

**LIGA DE ENSINO DO RIO GRANDE DO NORTE  
FACULDADE NATALENSE PARA O DESENVOLVIMENTO DO RN  
ESPECIALIZAÇÃO EM REDES DE COMPUTADORES**

**ANÁLISE DO PADRÃO 802.11N**

**Luis Fhelipe Ribeiro Gomes Netto Marinho**

**NATAL/RN  
2010**

**LUIS FHELIPE RIBEIRO GOMES NETTO MARINHO**

ANÁLISE DO PADRÃO 802.11N

**ANÁLISE DO PADRÃO 802.11N**

Luiz Felipe Ribeiro Gomes Netto Marinho

Monografia apresentada ao curso de Especialização em Redes de Computadores da Faculdade Natalense para o Desenvolvimento do Rio Grande do Norte como requisito para a obtenção do título de Especialista em Redes de Computadores.

**Orientador:**

**Antônio Luiz Pereira de Siqueira Campos**

Orientador: Antônio Luiz Pereira de Siqueira Campos (Doutor em Engenharia Elétrica)  
Monografia (Especialização em Redes de Computadores)  
Faculdade Natalense para o Desenvolvimento do Rio Grande do Norte

1: Redes de Computadores - Monografia 2: Internet sem Fio - Monografia 1. Título.

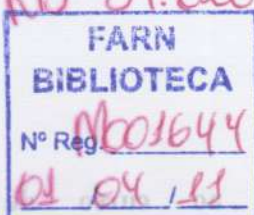
CDU 004.75

RNFARNIBIC

**NATAL/RN**

**2010**

RB-34.626

m  
004.72  
M23a  
2010  
EX-01Catalogação na Publicação – Biblioteca da FARN  
Setor de Processos Técnicos

Marinho, Luis Fhelipe Ribeiro Gomes Netto

Análise do padrão 802.11N / Luis Fhelipe Ribeiro Gomes Netto

Marinho. – Natal: FARN, 2010.

67 f.

Orientador: Antônio Luiz Pereira de Siqueira Campos (Doutor em Engenharia Elétrica)

Monografia (Especialização em Redes de Computadores) – Faculdade Natalense para o Desenvolvimento do Rio Grande do Norte.

1. Redes de Computadores – Monografia. 2. Internet sem Fio – Monografia. I. Título.

RN/FARN/BC

CDU 004.72

**LIGA DE ENSINO DO RIO GRANDE DO NORTE  
FACULDADE NATALENSE PARA O DESENVOLVIMENTO DO RN  
ESPECIALIZAÇÃO EM REDES DE COMPUTADORES**

**ANÁLISE DO PADRÃO 802.11N**

**Luis Fhelipe Ribeiro Gomes Netto Marinho**

Monografia apresentada e aprovada em \_\_\_\_ de \_\_\_\_ de \_\_\_\_, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros

---

Antônio Luiz Pereira de Siqueira Campos  
Orientador

---

Membro examinador

---

Membro examinador

Natal/RN, \_\_\_\_ de \_\_\_\_ de \_\_\_\_.

## RESUMO

Esse trabalho descreve as principais características do 802.11n, abordando suas principais inovações, como a utilização de um conjunto de antenas inteligentes (MIMO), a agregação de canais, a melhoria na taxa de código e no OFDM, fazendo um comparativo entre o 802.11n e os padrões anteriores.

**Palavras-chave:** WIFI, 802.11n, MIMO, OFDM.

## ABSTRACT

This paper describes the main features of 802.11n, addressing its major innovations, such as using a set of smart antennas (MIMO), channel aggregation, improvement in code rate and OFDM, making a comparison between 802.11n and the previous standards.

**Keywords:** WIFI, 802.11n, MIMO, OFDM.

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.3: Canais do 802.11n                                             | 18 |
| <b>Keywords: WIFI, 802.11n, MIMO, OFDM.</b>                               | 19 |
| Figura 3.1: Modelo OSI da ISO                                             | 21 |
| Figura 3.2: Canais de 20MHz do 802.11n em 2,4GHz                          | 22 |
| Figura 3.3: Sobreposição entre canais de 40MHz do 802.11n em 2,4GHz       | 23 |
| Figura 3.4: Constelação da modulação BPSK                                 | 25 |
| Figura 3.5: Sinal BPSK modulado a partir da sequência 0111 0101 0010 1011 | 23 |
| Figura 3.6: Constelação da modulação QPSK                                 | 25 |
| Figura 3.7: Sinal modulado por QPSK                                       | 26 |
| Figura 3.8: Constelação do 16-QAM                                         | 26 |
| Figura 3.9: Constelação do 64-QAM                                         | 27 |
| Figura 3.10: Intervalo de guarda                                          | 29 |
| Figura 3.11: Quadro com a técnica DSSS-OFDM                               | 30 |
| Figura 3.12: Subportadoras OFDM                                           | 31 |
| Figura 3.13: Subportadoras OFDM em canais de 20 e 40MHz                   | 32 |
| Figura 3.14: Modelo de antenas MIMO                                       | 33 |
| Figura 3.15: Sinal sendo refletido em uma transmissão                     | 34 |
| Figura 3.16: Transmissão MIMO                                             | 34 |
| Figura 3.17: Multiplicação espacial no emissor                            | 35 |
| Figura 3.18: Recuperação do sinal pelo receptor                           | 36 |
| Figura 4.1: Subdivisão da estrutura de enlace                             | 38 |
| Figura 4.2: Formato geral do quadro MAC                                   | 38 |
| Figura 4.3: Formato detalhado do quadro MAC                               | 39 |
| Figura 4.4: Formato do campo controle de sequência                        | 42 |
| Figura 4.5: Relação entre os espaçamentos                                 | 44 |
| Figura 4.6: Arquitetura da subcamada MAC                                  | 47 |
| Figura 4.7: Modo básico do CSMA/CA                                        | 48 |
| Figura 4.8: Crescimento exponencial do backoff                            | 49 |
| Figura 4.9: Modo de reserva do CSMA/CA                                    | 50 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1: Arquitetura do 802.11.....                                         | 16 |
| Figura 2.2: DRS no 802.11b.....                                                | 17 |
| Figura 2.3: Canais do 802.11b/g.....                                           | 18 |
| Figura 2.4: Canais do 802.11a.....                                             | 19 |
| Figura 3.1: Modelo OSI da ISO.....                                             | 21 |
| Figura 3.2: Canais de 20MHz do 802.11n em 2,4GHz.....                          | 22 |
| Figura 3.3: Sobreposição nos canais de 40MHz do 802.11n em 2,4GHz.....         | 23 |
| Figura 3.4: Constelação da modulação BPSK.....                                 | 25 |
| Figura 3.5: Sinal BPSK modulado a partir da sequência 0111 0101 0010 1011..... | 25 |
| Figura 3.6: Constelação da modulação QPSK.....                                 | 25 |
| Figura 3.7: Sinal modulado por QPSK.....                                       | 26 |
| Figura 3.8: Constelação do 16-QAM.....                                         | 26 |
| Figura 3.9: Constelação do 64-QAM.....                                         | 27 |
| Figura 3.10: Intervalo de guarda.....                                          | 29 |
| Figura 3.11: Quadro com a técnica DSSS-OFDM.....                               | 30 |
| Figura 3.12: Subportadoras OFDM.....                                           | 31 |
| Figura 3.13: Subportadoras OFDM em canais de 20 e 40MHz.....                   | 32 |
| Figura 3.14: Modelo de antenas MIMO.....                                       | 33 |
| Figura 3.15: Sinal sendo refletido em uma transmissão.....                     | 34 |
| Figura 3.16: Transmissão MIMO.....                                             | 34 |
| Figura 3.17: Multiplexação espacial no emissor.....                            | 35 |
| Figura 3.18: Recuperação do sinal pelo receptor.....                           | 36 |
| Figura 4.1: Subdivisão da camada de enlace.....                                | 38 |
| Figura 4.2: Formato geral do quadro MAC.....                                   | 38 |
| Figura 4.3: Formato detalhado do quadro MAC.....                               | 39 |
| Figura 4.4: Formato do campo controle de sequência.....                        | 42 |
| Figura 4.5: Relação entre os espaçamentos.....                                 | 44 |
| Figura 4.6: Arquitetura da subcamada MAC.....                                  | 47 |
| Figura 4.7: Modo básico do CSMA/CA.....                                        | 48 |
| Figura 4.8: Crescimento exponencial do backoff.....                            | 49 |
| Figura 4.9: Modo de reserva do CSMA/CA.....                                    | 50 |

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.10: Alternação entre os períodos sem e com contenção.....            | 51 |
| Figura 4.11: Exemplo de uma transmissão PCF.....                              | 52 |
| Figura 4.12: Exemplo de uma fragmentação.....                                 | 55 |
| Figura 4.13: Representação de um A-MSDU.....                                  | 56 |
| Figura 4.14: Quadro A-MSDU.....                                               | 56 |
| Figura 4.15: Quadro A-MPDU.....                                               | 57 |
| Figura 4.16: Procedimento padrão do ACK.....                                  | 58 |
| Figura 4.17: Representação do Block ACK.....                                  | 59 |
| Figura 4.18: Representação do Block ACK imediato.....                         | 59 |
| Figura 4.19: Representação do Block ACK atrasado.....                         | 60 |
| Figura 4.20: Representação do esquema de retrocompatibilidade do 802.11n..... | 64 |

Tabela 9: Descrição do estado DCF..... 57

Tabela 10: Categorias de tráfego..... 53

## LISTA DE TABELAS

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Sobreposição nos canais de 40MHz do 802.11n em 2,4GHz ..... | 23 |
| Tabela 2: Quantidade de canais não sobrepostos em 2,4GHz e 5GHz.....  | 24 |
| Tabela 3: Taxa de transferência do OFDM para um canal de 20MHz. ....  | 32 |
| Tabela 4: Taxa de transferência do OFDM para um canal de 40MHz. ....  | 33 |
| Tabela 5: Taxa de transferência do 802.11n com várias antenas .....   | 36 |
| Tabela 6: Duração nominal do SIFS.....                                | 45 |
| Tabela 7: Duração nominal do PIFS.....                                | 46 |
| Tabela 8: Duração nominal do DIFS. ....                               | 46 |
| Tabela 9: Duração do aSlotTime. ....                                  | 49 |
| Tabela 10: Categorias de tráfego. ....                                | 53 |

|         |                                                        |
|---------|--------------------------------------------------------|
| BSSID   | Basic Service Set Identification                       |
| CCK     | Complementary Code Keying                              |
| CFP     | Contention Free Period                                 |
| CRC     | Cyclic Redundancy Check                                |
| CTS     | Clear to Send                                          |
| CSMA/CA | Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance |
| CW      | Contention Window                                      |
| DA      | Destination Address                                    |
| DCF     | Distributed Coordination Function                      |
| DBLBA   | Deliberate Block ACK                                   |
| DIFS    | DCF Interframe Space                                   |
| DRS     | Dynamic Rate Shifting                                  |
| DSSS    | Direct Sequence Spread Spectrum                        |
| EDCA    | Enhanced Distributed Channel Access                    |
| EIFS    | Extended Interframe Space                              |
| ERP     | Extended Rate Physical                                 |
| FCS     | Frame Check Sequence                                   |
| FLC     | Forward Error Correction                               |
| FHSS    | Frequency-Hopping Spread Spectrum                      |
| GI      | Guard Interval                                         |
| HC      | Hybrid Coordinator                                     |
| HCCA    | HCF Controlled Channel access                          |
| HCF     | Hybrid Coordination Function                           |
| IEEE    | Institute of Electrical and Electronics Engineers      |
| IFS     | Interframe Space                                       |
| ISM     | Industrial, Scientific and Medical                     |
| ISO     | International Standard Organization                    |
| LLC     | Logical Link Control                                   |
| MAC     | Media Access Control                                   |
| Mbps    | Megabits per second                                    |
| MIMO    | Multiple Input Multiple Output                         |

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

|         |                                                        |
|---------|--------------------------------------------------------|
| $\mu$ s | micro segundos                                         |
| 4-PSK   | Quadrature Phase Shift Keying                          |
| 16-QAM  | 6-Quadrature Amplitude Modulation                      |
| 64-QAM  | 64-Quadrature Amplitude Modulation                     |
| AC      | Access Category                                        |
| ACK     | Acknowledge                                            |
| ADDBA   | Add Block Acknowledgment                               |
| A-MPDU  | Aggregate MAC Protocol Data Unit                       |
| A-MSDU  | Aggregate MAC Service Data Unit                        |
| AP      | Access Point                                           |
| APSD    | Automatic Power Save Delivery                          |
| AIFS    | Arbitration Interframe Space                           |
| ASK     | Amplitude Shift Keying                                 |
| BPSK    | Binary Phase Shift Keying                              |
| BSS     | Basic Service Set                                      |
| BSSID   | Basic Service Set Identification                       |
| CCK     | Complementary Code Keying                              |
| CFP     | Contention Free Period                                 |
| CRC     | Cyclic Redundancy Check                                |
| CTS     | Clear to Send                                          |
| CSMA/CA | Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance |
| CW      | Contention Window                                      |
| DA      | Destination Address                                    |
| DCF     | Distributed Coordination Function                      |
| DELBA   | Delete Block ACK                                       |
| DIFS    | DCF Interframe Space                                   |
| DRS     | Dynamic Rate Shifting                                  |
| DSSS    | Direct-Sequence Spread Spectrum                        |
| EDCA    | Enhanced Distributed Channel Access                    |
| EIFS    | Extended Interframe Space                              |
| ERP     | Extended Rate Physical                                 |
| FCS     | Frame Check Sequence                                   |
| FEC     | Forward Error Correction                               |
| FHSS    | Frequency-Hopping Spread Spectrum                      |
| GI      | Guard Interval                                         |
| HC      | Hybrid Coordinator                                     |
| HCCA    | HCF Controlled Channel access                          |
| HCF     | Hybrid Coordination Function                           |
| IEEE    | Institute of Electrical and Electronics Engineers      |
| IFS     | Interframe Space                                       |
| ISM     | Industrial, Scientific and Medical                     |
| ISO     | International Standard Organization                    |
| LLC     | Logical Link Control                                   |
| MAC     | Media Access Control                                   |
| Mbit/s  | Megabits por segundo                                   |
| MIMO    | Multiple Input Multiple Output                         |

|                                |                                            |    |
|--------------------------------|--------------------------------------------|----|
| MMPDU                          | MAC Management Protocol Data Unit          |    |
| MPDU                           | MAC Protocol Data Unit                     |    |
| ms                             | mili segundos                              |    |
| MSDU                           | MAC Service Data Unit                      |    |
| ns                             | nano segundos                              |    |
| OFDM                           | Orthogonal Frequency Division Multiplexing | 14 |
| OSI                            | Open Systems Interconnection               | 14 |
| PCF                            | Point Coordination Function                | 15 |
| PDA                            | Personal Digital Assistant                 |    |
| PIFS                           | PCF Interframe Space                       | 16 |
| PMPS                           | Spatial Multiplexing Power Save            | 16 |
| PS                             | Power Save                                 | 16 |
| PSK                            | Phase Shift Keying                         | 17 |
| PSMP                           | Power Save Multi-Poll                      | 17 |
| PSP                            | Power Save Polling                         | 17 |
| QoS                            | Quality of Service                         | 19 |
| QPSK                           | Quadrature Phase Shift Keying              | 21 |
| RA                             | Receiver Address                           |    |
| RIFS                           | Reduced Interframe Space                   | 22 |
| RTS                            | Request to Send                            | 22 |
| SA                             | Source Address                             | 22 |
| SGI                            | Short Guard Interval                       | 24 |
| SIFS                           | Short Interframe Space                     | 25 |
| TA                             | Transmitter Address                        | 25 |
| TC                             | Traffic Category                           | 25 |
| TS                             | Traffic Stream                             | 26 |
| TVIP                           | TV over IP                                 | 26 |
| TXOP                           | Transmission Opportunity                   | 27 |
| VOIP                           | Voice over IP                              | 28 |
| Wi-Fi                          | Wireless Fidelity                          | 28 |
| WLAN                           | Wireless Local Area Network                | 28 |
| WWiSE                          | World Wide Spectrum Efficiency             | 28 |
| 3.1.3.3 ERP-DSSS               |                                            | 29 |
| 3.1.3.4 ERP-CCK                |                                            | 30 |
| 3.1.3.5 DSSS-OFDM              |                                            | 30 |
| 3.1.3.6 ERP-OFDM               |                                            | 30 |
| 3.1.3.7 OFDM                   |                                            | 31 |
| 3.1.4 MIMO                     |                                            | 37 |
| 3.1.4.1 Múltiplas antenas      |                                            | 34 |
| 3.1.4.2 Multiplicação espacial |                                            | 35 |
| 3.1.4.3 802.11a e o MIMO       |                                            | 36 |
| 4 SUBCAMADA MAC DO 802.11N     |                                            | 38 |
| 4.1 FORMATO DOS QUADROS        |                                            | 39 |
| 4.1.1 Frame Control            |                                            | 39 |

## SUMÁRIO

|         |                                       |    |
|---------|---------------------------------------|----|
| 1       | INTRODUÇÃO.....                       | 14 |
| 1.1     | Objetivos.....                        | 14 |
| 1.2     | Organização do Trabalho.....          | 15 |
| 2       | PADRÕES ANTERIORES.....               | 16 |
| 2.1     | 802.11 LEGACY.....                    | 16 |
| 2.2     | 802.11B.....                          | 17 |
| 2.3     | 802.11A.....                          | 18 |
| 2.4     | 802.11G.....                          | 19 |
| 3       | 802.11N.....                          | 21 |
| 3.1     | CAMADA FÍSICA.....                    | 22 |
| 3.1.1   | Frequências e Canais de Operação..... | 22 |
| 3.1.2   | Técnicas de Modulação.....            | 24 |
| 3.1.2.1 | BPSK.....                             | 25 |
| 3.1.2.2 | QPSK.....                             | 25 |
| 3.1.2.3 | 16-QAM.....                           | 26 |
| 3.1.2.4 | 64-QAM.....                           | 27 |
| 3.1.3   | Técnicas de Transmissão.....          | 28 |
| 3.1.3.1 | Taxa de código.....                   | 28 |
| 3.1.3.2 | SGL.....                              | 28 |
| 3.1.3.3 | ERP-DSSS.....                         | 29 |
| 3.1.3.4 | ERP-CCK.....                          | 30 |
| 3.1.3.5 | DSSS-OFDM.....                        | 30 |
| 3.1.3.6 | ERP-OFDM.....                         | 30 |
| 3.1.3.7 | OFDM.....                             | 31 |
| 3.1.4   | MIMO.....                             | 33 |
| 3.1.4.1 | Múltiplas antenas.....                | 34 |
| 3.1.4.2 | Multiplexação espacial.....           | 35 |
| 3.1.4.3 | 802.11n e o MIMO.....                 | 36 |
| 4       | SUBCAMADA MAC DO 802.11N.....         | 38 |
| 4.1     | FORMATO DOS QUADROS.....              | 39 |
| 4.1.1   | Frame Control.....                    | 39 |

|         |                                      |    |
|---------|--------------------------------------|----|
| 4.1.2   | Duration/ID.....                     | 40 |
| 4.1.3   | Campos de Endereço.....              | 41 |
| 4.1.4   | Sequence Control.....                | 42 |
| 4.1.4.1 | Número de sequência.....             | 42 |
| 4.1.4.2 | Número do fragmento.....             | 43 |
| 4.1.5   | QoS Control.....                     | 43 |
| 4.1.6   | HT Control.....                      | 43 |
| 4.1.7   | Frame Body .....                     | 44 |
| 4.1.8   | FCS.....                             | 44 |
| 4.2     | ESPAÇAMENTO ENTRE QUADROS.....       | 44 |
| 4.2.1   | RIFS.....                            | 45 |
| 4.2.2   | SIFS.....                            | 45 |
| 4.2.3   | PIFS.....                            | 45 |
| 4.2.4   | DIFS.....                            | 46 |
| 4.2.5   | AIFS.....                            | 46 |
| 4.2.6   | EIFS.....                            | 47 |
| 4.3     | ARQUITETURA DA SUBCAMADA MAC.....    | 47 |
| 4.3.1   | DCF.....                             | 48 |
| 4.3.2   | PCF.....                             | 50 |
| 4.3.3   | HCF.....                             | 52 |
| 4.3.3.1 | EDCA.....                            | 52 |
| 4.3.3.2 | HCCA.....                            | 53 |
| 4.3.4   | Uso combinado do DCF, PCF e HCF..... | 54 |
| 4.4     | FRAGMENTAÇÃO E AGREGAÇÃO.....        | 54 |
| 4.4.1   | Fragmentação.....                    | 55 |
| 4.4.2   | Agregação.....                       | 56 |
| 4.4.2.1 | A-MSDU.....                          | 56 |
| 4.4.2.2 | A-MPDU.....                          | 57 |
| 4.5     | CARACTERÍSTICAS DO ACK.....          | 57 |
| 4.5.1   | No ACK.....                          | 58 |
| 4.5.2   | Block ACK.....                       | 58 |
| 4.6     | CARACTERÍSTICAS DO RTS/CTS .....     | 60 |
| 4.6.1   | CTS-to-self.....                     | 60 |
| 4.6.2   | Dual-CTS.....                        | 61 |

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| 4.7 ECONOMIA DE ENERGIA.....               | 61 |
| 4.7.1 PSP.....                             | 62 |
| 4.7.2 APSD.....                            | 62 |
| 4.7.3 SMPS.....                            | 63 |
| 4.7.4 PSMP.....                            | 63 |
| 4.8 RETROCOMPATIBILIDADE E GREENFIELD..... | 63 |
| 5 CONCLUSÃO.....                           | 65 |
| REFERÊNCIAS .....                          | 66 |

que mantém uma equipe de pesquisadores dedicada à criação desse padrão aberto.

O padrão criado foi o 802.11, conhecido comercialmente como Wireless Fidelity (Wi-Fi). O 802.11 é um sistema de transmissão de dados desenvolvido para prover acesso a uma rede de computadores independente da sua localização, usando ondas de rádio frequência.

As redes wireless são geralmente implementadas em cima de uma rede de cabos existente, dando aos seus usuários acesso a todos os recursos e serviços da rede situada no prédio ou instalação onde se encontram.

Os principais benefícios das WLANs (Wireless Local Area Network) se baseiam em mobilidade, os usuários podem se mover sem qualquer tipo de limite de lugar, desde que estejam dentro da área de cobertura do AP (Access Point). Outra enorme vantagem é o custo de instalação e manutenção, não sendo necessário montar uma malha extensiva de cabos e dispositivos de rede para prover os usuários com os serviços de rede.

O padrão 802.11 homologado pelo IEEE foi sendo atualizado ao longo dos anos pelas versões 802.11a/b/g/n. Cada versão atualiza o 802.11 em termos de velocidade, sendo algumas delas incompatíveis. Dessas, as mais importantes são 802.11a/b/g/n.

## 1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo teórico sobre a evolução mais recente, o 802.11n, homologado pelo IEEE em outubro de 2009, dando ênfase às suas principais características implementadas.

Como forma complementar, quando possível, entre o 802.11n e as versões anteriores (802.11a/b/g).

## 1 INTRODUÇÃO Trabalho

A comunicação sem fio é utilizada em larga escala e está cada vez mais presente no nosso dia a dia. Ela vem para satisfazer necessidades e desejos, tais como: conforto, comodidade e flexibilidade. Podemos notar sua presença em diversos aparelhos, como os controles remotos, em celulares, notebooks, Personal Digital Assistant (PDA), entre outros.

O primeiro padrão para comunicação sem fio entre computadores foi lançado em meados de 1997, homologado pela IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), que montou uma equipe de pesquisadores destinada à criação desse padrão aberto.

O padrão criado foi o 802.11, conhecido comercialmente como Wireless Fidelity (Wi-Fi). O 802.11 é um sistema de transmissão de dados desenvolvido para prover acesso a uma rede de computadores independente da sua localização, usando ondas de rádio frequência.

As redes wireless são geralmente implementadas em cima de uma rede de usuários com fio já existente, dando aos seus usuários acesso a todos os recursos e serviços da rede cabeada no prédio ou instalação onde se encontra.

Os principais benefícios das WLANs (Wireless Local Area Network) se baseiam em mobilidade, os usuários podem se conectar quase sem restrições de lugar, desde que estejam dentro da área de cobertura do AP (Access Point). Outra enorme motivação é o custo de instalação e manutenção, não sendo necessário montar uma malha estruturada de cabos e outros ativos de rede para prover os usuários com os serviços da rede.

O padrão 802.11 homologado pela IEEE foi sendo atualizado ao longo dos anos pelas emendas 802.11a/b/d/e/f/g/h/i/j/k/m/n/p/r/s/t/u/v. Cada emenda atualiza o 802.11 em certo aspecto, sendo algumas delas incompatíveis. Dessas, as mais importantes são 802.11a/b/g/n.

### 1.1 Objetivos

Esse trabalho tem como objetivo realizar um estudo teórico sobre a emenda mais recente, o 802.11n, homologado pela IEEE em outubro de 2009, dando ênfase às suas diversas inovações implementadas.

Serão feitas comparações, quando possível, entre o 802.11n e as emendas anteriores (802.11a/b/g).

## 1.2 Organização do Trabalho

O presente trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo 2 trata das emendas anteriores, mostrando características gerais de cada uma. No capítulo 3 será apresentado o 802.11n, e serão mostradas as principais características da camada física. No capítulo 4 é composto pelas principais características da subcamada MAC do 802.11n. O capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho.

### 2.1 802.11 LEGACY

O padrão original foi lançado em meados de 1997 [9], sendo estabelecido inicialmente sobre taxas de transmissão de até 2Mbps, além de utilizar o Forward error correction (FEC), um sistema para detecção e correção de erros de transmissão e o CSMA/CA [10], um protocolo de controle de acesso utilizado até hoje.

Este padrão pode utilizar as técnicas de transmissão: Frequency-hopping spread spectrum (FHSS) ou Direct-sequence spread spectrum (DSSS). Ambas as técnicas podem ser implementadas utilizando vários canais dentro de uma frequência.

O DSSS estabelece 14 canais com 5MHz de banda cada, sendo a informação transmitida por cada canal, em sequência [17]. O transmissor soma o sinal original com um sinal digital conhecido e modula o quadro em uma frequência determinada.

A técnica FHSS, por sua vez, utiliza um conjunto de saltos de frequência. São atribuídos 79 canais de 1MHz, onde o sinal é chutado em cada canal, segundo uma sequência pseudorrandômica, distribuída uniformemente o sinal ao longo de toda a banda [18]. Essa característica faz com que o FHSS seja menos suscetível a interferências, uma vez que a frequência utilizada muda constantemente.

Entre as frequências 2,4 e 2,4835GHz, uma frequência industrial, científica e médica (ISM), livre de licença em praticamente todos os países. O 802.11 previa também um canal de comunicação via infravermelho. A figura 2.1 é mostrada a arquitetura do 802.11.



Figura 2.1. Arquitetura do 802.11.

## 2 PADRÕES ANTERIORES

IEEE 802.11 é um conjunto de padrões para comunicação de equipamentos em uma rede local sem fio (WLAN). Esse conjunto de padrões foi proposto para emprego em bandas de uso público nas faixas de 2,4 e 5 GHz. O padrão IEEE 802.11 compreende a camada física e a subcamada de acesso ao meio (Media Access Control - MAC).

### 2.1 802.11 LEGACY

O padrão original foi lançado em meados de 1997 [9], sendo atualmente obsoleto. Previa taxas de transferências de até 2Mbit/s, além de utilizar o forward error correction (FEC), um sistema para detecção e correção de erros de transmissão e o CSMA/CA [20], um padrão de controle de acesso utilizado até hoje.

Esse padrão pode utilizar as técnicas de transmissão: Frequency-hopping spread spectrum (FHSS) ou Direct-sequence spread spectrum (DSSS). Ambas as técnicas permitem transmissões utilizando vários canais dentro de uma frequência.

O DSSS estabelece 14 canais com 5MHz de banda cada, sendo a informação transmitida por cada canal, em sequência [17]. O transmissor soma o sinal original com um sinal digital conhecido e modula o quadro em uma frequência determinada.

A técnica FHSS, por sua vez, utiliza um esquema de salto de frequência. São utilizados 79 canais de 1MHz, onde o sinal é chaveado em cada canal, seguindo uma sequência pseudorrandômica, distribuindo uniformemente o sinal ao longo de toda a banda [17]. Essa característica faz com que o FHSS seja menos suscetível à interferências, uma vez que a frequência utilizada muda constantemente.

Opera entre as frequências 2,4 e 2,4835GHz, uma frequência industrial, científica e médica (ISM), livre de licença em praticamente todos os países. O 802.11 previa também sua utilização em redes via infravermelho. A figura 2.1 é mostrada a arquitetura do 802.11.

|            |      |    |                  |
|------------|------|----|------------------|
| 802.2      |      |    | Camada de enlace |
| 802.11 MAC |      |    |                  |
| FHSS       | DSSS | IR | Camada Física    |

Figura 2.1: Arquitetura do 802.11

A fraqueza desse padrão foi que ele deixou algumas definições importantes sem resposta, permitindo que várias companhias produzissem equipamentos incompatíveis entre si.

## 2.2 802.11B

802.11b foi a primeira emenda lançada para o padrão 802.11, especifica uma taxa de transmissão de até 11Mbit/s, utilizando a mesma frequência do 802.11 legacy (entre 2,4 e 2,4835GHz), e CSMA/CA [23]. Utiliza DSSS como técnica de transmissão para taxas de até 2Mbit/s e uma técnica chamada Complementary Code Keying (CCK), para transmissões acima de 5,5Mbit/s.

Suporta, inicialmente, até 32 usuários por ponto de acesso sendo, teoricamente, a área de cobertura de cada AP de até 100 metros em ambientes fechados e de até 300 metros em ambientes abertos, sendo mais utilizado em ambientes fechados. Na prática, esses valores são muito inferiores, chegando a um terço dessa distância.

Outra característica importante é a Dynamic Rate Shifting (DRS), ou redução dinâmica de taxa, que provê um ajuste automático da taxa de transmissão entre o cliente e o ponto de acesso em função da distância, na medida em que o cliente se distancia do ponto de acesso a distância aumenta e a velocidade diminui proporcionalmente. Para a emenda 802.11b, as velocidades especificadas são 11, 5,5, 2 e 1Mbit/s.

Quando a amplitude do sinal diminui, a unidade de transmissão sofrerá uma redução na sua taxa nominal para o valor imediatamente mais baixo dentro dessa escala de valores, como mostrado na figura 2.2.

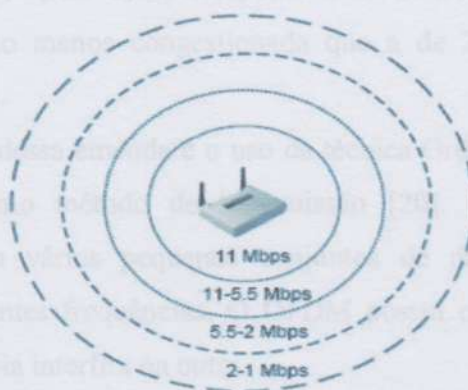


Figura 2.2: DRS no 802.11b

O 802.11b divide sua frequência em 13 canais de 22Mhz cada, sendo apenas 3 não sobrepostos, como mostrado na figura 2.3.

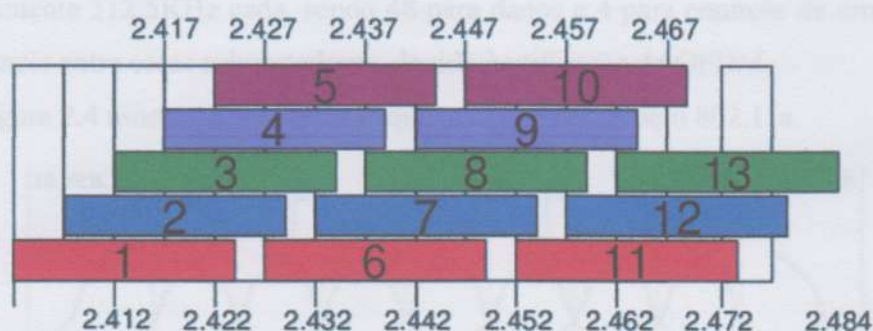


Figura 2.3: Canais do 802.11b/g

Foi o primeiro padrão a receber o nome comercial de Wi-Fi. O grande aumento de velocidade, em relação ao legacy, e diversas quedas de preços nos equipamentos ajudaram o 802.11b a se popularizar, sendo o principal responsável pela popularização das redes Wi-Fi.

A principal fraqueza do 802.11b é a frequência em que ele trabalha, sendo 2,4GHz uma frequência livre, vários aparelhos a utilizam, como telefones sem fio, bluetooth, aparelhos de micro-ondas, provocando uma certa taxa de interferência entre eles. Outro ponto negativo é em relação ao protocolo CSMA/CA, que utiliza uma quantidade significativa da capacidade do canal para manter a transmissão dos dados, ocupando a banda da transmissão.

### 2.3 802.11A

Sendo homologado no final de 1999, essa emenda propõe a utilização da faixa de frequência entre 5,15–5,35 e 5,725–5,825GHz, uma faixa de frequências livre de licença na maioria dos países e muito menos congestionada que a de 2,4GHz, com uma taxa de transmissão de até 54Mbit/s.

Outra característica dessa emenda é o uso da técnica Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) como método de transmissão [20]. Nela, a informação a ser transmitida é dividida em vários pequenos conjuntos de dados que são transmitidos simultaneamente em diferentes frequências. O OFDM possui características que impedem que o sinal de uma frequência interfira na outra.

O 802.11a, assim como o 802.11b, possui a redução dinâmica de taxa (DRS), com as seguintes velocidades especificadas: 54, 48, 36, 24, 18, 12, 9 e 6 Mbit/s.

Seu alcance é de apenas 50 metros, suportando até 64 clientes por AP.

O 802.11a possui 12 canais não sobrepostos, cada canal possui 52 subportadoras de aproximadamente 312,5KHz cada, sendo 48 para dados e 4 para controle de erros [22]. Não há interferência entre essas subportadoras, devido à utilização do OFDM.

A figura 2.4 mostra as faixas de frequência suportadas pelo 802.11a.



Figura 2.4: Canais do 802.11a [3]

Uma grande desvantagem do 802.11a é a menor área de cobertura do sinal, em relação aos padrões anteriores. Isso acontece devido a característica do sinal, o comprimento de onda de 5GHz é bem menor que o comprimento de onda de 2,4GHz, tornando-o muito mais fácil de ser absorvido por objetos sólidos. Isso, aliado a falta de compatibilidade com o padrão 802.11b, reduziram bastante a popularização do 802.11a.

Atualmente esse padrão é mais utilizado para interconectar redes, fazendo normalmente a interligação entre redes 802.11g.

## 2.4 802.11G

A emenda 802.11g foi lançado em 2003, trazendo características do 802.11a/b, sendo completamente compatível com o 802.11b. Trabalha na mesma faixa frequência do 802.11b (entre 2,4 e 2,4835GHz), possuindo os mesmos 13 canais, sendo 20Mhz por canal [24]. Possui uma taxa de transmissão máxima de 54Mbit/s, assim como o 802.11a, e DRS com as seguintes velocidades especificadas: 54, 48, 36, 24, 18, 12, 9 e 6 Mbit/s.

Outra característica herdada do 802.11a é o uso do OFDM como método de

transmissão, podendo mudar para o CCK, para transmissões em 11 e 5,5Mbit/s, mantendo compatibilidade com o 802.11b e possuindo a mesma área de cobertura do 802.11b.

A vantagem do 802.11g é sua compatibilidade com o 802.11b, tornando sua adoção muito mais rápida e barata. Entretanto, a adoção de um cliente 802.11b na rede, vai diminuir as taxas de transferências de todos os clientes.

A desvantagem é utilizar a saturada faixa de frequência de 2.4GHz.

Em junho de 2007 a IEEE uniu o padrão original do 802.11 com as emendas lançadas até essa data (802.11a, b, d, e, g, h, i, j) em um só padrão, sendo conhecido como IEEE 802.11-2007 [8].

Em 1995, esses grupos criaram uma proposta conjunta, sendo esta aprovada em agosto de 2000 pelo grupo de IEEE responsável pelo 802.11n. Essa proposta foi modificada em um momento [10].

Após centenas de alterações e melhorias no projeto inicial, o grupo de trabalho da IEEE aprovou em janeiro de 2007 a segunda versão desse protocolo. Nesse mesmo ano, começaram a ser produzidos os primeiros equipamentos com esta nova tecnologia, baseados na segunda versão do protocolo [11].

Em setembro de 2007, após 11 reuniões, foi homologado pela IEEE o padrão n, em seguida desse mesmo ano foi publicado. O padrão 802.11n compreende, no modelo OSI de 7 camadas, a camada física e a subcamada de acesso ao meio (MAC), que se encontra no segundo e terceiro níveis da arquitetura, como mostrado na figura 3.1.



Figura 3.1: Modelo OSI da IEEE

As principais características de camada física serão mencionadas a seguir e no próximo capítulo serão mencionadas as principais características da subcamada MAC.

### 3 O PADRÃO 802.11N

Em outubro de 2009 foi publicado pela IEEE a emenda 802.11n, após seis anos de desenvolvimento. As maiores empresas do mundo apoiaram grupos que iniciaram os trabalhos na proposta original do 802.11n. Esses grupos mandaram um grande número de propostas para as especificações. WWiSE e TGnSync foram os grupos que logo se destacaram como os principais candidatos a desenvolverem o padrão final [11].

A lista de patrocinadores WWiSE incluíam: Airgo Networks, Bermai, Broadcom, Conexant, STMicroelectronics e a Texas Instruments. Entre os patrocinadores da TGnSync destacavam-se: Agere, Atheros, Cisco, Infineon, Intel, Nortel, Panasonic, Philips, Qualcomm, Samsung, Sanyo, Sony e Toshiba.

Em 2005, esses grupos enviaram uma proposta conjunta, sendo essa aprovada em janeiro de 2006 pelo grupo da IEEE responsável pelo 802.11n. Essa proposta foi transformada em um rascunho [10].

Após centenas de alterações e melhorias no projeto inicial, o grupo de trabalho da IEEE aprovou em janeiro de 2007 a segunda versão desse rascunho. Nesse mesmo ano, começaram a ser produzidos os primeiros access points com essa nova tecnologia, baseados na segunda versão do rascunho [21].

Em setembro de 2009, após 11 rascunhos, foi homologado pela IEEE o padrão e, em outubro desse mesmo ano foi publicado. O padrão 802.11n compreende, no modelo OSI da ISO, a camada física e a subcamada de acesso ao meio (MAC), que se encontra na camada de enlace, como mostrado na figura 3.1.

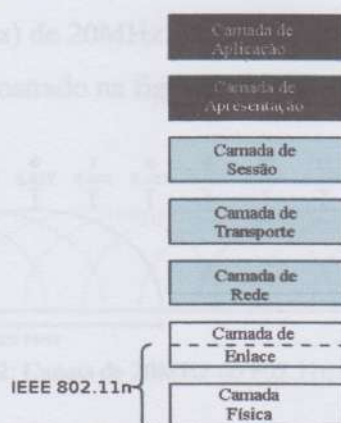


Figura 3.1: Modelo OSI da ISO

As principais características da camada física serão mostradas a seguir e no próximo capítulo serão mostradas as principais características da subcamada MAC.

### 3.1 CAMADA FÍSICA

A camada física é a primeira camada do modelo OSI, ela consiste das tecnologias utilizadas para a transmissão física dos dados pela rede. Devido aos diversos mecanismos de transmissão de dados (par trançado, fibra ótica, micro-ondas, entre outros) e suas diversas características únicas, a camada física é uma das mais complexas dentre todas do modelo OSI.

A camada física define os métodos de transmissão dos bits, independentemente de sua constituição lógica, por um meio físico, conectando elementos de uma rede. A sequência de bits é transformada em um código de palavras ou símbolos e transmitido por um meio físico, seja ele cabos de par trançado, fibras de vidro ou o ar.

A camada física traduz a comunicação lógica vinda da camada de enlace em operações específicas ao meio físico ao qual será enviado. As características dos conectores, frequências, modulação e outras características de baixo nível são definidas nessa camada.

#### 3.1.1 Frequências e Canais de Operação

O 802.11n pode ser utilizado tanto na faixa frequência do 802.11b/g (entre 2,4 e 2,4835GHz) quanto na faixa de frequência do 802.11a (entre 5,15–5,35 e entre 5,725–5,825GHz) [21].

Caso utilize a faixa de frequência de 2,4GHz, essa será dividida em 13 canais sobrepostos (14 em alguns países) de 20MHz com uma banda de guarda de 5MHz, da mesma maneira que o 802.11g, como mostrado na figura 3.2.

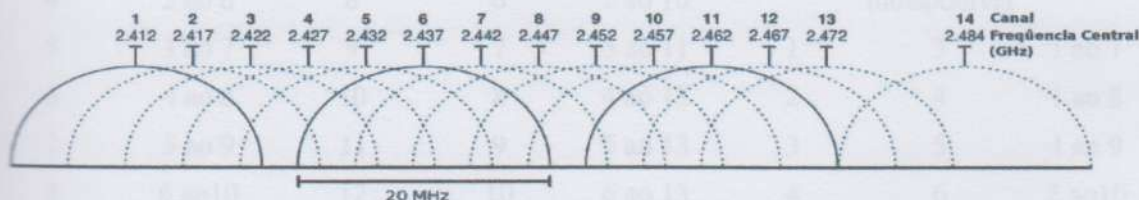


Figura 3.2: Canais de 20MHz do 802.11n em 2,4GHz

Caso utilize a faixa de frequência entre 5,15–5,35 e entre 5,725–5,825GHz, ela será dividida também em 12 canais não sobrepostos, similar ao 802.11a.

Uma das novas características do 802.11n é a capacidade de agregar dois canais de 20MHz em um de aproximadamente 40MHz, dobrando a largura de banda e, por

consequência, aumentando a vazão do canal [16]. Essa técnica requer dois canais livres e adjacentes, espaçados por aproximadamente 20MHz em qualquer direção do espectro, sendo o primeiro utilizado para as máquinas que são incapazes de se comunicar utilizando os 40MHz, tipicamente aparelhos com a tecnologia 802.11a/b/g.

Adotando um canal de 40MHz, a frequência central desse canal será a média aritmética entre o canal primário e o secundário.

Essa técnica possui limitações quando utilizada na frequência de 2,4GHz, devido à grande sobreposição dos canais e a saturação do tráfego nessa frequência, podem ser utilizados simultaneamente, sem sobreposição, apenas um canal de 40 e um de 20MHz. A figura 3.3 mostra essa sobreposição de canais.

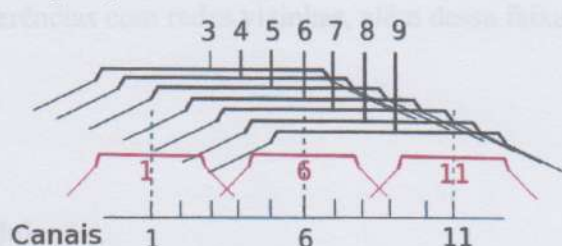


Figura 3.3: Sobreposição nos canais de 40MHz do 802.11n em 2,4GHz

Pode-se montar a seguinte tabela com os canais sobrepostos:

Tabela 1: Sobreposição nos canais de 40MHz do 802.11n em 2,4GHz [21]

| Canal Primário | 20MHz        | 40MHz para cima  |                |              | 40MHz para baixo |                |              |
|----------------|--------------|------------------|----------------|--------------|------------------|----------------|--------------|
|                | Sobreposição | Canal secundário | Canal Primário | Sobreposição | Canal secundário | Canal Primário | Sobreposição |
| 1              | 1 ao 3       | 5                | 3              | 1 ao 7       |                  |                | Indisponível |
| 2              | 1 ao 4       | 6                | 4              | 1 ao 8       |                  |                | Indisponível |
| 3              | 1 ao 5       | 7                | 5              | 1 ao 9       |                  |                | Indisponível |
| 4              | 2 ao 6       | 8                | 6              | 2 ao 10      |                  |                | Indisponível |
| 5              | 3 ao 7       | 9                | 7              | 3 ao 11      | 1                | 3              | 1 ao 7       |
| 6              | 4 ao 8       | 10               | 8              | 4 ao 12      | 2                | 4              | 1 ao 8       |
| 7              | 5 ao 9       | 11               | 9              | 5 ao 13      | 3                | 5              | 1 ao 9       |
| 8              | 6 ao 10      | 12               | 10             | 6 ao 13      | 4                | 6              | 2 ao 10      |
| 9              | 7 ao 11      | 13               | 11             | 7 ao 13      | 5                | 7              | 3 ao 11      |
| 10             | 8 ao 12      |                  | Indisponível   |              | 6                | 8              | 4 ao 12      |
| 11             | 9 ao 13      |                  | Indisponível   |              | 7                | 9              | 5 ao 13      |
| 12             | 10 ao 13     |                  | Indisponível   |              | 8                | 10             | 6 ao 13      |
| 13             | 11 ao 13     |                  | Indisponível   |              | 9                | 11             | 7 ao 13      |

Quando utilizada na faixa de frequência de 5GHz, essa técnica provê até 6 canais de 40MHz simultâneos sem sobreposição.

Tabela 2: Quantidade de canais não sobrepostos em 2,4GHz e 5GHz

| Frequência (GHz) | Canais não sobrepostos (20MHz) | Canais não sobrepostos (40MHz) |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 2,4-2,4835       | 3                              | 1                              |
| 5,15-5,35        | 8                              | 4                              |
| 5,725-5,825      | 4                              | 2                              |

Observa-se que para utilização de canais com largura de banda de 40MHz a faixa de 5GHz é mais apropriada, devido à maior quantidade de canais livres e sem sobreposição, seis ao total, evitando interferências com redes vizinhas, além dessa faixa de frequência ser menos concorrida.

### 3.1.2 Técnicas de Modulação

Em um sistema de transmissão de dados é preciso utilizar formas de inserir as informações úteis em um sinal de rádio frequência, chamado de onda portadora, que será o veículo de transporte da informação. As formas de inserção de informação em um sinal são chamadas de modulação, e permitem que esta informação seja transportada embutida nos parâmetros de amplitude, frequência ou fase da portadora. A escolha da técnica de modulação permite “moldar” as características do sinal a transmitir e adaptá-lo às características do canal.

Nas modulações digitais, os bits do sinal de informação são codificados através de símbolos. A modulação é responsável por mapear cada possível sequência de bits de um comprimento preestabelecido em um símbolo determinado. Os símbolos nos quais as sequências de bits de um sinal de informação são transformadas serão transmitidos pela onda portadora.

O conjunto de símbolos gerado por uma modulação é chamado de constelação, sendo que cada tipo de modulação gera uma constelação diferente de símbolos.

O 802.11n utiliza como técnicas de modulação: BPSK (binary phase shift keying), QPSK (quadrature phase shiftkeying), 16-QAM (16-quadrature amplitude modulation), 64-QAM (64-quadrature amplitude modulation).

### 3.1.2.1 BPSK

A modulação BPSK é utilizada para transmissões com baixa taxa de transferência, pois sua constelação possui apenas dois símbolos. Modula apenas a fase da portadora. A figura 3.4 mostra a constelação da modulação BPSK.

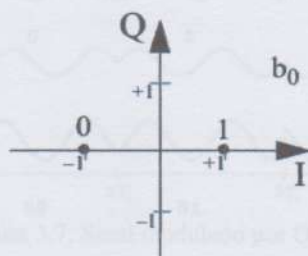


Figura 3.4: Constelação da modulação BPSK [8]

Neste sistema de modulação, quando há uma transição de um bit 0 para um bit 1 ou de um bit 1 para um bit 0, a onda portadora sofre uma alteração de fase de 180 graus, permitindo a transmissão de apenas um bit por símbolo, como mostrado na figura 3.5.

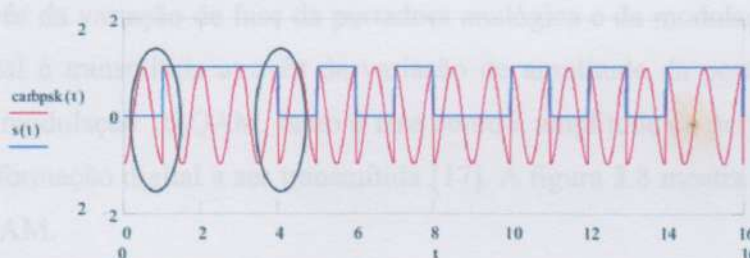


Figura 3.5: Sinal BPSK modulado a partir da sequência 0111 0101 0010 1011

### 3.1.2.2 QPSK

Também conhecida como 4-PSK, o QPSK possui quatro pontos equidistantes em sua constelação. Com quatro fases, o QPSK pode transmitir dois bits por símbolo [17]. A figura 3.6 mostra a constelação da modulação QPSK.

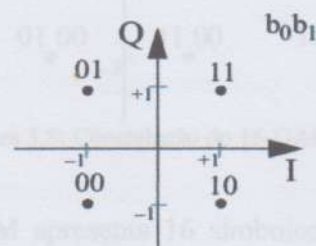


Figura 3.6: Constelação da modulação QPSK [8]

A modulação QPSK possui duas dimensões, pois utiliza dois sinais independentes (seno e cosseno) para criar seus símbolos. Cada um desses sinais independentes representa um bit, 0 ou 1, que são somados, formando o sinal modulado final, como mostrado na figura 3.7.

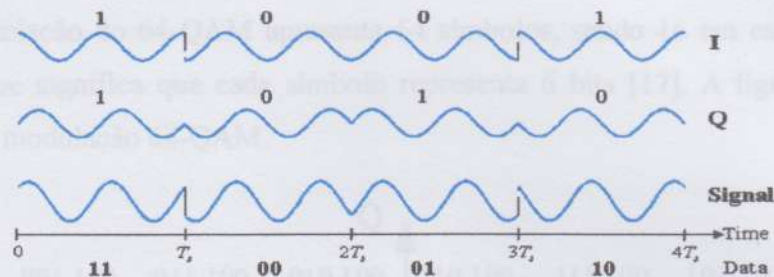


Figura 3.7: Sinal modulado por QPSK

### 3.1.2.3 16-QAM

A modulação 16-QAM combina a modulação PSK, onde a informação digital é transmitida através da variação de fase da portadora analógica e da modulação ASK, onde a informação digital é transmitida através da variação de amplitude da portadora analógica. Desta forma, na modulação 16-QAM, tanto a fase como a amplitude da portadora variam de acordo com a informação digital a ser transmitida [17]. A figura 3.8 mostra a constelação da modulação 16-QAM.

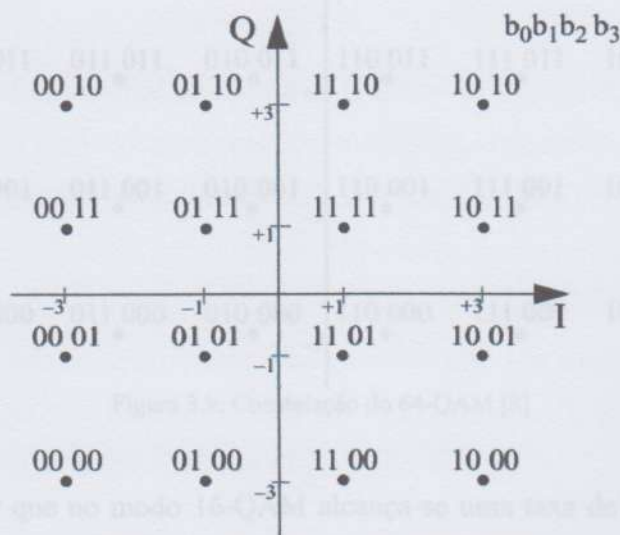


Figura 3.8: Constelação do 16-QAM [8]

A constelação do 16-QAM apresenta 16 símbolos, sendo 4 em cada quadrante do diagrama, o que significa que cada símbolo representa 4 bits.

### 3.1.2.4 64-QAM

A modulação 64-QAM possui as mesmas características da 16-QAM, embora possua uma quantidade de símbolos maior.

A constelação do 64-QAM apresenta 64 símbolos, sendo 16 em cada quadrante do diagrama, o que significa que cada símbolo representa 6 bits [17]. A figura 3.9 mostra a constelação da modulação 64-QAM.

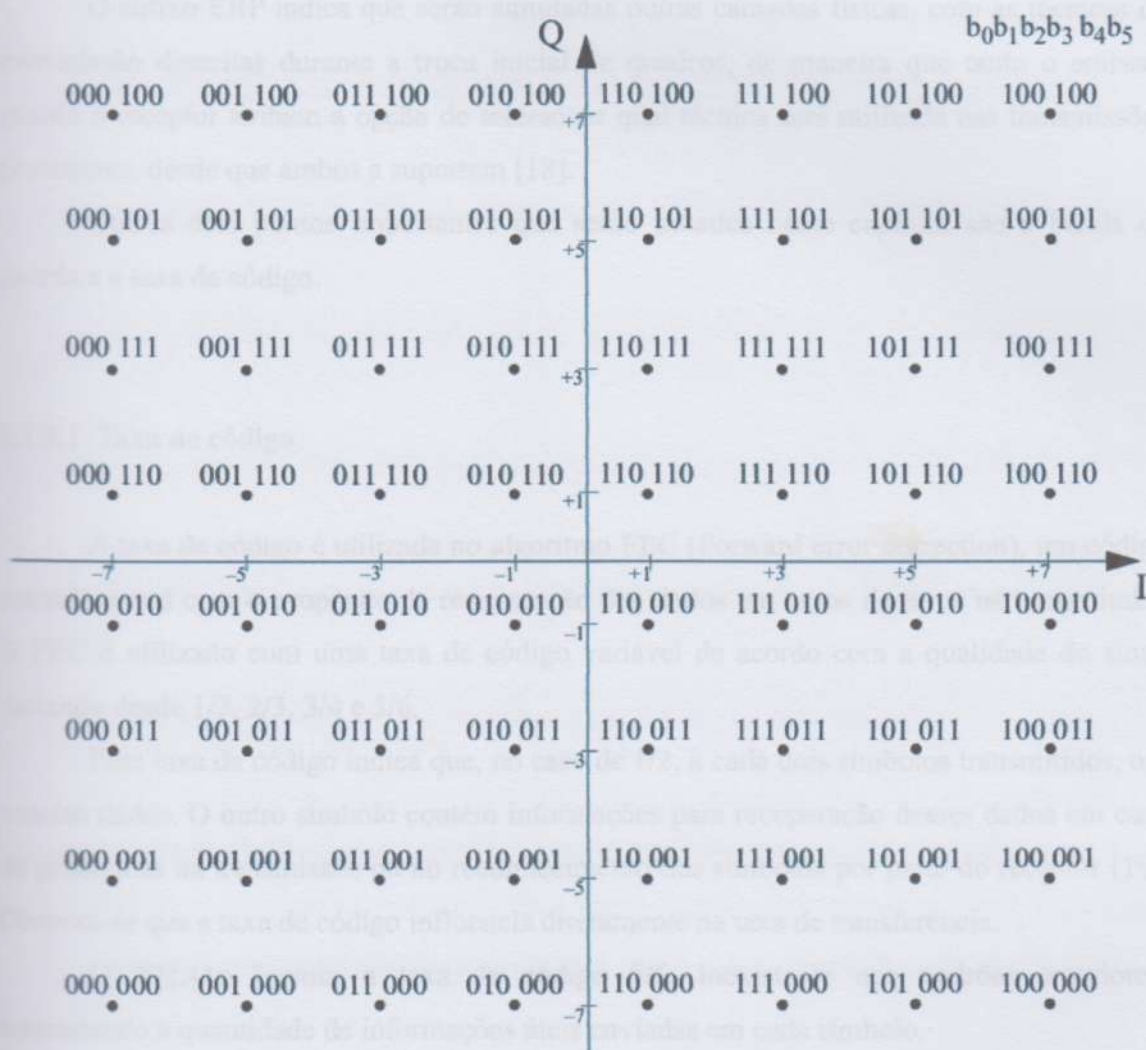


Figura 3.9: Constelação do 64-QAM [8]

Pode-se notar que no modo 16-QAM alcança-se uma taxa de transmissão menor do que no modo 64-QAM, uma vez que cada símbolo transporta um número menor de bits. No entanto, no modo 16-QAM, o espaçamento entre os símbolos é maior, possibilitando uma melhor qualidade do sinal, pois a maior distância entre os símbolos dificulta erros de interpretação no receptor quando esse detecta um símbolo.

### 3.1.3 Técnicas de Transmissão

Os sinais modulados precisam ser enviados pelo meio, no caso o ar. Para isso, são necessárias técnicas e ferramentas para transportar essa informação até seu destino. O 802.11n possui cinco técnicas de transmissão, a maioria delas para manter compatibilidade com os padrões anteriores, são elas: ERP-DSSS, ERP-CCK, DSSS-OFDM, ERP-OFDM e OFDM [7].

O sufixo ERP indica que serão simuladas outras camadas físicas, com as técnicas de transmissão descritas durante a troca inicial de quadros, de maneira que tanto o emissor quanto o receptor tenham a opção de selecionar qual técnica será utilizada nas transmissões posteriores, desde que ambos a suportem [18].

Outros dois pontos importantes que serão tratados nesse capítulo são a banda de guarda e a taxa de código.

#### 3.1.3.1 Taxa de código

A taxa de código é utilizada no algoritmo FEC (Forward error correction), um código convolucional com o propósito de recuperação dos dados em casos de erros na transmissão. O FEC é utilizado com uma taxa de código variável de acordo com a qualidade do sinal, variando desde  $1/2$ ,  $2/3$ ,  $3/4$  e  $5/6$ .

Essa taxa de código indica que, no caso de  $1/2$ , a cada dois símbolos transmitidos, um contém dados. O outro símbolo contém informações para recuperação desses dados em caso de problemas na transmissão ou no reconhecimento dos símbolos por parte do receptor [19]. Observa-se que a taxa de código influencia diretamente na taxa de transferência.

O 802.11n incluiu a taxa de código  $5/6$ , inexistente nos padrões anteriores, aumentando a quantidade de informações úteis enviadas em cada símbolo.

Taxas de código com baixa eficiência são utilizadas quando a relação sinal/ruído está baixa, sendo necessária uma camada extra de proteção ao sinal.

#### 3.1.3.2 SGI

Uma das melhorias da camada física do 802.11n foi a redução do intervalo de guarda

entre cada símbolo OFDM. O intervalo de guarda é um intervalo de tempo esperado pelo emissor de um sinal entre cada símbolo OFDM transmitido, evitando interferências intersimbólicas [13].

Nos padrões anteriores, o intervalo de guarda entre cada transmissão era de 800ns, o 802.11n reduz essa espera para 400ns, como mostrado na figura 3.10. Essa redução implica em um pequeno aumento na taxa de transferência.

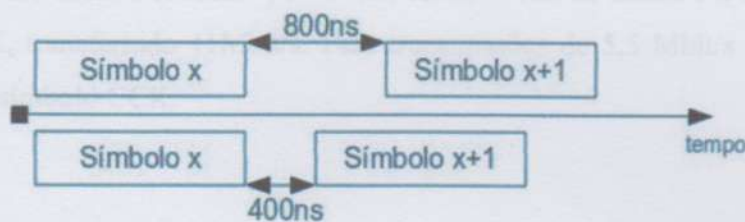


Figura 3.10: Intervalo de guarda

A implementação do SGI, ou intervalo reduzido de guarda, não é obrigatória, sendo opção do fabricante do equipamento e, para sua utilização, ambos equipamentos tem que ser compatíveis.

### 3.1.3.3 ERP-DSSS

O DSSS é utilizado para retrocompatibilidade com o 802.11b. Essa técnica estabelece 14 canais com 5MHz de banda cada.

O DSSS espalha o quadro de dados digitalmente e depois modula esse quadro em uma frequência determinada. O transmissor espalha o sinal a ser transmitido operando-o com um sinal digital através de um somador binário. O sinal digital consiste em uma série de mais um (+1) e menos um (-1), e é chamado de sequência direta. A sequência direta é: +1, -1, +1, +1, -1, +1, +1, +1, -1, -1, -1 [15].

A saída do somador binário é um sinal de taxa mais alta que o sinal original. Por exemplo, um sinal de 1Mbps na entrada, resultará em um sinal de saída de 11Mbps. Depois o modulador transforma o sinal da banda básica em um sinal analógico na frequência de operação do canal escolhido.

Essa técnica utiliza a modulação BPSK para transferências até 1Mbit/s e QPSK para transferências de até 2Mbit/s.

### 3.1.3.4 ERP-CCK

O CCK é utilizado para retrocompatibilidade com o 802.11b. A modulação CCK é uma forma de espalhamento espectral utilizando códigos complementares binários de 8 bits [15]. Esses códigos complementares são utilizados para modular a onda portadora e espalhar o sinal de informações a ser transmitido.

Cada símbolo CCK é formado por 8 bits, sendo 6 bits de dados e 2 bits na forma de modulação QPSK, transferindo 11Mbit/s. Para transmissões de 5,5 Mbit/s são utilizados 4 bits de dados por símbolo CCK.

### 3.1.3.5 DSSS-OFDM

Essa técnica é utilizada para que equipamentos 802.11b sejam capazes de saber quando o canal está vazio, evitando colisões, e possam detectar outros equipamentos que utilizam OFDM []. A figura 3.11 exemplifica um quadro transmitido pelo DSSS-OFDM.

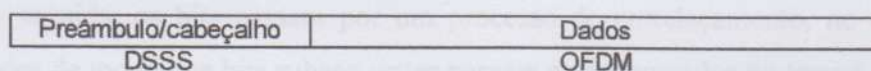


Figura 3.11: Quadro com a técnica DSSS-OFDM

O DSSS-OFDM combina duas técnicas. O preâmbulo e o cabeçalho dos pacotes é enviado utilizando DSSS, enquanto a área de carga (payload) é enviada utilizando OFDM [18].

Com isso, os equipamentos 802.11b da rede podem escutar o cabeçalho do pacote, que é enviado em DSSS, obtendo a informação de quanto tempo o pacote vai levar para ser enviado, esperando então esse tempo mínimo antes de tentar enviar novamente, evitando assim colisões.

Essa técnica aumenta o overhead da rede, já que o preâmbulo e o cabeçalho de todos os pacotes utilizarão o DSSS, uma técnica menos eficiente que o OFDM.

### 3.1.3.6 ERP-OFDM

Essa técnica é utilizada para manter compatibilidade com o 802.11a/g, nesse caso,

nenhuma alteração feita pelo 802.11n no OFDM é utilizada.

A informação a ser transmitida é dividida em vários pequenos conjuntos de dados que são transmitidos simultaneamente em diferentes frequências. Cada canal de transmissão possui 52 subportadoras de aproximadamente 312,5KHz cada, sendo 48 para dados e 4 para controle de erros [13].

São utilizadas as modulações BPSK, QPSK, 16-QAM e 64-QAM, variando a taxa de transferência entre 6 e 54Mbit/s.

### 3.1.3.7 OFDM

A modulação OFDM utiliza diversas portadoras ortogonais para transmitir um sinal. Mas antes de ser modulado na portadora, este sinal passa por diversas etapas de processamento.

Inicialmente, os dados são submetidos a um sistema de proteção de erro que é a inserção de um código corretor de erros, no caso do 802.11, o FEC.

Em seguida, os bits passam por um processo de entrelaçamento, no qual eles são reorganizados de modo que bits subsequentes passam a ser separados no tempo. Desta forma, a informação torna-se mais imune a erros do tipo rajada, que atingem bits subsequentes, pois após este processamento, estes erros passam a atingir bits pertencentes a diversos bytes diferentes, que estão muito distantes na informação original [13]. Isto torna mais fácil a recuperação do sinal original no receptor. A figura 3.12 mostra a separação das subportadoras OFDM.

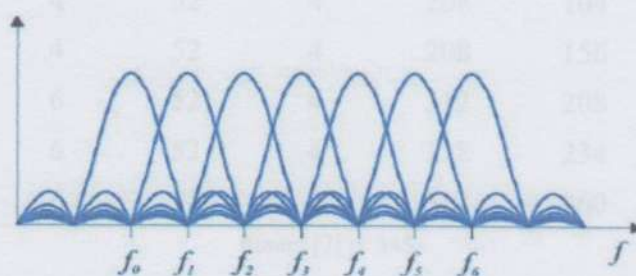


Figura 3.12: Subportadoras OFDM

No processo de modulação OFDM, diversas portadoras em frequências diferentes são utilizadas para modular o sinal digital, sendo que cada portadora transporta apenas alguns bits do sinal original após passar pelos processos de entrelaçamento, embaralhamento e incluir códigos de correção de erro. Estas portadoras são ortogonais entre si, para evitar que haja

interferência entre elas. Isso significa que o espaçamento entre as portadoras é igual ao inverso da duração de um símbolo.

No 802.11n foi ampliado o número de subportadoras para 56, sendo 52 para dados e 4 para controle de erros. Caso sejam utilizados canais de 40MHz, o número de subportadoras aumenta para 114, sendo 108 para dados e 6 para controle. A figura 3.13 exemplifica a distribuição das subportadoras OFDM pela largura de banda do canal.

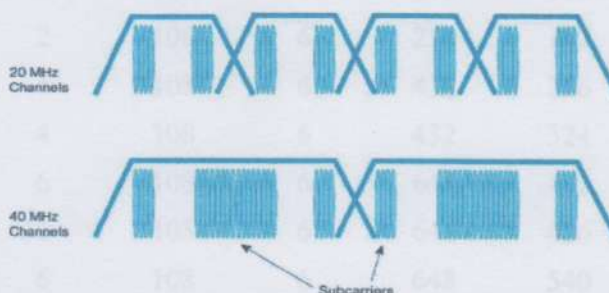


Figura 3.13: Subportadoras OFDM em canais de 20 e 40MHz [2]

A tabela abaixo mostra a taxa de transferência para um canal de 20MHz, apenas um fluxo espacial (spatial stream).

Tabela 3: Taxa de transferência do OFDM para um canal de 20MHz

| Modulação | Taxa de Código | Bits por Símbolo | Subportadoras OFDM |          | Bits por portadora OFDM | Bits de dados por portadora OFDM | Transferência (Mbit/s) |          |
|-----------|----------------|------------------|--------------------|----------|-------------------------|----------------------------------|------------------------|----------|
|           |                |                  | Dados              | Controle |                         |                                  | 800ns GI               | 400ns GI |
| BPSK      | 1/2            | 1                | 52                 | 4        | 52                      | 26                               | 6,5                    | 7,2      |
| QPSK      | 1/2            | 2                | 52                 | 4        | 104                     | 52                               | 13,0                   | 14,4     |
| QPSK      | 3/4            | 2                | 52                 | 4        | 104                     | 78                               | 19,5                   | 21,7     |
| 16-QAM    | 1/2            | 4                | 52                 | 4        | 208                     | 104                              | 26,0                   | 28,9     |
| 16-QAM    | 3/4            | 4                | 52                 | 4        | 208                     | 156                              | 39,0                   | 43,3     |
| 64-QAM    | 2/3            | 6                | 52                 | 4        | 312                     | 208                              | 52,0                   | 57,8     |
| 64-QAM    | 3/4            | 6                | 52                 | 4        | 312                     | 234                              | 58,5                   | 65,0     |
| 64-QAM    | 5/6            | 6                | 52                 | 4        | 312                     | 260                              | 65,0                   | 72,2     |

Fonte: [7] p. 345

Observa-se um ganho considerável de performance em relação ao 802.11a/g, 20%, utilizando uma banda de guarda de 800ns e 33%, para uma banda de guarda de 400ns. O maior motivo desse aumento foi a melhoria da taxa de código, aumentando a quantidade de bits de dados transferidos por símbolo.

A tabela abaixo mostra a taxa de transferência para um canal de 40MHz, apenas um

fluxo espacial.

Tabela 4: Taxa de transferência do OFDM para um canal de 40MHz

| Modulação | Taxa de Código | Bits por Símbolo | Subportadoras OFDM |          | Bits por portadora OFDM | Bits de dados por portadora OFDM | Transferência (Mbit/s) |          |
|-----------|----------------|------------------|--------------------|----------|-------------------------|----------------------------------|------------------------|----------|
|           |                |                  | Dados              | Controle |                         |                                  | 800ns GI               | 400ns GI |
| BPSK      | 1/2            | 1                | 108                | 6        | 108                     | 54                               | 13,5                   | 15,0     |
| QPSK      | 1/2            | 2                | 108                | 6        | 216                     | 108                              | 27,0                   | 30,0     |
| QPSK      | 3/4            | 2                | 108                | 6        | 216                     | 162                              | 40,5                   | 45,0     |
| 16-QAM    | 1/2            | 4                | 108                | 6        | 432                     | 216                              | 54,0                   | 60,0     |
| 16-QAM    | 3/4            | 4                | 108                | 6        | 432                     | 324                              | 81,0                   | 90,0     |
| 64-QAM    | 2/3            | 6                | 108                | 6        | 648                     | 432                              | 108,0                  | 120,0    |
| 64-QAM    | 3/4            | 6                | 108                | 6        | 648                     | 486                              | 121,5                  | 135,0    |
| 64-QAM    | 5/6            | 6                | 108                | 6        | 648                     | 540                              | 135,0                  | 150,0    |

Fonte: [7], p. 347

A taxa de transferência em relação ao 802.11a/g aumentou em 150%, utilizando uma banda de guarda de 800ns e 177%, para uma banda de guarda de 400ns.

### 3.1.4 MIMO

Os modelos atuais de transmissão são baseados na utilização de apenas uma antena tanto na recepção quanto na transmissão dos dados, o MIMO apresenta um novo conceito, a utilização de várias antenas na transmissão e recepção. MIMO é uma ramificação da área de estudo das Antenas Inteligentes. Os pontos principais que as antenas tipo MIMO tentam combater são a capacidade limitada das redes atuais e a necessidade de se garantir maior qualidade de transmissão e maior área de cobertura do sinal. A figura 3.14 exemplifica um esquema de antenas MIMO.



Figura 3.14: Modelo de antenas MIMO

Nas antenas MIMO, os sinais são enviados em vários feixes paralelos, que exploram o ambiente para alcançar o receptor. Esse recurso é utilizado considerando as mudanças de

direção do sinal quando este colide e reflete nos diversos obstáculos que podem existir no caminho entre o emissor e o receptor [2].

As mudanças de percurso geram atrasos em partes do sinal, que são compensados por algoritmos presentes nas antenas receptoras, que fazem os cálculos baseando-se na reflexão sofrida pelo sinal ao longo do seu percurso. O receptor possui filtros que são capazes de recuperar o sinal original após a chegada e o tratamento de todos os feixes enviados pela fonte. A figura 3.15 mostra a reflexão do sinal.

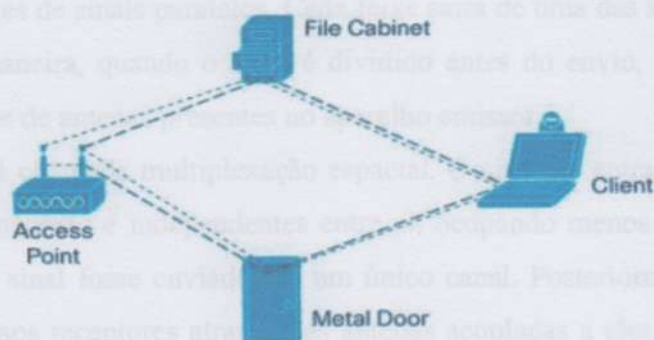


Figura 3.15: Sinal sendo refletido em uma transmissão [2]

O MIMO é baseado no uso de múltiplas antenas enviando dados paralelamente, e na multiplexação espacial, que através do uso de diversos filtros, tira proveito de transmissões refletidas.

#### 3.1.4.1 Múltiplas antenas

A configuração das antenas MIMO é do tipo  $M \times N$ , sendo  $M$  antenas transmissoras e  $N$  antenas receptoras. O 802.11n prevê a utilização de até quatro antenas para emissão e recepção dos dados, não havendo distinção na utilização de, por exemplo, duas antenas na emissão e três na recepção. Apesar disso, são mais comuns as combinações de antenas  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$  ou  $4 \times 4$ . A figura 3.16 exemplifica uma transmissão MIMO.

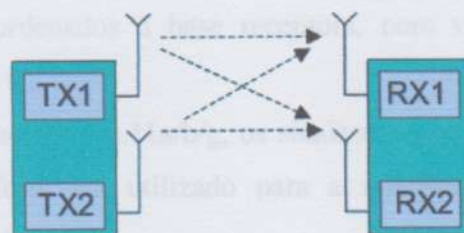


Figura 3.16: Transmissão MIMO

Cada antena adicionada ao sistema melhora a relação sinal/ruído, além de aumentar a taxa de transferência.

### 3.1.4.2 Multiplexação espacial

O funcionamento do sistema MIMO tem por base que a transmissão dos dados é feita através de vários feixes de sinais paralelos. Cada feixe sairá de uma das antenas presentes no transmissor, dessa maneira, quando o sinal é dividido antes do envio, essa divisão é feita baseada na quantidade de antenas presentes no aparelho emissor.

Essa técnica é chamada multiplexação espacial. O sinal de entrada do transmissor é dividido em feixes menores e independentes entre si, ocupando menos banda do que seria necessário se todo o sinal fosse enviado em um único canal. Posteriormente, transmissores enviam esses feixes aos receptores através das antenas acopladas a eles, como mostrado na figura 3.17. Esses feixes são enviados na mesma frequência, e serão recuperados pelos receptores, que ficarão responsáveis por reagrupá-los novamente em um único sinal.

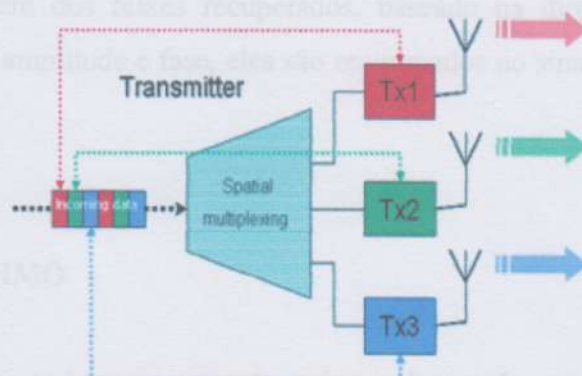


Figura 3.17: Multiplexação espacial no emissor

No percurso dos feixes transmitidos, devido à provável presença de obstáculos variados (paredes, móveis, etc.), percebe-se o efeito da propagação por múltiplos caminhos, originado da reflexão dos feixes após a colisão destes com tais obstáculos. Os feixes normalmente chegam desordenados à base receptora, com valores de amplitude e fase aleatórios e diferentes entre si.

Nos aparelhos do padrão 802.11a/b/g, os sinais mais fracos eram considerados como ruído e apenas o mais forte era utilizado para a interpretação, reduzindo a taxa de transferência e a cobertura da rede.

Os aparelhos dotados com a tecnologia MIMO utilizam os valores aleatórios de

amplitude e fase a seu favor, transformando essa propagação por caminhos variados em uma vantagem. Os receptores MIMO possuem filtros superpostos para a ponderação do espaço físico, em que cada filtro é responsável por extrair um dos feixes recebidos por meio da anulação espacial dos feixes restantes, como mostrado na figura 3.18. Essa filtragem não só permite o ganho de qualidade no sinal, como também adiciona técnicas para controle de redução do enfraquecimento do sinal.

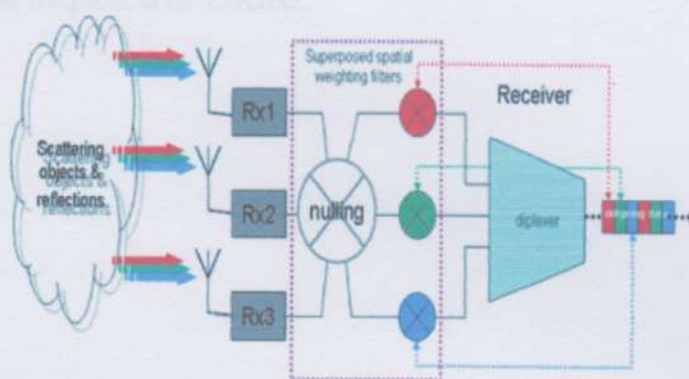


Figura 3.18: Recuperação do sinal pelo receptor

Após a filtragem dos feixes recuperados, baseado na direção de chegada e nos respectivos valores de amplitude e fase, eles são reagrupados no sinal que será utilizado pelo receptor.

### 3.1.4.3 802.11n e o MIMO

Como foi visto anteriormente, quanto maior o número de antenas, maior será a taxa de transferência obtida.

Tabela 5: Taxa de transferência do 802.11n com várias antenas

| Antenas | Tamanho do canal (MHz) | Transferência máxima (Mbit/s) |          |
|---------|------------------------|-------------------------------|----------|
|         |                        | 800ns GI                      | 400ns GI |
| 2x2     | 20                     | 130,0                         | 144,0    |
|         | 40                     | 270,0                         | 300,0    |
| 3x3     | 20                     | 195,0                         | 216,7    |
|         | 40                     | 405,0                         | 450,0    |
| 4x4     | 20                     | 260,0                         | 288,9    |
|         | 40                     | 540,0                         | 600,0    |

Nota-se que o uso combinado do OFDM e do MIMO aumentaram drasticamente a taxa de transferência do 802.11n.

Outras vantagens da utilização do MIMO é o maior alcance do sinal e a maior resistência a interferências.

As principais desvantagens do MIMO são: o preço dos equipamentos de rede, e o uso da saturada faixa de frequência de 2,4GHz.

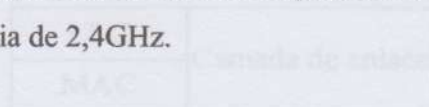


Figura 4.1: Subcamada de rede de rede

O LLC define o controle de fluxo dos dados além do controle de erros de transmissão. O protocolo LLC é responsável por garantir a entrega dos dados ao destino, mesmo que os dados tenham sido recebidos em ordem incorreta. O LLC também é responsável por garantir a entrega dos dados ao destino, mesmo que os dados tenham sido recebidos em ordem incorreta.

O LLC é responsável por garantir a entrega dos dados ao destino, mesmo que os dados tenham sido recebidos em ordem incorreta. O LLC também é responsável por garantir a entrega dos dados ao destino, mesmo que os dados tenham sido recebidos em ordem incorreta.

A subcamada LLC é responsável por garantir a entrega dos dados ao destino, mesmo que os dados tenham sido recebidos em ordem incorreta. O LLC também é responsável por garantir a entrega dos dados ao destino, mesmo que os dados tenham sido recebidos em ordem incorreta.

A subcamada LLC é responsável por garantir a entrega dos dados ao destino, mesmo que os dados tenham sido recebidos em ordem incorreta. O LLC também é responsável por garantir a entrega dos dados ao destino, mesmo que os dados tenham sido recebidos em ordem incorreta.

| MAC Layer: PDU (MSDU) |         |         |                       |         |
|-----------------------|---------|---------|-----------------------|---------|
| Protocol              | Control | Address | MAC Layer: PDU (MSDU) | Control |
| Header                | Header  | Header  | Header                | Header  |
| Header                | Header  | Header  | Header                | Header  |

Figura 4.2: Formato geral de quadro MAC [25]

A subcamada MAC possui três modos de operação: o modo DCF (distributed coordination function), o modo PCF (priority coordination function) e o modo POF (hybrid coordination function). O modo DCF é o modo de operação padrão e é responsável por garantir a entrega dos dados ao destino, mesmo que os dados tenham sido recebidos em ordem incorreta.

A subcamada MAC possui três modos de operação: o modo DCF (distributed coordination function), o modo PCF (priority coordination function) e o modo POF (hybrid coordination function).

#### 4 SUBCAMADA MAC DO 802.11N<sup>1</sup>

Após a camada física, seguindo o modelo OSI da ISO, vem a camada de enlace, que é subdividida em duas partes: a subcamada MAC e o Controle Lógico do Link (LLC), como mostrado na figura 4.1.

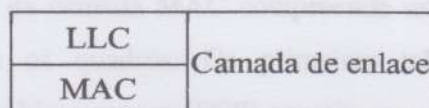


Figura 4.1: Subdivisão da camada de enlace

O LLC define o controle de fluxo dos dados além do controle de erros de transmissão, enquanto a subcamada MAC define o controle de acesso ao meio, provendo o formato e tamanho dos quadros a serem transmitidos, além de diversas definições para controle e manutenção da transmissão.

O 802.11n promove alterações apenas na subcamada MAC da camada de enlace do modelo OSI da ISO.

A sequência de dados encapsulados recebidos pela subcamada MAC vinda da subcamada LLC é chamada de MSDU (MAC service data unit), ou dados da camada de serviço MAC.

A sequência de dados enviados pela subcamada MAC para a camada física é chamada de MPDU (MAC protocol data unit), ou dados da camada de protocolo MAC, como mostrado na figura 4.2.

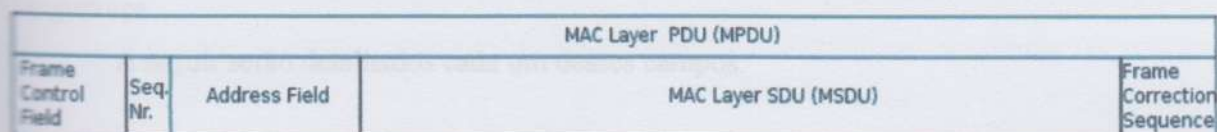


Figura 4.2: Formato geral do quadro MAC [25]

A subcamada MAC possui três modos de operação, o modo DCF (distributed coordination function), o modo PCF (point coordination function) e o modo HCF (hybrid coordination function). Define também o espaçamento entre cada quadro transmitido, além de outros mecanismos de controle. Cada uma dessas características serão apresentadas a seguir.

<sup>1</sup> A maior parte das referências desse capítulo vem dos livros [7] e [8]. Apenas as exceções a essa regra serão indicadas no texto.



- Indicar se o quadro é destinado a uma estação na mesma rede ad-hoc ou na mesma rede estruturada do emissor, se o quadro faz parte da autenticação da estação (se estiver sendo utilizado o protocolo 802.1x) ou se o quadro utiliza o formato de quatro endereços.
- Indicar se existe um outro fragmento da mesma MSDU ou da mesma MMPDU (protocolo de controle da subcamada MAC) a ser transmitido.
- Indicar se o quadro é uma retransmissão. A estação receptora utiliza essa informação para eliminar quadros duplicados.
- Indicar se após a transmissão atual o emissor entrará no modo de economia de energia.
- Indicar, para uma estação em modo de economia de energia, que existem transmissões no buffer do AP para serem enviadas para essa estação.
- Indicar se os dados contidos no campo Frame Body estão criptografados.

#### 4.1.2 Duration/ID

O campo Duration/ID é um campo de 16 bits e seu conteúdo varia de acordo com o tipo do quadro, se o quadro foi transmitido fora do período de contenção e de acordo com as configurações de qualidade de serviço (QoS) da estação transmissora. Segue abaixo o conteúdo desse campo.

- Em quadros de controle do tipo PS-Poll (quadro enviado por uma estação em modo de economia de energia para um AP, com a finalidade de obter quadros destinados a essa estação que estão no buffer do AP), o campo Duration/ID armazena o identificador de associação da estação que transmitiu o quadro nos 14 bits menos significantes, e os 2 bits mais significantes são setados em 1.
- Quadros transmitidos dentro do período de contenção por estações que não utilizam QoS, esse campo recebe um valor fixo de 32.768.
- Em todos os quadros enviados por estações que não utilizam QoS e quadros de controle enviados por estações que utilizam QoS, esse campo indicará a duração de cada quadro.

### 4.1.3 Campos de Endereço

Existem quatro campos de endereço no quadro MAC, cada campo com 48 bits. Esses campos são utilizados para indicar o identificador de uma rede sem fio estruturada (BSSID), o endereço de origem (SA), o endereço de destino (DA), o endereço da estação transmissora (TA) e o endereço da estação receptora (RA). Certos quadros não contêm algum desses endereços.

Endereços MAC são de dois tipos: endereços individuais, que são endereços que representam uma máquina específica e endereços de grupo, um único endereço para vários destinos que pode ser utilizado por uma ou mais estações ou uma rede inteira. Existem dois tipos de endereços de grupo:

- Endereços multicast de grupo: um endereço associado por convenção em uma camada de mais alto nível para um grupo de estações lógicas.
- Endereços de broadcast: um endereço de multicast distinto e pré-definido que sempre denota todas as estações de uma rede. Esse grupo é pré-definido para cada meio de comunicação para representar todas as estações ativas e conectadas naquele meio.

As principais características desses endereços são:

- Identificador de uma rede sem fio estruturada: possui 48 bits no mesmo formato do endereço MAC, e identifica unicamente cada BSS. O valor desse endereço, em uma rede estruturada, é o endereço MAC do AP da BSS. O valor desse endereço em uma rede ad-hoc é um endereço MAC formado por 46 bits randomicamente gerados. O bit individual/grupo do MAC gerado é setado como 0. O bit universal/local é setado em 1. Esse mecanismo é utilizado para prover uma alta probabilidade de selecionar um identificador único.
- Endereço de destino: contém o endereço MAC individual ou um endereço de grupo que identifica a estação ou estações que deverão receber a MSDU, ou os fragmentos dessa, ou a A-MSDU, contida na área de dados.
- Endereço de origem: contém o endereço MAC individual que identifica a estação que irá transferir a MSDU, ou os fragmentos dessa, ou a A-MSDU, contida na área de dados. O bit individual/de grupo é sempre transmitido como 0 no endereço de origem do quadro.
- Endereço da estação receptora: contém o MAC individual ou de grupo que identifica

a estação receptora do quadro.

- Endereço da estação transmissora: contém o endereço MAC individual que identifica a estação que transmitiu o quadro no meio. O bit individual/de grupo é sempre transmitido como 0 no emissor.

#### 4.1.4 Sequence Control

O campo Sequence Control, ou controle de sequência, é um campo de 16 bits subdividido em dois subcampos: o número de sequência (sequence number) e o número do fragmento (fragment number), como mostrado na figura 4.4. O campo controle de sequência não está presente em quadros de controle.

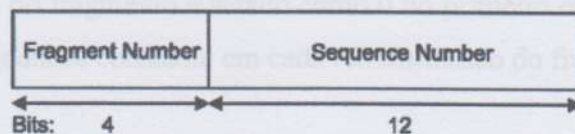


Figura 4.4: Formato do campo controle de sequência

##### 4.1.4.1 Número de sequência

O número de sequência é um campo de 12 bits que indica o número de sequência do MSDU, A-MSDU ou do MMPDU. Cada MSDU, A-MSDU ou MMPDU transmitido por uma estação possui um número de sequência.

Estações que não suportam QoS, assim como estações que a suportam que estejam operando sem QoS adicionam um número de sequência aos quadros de dados e de gerenciamento variando o esse número entre 0 e 4096, iniciando em 0 e incrementando 1 a cada MSDU, A-MSDU ou MMPDU.

Estações que suportam QoS, quando associadas em uma rede que também suporte QoS, mantêm a mesma contagem do número de sequência, para cada identificador de tráfego (TID - traffic identifier), por cada receptor (identificado pelo MAC). Os números de sequência para quadros de dados por QoS são definidos utilizando o valor do identificador de tráfego, incrementando unitariamente para cada MSDU ou A-MSDU enviado para esse TID. Números de sequência para quadros de gerenciamento, quadros de dados transmitidos por QoS cujo destino seja um endereço de grupo e todos os quadros sem QoS transmitidos por

uma estação que suporta QoS são definidas com um contador entre 0 e 4096, iniciando em 0 e incrementando 1 a cada MSDU, A-MSDU ou MMPDU.

Cada fragmento de um MSDU ou MMPDU contém uma cópia do número de sequência designado para esse MSDU ou MMPDU. O número de sequência permanece constante para todas as retransmissões de um MSDU ou MMPDU.

#### 4.1.4.2 Número do fragmento

O número do fragmento é um campo de 4 bits que indica o número de cada fragmento MSDU ou MMPDU. Esse número é setado como 0 no primeiro ou no único fragmento MSDU ou MMPDU, sendo incrementado unitariamente para cada fragmento sucessivo transmitido. O número do fragmento é setado como 0 no primeiro ou no único fragmento A-MSDU. O número permanece constante em cada retransmissão do fragmento.

#### 4.1.5 QoS Control

O campo QoS control, ou controle de qualidade e serviço (QoS), é um campo de 16 bits que identifica, entre outros, a categoria de tráfego (TC) ou o fluxo do tráfego (TS) a que o quadro pertence, a quantidade de octetos no buffer destinados a cada estação separadamente, além de várias outras informações relativas à qualidade de serviço que variam a cada quadro.

A principal função desse campo é separar os quadros por tipos de tráfego e por prioridade, identificando os quadros com maior prioridade para serem enviados mais rapidamente. O campo controle de QoS está presente em todo quadro em que o QoS estiver habilitado.

#### 4.1.6 HT Control

O campo HT control, ou controle de transferência, é um campo de 32 bits que identifica, entre outras coisas, a calibração das antenas. Esse campo está presente em certos quadros de controle e em certos quadros de dados e gerenciamento em transmissões QoS.

### 4.1.7 Frame Body

O campo Frame Body, ou área de dados, é um campo de tamanho variável que contém a informação a ser enviada. Essa informação varia de acordo com o tipo do quadro. O tamanho mínimo da área de dados é 0 octetos, enquanto o tamanho máximo é definido pelo tamanho máximo do MSDU ou do A-MSDU adicionando um overhead da encapsulação de segurança.

### 4.1.8 FCS

O campo FCS, ou sequência de checagem de quadro, possui 32 bits e contém um código gerado pelo algoritmo polinomial CRC-32. Esse código é calculado a partir de todos os campos do cabeçalho MAC e da área de dados.

A função desse campo é gerar uma maneira de detecção de erros na transmissão do quadro. O CRC é calculado e anexado ao quadro a ser transmitido e verificado no emissor. Caso os valores não coincidam, o quadro é descartado.

## 4.2 ESPAÇAMENTO ENTRE QUADROS

O intervalo de tempo esperado por cada estação entre a transmissão de cada quadro é chamado de IFS, ou espaçamento entre quadros. Essa espera é importante para evitar que quadros colidam entre si.

Seis intervalos diferentes foram definidos para prover diversos níveis de prioridade no acesso ao meio. A figura 4.5 mostra a relação entre esses espaçamentos.

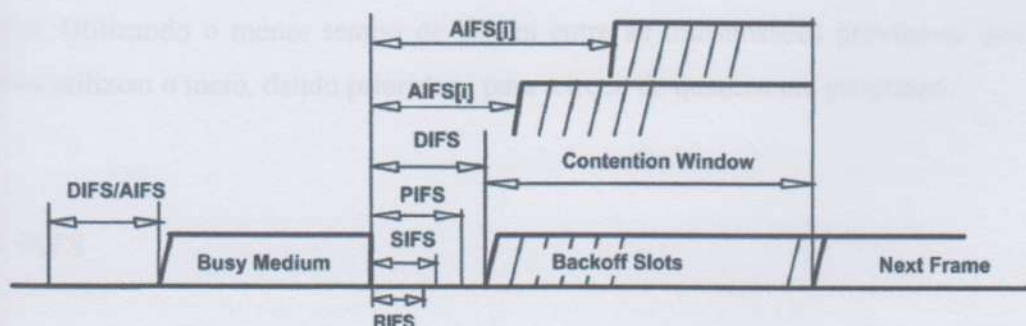


Figura 4.5: Relação entre os espaçamentos

#### 4.2.1 RIFS

O RIFS, ou intervalo reduzido de espera, é utilizado para separar múltiplos quadros de um único transmissor, quando nenhuma resposta que requeira uma espera do tipo SIFS é esperada. A espera do tipo RIFS não deve ser utilizada entre quadros que possuam destinatários diferentes.

O RIFS é o tempo de espera entre o último símbolo do quadro anterior e o início do primeiro símbolo do preâmbulo do quadro subsequente, e possui uma duração nominal de 2 $\mu$ s, podendo essa variar não mais que 10% desse valor.

#### 4.2.2 SIFS

O SIFS, ou intervalo curto de espera, deve ser utilizado antes da transmissão de um quadro ACK, um quadro CTS, o segundo ou subsequente MPDU de uma rajada de quadros e por uma estação respondendo qualquer mensagem PCF.

O SIFS é o tempo de espera entre o último símbolo do quadro anterior e o início do primeiro símbolo do preâmbulo do quadro subsequente. A duração nominal dessa espera é definida na tabela abaixo, podendo variar até em 10% desses valores.

Tabela 6: Duração nominal do SIFS

| Faixa de frequência | Duração nominal ( $\mu$ s) |
|---------------------|----------------------------|
| 2,4GHz              | 10                         |
| 5GHz                | 16                         |

O SIFS é o menor tempo de espera para transmissões entre estações diferentes, e deve ser utilizado quando as estações confiscam o meio e precisam mantê-lo até o final da troca de quadros. Utilizando o menor tempo de espera entre as transmissões previne-se que outras estações utilizem o meio, dando prioridade para a troca de quadros em progresso.

#### 4.2.3 PIFS

O PIFS, ou intervalo de espera do PCF, é utilizado por estações que operam no regime

PCF. A duração nominal do PIFS é a soma do tempo de espera SIFS com o aSlotTime, que varia de acordo com a frequência e a largura do canal utilizado.

Tabela 7: Duração nominal do PIFS

| Faixa de frequência | Largura do canal (MHz) | Duração nominal ( $\mu$ s) |
|---------------------|------------------------|----------------------------|
| 2,4GHz              | 20                     | 19                         |
|                     | 40                     | 30                         |
| 5GHz                | 20                     | 25                         |
|                     | 40                     | 25                         |

A duração real não pode variar mais que 10% desses valores.

#### 4.2.4 DIFS

O DIFS, ou intervalo de espera do DCF, deve ser utilizado por estações que operam no modo DCF entre transmissões de dados e quadros de gerenciamento.

A duração nominal do DIFS é a soma do tempo de espera SIFS com o dobro do aSlotTime, que varia de acordo com a frequência utilizada.

Tabela 8: Duração nominal do DIFS

| Faixa de frequência | Largura do canal (MHz) | Duração nominal ( $\mu$ s) |
|---------------------|------------------------|----------------------------|
| 2,4GHz              | 20                     | 28                         |
|                     | 40                     | 50                         |
| 5GHz                | 20                     | 34                         |
|                     | 40                     | 34                         |

A duração real não pode variar mais que 10% desses valores.

#### 4.2.5 AIFS

O AIFS, ou intervalo de espera arbitrário, é utilizado por estações que suportam QoS para transmitir quadro de dados, quadros de gerenciamento e de controle.

Esse intervalo de espera é utilizado apenas por estações em modo QoS, e seu tempo

de espera é variável e configurável.

#### 4.2.6 EIFS

O EIFS, ou intervalo de espera estendido, é utilizado por estações no modo DCF antes da transmissão, quando essa determina que o meio está disponível após a recepção de um quadro defeituoso, ou seja, um quadro que falhou na checagem do CRC.

O tempo nominal de espera do EIFS é definido pela soma:  $SIFS + DIFS + ACKTxTime$ , sendo o  $ACKTxTime$  o tempo, em ms, necessário para transmitir um quadro ACK, incluindo preâmbulo e qualquer outra informação necessária pela camada física, na sua menor taxa de transferência.

### 4.3 ARQUITETURA DA SUBCAMADA MAC

A subcamada MAC possui três modos de operação, o modo DCF (distributed coordination function), o modo PCF (point coordination function) e o modo HCF (hybrid coordination function), como mostrado na figura 4.6.

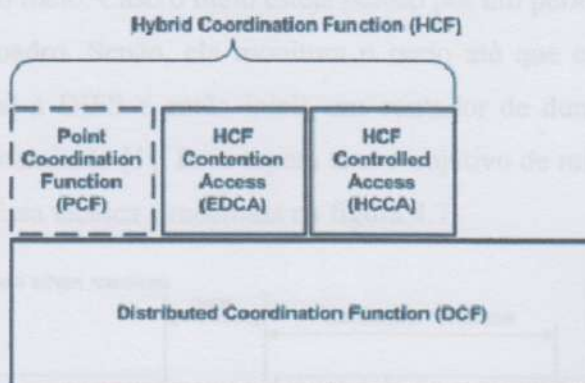


Figura 4.6: Arquitetura da subcamada MAC

O DCF, ou função de coordenação distribuída, é o método de acesso fundamental do 802.11, e deve ser implementado em todas as estações, para uso tanto em uma rede *infraestruturada*, como em uma rede *ad-hoc*.

O PCF, ou função de coordenação centralizada, é um método de acesso opcional, sendo utilizado apenas em redes *infraestruturadas*.

O HCF, ou função de coordenação híbrida, é utilizado apenas em redes que suportam QoS. Essa função combina características do DCF e do PCF, com algumas alterações, procurando prover uma melhor qualidade de serviço para a rede.

O PCF e HCF dependem do DCF. Em estações que não suportam QoS, o HCF não está presente. Em estações que suportam QoS, tanto o DCF quanto o HCF estão presentes. O PCF é opcional em todas as estações.

#### 4.3.1 DCF

O DCF prevê um protocolo automático de acesso e compartilhamento do meio através do CSMA/CA e de um tempo de espera randômico, caso o meio esteja congestionado. Além disso, todo o tráfego endereçado a uma máquina deve ser respondido com um quadro de reconhecimento (ACK - Acknowledge). Caso o ACK não seja recebido pela máquina remetente, o quadro será retransmitido.

O protocolo CSMA/CA é designado para reduzir a probabilidade de colisão entre múltiplas estações acessando o meio. Esse protocolo possui dois modos de operação, o modo básico e o modo de reserva.

No modo básico, sempre que uma estação tem algum quadro para transmitir, ela monitora a atividade do meio. Caso o meio esteja ocioso por um período maior que o DIFS, a estação transmite o quadro. Senão, ela monitora o meio até que ele fique ocioso por um período de tempo igual à DIFS e então inicia um contador de duração aleatória (backoff) antes de iniciar sua transmissão [1]. Essa espera tem o objetivo de minimizar a probabilidade de uma nova colisão. Essa técnica é mostrada na figura 4.7.

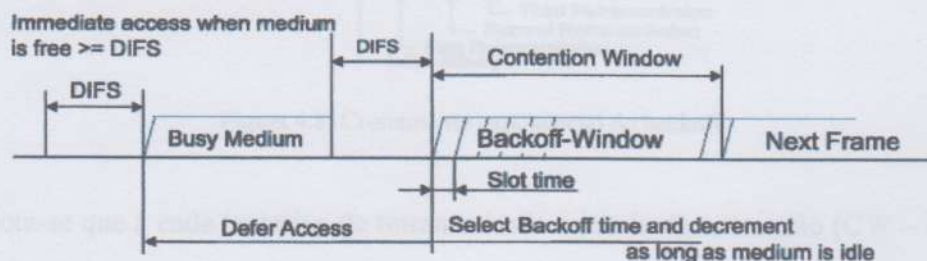


Figura 4.7: Modo básico do CSMA/CA

Após essa espera, se o meio ainda estiver ocioso, o quadro é transmitido. Caso o meio não esteja ocioso, é escolhido outro valor para o backoff.

Como uma estação não tem como detectar se houve uma colisão ou não, já que ela é incapaz de transmitir e escutar o meio simultaneamente, um ACK é transmitido pela estação de destino logo após um período de tempo SIFS sempre que um quadro é recebido sem erros. Se após o período de tempo igual ACKtimeout um ACK não for recebido, a estação transmissora sabe que houve uma colisão ou uma perda do quadro e reagenda sua transmissão [6].

A espera do backoff aumenta a cada tentativa de retransmissão. Sua formula é: número gerado aleatoriamente multiplicado pelo aSlotTime, esse último varia de acordo com a frequência e a largura do canal utilizada.

Tabela 9: Duração do aSlotTime

| Faixa de frequência | Largura do canal (MHz) | Duração ( $\mu$ s) |
|---------------------|------------------------|--------------------|
| 2,4GHz              | 20                     | 9                  |
|                     | 40                     | 20                 |
| 5GHz                | 20                     | 9                  |
|                     | 40                     | 9                  |

O valor aleatório gerado pelo backoff varia por faixas, de acordo com a figura 4.8.

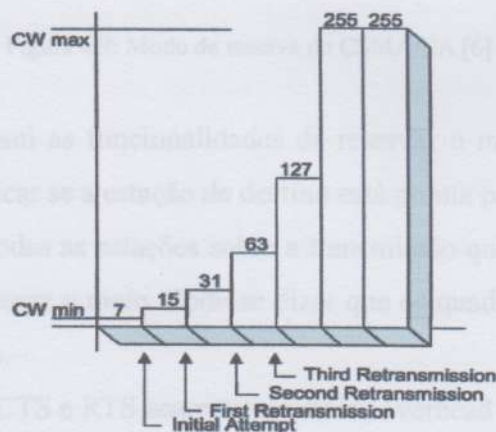


Figura 4.8: Crescimento exponencial do backoff

Nota-se que a cada tentativa de retransmissão a janela de contenção (CW – contention window) fica cada vez maior, obrigando a estação a esperar cada vez mais para transmitir.

No modo de reserva, após a estação escutar o meio por um tempo igual a DIFS e seguir as regras de backoff descritas anteriormente, no lugar de transmitir seus dados úteis, ela envia um quadro de requisição de transmissão (RTS - request to send), contendo a duração do quadro de dados endereçado à estação de destino. Caso a estação de destino

receba este RTS corretamente, ela espera um tempo SIFS e envia um quadro chamado CTS (clear to send ou livre para enviar) indicando que a estação que fez o pedido pode enviar os dados. Após um tempo igual a SIFS, a estação que recebeu o CTS inicia a sua transmissão. A figura 4.9 exemplifica a técnica RTS/CTS.

Novamente, a estação transmissora espera o ACK. Caso não receba, reagenda a transmissão do quadro.

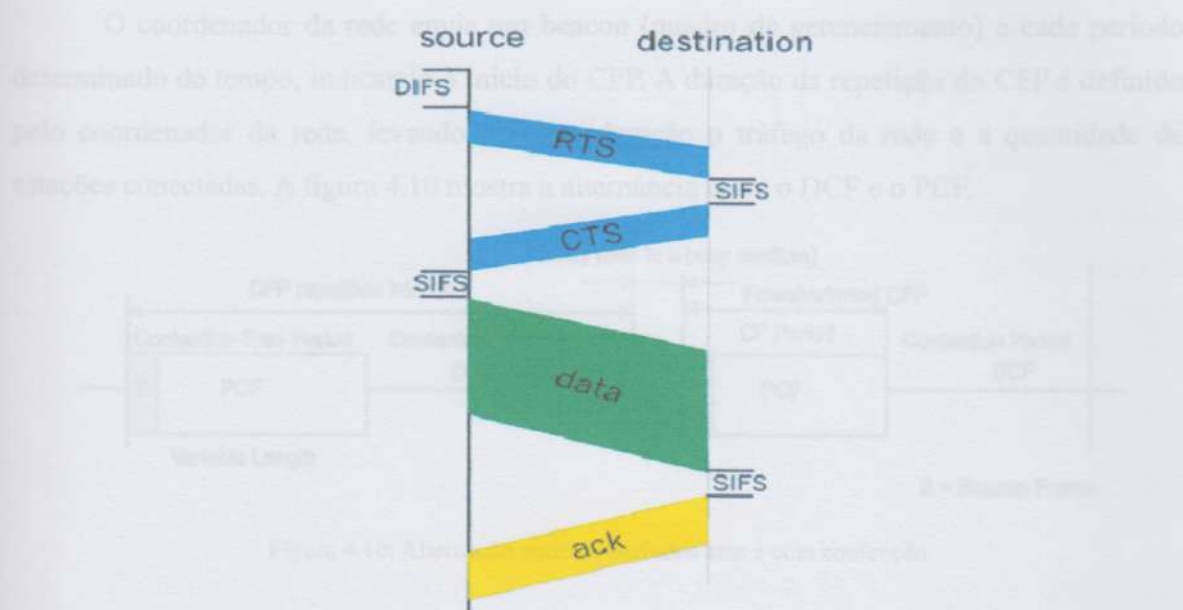


Figura 4.9: Modo de reserva do CSMA/CA [6]

O quadro RTS possui as funcionalidades de reservar o meio para a transmissão do quadro de dados e de verificar se a estação de destino está pronta para recebê-lo.

O CTS informa a todas as estações sobre a transmissão que vai ocorrer, fazendo com que estas esperem para acessar o meio. Pode-se dizer que os quadros RTS e CTS reservam o meio para uma transmissão.

O uso dos quadros CTS e RTS acarreta um maior overhead na rede.

#### 4.3.2 PCF

O modo de operação PCF provê uma transferência sem período de contenção (CFP – contention free period). O coordenador da rede é o ponto coordenador. Todas as estações devem obedecer às regras de acesso do PCF.

As características de operação do PCF são: todas as estações devem operar

propriamente na rede que o ponto coordenador está operando; e , quando associado a uma rede com um ponto coordenador, as estações devem ser capazes de receber todos os quadros enviados pelo coordenador.

Diferentemente do DCF, que distribui o controle por todas as estações, no PCF uma única estação, normalmente o AP, coordena todo o acesso ao meio. Caso o PCF esteja habilitado numa dada rede, os modos PCF e DCF se alternarão no tempo.

O coordenador da rede envia um beacon (quadro de gerenciamento) a cada período determinado de tempo, indicando o início do CFP. A duração da repetição do CFP é definido pelo coordenador da rede, levando em consideração o tráfego da rede e a quantidade de estações conectadas. A figura 4.10 mostra a alternância entre o DCF e o PCF.

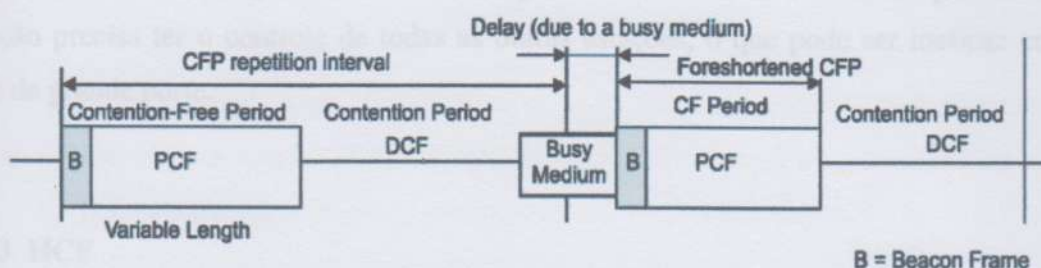


Figura 4.10: Alternação entre os períodos sem e com contenção

No CFP, o ponto coordenador vai consultar todas as estações, uma a uma, se ela tem dados a serem transmitidos. Nenhuma estação pode transmitir ou receber dados do ponto de acesso se não estiver sendo consultada.

O ponto coordenador espera um intervalo de tempo PIFS e então transmite o beacon em broadcast informando o início do CFP. Então, o ponto coordenador envia individualmente a cada estação, um quadro de consulta (CF-Pool), com a intenção de informar que a estação está livre para transmitir, ou um quadro de dados com um CF-Pool, caso a estação tenha algum quadro a ser recebido no buffer do ponto coordenador. A estação consultada deve esperar um período de tempo SIFS e responder ao ponto coordenador com um quadro CF-ACK, informando que não tem nenhum quadro para ser enviado, ou com um quadro de dados e um CF-ACK. Após a resposta da estação, o ponto coordenador irá esperar um tempo SIFS e consultar a próxima estação. Caso não haja resposta da estação consultada por um tempo DIFS, o ponto coordenador irá consultar a próxima estação. Após consultar todas as estações, o ponto coordenador envia, em broadcast, o quadro CF-END, informando o fim do CFP. A figura 4.11 exemplifica essa técnica.

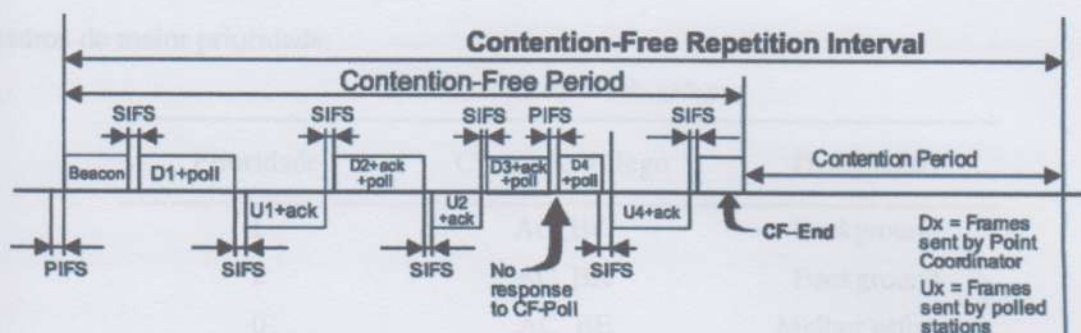


Figura 4.11: Exemplo de uma transmissão PCF

No modo PCF, como o intervalo entre transmissões é ditado pelo ponto coordenador, uma latência máxima é garantida. A desvantagem do PCF é não ser escalável, pois uma única estação precisa ter o controle de todas as outras estações, o que pode ser ineficaz em uma rede de grande porte.

### 4.3.3 HCF

O HCF possui características tanto do DCF quanto do PCF, é utilizado apenas para transmissões que requeiram QoS, sendo obrigatória sua implementação em todas as máquinas que suportem QoS. O HCF é subdividido em dois métodos, sendo um com contenção e outro sem contenção.

O EDCA, ou canal de acesso distribuído aprimorado, é um método com contenção, que provê um acesso diferenciado e distribuído ao meio, através do uso de quatro categorias diferentes de acesso (AC). O HCCA, ou acesso controlado ao meio HCF, é um método com contenção, que utiliza um coordenador central para controlar o acesso das máquinas ao meio. Esse acesso é cedido seguindo regras de qualidade de serviço.

A seguir serão detalhados esses dois métodos.

#### 4.3.3.1 EDCA

O EDCA é um derivado do DCF, e separa o tráfego em quatro categorias, cada categoria representando uma prioridade. Os quadros de maior prioridade esperam menos para serem transmitidos. O EDCA opera antecipando a oportunidade de transmissão (TXOP) dos

quadros de maior prioridade.

Tabela 10: Categorias de tráfego

| Prioridade | Classe de tráfego | Designação     |
|------------|-------------------|----------------|
| 1          | AC_BK             | Background     |
| 2          | AC_BK             | Background     |
| 0          | AC_BE             | Melhor esforço |
| 3          | AC_BE             | Melhor esforço |
| 4          | AC_VI             | Vídeo          |
| 5          | AC_VI             | Vídeo          |
| 6          | AC_VO             | Voz            |
| 7          | AC_VO             | Voz            |

Para cada categoria de tráfego, uma variante modificada do DCF compete por uma oportunidade de transmissão utilizando parâmetros do EDCA informados pelo AP da rede que a máquina está associada. Esses parâmetros são variáveis e dependentes da atividade da rede e da quantidade de máquinas associadas a essa. Entre esses parâmetros estão:

- A duração máxima de tempo que a rede ficará ociosa;
- Os limites máximo e mínimo da janela de contenção;
- A duração máxima da TXOP.

A duração do TXOP é o período de tempo que a estação mantém controle ininterrupto do meio e inclui o tempo necessário para transmitir quadros de resposta ao AP, caso necessário.

Caso uma estação possua mais de um quadro para ser transmitido no buffer, ela irá transmitir o quadro de maior prioridade, deixando os quadros de menor prioridade para serem transmitidos na sua próxima oportunidade de transmissão.

O AP anuncia os parâmetros do EDCA em quadros de gerenciamento enviados pela rede e durante a associação e reassociação da estação. Os quadros de gerenciamento são enviados utilizando a classe de tráfego AC\_VO.

#### 4.3.3.2 HCCA

O HCCA é análogo ao PCF, possuindo método de operação similar. Utiliza um ponto

coordenador para organizar as transmissões de qualidade de serviço, chamado coordenador híbrido (HC). Esse coordenador opera seguindo regras diferentes do PC do PCF.

O HC é o AP da rede e utiliza regras de prioridade para gerenciar o acesso ao meio, iniciar as trocas de quadros e alocar as oportunidades de transmissão, tanto para si quanto para as outras estações. Essas regras promovem um tempo limitado e controle de acesso livre de contenção.

A transmissão do tráfego e a alocação das oportunidades de transmissão podem ser feitas durante o período de contenção, com a finalidade de manter os requerimentos de qualidade de serviço de cada fluxo de tráfego ou categoria de tráfego. Essa alocação é baseada na quantidade de tráfego pendente pertencente a diferentes fluxos e/ou categorias de tráfego e estão sujeitas às políticas específicas da rede.

#### 4.3.4 Uso combinado do DCF, PCF e HCF

O DCF é um método de controle centralizado, tanto o PCF quanto o HCF, são definidos para operarem na mesma rede. Quando um PC está operando, os métodos PCF e DCF se alternam, mantendo cada método por certo período de tempo. Quando um HC está operando em uma rede, esse pode gerar uma alternância do período sem contenção e do período de contenção, da mesma maneira que o método de acesso PCF, mantendo compatibilidade com o DCF apenas durante o período de contenção.

#### 4.4 FRAGMENTAÇÃO E AGREGAÇÃO

A subcamada MAC suporta um conceito chamado fragmentação, uma ferramenta útil em ambientes com muita interferência. Um transmissor pode, opcionalmente, dividir um quadro em fragmentos menores, para transmissão sequencial. Esses fragmentos menores são transmitidos mais rapidamente, reduzindo a probabilidade de erros por interferência na transmissão e por colisões. Se mesmo assim ocorrer um erro, o quadro a ser retransmitido é bem menor que o quadro original.

Outro conceito da subcamada MAC, introduzido pelo 802.11n, é a agregação de quadros. A estação transmissora pode agregar vários quadros em um só, transmitindo de uma só vez. Essa técnica reduz o overhead da rede, uma vez que apenas um preâmbulo e um

cabeçalho são enviados nessa transmissão.

A seguir serão detalhadas essas técnicas.

#### 4.4.1 Fragmentação

Para diminuir a probabilidade de erros na transmissão devido à colisões e à interferência, quadros menores podem ser transmitidos [15]. A subcamada MAC pode fragmentar e desfragmentar quadros enviados ou recebidos, respectivamente, de uma mesma estação, como exemplificado na figura 4.12. Podem ser fragmentados apenas MSDU's e MMPDU's com mesmo endereço de destino, e quadros de broadcast e multicast não são fragmentados.

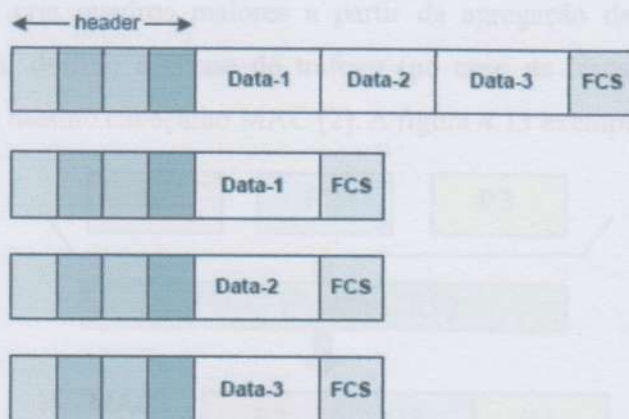


Figura 4.12: Exemplo de uma fragmentação

O tamanho é o mesmo para todos os fragmentos, menos o último, que deve ser menor. O tamanho de cada fragmento deve ser um número par de octetos, exceto o último, que pode ter um número par ou ímpar de octetos.

Reduzindo o tamanho de cada quadro, diminui a probabilidade de interferências durante a transmissão. Cada fragmento é enviado como um quadro independente, necessitando de cabeçalho e um quadro ACK correspondente. A remontagem é feita no receptor, de acordo com as informações contidas no cabeçalho MAC.

A maior vantagem da fragmentação é evitar erros na transmissão dos quadros e reduzir o tempo gasto na retransmissão, caso erros ocorram. Por outro lado, a fragmentação introduz mais overhead na rede, pela maior quantidade de quadros para serem transmitidos.

#### 4.4.2 Agregação

O 802.11n possui a opção de combinar múltiplos quadros que estejam prontos para serem transmitidos em um único quadro agregado. A agregação de quadros ajuda a reduzir a ocupação desnecessária do meio, reduzindo a quantidade de quadros enviados e o número de janelas de contenção. Os quadros agregados são enviados utilizando apenas uma TXOP.

Existem dois métodos de agregação de quadros. São eles: o A-MSDU e o A-MPDU.

Abaixo serão descritos os dois métodos.

##### 4.4.2.1 A-MSDU

A A-MSDU cria quadros maiores a partir da agregação de quadros com mesmo endereço de origem, destino e classe de tráfego (no caso de transmissões QoS), em um quadro maior com o mesmo cabeçalho MAC [2]. A figura 4.13 exemplifica uma agregação.

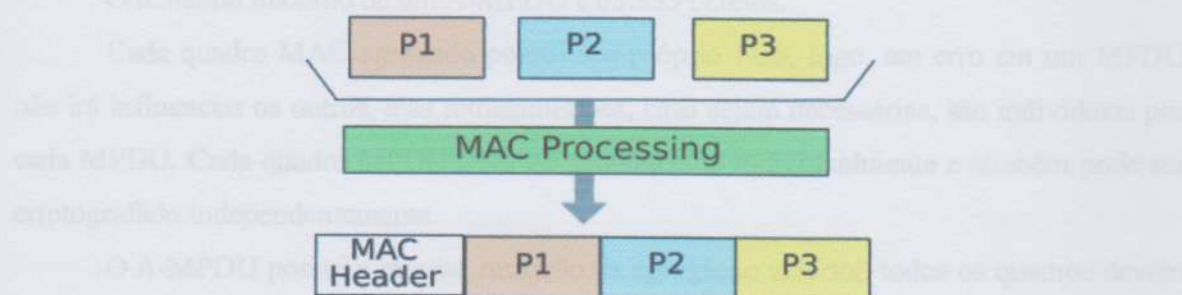


Figura 4.13: Representação de um A-MSDU [16]

Os quadros agregados não possuem os cabeçalhos da subcamada MAC, tampouco o campo FCS, como mostrado na figura 4.14.

Para suportar essa técnica, o campo de dados do quadro MAC foi aumentado para 7.955 octetos.

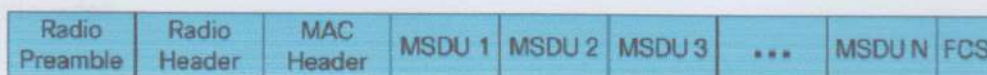


Figura 4.14: Quadro A-MSDU [2]

Uma restrição do A-MSDU é que todos os quadros devem possuir a mesma classe de serviço, ou seja, não é permitida a combinação de quadros de voz com quadros de melhor esforço. Outra restrição é que o transmissor pode ficar esperando algum quadro ficar

completo antes de transmitir, atrasando toda a transmissão.

#### 4.4.2.2 A-MPDU

A agregação MPDU é ligeiramente diferente da A-MSDU. A A-MPDU agrega quadros MAC completos, incluindo o cabeçalho e o FCS[2], que são encapsulados no mesmo cabeçalho da camada física, como mostrado na figura 4.15.

RP = Radio Preamble  
RH = Rapid Header  
MH = Mac Header  
MSDU = Ethernet Frame

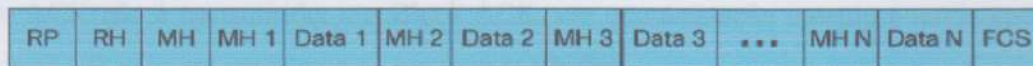


Figura 4.15: Quadro A-MPDU [2]

O tamanho máximo de um A-MPDU é 65.535 octetos.

Cada quadro MAC agregado possui seu próprio FCS, logo, um erro em um MPDU não irá influenciar os outros, e as retransmissões, caso sejam necessárias, são individuais por cada MPDU. Cada quadro MPDU deve ser reconhecido individualmente e também pode ser criptografado independentemente.

O A-MPDU possui a mesma restrição da agregação anterior, todos os quadros devem possuir a mesma classe de serviço.

O A-MPDU é menos eficiente que o A-MSDU, uma vez que cada quadro MAC possui cabeçalho, aumentando o overhead da transmissão.

Uma desvantagem das técnicas de agregação é que o quadro agregado, por ser muito maior, irá demorar mais tempo para ser transmitido, tornando-se maior a probabilidade de ocorrer uma interferência. O uso dessas técnicas deve ser evitado em ambientes congestionados.

## 4.5 CARACTERÍSTICAS DO ACK

Cada quadro transmitido pela rede, após conferido o FCS, é respondido com um quadro de reconhecimento (ACK). Esse quadro indica que o receptor recebeu sem erros a

informação. Esse é o funcionamento padrão do ACK, exemplificado na figura 4.16.

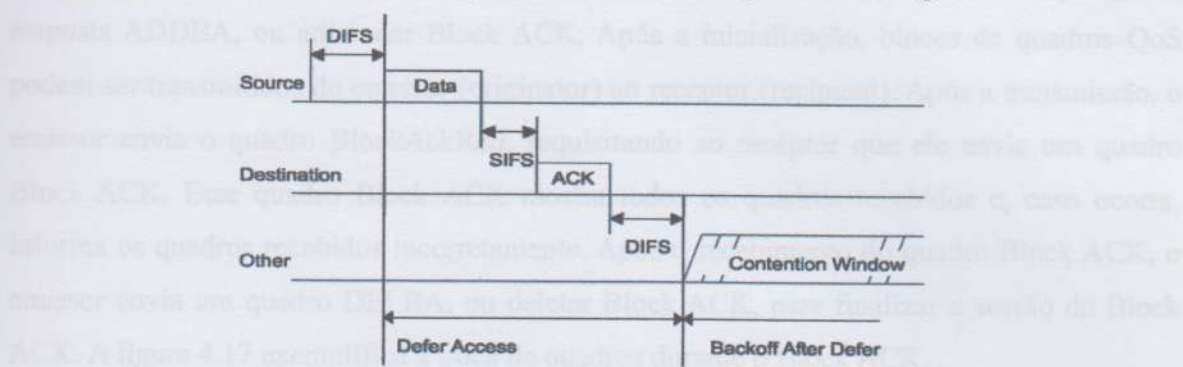


Figura 4.16: Procedimento padrão do ACK

Além do funcionamento padrão, o ACK possui dois outros modos: o No ACK, em que o quadro ACK não é transmitido, e o Block ACK, em que a estação receptora envia apenas um quadro ACK para uma sequência de quadros recebidos.

A seguir serão detalhados esses dois modos.

#### 4.5.1 No ACK

A utilização do ACK em redes com qualidade de serviço é determinada pela política de QoS da estação transmissora. Quando a política de No ACK é utilizada, a estação receptora não irá enviar nenhum quadro ACK para a estação transmissora e, conseqüentemente, não existirão retransmissões nesse fluxo de tráfego. É uma técnica implementada pelo 802.11n.

Essa técnica é útil na transmissão de voz ou vídeo, uma vez que esses dados são sensíveis a retransmissões.

#### 4.5.2 Block ACK

O Block ACK, ou bloqueio de reconhecimento, é uma técnica que agrega o reconhecimento de vários quadros em um único quadro ACK. Ela é utilizada apenas em redes QoS, e foi herdada do 802.11g.

O Block ACK pode ser utilizado para reconhecer quadros MPDU agregados, uma vez que esses quadros devem ser reconhecidos individualmente.

O mecanismo do Block ACK é iniciado com a troca de quadros de requisição e resposta ADDBA, ou adicionar Block ACK. Após a inicialização, blocos de quadros QoS podem ser transmitidos do emissor (originator) ao receptor (recipient). Após a transmissão, o emissor envia o quadro BlockAckReq, requisitando ao receptor que ele envie um quadro Block ACK. Esse quadro Block ACK mostra todos os quadros recebidos e, caso ocorra, informa os quadros recebidos incorretamente. Após o recebimento do quadro Block ACK, o emissor envia um quadro DELBA, ou deletar Block ACK, para finalizar a sessão do Block ACK. A figura 4.17 exemplifica a troca de quadros durante o Block ACK.

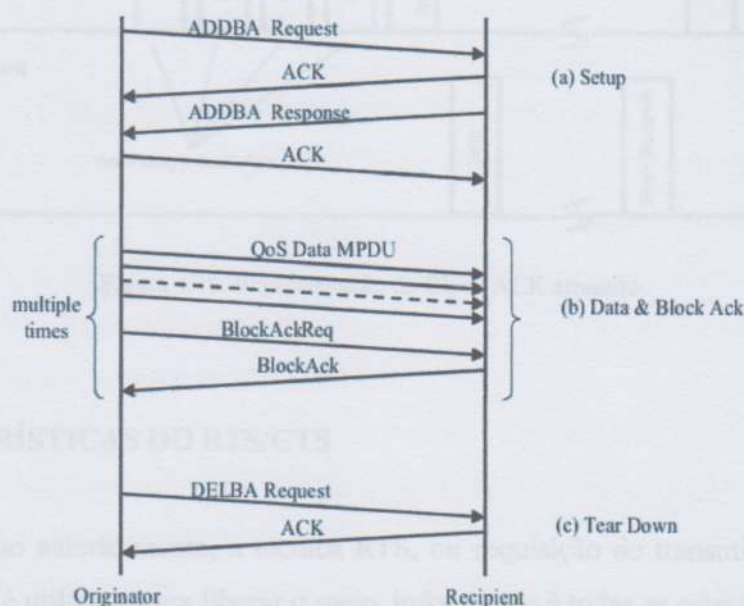


Figura 4.17: Representação do Block ACK

São dois tipos de Block ACK: imediato e atrasado.

No Block Ack imediato, a estação transmissora envia o quadro BlockAckReq na mesma oportunidade de transmissão que iniciou a transmissão dos dados, como exemplificado na figura 4.18. É utilizado um espaçamento SIFS entre cada quadro.

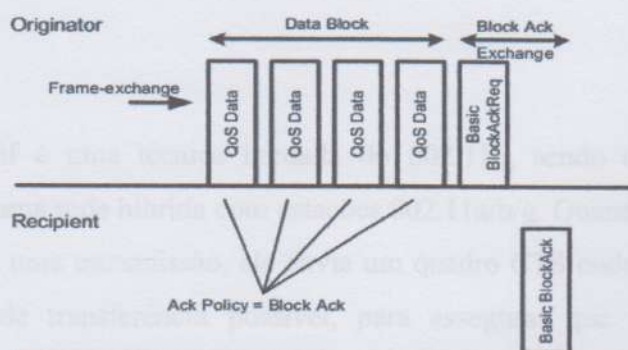


Figura 4.18: Representação do Block ACK imediato

Por sua vez, o Block ACK atrasado permite que o quadro BlockAckReq seja transmitido em uma futura oportunidade de transmissão, como mostrado na figura 4.19. A estação receptora responde ao BlockAckReq com um ACK simples, indicando que o Block Ack será atrasado. O atraso do Block ACK aumenta a latência da transmissão, e é utilizado para suportar estações que são incapazes de calcular rapidamente o ACK.

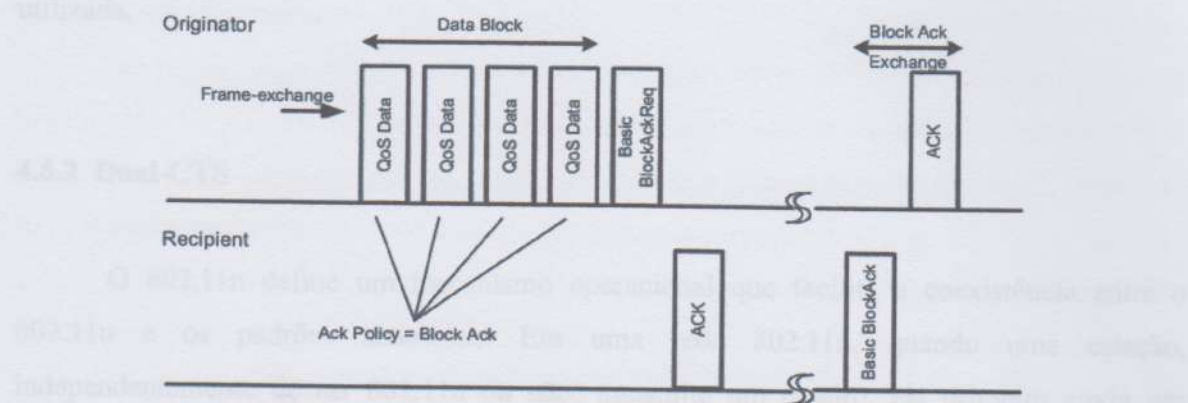


Figura 4.19: Representação do Block ACK atrasado

## 4.6 CARACTERÍSTICAS DO RTS/CTS

Como visto anteriormente, a técnica RTS, ou requisição de transmissão, e CTS, ou livre para enviar, é utilizada para liberar o meio, informando à todas as estações que a estação irá transmitir um quadro.

Existem outras duas técnicas baseadas no RTS/CTS, que são suportadas pelo 802.11n, são elas: CTS-to-self e Dual-CTS.

Essas técnicas serão vistas com mais detalhes abaixo.

### 4.6.1 CTS-to-self

O CTS-to-self é uma técnica herdada do 802.11g, sendo utilizada por estações 802.11n quando em uma rede híbrida com estações 802.11a/b/g. Quando uma estação precisa reservar o meio para uma transmissão, ela envia um quadro CTS endereçado a si, na menor modulação e taxa de transferência possível, para assegurar que todas as estações se sincronizem [14]. Nesse quadro CTS é informada a duração da transmissão pendente mais

um possível quadro ACK.

A técnica CTS-to-self gera um overhead menor que o RTS/CTS, embora seja uma técnica menos robusta contra colisões, já que não há garantias que todas as estações escutem a mensagem.

Caso erros ocorram na transmissão do CTS-to-self, uma técnica mais robusta deve ser utilizada.

#### 4.6.2 Dual-CTS

O 802.11n define um mecanismo operacional que facilita a coexistência entre o 802.11n e os padrões anteriores. Em uma rede 802.11n, quando uma estação, independentemente de ser 802.11n ou não, transmite um quadro, ela primeiro envia um quadro RTS para o AP 802.11n, que irá responder com dois quadros CTS. O primeiro utilizando o formato de compatibilidade, garantindo que todas as estações associadas ao AP escutem, e o segundo o formato do 802.11n [4].

Essa técnica garante que todas as estações associadas à rede se sincronizem e evita uma possível colisão entre quadros. Ela é habilitada apenas no AP 802.11n e, por consequência, apenas em redes 802.11n híbridas.

O Dual-CTS gera um overhead maior que o RTS/CTS, embora seja uma técnica mais robusta contra colisões.

### 4.7 ECONOMIA DE ENERGIA

O 802.11 implementa dois modos de economia de energia. São eles: o modo Power Save Polling (PSP), ou economia de energia por pesquisa, e o Automatic Power Save Delivery (APSD), ou economia de entrega automática.

A emenda 802.11n adiciona dois modos de economia de energia, ambos relacionados ao uso de múltiplas antenas. São eles: Spatial Multiplexing Power Save (SMPS), ou economia de energia da multiplexação espacial, e Power Save Multi-Poll (PSMP), ou economia de energia por multi classes.

Esses modos serão detalhados a seguir.

#### 4.7.1 PSP

O padrão 802.11 possui dois modos de economia de energia no modo infraestruturado, o modo ativo e o modo de economia de energia (PS).

No modo ativo, a estação estará completamente ativa, podendo enviar e receber quadros a qualquer momento.

No modo PS, a estação alterna entre os modos: ativo, como descrito acima, e sleep (dormindo). Na maioria do tempo, a estação estará no modo sleep, mudando para o modo ativo apenas para capturar quadros de gerenciamento e receber quadros de dados vindos do AP, caso necessário. Nesse modo a estação consome pouca energia [5].

Antes que a estação entre no modo PS, ela deve informar ao AP, que deve responder, habilitando a estação a entrar no modo PS. Caso o AP não responda a requisição, a estação permanece no modo ativo.

Uma vez no modo de economia de energia, o AP bufferiza todos os quadros endereçados a essa estação, enviando beacons em intervalos de tempo definidos contendo informações sobre quadros pendentes. Com a informação desses beacons, a estação decide se entra no modo awake para receber os quadros.

O AP não entra em modo de economia de energia, apenas as estações a ele associadas.

Em redes ad-hoc o gerenciamento de energia segue a mesma estratégia, embora seja muito menos eficiente. Uma vez que não existe ponto centralizador, os quadros estão armazenados em diversas estações, mantendo cada estação mais tempo ativa para a entrega de todos os quadros.

#### 4.7.2 APSD

O modo APSD é um método introduzido pelo 802.11e para melhorar a qualidade de serviço de estações conectadas utilizando a técnica EDCA. O APSD foi desenvolvido para utilizar os quadros de dados enviados da estação para o AP como gatilho, informando o momento que a estação está no modo ativo. O AP utiliza esse momento para enviar qualquer quadro armazenado em seu buffer que tenha essa estação como destino [12].

Essa funcionalidade é útil principalmente na transmissão tráfego bidirecional, como tráfego de voz, por exemplo.

### 4.7.3 SMPS

O modo SMPS permite que estações 802.11n desativem seus radio transmissores, mantendo apenas um operando. O SMPS possui dois modos de operação: estático e dinâmico.

No modo estático, a estação desativa todos os rádios exceto um, tornando-se essencialmente uma estação 802.11a/g. O AP é notificado que a estação está no modo estático, que passa a enviar apenas um fluxo espacial para a estação, até que essa informe que os rádios adicionais estão operando.

O modo dinâmico também desativa todos os rádios exceto um mas, nesse modo, a estação pode rapidamente reativar os rádios adicionais para recepção de quadros. A estação pode, imediatamente após a recepção dos quadros, desativar os rádios.

Nesse modo de operação, o AP envia um RTS para a estação antes de enviar os quadros. Ao receber o RTS, a estação reativa os rádios e envia um CTS para o AP.

### 4.7.4 PSMP

O modo PSMP é uma extensão do modo APSD, e provê o mesmo método de entrega com gatilho que seu antecessor, estendendo a possibilidade da estação selecionar os quadros que servirão como gatilho para a transmissão do AP.

Esse método de escalonamento reduz a contensão das transmissões entre cada estação. A diminuição da contensão reduz o tempo de contensão e a quantidade de retransmissões na rede. O PMPS é um método dinâmico que se ajusta a mudanças na demanda do tráfego das estações que o utilizam.

## 4.8 RETROCOMPATIBILIDADE E GREENFIELD

A retrocompatibilidade é vista como essencial desde o início do desenvolvimento do 802.11n. Esse novo padrão possui diversos mecanismos de proteção quando opera com estações 802.11a/b/g. Esse modo de operação misto será utilizado até que todas as estações da rede sigam o novo padrão.

O 802.11n transmite um sinal que não pode ser decodificado pelos padrões anteriores.

Para evitar colisões e interferência nas transmissões, o 802.11n opera em um modo misto que transmite o preâmbulo e um cabeçalho MAC, que podem ser decodificados pelos padrões anteriores, como mostrado na figura 4.20. Esse mecanismo informa às outras estações que há uma transmissão em andamento e a duração da mesma. Após o preâmbulo e o cabeçalho MAC, a estação transmite todo o quadro seguindo as especificações do padrão 802.11n.

LRP = Legacy Radio Preamble  
LRH = Legacy Rapid Header  
RP = 11n Radio Preamble  
RH = 11n Radio Header



Figura 4.20: Representação do esquema de retrocompatibilidade do 802.11n [2]

Outro mecanismo de proteção utilizado para prevenir que transmissões do novo padrão sofram interferência de alguma transmissão do padrão antigo é o CTS-to-self. Esse mecanismo, adicionado pelo 802.11g, permite que estações 802.11n transmitam um quadro CTS endereçado para si, informando a duração da transmissão. Esse quadro irá reservar o meio para a transmissão, evitando colisões. O quadro CTS deve ser transmitido na menor modulação e taxa de transferência possível.

O custo dessa retrocompatibilidade é o excesso de overhead nas transmissões, que reduzem os benefícios dos aprimoramentos implementados no 802.11n, resultando em uma significativa redução na taxa de transferência das estações com o novo padrão.

Os mecanismos de retrocompatibilidade são acionados mesmo quando as estações 802.11a/b/g estão associadas a um outro AP, bastando que essas estejam no mesmo canal da estação 802.11n.

As estações 802.11n possuem um modo chamado Greenfield. Esse modo é utilizado quando todas as estações são do novo padrão, incluindo o AP, e não há nenhuma estação com as tecnologias antigas no alcance.

Quando no modo Greenfield, todos os artifícios de retrocompatibilidade são abdicados, tornando a rede muito mais rápida.

## 5 CONCLUSÃO

Como visto anteriormente, a emenda 802.11n implementa uma série de técnicas para aumentar drasticamente a taxa de transferência.

O 802.11n aprimorou técnicas utilizadas em padrões anteriores, como o OFDM, reduziu a taxa de código, implementou o RIFS, canais de 40MHz, agregação de quadros, entre outras. Essas melhorias aumentaram a taxa de transferência para até 150Mbit/s.

A novidade mais comentada do 802.11n foi a implementação do MIMO, um sistema de múltiplas antenas inteligentes transmitindo dados simultaneamente. Esse sistema pode quadruplicar a taxa de transferência do novo padrão. O problema do MIMO é seu preço de implementação. Utilizar quatro antenas significa ter quatro rádios, além de manter o complexo sistema por trás do MIMO.

Uma inovação importante é a possibilidade de operar tanto na faixa dos 2,4GHz quanto na faixa de 5GHz. A importância dessa inovação vem da saturação da faixa de 2,4GHz. Aparelhos como telefones sem fio, micro-ondas, bluetooth e até mesmo o padrão 802.11 utilizam essa faixa de frequência. Além dessa saturação, 802.11 possui apenas três canais de 20MHz não sobrepostos nessa frequência, e o novo padrão suporta o uso de canais de 40MHz. Esses canais agregados apesar de serem possíveis, terminam sendo inviáveis em 2,4GHz.

Outro problema são as técnicas utilizadas para viabilizar a retrocompatibilidade, que embora sejam necessárias durante o período de popularização do novo padrão, aumentam o overhead da rede.

O 802.11n aprimorou diversas técnicas do 802.11e, tornando-se apto para suportar aplicações que necessitem de QoS, como Voip, video-conferências, TVIP, entre outras.

O cenário atual de utilização do 802.11n é uma rede mista. Com as técnicas de retrocompatibilidade ativadas, na faixa de 2,4GHz, as estações do novo padrão funcionariam com as mesmas características do 802.11g.

Essa realidade está bem longe da solução ideal, que seria utilizar o 802.11n em 5GHz, para evitar o congestionamento da faixa de 2,4GHz, em uma rede apenas com estações com o novo padrão, tendo em vista a pouca utilização do 802.11a, esse cenário é real. Nesse caso, as estações operariam no modo Greenfield, descartando todas as técnicas de retrocompatibilidade e alcançando o seu verdadeiro potencial.

## REFERÊNCIAS

- [1] BURTON, Marcus. **802.11 Arbitration**. Disponível em: <[www.cwnp.com/pdf/802.11\\_arbitration.pdf](http://www.cwnp.com/pdf/802.11_arbitration.pdf)>. Acesso em: 05 jun. 2010.
- [2] CISCO. **802.11n: The Next Generation of Wireless Performance**. Disponível em: <[http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/wireless/ps5678/ps6973/ps8382/prod\\_white\\_paper0900aecd806b8ce7\\_ns767\\_Networking\\_Solutions\\_White\\_Paper.html](http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/wireless/ps5678/ps6973/ps8382/prod_white_paper0900aecd806b8ce7_ns767_Networking_Solutions_White_Paper.html)>. Acesso em: 10 jun. 2010.
- [3] CISCO. **Enterprise Mobility 3.0 Design Guide**. Disponível em: <<http://www.cisco.com/en/US/docs/solutions/Enterprise/Mobility/emob30dg/RFDesign.html>>. Acesso em: 20 mar. 2010.
- [4] COLEMAN, David D.; WESTCOTT, David A. **CWNA Certified Wireless Network Administrator Official Study Guide: Exam PW0-104**. Sybex, 2009.
- [5] GAST, Matthew. **802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide**. O'Reilly, 2002.
- [6] HARGREAVES, Eduardo. **O protocolo CSMA-CA e o padrão IEEE 802.11**. Disponível em: <[www.ravel.ufrj.br/arquivosPublicacoes/csma\\_ca\\_eduardo.pdf](http://www.ravel.ufrj.br/arquivosPublicacoes/csma_ca_eduardo.pdf)>. Acesso em: 20 jun. 2010.
- [7] IEEE 802.11n. **IEEE Standard 802.11N: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications**, 2009.
- [8] IEEE 802.11-2007. **IEEE Standard 802.11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications**, 2007.
- [9] IEEE. **Official IEEE 802.11 Working Group Project Timelines**. Disponível em: <[http://www.ieee802.org/11/Reports/802.11\\_Timelines.htm](http://www.ieee802.org/11/Reports/802.11_Timelines.htm)>. Acesso em: 17 mar. 2010.
- [10] IEEE. **IEEE P802.11 - Task Group N - Meeting Update**. Disponível em: <[http://www.ieee802.org/11/Reports/tgn\\_update.htm](http://www.ieee802.org/11/Reports/tgn_update.htm)>. Acesso em: 18 mar. 2010.
- [11] PERAHIA, Eldad. IEEE 802.11n Development: History, Process, and Technology. **IEEE Communications Magazine**, p48-55, jul. 2008.
- [12] PÉREZ-COSTA, Xavier; VIDAL, Albert; CAMPS-MUR, Daniel. **SU-APSD: Static IEEE 802.11e Unscheduled Automatic Power Save Delivery**. Disponível em: <<http://xavierperezcosta.com/publications/SU-APSD.pdf>>. Acesso em: 26 jun. 2010.
- [13] PINTO, Ernesto Leite; ALBUQUERQUE, Cláudio Penedo. A técnica de transmissão OFDM. **Revista Científica Periódica – Telecomunicações**, v.5, n.1, P01-10, jun. 2002.
- [14] PUTMAN, Byron W. **802.11 WLAN Hands-On Analysis : Unleashing the Network Monitor for Troubleshooting and Optimization**. Authorhouse, 2006

[15] RUBINSTEIN, Marcelo G.; REZENDE, José Ferreira de. **Qualidade de Serviço em Redes 802.11**. Disponível em: <[www.lee.eng.uerj.br/~rubi/TechReports/RuRe02.pdf](http://www.lee.eng.uerj.br/~rubi/TechReports/RuRe02.pdf)>. Acesso em: 17 jun. 2010.

[16] SHRIVASTAVA, Vivek *et al.* **802.11n Under the Microscope**. Disponível em: <[pages.cs.wisc.edu/~viveks/11n.pdf](http://pages.cs.wisc.edu/~viveks/11n.pdf)>. Acesso em: 20 jun. 2010.

[17] TANENBAUM, Andrew S. **Redes de Computadores**. 4. ed. Campus, 2003.

[18] VASSIS, Dimitris *et al.* The IEEE 802.11g Standard for High Data Rate WLANs. **IEEE Network**, p21-26, mai./jun. 2005.

[19] WIKIPEDIA. **Forward Error Correction**. Disponível em: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Forward\\_error\\_correction](http://en.wikipedia.org/wiki/Forward_error_correction)>. Acesso em: 21 mar. 2010.

[20] WIKIPEDIA. **802.11-2007**. Disponível em: <[http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.11-2007](http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11-2007)>. Acesso em: 21 mar. 2010.

[21] WIKIPEDIA. **802.11n**. Disponível em: <[http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.11n-2009](http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11n-2009)>. Acesso em: 18 mar. 2010.

[22] WIKIPEDIA. **802.11a**. Disponível em: <[http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.11a-1999](http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11a-1999)>. Acesso em: 12 mar. 2010.

[23] WIKIPEDIA. **802.11b**. Disponível em: <[http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.11b-1999](http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11b-1999)>. Acesso em: 12 mar. 2010.

[24] WIKIPEDIA. **802.11g**. Disponível em: <[http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.11g-2003](http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11g-2003)>. Acesso em: 13 mar. 2010.

[25] WIKIPEDIA. **MSDU**. Disponível em: <[http://en.wikipedia.org/wiki/MAC\\_service\\_data\\_unit](http://en.wikipedia.org/wiki/MAC_service_data_unit)>. Acesso em: 18 mai. 2010.