]       | À semelhança do protocolo proposto em [JL11], na fase de negociação o AP recebe até $M$ pacotes RTS. No fim desta fase, caso o número de pacotes RTS recebidos, $K$ , seja inferior a $M$ , o AP envia no pacote CTS o número de vagas ( $M - K$ ). Desta forma, os nós que não enviaram o pacote RTS, podem transmitir na fase de transmissão, com uma probabilidade $\tau$ . Porém, o acesso ao meio na fase de transmissão é feito de modo assíncrono, isto é, um nó transmissor pode iniciar a sua transmissão em qualquer momento (na fase de transmissão), caso o limite de ligações em paralelo ainda não tenha sido atingido. |
| GDP [CZKM10]                   | Este protocolo permite que a probabilidade de acesso ao meio varie consoante a sua distribuição em torno do recetor.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

Tabela 2.1: Tabela de comparação dos protocolos propostos.

Os autores apresentam diferentes soluções para sistemas com MPR, bem como a análise de débito de dados simulados com a utilização do protocolo proposto.





# Receção de Múltiplos Pacotes

## 3.1 Condição de Receção

Presentemente existem vários sistemas de rádio que permitem a receção de múltiplos pacotes, que utilizam por exemplo técnicas CDMA ou MU-MIMO, as quais permitem que múltiplos nós transmitam em simultâneo para um determinado nó recetor. De uma forma genérica os mecanismos de receção dos múltiplos pacotes no recetor pode ser dividida em duas famílias:

1. MPR - no caso em que os sinais são recebidos em simultâneo, cuja receção de pacotes 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 ( $\gamma$ ) [NEW06]. Sendo este o modo estudado neste trabalho.
2. *Successive Interference Cancellation* (SIC) MPR - no caso em que os sinais são processados iterativamente, podendo exigir retransmissões. Nesta técnica, o rácio entre o valor da potência da transmissão em análise e o valor das potências das transmissões simultâneas, também determina se o sinal é capturado com sucesso. No entanto, após o sinal da fonte em análise ser recebido com sucesso, o sinal dessa fonte é subtraído ao sinal recebido, e existe uma nova tentativa de descodificação de outra fonte. O processo é repetitivo iterativamente, e em alguns sistemas só é repetido até à primeira receção sem sucesso. No momento de transmissão, é determinado que serão transmitidos os mesmos pacotes diversas vezes, independentemente se

existiu sucesso na transmissão ou não, de forma a ser possível o tratamento iterativo [WM98].

Este trabalho estuda somente o tipo de sistemas MPR, embora os sistemas SIC-MPR possam seguir a mesma metodologia de modelação proposta neste trabalho, mas aplicada de forma iterativa a cada um dos nós que transmitem em simultâneo. Em ambos os casos, a condição de recepção com sucesso depende da potência recebida de cada nó transmissor. Assim, 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

1. Perdas de Propagação (Path Loss) - em que a potência do sinal recebido é função da distância entre as antenas, de um fator de atenuação (coeficiente de perdas de propagação), dos ganhos das antenas e da frequência de transmissão;
2. Desvanecimento Lento (Slow Fading) - situação em que o sinal sofre uma atenuação durante um período que engloba múltiplos símbolos;
3. Desvanecimento Rápido (Fast Fading) - situação que ocorre quando o sinal sofre uma atenuação rápida, com duração inferior ao período de um símbolo.

Desta forma, o valor das potências transmitidas sofrem atenuações que fazem com que o valor das potências na recepção sigam distribuições diferentes, consoante a intensidade dos efeitos que ocorrem nos cenários em estudo. No decorrer deste trabalho, assume-se uma determinada distribuição probabilística para os efeitos de *Path Loss* (PL). No segundo efeito, é assumido que o desvanecimento lento é representado através de uma distribuição *Lognormal* (LN). Relativamente ao último efeito, assume-se que a sua distribuição é do tipo *Rayleigh* (RL).

Este capítulo apresenta o estudo da probabilidade de recepção num sistema MPR (sem SIC), tendo em conta a condição de recepção com sucesso e os efeitos de propagação enumerados acima.

## 3.2 Probabilidade de Recepção Individual

### 3.2.1 Caracterização Teórica

Nesta secção, é proposto um modelo para o cálculo da probabilidade de sucesso de recepção, quando se assume que múltiplos nós transmitem em simultâneo. Considerando que os efeitos de propagação determinam o valor das potências na recepção, com as distribuições de PL, RL e LN, deduz-se o número médio de receções com sucesso, quando um total de  $n$  nós transmitem em simultâneo.

Tendo um cenário onde  $n$  nós pretendem transmitir dados em simultâneo para um único recetor, assume-se que as potências recebidas de cada um dos emissores ( $P_k$ , em que  $k = 1, 2, \dots, n$ ) são variáveis aleatórias, independentes e identicamente distribuídas, definidas por uma distribuição  $f_p$ .

Seja a soma das potências recebidas

$$P_t = \sum_{k=1}^n P_k, \quad (3.1)$$

a interferência agregada, gerada pelas transmissões dos  $n$  nós é definida por

$$\Lambda = P_t + N_0, \quad (3.2)$$

onde  $N_0$  é ruído envolvente na transmissão.

Num recetor MPR, a condição de recepção da transmissão  $j$  consiste numa primeira fase em observar a relação entre a potência  $P_j$ , as restantes transmissões e o ruído, definida por

$$\gamma_j = \frac{P_j}{\Lambda - P_j}. \quad (3.3)$$

Desta forma, considera-se que o sinal com potência  $P_j$  é recebido com sucesso se o seu SINR ( $\gamma_j$ ) for maior do que um determinado limiar  $b$  [Cov72],[NEW06],

$$\gamma_j > b. \quad (3.4)$$

Ou seja,

$$P_j > \frac{b \cdot \Lambda}{b + 1} \quad (3.5)$$

é a condição necessária para que a recepção seja feita com sucesso.

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  $b < 1$  [HAL97]. Em 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. Da mesma forma, um  $b$  elevado representa um sistema CDMA com um fator de espalhamento reduzido.

Considerando

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

temos a condição de recepção dada por  $P_j > b'\Lambda$ . A probabilidade de recepção de um nó é definida por

$$p_s = P_r(P_j > b'\Lambda), \quad (3.7)$$

o que é equivalente a

$$p_s = 1 - P_r(P_j - b'\Lambda \leq 0). \quad (3.8)$$

Por definição, a FGM da VA  $P_j$  é dada por

$$M_{P_j}(t) = E[e^{tP_j}] = \int_{-\infty}^{\infty} e^{tx} f_p(x) dx. \quad (3.9)$$

Definindo  $\alpha = P_j - b'\Lambda$ , tem-se a condição

$$\alpha = \frac{P_j b + P_j - b\Lambda}{b+1} = \frac{P_j}{b+1} - b' \sum_{k=1, k \neq j}^n P_k = \frac{P_j}{b+1} - b' P_\gamma. \quad (3.10)$$

Dessa forma, a FGM de  $\alpha$ ,  $M_\alpha(t)$ , é dada por

$$M_\alpha(t) = M_{P_j} \left( \frac{t}{b+1} \right) \cdot M_{P_\gamma}(-b't), \quad (3.11)$$

e dado que as potências envolvidas no somatório que define  $P_\gamma$  são independentes entre

si, tem-se

$$M_\alpha(t) = M_{P_j} \left( \frac{t}{b+1} \right) \cdot \prod_{k=1, k \neq j}^n M_{P_k}(-b't). \quad (3.12)$$

Sabendo-se que a FGM e a função característica de uma variável  $Z$  estão relacionadas através da condição

$$\varphi_Z(t) = M_{iZ}(t) = M_Z(it), \quad (3.13)$$

então a função característica da variável  $\alpha$ , definida por

$$\varphi(u) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{ixu} f_\alpha(x) dx, \quad (3.14)$$

pode ser diretamente obtida através de (3.12) e (3.13). Finalmente, a distribuição  $f_\alpha(x)$  pode ser obtida através da inversa da função característica, ou seja

$$f_\alpha(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ixt} \varphi(it) dt. \quad (3.15)$$

Partindo de (3.5), a probabilidade de receção de um nó transmissor pode ser representada por

$$p_s = 1 - P_r(\alpha \leq 0). \quad (3.16)$$

Consequentemente, utilizando (3.15) obtém-se

$$p_s = 1 - \int_{-\infty}^0 f_\alpha(x) dx, \quad (3.17)$$

definindo-se desta forma a probabilidade de um nó transmitir com sucesso, entre  $n$  nós concorrentes, sabendo previamente a distribuição da potência recebida de cada um dos nós ( $f_p(x)$  em (3.9)).

### 3.2.2 Validação

De forma a validar o modelo teórico para o cálculo da probabilidade  $p_s$ , consideram-se os três efeitos de propagação descritos na Secção 3.1. Para a validação do modelo consideram-se em todos os cenários o limiar de decisão  $b = 0.02$ .

### 3.2.2.1 Desvanecimento Rápido

Neste efeito considera-se que  $n$  nós transmitem com uma potência afetada pela distribuição de (RL), com a Função Densidade de Probabilidade (PDF) definida por

$$f(x, \lambda) = \frac{x}{\lambda^2} e^{-x^2/(2\lambda^2)} \quad (3.18)$$

Sabendo que a distribuição de *Rayleigh* é aproximada por uma distribuição exponencial, isto é para a variável aleatória  $X$ ,  $\text{Rayleigh}(X, \lambda^{-1/2}) \approx \text{Exp}(\frac{X^2}{2}, \lambda)$ , a potência recebida quando o efeito de RL ocorre é representada pela distribuição exponencial com  $\lambda = 1$ . Dessa forma, a distribuição efetivamente utilizada no cenário de RL é dada por

$$f_p(x) = e^{-x}, \quad (3.19)$$

e a correspondente Função de Distribuição Cumulativa (CDF)

$$F_p(x) = 1 - e^{-x}. \quad (3.20)$$

Nas diferentes simulações efetuadas determinaram-se as potências dos  $n$  sinais transmitidos, as quais foram determinadas através da função inversa da CDF multiplicada pela potência do sinal transmitido ( $P_{Tx}$ ),

$$P_j = \log\left(\frac{1}{1 - F_p}\right) \cdot P_{Tx}, \quad (3.21)$$

onde  $F_p \in [0, 1[$  é um valor aleatório escolhido através de uma distribuição uniforme, e  $P_{Tx} = 1$ .

Assim sendo, para cada  $n$  foram feitas simulações onde se determinou o número de transmissões com sucesso recebidas em simultâneo pelo nó recetor, que ao dividir pelo número de eventos de transmissão simultânea se obtém a probabilidade ( $p_s$ ) de receção de uma das transmissões simultâneas no nó recetor.

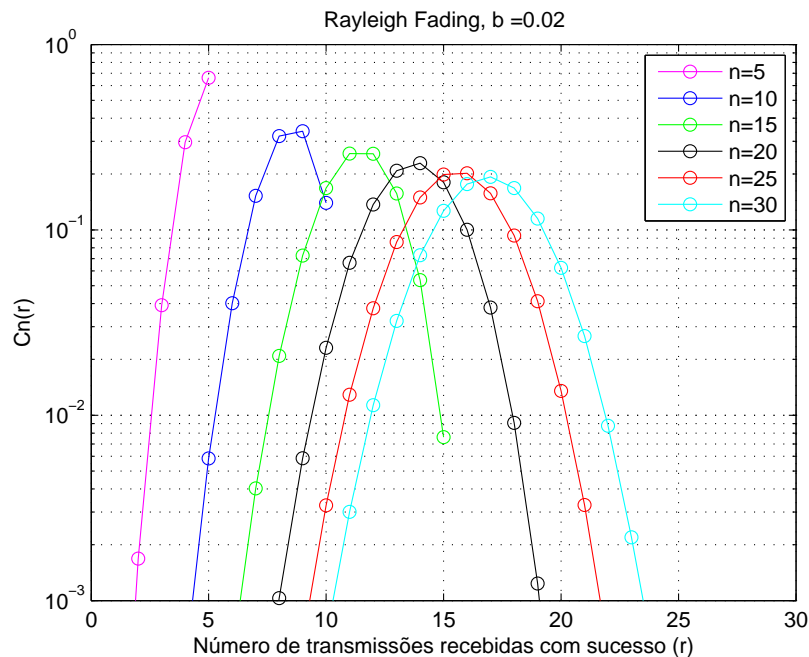
Na Tabela 3.1 observam-se os valores de  $p_s$  obtidos, bem como o intervalo de confiança (IC) das simulações para cada  $n$ , para um índice de confiança de 95%.

Como se pode verificar, as simulações validam os valores de  $p_s$  obtidos teoricamente.

| $n$ | $p_s$ teórico | $p_s$ simulado | IC                  |
|-----|---------------|----------------|---------------------|
| 5   | 0.9151        | 0.9238         | [0.91531 ; 0.93229] |
| 10  | 0.8248        | 0.8368         | [0.82285 ; 0.85075] |
| 15  | 0.7363        | 0.7579         | [0.74074 ; 0.77506] |
| 20  | 0.6700        | 0.6862         | [0.66745 ; 0.70495] |
| 25  | 0.6174        | 0.6217         | [0.60248 ; 0.64092] |
| 30  | 0.5591        | 0.5631         | [0.54418 ; 0.58202] |

Tabela 3.1: Tabela de validação de  $p_s$  em RL

Através das simulações, obtiveram-se ainda as distribuições das probabilidades de receção com sucesso ( $C_n(r)$ ), as quais se encontram representadas na Figura 3.1. De notar que embora a distribuição  $C_n(r)$  seja discreta, na Figura 3.1 os pontos discretos representados por marcadores circulares são unidos por uma linha para evidenciar a forma da distribuição. Foram simulados seis cenários considerando  $n = 5, 10, 15, 20, 25, 30$ , permitindo perceber no caso em que se assume somente RL qual o número máximo de receções com sucesso quando os  $n$  nós transmitem em simultâneo.

Figura 3.1: Distribuição de probabilidades obtidas com RL admitindo  $b = 0.02$ .

De forma a caracterizar a influência do limiar  $b$ , ilustra-se nas Figuras 3.2 e 3.3 as distribuições quando  $b = 0.01$  e  $b = 0.04$ , respetivamente.

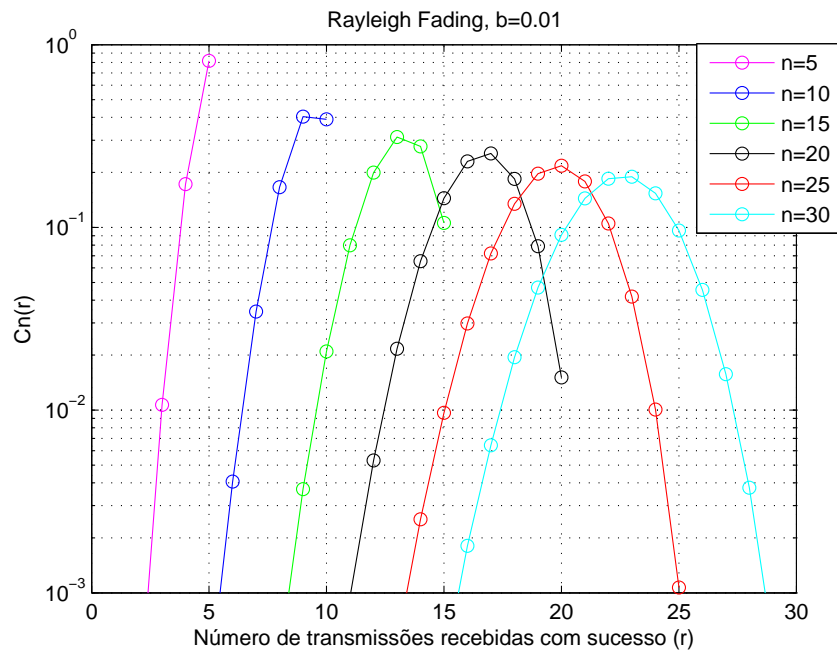


Figura 3.2: Distribuição de probabilidades obtidas com RL admitindo  $b = 0.01$ .

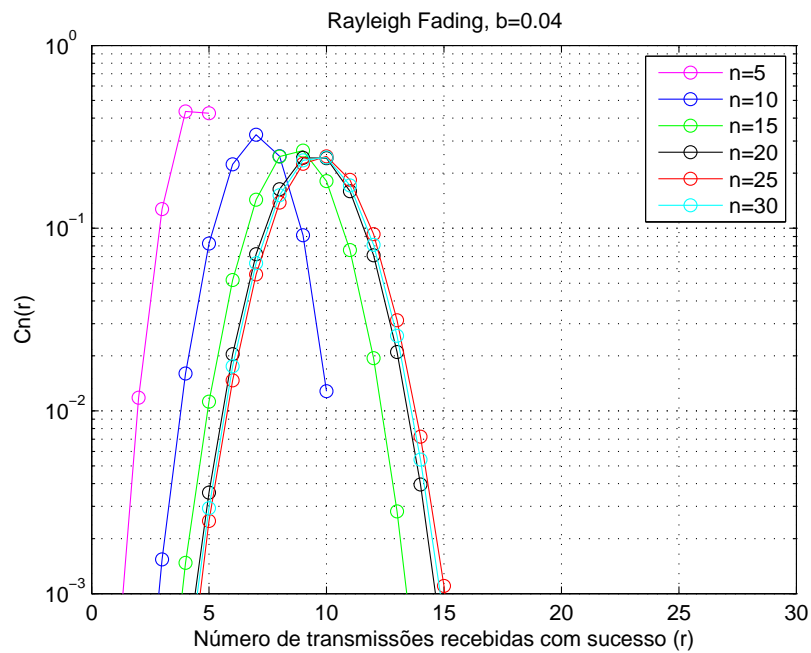


Figura 3.3: Distribuição de probabilidades obtidas com RL admitindo  $b = 0.04$ .

### 3.2.2.2 Desvanecimento Lento

Neste efeito assume-se que a distribuição da potência recebida de um transmissor tem distribuição *Lognormal* (LN). Analisando o cenário onde a distribuição da potência recebida proveniente dos nós emissores é dada pela função densidade LN, tem-se

$$f_p(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\left\{ \frac{-[\ln(x)-\mu]^2}{2\sigma^2} \right\}}, \quad (3.22)$$

onde  $\mu$  e  $\sigma$  são a média e variância dadas, respetivamente, por  $\mu = 0$  e  $\sigma = 3/A$  com  $A = 10/\ln(10)$ .

| $n$ | $p_s$ teórico | $p_s$ simulado | IC                  |
|-----|---------------|----------------|---------------------|
| 5   | 0.9986        | 0.9986         | [0.98882 ; 1.0084]  |
| 10  | 0.9801        | 0.9797         | [0.96084 ; 0.99856] |
| 15  | 0.9288        | 0.9284         | [0.90292 ; 0.95388] |
| 20  | 0.8480        | 0.8519         | [0.82322 ; 0.88058] |
| 25  | 0.7538        | 0.7633         | [0.73444 ; 0.79216] |
| 30  | 0.6607        | 0.6732         | [0.64620 ; 0.70020] |

Tabela 3.2: Tabela de validação de  $p_s$  assumindo desvanecimento do tipo LN e admitindo  $b = 0.02$

Considerando as condições de transmissão com sucesso do cenário anterior, a Tabela 3.2 mostra os valores de  $p_s$  obtidos e o respetivo IC para cada  $n$ , observando-se que os valores de  $p_s$  obtidos através de simulação se aproximam dos valores de  $p_s$  obtidos teoricamente. A Figura 3.4 apresenta as distribuições das probabilidades de receção com sucesso ( $C_n(r)$ ) para o mesmo cenário considerado na Tabela 3.2, admitindo  $b = 0.02$ .

As Figs. 3.5 e 3.6 ilustram as mesmas distribuições para os limiares  $b = 0.01$  e  $b = 0.04$ , respetivamente.

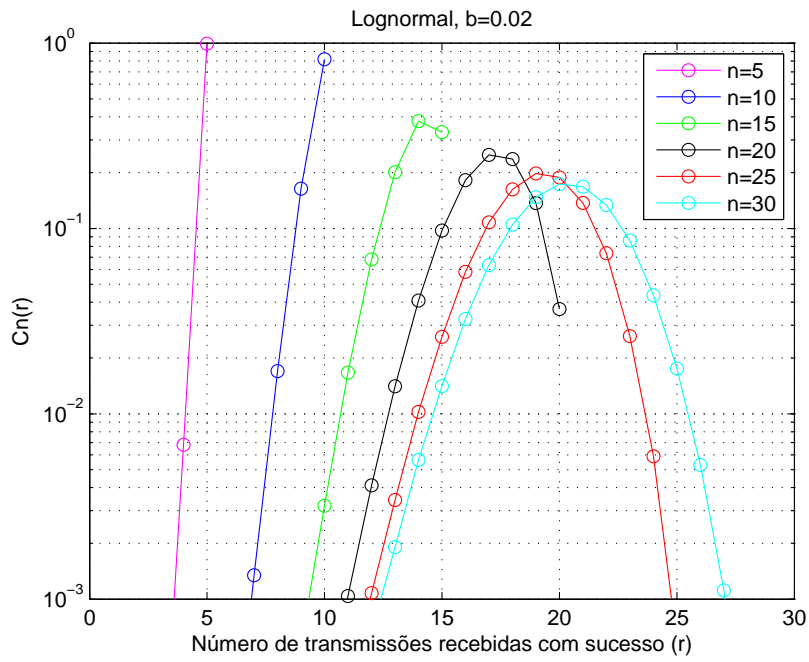


Figura 3.4: Distribuição de probabilidades obtidas com LN admitindo  $b = 0.02$ .

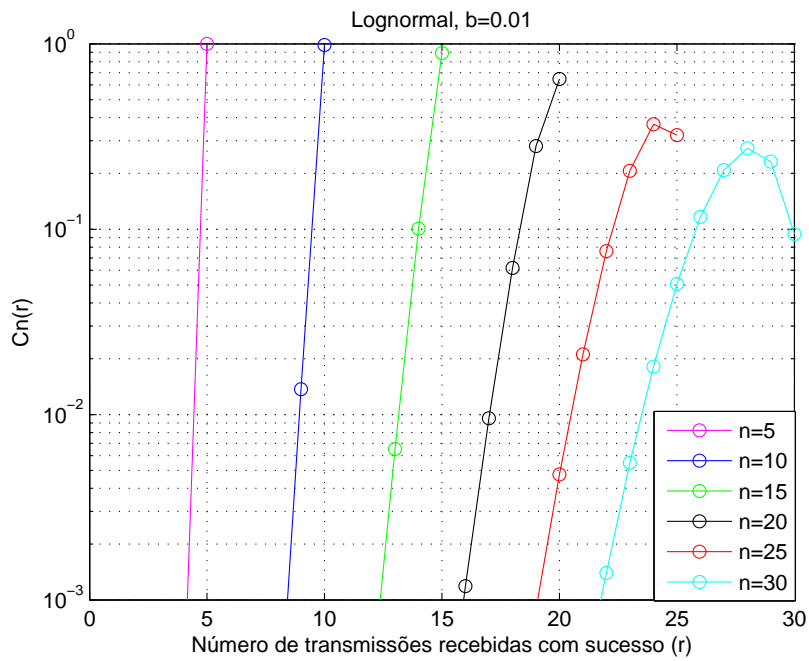


Figura 3.5: Distribuição de probabilidades obtidas com LN admitindo  $b = 0.01$ .

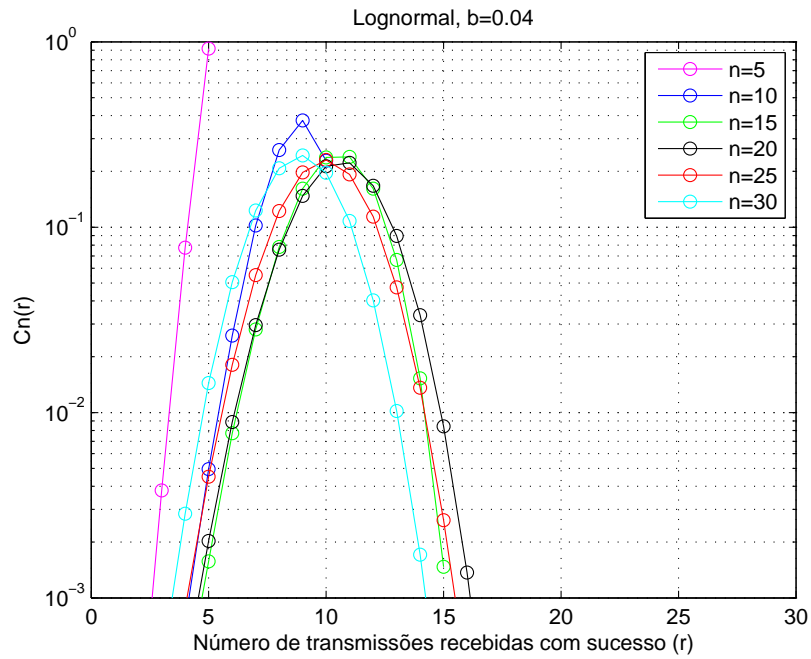


Figura 3.6: Distribuição de probabilidades obtidas com LN admitindo  $b = 0.04$ .

### 3.2.2.3 Perdas de Propagação

Sabendo que cada nó transmissor encontra-se localizado uniformemente num círculo de raio  $D$ , centrado no nó recetor, a PDF de uma distância  $x$  entre o nó recetor e o nó emissor é dada por

$$f_X(x) = \frac{2x}{D^2}, 0 \leq x \leq D. \quad (3.23)$$

Sendo a CDF dada por

$$F_X(x) = \frac{x^2}{D^2}. \quad (3.24)$$

A potência recebida pelo recetor, a uma distância  $X$ , é atenuada pelo fator,

$$(1 + X)^{-\eta}, \quad (3.25)$$

sendo o domínio de  $X$  dado por  $[(D + 1)^{-\eta}, 1]$ . Tendo as variáveis aleatórias  $Z$  que representa a potência, e  $X$  que representa a distância, sabe-se que  $Z = (1 + X)^{-\eta}$ , com

$$\begin{aligned} F_Z(z) &= P_r\{Z \leq z\} \\ &= P_r\{(1 + X)^{-\eta} \leq z\} \\ &= P_r\{X > z^{-\frac{1}{\eta}} - 1\} \\ &= 1 - F_X\left(z^{-\frac{1}{\eta}} - 1\right). \end{aligned} \quad (3.26)$$

Usando a CDF da distância

$$F_Z(z) = 1 - \frac{(z^{-1/\eta} - 1)^2}{D^2} \quad (3.27)$$

que derivando em ordem a  $z$  se obtém

$$f_Z(z) = \frac{2}{D^2\eta} \left( z^{-\frac{2}{\eta}-1} - z^{-\frac{1}{\eta}-1} \right), \quad (3.28)$$

onde  $\eta = 2$  representa o coeficiente de PL, e  $D = 10$  representa o raio da área circular centrada no nó recetor onde os nós transmissores se encontram distribuídos aleatoriamente. O domínio da PDF está corrigido de forma a não serem consideradas distâncias nulas, sendo que a potência recebida ( $z$ ) se encontra no intervalo  $[(D + 1)^{-\eta}, 1]$ . Desta forma, a atenuação da potência transmitida é influenciada pela distância entre o nó emissor e o nó recetor. Na Tabela 3.3 observam-se os valores de  $p_s$  obtidos e o respetivo IC para cada  $n$ . Os dados contidos na tabela evidenciam que os valores de  $p_s$  obtidos através de simulação se aproximam dos valores de  $p_s$  obtidos teoricamente.

| $n$ | $p_s$ teórico | $p_s$ simulado | IC                  |
|-----|---------------|----------------|---------------------|
| 5   | 0.9946        | 0.9944         | [0.98469 ; 1.00410] |
| 10  | 0.9668        | 0.9676         | [0.94902 ; 0.98618] |
| 15  | 0.8921        | 0.8943         | [0.86995 ; 0.91865] |
| 20  | 0.7577        | 0.7586         | [0.73438 ; 0.78282] |
| 25  | 0.6064        | 0.6026         | [0.58318 ; 0.62202] |
| 30  | 0.4808        | 0.4804         | [0.46574 ; 0.49506] |

Tabela 3.3: Tabela de validação de  $p_s$  assumindo desvanecimento do tipo PL e admitindo  $b = 0.02$

A figura 3.7 mostra a distribuição das probabilidades de recepção com sucesso sob efeito de perdas de propagação, com um limiar  $b = 0.02$ . A influência deste limiar é

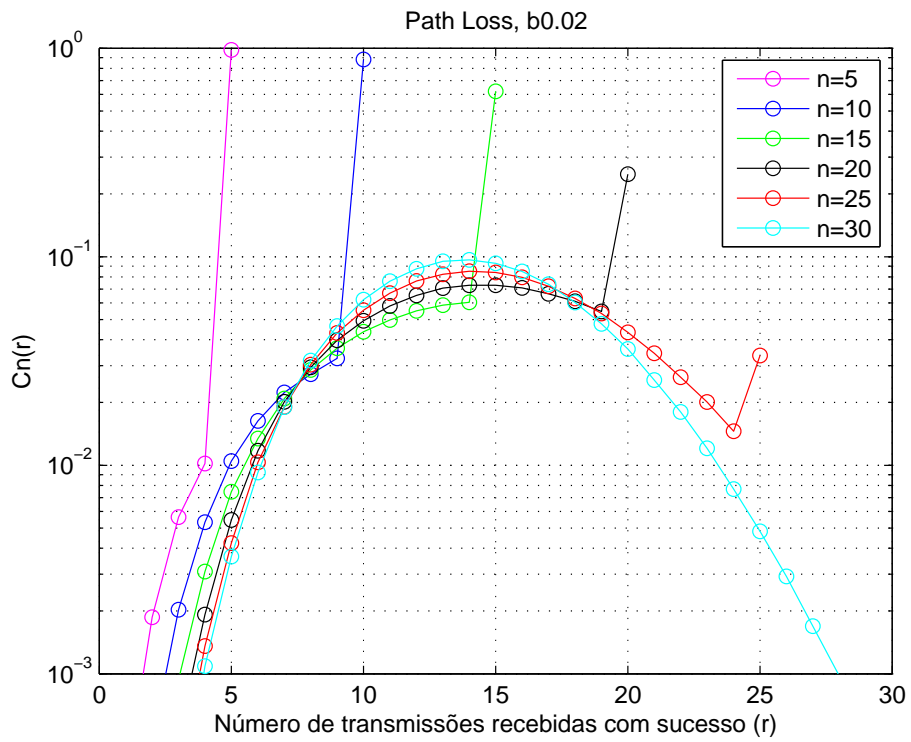


Figura 3.7: Distribuição de probabilidades obtidas com PL admitindo  $b = 0.02$ .

semelhante aos efeitos de propagação anteriores, aumentando a probabilidade de recepção quando o limiar diminui (figuras 3.8 e 3.9).

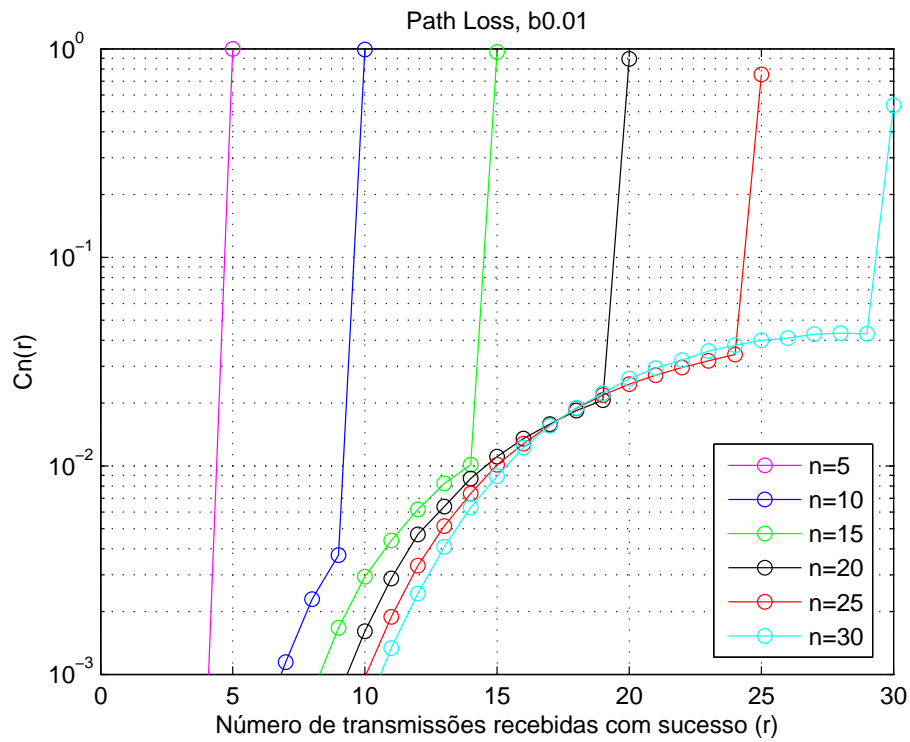


Figura 3.8: Distribuição de probabilidades obtidas com PL admitindo  $b = 0.01$ .

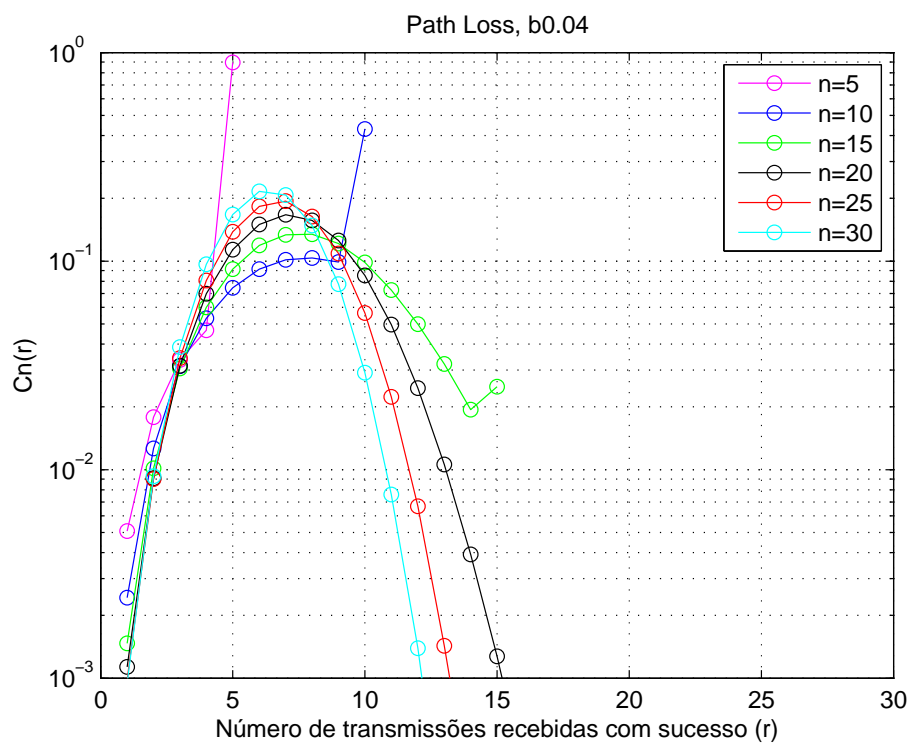


Figura 3.9: Distribuição de probabilidades obtidas com PL admitindo  $b = 0.04$ .

### 3.2.2.4 RL, LN e PL em simultâneo

Observando os três efeitos no mesmo cenário, é possível obter as potências recebidas para cada  $n$ , invertendo o produto das três CDFs dos diferentes efeitos (RL, LN e PL), sendo os valores do produto das CDFs originados de forma aleatória (seguindo uma distribuição uniforme) com valores compreendidos entre 0 e 1. Com as probabilidades dos três efeitos validada, foram simuladas as probabilidades para cada  $n$ , considerando os três efeitos em simultâneo. Os valores de  $p_s$  obtidos nas simulações encontram-se representados na Tabela 3.4.

| $n$ | $p_s$ simulado | IC                  |
|-----|----------------|---------------------|
| 5   | 0.7942         | [0.78706 ; 0.80134] |
| 10  | 0.6193         | [0.60956 ; 0.62904] |
| 15  | 0.4992         | [0.48884 ; 0.50956] |
| 20  | 0.4127         | [0.40256 ; 0.42284] |
| 25  | 0.3490         | [0.33945 ; 0.35855] |
| 30  | 0.2996         | [0.29076 ; 0.30844] |

Tabela 3.4: Tabela de  $p_s$  para RL+LN+PL.

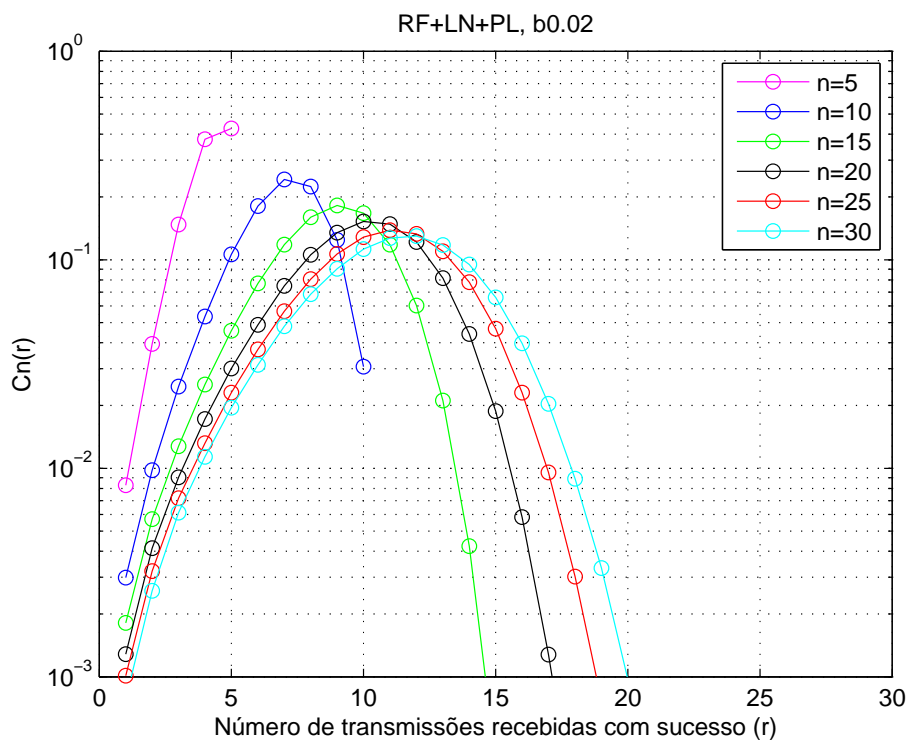


Figura 3.10: Distribuição de probabilidades obtidas em LN com limiar  $b = 0.02$ .

As Figuras 3.1, 3.4 e 3.7 mostram a influência que os efeitos de propagação provocam, isoladamente, no sucesso de transmissão de pacotes, quando  $b = 0.02$ , influenciando o valor das potências recebidas no AP. Simulando os três efeitos de propagação no mesmo cenário (ocorrendo em simultâneo), obtém-se a distribuição ilustrada na figura 3.10. Como se verifica, quando  $n$  é superior a 15 transmissores, as distribuições começam a ficar mais próximas e mais semelhantes na forma.

Fazendo variar o limiar  $b$ , observa-se nas Figuras 3.11 e 3.12 as variações na distribuição das probabilidades quando os três efeitos de propagação estão presentes. Desta forma, caracteriza-se de que modo o limiar  $b$  influencia o número de transmissões recebidas com sucesso.

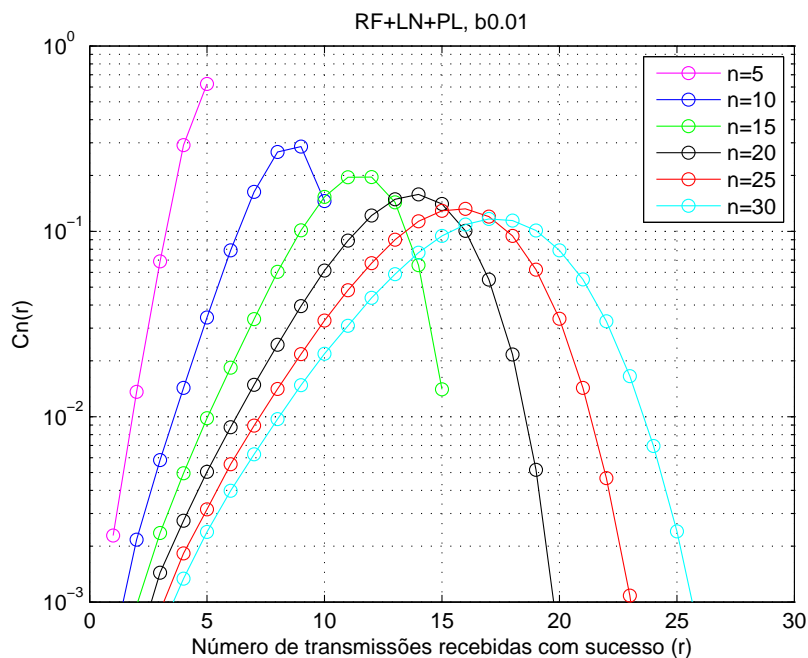


Figura 3.11: Distribuição de probabilidades obtidas com limiar  $b = 0.01$ .

Como esperado, ao fixar  $b = 0.01$  (Figura 3.11) observa-se um aumento da probabilidade de recepção, e da média do número de transmissões recebidas com sucesso, relativamente ao limiar  $b = 0.02$  utilizado na figura 3.10.

Com  $b = 0.04$  as probabilidades de recepção diminuem, bem como a média do número de transmissões recebidas com sucesso, tal como se observa na Figura 3.12.

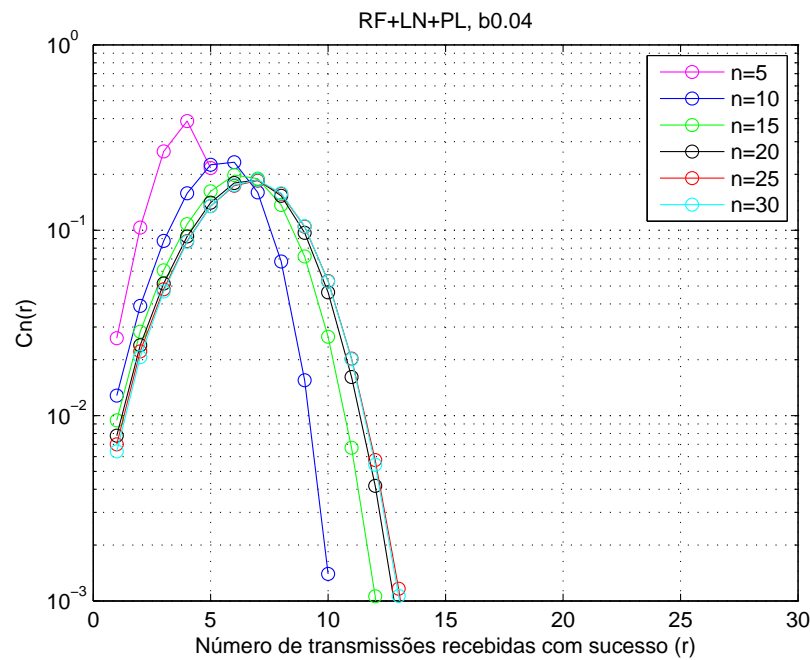


Figura 3.12: Distribuição de probabilidades obtidas com limiar  $b = 0.04$ .

### 3.3 Caracterização do Número Médio de Pacotes Recebidos

Tendo a probabilidade de receção individual ( $p_s$ ), validada na secção anterior, é possível caracterizar o número médio ( $E_r$ ) de pacotes recebidos quando existem  $n$  nós a comunicar em simultâneo, sendo:

$$E_r = n \cdot p_s. \quad (3.29)$$

Nas próximas subsecções caracteriza-se o número médio de pacotes recebidos para cada  $n$  estudado, tendo em consideração os efeitos de propagação e fazendo variar o limiar  $b$ , possibilitando a observação da forma com que este valor influencia no número médio de pacotes recebidos.

#### 3.3.1 Desvanecimento Rápido

Com desvanecimento rápido, cuja distribuição do valor das potências recebidas é dada na Secção 3.2.2.1, observa-se os resultados de simulação apresentados na Tabela 3.5.

Tal como se pode verificar na Tabela 3.6, os dados obtidos através das simulações encontram-se em linha com os resultados obtidos teoricamente (devido à complexidade

| $n$ | $E_r(b = 0.01)$ | $E_r(b = 0.02)$ | $E_r(b = 0.04)$ | $E_r(b = 0.08)$ |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 5   | 4.8056          | 4.6201          | 4.2741          | 3.6745          |
| 10  | 9.1421          | 8.3677          | 7.0265          | 5.0017          |
| 15  | 13.0499         | 11.3683         | 8.6613          | 5.1070          |
| 20  | 16.5529         | 13.7250         | 9.4946          | 4.6345          |
| 25  | 19.6901         | 15.5422         | 9.7568          | 3.9422          |
| 30  | 22.4811         | 16.8921         | 9.6183          | 3.2216          |
| 35  | 24.9549         | 17.8551         | 9.2215          | 2.5575          |
| 40  | 27.1359         | 18.4805         | 8.6652          | 1.9890          |
| 45  | 29.0407         | 18.8317         | 8.0103          | 1.5231          |
| 50  | 30.7071         | 18.9489         | 7.3209          | 1.1506          |
| 55  | 32.1354         | 18.8770         | 6.6154          | 0.8609          |
| 60  | 33.3610         | 18.6550         | 5.9320          | 0.6418          |
| 65  | 34.3866         | 18.3028         | 5.2795          | 0.4720          |
| 70  | 35.2304         | 17.8517         | 4.6781          | 0.3452          |
| 75  | 35.9130         | 17.3207         | 4.1176          | 0.2512          |
| 80  | 36.4445         | 16.7336         | 3.6082          | 0.1833          |
| 85  | 36.8485         | 16.1043         | 3.1520          | 0.1325          |
| 90  | 37.1220         | 15.4479         | 2.7436          | 0.0954          |
| 95  | 37.2783         | 14.7697         | 2.3801          | 0.0684          |
| 100 | 37.3446         | 14.0793         | 2.0582          | 0.0490          |

Tabela 3.5: Número médio de pacotes recebidos com RL.

| $n$ | $E_r$ teórico | $E_r$ simulado | IC                  |
|-----|---------------|----------------|---------------------|
| 5   | 4.5755        | 4.6201         | [4.6116 ; 4.6286]   |
| 10  | 8.2480        | 8.3677         | [8.3538 ; 8.3816]   |
| 15  | 11.0445       | 11.3683        | [11.3511 ; 11.3855] |
| 20  | 13.4000       | 13.7250        | [13.7063 ; 13.7437] |
| 25  | 15.4350       | 15.5422        | [15.5230 ; 15.5614] |
| 30  | 16.7730       | 16.8921        | [16.8732 ; 16.9110] |

Tabela 3.6: Tabela de validação de  $E_r = n * p_s$  assumindo desvanecimento do tipo RL e admitindo  $b = 0.02$ .

do modelo e ao seu tempo de computação, os dados apresentados na Tabela 3.6 são limitados a  $n = 30$ ). Na figura 3.14 observa-se o número médio de pacotes recebidos face ao número total de pacotes transmitidos. Ao incrementar o valor do limiar  $b$ , o número médio de pacotes recebidos diminui. Além disso, observa-se que para um determinado valor de  $b$ , o número de recepções com sucesso pode ser maximizado, escolhendo o número de nós  $n$  que transmitem em simultâneo.

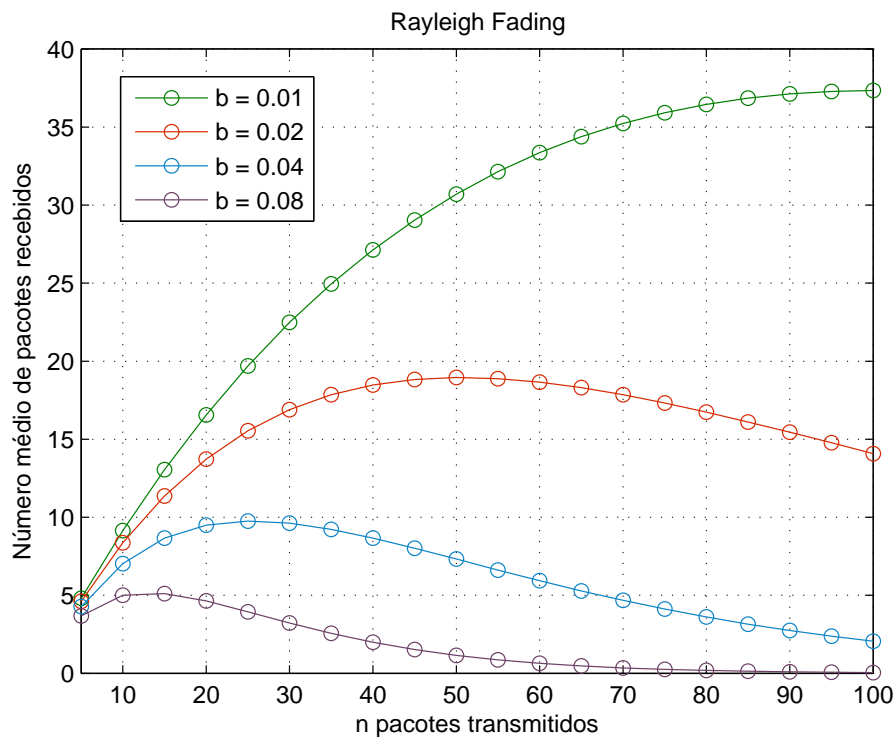


Figura 3.13: Número médio de pacotes recebidos vs. número de pacotes transmitidos com RL

### 3.3.2 Desvanecimento Lento

Com a distribuição de LN para o efeito de Desvanecimento Lento, obtiveram-se os seguintes resultados, de simulação apresentados na Tabela 3.7.

| $n$ | $E_r(b = 0.01)$ | $E_r(b = 0.02)$ | $E_r(b = 0.04)$ | $E_r(b = 0.08)$ |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 5   | 4.9997          | 4.9931          | 4.9143          | 4.4606          |
| 10  | 9.9860          | 9.7976          | 8.6611          | 5.6638          |
| 15  | 14.8852         | 13.9272         | 10.3873         | 4.8484          |
| 20  | 19.5613         | 17.0363         | 10.5752         | 3.6823          |
| 25  | 23.8752         | 19.0816         | 9.9239          | 2.6876          |
| 30  | 27.7153         | 20.1934         | 8.9038          | 1.9402          |
| 35  | 31.0177         | 20.5756         | 7.7868          | 1.4038          |
| 40  | 33.7731         | 20.4015         | 6.7158          | 1.0212          |
| 45  | 35.9920         | 19.8458         | 5.7427          | 0.7518          |
| 50  | 37.7079         | 19.0396         | 4.8919          | 0.5576          |
| 55  | 38.9545         | 18.0794         | 4.1570          | 0.4187          |
| 60  | 39.7967         | 17.0286         | 3.5323          | 0.3160          |
| 65  | 40.2804         | 15.9513         | 3.0024          | 0.2418          |
| 70  | 40.4419         | 14.8713         | 2.5587          | 0.1869          |
| 75  | 40.3622         | 13.8224         | 2.1815          | 0.1445          |
| 80  | 40.0418         | 12.8060         | 1.8664          | 0.1136          |
| 85  | 39.5473         | 11.8469         | 1.6010          | 0.0895          |
| 90  | 38.9087         | 10.9456         | 1.3731          | 0.0709          |
| 95  | 38.1413         | 10.1058         | 1.1833          | 0.0571          |
| 100 | 37.2845         | 9.3192          | 1.0215          | 0.0460          |

Tabela 3.7: Número médio de pacotes recebidos com LN

| $n$ | $E_r$ teórico | $E_r$ simulado | IC                  |
|-----|---------------|----------------|---------------------|
| 5   | 4.9930        | 4.9931         | [4.9833 ; 5.0029]   |
| 10  | 9.8010        | 9.7976         | [9.7787 ; 9.8165]   |
| 15  | 13.9320       | 13.9272        | [13.9017 ; 13.9527] |
| 20  | 16.9600       | 17.0363        | [17.0076 ; 17.065]  |
| 25  | 18.8450       | 19.0816        | [19.0527 ; 19.1105] |
| 30  | 19.8210       | 20.1934        | [20.1664 ; 20.2204] |

Tabela 3.8: Tabela de validação de  $E_r = n * p_s$  assumindo desvanecimento do tipo LN e admitindo  $b = 0.02$ .

Os resultados de validação são apresentados na Tabela 3.8.

Os resultados apresentados na Figura 3.14, são semelhantes ao efeito descrito na subsecção anterior, no entanto com a parametrização adotado no efeito de Desvanecimento Lento o número médio de pacotes recebidos é ligeiramente superior.

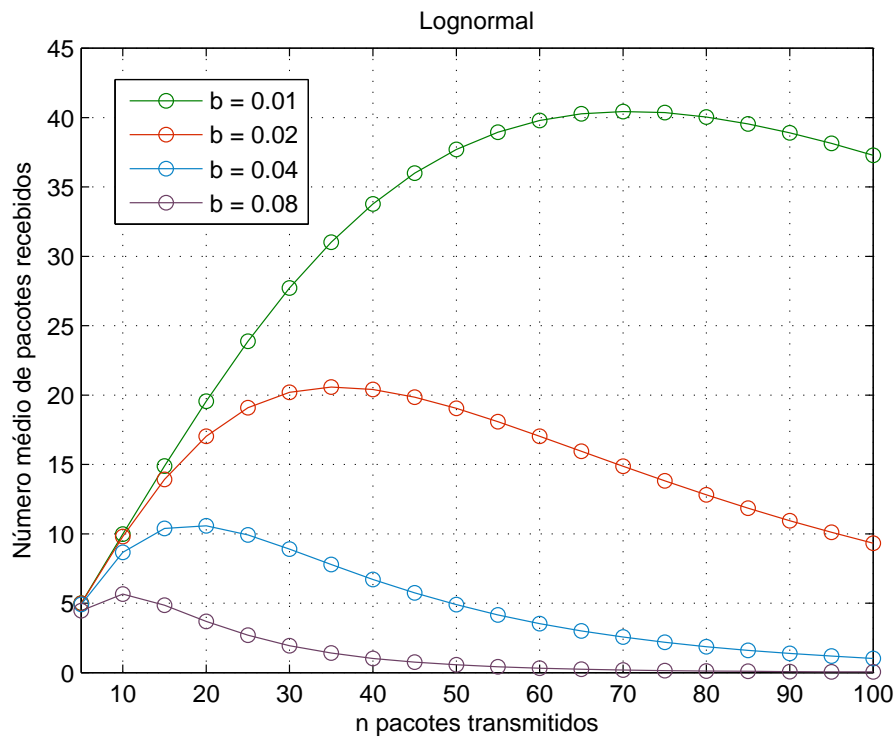


Figura 3.14: Número médio de pacotes recebidos vs. número de pacotes transmitidos com LN

### 3.3.3 Perdas de Propagação

Observando o número médio de pacotes recebidos tendo em conta o efeito de Perdas de Propagação cuja distribuição de potências na recepção é dado por PL, foram obtidos os seguintes resultados de simulação representados na Tabela 3.9. A Tabela 3.10 apresenta a validação do número de nós médio, onde é possível concluir que os valores obtidos pelo modelo se aproximam dos resultados obtidos através de simulação.

Na Figura 3.15 observa-se que o efeito condiciona bastante o número médio de pacotes recebidos, mostrando que este efeito tem maior importância em termos da diminuição do número médio de pacotes recebidos quando comparado ao desvanecimento lento (LN) ou rápido (RL).

| $n$ | $E_r(b = 0.01)$ | $E_r(b = 0.02)$ | $E_r(b = 0.04)$ | $E_r(b = 0.08)$ | $E_r(b = 0.16)$ |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 5   | 4.9992          | 4.9717          | 4.8124          | 4.2435          | 2.8315          |
| 10  | 9.9851          | 9.6777          | 7.9898          | 4.3295          | 1.9109          |
| 15  | 14.9024         | 13.4111         | 8.0774          | 3.6169          | 1.5222          |
| 20  | 19.5936         | 15.1664         | 7.3275          | 3.1903          | 1.2883          |
| 25  | 23.7372         | 15.0616         | 6.7940          | 2.8899          | 1.1191          |
| 30  | 26.8750         | 14.4088         | 6.3826          | 2.6503          | 0.9878          |
| 35  | 28.5981         | 13.8295         | 6.0439          | 2.4555          | 0.8812          |
| 40  | 29.0104         | 13.3399         | 5.7566          | 2.2926          | 0.7899          |
| 45  | 28.6606         | 12.9187         | 5.5093          | 2.1493          | 0.7109          |
| 50  | 28.0931         | 12.5535         | 5.2867          | 2.0216          | 0.6436          |
| 55  | 27.5343         | 12.2090         | 5.0895          | 1.9055          | 0.5810          |
| 60  | 27.0226         | 11.9089         | 4.9061          | 1.8020          | 0.5261          |
| 65  | 26.5646         | 11.6267         | 4.7381          | 1.7033          | 0.4773          |
| 70  | 26.1336         | 11.3615         | 4.5826          | 1.6153          | 0.4329          |
| 75  | 25.7388         | 11.1220         | 4.4375          | 1.5341          | 0.3911          |
| 80  | 25.3678         | 10.8985         | 4.2978          | 1.4559          | 0.3544          |
| 85  | 25.0019         | 10.6758         | 4.1712          | 1.3848          | 0.3207          |
| 90  | 24.6740         | 10.4689         | 4.0500          | 1.3178          | 0.2897          |
| 95  | 24.3561         | 10.2749         | 3.9290          | 1.2537          | 0.2617          |
| 100 | 24.0448         | 10.0916         | 3.8214          | 1.1930          | 0.2355          |

Tabela 3.9: Número médio de pacotes recebidos com PL

| $n$ | $E_r$ teórico | $E_r$ simulado | IC                  |
|-----|---------------|----------------|---------------------|
| 5   | 4.9730        | 4.9717         | [4.9620 ; 4.9814]   |
| 10  | 9.6680        | 9.6777         | [9.6591 ; 9.6963]   |
| 15  | 13.3815       | 13.4111        | [13.3867 ; 13.4355] |
| 20  | 15.1540       | 15.1664        | [15.1422 ; 15.1906] |
| 25  | 15.1600       | 15.0616        | [15.0422 ; 15.081]  |
| 30  | 14.4240       | 14.4088        | [14.3941 ; 14.4235] |

Tabela 3.10: Tabela de validação de  $E_r = n * p_s$  assumindo desvanecimento do tipo PL e admitindo  $b = 0.02$ .

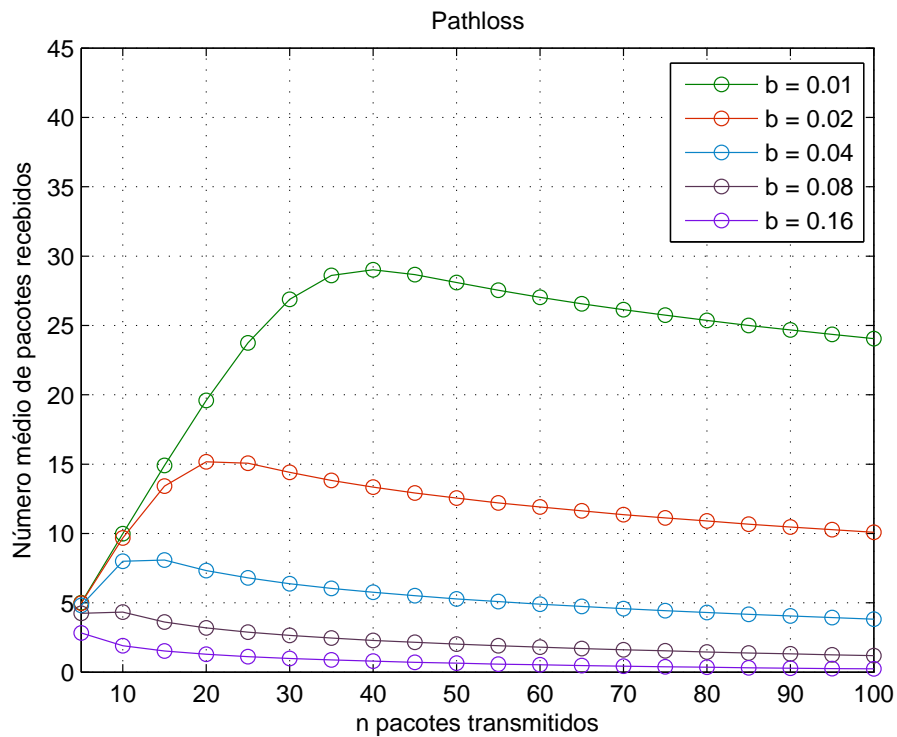


Figura 3.15: Número médio de pacotes recebidos vs. número de pacotes transmitidos com PL

### 3.3.4 Cenário com os três efeitos

Num cenário mais realista onde são considerados os três efeitos em simultâneo, foram obtidos através de simulação os valores apresentados na Tabela 3.11.

A Figura 3.16 mostra o número médio de pacotes recebidos relativamente ao número de pacotes transmitidos. A figura ilustra ainda os resultados obtidos considerando ou não a existência de ruído do tipo Additive White Gaussian Noise (AWGN), representado por  $N_0$  em (3.2). Tal como se verifica pelos resultados, o facto do ruído  $N_0$  ter sido desprezado no modelo (na equação (3.10)) é aproximação válida para ruído do tipo AWGN, diminuindo dessa forma a complexidade do modelo.

| $n$ | $E_r(b = 0.01)$ | $E_r(b = 0.02)$ | $E_r(b = 0.04)$ | $E_r(b = 0.08)$ | $E_r(b = 0.16)$ |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 5   | 4.5209          | 4.1749          | 3.6654          | 2.9986          | 2.2416          |
| 10  | 8.0492          | 6.8478          | 5.3224          | 3.6864          | 2.2353          |
| 15  | 10.8536         | 8.6235          | 6.1061          | 3.7717          | 2.0175          |
| 20  | 13.1001         | 9.8280          | 6.4589          | 3.6727          | 1.8106          |
| 25  | 14.9246         | 10.6501         | 6.5943          | 3.5188          | 1.6372          |
| 30  | 16.4166         | 11.2156         | 6.6113          | 3.3597          | 1.4952          |
| 35  | 17.6411         | 11.5965         | 6.5554          | 3.2024          | 1.3773          |
| 40  | 18.6562         | 11.8531         | 6.4641          | 3.0566          | 1.2790          |
| 45  | 19.4940         | 12.0117         | 6.3492          | 2.9253          | 1.1939          |
| 50  | 20.1875         | 12.0998         | 6.2285          | 2.8013          | 1.1202          |
| 55  | 20.7591         | 12.1386         | 6.1054          | 2.6884          | 1.0552          |
| 60  | 21.2405         | 12.1491         | 5.9789          | 2.5862          | 0.9983          |
| 65  | 21.6386         | 12.1196         | 5.8528          | 2.4955          | 0.9467          |
| 70  | 21.9672         | 12.0706         | 5.7306          | 2.4053          | 0.9003          |
| 75  | 22.2323         | 12.0017         | 5.6134          | 2.3278          | 0.8585          |
| 80  | 22.4523         | 11.9234         | 5.5022          | 2.2511          | 0.8193          |
| 85  | 22.6287         | 11.8429         | 5.3940          | 2.1828          | 0.7829          |
| 90  | 22.7585         | 11.7496         | 5.2894          | 2.1169          | 0.7502          |
| 95  | 24.3561         | 11.6516         | 5.1859          | 2.0553          | 0.7202          |
| 100 | 22.8640         | 11.5534         | 5.0908          | 1.9981          | 0.6928          |

Tabela 3.11: Número médio de pacotes recebidos com RL + LN + PL.

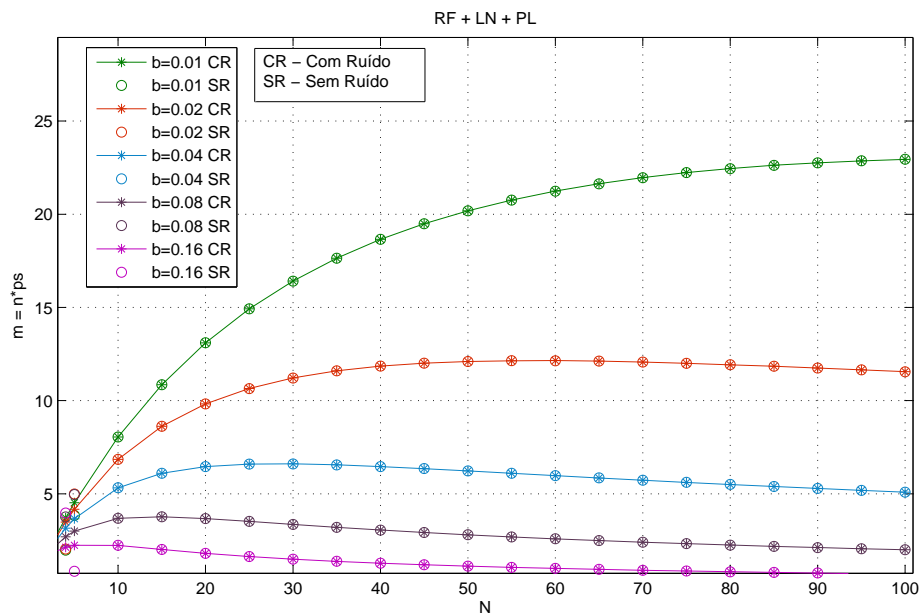


Figura 3.16: Número médio de pacotes recebidos vs. número de pacotes transmitidos com RL + LN + PL

# 4

## Protocolo MAC

### 4.1 Introdução

No capítulo anterior realizou-se o estudo de como os efeitos de propagação influenciam o valor das potências recebidas, caracterizando-se a capacidade de recepção em diversos cenários MPR. Foi, igualmente, caracterizado o número médio de transmissões com sucesso, tendo em conta o número total de nós a transmitir em simultâneo.

Este capítulo apresenta três protocolos MAC, assumindo que existe capacidade MPR no recetor, aproveitando a informação caracterizada no capítulo anterior. Desta forma, é possível explorar a influência dos efeitos de propagação no débito de transmissão e a determinação do valor ótimo de nós a transmitir em simultâneo. Pelos dados do capítulo anterior, observa-se que a partir de um certo número de nós a transmitir em simultâneo, o número médio de pacotes recebidos com sucesso começa a diminuir. Através dos protocolos MAC é possível controlar o número de nós que transmitem em simultâneo de forma a aumentar o número de pacotes recebidos.

Na Figura 4.1 observa-se uma ronda de comunicação na qual se baseiam os três protocolos MAC analisados neste capítulo. Esta divide-se em duas partes: a fase de negociação, e a fase de transmissão de dados. Na fase de negociação os  $n_{max}$  nós com intenção de transmitir enviam, com determinada probabilidade  $p$ , um pacote RTS num dos  $w$  slots desta fase, efetuando assim um pedido para transmissão na fase seguinte. Após  $w$  slots, é enviado um pacote CTS, pelo recetor, informando os nós selecionados para transmitir.

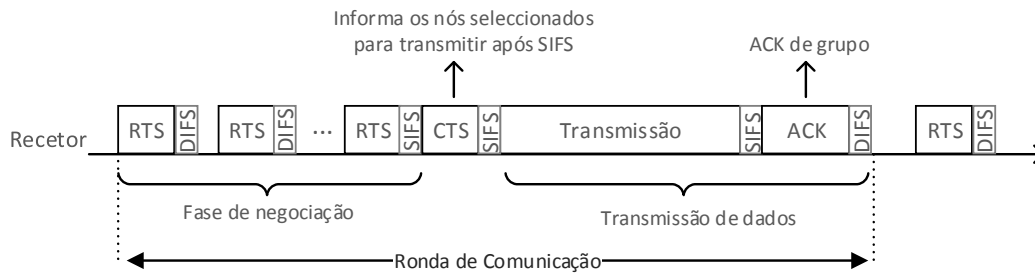


Figura 4.1: Protocolo MAC baseado em [Zha10].

$N_{Tx}$  representa o número total de nós que irão participar na fase de transmissão. A duração de uma ronda de comunicação é fixa, tendo a fase de negociação uma duração de  $w + 1$  slots ( $w$  slots RTS e um CTS), e a fase de transmissão tem a duração do tempo de transmissão  $T_x$  e do slot ACK.

Desta forma, seja  $N$  uma variável aleatória (VA) que representa o número de nós a aceder num slot RTS

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

e  $X$  uma VA que representa o slot da trama RTS da fase de negociação

$$X \in \{1, 2, \dots, w\}, \quad (4.2)$$

a probabilidade de um nó transmitir uma trama RTS no slot  $k \in \{1, 2, \dots, w\}$  é dada pela distribuição geométrica

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

dado só poderem transmitir o RTS num dos  $w$  slots. A probabilidade de  $N$  nós acederem num slot  $K$  é dada pela distribuição binomial

$$P(N = n, X = k) = \binom{n_{max}}{n} \cdot [P_r(X = k)]^n \cdot [1 - P_r(X = k)]^{n_{max}-n}, \quad (4.4)$$

que utilizando a equação (4.3) conduz a

$$P(N = n, X = k) = \binom{n_{max}}{n} \cdot [p \cdot (1 - p)^{k-1}]^n \cdot [1 - p \cdot (1 - p)^{k-1}]^{n_{max}-n}. \quad (4.5)$$

Seja  $m$  o número máximo de nós transmissores num *slot*, o qual pode estar limitado a 1, no caso em que somente um pacote pode ser recebido com sucesso (Single Packet Reception - SPR), a média de nós que enviam o pedido de reserva num determinado *slot* ( $k$ ) é dada por

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

Desta forma, é possível calcular o número de nós a transmitir, permitindo estudar o débito ( $S$ ) de transmissão, tendo em conta que o número de *slots* de RTS utilizados na fase de negociação e a quantidade de nós a transmitir influenciam diretamente o valor do débito.

Seja  $N_{Tx}$  o número de nós aceites na fase de negociação, pelos efeitos de propagação estudados no capítulo anterior, o valor de pacotes recebidos varia consoante as potências recebidas. Dessa forma, o número médio de pacotes recebidos com sucesso,  $R_{Tx}$ , é função do número médio de nós aceites na fase de negociação.  $R_{Tx}(N_{Tx})$  representa a função de pacotes recebidos com sucesso, podendo ser determinado pelo modelo proposto no Capítulo 3, ou aproximado pelos dados da Secção 3.3 para as parametrizações adotadas.

O débito, obtido pelos nós é definido por

$$S = \frac{R_{Tx} \cdot (T_x)}{w + 1 + T_x + T_{ACK}}, \quad (4.7)$$

onde  $w + 1$  é o número de *slots* na fase de negociação (incluindo o CTS),  $T_x$  representa a duração da fase de transmissão e  $T_{ACK}$  a duração do *slot* ACK.

Nas secções seguintes serão estudados três protocolos baseados no esquema de acesso apresentado na Figura 4.1, os quais se enumeram de seguida:

1. Protocolo SPR + MPR - neste protocolo é assumido SPR na fase de negociação. Foi escolhido SPR na fase de negociação pelo facto de permitir maior fiabilidade de transmissão dos pedidos de negociação (RTS), podendo ser aplicados esquemas de comunicação de menor complexidade durante a fase de reserva. Num esquema

SPR, caso exista mais do que um pacote RTS transmitido num determinado *slot* de negociação pelos diferentes nós transmissores os pedidos de negociação são ignorados para todos os pacotes que colidiram naquele *slot*.

Neste protocolo adota-se MPR somente na fase de transmissão, sabendo-se pelo Capítulo 3 que quando  $N_{Tx}$  nós passam à fase de transmissão, apenas  $R_{Tx}$  transmitem com sucesso. Desta forma, o valor de  $R_{Tx}$  é determinado a partir de (3.29) após ser conhecido o número de nós que requereu transmissão durante a fase de negociação.  $R_{Tx} = E_r$  é calculado através da equação (3.29).

2. Protocolo MPR-limitado + MPR - neste protocolo admite-se MPR na fase de negociação, embora seja imposto um limite ao número máximo ( $\beta$ ) de nós que podem ser recebidos por *slot* de reserva. Este é um protocolo mais irrealista, embora seja assumido em muitos trabalhos. Neste caso, quando o número de RTSs transmitidos num *slot* de negociação é superior a  $\beta$ , só se consideram  $\beta$  pedidos recebidos com sucesso. Quando o número de RTS é inferior ou igual a  $\beta$ , considera-se que o número de pacotes recebidos é igual ao número de transmissões.

Na fase de transmissão este protocolo utiliza um esquema MPR (sem limitação  $\beta$ ), à semelhança do protocolo anterior, obtendo-se a média do número de pacotes recebidos com sucesso ( $R_{Tx}$ ) através do modelo proposto no capítulo anterior.

3. Protocolo MPR + MPR - neste protocolo, admite-se um comportamento mais realista, não assumindo a limitação  $\beta$  no número de pacotes recebidos. Contrariamente ao protocolo anterior, admite-se uma determinada probabilidade de receber 1, 2, ...,  $n_{max}$  transmissões com sucesso quer na fase de negociação (envio dos RTS), quer na fase de transmissão, a qual é caracterizada no Capítulo 3. Isto significa que se  $N_X$  nós colidirem num determinado *slot* da fase de negociação, apenas  $R_X$  serão considerados. Sendo  $R_X = E_r$  determinado através da equação (3.29). O número de nós a aceder à fase de transmissão ( $N_{Tx}$ ) é determinado pelo somatório das  $R_X$  transmissões com sucesso por *slot* da fase de reserva.

A fase de transmissão funciona de modo semelhante aos protocolos anteriores.

O débito de transferência de dados é estudado de seguida para cada um dos protocolos, fazendo variar o número total de nós com intenção de transmitir, o número de *slots*

na fase de negociação e a probabilidade de transmissão de pedidos RTS.

## 4.2 Protocolo A: SPR+MPR

Este protocolo MAC é definido por duas fases em cada ronda de comunicação (como observado na Figura 4.1). Na fase de negociação (reserva) os  $n_{max}$  nós transmissores enviam um pedido RTS num dos  $w$  slots desta fase. Num cenário onde  $n_{max}$  nós pretendem transmitir, estes executam o protocolo de forma individual, sem consciência do número de nós na vizinhança que também pretendem transmitir dados.

No recetor, vários pedidos RTS serão recebidos nas diferentes oportunidades (slots) da fase de negociação, porém, neste protocolo é considerada transmissão SPR em cada um dos slots de negociação. Dessa forma, caso exista mais do que um nó a transmitir no mesmo slot ocorrerá uma colisão, e as transmissões envolvidas não serão devidamente decodificadas pelo nó recetor. Assim, haverá no máximo apenas um pedido RTS por slot de reserva, e, por consequência, haverá no máximo  $w$  nós a transmitir na fase de transmissão, que no fim da fase de reserva recebem autorização (CTS) para transmissão na fase seguinte. Por conseguinte, a média de nós que são autorizados a transmitir é dada por

$$E_a = \sum_{k=1}^w \alpha_k(m=1). \quad (4.8)$$

Repare-se que o argumento da função  $\alpha_k$ , que representa o número médio de nós a aceder com sucesso no slot  $k$ , é  $m=1$ , dado se ter considerado transmissão SPR na qual só existe sucesso quando um único nó acede ao slot.

Seja  $N_{Tx} = E_a$  o número de nós autorizados a aceder ao meio na fase de transmissão, estes irão transmitir em simultâneo, durante o intervalo  $T_x$ . Sendo as suas potências atenuadas pelos efeitos de propagação estudados no capítulo anterior, e observando a caracterização do número médio de pacotes recebidos, o valor médio de receções com sucesso,  $R_{Tx}(N_{Tx})$ , é aproximado teoricamente pela equação (3.29).

Assim, por (4.7), é possível obter o débito de transmissão, o qual é caracterizado na Secção 4.5.

### 4.3 Protocolo B: MPR-limitado+MPR

À semelhança do protocolo anterior, os nós comportam-se de forma individual, enviando o pedido RTS num dos *slots* da fase de negociação, esperando receber o CTS no final da mesma. Este pedido é feito com determinada probabilidade  $p$ .

Na fase de negociação, o recetor aceita mais do que um pedido RTS por *slot*, limitando a  $\beta$  pedidos por *slot*. Seja  $m = \beta$  o número máximo de nós que são autorizados a transmitir num *slot*, a média de nós que efetua reserva com sucesso durante a fase de reserva é dada por

$$E_b = \sum_{k=1}^{n_{max}} \left[ \min(\beta, k) \cdot \binom{n_{max}}{k} \cdot P_{1Tx}^k \cdot (1 - P_{1Tx})^{n_{max}-k} \right], \quad (4.9)$$

onde  $P_{1Tx}$  representa a probabilidade de um nó transmitir o pacote RTS durante os  $w$  *slots* da fase de negociação, a qual é dada por

$$P_{1Tx} = \sum_{k=1}^w P_r(X = k). \quad (4.10)$$

Este protocolo pode ser útil quando se pretende limitar o número máximo de nós na transmissão, podendo  $\beta$  ser definido através do valor ótimo de nós a transmitir para um determinado valor de limiar. Desta forma, limita-se o número médio de nós a transmitir, causando a diminuição no débito.

A fase de transmissão funciona de forma semelhante ao protocolo semelhante, sendo o seu débito avaliado na Secção 4.5.

### 4.4 Protocolo C: MPR+MPR

Seja o envio dos pacotes RTS processado à semelhança dos protocolos anteriores, na receção os pedidos aceites por *slot* não são, neste protocolo, limitados a  $\beta$ . É considerado o número total de pedidos num *slot* da fase de negociação, e o seu valor é dado pela caracterização do número médio de pacotes, deduzido no capítulo anterior (equação (3.29)), tendo em conta os efeitos de propagação. Desta forma, caso  $N_k$  nós enviem um pedido RTS, o recetor irá receber com sucesso apenas  $R_k$ , não sendo possível observar a condição de receção com sucesso para os restantes pacotes. Assim, o valor médio de nós que são

autorizados a aceder ao meio na fase de transmissão é dado por

$$E_c = \sum_{k=1}^w R_k \cdot \alpha_w(N_k). \quad (4.11)$$

Seja  $N_{Tx} = E_c$  o número de nós autorizados a transmitir na fase de transmissão, o protocolo segue o comportamento descrito nos protocolos anteriores onde, observando o número médio de transmissões na fase de transmissão se obtém  $R_{Tx}$  necessário para determinar o débito através da equação (4.7).

## 4.5 Validação de Resultados

Os cenários definidos neste trabalho têm em consideração que os três efeitos de propagação (PL, LN e RF) ocorrem em simultâneo e com as parametrizações já referidas no Capítulo 3, pelo que o número médio ( $R$ ) de nós a transmitir com sucesso (tendo em conta que  $N$  nós emitem em simultâneo) é dado pelos valores calculados no capítulo anterior. De forma a validar os resultados, a função que determina o número médio de pacotes recebidos com sucesso ( $R$ ) é determinada pelos os valores da Tabela 3.11 quando  $b = 0.02$ . No entanto, o cálculo do modelo teórico exige que esta função seja contínua, pelo que foi feita uma interpolação de forma a que seja possível calcular  $R$  quando  $N$  não é um número inteiro.

### 4.5.1 Protocolo A: SPR+MPR

Procedeu-se à computação do modelo, bem como as simulações de forma a validar os resultados obtidos teoricamente. Para o protocolo SPR+MPR foi criado um cenário onde a fase de negociação é composta por 29 *slots* RTS e 1 *slot* CTS, a probabilidade de envio do pacote RTS é  $p = 1/40$  e o tempo de transmissão  $T_x = 20$ .

A Figura 4.2 mostra o número de nós a acederem à fase de transmissão ( $N_{Tx}$ ). Pela figura observa-se a validação do modelo teórico deste protocolo, estando os valores das simulações coincidentes com os valores do modelo, calculados pela equação (4.8).

Na Figura 4.3 representa-se o gráfico do número de transmissões recebidas com sucesso ( $R_{Tx}$ ) através de simulações e através do modelo (3.29). Observa-se que com o aumento do número de nós transmissores, o número de pacotes recebidos com sucesso

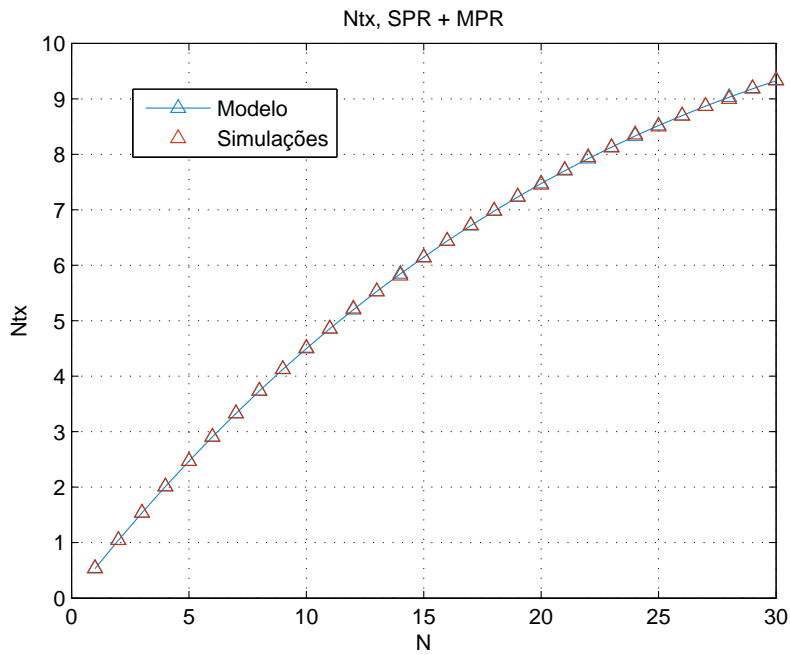


Figura 4.2: Número de nós a acessarem à fase de transmissão com os efeitos de propagação RL + LN + PL para SPR+MPR

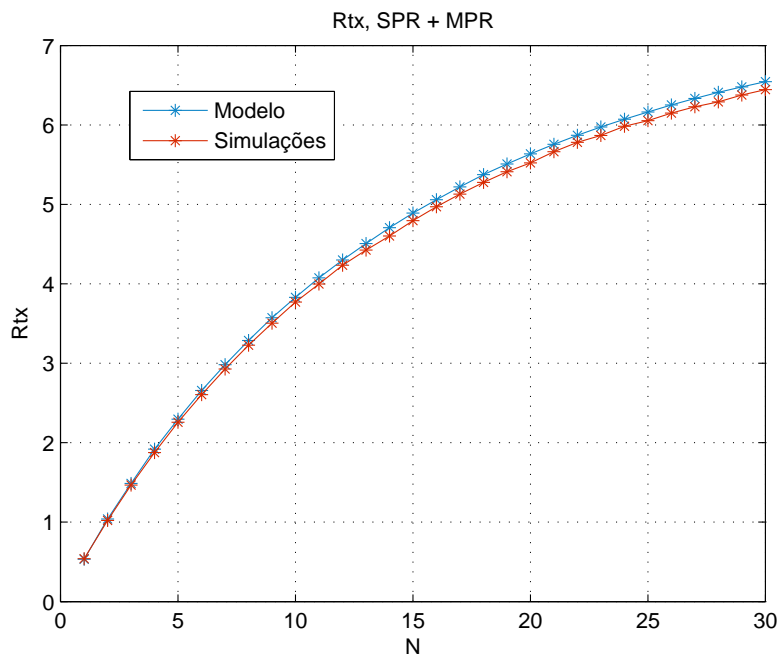


Figura 4.3:  $R_{Tx}$  na fase de transmissão com RL + LN + PL para SPR+MPR

( $R_{Tx}$ ), obtidos nas simulações são ligeiramente diferentes dos valores de  $R_{Tx}$  calculados pelo modelo teórico. Isto deve-se ao facto de quando o número de pacotes transmitidos é elevado, verifica-se que o número de receções com sucesso começa a ser constante (Figura 3.16), ou seja, tem um comportamento aproximadamente logarítmico. Esse facto induz um erro ao calcular a interpolação do número médio de pacotes recebidos, o qual é propagado ao modelo teórico através da variável  $N_{Tx}$  da equação (3.29). Este erro propaga-se também ao débito, obtido pela equação (4.7), o qual é apresentado na Figura 4.4.

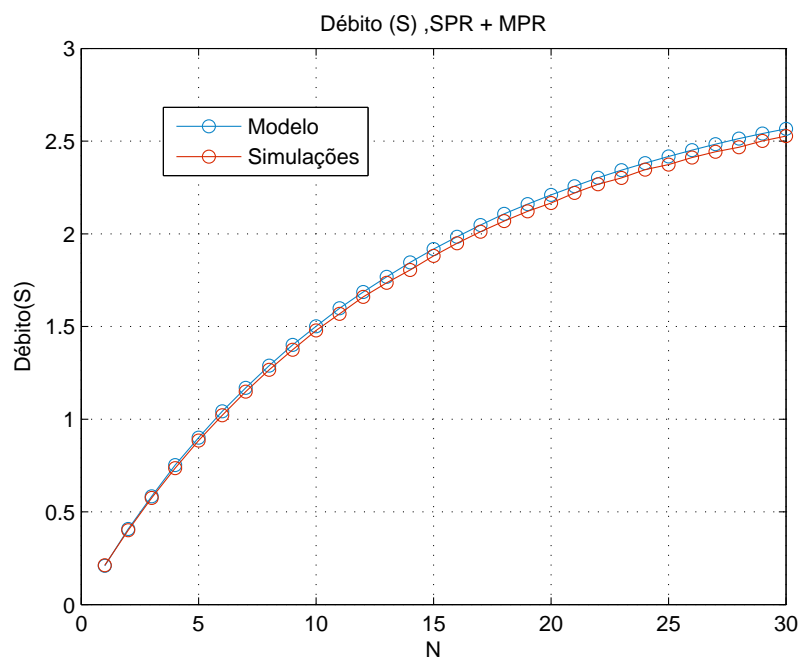


Figura 4.4: Débito na transmissão com os efeitos de propagação RL + LN + PL para SPR+MPR com 29 slots RTS

Fazendo baixar o número de slots RTS na fase de negociação para 9, observa-se, na Figura 4.5, uma diminuição no débito de transmissão.

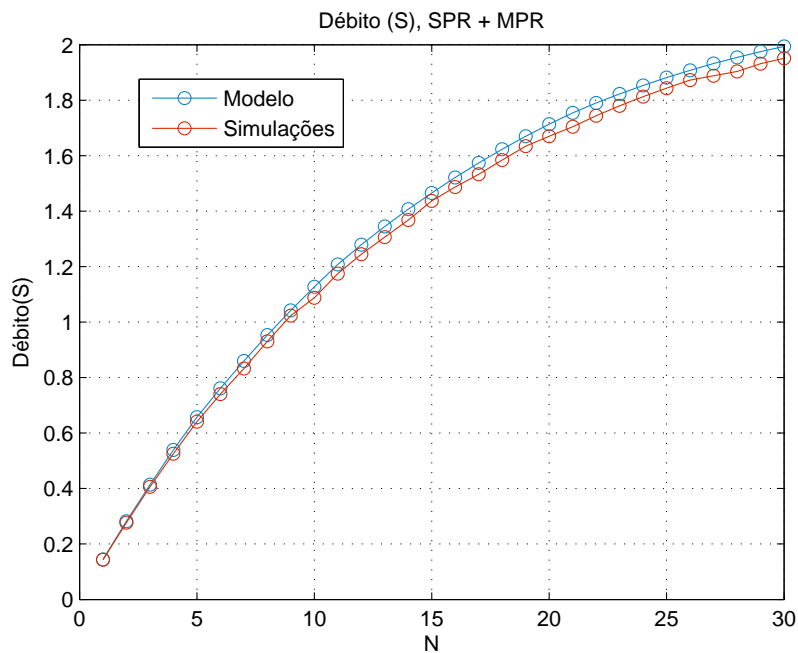


Figura 4.5: Débito na transmissão com os efeitos de propagação RL + LN + PL para SPR+MPR com 9 slots RTS

#### 4.5.2 Protocolo B: MPR-limitado + MPR

De forma idêntica ao protocolo anterior, procedeu-se à computação do modelo e simulações do protocolo  $\beta - MPR$ , num cenário cujo protocolo é composto por 9 slots RTS e um slot CTS na fase de negociação, a probabilidade de envio do pacote RTS é  $p = 1/40$ , o tempo de transmissão é  $T_x = 20$ .

Na Figura 4.6 observa-se o número de nós a acederem à fase de transmissão ( $N_{Tx}$ ) para cada  $N$  nós que inicialmente tinham intenção de transmitir. Os resultados das simulações aproximam-se dos resultados teóricos, os quais foram obtidos através da equação 4.9.

$R_{Tx}$  é apresentado na Figura 4.7, sendo os resultados teóricos obtidos a partir de (3.29).

A Figura 4.8 mostra o débito de transferência de dados obtido com este cenário.

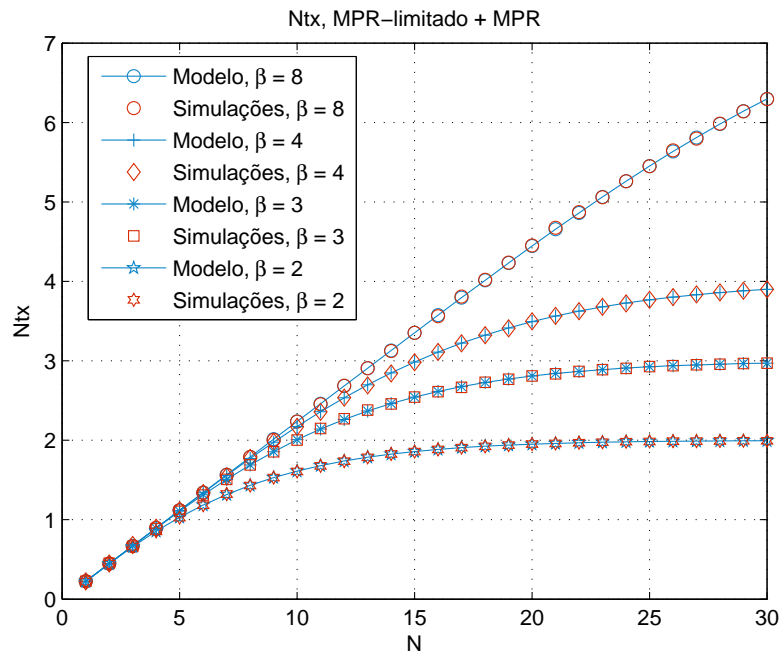


Figura 4.6: Número de nós a acessarem à fase de transmissão com os efeitos de propagação RL + LN + PL para MPR-limitado+MPR

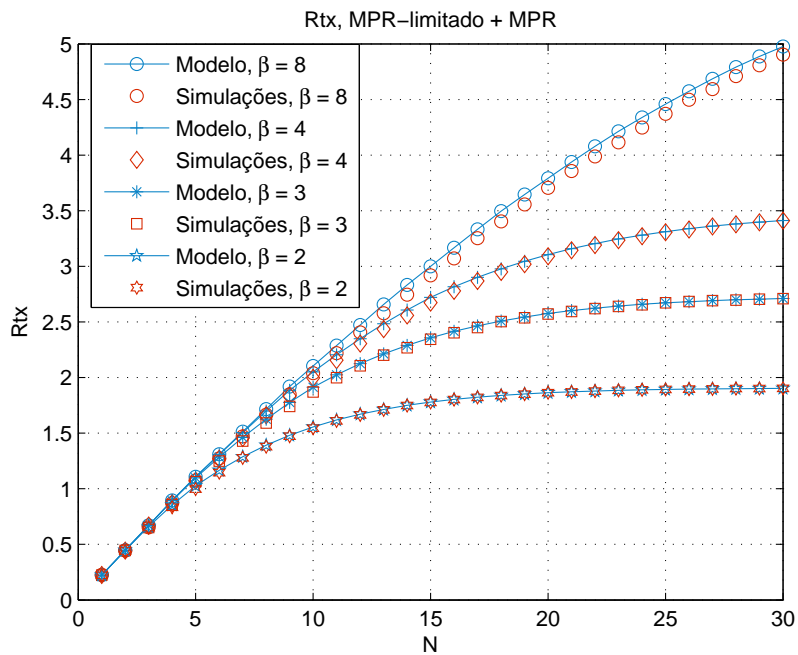


Figura 4.7:  $R_{Tx}$  com RL + LN + PL para MPR-limitado+MPR

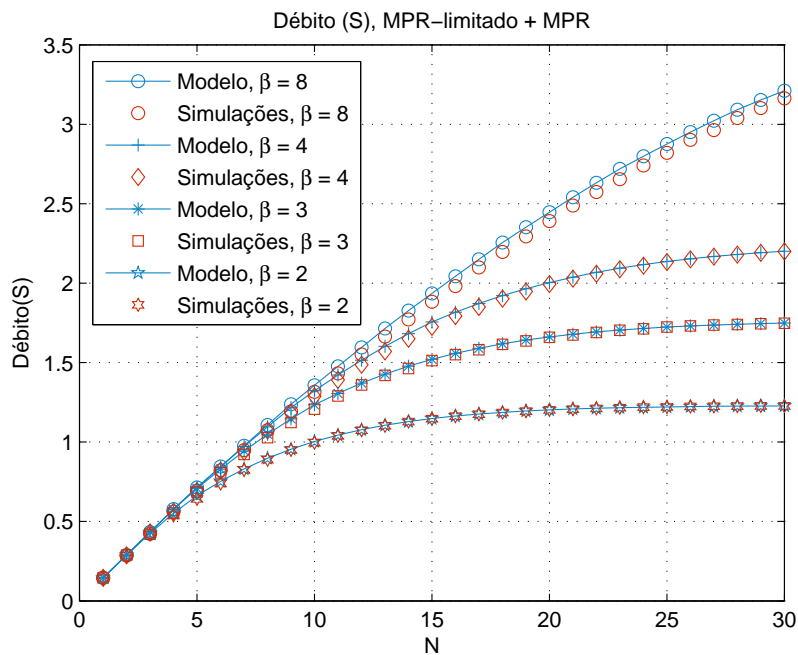


Figura 4.8: Débito na transmissão com RL + LN + PL para MPR-limitado+MPR

### 4.5.3 Protocolo C: MPR + MPR

O cenário para efetuar a computação do modelo e simulações deste protocolo é semelhante ao protocolo anterior, com 9 slots RTS e 1 slot CTS na fase de negociação, com probabilidade de envio de RTS  $p = 1/40$  e tempo de transmissão  $T_x = 20$ .

É observado na Figura 4.9 o número de nós a acederem à fase de transmissão ( $N_{Tx}$ ), por cada  $N$ . Os resultados teóricos, obtidos a partir de (4.11), são validados pelos resultados das simulações.

A Figura 4.10 mostra o número de pacotes recebidos com sucesso, na fase de transmissão, de acordo com a caracterização do número médio de pacotes recebidos, determinado no Capítulo 3 (equação (3.29)).

O débito da transmissão de dados é observado na Figura 4.11. Note-se que os resultados teóricos do modelo são validados pelas simulações.

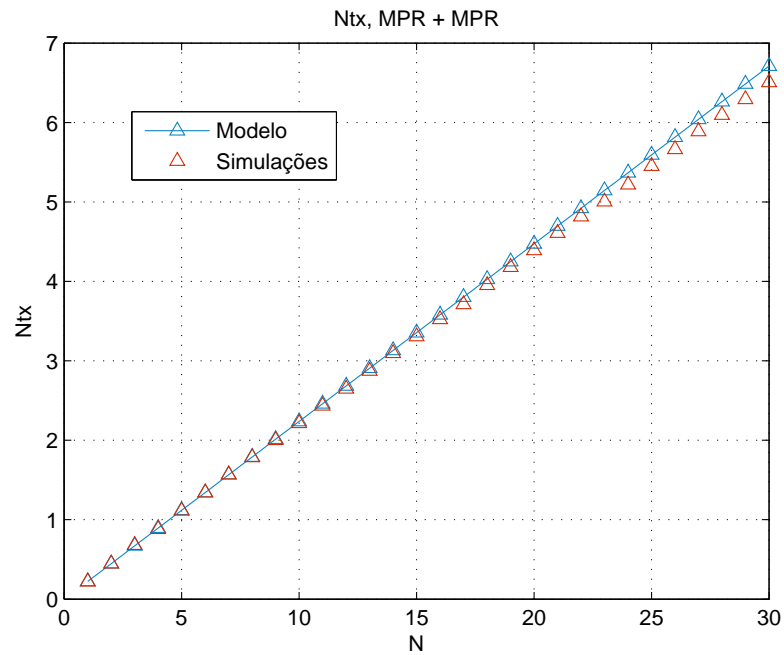


Figura 4.9: Número de nós a acessarem à fase de transmissão com os efeitos de propagação RL + LN + PL para MPR+MPR

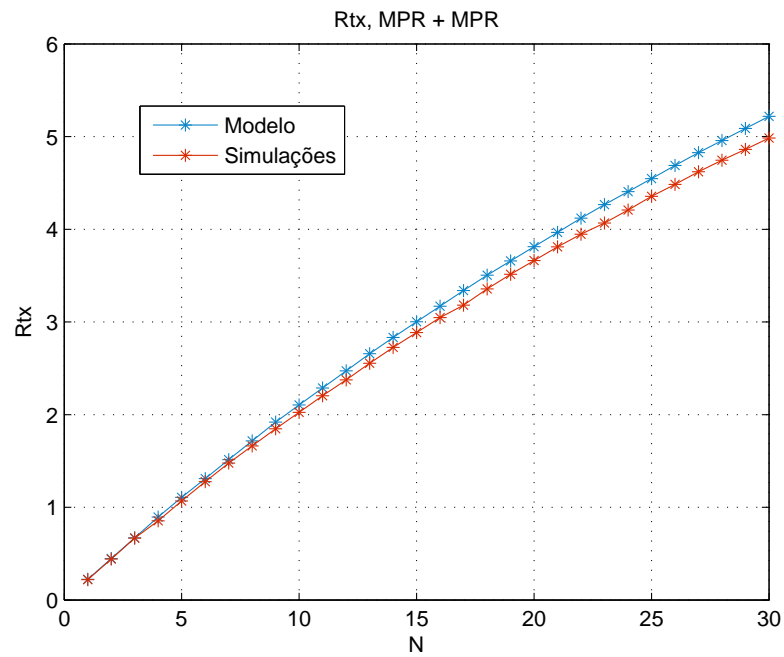


Figura 4.10:  $R_{Tx}$  com RL + LN + PL para MPR+MPR

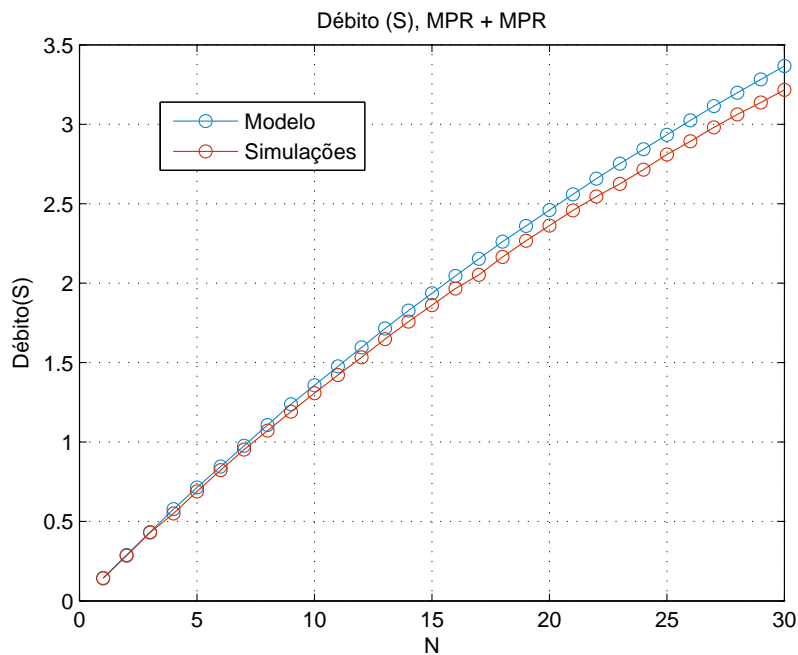


Figura 4.11: Débito na transmissão com RL + LN + PL para MPR+MPR

## 4.6 Comparação dos Protocolos

A Figura 4.12 mostra o débito de transferência de dados para os três protocolos utilizando as mesmas parametrizações: 9 *slots* RTS e 1 *slot* CTS na fase de negociação com  $p = 1/40$  e  $T_x = 1/40$ . No Protocolo B (MPR-limitado + MPR) é utilizado  $\beta = 4$ . Observa-se na figura que no Protocolo A (SPR + MPR) o rendimento é reduzido face aos restantes protocolos devido à utilização de SPR na fase de negociação, com a limitação na receção de apenas 1 pacote RTS por *slot* RTS. O débito no Protocolo B acompanha, inicialmente, o débito do Protocolo C (MPR + MPR), porém devido à limitação de  $\beta = 4$ , o débito torna-se constante a partir de  $N = 18$ . O Protocolo C apresenta um rendimento mais elevado entre os três protocolos.

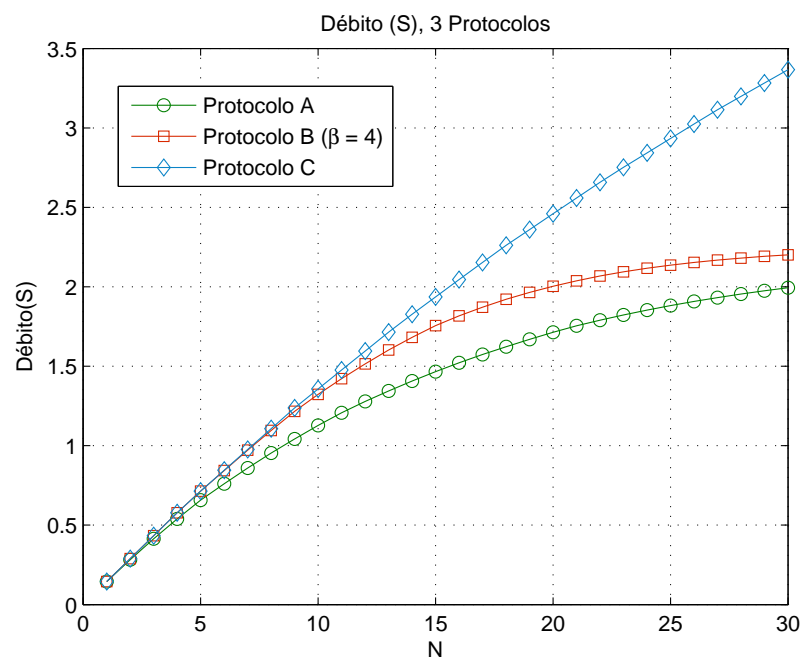


Figura 4.12: Débito na transmissão dos três protocolos.





## Conclusões

Esta dissertação propõe três protocolos MAC em sistemas cuja recepção tem capacidade de MPR. Inicialmente foram estudadas quais as condições para que os pacotes sejam recebidos com sucesso, e de que modo os efeitos de propagação influenciam esta condição. Com isto, foi possível caracterizar o número médio de pacotes recebidos com sucesso, possibilitando assim a modelação dos protocolos.

### 5.1 Considerações Finais

O trabalho começa por determinar a condição de recepção com sucesso num cenário onde  $n$  nós pretendem transmitir para um recetor, isto é, um pacote é recebido com sucesso se a relação entre a potência do sinal recebido e a soma das potências interferentes e o ruído for superior a um determinado limiar. Com isto, caracteriza-se de que forma os efeitos de propagação atenuam a potência, e por consequência, a condição de recepção. Assim, foi possível caracterizar a probabilidade de recepção individual, permitindo com isso a caracterização do número médio de pacotes recebidos. Apesar das transmissões em paralelo serem independentes, na recepção é necessário ter em conta todas as transmissões em simultâneo. Porém, o cálculo do número médio de pacotes recebidos assume independência entre a visão de uma só recepção e todas as outras. Dada a baixa magnitude do erro observado através da comparação do modelo teórico com os resultados de simulação, a aproximação de independência aplicada às diferentes probabilidades de recepção é admissível.

Caracterizado o comportamento do nível físico, e sabendo o número médio de pacotes

recebidos com sucesso tendo em conta o número de pacotes transmitidos, foram desenvolvidos três protocolos MAC (Capítulo 4). O protocolo é composto por uma ronda de transmissão e cada ronda é dividida em duas fases: a fase de negociação, onde os nós transmissores enviam (com determinada probabilidade) um pacote RTS num dos *slots* disponíveis para o efeito, terminando com um CTS enviado pelo recetor para informar quais os nós autorizados a transmitir; e a fase de transmissão, em que os nós autorizados transmitem em simultâneo para o meio. Esta última fase é igual nos três protocolos.

O primeiro protocolo (Secção 4.2) funciona com o recetor em modo SPR na fase de negociação, permitindo a receção de apenas um pacote RTS em cada *slot*. No segundo protocolo (Secção 4.3), o recetor tem capacidade de MPR, porém limitada a um determinado limiar constante. No terceiro protocolo (Secção 4.4), o recetor tem igualmente capacidade MPR, sendo que na fase de negociação o número de nós não está limitado pelo protocolo, estando somente limitado pelo modelo do nível físico (limitado pela probabilidade de receção com sucesso).

Na fase de transmissão (semelhante nos três protocolos), o recetor tem capacidade MPR, sendo o número de nós a transmitir com sucesso caracterizado pela Secção 3.3.

Os modelos teóricos foram validados pelas simulações (Secção 4.5), tendo sido variado o número de nós a acederem à fase de transmissão, o número de nós a transmitir dados com sucesso, e o débito de transmissão de dados para cada cenário.

Na Secção 4.6 realiza-se uma comparação do débito entre os três protocolos. Pela comparação, observa-se que o Protocolo A tem menor rendimento que os Protocolos B e C, devido à sua limitação na receção (SPR na fase de negociação). O débito atingido pelo Protocolo B é igual ao débito do Protocolo C até um determinado número de transmissões em simultâneo, pois existe um limiar fixo  $\beta$  associado ao Protocolo B que limita o número de receções na fase de negociação. Observa-se que o Protocolo C apresenta o maior rendimento, apresentando o melhor desempenho entre os três.

## 5.2 Trabalho Futuro

Esta dissertação teve como objetivo o desenvolvimento de três protocolos MAC. Foram desenvolvidos e validados três modelos teóricos (um para cada protocolo) que permitem

calcular o débito útil atingido por cada um deles. Como trabalho futuro pretende-se determinar as parametrizações dos modelos teóricos que otimizem o débito de transferência de dados. Isto é, obter o tamanho da janela da fase negociação, o tempo de transmissão e a probabilidade de reserva que para um determinado número de nós conduzem ao débito máximo.

Outro parâmetro a considerar é a distribuição espacial dos nós e a sua influência em termos da probabilidade de sucesso na recepção. Este parâmetro poderá ser utilizado pelos protocolos MAC de forma a permitir o acesso ao meio a um conjunto de nós que, dada a sua posição relativamente ao nó recetor, permitam um aumento efetivo do débito alcançado pelo sistema.



# Bibliografia

- [CZKM10] G. D. Celik, G. Zussman, W. F. Khan e E. Modiano. “MAC for networks with multipacket reception capability and spatially distributed nodes”. Em: *Mobile Computing, IEEE Transactions on* 9.2 (2010), 226–240. (Acedido em 31/03/2014).
- [CBT13] D. Chan, T. Berger e L. Tong. “Carrier Sense Multiple Access Communications on Multipacket Reception Channels: Theory and Applications to IEEE 802.11 Wireless Networks”. Em: *IEEE Transactions on Communications* 61.1 (jan. de 2013), pp. 266–278.
- [Cov72] T. Cover. “Broadcast channels”. Em: *IEEE Transactions on Information Theory* 18.1 (jan. de 1972), pp. 2–14.
- [GVS88] S. Ghez, S. Verdu e S. Schwartz. “Stability properties of slotted Aloha with multipacket reception capability”. Em: *IEEE Transactions on Automatic Control* 33.7 (jul. de 1988), pp. 640–649.
- [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.
- [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.
- [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.

- [KT75] L. Kleinrock e F. Tobagi. "Packet Switching in Radio Channels: Part I—Carrier Sense Multiple-Access Modes and Their Throughput-Delay Characteristics". Em: *IEEE Transactions on Communications* 23.12 (dez. de 1975), pp. 1400–1416.
- [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.
- [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.
- [WM98] D. Warrier e U. Madhow. "On the capacity of cellular CDMA with successive decoding and controlled power disparities". Em: *48th IEEE Vehicular Technology Conference, 1998. VTC 98. Vol. 3. Mai. de 1998*.
- [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.