

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PROPOSTA DE MÉTODO DE ACESSO AO MEIO
BASEADO EM QoS PARA REDES AD HOC IEEE 802.11.**

TIAGO TRINDADE DA SILVA

ORIENTADORA: CLÁUDIA JACY BARENCO ABBAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PUBLICAÇÃO: PGGENE.DM – 332/08

BRASÍLIA/DF: FEVEREIRO – 2008.

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PROPOSTA DE MÉTODO DE ACESSO AO MEIO BASEADO EM
QoS PARA REDES AD HOC IEEE 802.11.**

TIAGO TRINDADE DA SILVA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

APROVADA POR:

**CLÁUDIA JACY BARENCO ABBAS, Doutora ENE/UnB.
(ORIENTADORA)**

**MARIO DANTAS, Doutor INE/UFSC.
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**RAFAEL TIMÓTEO DE SOUSA Jr., Doutor ENE/UnB.
(EXAMINADOR INTERNO)**

BRALÍLIA, 29 DE FEVEREIRO 2008.

FICHA CATALOGRAFICA

SILVA, TIAGO TRINDADE DA

Proposta de Método de Acesso ao Meio Baseado em QoS para Redes *Ad Hoc* IEEE 802.11. [Distrito Federal] 2008.

xxi, 116p., 210 x 297 mm ENE/FT/UnB, Mestre, Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. IEEE 802.11.

2. QoS

3. CSMA/CA

3. Redes sem Fios.

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRAFICA

SILVA, TIAGO TRINDADE DA (2007). Proposta de Método de Acesso ao Meio Baseado em QoS para Redes *Ad Hoc* IEEE 802.11. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM – 332/08. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, última página do trabalho p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Tiago Trindade da Silva

TÍTULO: Proposta de Método de Acesso ao Meio Baseado em QoS par a Redes *Ad Hoc* IEEE 802.11.

GRAU: Mestre.

Ano: 2008

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Tiago Trindade da Silva

CLSW Quadra 101, Bloco B, apartamento 141, Sudoeste.

70670-502 Brasília – DF – Brasil.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha esposa Fabina pelo amor e compreensão durante todos os momentos deste trabalho, pela força e perseverança durante os momentos que passamos longe um do outro.

Aos meus pais Valdemar e Ivete pelo apoio e ajuda para o início deste trabalho, pelos conselhos recebidos, pelo amor e carinho, com certeza sem a ajuda deles nada teria acontecido.

Aos meus irmãos Rafael e Helena que suportaram e ainda suportam a distância que nos separa, por sempre me receberem com amor e carinho.

A família de Fabina, seus pais Aires e Neura, sua irmã Bruna que sempre me apoiam, inclusive no dia em que eu e Fabiana casamos e fomos para longe deles.

A Cláudia minha orientadora pelos conselhos e amizade.

Aos meus amigos Leôncio, Eric, Daniel e Pedro pela amizade, ajudas e bons momentos.

Aos professores do ENE pelos conhecimentos transmitidos e ajudas prestadas durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos funcionários do Laboratório de Redes do ENE Adriana, Wandenberg e Wesley pela disposição e sorriso amigo.

E ao CNPq pela ajuda financeira que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.

Dedico a Deus pela minha vida
À Fabina minha doce e fiel esposa
Aos meus pais Valdemar e Ivete
E aos meus irmãos Rafael e Helena

RESUMO

PROPOSTA DE MÉTODO DE ACESSO AO MEIO BASEADO EM QoS PARA REDES *AD HOC* IEEE 802.11.

Autor: Tiago Trindade da Silva

Orientadora: Cláudia Jacy Barenco Abbas

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, fevereiro de 2008.

A presença do padrão IEEE 802.11 na maioria dos dispositivos móveis disponíveis no mercado e a disponibilidade dos *hotspot* em hotéis, aeroportos e restaurantes aliados a presença das redes IEEE 802.11 nas empresas, universidades e residências torna a Internet altamente disponível a tais dispositivos. A experiência do usuário com as aplicações multimídias da Internet torna necessário à utilização de tais aplicações nas redes móveis. Estas aplicações requerem a implementação de QoS ao padrão IEEE 802.11 de forma que uma WLAN possa atender os requisitos das aplicações e as expectativas dos usuários.

As soluções de QoS propostas para o padrão IEEE 802.11 em modo *Ad Hoc*, como a IEEE 802.11e, baseiam-se na natureza da informação, o que em determinados casos, é uma solução injusta para as estações que estão disputando o acesso ao meio. Por exemplo, quando algumas estações da rede transmitem dados somente com prioridade alta e outras somente com prioridade baixa as estações que utilizam a prioridade alta podem suprimir as transmissões das estações que utilizam a prioridade baixa. Os métodos de acesso ao meio disponíveis não controlam a distribuição de banda entre as estações quando os fluxos transmitidos, por cada estação, possuem prioridades diferentes. Nenhuma das propostas existente garante qualquer tempo de transmissão para as estações.

Esta dissertação apresenta uma nova proposta de acesso ao meio com QoS para as redes *ad hoc* IEEE 802.11 chamado de DCFAH (*Distributed Coordination Function Ad Hoc*). A proposta considera um mecanismo de acesso ao meio justo e uma largura de banda mínima para as estações que necessitem de QoS. Também existe uma preocupação com as métricas de QoS como atraso e *Jitter*. A DCFAH utiliza o mecanismo EDCA para diferenciar o serviço de QoS entre os fluxos internos de uma estação, sendo assim pode ser classificado

como um mecanismo por fluxo. A justiça da DCFAH é provida através do mecanismo de controle distribuído, executado em todas as estações, que distribui igualmente a todas as estações os *slots* de transmissão do período com QoS. A DCFAH ainda provê serviços de melhor esforço para as aplicações que não necessitam de QoS.

Obteve-se a análise de desempenho dos parâmetros de *throughput*, atraso e *jitter* da DCFAH comparado os resultados obtidos, através de simulações, ao desempenho dos mesmos parâmetros do EDCA. Todas as simulações do DCFAH e do EDCA realizaram-se no simulador de redes NS 2 com as prioridades de acesso ao meio de voz, vídeo, melhor esforço e *background* conforme especifica a emenda IEEE 802.11e.

Os resultados obtidos demonstram a eficiência do DCFAH na distribuição da largura de banda entre as estações da rede conforme as solicitações de reservas efetuadas. O DCFAH comparado ao EDCA não apresenta perda de *throughput* ou qualquer deterioração nos parâmetros de atraso ou *jitter* apesar do *overhead* inserido pelo mecanismo de controle de acesso ao meio e reservas utilizado pelo DCFAH. O período de melhor esforço garante a gradação de serviço entre as estações conforme a natureza da informação.

ABSTRACT

PROPOSTA DE MÉTODO DE ACESSO AO MEIO BASEADO EM QoS PARA REDES *AD HOC* IEEE 802.11.

Author: Tiago Trindade da Silva

Supervisor: Cláudia Jacy Barenco Abbas

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, February of 2008.

IEEE 802.11 standard is present in most mobile devices available today in the market. The offer of hotspot in hotels, airports and restaurants in conjunction with the IEEE 802.11 network in companies, universities and residences turns the Internet widely accessible to such devices. Because of users experience with these internet multimedia applications, it is necessary to apply these applications on mobile webs, which requires the implementation of QoS over IEEE 802.11 standard, in order to WLAN fulfil the applications requirement and users expectation.

The existing QoS solutions for ad hoc IEEE 802.11 standard, such as IEEE 802.11e, are based on the information's nature. In specific cases, this type of solution is considered unfair to stations disputing access to the media. When some web stations send only high priority data while others send only low priority, they can suppress the low priority transmissions. The media access methods available do not control bandwidth distribution when data is transmitted with different priority by each station. None of the existing solutions assure some transmission time for each station.

This dissertation presents a new media access proposal called DCFAH (Distributed Coordination Function Ad Hoc) with QoS for ad hoc IEEE 802.11 networks. It considers a fair media access mechanism and a minimum bandwidth for stations that need QoS. There is also a concern about QoS metrics like delay and Jitter. DCFAH uses an EDCA mechanism to differ the QoS services in an internal flow, therefore it can be classified as a mechanism per flow. DCFAH provides fairness through a mechanism of controlled distribution functioning in all stations. It distributes equally slots of period transmissions

with QoS to every station. More over, provides services of better efforts to the applications that do not require QoS.

The analysis of the performance of DCFAH throughput, delay and jitter bounds was obtained by comparing results gathered through simulations with the performance of the same parameters of EDCA. All DCFAH and EDCA simulations were done in the network simulator NS 2 using media access priorities of voice, video, best effort and background according to IEEE 802.11e specifications.

The results demonstrate DCFAH efficiency on the bandwidth distribution through the network stations according to reservation requests made. Comparing to EDCA, DCFAH does not demonstrate throughput loss or any deterioration in delay or jitter bounds despite the overhead inserted by the media and reserves control access mechanism used by DCFAH. The best effort period assures the QoS between stations according to the information natures.

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 | REDES SEM FIOS PADRÃO IEEE 802.11 | 3 |
| 2.1 | VISÃO GERAL..... | 3 |
| 2.1.1 | Componentes da arquitetura IEEE 802.11 | 5 |
| 2.1.2 | Conceitos do sistema de distribuição | 6 |
| 2.1.3 | ESS – <i>Extended Service Set</i> | 7 |
| 2.1.4 | Integração com redes cabeadas | 8 |
| 2.1.5 | QSSS: Qualidade de serviço na rede IEEE 802.11 | 9 |
| 2.1.6 | Modelo de Referência | 11 |
| 3 | DESCRIÇÃO FUNCIONAL DA SUBCAMADA MAC | 13 |
| 3.1.1 | Arquitetura MAC | 13 |
| 3.1.2 | Função de Coordenação Distribuída (DCF) | 13 |
| 3.1.3 | Função de coordenação em um ponto (PCF) | 24 |
| 3.1.4 | Função de Coordenação Híbrida (HCF)..... | 27 |
| 4 | PROPOSTA DE ACESSO AO MEIO | 39 |
| 4.1 | TRABALHOS RELACIONADOS E MOTIVAÇÃO | 39 |
| 4.2 | FUNÇÃO DE COORDENAÇÃO DISTRIBUÍDA | 41 |
| 4.3 | ESTRUTURA DO SUPERFRAME | 42 |
| 4.4 | GERENCIAMENTO DA REDE | 44 |
| 4.5 | MECANISMO DE RESERVA | 45 |
| 4.6 | QUADROS UTILIZADOS | 46 |
| 4.7 | QUADROS BEACONS | 47 |
| 4.8 | QUADROS DE RESERVAS | 51 |
| 4.9 | ESPAÇO ENTRE QUADROS | 51 |
| 4.10 | PROCEDIMENTO DE ACESSO AO CANAL | 53 |
| 5 | SIMULAÇÕES E RESULTADOS | 57 |
| 5.1 | NS 2 E PATCHS | 57 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 5.1.1 | Implementação do IEEE 802.11 no NS 2 e contribuições | 57 |
| 5.1.2 | Escolha da versão do NS 2 e aplicações dos <i>patches</i> | 59 |
| 5.2 | IMPLEMENTAÇÃO DO DCFAH | 61 |
| 5.3 | ANÁLISE DE DESEMPENHO DA DCFAH | 62 |
| 5.3.1 | Análise de desempenho do <i>Throughput</i> | 63 |
| 5.3.2 | Análise do atraso | 79 |
| 5.3.3 | Análise do <i>jitter</i> | 86 |
| 6 | CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS | 93 |
| 6.1 | CONCLUSÕES | 93 |
| 6.2 | TRABALHOS FUTUROS | 95 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 97 |
| | ANEXOS | 101 |
| A - | SEQÜÊNCIA DE TROCA DE QUADROS | 103 |
| B - | Comparação do Tempo de Transmissão dos Quadros de Dados com o Tempo de <i>Backoff</i> Aleatório..... | 115 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 3.1 – Prioridade de usuário para mapeamento da categoria de acesso | 28 |
| Tabela 4.1 – Valor acrescentado ao tipo e subtipo do campo controle do quadro. | 47 |
| Tabela 4.2 – Valor adicionado ao campo controle de QoS. | 47 |
| Tabela 4.3 – Informação acrescentada aos quadros <i>beacons</i> | 48 |
| Tabela 4.4 – Valores do campo próximo período do elemento capacidade QoS <i>Ad Hoc</i> . . | 48 |
| Tabela 5.1 – Valores utilizados para os parâmetros do EDCA. | 63 |
| Tabela 5.2 – Prioridades de acesso utilizadas na análise de desempenho do <i>throughput</i> ... | 63 |
| Tabela 5.3 – Parâmetros de configuração do SuperFrame | 64 |
| Tabela A.1 – Seqüência de quadros. | 103 |
| Tabela A.2 – Seqüência de quadros CF. | 103 |
| Tabela A.3 – Seqüência HCF | 104 |
| Tabela A.4 – Seqüência de <i>Poll</i> | 105 |
| Tabela A.5 – Seqüência TXOP | 106 |
| Tabela A.6 – Seqüência de Dados com QoS CF-ACK <i>Piggybacked</i> | 107 |
| Tabela B.1 – Valores máximos e mínimos do <i>BackoffTime</i> | 115 |
| Tabela B.2 – Tempo de transmissão para quadros de dados. | 116 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – BSS – <i>Basic Service Set</i> | 6 |
| Figura 2.2 – Sistema de Distribuição e Ponto de Acesso (AP). | 7 |
| Figura 2.3— <i>Extended Service Set (ESS)</i> | 8 |
| Figura 2.4 – Conexão com outras redes da família IEEE 802. | 9 |
| Figura 2.5 – Parte do modelo de referência ISO/IEC coberto pelo IEEE 802.11. | 11 |
| Figura 3.1 – Arquitetura MAC. | 13 |
| Figura 3.2 – Algumas relações de IFS. | 17 |
| Figura 3.3 – Exemplo do crescimento exponencial de CW. | 19 |
| Figura 3.4 – Método básico de acesso..... | 20 |
| Figura 3.5 – Procedimento de <i>backoff</i> | 21 |
| Figura 3.6 – Ajustes do RST/CTS/Dados/ACK e NAV. | 24 |
| Figura 3.7 – Alternação entre CFP e CP. | 25 |
| Figura 3.8 – Modelo de referência para implementação. | 30 |
| Figura 3.9 – Mecanismo de temporização das relações EDCA. | 34 |
| Figura 4.1 – SuperFrame com os períodos de reserva, BE e QoS. | 42 |
| Figura 4.2 – Diagrama do mecanismo de reserva. | 46 |
| Figura 4.3 – Capacidade QoS <i>Ad Hoc</i> | 48 |
| Figura 4.4 – Mapa de distribuição de <i>slots</i> com QoS. | 49 |
| Figura 4.5 – Elemento de informação de reserva. | 49 |
| Figura 4.6 – Elemento reservas QSTAS. | 49 |
| Figura 4.7 – Elemento lista de espera para <i>slots</i> ociosos. | 50 |
| Figura 4.8 – Subcampo QSTA _i | 50 |
| Figura 4.9 – Quadro de solicitação de reservas de <i>slots</i> | 51 |
| Figura 4.10 – Espaços entre os quadros do IEEE 802.11 e SAIFS da DCFAH. | 52 |
| Figura 4.11 – SAIFS durante um período com QoS de um SuperFrame. | 53 |
| Figura 5.1 – <i>Throughput</i> agregado do DCFAH com AC_VO. | 65 |
| Figura 5.2 – <i>Throughput</i> agregado do EDCA com AC_VO. | 66 |
| Figura 5.3 – <i>Throughput</i> individual para o DCFAH com prioridade de acesso AC_VO ... | 67 |
| Figura 5.4 – <i>Throughput</i> individual para o EDCA com prioridade de acesso AC_VO | 68 |
| Figura 5.5 – <i>Throughput</i> agregado do DCFAH com AC_BK. | 69 |
| Figura 5.6 – <i>Throughput</i> agregado do EDCA com AC_BK. | 70 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.7 – <i>Throughput</i> individual para o DCFAH com prioridade de acesso AC_BK ... | 71 |
| Figura 5.8 – <i>Throughput</i> individual para o DCFAH com prioridade de acesso AC_BK ... | 72 |
| Figura 5.9 – <i>Throughput</i> agregado do DCFAH com os quatro níveis de prioridade. | 74 |
| Figura 5.10 – <i>Throughput</i> agregado do EDCA com os quatro níveis de prioridade. | 74 |
| Figura 5.11 – <i>Throughput</i> individual para o DCFAH para prioridades AC_VO e AC_VI | 75 |
| Figura 5.12 – <i>Throughput</i> individual para o DCFAH para prioridades AC_BE e AC_BK | 76 |
| Figura 5.13 – <i>Throughput</i> individual para o EDCA para prioridades AC_VO e AC_VI ... | 77 |
| Figura 5.14 – <i>Throughput</i> individual para o EDCA para prioridades AC_BE e AC_BK .. | 78 |
| Figura 5.15 – Atraso introduzido pelo DCFAH para todas as prioridades. | 80 |
| Figura 5.16 – Atraso introduzido pelo EDCA para todas as prioridades. | 80 |
| Figura 5.17 – Atraso introduzido pelo DCFAH para prioridade AC_VO e AC_VI | 81 |
| Figura 5.18 – Atraso introduzido pelo DCFAH para prioridade AC_BE e AC_BK. | 82 |
| Figura 5.19 – Atraso introduzido pelo EDCA para prioridade AC_VO e AC_BK. | 84 |
| Figura 5.20 – Atraso introduzido pelo DCFAH para prioridade AC_BE e AC_BK. | 85 |
| Figura 5.21 – <i>Jitter</i> do DCFAH. | 86 |
| Figura 5.22 - <i>Jitter</i> do EDCA. | 87 |
| Figura 5.23 – <i>Jitter</i> do DCFAH para prioridades AC_VO e AC_VI | 88 |
| Figura 5.24 – <i>Jitter</i> do DCFAH para prioridade AC_BE e AC_BK. | 89 |
| Figura 5.25 – <i>Jitter</i> do EDCA para prioridade AC_VO e AC_VI..... | 90 |
| Figura 5.26 – <i>Jitter</i> do EDCA para prioridade AC_BE e AC_BK. | 91 |
| Figura A.1 – Seqüência de quadros. | 111 |
| Figura A.2 – Seqüência de quadros CF. | 111 |
| Figura A.3 – Seqüência HCF. | 112 |
| Figura A.4 – Seqüência de <i>Poll</i> | 112 |
| Figura A.5 – Seqüência de dados com QoS <i>Piggybacked</i> em CF-Ack. | 113 |
| Figura A.6 – Seqüência TXOP | 113 |

LISTA DE ABREVIACOES.

AC – *Access Category*
ACK – *Acknowledgment*
AID – *Association Identifier*
AIFS – *Arbitrary IFS*
AIFSN – *Arbitration Interframe Space Number*
AP – *Access Point*
ATIM – *Announcement Traffic Indication Message*
BE – *Best Effort*
BSS – *Basic Set Service*
CBR – *Constat Bit Rate*
CD – *Carrier Sense*
CF-End – *Contention Free End*
CFP – *Contention Free Period*
CF-Poll – *Contention Free Poll*
CP – *Contetion Period*
CS – *Carrier Sense*
CSMA/CA – *Carrier Sense Multiple Access/Colision Avoidance*
CTS – *Clear To Send*
CW – *Contention Window*
DCF – *Distributed Coordination Function*
DCFAH – *Distributed Coordination Function Ad Hoc*
DIFS – *DCF Interframe Space*
DS – *Distribution System*
DSM – *Distribution System Medium*
DTIM – *Delivery Traffic Indication Message*
EDCA – *Enhanced Distributed Channel Access*
EDCAF – *Enhanced Distributed Channel Access Function*
EIFS – *Extended Interframe Space*
ESS – *Extended Service Set*
HC – *Hybrid Coordinator*

HCCA – *HCF Controlled Channel Access*
HCF – *Hybrid Coordination Function*
IBSS – *Independent Basic Set Service*
IFS – *InterFrame Space*
ISO – *International Organization for Standardization*
LLC – *Logic Link Control*
MAC – *Medium Access Control*
MMPDU – *MAC Management Protocol Data Unit*
MMPDU – *MAC Management Protocol Data Unit*
MPDU – *MAC Protocol Data Unit*
MSDUs – *MAC Service Data Unit*
NAV – *Network Allocation Vector*
NoQSTAS – *Número de Estações com Reservas Neste Mapa de
Reserva de Slots com QoS*
nQAP – *non QoS Access Point*
nQBSS – *non QoS Basic Set Service*
OSI – *Open System Interconnection*
PC – *Point Coordinator*
PCF – *Point Coordination Function*
PDAs – *Personal Digital Assistant*
PIFS – *PCF Interframe Space*
PS-Poll – *Power Save Poll*
QAP – *QoS Access Point*
QBSS – *QoS Basic Set Service*
QIBSS – *QoS Independent Basic Set Service*
QLRC – *QoS Long Retry Counter*
QoS – *Quality of Service*
QSRC – *QoS Short Retry Counter*
RTS – *Request To Send*
SAIFS – *Slotted Arbitrary Interframe Space*
SIFS – *Short Interframe Space*
SLRC – *Station Long Retry Count*
SME – *Station Management Entity*
SSRC – *Station Short Retry Count*

TBTT – *Target Beacon Transmission Time*

TCP – *Transmission Control Protocol*

TMRSQoS – *Tamanho do Mapa de Reserva de Slots com QoS*

TXOPs – *Transitions Opportunities*

UDP – *User Datagram Protocol*

UP – *User Priority*

VMAC – *Virtual MAC*

VoIP – *Voz sobre IP*

VS – *Virtual Source*

WM – *Wireless Medium*

1 INTRODUÇÃO

Atualmente a maior necessidade de mobilidade do ser humano aliada com a Internet tem exigido que todos os fabricantes de dispositivos computacionais, como PDAs, *notebooks* e *smartphones*, incluam dispositivos de comunicação sem fios em seus produtos. O padrão IEEE 802.11 [1] tem-se apresentado como uma das mais populares tecnologias por sua capacidade de operação nos modos infra-estruturado e *Ad Hoc* [3], total transparência para as camadas superiores e ampla disponibilidade de dispositivos no mercado.

Como já dito anteriormente, a disponibilidade das redes IEEE 802.11 e a sua massiva presença em todos os ambientes e o uso mais freqüente de dispositivos móveis tornam-na a candidata ideal para utilização também em modo *Ad Hoc* para muitos tipos de aplicação da Internet.

Os usuários estão acostumados com as aplicações multimídia já consagradas nos ambientes de *desktop* e corporativos. Exemplos de aplicações são as vídeo conferências, o VoIP, a transferência de vídeos ou músicas, sendo assim os dispositivos móveis devem dispor de soluções para tornarem-se atraentes e motivarem o usuário a adquiri-los. Neste cenário surge a necessidade da implementação de QoS nas redes IEEE 802.11.

O grupo de trabalho responsável pelo padrão IEEE 802.11 apresentou um novo método de acesso ao meio com QoS denominado de IEEE 802.11e [5], esta proposta considera um mecanismo de gradação de serviço conforme a natureza da informação. O Capítulo 2 apresenta a descrição do padrão IEEE 802.11 juntamente com a emenda IEEE 802.11e e o Capítulo 3 apresenta a descrição funcional da subcamada MAC do padrão IEEE 802.11 e da emenda IEEE 802.11e.

O capítulo 4 apresenta as propostas existentes para redes IEEE 802.11 modo *Ad Hoc*, de maior relevância, que realizam a gradação de QoS conforme a natureza da informação e não garantem um tempo mínimo de transmissão para cada estação da rede. Esses aspectos motivaram o desenvolvimento desta dissertação com uma proposta de controle de acesso ao meio distribuído para redes IEEE 802.11 em modo *Ad Hoc*, que também é apresentada

no Capítulo 4 com a descrição funcional do DCFAH (*Distributed Coordination Function Ad Hoc*) [2]. Toda sua estrutura de SuperFrame com os períodos de reserva, melhor esforço e com QoS, quadros de reservas, mapa de distribuição de *slots* com QoS e mapa de empréstimo de *slots* com QoS são detalhados..

O principal objetivo do DCFAH é garantir uma taxa mínima de transmissão para cada estação da rede, independentemente do tipo de dados que a estação transmite e do grau de utilização da rede. Em um ambiente *Ad Hoc* a gradação de serviço deve ir além da natureza da informação a fim de permitir que todas as estações tenham oportunidade de transmitir os seus quadros, ou seja, deve-se prover uma solução justa que divida a largura de banda entre as estações e garanta um tempo mínimo de transmissão para cada estação.

O capítulo 5 apresenta o ambiente de simulação utilizado para a verificação da proposta. Em outras palavras, as contribuições necessárias para a implementação da DCFAH e os resultados obtidos nos testes de análise de desempenho do *throughput*, atraso e *jitter* da DCFAH comparados com o desempenho do EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*) [4]. Todos os testes foram realizados em uma rede saturada para a verificação do comportamento da DCFAH quando os recursos da rede não são capazes de atender a demanda agregada.

O capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas aonde se indica que a presente proposta distribui a largura da banda entre as estações independentemente da natureza da informação, a gradação de serviço conforme a natureza da informação e obtida através do período de melhor esforço. Os trabalhos futuros também apresentando no capítulo 6 indicam a implementação do mecanismo de reserva dos *slots* com QoS, escalabilidade da rede e operação em redes *multi-hop*.

2 REDES SEM FIOS PADRÃO IEEE 802.11

Neste capítulo é apresentada uma visão geral do padrão IEEE 802.11 [1] com todas as suas peculiaridades e requerimentos. Essa visão geral engloba as características das redes sem fios, os componentes da arquitetura, sistema de distribuição, ESS, QoS nas redes IEEE 802.11 e a comparação com o modelo de referência ISO/OSI.

2.1 VISÃO GERAL

As redes sem fio possuem características fundamentais que diferem significativamente das redes tradicionais estruturadas ou cabeadas. Em uma rede com cabos um endereço é equivalente à localização física da estação, isto implicitamente é assumido no projeto das redes com cabos. No IEEE 802.11 a unidade de endereço é a estação. A estação é o destino da mensagem, mas geralmente não representa uma localização física específica.

A camada física usada no IEEE 802.11 é diferente dos meios cabeados, possuindo as seguintes características:

- a) Usa-se um meio que não tem um limite físico absoluto, extensão dos limites físicos não é facilmente observável. As estações com os transceptores não sabem se os quadros transmitidos serão recebidos pelo destinatário porque não é possível saber se o destinatário encontra-se no alcance de transmissão da estação;
- b) Estão potencialmente desprotegidas de outros sinais eletromagnéticos que podem estar compartilhando o mesmo meio físico. Por exemplo, várias tecnologias distintas podem utilizar o mesmo espectro eletromagnético e largura de faixa sobre o mesmo espaço físico;
- c) Comunicação sobre um meio significativamente com menor confiabilidade que um meio físico de cabos. Isto ocorre devido ao nível de ruído elevado. Por

exemplo. as transmissões de tecnologias distintas no mesmo espectro eletromagnético são tratadas como ruído entre as tecnologias;

- d) Possui topologias dinâmicas no decorrer do tempo com aumento ou diminuição da população de estações;
- e) Falta de conectividade completa, e então a suposição normalmente feita que todas as estações da WLAN possam escutar todas as outras estações é inválida;
- f) Possuem tempos variados e propriedades de propagação das ondas eletromagnéticas assimétricas;
- g) Podem sofrer interferência de outras redes IEEE 802.11, separadas logicamente, mas operando em áreas sobrepostas, e de outras tecnologias.

Por causa das limitações de alcance dos meios físicos sem fio, uma célula sem fios cobre distâncias geográficas limitadas. Frequentemente a área de cobertura é constituída de várias células que formam uma única rede de tamanho arbitrário.

O meio físico do IEEE 802.11 requer a manipulação de estações móveis e portáteis. Uma estação portátil pode mover-se de uma posição para outra, mas como normalmente depende de uma fonte de energia externa dificilmente é utilizada durante o movimento. Um bom exemplo de estação portátil é um computador *desktop* com uma placa de rede sem fios. Este pode acessar a rede em uma posição fixa e pode ser facilmente desligado, desmontado, movido para outro local, remontado e religado. Uma estação móvel possui uma fonte de energia própria, por exemplo, uma bateria, o que permite o acesso à rede ao mesmo tempo em que se movimenta de um local para outro.

Por razões técnicas não é suficiente a capacidade de manipular somente estações portáteis porque os efeitos de propagação das ondas eletromagnéticas podem atrapalhar a distinção entre estações móveis e portáteis. As estações estacionárias podem parecer, para as outras estações da rede, como uma estação móvel devido aos efeitos de propagação.

Outro aspecto importante das estações móveis é o gerenciamento de energia, necessário quando a fonte de energia é uma bateria. Por exemplo, não pode ser presumido que uma estação receptora estará sempre disponível.

É requerido ao IEEE 802.11 aparecer para as camadas superiores (LLC – *Logic Link Control*) como uma rede da família IEEE 802. Isto requer que a rede IEEE 802.11 gerencie a mobilidade das estações dentro da subcamada MAC. Para atender a suposição que a LLC faz sobre as camadas inferiores é necessário que o IEEE 802.11 incorpore funções não tradicionais da subcamada MAC.

Quando existe um serviço de QoS o MAC empenha-se para prover “serviço garantido” dentro das limitações do meio sem fios. Isto é, particularmente na faixa espectral sem licença, garantias verdadeiras não são frequentemente possíveis. Então gradações de serviços são sempre possíveis, mas em ambientes suficientemente controlados, QoS verdadeiramente garantidas poderiam ser atendidas.

Quando usado para suportar aplicações com requerimento de qualidade de serviço cada rede IEEE 802.11 provê um enlace dentro de um ambiente de QoS fim a fim que pode ser estabelecido e gerenciado pelas entidades das camadas superiores. Para manipular o tráfego com QoS de forma comparável a outras Redes IEEE 802 a facilidade de QoS do IEEE 802.11 requer que a subcamada MAC do IEEE 802.11 incorpore funcionalidades não tradicionais na subcamada MAC. Além disso, pode ser necessário que as entidades de gerenciamento de certas camadas superiores estejam “atentas a redes sem fio”. A largura de banda disponível e outras características de QoS que uma rede sem fio está sujeitas frequentemente, e algumas vezes substancialmente, a mudanças dinâmicas devido a outras causas além da carga que estão fora do controle direto das entidades de gerenciamento da Rede.

2.1.1 Componentes da arquitetura IEEE 802.11

A arquitetura IEEE 802.11 consiste em vários componentes que interagem para prover uma rede sem fio que suporte a mobilidade das estações transparentemente para as camadas superiores.

O bloco básico de construção de uma rede IEEE 802.11 é a BSS (*Basic Set Service*). A Figura 2.1 mostra duas BSS, cada qual com duas estações. Comumente usa-se a forma oval para demonstrar uma BSS como a área de cobertura dentro da quais as estações, membros da BSS, podem permanecer comunicando-se. O conceito de área, embora não tenha precisão, é frequentemente suficiente. Se uma estação move-se para fora da sua BSS já não pode permanecer comunicando-se diretamente com os outros membros da BSS.

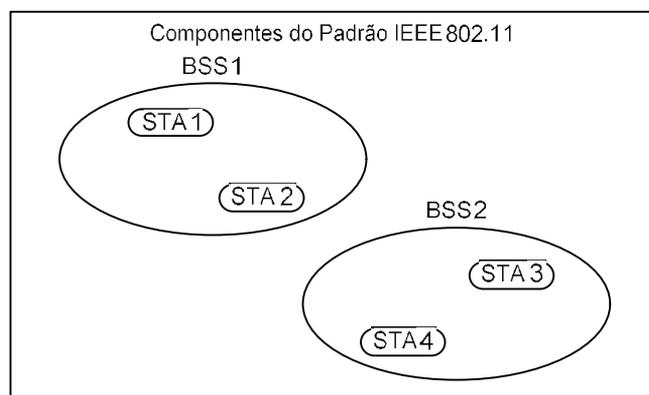


Figura 2.1 – BSS – *Basic Service Set*.

A BSS independente (IBSS) é o bloco mais simples do padrão IEEE 802.11. Uma rede IEEE 802.11 mínima pode consistir somente de duas estações comunicando-se diretamente entre si. Este tipo de operação é frequentemente referenciado como uma rede *ad hoc*.

2.1.2 Conceitos do sistema de distribuição

As limitações físicas de propagação determinam as distâncias diretas entre as estações que podem ser suportadas. Por exemplo, em algumas redes esta distância é suficiente, para outras redes o aumento da área de cobertura é necessário.

O componente, da arquitetura IEEE 802.11, usado para interconectar duas ou mais BSS é chamado de sistema de distribuição (DS – *Distribution System*). O DS habilita o suporte a dispositivos móveis provendo os serviços lógicos necessários para manipular endereços para o mapeamento dos destinos, sem depender da integração de múltiplas BS Ss.

Um ponto de acesso (AP – *Access Point*) é a estação que provê acesso para os serviços do DS, além de atuar como estação. A Figura 2.2 adiciona os componentes DS e AP à arquitetura IEEE 802.11 descrita.

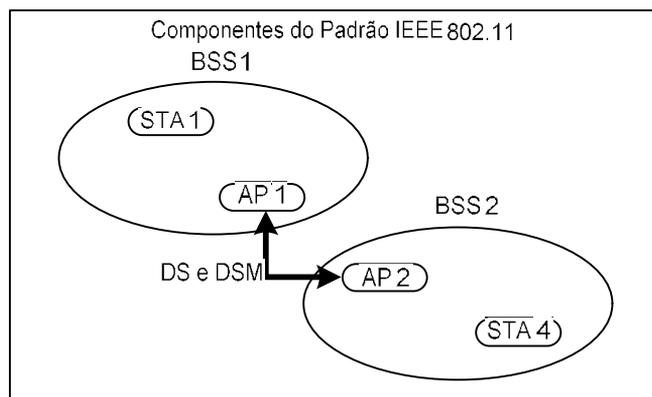


Figura 2.2 – Sistema de Distribuição e Ponto de Acesso (AP) .

Os dados movem-se entre uma BSS e o DS através do AP. Todos os APs também são estações endereçáveis. O endereço usado para comunicar-se pelo AP sobre o WM (*Wireless Medium*) e sobre o DSM (*Distribution System Medium*) não é necessariamente o mesmo.

2.1.3 ESS – *Extended Service Set*

O DS permite ao IEEE 802.11 criar uma rede sem fio de tamanho e complexidade arbitrários. O IEEE 802.11 refere-se a este tipo de rede como ESS – *Extended Service Network*, conforme mostrado na Figura 2.3. O conceito chave é que a rede ESS apareça para a camada LLC como uma rede IBSS. As estações, que pertencem a uma ESS, podem comunicar-se entre si e estações móveis podem mover-se de uma BSS para outra (dentro da mesma ESS) transparentemente para a LLC. O IEEE 802.11 não assume nada sobre a localização física relativa às BSS.

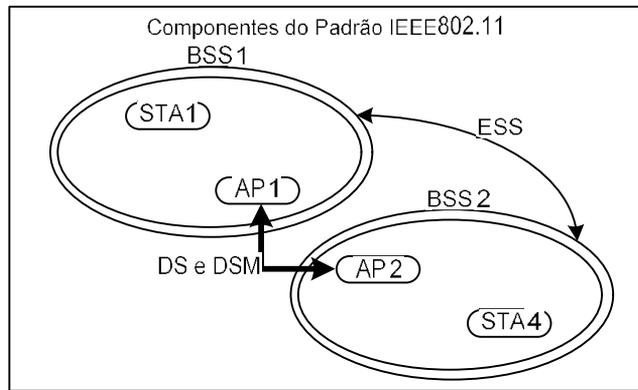


Figura 2.3— *Extended Service Set (ESS)*.

As BSSs podem ser configuradas das seguintes formas:

- a) As BSS podem sobrepor-se parcialmente. Isto comumente é usado para organizar cobertura contínua dentro de um espaço físico;
- b) As BSS podem estar fisicamente separadas. Logicamente não há limite de distância entre as BSS.
- c) As BSS podem estar fisicamente juntas. Isto pode ser feito para prover redundância.
- d) Uma (ou mais) rede IBSS ou ESS pode estar fisicamente presente no mesmo espaço como uma (ou mais) redes ESS. Isto pode acontecer por inúmeras razões. Duas das mais comuns são quando uma rede *Ad Hoc* está operando em um local onde também tem uma rede ESS e quando as redes IEEE 802.11 estão fisicamente sobrepostas e foram montadas por organizações diferentes.

2.1.4 Integração com redes cabeadas

Para integrar a arquitetura IEEE 802.11 com uma rede com cabos tradicionais é introduzido um componente lógico da arquitetura chamado de porta. O portal é um ponto lógico onde os MSDUs (*MAC Service Data Unit*) de uma rede integrada diferente da IEEE 802.11 entram para o DS da IEEE 802.11. A Figura 2.4 mostra uma rede IEEE 802.11 conectada uma rede com cabos IEEE 802.

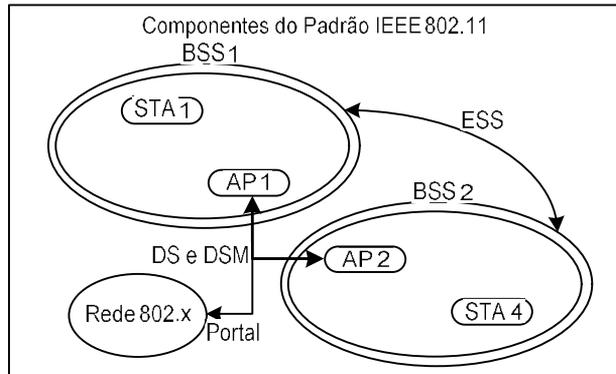


Figura 2.4 – Conexão com outras redes da família IEEE 802.

Todos os dados de uma rede diferente da IEEE 802.11 entram na arquitetura IEEE 802.11 pelo portal. O portal provê a integração lógica entre a arquitetura IEEE 802.11 e as redes com cabos existentes. É possível para um dispositivo oferecer ambas as funções de AP e de portal. Este deve ser o caso quando o DS é implementado por componentes IEEE 802.11.

No IEEE 802.11, a arquitetura ESS (AP e o DS) provê a segmentação do tráfego e a extensão do alcance. Conexões lógicas entre a IEEE 802.11 e outras redes são realizadas através do portal. O portal conecta o DSM e os meios das redes que não estão integrados.

2.1.5 QBSS: Qualidade de serviço na rede IEEE 802.11

A facilidade de QoS do IEEE 802.11 está presente na emenda IEEE 802.11e [4] que provê melhoramentos na camada MAC para suportar aplicações de rede que requeiram qualidade de serviço. Os melhoramentos de QoS estão disponíveis para as estações com QoS associadas com um AP com QoS (QAP) em uma QoS BSS (QBSS). Um subconjunto dos melhoramentos de QoS está disponível para uso entre estações que são membros da mesma QoS IBSS (QIBSS). Desde que uma estação implemente o conjunto de funcionalidades da estação, como definido no padrão IEEE 802.11, edição de 1999 (reiterado em 2003), a estação pode associar-se com um AP sem QoS (nQAP ou AP) em uma BSS sem QoS (nQBSS), para prover os serviços de dados MAC sem QoS quando não existir uma QBSS para associar-se.

Os melhoramentos que distinguem uma estação com QoS de uma estação sem QoS e um QAP de um AP são termos coletivos da facilidade de QoS. A quantidade dos mecanismos específicos para QoS podem variar entre as implementações, bem como entre as estações e QAPs.

Este padrão prove dois mecanismos para suportar aplicações com requerimentos de QoS chamados de EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*) e HCCA (HCF – *Hybrid Coordination Function – Controlled Channel Access*).

O EDCA entrega o tráfego baseado em diferentes UPs (*User Priority*). Esta diferenciação é alcançada para diferentes valores de UPs pela variação dos seguintes parâmetros :

- a) Quantidade de tempo que uma estação monitora o canal livre antes da transmissão ou *backoff*;
- b) O tamanho da janela de contenção (CW – *Contention Window*) usada para o *backoff*;
- c) O tempo que uma estação pode transmitir após ela adquirir o canal. Estas transmissões também podem estar sujeitas a certas restrições de acesso ao canal na forma de controle de admissão. Detalhes deste mecanismo estão providos na seção 3.1.4.1 Acesso ao canal baseado em contenção (EDCA) do padrão IEEE 802.11 [1].

O HCCA permite a reserva de oportunidades de transmissão (TXOPs – *Transmissions Opportunities*) através do HC (*Hybrid Coordinator*). Uma estação faz o requerimento de TXOPs, baseado nas suas necessidades, ao HC indicando o sentido da transmissão da estação para o QAP, do QAP para a estação ou para ambos os sentidos. A requisição é iniciada pelo SME (*Station Management Entity*) da estação. O HC, que está no QAP, pode aceitar ou rejeitar a requisição baseado nas suas políticas de controle de admissão. Se a requisição for aceita, o HC programa os TXOPs para o QAP e para a estação. Para transmissões da estação, o HC executa um *poll* sobre a estação baseado nos parâmetros supridos pela estação no momento da requisição. Para as transmissões com destino a estação o QAP obtém TXOPs diretamente do HC e entrega os quadros enfileirados para a estação, também baseado nos parâmetros supridos pela estação.

As estações sem QoS podem associar-se a uma QBSS se o QAP permitir. Todos os quadros endereçados para as estações sem QoS pelo QAP não devem usar o formato dos quadros associados com a facilidade de QoS.

2.1.6 Modelo de Referência

Este modelo apresenta a visão arquitetural, enfatizando a separação do sistema em duas partes maiores: o MAC da camada de enlace e a camada física. Estas camadas são planejadas para corresponder às camadas mais baixas do modelo básico de referência OSI da ISO/IEC (ISO/IEC 7498-1:1994). As camadas e subcamadas descritas neste padrão são mostradas na Figura 2.5.

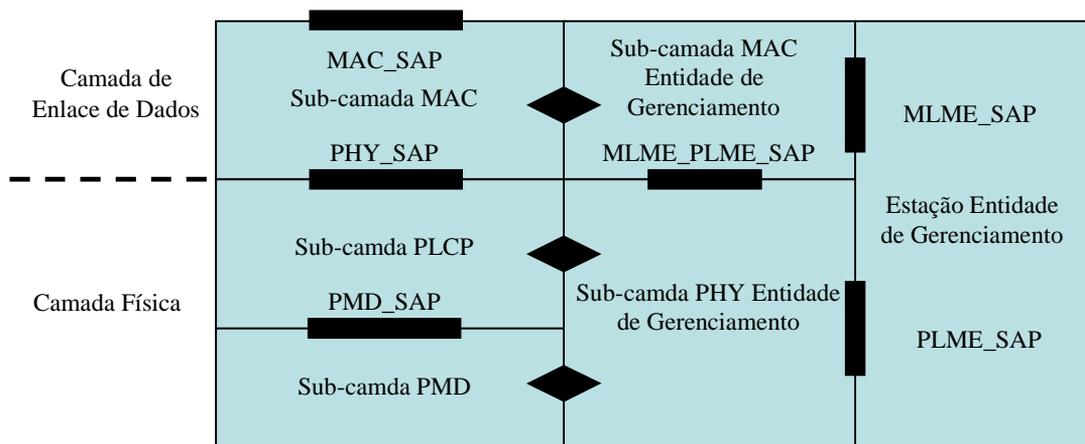


Figura 2.5 – Parte do modelo de referência ISO/IEC coberto pelo IEEE 802.11.

3 DESCRIÇÃO FUNCIONAL DA SUBCAMADA MAC

A descrição da subcamada MAC apresenta os modos de operação do padrão IEEE 802.11 formada pela função coordenação distribuída (*Distributed Coordination Function – DCF*), função coordenação em um ponto (*Point Coordination Function – PCF*) e a função de coordenação híbrida (HCF). Essas funções são explicadas em 3.1.2 Função de Coordenação Distribuída (DCF), 3.1.3 Função de Coordenação em um Ponto (PCF), e 3.1.4 Função de Coordenação Distribuída (HCF).

3.1.1 Arquitetura MAC

A arquitetura MAC pode ser descrita como mostra a Figura 3.1, onde o PCF e o HCF são providos através dos serviços do DCF. Note que uma estação sem QoS não possui o HCF. Em uma implementação para estações com QoS estão presentes o DCF e o HCF, o PCF é opcional para todas as estações.

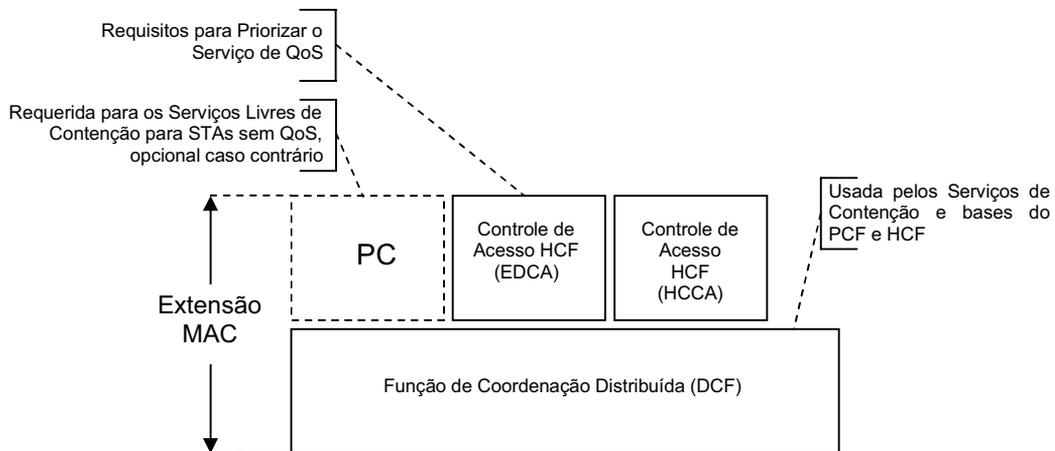


Figura 3.1 – Arquitetura MAC.

3.1.2 Função de Coordenação Distribuída (DCF)

O protocolo básico de acesso ao meio é o DCF que permite o compartilhamento automático do meio, para as camadas físicas compatíveis, através do uso do CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access – Collision Avoidance*) mais o tempo aleatório de *backoff* após a o meio tornar-se ocioso. Além disso, todo o tráfego direcionado usa o mecanismo

de reconhecimento positivo imediato (quadros ACK), onde as retransmissões são programadas pelo transmissor se o quadro ACK não for recebido.

O protocolo CSMA/CA é projetado para reduzir a probabilidade de colisões entre múltiplas estações que acessam o mesmo meio, no ponto onde as colisões ocorreriam com maior probabilidade. Justamente após o meio passar de ocupado para ocioso (indicado pela função CS – *Carrier Sense*) existe a maior probabilidade de haver colisões, isto ocorre porque várias estações podem estar esperando que o meio torne-se ocioso. Nesta situação é necessário um procedimento aleatório de *backoff* para resolver os conflitos de contenção do meio.

A detecção da portadora deve ser executada pelos mecanismos físico e virtual. O mecanismo físico é dado pelo CS. O mecanismo virtual de detecção de portadora é obtido pela distribuição das informações de reserva que anunciam o impedimento da utilização do meio. As trocas de quadros RTS (*Request To Send*) e CTS (*Clear To Send*) que ocorrem antes do quadro de dados é uma forma de distribuição da informação de reserva do meio. Os quadros RTS e CTS contêm o campo *Duration/ID*, onde é definido o período de tempo de reserva do meio para a transmissão da seqüência de dados atual. Todas as estações dentro do alcance de transmissão da estação de origem (que transmite o RTS) ou da estação de destino (que transmite o CTS) devem entender que o meio estará ocupado.

Outra forma de distribuir as informações de reserva do meio é através do campo *Duration/ID* nos quadros de dados *unicast*. Este campo informa o tempo de reserva do meio até a final da transmissão do quadro mais o quadro ACK, ou nos casos de fragmentos em seqüência até o final do quadro mais o tempo necessário para transmitir o próximo fragmento.

A troca de quadros RTS/CTS também executa um tipo de interferência rápida de colisão e uma conferência do caminho de transmissão. Se o retorno do CTS não é detectado pela estação de origem do RTS a nova tentativa de transmissão (após observar as outras regras de utilização do meio) pode ser executada mais rapidamente do que a tentativa de transmitir o quadro de dados. Isto ocorre devido à diferença de tamanho do quadro de dados e do quadro RTS, que normalmente é muito menor que o quadro de dados.

Outras vantagens do mecanismo RTS/CTS ocorrem quando duas ou mais BSS utilizam o mesmo canal sobreposto. O mecanismo de reserva do meio trabalha através dos limites da BSS. O mecanismo RTS/CTS pode também melhorar a operação na situação típica onde todas as estações podem receber quadros do AP, mas não podem receber os quadros de todas as outras estações que estão associadas à mesma BSS.

O mecanismo RTS/CTS não pode ser usado por MPDUs com endereços *broadcast* ou *multicast* porque existem vários destinos para o quadro RTS, e assim vários CTS concorrentes seriam enviados em resposta. O mecanismo RTS/CTS não é necessário para a transmissão de todos os quadros de dados, já que os quadros RTS e CTS acrescentam *overhead*, assim o mecanismo nem sempre é justificado, especialmente para quadros de dados pequenos.

O uso do mecanismo RTS/CTS é controlado pelo atributo `dot11Threshold`. Este atributo pode ser ajustado por pares de estações. Este mecanismo permite a configuração das estações para usarem o RTS/CTS sempre, nunca, ou somente quando os quadros forem maior que o tamanho especificado.

Uma estação configurada para não usar o mecanismo RTS/CTS ainda deve manter atualizado o seu mecanismo de detecção de portadora virtual com a informação do tempo de duração contida nos quadros RTS ou CTS recebidos, e deve sempre responder os RTS endereçados a ela com um quadro CTS.

O protocolo de acesso ao meio permite as estações suportarem diferentes ajustes das taxas de dados. Todas as estações devem receber quadros em todas as taxas de dados contidas em `aBasicRateSet` e transmitir em uma ou mais taxa de dados de `aBasicRateSet`. Para suportar a operação do RTS/CTS e do mecanismo virtual de detecção de portadora todas as estações devem ter a capacidade de detectar os quadros RTS e CTS.

3.1.2.1 Mecanismo de detecção de portadora

As funções física e virtual de detecção de portadora são usadas para determinar o estado do meio. Quando ambas as funções indicam que o meio está ocupado, o meio deve ser considerado ocupado; caso contrário, ele deve ser considerado livre.

O mecanismo de detecção de portadora física é provido pela camada física. O mecanismo de detecção de portadora virtual é provido pela subcamada MAC. Este mecanismo é chamado de NAV (*Network Allocation Vector*). O NAV mantém uma previsão do tráfego futuro sobre o meio com base na informação do tempo de duração que é anunciado nos quadros RTS/CTS anteriores a uma troca de dados. A informação de duração também está disponível nos cabeçalhos MAC de todos os quadros de dados, enviados durante o CP (*Contention Period*), diferentes dos quadros de Controle *PS-Poll* (*Power Save Poll*). O mecanismo para ajuste do NAV usando RTS/CTS no DCF é descrito em 3.1.2.7 Ajuste e Reajuste do NAV e a utilização do NAV, no PCF é descrito em 3.1.3.3 Operação do NAV Durante o CFP.

O mecanismo de detecção da portadora combina o estado do NAV e o estado de transmissão das estações com a detecção física da portadora para determinar se o meio está ocupado ou ocioso. O NAV pode ser visto como um contador decrescente que conta até zero com uma taxa uniforme. Quando o valor do contador é igual zero, a detecção de portadora virtual indica que o meio está ocioso. Quando o valor do NAV é diferente de zero o meio está ocupado. O meio deve ser determinado como ocupado quando a estação está transmitindo.

3.1.2.2 IFS – *Interframe Space*

O intervalo de tempo entre os quadros é chamado de IFS. Existem cinco tipos diferentes de IFSs para prover os níveis de prioridade de acesso para o meio sem fios. O IFSs são listados abaixo em ordem crescente:

- a) SIFS – *Short Interframe Space*: é o espaço entre os quadros mais curto e deve ser usado quando a estação está utilizando o meio e necessita mantê-lo durante a seqüência de troca de quadros que está sendo executada. A Utilização do SIFS entre quadros durante as transmissões da seqüência de troca de quadros previne que outras estações transmitam entre os quadros da mesma seqüência porque deferem um tempo maior antes de iniciar a transmissão. Assim a seqüência atual tem maior prioridade e pode ser completada.

- b) PIFS – PCF *Interframe Space*: utilizado pelas estações no modo PCF para ganhar prioridade de acesso ao meio no início do CFP ou para transmitir um quadro de Anúncio de Troca de Canal.
- c) DIFS – DCF *Interframe Space*: utilizado pelas estações no modo DCF para transmitir os quadros de dados (MPDUs – *MAC Protocol Data Unit*) e os quadros de gerenciamento (MMPDUs – *MAC Management Protocol Data Unit*).
- d) AIFS – *Arbitrary IFS*: usado pelas estações com QoS operando sob o EDCA, determina diferentes níveis de prioridade de acesso ao meio para cada tipo de fluxo existente na estação.
- e) EIFS – *Extended Interframe Space*: utilizado pelas estações após a detecção de um quadro com erros para prover tempo suficiente para as outras estações reconhecerem que foi recebido um quadro com erros antes do início da transmissão. Quando a estação receber um quadro livre de erros durante a re-sincronização EIFS é retomando o método de acesso ao meio normal (usando DIFS ou AIFS como for apropriado, e se necessário, o *backoff* aleatório).

Os diferentes IFSs devem ser independentes da taxa de *bits* da estação. Os temporizadores IFS são definidos como intervalos de tempo sobre o meio e com exceção do AIFS que são fixos para cada meio físico diferente. Os valores do IFS são determinados através de atributos específicos pela camada física. A Figura 3.2 mostra a relação entre os IFS.

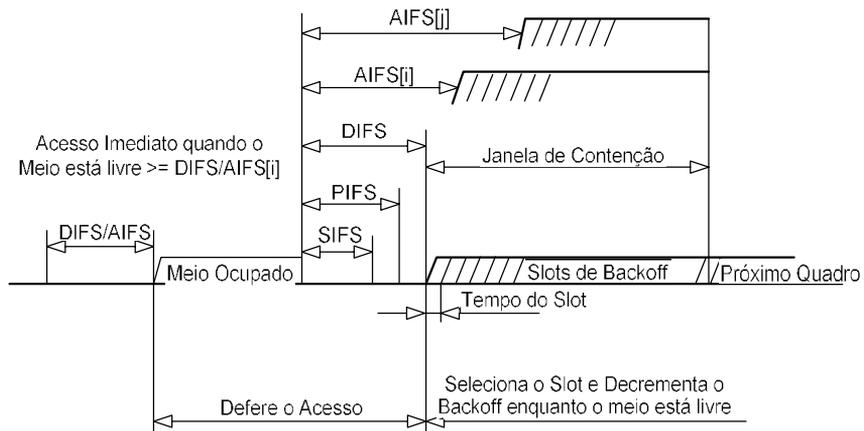


Figura 3.2 – Algumas relações de IFS.

3.1.2.3 Tempo aleatório de *backoff*

Quando uma estação deseja iniciar a transferência de MPDUs de dados e ou MMPDUs de gerenciamento deve invocar o mecanismo de detecção de portadora para determinar se o meio está ocioso ou ocupado. Se o meio estiver ocupado a estação deve deferir até o meio tornar-se ocioso sem interrupção por um período de tempo igual a um DIFS , quando o último quadro detectado sobre o meio tenha sido recebido corretamente, ou após o meio tornar-se livre sem interrupção por um período de tempo igual a um EIFS , quando o último quadro detectado sobre o meio não tenha sido recebido corretamente. Após o tempo de um DIFS ou EIFS de meio ocioso a estação deve então gerar um período aleatório de *backoff* para um tempo de deferência adicional antes da transmissão, a menos que o temporizador de *backoff* já contenha um valor diferente de zero, e neste caso a seleção de um número aleatório não é necessária e nem executada. Este processo minimiza as colisões durante a contenção entre múltiplas estações que tenham deferido o mesmo evento . A equação (3.1) mostra como o cálculo do tempo aleatório de *Backoff* é executado.

| | |
|--|-------|
| $\text{TempoBackoff} = \text{Random}(CW) \cdot a\text{SlotTime}$ | (3.1) |
|--|-------|

Onde:

Random(): Função pseudo-aleatória geradora de inteiros com distribuição normal sob o intervalo $[0, CW]$.

CW: valor inteiro dentro de uma faixa de valores das características físicas aCW_{\min} e aCW_{\max} , $aCW_{\min} \leq CW \leq aCW_{\max}$.

aSlotTime: valor atribuído conforme o meio físico utilizado.

O parâmetro janela de contenção deve tomar o valor inicial de aCW_{\min} . Cada estação deve manter um contador de tentativas curto (*Station Short Retry Count – SSRC*) e um contador de tentativas longo (*Station Long Retry Count – SLRC*) e ambos devem tomar um valor inicial diferente de zero. O *CW* deve tomar o próximo valor na série toda vez que uma tentativa de transmissão, de um MPDU, não obter sucesso e causar o incremento de

um dos contadores de retransmissões. CW deve ser encrementado até alcançar o valor de aCW_{max} . Uma tentativa é definida como uma sequência completa de quadros enviados, separados por intervalos SIFS, em uma tentativa para entregar uma MPDU. Quando CW alcançar o valor de aCW_{max} deve permanecer com este valor até ser resetado. Isto melhora a estabilidade do protocolo de acesso sob condições de grande carga.

O valor de CW deve ser resetado e assumir o valor de aCW_{min} após obter sucesso na tentativa de transmissão de um MSDU ou MMPDU. Quando SLRC alcançar $aLongRentryLimit$, só deve ser resetado para 0 se um quadro ACK for recebido em resposta à transmissão de um MPDU ou MMPDU maior que $dot11RTSThreshold$, ou na transmissão de um quadro *broadcast*. Quando SSRC alcançar $dot11ShortRetryLimit$ só deve ser resetado para 0 se um quadro CTS for recebido em resposta a um quadro RTS, se um quadro ACK for recebido em resposta à transmissão de um MPDU ou de um MMPDU, ou na transmissão de um quadro *broadcast*. O valor de CW cresce em potência de 2 menos 1 (ver Figura 3.3).

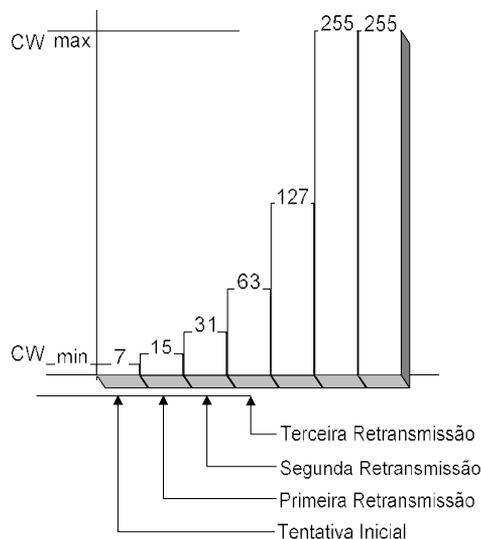


Figura 3.3 – Exemplo do crescimento exponencial de CW.

3.1.2.4 Procedimento de acesso durante o DCF

Uma estação pode transmitir um MPDU pendente, quando está operando sob o método de acesso DCF, quando determinar que o meio permanece livre por um período de tempo igual ou maior que um período DIFS ou um período EIFS, se imediatamente após o

processamento de um evento do meio ocupado foi causado pela detecção de um quadro com erros, o algoritmo aleatório de *backoff* deve ser utilizado. O mecanismo básico de acesso é mostrado na Figura 3.4.

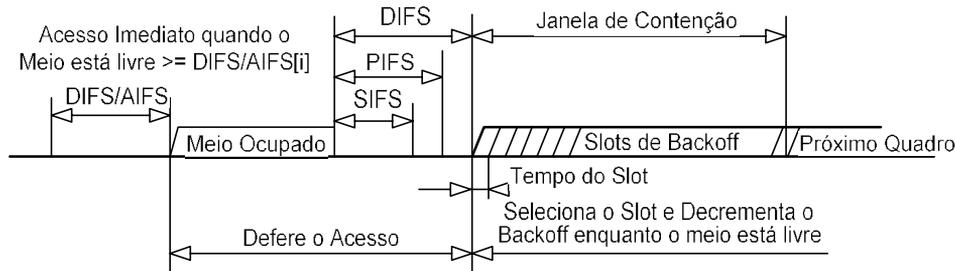


Figura 3.4 – Método básico de acesso.

3.1.2.5 Procedimento de *backoff*

O procedimento de *backoff* durante o DCF é invocado pelas estações antes de iniciar a transmissão de um quadro quando o meio é indicado ocupado pelos mecanismos físico e virtual de detecção de portadora. O procedimento de *backoff* também deve ser invocado quando a estação transmissora deduz uma falha na transmissão.

Para iniciar o procedimento de *backoff* a estação deve ajustar o seu temporizador de *backoff* para um valor aleatório de *backoff* usando a equação (3.1). O temporizador de *backoff* só deve ser decrementado após um período DIFS ou após um período EIFS, conforme o caso, depois que o meio tornou-se ocioso.

A estação que está executando o procedimento de *backoff* deve usar o mecanismo de detecção de portadora para determinar se existe atividade durante cada *slot* de *backoff*. Se nenhuma atividade no meio for indicada para o tempo de duração do *slot* de *Backoff* particular, então o procedimento de *backoff* deve decrementar o seu temporizador de *backoff* em um `aSlotTime`.

Se o meio for determinado ocupado em qualquer momento durante o *slot* de *backoff*, então o procedimento de *backoff* é suspenso; isto é, o temporizador de *backoff* não deve ser decrementado para aquele *slot*. O meio deve ser determinado ocioso por um período DIFS ou EIFS antes da retomada do procedimento de *backoff*. As transmissões devem iniciar

quando o temporizador de *backoff* alcançar o valor zero. A Figura 3.5 demonstra o funcionamento do mecanismo de *backoff*.

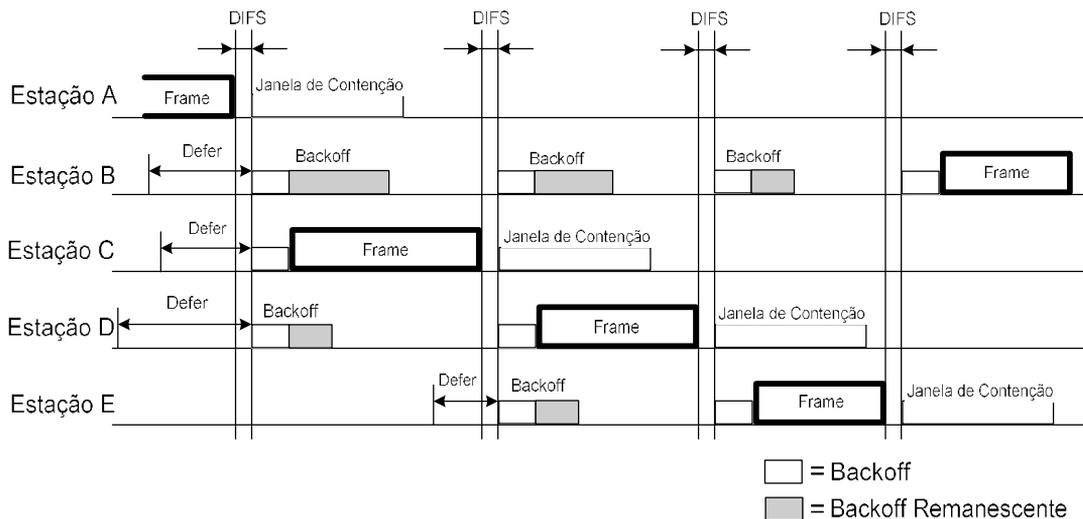


Figura 3.5 – Procedimento de *backoff*

Em uma IBSS o temporizador de *backoff* para uma transmissão pendente, desde que não seja um quadro *Beacon* ou *ATIM* (*Announcement Traffic Indication Message*), não deve ser decrementada durante o período *TBTT* (*Target Beacon Transmission Time*) até a expiração da Janela *ATIM* e o temporizador de *backoff* pendente para um quadro de gerenciamento *ATIM* deve ser decrementado somente dentro da Janela *ATIM*. Em uma IBSS um intervalo de *backoff* separado deve ser gerado para executar as transmissões dos quadros *Beacon*.

3.1.2.6 Procedimentos de recuperação e limites de retransmissão

A estação que iniciou a seqüência de troca de quadros é reponsável pela recuperação dos erros independente do tipo de erro ocorrido. A recuperação de erros é realizada através da retentativa de transmissão da seqüência de troca de quadros que a estação transmissora deduziu ter falhado. As retentativas devem continuar, para cada seqüência de troca de quadros, até a transmissão obter sucesso ou até o limite relevante de retentativas ser alcançado, seja qual for que ocorra primeiro. As estações devem manter, além dos contadores da estação, um contador de retentativas curto e um longo para cada MSDU ou

MMPDU que esteja na fila de transmissão. Esses contadores são incrementados e resetados de forma independente um do outro.

Após a transmissão de um quadro RTS, a STA deve executar o procedimento CTS. Se a transmissão falhar, o contador de tentativas curto para o MSDU ou MMPDU e o contador de tentativas curto da estação devem ser incrementados. Este procedimento deve continuar até o número de tentativas de transmissão do MSDU ou MMPDU alcançar `dot11ShortRetryLimit`.

Depois que um quadro que necessite reconhecimento for transmitido a STA deve executar o procedimento ACK. O contador de tentativas curto para o MSDU ou MMPDU e o contador de tentativas curto da estação devem ser incrementados a cada vez que a transmissão de um quadro MAC de tamanho menor ou igual a `dot11RTSThreshold` falhar para aquele MSDU ou MMPDU. Este contador de tentativas curto e o contador de tentativas curto da estação devem ser resetados quando um quadro MAC de comprimento menor ou igual a `dot11RTSThreshold` obtenha sucesso para aquele MSDU ou MMPDU. O contador de tentativas longo para MSDU ou MMPDU e o contador de tentativas longo para a estação devem ser incrementados a cada transmissão de um quadro MAC de tamanho maior que `dot11RTSThreshold` falhar para o MSDU ou MMPDU. Estes contadores de tentativas longos para o MSDU ou MMPDU e para a estação devem ser resetados quando um quadro MAC de comprimento maior que `dot11RTSThreshold` tenha sucesso para aquele MSDU ou MMPDU. Todas as tentativas de retransmissão para o MSDU ou MMPDU que o procedimento ACK tenha falhado um ou mais vezes devem ser feito com o campo *Retry* ajustado para 1 nos quadros dos tipos Dados ou Gerenciamento.

As novas tentativas das transmissões que falharam devem continuar até que o contador de tentativas curto para o MSDU ou MMPDU seja igual a `dot11ShortRetryLimit` ou até que o contador de tentativas longo para o MSDU ou MMPDU seja igual à `aLongRentgryLimit`. Quando ambos esses limites são alcançados, as tentativas de retransmissão devem cessar e o MSDU ou MMPDU deve ser descartado.

Uma estação no modo *Power-Save* em uma ESS que inicie uma seqüência de troca de quadros transmitindo um quadro *PS-Poll* para requisitar dados do AP deve fazer uma nova tentativa para a seqüência sempre que nenhum quadro de resposta do AP for recebido. Se o AP enviar um quadro de dados em resposta ao quadro *PS-Poll*, mas falhar o recebimento do quadro ACK reconhecendo este quadro de dados, o próximo quadro de *PS-Poll* da mesma estação pode causar a retransmissão do último MSDU. Este MSDU duplicado deve ser filtrado na estação receptora usando o mecanismo normal de filtragem para quadros duplicados. Se o AP responde o *PS-Poll* através de um quadro ACK, então a responsabilidade para a recuperação de erros da entrega de quadros de dados muda para o AP porque o dado é transferido em uma troca de quadros subsequente, a qual é iniciada pelo AP. O AP deve tentar entregar um MSDU para a estação que transmitiu o *PS-Poll* usando qualquer seqüência de troca de quadros válida para um MSDU direcionado. Se o modo de economia de energia da estação transmissora do *PS-Poll* retornar para o estado ocioso após a transmissão do quadro ACK em resposta a recepção correta deste MSDU, mas o AP falhou na recepção deste quadro ACK, o AP irá tentar uma nova transmissão deste MSDU até o limite de tentativas relevante ser alcançado .

3.1.2.7 Ajuste e reajuste do NAV

As estações que receberam um quadro válido devem atualizar o seu NAV com a informação recebida no campo *Duration/ID*, mas somente quando o novo valor do NAV é maior que o valor atual e somente quando o quadro não é endereçado para a estação receptora.

A Figura 3.6 mostra o funcionamento do NAV para a estação que iniciou a seqüência de troca de dados na linha origem, para a estação de destino na linha destino e na parte superior da linha outras para as outras estações que receberam o quadro RTS e na parte inferior da linha outras para as estações que receberam somente o quadro CTS.

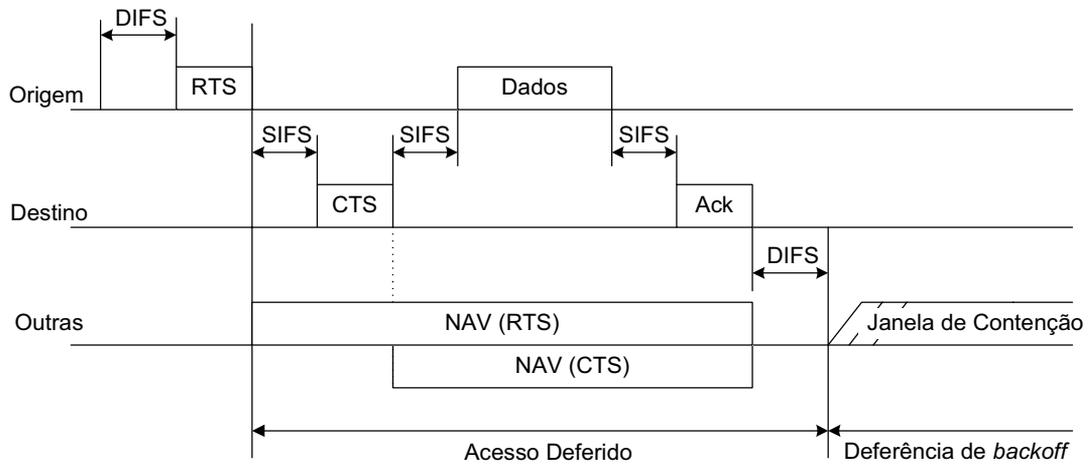


Figura 3.6 – Ajustes do RTS/CTS/Dados/ACK e NAV.

3.1.3 Função de coordenação em um ponto (PCF)

O PCF é opcional e utilizado somente em redes infra-estruturadas e prove o acesso ao meio livre de contenção (CFP – *Contention Free Period*). Este método de acesso usa um ponto coordenador (*Point Coordinator – PC*), que deve operar no AP da BSS, para determinar qual estação tem permissão para transmitir. A operação é realizada essencialmente através do *polling*, com o PC executando as regras de *polling master*. A operação do PCF pode requerer coordenação adicional, que não especificadas pelo padrão IEEE 802.11, para permitir a operação eficiente nos casos onde existam mais que um ponto de coordenação de BSS operando sobre o mesmo canal com sobreposição física.

O PCF usa o mecanismo virtual de detecção de portadora auxiliado por um mecanismo de prioridade de acesso. O PCF deve distribuir as informações nos quadros de gerenciamento *Beacons* para ganhar e manter controle do meio através do ajuste do NAV das estações. Além disso, todos os quadros transmitidos durante o PCF devem usar o menor IFS. Desta forma o tráfego do ponto coordenador tem maior prioridade para acessar o meio que as estações de outras BSS sobrepostas operando no método de acesso DCF.

3.1.3.1 Tempos e estrutura do CFP

O PCF controla os quadros transferidos durante um CFP. O CFP deve alternar-se com o CP controlado pelo DCF, a Figura 3.7 mostra esta situação. Cada CFP deve iniciar com um

quadro *beacon* que contém um elemento DTIM (*Delivery Traffic Indication Message*). Os CFPs devem ter uma taxa constante de repetição, a qual deve ser sincronizada com o intervalo *beacon* como especificado nos parágrafos seguintes.

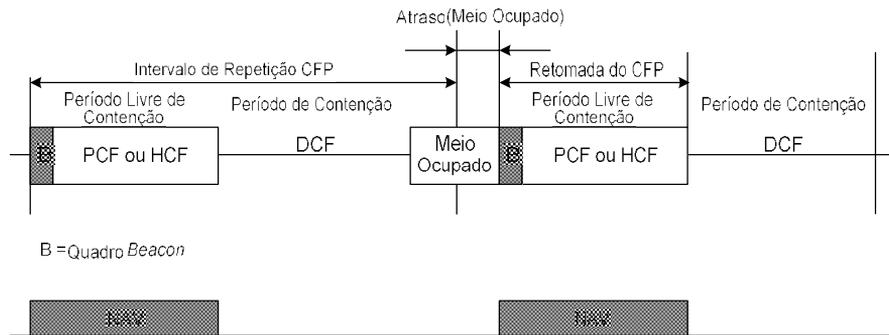


Figura 3.7 – Alternação entre CFP e CP.

O PC gera o CFP baseado na taxa de repetição do período livre de contenção conforme o atributo *CFPRate*, que é definido pelo número de intervalos DTIM. Este valor, em unidades de intervalos DTIM, deve ser anunciado para as outras estações na BSS através dos quadros *beacon* transmitidos pelo AP que contém o PC ativo.

3.1.3.2 Procedimento de acesso PCF

O PC deve verificar se o meio permanece ocioso durante um intervalo PIFS e então pode iniciar o CFP com a transmissão do quadro *beacon* contendo os elementos do Conjunto de Parâmetros CF e DTIM. Todas as estações na BSS ajustam os seus NAV para o valor de *CFPMaxDuration* contido neste *beacon*. Isto evita a contenção por prevenir que as estações transmitam quadros sem receberem o *poll* do PC.

Após o quadro *beacon* inicial o PC deve esperar por pelo menos um intervalo SIFS e então transmitir um dos seguintes quadros: Dados, CF-Poll (*Contention Free Poll*), Dados+CF-Poll ou CF-End (*Contention Free End*). Se o CFP for nulo, por exemplo, quando não existe nenhum tráfego armazenado e nenhuma estação para receber o *polling* do PC então deve ser transmitido o quadro CF-End imediatamente após o *beacon* inicial.

As estações que estão recebendo os quadros dirigidos livres de erros do PC devem esperar um intervalo SIFS antes de enviar o quadro de resposta, se houver algum quadro de resposta para ser enviado.

3.1.3.3 Operação do NAV durante o CFP

Todas as estações, exceto o AP, devem pré-ajustarem os seus NAVs para o valor `CFPMaxDuration` (obtido do quadro *beacons*) a cada TBTT (*Target Beacon Transmission Time*) no qual o CFP está agendado para iniciar. Todas as estações devem manter atualizados os seus NAVs usando o valor de `CFPDurRemaining` obtido de qualquer quadro *Beacon* recebido que não contenha erros

Essas ações evitam que as estações obtenham o controle do meio durante o CFP, o que é especialmente importante nos casos onde o CFP ocupa o meio em vários intervalos. O ajuste do NAV também deve reduzir o risco de estações escondidas acessarem ao meio porque devem deferir por um DIFS antes do início da transmissão.

O PC deve transmitir um quadro CF-End no final de cada CFP e as estações devem resetar os seus NAVs ao receberem este quadro.

3.1.3.4 Procedimento de Transferência PCF

O PC deve usar um intervalo SIFS entre a transmissão de todos os quadros após o *beacon* que inicia o CPF até o quadro CF-End. Quando o PC aguarda a transmissão de uma estação e não recebe nenhum quadro durante um intervalo SIFS o PC deve aguardar um intervalo PIFS e enviar as próximas transmissões pendentes. Isto permite o PC manter o controle do meio na presença de BSSs sobrepostas.

O PC deve transmitir um quadro *polling* para permitir que uma estação acesse ao meio e envie os seus quadros pendentes. Quando uma estação recebe o *polling* deve deferir por um intervalo PIFS e transmitir uma resposta ao PC, esta resposta pode conter um quadro de dados ou um quadro nulo caso a estação não possua dados para enviar.

O CFP deve terminar quando o tempo *CFPDurRemaining* tenha decorrido desde o quadro *Beacon* que originou o CFP ou quando o PC não tenha mais quadros para transmitir ou nenhuma estação para efetuar o *polling*. Em ambos os casos o final do CFP deve ser sinalizado pela transmissão de um quadro *CF-End* pelo PC.

3.1.4 Função de Coordenação Híbrida (HCF)

A facilidade de QoS inclui uma função de coordenação adicional chamada HCF utilizada somente nas redes com QoS (QBSS). O HCF deve ser implementado em todas as estações com QoS. O HCF combina as funções do DCF e do PCF com a adição do mecanismo específico de QoS, o que permite a utilização do conjunto de troca de quadros em seqüência para a transferência dos dados com QoS durante os períodos CP e CFP. Para o acesso ao meio com contenção é utilizado o mecanismo chamado EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*) e para o acesso ao canal baseado em contenção é utilizado o mecanismo chamado HCCA (*HCF Controlled Channel Access*).

As estações com QoS podem obter oportunidades de transmissão (TXOPs) usando um ou ambos os mecanismos de acesso ao meio. Se o TXOP for obtido através do acesso ao canal baseado em contenção é chamado de EDCA TXOP. Se o TXOP for obtido através do acesso ao canal controlado é chamado de HCCA TXOP.

3.1.4.1 Acesso ao canal baseado em contenção (EDCA)

O mecanismo EDCA é um mecanismo distribuído que provê acesso diferenciado ao WM, para as estações com QoS, através de oito níveis diferentes de prioridade diferentes. O mecanismo EDCA define quatro categorias de acesso (AC – *Access Category*) que provêm o suporte necessário para a entrega do tráfego com UP (*User Priority*) para as estações. As categorias de acesso são derivadas da UP conforme a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Prioridade de usuário para mapeamento da categoria de acesso

| Prioridade | Prioridade do Usuário (Mesma UP da Prioridade de Usuário 802.1D) | Designação 802.1D | Categoria de Acesso (AC) | Designação (Informação) |
|---|---|------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| Menor  Maior | 1 | BK | AC_BK | Segundo Plano |
| | 2 | - | AC_BK | Segundo Plano |
| | 0 | BE | AC_BE | Melhor Esforço |
| | 3 | EE | AC_BE | Melhor Esforço |
| | 4 | CL | AC_VI | Vídeo |
| | 5 | VI | AC_VI | Vídeo |
| | 6 | VO | AC_VO | Voz |
| | 7 | NC | AC_VO | Voz |

Para cada AC existe uma variante do DCF chamada de EDCAF (*Enhanced Distributed Channel Access Function*) onde:

- a) Os parâmetros usados pelo EDCAF para controlar as suas operações são definidos no QAP pela tabela de atributos da MIB `dot11QAPEDCATable` e nas estações pela tabela de atributos da MIB `dot11EDCATable`.
- b) O tempo mínimo de duração dos intervalos entre os quadros não é mais o valor constante (DIFS) utilizado no DCF, mas é um valor distinto (contido na tabela de atributo da MIB `dot11QAPEDCATableAIFSN` para o QAP, e na tabela da MIB `dot11EDCATableAIFSN` para as estações), ou são atribuídos por uma entidade de gerenciamento ou pelo próprio QAP.
- c) Os limites da janela de contenção `aCWmin` e `ACWmax`, do qual o *backoff* é calculado, não são fixados pela camada física como ocorre no DCF, mas são variáveis contidas nas tabelas de atributos da MIB `dot11QAPEDCACWmin` e `dot11QAPEDCACWmax` para o QAP e nas tabelas de atributos da MIB `dot11EDCATableCWmin` e `dot11EDCATableCWmax` para as estações, ou são atribuídos pela entidade de gerenciamento ou pelo próprio QAP.

- d) As colisões entre EDCAFs dentro da estação são resolvidas internamente, de forma que os quadros de dados com o AC de maior prioridade devem receber o TXOP e os quadros com AC de menor prioridade devem ser tratados da mesma forma que os quadros que sofrem uma colisão externa no meio WM. Entretanto este comportamento de colisão não deve ajustar os *bits* de tentativas no cabeçalho MAC dos MPDUs dos quadros com o AC de menor prioridade, como ocorreria após a tentativa de transmissão sem sucesso devido às colisões externa no WM.

- e) Durante um TXOP EDCA obtido através do EDCAF a estação pode iniciar a seqüência de troca de quadros para transmitir os MMPDUs ou os MSDUs que pertençam ao mesmo AC. A duração deste TXOP EDCA é limitada em um AC através da variável da MIB `dot11QAPEDCATXOP` para o QAP e na tabela da MIB `dot11EDCATableTXOPLimit` para as estações. Um valor igual a 0 para este tempo de duração significa que o TXOP EDCA só pode ser utilizado para a transmissão de um único MSDU ou MMPDU utilizando qualquer taxa no conjunto operacional da QBSS.

O QAP anuncia os parâmetros EDCA através dos quadros *beacons*, *probe response* e *association response*. Isto é feito através da inclusão do elemento de informação Conjunto de Parâmetros EDCA. Se as estações não receberem este elemento devem usar os valores padrões. O QAP pode usar o conjunto de parâmetros EDCA diferentes do que ele anuncia para as QSTAs na sua QBSS.

Os quadros de gerenciamento devem ser enviados usando a categoria de acesso AC_VO sem as restrições do controle de admissão. Uma estação também deve enviar quadros de gerenciamento usando a categoria de acesso AC_VO antes de associar -se com qualquer BSS, mesmo que não exista disponibilidade das facilidades de QoS na BSS. Os quadros de Controle devem ser enviados usando o mesmo parâmetro de QoS correspondente aos quadros de Dados com QoS. Os quadros de Controle *PS-Poll* devem ser enviados usando a categoria de acesso AC_BE para reduzir a probabilidade de colisão após os quadros *beacons*. Os quadros RTS devem ter a mesma UP do quadro de dados ou gerenciamento que está incluso na seqüência de troca de quadros em que o RTS é o primeiro quadro.

O protocolo de acesso ao canal é derivado do procedimento DCF descrito em 3.1.2 DCF. A Figura 3.8 mostra um modelo de referência para a implementação do mapeamento do tipo do quadro ou UP para o AC. Nesta figura existem quatro filas de transmissão e quatro funções EDCAFs, sendo uma para cada fila. O mapeamento do UP para o AC foi descrito acima na Tabela 3.1.

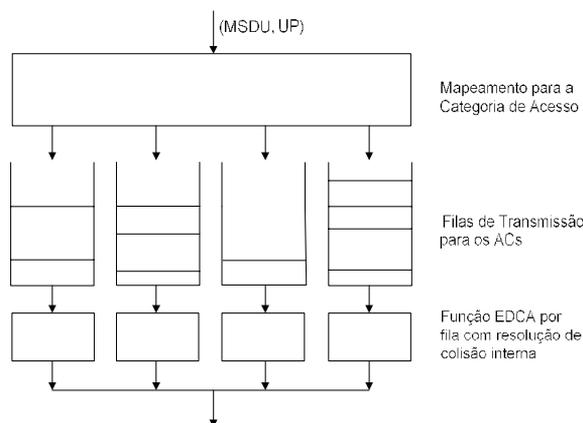


Figura 3.8 – Modelo de referência para implementação.

Os TXOP EDCA possuem dois modos definidos:

- a) Início do TXOP EDCA: ocorre quando as regras do EDCA permitem o acesso ao meio.
- b) Transmissão dos quadros dentro do TXOP EDCA: ocorre quando um EDCAF retém o direito de acesso ao meio após a conclusão de uma seqüência de troca de quadros.

O valor do limite do TXOP é anunciado pelo QAP no elemento de informação Conjunto de Parâmetros EDCA nos quadros *beacons* e *probe response* transmitidos pelo QAP. O valor do limite de tempo do TXOP igual a 0 indica que somente um único MSDU ou MMPDU, além de um possível RTS/CTS ou CTS -para-si-mesmo, pode ser transmitido com qualquer taxa de dados para o TXOP.

As estações devem assegurar que a duração dos TXOPs, obtidos durante as regras do EDCA, não excedam o limite de tempo do TXOP. A duração de um TXOP é o tempo

durante o qual o proprietário do TXOP mantém o controle ininterrupto do meio, e inclui o tempo necessário para transmitir os quadros de resposta aos quadros transmitidos pelo proprietário do TXOP.

Cada temporizador de acesso ao canal mantém uma função de *backoff* (temporizador) medido em *slots* de *backoff*. O tempo de duração do intervalo $AIFS[AC]$ é derivada do valor $AIFSN[AC]$ dado pela equação (3.2).

| | |
|---|-------|
| $AIFS[AC] = (AIFSN[AC] \times aSlotTime) + aSIFSTime$ | (3.2) |
|---|-------|

O valor de $AIFSN[AC]$ deve ser maior ou igual a 2 para as estações e maior ou igual a 1 para os QAPs. Um TXOP EDCA é garantido para um EDCAF quando o EDCAF determina que ele possa iniciar a transmissão de uma seqüência de troca de quadros. O início da transmissão deve ser determinado seguindo as regras abaixo.

Nos limites de *slots* específicos cada EDCAF deve fazer uma determinação para executar uma e somente uma das seguintes funções:

- a) Iniciar a transmissão de uma seqüência de troca de quadros para essa função de acesso;
- b) Decrementar o temporizador de *backoff* para essa função de acesso;
- c) Invocar o procedimento de *backoff* para uma colisão interna;
- d) Não faça nada para essa função de acesso;

Para cada EDCAF são definidos os limites dos *slots* específicos onde cada uma destas operações deve ser executada:

- a) Após $AIFSN[AC] \times aSlotTime - aRxTxTurnaroundTime$ de tempo que o meio permaneça ocioso após um intervalo SIFS (o meio não precisa estar

necessariamente ocioso durante o intervalo SIFS) após o última vez que o meio estava ocupado e que foi recebido um quadros com o FCS correto.

- b) Após $EIFS - DIFS + AIFSN[AC] \times aSlotTime + aSIFSTime - aRxTxTurnaround$ de tempo que o meio do meio permaneça ocioso após a recepção de um quadro com erro no FCS, ou `PHY-RXEND.indication(RXERROR)`, onde o valor de `RXERROR` indica a ocorrência de Erros;
- c) Quando qualquer outro EDCAF nesta QSTA transmitiu um quadro requerendo reconhecimento:
1. Antes do final do intervalo `Ack-Timeout` de `PHY_TXEND.confirm` mais $AIFSN[AC] \times aSlotTime + aSIFSTime - aRxTxTurnaroundTime$ de tempo que o meio permaneça ocioso e
 2. Antes do final do primeiro $AIFSN[AC] \times aSlotTime - aRxTxTurnaroundTime$ de tempo que o meio permaneça ocioso após um intervalo SIFS (não é necessário que o meio permaneça ociosos durante o tempo do intervalo SIFS, o início da duração do SIFS contido pelo tamanho do cabeçalho do PLCP do quadro anterior) quando ocorre uma primitiva `PHY-RXEND.indication` especificada na subcláusula 9.2.8.
- d) Após $AIFSN[AC] \times aSlotTime - aRxTxTurnaroundTime$ e tempo que o meio permaneça ocioso após um intervalo SIFS (o meio não precisa estar necessariamente ocioso durante o tempo do intervalo do SIFS) após a última vez que o meio esteve ocupado e que foi recebido um quadro para um EDCAF que não requeria reconhecimento;
- e) Após $AIFSN[AC] \times aSlotTime + aSIFSTime - aRxTxTurnaroundTime$ de tempo que o meu permaneça ocioso após a indicação do mecanismo CD (*carrier sense*) que não é coberto de a) até d);

- f) Após `aSlotTime` de tempo ocioso do meio, quando ocorre imediatamente após qualquer uma das condições de a) até f) é conhecido pelo EDCAF.

Cada um dos itens descritos acima especifica os limites do *slot*, cada EDCAF deve iniciar uma seqüência de transmissão, se:

- a) Há um quadro disponível para transmissão no EDCAF e
- b) O temporizador de *backoff* do EDCAF está com o valor zero e
- c) Nenhum EDCAF de UP mais alta possui um quadro para transmitir.

Cada um dos itens descritos acima especifica os limites do *slot*, cada EDCAF deve decrementar o temporizador de *backoff* se o valor do mesmo for diferente de zero.

Cada um dos itens descritos acima especifica os limites do *slot*, cada EDCAF deve invocar o procedimento de *backoff* devido a uma colisão interna, se:

- a) Há um quadro disponível para transmitir neste EDCAF, e
- b) O temporizador de *backoff* para este EDCAF está zerado, e
- c) Um EDCAF de UP mais alta possui um quadro para transmitir.

Cada um dos itens descritos acima especifica os limites do *slot*, um EDCAF não fará nada se nenhuma das ações anteriores for tomada.

A Figura 3.9 mostra um exemplo da relação entre AIFS, AIFSN, DIFS e os *slots* de tempo imediatamente após o meio tornar-se ocioso, assumindo que o quadro que estava ocupando o meio foi recebido sem erros. Neste caso, com $AIFS = 2$, o EDCAF pode decrementar o contador de *backoff* pela primeira vez em $2 \times aSlotTime$ após o meio tornar-se livre (o meio torna-se livre no final de M1 na figura). Se, neste exemplo, o

Se o campo *Duration*/ID for ajustado para a transmissão de vários quadros e ocorrer uma falha na transmissão a função de acesso ao canal correspondente pode recuperar antes da expiração do NAV ajustado devido ao ajuste do campo *Duration*/ID no quadro em que ocorreu a falha de transmissão. Contudo, se os NAVs ajustados pelo quadro em que ocorreu a falha de transmissão expirar e se a função de acesso ao canal não se recuperou então o EDCAF deve invocar o procedimento de *backoff*.

Nenhum outro AC da estação deve transmitir antes da expiração do NAV ajustado pelo quadro em que ocorreu a falha de transmissão e devem tratar o meio como ocupado até a expiração do NAV.

Cada EDCAF mantém uma variável de estado chamada $CW[AC]$, a qual deve ser iniciada com o valor do parâmetro $CW_{min}[AC]$. Se um EDCAF específico transmite um quadro com sucesso a variável $CW[AC]$ deve ser resetado para $CW_{min}[AC]$.

O procedimento de *backoff* deve ser invocado para um EDCAF quando:

- a) Quando o AC requisita a transmissão de um quadro e o meio encontra-se ocupado e o temporizador de *backoff* tem o valor igual a zero para o AC.
- b) O proprietário do TXOP efetuou uma transmissão com sucesso durante o TXOP para o AC.
- c) Ocorre uma falha na transmissão de um quadro do AC.
- d) Dois EDCFs na estação estão tentando obter um TXOP ao mesmo tempo, o que caracteriza uma colisão interna, então o AC de menor prioridade deve invocar o procedimento de *backoff*.

Se o procedimento de *backoff* for invocado pelo item (a) o valor do $CW[AC]$ deve ser mantido inalterado. Se o procedimento de *backoff* for invocado pelo item (b) o valor de $CW[AC]$ deve ser resetado para $CW_{min}[AC]$.

Se o procedimento de *backoff* for invocado por uma falha conforme os itens (c) ou (d) o valor de $CW[AC]$ deve ser atualizado antes da invocação do procedimento de *backoff* conforme abaixo:

a) Se o $QSRC[AC]$ ou o $QLRC[AC]$ para a QSTA alcançar $dot11ShortRentryLimit$ ou $dot11LongRentryLimit$ respectivamente, $CW[AC]$ deve ser resetado para $CWmin[AC]$.

b) Caso contrário:

1. Se $CW[AC]$ for menor que $CWmax[AC]$, $CW[AC]$ deve ser ajustado para o valor $(CW[AC] + 1) * 2 - 1$;
2. Se $CW[AC]$ for igual a $CWmax[AC]$, $CW[AC]$ deve permanecer inalterado para o resto das outras tentativas.

O temporizador de *backoff* é ajustado com valor inteiro escolhido aleatoriamente usando -se uma distribuição normal entre os valores de $[0, CW[AC]]$. Todos os *slots* de *backoff* ocorrem após um intervalo $AIFS[AC]$ ou após um intervalo $EIFS - DIFS + AIFS[AC]$, dependendo do último quadro recebido, durante o qual o meio permaneça ocioso.

3.1.4.2 Acesso ao Canal Controlado (HCF)

O mecanismo HCF de acesso ao canal controlado usa um coordenador centralizado de QoS chamado de coordenador híbrido, que opera com regras diferentes do ponto coordenador (PC) do PCF. O HC é deve estar no QAP da QBSS e usa a prioridade mais alta para acessar o WM e iniciar a seqüência de troca de quadros ou para alocar os TXOPs para si mesmo ou para as estações, provendo assim uma duração limitada de fase do controle de acesso (*CAP – controlled access phase*) para a transferência de dados com QoS livre de contenção.

A entrega de tráfego do HC e alocação dos TXOPs podem ser programadas durante o CP ou durante o CFP (gerado opcionalmente pelo HC) para atender as necessidades de QoS. A alocação dos TXOPs e a transferência de tráfego com QoS livre de contenção pode estar baseado no conhecimento da QBSS pelo HC da quantia de tráfego pendente e deve estar subordinado as políticas de QoS específicas da QBSS.

O HCF protege a transmissão durante cada CAP usando o mecanismo de detecção de portadora virtual. Uma estação pode iniciar uma seqüência de troca de quadros quando receber um *polling* TXOP que tenha o tempo de ocupação do meio maior que o tempo total da seqüência.

Durante o HCF a unidade básica de alocação que permite transmitir sobre o WM é o TXOP. Cada TXOP é definido pelo momento de início e por um tamanho máximo. O TXOP pode ser obtido pela QSTA vencendo uma instância de contenção do EDCA (veja 9.9.1) durante o CP, ou por uma QSTA quando recebe um quadro QoS (+) CF-Poll (veja 9.9.2) durante o CP ou CFP. O primeiro é chamado TXOP EDCA, enquanto o segundo é chamado TXOP HCCA ou TXOP *polled*. Um TXOP HCCA não deve estender-se através de um TBTT. Um TXOP não deve exceder `dot11MaxDwellTime` (quando é usando um meio PHY FH). A ocorrência de um TBTT implica no final do TXOP HCCA, após o qual o procedimento de acesso ao canal regular (EDCA ou HCCA) é retomado. É possível que nenhum quadro seja transmitido durante o TXOP. A terminação escorçada do TXOP HCCA não vai implicar em uma condição de erro.

3.1.4.3 PCF, DCF e HCF coexistindo.

O DCF e uma das funções de coordenação centralizada (PCF ou HCF) podem coexistir de forma que ambos possam operar concorrentemente dentro da mesma BSS. Quando o PC está operando na BSS, os métodos de acesso PCF e DCF alternam-se entre si, com o período CFP (*Contention-Free Period*) seguido pelo período CP (*Contention Period*). Quando o HC está operando na QBSS, ele pode gerar uma alternativa ao CFP e ao CP do mesmo modo que o PC através do método de acesso DCF somente durante o período CP. O método de acesso HCF opera sequencialmente quando o canal está no CP. A operação seqüencial permite os métodos de *polling* e baseado em contenção alternarem-se entre si, com pequenos intervalos de tempo para transmitir uma seqüência de troca de quadros.

4 PROPOSTA DE ACESSO AO MEIO

A proposta de acesso ao meio apresentada por esta dissertação é chamada de Função de Coordenação Distribuída *Ad Hoc* e referenciada no texto como DCFAH (*Distributed Coordination Function Ad Hoc*) [2]. Todos os mecanismos e funcionamento da DCFAH estão em 4.2 Função de Coordenação Distribuída. As propostas de implementação de QoS em Redes IEEE 802.11 existentes são apresentadas e discutidas em 4.1 Trabalhos relacionados.

4.1 TRABALHOS RELACIONADOS E MOTIVAÇÃO

Entre as proposta de implementação de QoS para as redes IEEE 802.11 testamos a proposta de Aad [5] que apresenta diferentes níveis de *backoff*, tamanho da janela de contenção, DIFS e tamanho máximo de quadro para cada nível de prioridade. Já Vaidya *et al* [6] apresentam um mecanismo para a diferenciação do nível de prioridade conforme o tamanho do pacote e um peso atribuído a tipo de dado que o pacote pertence.

Campbell *et al* [7] apresentam um mecanismo distribuído chamado de VMAC (*Virtual MAC*) que gera dados com as estatísticas de QoS ao nível da subcamada MAC. Outro algoritmo chamado VS (*Virtual Source*) utiliza os dados apurados pelo VMAC para estimar os parâmetros de QoS do ponto de vista da aplicação. Através dos parâmetros de QoS medidos pelo algoritmo VS é possível ajustar o tamanho da janela de contenção conforme o nível de prioridade dos dados.

O sistema *BlackBurst* [8] determina dois níveis de prioridade para as estações da rede para a transmissão de fluxos em tempo real. As estações que possuem prioridade alta acessam ao meio através do método DCF [1] e as estações que transmitem fluxos em tempo real possuem prioridade alta e acessam ao meio após um intervalo PIFS [1] não utilizando qualquer mecanismo de contenção e transmite uma rajada de dados com tamanho proporcional ao tempo aguardado pela estação para acessar ao meio. Após a transmissão de um quadro a estação escalona as próximas transmissões. O *BlackBurst* tenta sincronizar as transmissões em tempo real e atende as necessidades de transmissão. As transmissões das

estações de baixa prioridade prejudicam o funcionamento dos fluxos em tempo real já que os intervalos constantes criados pelo sincronismo não são atendidos causando uma degradação considerável do desempenho.

Deng e Chang [9] propõem um mecanismo que diferencia a prioridade de acesso das estações da rede através da combinação de dois IFS diferentes, PIFS e DIFS [1], garantindo maior prioridade para as estações que utilizam o PIFS. Os algoritmos de *backoff* garantem que as estações de prioridade mais alta produzam *backoffs* menores que o das estações de prioridade baixa.

Xiao descreve em [10] o funcionamento do IEEE 802.11e e dos seus mecanismos de acesso ao meio. Em [11, 12 e 13] é mostrado que o padrão IEEE 802.11e apresenta vantagens para diferenciação de fluxos de naturezas distintas. Zhu *et al* demonstram em [14]:

- a) A necessidade da adaptação do enlace na camada física;
- b) De uma função de coordenação de acesso ao canal;
- c) E de uma estratégia de controle de admissão na subcamada MAC e nas camadas superiores.

A proposta de implementação de QoS apresentada pelo grupo de trabalho do IEEE 802.11 através da emenda IEEE 802.11e [4] e todos os trabalhos que apresentam novos mecanismos de acesso ao meio para redes IEEE 802.11 realizam a gradação de QoS conforme a natureza da informação transmitida pela estação da rede. Nenhum desses trabalhos garante o acesso ao meio para as estações da rede mantendo a justiça entre as estações quando as estações transmitem dados com natureza distinta.

Um mecanismo justo de transmissão deve garantir um tempo mínimo de acesso ao meio para cada estação de forma independente da natureza dos dados transmitidos pela estação, de forma que nenhuma estação monopolize o acesso ao meio transmitindo somente dados com maior prioridade.

4.2 FUNÇÃO DE COORDENAÇÃO DISTRIBUÍDA

O DCFAH é uma nova proposta de acesso ao meio físico para redes IEEE 802.11 e provê o acesso ao meio físico através da reservas de *slots* realizada pelas estações da rede. Cada estação pode reservar *slots* de transmissão conforme a sua necessidade respeitando as reservas das outras estações. A justiça no acesso ao meio é empregada garantido um mínimo de *slots* para cada estação e para otimizar e evitar ociosidade do meio é formada uma lista de espera que permite que as estações emprestem os seus *slots* reservados caso não utilizem os mesmos.

O DCFAH utiliza a estrutura de um SuperFrame dividida nos períodos de reserva, BE e QoS como apresentado em 4.3 Estrutura do SuperFrame. O período de reserva é destinado as solicitações de reservas de *slots* para as estações transmitir os fluxos de dados que requeiram QoS, o período de BE é destinado à transmissão dos dados que não necessitem de QoS e o período com QoS é composto pelos *slots* reservados pelas estações para cursar os dados com QoS.

O controle do DCFAH é distribuído e executado em todas as estações da rede através da disputa pela transmissão do quadro *Beacon* de início do SuperFrame. A estação que transmitir o primeiro *Beacon* do SuperFrame torna-se a gerente do SuperFrame e responsável pela transmissão de todos os quadros *Beacons* dentro do SuperFrame.

Durante o período de reserva todas as estações da rede devem transmitir os quadros de solicitação de reserva para a estação gerente do SuperFrame atual. A transmissão desses quadros deve obedecer ao método fundamental de acesso do MAC IEEE 802.11 no modo DCF, que é feito através do CSMA/CA. O período de reserva é finalizado pela estação Gerente do SuperFrame através da transmissão do próximo *Beacon*. Durante o período de reserva a estação gerente deve receber todos os quadros de solicitação proveniente das outras estações da rede e computar as reservas solicitadas e gerar a lista de espera pelos *slots* ociosos, durante o período de BE, e montar o elemento Mapa de Distribuição dos *Slots* com QoS, o qual determina a ordem de transmissão que deve ser obedecida pelas estações da rede para a transmissão dos MPDUs com QoS.

A rede deve manter-se sincronizada para que as estações saibam exatamente quando iniciam os *slots*. O sincronismo é provido pelo IEEE 802.11 através da informação *TimeStamp* presente nos quadros de *Beacons*. Todas as estações da rede devem conhecer o Mapa de Distribuição de *Slots* com QoS, o valor do *TimeStamp* da rede e o número de estações existentes na rede e a lista de reserva.

O DCFAH não apresenta nenhum mecanismo de controle de admissão de tráfego nem o mapeamento dos diferentes fluxos de dados existentes dentro de uma estação. O tratamento dos fluxos de diferentes naturezas é tratado internamente em cada QSTA através do EDCAF.

O DCFAH provê o serviço de entrega de MSDUs (MAC *Service Data Unit*) com QoS em redes sem infra-estrutura ou sem um ponto central de coordenação utilizando um mecanismo de reserva de *slots* para transmissão de dados das estações. A DCFAH garante um tempo mínimo de BE (*Best Effort*) para as estações cursarem os dados que não necessitem de QoS.

4.3 ESTRUTURA DO SUPERFRAME

A Figura 4.1 mostra o SuperFrame dividido nos períodos de Reserva, sem QoS e com QoS. O quadro *Beacon* sinaliza a operação do próximo período, os períodos podem iniciar com atraso devido à ocupação do meio físico. A estação que transmite o *Beacon* de início do SuperFrame torna-se a gerente do mesmo ficando responsável pela transmissão de todos os *Beacons* subsequentes que pertençam ao SuperFrame, o gerenciamento de alocação dos *slots* do SuperFrame e a transmissão do quadro de finalização do SuperFrame.

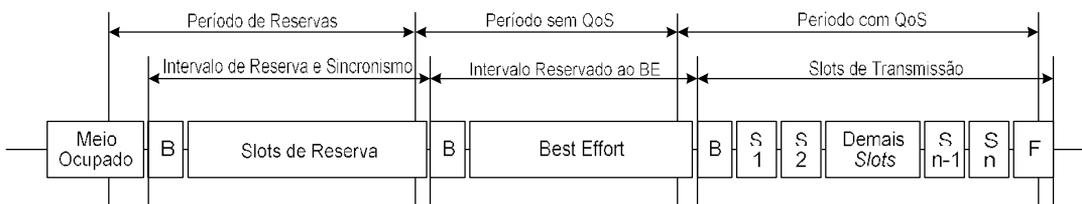


Figura 4.1 – SuperFrame com os períodos de reserva, BE e QoS.

Após a transmissão do *Beacon* de início do SuperFrame as estações da rede devem solicitar a reserva dos *slots* para o próximo período de QoS. As reservas devem manter um mecanismo justo que não permita a monopolização do meio por uma estação ou por um grupo de estações. A priori a divisão do número total de *slots* do SuperFrame é efetuada de forma igual para todas as estações da rede conforme a equação (4.1):

$$S_R = \frac{s}{n} \quad (4.1)$$

Onde:

S_R : número de *slots* reservados para cada estação;

s : número total de *slots* no SuperFrame;

n : número total de estações na IBSS.

Desta forma todas as estações têm direito ao mesmo número de *slots* da rede e só é necessário que cada estação confirme que irá utilizar os seus *slots* durante o período de requisição. Quando uma estação necessitar de *slots* adicionais deve realizar a solicitação dos mesmos e aguardar o quadro *Beacon* com a confirmação das solicitações atendidas na rede. Caso sobrem *slots* a estação gerente, do SuperFrame atual, pode conceder a reserva dos *slots* adicionais para as estações que solicitaram *slots* adicionais.

A estação gerente deve criar uma lista de espera de reservas com a indicação de quais estações solicitaram *slots* adicionais e não foram atendidas. Esta lista deve ser transmitida nos quadros *Beacons* no elemento Lista de Espera para *Slots* Ociosos conforme especificado no item 4.6 Quadros Utilizados.

Quando uma estação confirma os seus *slots* pré-alocados e não utilizar os mesmos, parcialmente ou totalmente, por qualquer motivo e ainda restarem *slots* ociosos deve emprestar este *slots* seguindo a Lista de Espera para *Slots* Ociosos. O empréstimo é realizado através da transmissão de um quadro *poll* para a estação que receberá o empréstimo. Os empréstimos devem levar em consideração o número de *slots* ociosos da

estação que efetuará o empréstimo e o número de *slots* solicitados pela estação que receberá o empréstimo, o caso ideal é quando estes números são iguais, mas caso isto não ocorra o número de *slots* ociosos deve ser menor que o número de *slots* solicitados.

4.4 GERENCIAMENTO DA REDE

O Gerenciamento da Rede é distribuído e no início de cada SuperFrame as estações da rede disputam a gerência do mesmo através da transmissão do *Beacon* de início. A estação gerente fica encarregada de transmitir todos os *Beacons* durante o SuperFrame, receber as Requisições de Reserva, computar e transmitir o Mapa de Distribuição de *Slots* com QoS e a Lista de Espera para *Slots* Ociosos.

No padrão IEEE 802.11 a geração do *Beacons* em uma IBSS é distribuída. O período de geração dos *Beacons* está incluído nos próprios *Beacons* e nos quadros *Probe Response*, e as estações devem acatar o período de geração dos *Beacons* quando entram na IBSS. Todas as estações que fazem parte da IBSS participam da geração dos *Beacons*. Cada estação deve manter um temporizador chamado de TSF que é usado para a temporização do período dado pela variável `aBeaconPeriod` que determina o intervalo de transmissão dos quadros *Beacons* (TBTT). Em uma IBSS o TBTT é estabelecido pela estação que inicia a IBSS. O tempo zero, momento de início da rede, é definido como o primeiro TBTT. A cada TBTT a estação deve:

- a) Suspender o decremento do temporizador de *backoff* para qualquer quadro diferente de *beacon* ou ATIM;
- b) Calcular um atraso aleatório uniformemente distribuído entre 0 e duas vezes o produto de `aCWmin` por `aSlotTime`;
- c) Esperar pelo período de atraso aleatório, decrementando o temporizador de atraso aleatório usando o mesmo algoritmo de *backoff*;
- d) Cancelar o atraso aleatório restante e a transmissão do *beacon* se um *beacon* chegar antes do temporizador de atraso aleatório expirar, e o temporizador de *backoff* ATIM deve voltar a ser decrementado;

- e) Enviar um *beacon* se o atraso aleatório expirar e nenhum *beacon* ter sido recebido durante o período de atraso.

A DCFAH modifica este funcionamento determinado que o TBTT agora seja utilizado somente para a transmissão dos *beacons* de início dos SuperFrames, ou seja, as estações da rede disputam a transmissão do *beacon* de início do SuperFrame e depois a estação gerente fica encarregada da transmissão dos *beacons* durante o SuperFrame até o final do mesmo quando iniciará a disputa para a transmissão de um novo *beacon* para o início do próximo SuperFrame.

A política da rede deve ser analisada dentro de cada QSTA, sendo que o mapeamento dos diferentes níveis de fluxos de dados deve ser realizado antes da transmissão dos quadros de solicitação de Reservas de *slots* para o Período com QoS.

Para evitar a ocorrência de *jitter* entre os SuperFrame a estação gerente do SuperFrame atual deve seguir a ordem de reservas utilizadas no SuperFrame anterior, sendo que as reservas existentes que não foram confirmadas só expiram após três SuperFrames sem confirmação. No Mapa de Distribuição de reserva existe um campo que conta o número de *timeouts* que cada reserva sofreu, sendo que quando ocorrer o terceiro *timeout* a reserva é cancelada. Quando uma QSTA deseja terminar uma reserva deve transmitir um quadro de Cancelamento da Reserva de Slots.

4.5 MECANISMO DE RESERVA

O mecanismo de reserva é executado em todas as estações da rede, mas apenas a estação gerente executa o controle das solicitações de reservas ficando encarregada de transmitir o *beacon* com os elementos Mapa de Reservas de Distribuição dos *Slots* com QoS e Lista de Espera para *Slots* Ociosos no início do Período com QoS.

A Figura 4.2 mostra o diagrama do mecanismo de reserva, aonde em (1) tem-se as solicitações de reservas efetuadas pelas camadas superiores que são submetidas ao Controle de Admissão em (2), o qual verifica as políticas aplicadas à rede em (3). Se a reserva passar nas regras das políticas de aceitação de tráfego (3) o controle de admissão

autoriza o envio do quadro de solicitação de reserva (5) pela estação. A estação gerente do SuperFrame finaliza os *slots* de reserva transmitido o *beacon* de início do período de BE ou sem QoS. Durante o período de BE a estação gerente do SuperFrame processa as reservas solicitadas e monta o Mapa de Distribuição dos *Slots* com QoS, que é incluído no *beacon* transmitido no início do período de QoS.

Quando as estações recebem o *beacon* de início do período com QoS devem atualizar a sua Base de Dado da Reserva (7), a qual será consultada para determinar o SIAFS da estação durante o Período com QoS. Quando uma estação não receber o elemento Mapa de Distribuição de *Slots* com QoS não deverá transmitir nenhum quadro durante o Período com QoS.

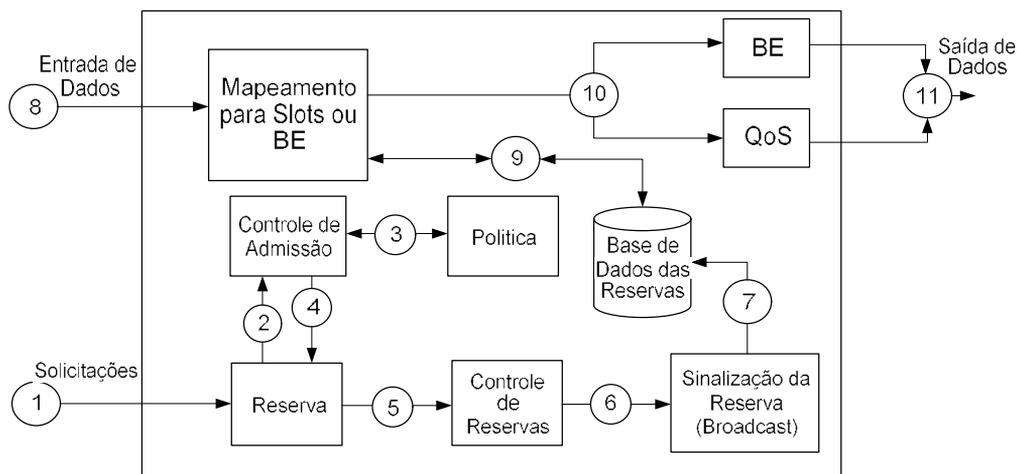


Figura 4.2 – Diagrama do mecanismo de reserva.

4.6 QUADROS UTILIZADOS

O DCFAH acrescenta os seguintes quadros ao padrão IEEE 802.11:

- a) Quadro de Solicitação da Reserva de *Slots*.
- b) Quadro de Cancelamento da Reserva de *Slots*.

Todos os quadros que pertencem à DCFAH obedecem ao formato geral dos quadros do padrão IEEE 802.11, sendo acrescentando somente o valor apresentado na Tabela 4.1 aos

subcampos Tipo e Subtipo do campo Controle do Quadro presente no cabeçalho dos quadros IEEE 802.11.

Tabela 4.1 – Valor acrescentado ao tipo e subtipo do campo controle do quadro.

| Tipo | Descrição do Tipo | Valor do Subtipo | Descrição do Subtipo |
|-------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 01 | Controle | 0111 | Requisição de Reserva |
| 01 | Controle | 0110 | Cancelamento de Reserva |

Os valores apresentados na Tabela 4.2 devem ser acrescentando ao Campo Controle de QoS dos quadros de dados com QoS transmitidos pelas estações durante o Período com QoS. Este campo que possui 16 bits de tamanho e está presente em todos os quadros do tipo Dados nos quais o subcampo QoS têm o valor 1. A alteração realizada corresponde ao bit 7 ao qual foi acrescentado o valor 1 para indicar que este quadro pertence à DCFAH.

O Campo TID presente no Campo Controle de QoS do padrão IEEE 802.11 não é utilizado na DCFAH para simplificar o mecanismo de reserva. O Campo Política de Reconhecimento (*Ack – Acknowledge*) continuam realizando as mesmas funções do padrão IEEE 802.11. O Campo Tamanho da Fila tem 16 bits de tamanho e sempre possui um valor inteiro que indica o número de quadros que estão enfileirados na estação.

Tabela 4.2 – Valor adicionado ao campo controle de QoS.

| Subtipos de Quadros Aplicáveis | Bits 0-3 | Bit 4 | Bits 5-6 | Bit 7 | Bits 8-15 |
|--|-----------------|--------------|-----------------|--------------|------------------|
| Quadros de Dados com QoS Dados enviados pelas estações durante o Período com QoS. | Não Utilizado | 0 | Política de Ack | 1 | Tamanho da Fila |

4.7 QUADROS BEACONS

O DCFAH acrescenta aos quadros *beacons* do padrão IEEE 802.11 as informações apresentada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Informação acrescentada aos quadros *beacons*.

| Ordem | Informação | Notas |
|-------|---|--|
| 24 | Capacidade QoS <i>Ad Hoc</i> | Elemento de informação da Capacidade QoS <i>Ad Hoc</i> está presente em todos os quadros <i>Beacons</i> gerados pelas estações que estão utilizando a DCFAH. |
| 25 | Mapa de Distribuição de <i>Slots</i> com QoS. | Apresenta a distribuição dos <i>Slots</i> com QoS que deve ser seguida pelas estações durante o Período com QoS. |

O elemento de capacidade QoS *Ad Hoc* tem de 3 octetos de tamanho e contém as informações de capacidade da IBSS com a DCFAH conforme mostrado na Figura 4.3. O Campo Número QSTAS tem 4 bits de tamanho e indica a quantidade de estações que fazem parte da rede. O Campo Tamanho dos *Slots* tem 8 bits de tamanho e indica o tamanho dos *slots* em microssegundos. O campo Próximo Período tem 2 bits de tamanho e indica qual é o período que inicia após o *Beacon* conforme os valores apresentados na Tabela 4.4. O campo Tamanho do Período tem 10 bits de tamanho e indica o tempo de duração, em milissegundos, do próximo período.

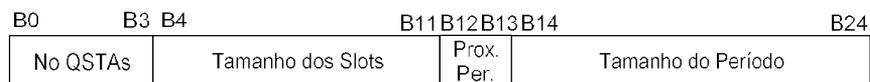


Figura 4.3 – Capacidade QoS *Ad Hoc*.

Tabela 4.4 – Valores do campo próximo período do elemento capacidade QoS *Ad Hoc*.

| Valores do Campo | | Próximo Período |
|------------------|-----|----------------------------|
| B12 | B13 | |
| 0 | 0 | Período de Reserva. |
| 0 | 1 | Período BE ou sem QoS. |
| 1 | 0 | Período com QoS. |
| 1 | 1 | Não Utilizado – Reservado. |

O tamanho do Mapa de Distribuição de *Slots* com QoS é arbitrário e depende da quantidade de estações com reservas no SuperFrame. A Figura 4.4 mostra o Mapa de Distribuição de *Slots* com QoS juntamente com os seus campos Informações de Reserva e Reservas das QSTAS, aonde os índices 1, 2 e n representam a ordem das reservas para as estações.



Figura 4.4 – Mapa de distribuição de *slots* com QoS.

O campo Informação de Reserva tem 16 bits de tamanho e é constituído dos campos Número de Reserva e Número de QSTAS, veja a Figura 4.5. O campo Número de Reservas indica o número de reservas dentro do Mapa de Distribuição de *Slots* com QoS. O campo Número de QSTAS indica a quantidade de estações que possuem reservas e também indica o tamanho do Mapa de Distribuição de *Slots* com QoS conforme a equação (4.2).

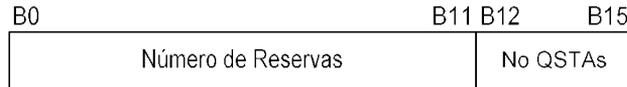


Figura 4.5 – Elemento de informação de reserva.

$$T_{MRSQoS} = 2 + NoQSTAS \quad (4.2)$$

Onde:

$TMRSQoS$: Tamanho do Mapa de Reserva de *Slots* com QoS;

$NoQSTAS$: Número de estações com reservas neste Mapa de Reserva de *Slots* com QoS

O valor 2 representa os dois octetos do campo Informações de Reserva.

O campo Reservas QSTAS_{*i*} (onde *i* indica o índice da estação na fila de reservas dos *slots*) é mostrado na Figura 4.6.



Figura 4.6 – Elemento reservas QSTAS.

O campo AID – QSTA tem 16 bits de tamanho e contém o número do ID de Associação da estação para identificar qual e a estação dona dos *slots*, o campo Número *Slots* tem 4 bits de tamanho e indica o número de *slots* reservados para a estação e o campo *TimeOut* tem 2 bits de tamanho e indica a quantidade de *timeouts* que a reserva ainda pode suportar antes de ser eliminada. Os Bits de 22 a 23 são reservados e não possuem função. O campo *TimeOut* é incrementado a cada SuperFrame se a estação dona das Reservas não enviar o quadro de solicitação de reserva para confirmar as reservas que já possui.

O tamanho do elemento Lista de Espera para *Slots* Ociosos é arbitrário e depende da quantidade de estações que solicitaram mais *slots* do que o seu limite e não foram atendidas devido à saturação da capacidade máxima da rede. A Figura 4.7 mostra o elemento Lista de Espera para *Slots* Ociosos com o campo Informações da Fila e as estações que estão na fila através do campo QSTA que possui um índice para indicar qual a posição que a estação ocupa na fila.



Figura 4.7 – Elemento lista de espera para *slots* ociosos.

O subcampo Informação da Fila tem 8 bits de tamanho e indica o número de estações que estão na fila. O subcampo $QSTA_i$, onde i é o índice que indica a posição que a estação ocupa na fila, é mostrado na Figura 4.8.



Figura 4.8 – Subcampo $QSTA_i$.

O subcampo $QSTA_i$ possui os campos AID - QSTA que tem 16 bits de tamanho e contém o ID de associação da estação, o campo Número de *Slots* tem 4 bits de tamanho e indica o número de *slots* que a estação deseja emprestar dos *slots* ociosos das outras estações da rede.

4.8 QUADROS DE RESERVAS

O quadro do tipo Controle e subtipo solicitação de reserva só podem ser transmitidos durante o Período de Reservas pelas estações que estão associadas à IBSS. Estes quadros devem ser endereçados para a estação Gerente do SuperFrame atual.

O quadro de solicitação de reserva, mostrado na Figura 4.9, contém o campo AID – QSTA que possui 16 bits de tamanho e indica o ID de Associação da estação que está solicitando a reserva. O campo Número de *Slots* tem 4 bits de tamanho e indica o número de *slots* que estão sendo solicitados, os últimos 4 bits não possuem função.

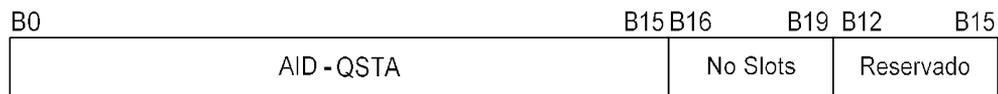


Figura 4.9 – Quadro de solicitação de reservas de *slots*.

O quadro de cancelamento de reserva possui a mesma estrutura que o quadro de solicitação de reservas com os mesmos campos e difere apenas na função do campo Número de *Slots* que indica o número de *slots* que a estação está efetuando o cancelamento da reserva.

4.9 ESPAÇO ENTRE QUADROS

O DCFAH utiliza um novo espaço entre quadros chamado de *Slotted Arbitrary Interframe Space* (SAIFS) durante o período com QoS utilizado para garantir a prioridade de acesso ao meio para os *slots* pertencentes às estações. A DCFAH desconsidera o período de *Backoff* existente no CSMA/CA utilizado nos modos de operação DCF, EDCA e HCCA do padrão IEEE 802.11 durante o Período com QoS. Todas as estações que estão no Mapa de Distribuição de Slots com QoS devem iniciar a deferência do SAIFS após o meio tornar-se livre. O SAIFS de cada estação é calculado através da equação (4.3).

$$SAIFS_i = [(SlotTime \times NumberOffSlots) + aSIFSTime] \times POS_i \quad (4.3)$$

Onde:

$SAIFS_i$: o tempo de deferência SAIFs da estação com o índice i ;

Pos_i : posição da estação i no Mapa de Distribuição de Slots com QoS;

$SlotTime$: tempo de duração de um Slot;

$aSIFSTime$: tempo de um intervalo SIFS;

$NumberOfSlots$: número de slots que a QSTA $_i$ possui no Mapa de Distribuição de Slots com QoS.

O SAIFS (*Slotted Arbitrary Interframe Space*) é mostrado na Figura 4.10 juntamente com os espaços entre quadros existentes no padrão IEEE 802.11. O SAIFS $_1$ deve ser menor que um DIFS para garantir que a primeira estação tenha prioridade no acesso ao meio no primeiro slot.

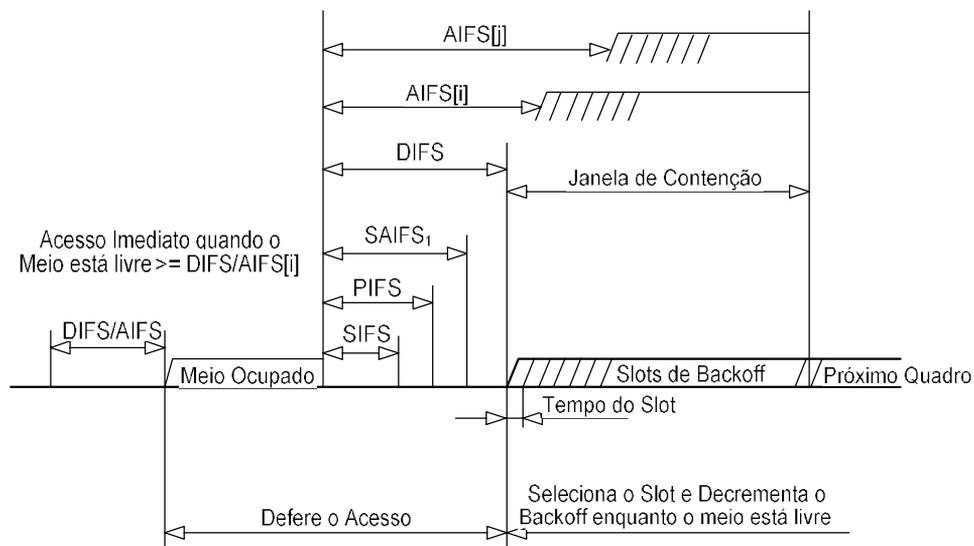


Figura 4.10 – Espaços entre os quadros do IEEE 802.11 e SAIFS da DCFAH.

A Figura 4.11 apresenta os SAIFS para um período com QoS de um SuperFrame, sendo que o SAIFS $_1$ é o tempo total deferido, após o *beacon* que inicia o período com QoS, pela estação dona do primeiro slot, o SAIFS $_2$ é o tempo total deferido, após o *beacon*, pela

Quando uma estação inicia o seu acesso ao meio deve iniciar o contador de *slots* com o número de *slots* reservados a ela conforme o Mapa de Distribuição de *Slots* com QoS, a cada *slot* ocupado a estação deve decrementar o contador de *slots*. Quando o contador de *slots* atingir o valor 0 (zero) a estação deve então parar as suas transmissões e aguardar o final do SuperFrame para transmitir novos quadros.

A estação dona do *slot* atual pode negociar com a estação receptora o mecanismo de reconhecimento que melhor atenda as necessidades obedecendo às regras de reconhecimento especificadas no padrão IEEE 802.11, por exemplo, Reconhecimento em Bloco, Sem Reconhecimento ou Reconhecimento Normal.

Quando uma estação recebe um quadro de dados que necessite de reconhecimento deve ignorar o seu NAV e deferir um SIFS após o final do quadro de dados que requer reconhecimento e enviar o quadro Ack.

Quando uma estação não for usar todos ou alguns de seus *slots* durante o SuperFrame pode emprestar os mesmos seguindo a ordem da Lista de Espera de *Slots* Ocioso. Este empréstimo só pode ocorrer se o número de *slots* restantes for suficiente para a estação dona dos mesmos enviar um quadro de *pull* para a estação que se encontra na primeira posição da fila, receber um quadro *Ack* de confirmação do empréstimo e ainda restar tempo da estação receptora do empréstimo transmitir dados ao menos em um *slot*. Também é necessário que a Lista de Espera de *Slots* Ociosos seja atualizada em todas as outras estações da rede, isto é feito através da transmissão de um quadro *beacon* pela estação gerente da rede que deve ser informada do empréstimo pela estação que efetuará o empréstimo.

As estações que não são donas do *slot* atual só podem acessar ao meio caso receba um quadro da estação dona do *slot* atual que necessite de uma resposta, por exemplo, um quadro de dados que necessite de reconhecimento ou um quadro para estabelecimento do mecanismo de reconhecimento em bloco ou quando receber um empréstimo de *slots* da estação dona dos mesmos.

Os quadros RTS e CTS não devem ser utilizados durante o Período com QoS porque neste período as estações só podem transmitir em duas ocasiões:

- a) Durante os seus *Slots*;
- b) Um quadro de resposta a outro quadro transmitido pela estação dona do *Slot* atual.

Todos os subtipos de quadros de dados permitidos pelo padrão IEEE 802.11 para redes Ad Hoc podem ser transmitidos durante o Período com QoS, que também permite a fragmentação de quadros e a transmissão de múltiplos quadros em seqüência com um dos mecanismos de reconhecimento existente no padrão IEEE 802.11.

5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

5.1 NS 2 E PATCHS

O NS 2 (*Network Simulator version 2*) é um simulador discreto orientado a objetos baseado em eventos para pesquisas em redes [15], provendo um substancial suporte para simulação de TCP/UDP, roteamento e protocolos *multicast* sobre redes cabeadas e sem fios (locais e satélite).

Durante o início dos testes deste trabalho o NS 2 encontrava-se na versão 2.29 a qual foi escolhida para o início dos testes e implementação do DCFAH.

5.1.1 Implementação do IEEE 802.11 no NS 2 e contribuições

A implementação do padrão IEEE 802.11 no NS 2, obtido através de código fonte do site oficial [15], não possui a transmissão dos quadros *beacons*, o mecanismo de associação e a emenda IEEE 802.11e que trata da implementação de QoS.

5.1.1.1 Soluções para os quadros *beacons*

Atualmente existem duas soluções para a implementação dos quadros *beacons*. A primeira solução foi postada na lista de discussão dos desenvolvedores do NS 2 em 24 de maio de 2006 por Matteo Rosi e Leonardo Maccari [16], ambos membros do Telecommunication Network Lab do Department of Electronics and Telecommunications da Universidade de Florença.

A segunda solução foi postada em 17 de maio de 2007 por Ilango Purushothaman e Sumit Roy [17], ambos são membros do Fundamental Network Lab do Department of Electrical Engineering da Universidade de Washington. O *patch* disponível foi escrito para o NS 2.31.

A implementação de Mateo Rossi e Leonardo Maccari [16] apresentava alguns problemas e logo foi postada uma nova versão para o NS 2.29 em 5 de junho de 2006 [16]. Após a realização de vários testes com essa versão os resultados não se mostraram satisfatórios e a quantidade de correções necessárias para o funcionamento motivou o início dos testes da segunda solução de Ilango Purushothaman e Sumit Roy que está muito bem documentada em [17].

Como Ilango Purushothaman e Sumit Roy [17] escreveram a sua contribuição para o NS 2.31 e este trabalho iniciou-se com o NS 2.29 foi necessário verificar se existem diferenças na implementação do padrão IEEE 802.11 entre estas versões. Após os testes com simulações e a verificação do código fonte ficou confirmado que não existiam diferenças na implementação do padrão IEEE 802.11 entre as versões 2.29 e 2.31 do NS. Os testes desta contribuição mostraram o seu efetivo funcionamento com a verificação da transmissão dos quadros *beacon* pelas estações definidas como AP (*Access Points*) na topologia da rede.

Nenhuma das contribuições para a transmissão dos quadros *beacons* apresentavam a implementação da transmissão dos *beacons* para redes *Ad Hoc*. Como a DCFAH necessita da transmissão de *beacons* com a topologia *Ad Hoc* foi necessário a implementação destes quadros conforme a Cláusula 11 sub-item 11.1.2.2 Geração de *Beacons* em uma IBSS do padrão IEEE 802.11 [1].

5.1.1.2 Soluções para a implementação de QoS

Como descrito em 3 Descrição Funcional da Subcamada MAC a emenda IEEE 802.11e adiciona duas as formas de acesso ao meio, para as aplicações que requeiram QoS, HCCA e EDCA. Para o mecanismo de acesso ao meio HCCA existe uma solução apresentada pelo Computer Network Group da Universidade de Pisa – Itália escrita para o NS 2.29 [18].

No fórum de discussão dos desenvolvedores do NS 2 [19] existem alguns métodos de acesso EDCA. A primeira apresentada por um grupo da Universidade de Stanford que não está mais disponível para acesso e todos os *links* referenciados não estavam disponíveis durante o desenvolvimento deste trabalho.

A segunda contribuição foi apresentada por Ni Qiang do INRIA – França [20] para emenda IEEE 802.11e, ainda em versão *draft* que teve modificações significativas até a versão final. Esta contribuição foi escrita para o NS 2.1b6 e distribuída com todo o código fonte do NS 2 exigindo assim uma análise de todo o código do NS 2 para adequação da contribuição a versão final da emenda IEEE 802.11e [4]. Este cenário motivou a verificação da terceira contribuição disponível.

A terceira contribuição foi apresentada por Sven Wiethölter, Christian Hoene e Adam Wolisz do Telecommunication Network Group (TKN) da Universidade de Berlin [21]. Esta contribuição foi inicialmente escrita para o NS 2.26 com os requerimentos do *draft* D4.3 [22] e D5.0 [23], ambos de 2003, da emenda IEEE 802.11e. Em 2006 foi disponibilizado um novo *patch* para o NS 2.28 atendendo os requerimentos da versão final da emenda IEEE 802.11e [4] lançada em 2005. Após a análise do *patch* para o NS 2.28 do TKN foi constatado a sua aplicabilidade na implementação do DCFAH.

5.1.2 Escolha da versão do NS 2 e aplicações dos *patches*

Como as duas contribuições necessárias para a implementação da DCFAH foram escritas para versões diferentes do NS 2, sendo que a contribuição para a transmissão dos quadros *Beacons* de Ilango Purushothaman e Sumit Roy foi escrita para o NS 2.31 e a contribuição de implementação do EDCA do TKN foi escrita para o NS 2.28 e no início deste trabalho foi utilizado a versão 2.29 foi necessário a verificação das diferenças existentes na implementação do NS 2.28, 2.29 e 2.31 para a escolha da versão para realização dos testes da DCFAH.

A versão 2.31 apresenta-se no momento do início dos testes como a última versão disponível e o *patch* de transmissão dos *beacons* não necessitavam de nenhuma alteração para funcionamento. Iniciou-se a verificação da possibilidade de portar o *patch* do EDCA para esta versão. Durante a escolha do *patch* para os *Beacons* foi verificado que o NS 2.31 e o NS 2.29 não apresentavam diferenças na implementação do padrão IEEE 802.11 e a documentação do *patch* do EDCA para o NS 2.28 indicava que o mesmo poderia ser utilizado no NS 2.29 sem muitas modificações então a escolha recaiu sobre a versão 2.31 por ser a mais atual. O *patch* dos quadros *beacons* não necessitava de modificações, o

patch do EDCA poderia ser portado para o NS 2.29 que não apresentava diferenças substanciais na implementação da subcamada MAC, do padrão IEEE 802.11, com relação ao NS 2.31.

5.1.2.1 Aplicação do *Patch* para Transmissão dos *Beacons* e Implementação da Transmissão dos *Beacons* em Modo *Ad Hoc*.

A aplicação do *patch* de transmissão dos quadros *beacons* não exigiu qualquer modificação para o perfeito funcionamento no modo infra-estruturado, aonde uma ou mais estações devem ser definidas como APs para transmitirem os quadros *beacons* para as outras estações da rede. Para atender as requisições de transmissão dos quadros *beacon* em modo *Ad Hoc* do padrão IEEE 802.11 foi necessário acrescentar ao NS 2.31 uma variável para determinar se a rede está em modo infra-estruturado ou *Ad Hoc*. No modo infra-estruturado é utilizado o código provido pelo *patch* e no modo *Ad Hoc* o contador do intervalo de transmissão dos *beacons* é iniciado no momento em que o nó é criado.

Quando o contador do intervalo *beacon* estoura todas as estações param a deferência de qualquer *backoff* existente e programam a transmissão do novo *beacon*. Se a estação receber um *beacon* enquanto está decrementando um *backoff* para transmitir um *beacon* o *backoff* é finalizado e a programação da transmissão do *beacon* é cancelada. Se o *backoff* chegar a zero o quadro *beacon* é transmitido e a estação volta a sua operação de transmissão de quadros de outros tipos diferentes do quadro *beacon*.

5.1.2.2 Aplicação do *Patch* do EDCA

O *patch* do EDCA exigiu algumas modificações para o seu correto funcionamento devido as diferenças entre as versões 2.31 e 2.28 do NS e a geração dos quadros *beacons* pela subcamada MAC. O *patch* da contribuição do EDCA colocava os parâmetros de configuração de prioridade dos fluxos dentro da fila de interface entre as subcamadas LLC e MAC [24]. O *patch* possui um arquivo de configuração em tcl com uma função que passa os valores dos parâmetros do EDCA para a subcamada MAC, que possui o seu código escrito em C++, quando o primeiro quadro é colocado na fila de interface.

A contribuição do EDCA não contemplava a transmissão dos quadros *beacon* gerados pela subcamada MAC que necessita do parâmetro aCW_{min} para calcular o *backoff* aleatório decrementado antes de iniciar transmissão. Como os parâmetros do EDCA só eram passados para a subcamada MAC após o enfileiramento do primeiro quadro na fila de interace entre MAC e LLC os quadros *beacons* não poderiam ser transmitidos antes deste evento.

A solução aplicada foi a utilização de uma estrutura dentro da subcamada MAC para armazenar os valores utilizados para os parâmetros do EDCA e a chamada da função em tcl, que passa esses valores para a subcamada MAC, no momento em que a estação é criada. Desta forma o valor de aCW_{min} pode ser utilizado para o *backoff* aleatório que antecede a transmissão dos quadros *beacons*. Os parâmetros do EDCA configurados no *patch*

5.2 IMPLEMENTAÇÃO DO DCFAH

A implementação DCFHA contempla os seguintes itens:

1. Contador do SuperFrame: este contador é carregado com o tempo para o início do próximo SuperFrame. Quando o valor chega a zero a estação deve parar tudo o que está fazendo e tentar transmitir um quadro *beacon*. Caso obtenha sucesso na transmissão do *beacon* a estação torna-se a gerente do SuperFrame e é responsável pela recepção dos quadros de solicitação de Reserva, Criação Mapa de Distribuição de *Slots* com QoS e envio dos *beacons* subsequentes até o final do SuperFrame.
2. Contador de Início dos *Slots* com QoS: este contador é carregado com o tempo de início do *slot* com QoS da estação conforme a equação (4.3);
3. Contador de Final dos *Slots* com QoS: este contador é carregado com o tempo de término dos *Slots* com QoS da estação. Este valor é dado pelo número de *Slots* com QoS que a estação obteve no Mapa de Distribuição de *Slots* com QoS.

4. Transmissão e Recepção dos Quadros de Reserva de *Slots* e Cancelamento de Reserva de *Slots* com QoS: Definição de um novo tipo de quadro através de uma estrutura no qual será definido pela estação o número de *slots* com reservas que deseja.
5. Criação do Elemento Mapa de Distribuição de *Slots* com QoS: Este elemento é uma estrutura que possui todas as informações sobre as reservas solicitadas e atendidas no SuperFrame. Este elemento deve ser inserido nos quadros *beacons* que antecedem e que são transmitidos durante o período com QoS;
6. Mecanismo de Gerenciamento de Reservas: implementado conforme 4.4 GERENCIAMENTO DA REDE da Rede e executado em todas as estações da rede para garantir as reservas dos *slots* com QoS;

Na implementação realizada para os testes de análise de desempenho do DCFAH não foi utilizado a funcionalidade de empréstimos de *Slots* com QoS entre as estações da rede.

5.3 ANÁLISE DE DESEMPENHO DA DCFAH

Todas as simulações foram realizadas em uma rede IEEE 802.11 em modo *Ad Hoc* com taxa de transmissão de dados de 11 Mbps. Enrico Palletta e Hector Velayos demonstram [25] que o *throughput* máximo de uma rede IEEE 802.11 saturada para taxas de 11 Mbps é de 6 Mbps quando não existe disputa do meio físico pelas estações, ou seja, *throughput* de 6 Mbps é atingido quando existe apenas uma estação transmitindo em toda a rede.

Para todas as simulações realizadas foram utilizados quatro níveis de prioridade para atender voz, vídeo, melhor esforço e background. A Tabela 5.1 apresenta os valores utilizados para cada prioridade de acesso atendendo as especificações do padrão IEEE 802.11e para o meio físico descrito na Cláusula 15 e 18 [1] que compreende o padrão IEEE 802.11b.

Tabela 5.1 – Valores utilizados para os parâmetros do EDCA.

| AC | Descrição | aCW _{min} | aCW _{max} | AIFSN | Limite do TXOP para 802.11b |
|-------|-------------------|--------------------|--------------------|-------|-----------------------------|
| AC_BK | <i>Background</i> | 31 | 1023 | 7 | 0 |
| AC_BE | Melhor Esforço | 31 | 1023 | 3 | 0 |
| AC_VI | Vídeo | 15 | 31 | 2 | 6,016 ms. |
| AC_VO | Voz | 7 | 15 | 2 | 3,264 ms. |

O DCFAH utiliza os parâmetros do EDCA para os acessos ao meio realizados quando transmite os quadros de solicitação de reserva durante o período de reserva e os quadros de dados durante o período sem QoS. A análise de desempenho baseou-se em resultados de *throughput*, atraso e *jitter*, que são apresentados a seguir.

5.3.1 Análise de desempenho do *Throughput*

Para a análise de desempenho do *throughput* o DCFAH foi comparado com o EDCA através de seis simulações, sendo três com o EDCA e três com o DCFAH, a Tabela 5.2 apresenta os parâmetros utilizados para cada simulação. O tráfego agregado de 7 Mbps garantem a saturação da rede permitindo a análise do comportamento do protocolo DCFAH em situações extremas.

Tabela 5.2 – Prioridades de acesso utilizadas na análise de desempenho do *throughput*.

| Número da Simulação | Número de Estações | Prioridade do Tráfego | Tráfego por Estação | Tráfego Agregado | Protocolo |
|---------------------|--------------------|-----------------------|------------------------------|------------------|-----------|
| 1 | 10 | AC_VI | CBR ¹ 700 kbps | 7 Mbps | DCFAH |
| 2 | 10 | AC_VI | CBR 700 kbps | 7 Mbps | EDCA |
| 3 | 10 | AC_BK | CBR 700 kbps | 7 Mbps | DCFAH |
| 4 | 10 | AC_BK | CBR 700 kbps | 7 Mbps | EDCA |

¹ CBR – *Constat Bit Rate*.

| Número da Simulação | Número de Estações | Prioridade do Tráfego | Tráfego por Estação | Tráfego Agregado | Protocolo |
|----------------------------|---------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------|------------------|
| 5 | 3 | AC_VI | CBR 700 kbps | 7 Mbps | DCFH |
| | 2 | AC_VO | | | |
| | 3 | AC_BE | | | |
| | 2 | AC_BK | | | |
| 6 | 3 | AC_VI | CBR 700 kbps | 7 Mbps | DCFH |
| | 2 | AC_VO | | | |
| | 3 | AC_BE | | | |
| | 2 | AC_BK | | | |

Em todas as simulações realizadas para a análise de desempenho do DCFH, tanto as realizadas com o meio de acesso DCFH quanto as realizadas com o meio de acesso EDCA a fim de comparações, a primeira estação inicia a transmissão de dados após 2 segundos do início da simulação e a estação subsequente inicia a transmissão de dados após 1 segundo do início da estação anterior e assim sucessivamente até o início da transmissão de dados da última estação. Para todas as simulações o tempo total de simulação foi de 40 segundos.

Para atender as 10 estações o SuperFrame foi configurado conforme os valores apresentados na Tabela 5.3. O início do período com QoS pode começar com algum atraso decorrente de colisões com os quadros transmitidos durante o período de BE. Estas colisões podem ocorrer porque durante o período de BE todas as estações estão transmitindo quadros livremente que podem colidir com o quadro *Beacon* de início do período com QoS. Para resolver este problema foi adicionado um período de 20 ms destinado aos possíveis atrasos.

Tabela 5.3 – Parâmetros de configuração do SuperFrame

| Período do SuperFrame | Número de Beacons | Intervalo de Beacons | Tempo Total do Período | Total de Tempo Acumulado |
|------------------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| Reservas | 1 | 50 ms | 50 ms | 50 ms |
| BE | 2 | 115 ms | 230 ms | 280 ms |

| Período do SuperFrame | Número de Beacons | Intervalo de Beacons | Tempo Total do Período | Total de Tempo Acumulado |
|------------------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| Atraso | --- | --- | 20 ms | 20 ms |
| QoS | 6 | 115 ms | 690 ms | 990 ms |
| Disputa da Gerência | 1 | 30 ms | 10 ms | 1 s |

Testes práticos através de simulações demonstraram que a reserva de um tempo inferior a 20 ms para o atraso do início do período com QoS não garantiram os *slots* para todas as estações durante o período com QoS, sendo que as estações mais prejudicadas neste testes foram as que ocupam a primeira e última posição do Mapa de Reserva de Slots. Para garantir que nenhuma estação tenha prejuízo nas suas reservas este tempo de atraso foi garantido.

O *Slots* de transmissão para o período com QoS foi configurado com 11 ms de duração para acomodar as 10 estações da rede. Cada reserva possui um *Slot* por intervalo *Beacons*, como o SuperFrame possui seis intervalos *Beacons* o tempo total de transmissão para cada estação é de 66 ms. Com uma taxa de 11 Mbps cada estação teve uma reserva de 726 kbps.

O gráfico do *throughput* agregado para o DCFAH é apresentado na Figura 5.1, o gráfico do *throughput* agregado para o EDCA é apresentado na Figura 5.2

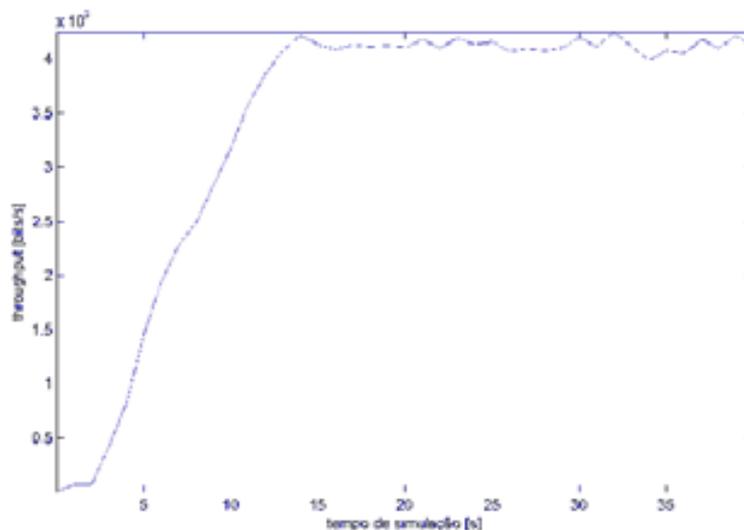


Figura 5.1 – *Throughput* agregado do DCFAH com AC_VO.

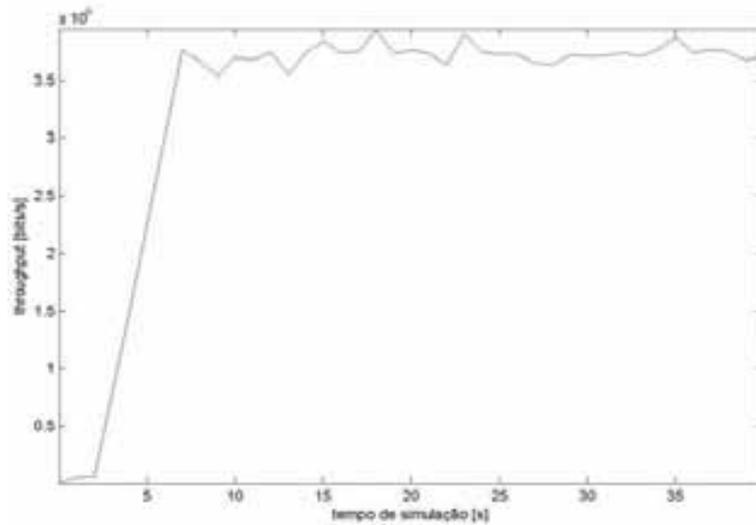
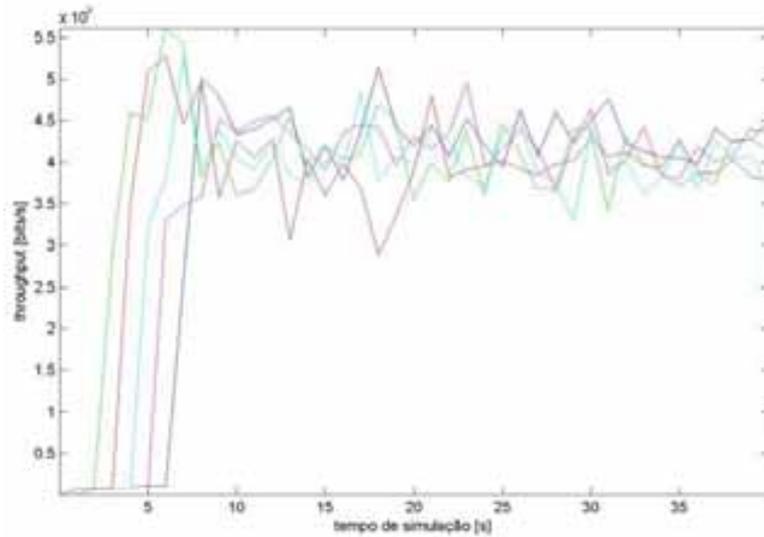


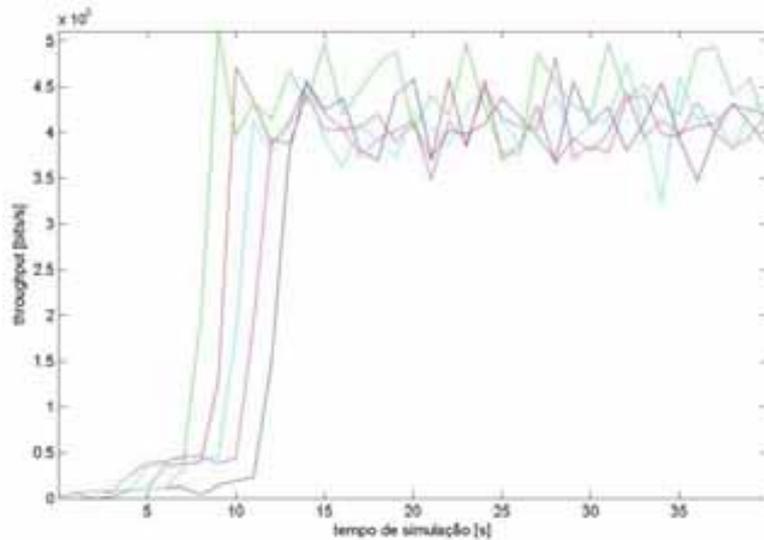
Figura 5.2 – *Throughput* agregado do EDCA com AC_VO.

Comparando o gráfico apresentado na Figura 5.1 com o apresentado na Figura 5.2 conclui-se que, quando todas as estações da rede estão utilizando a prioridade de acesso AC_VO, o desempenho do *throughput* agregado do DCFAH é superior ao desempenho do *throughput* agregado do EDCA.

A Figura 5.3 apresenta o *throughput* individual do DCFAH para a prioridade de acesso AC_VO, no gráfico. O gráfico (a) apresentado na Figura 5.3 mostram que o *throughput* individual do DCFAH decresce conforme aumenta a quantidade de estações transmissoras com reservas. Isto ocorre porque as estações transmitem dados durante o período de BE e a concorrência neste período é diretamente proporcional ao número de estações que estão transmitindo. As oscilações encontradas nos gráficos (a) e (b) da Figura 5.3 também são atribuídas ao acesso ao meio através do EDCA realizado durante o período de BE.



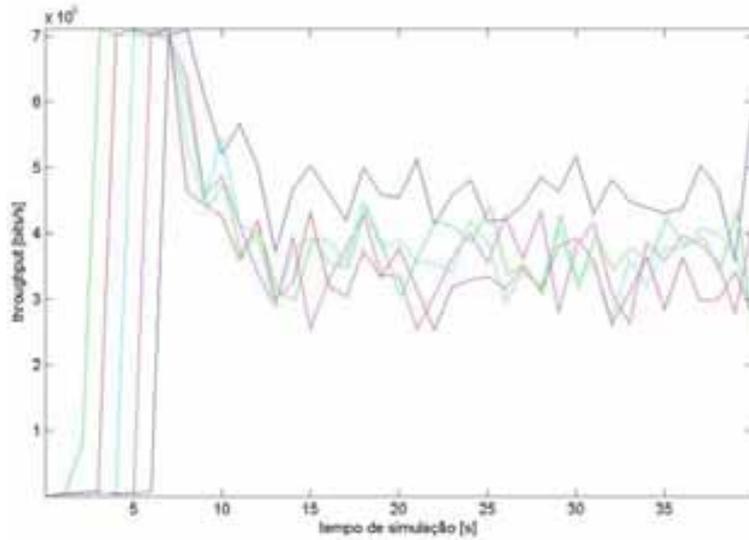
(a)



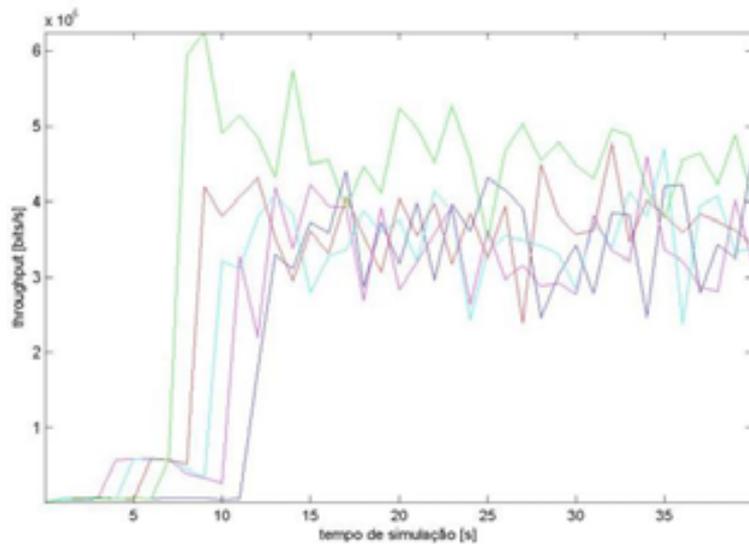
(b)

Figura 5.3 – *Throughput* individual para o DCFAH com prioridade de acesso AC_VO em (a) para as estações 0, 1, 2, 3 e 4 e em (b) para as estações 5, 6, 7, 8 e 9.

A Figura 5.4 apresenta o *throughput* individual de cada uma das estações para o EDCA com prioridade de acesso AC_VO. O gráfico (a) apresentado na Figura 5.4 mostra que o *throughput* individual do EDCA decresce conforme aumenta a quantidade de estações transmissoras. Comparando os gráficos (a) e (b) da Figura 5.4 constata-se que o EDCA apresenta um *throughput* que atende aos 700 kbps até que ocorra a saturação da rede



(a)



(b)

Figura 5.4 – *Throughput* individual para o EDCA com prioridade de acesso AC_VO em (a) para as estações 0, 1, 2, 3 e 4 e em (b) para as estações 5, 6, 7, 8 e 9.

Comparando os gráficos (a) e (b) da Figura 5.3 com os gráficos (a) e (b) da Figura 5.4 conclui-se que o DCFAH, apesar do seu *overhead*, apresenta um *throughput* ligeiramente superior ao EDCA para prioridade de acesso AC_BK devido ao período com QoS que garante o tempo fixo de transmissão de cada estação sem deferência de *backoff* ou a ocorrência de colisões.

Através dos gráficos (a) e (b) da Figura 5.3 e (a) e (b) da Figura 5.4 também se constata que o DCFAH mantém o valor médio do *throughput* muito próximo entre as estações enquanto no EDCA algumas estações apresentam o *throughput* acima das outras. Isto ocorre porque no EDCA quem chega primeiro transmite primeiro devido a que o sistema de *backoff* é aleatório.

As oscilações do *throughput* do EDCA possuem uma amplitude maior do que no DCFAH devido que o acesso ao meio no DCFAH possui cadência constante e tempo fixo de transmissão e no EDCA todo o acesso ao meio é aleatório e depende do algoritmo de *backoff* e do tamanho do quadro transmitido.

No DCFAH cada estação pode transmitir durante todos os *Slot* obtidos através do mecanismo de reservas sem necessidade de deferir qualquer tempo de *backoff* aleatório, desta forma a única influência que o tamanho dos quadros de dados oferece sobre o *throughput* é no tamanho do *overhead* dos quadros Ack acrescido dos intervalos SIFS entre o quadro de dados e o quadro Ack. O tamanho do quadro de dados do EDCA influencia o *throughput* conforme está mostrado no Anexo B.

Para verificar o desempenho do *throughput* do DCFAH com outro nível de prioridade foram realizadas as simulações 3 e 4 mostradas da Tabela 5.2 utilizando a prioridade de acesso AC_BK. O gráfico do *throughput* agregado do DCFAH, para as 10 estações, é dado pela Figura 5.5.

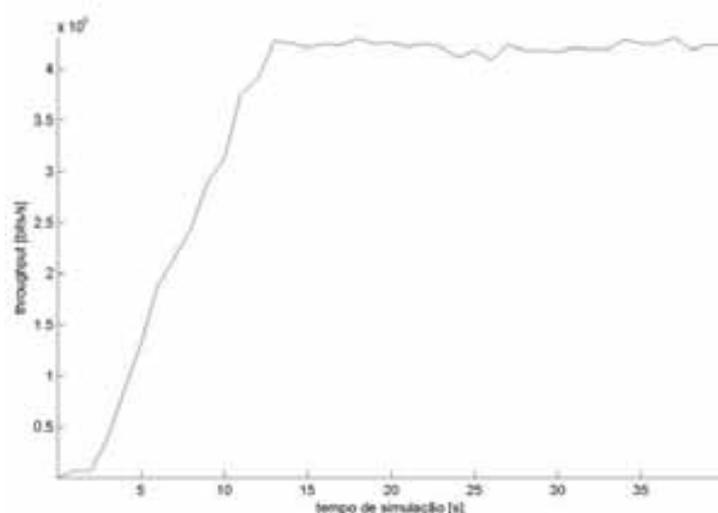


Figura 5.5 – *Throughput* agregado do DCFAH com AC_BK.

Comparando o gráfico da Figura 5.5 com o gráfico da Figura 5.1 verifica-se que o *throughput* agregado das 10 estações não depende da prioridade de acesso dos dados transmitidos na rede, quando todas as estações utilizam a mesma prioridade de acesso para todas as suas transmissões.

A Figura 5.6 apresenta o gráfico do *throughput* agregado do EDCA para 10 estações transmitindo com prioridade de acesso AC_BK.

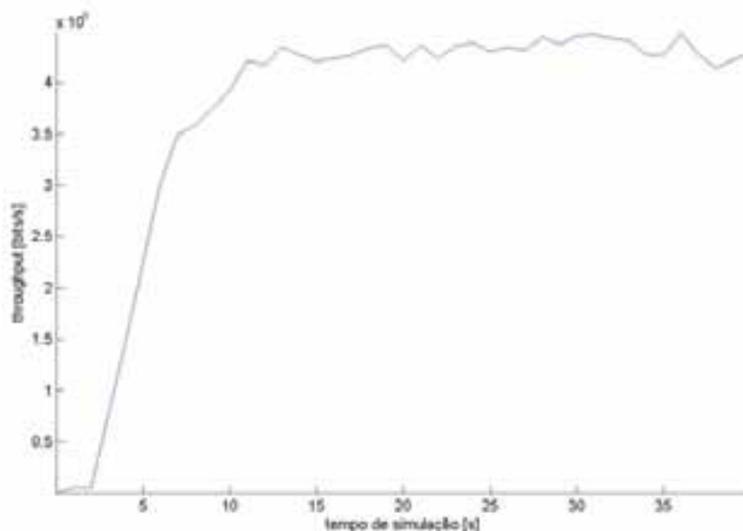
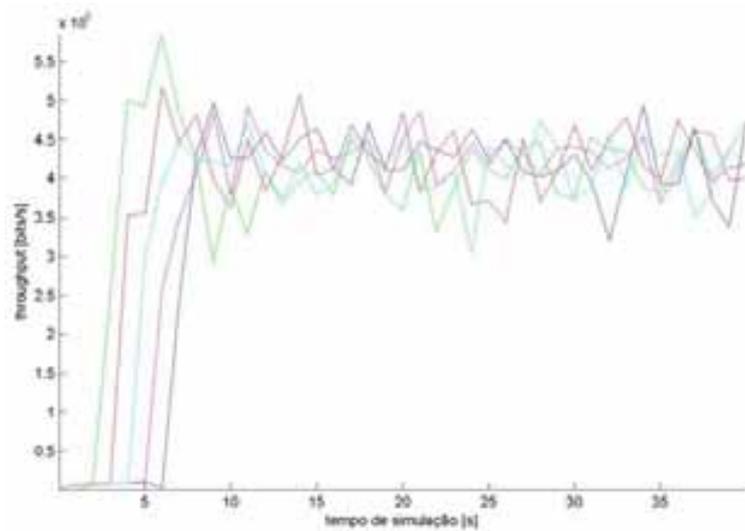


Figura 5.6 – *Throughput* agregado do EDCA com AC_BK.

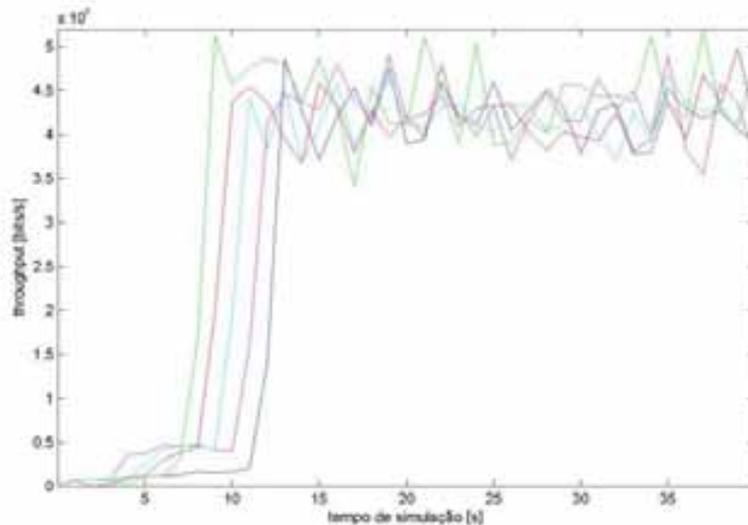
Comparando o gráfico da Figura 5.6 com o gráfico da Figura 5.2 verifica-se que o EDCA apresenta um *throughput* agregado maior com a prioridade de acesso AC_BK com relação à prioridade de acesso AC_VO. Este efeito deve-se ao fato de que o tamanho da janela de contenção CW utilizada para o cálculo do *Backoff* aleatório é inversamente proporcional ao nível de prioridade conforme a Tabela 5.1.

O *throughput* agregado do DCFAH, conforme o gráfico da Figura 5.5, é muito semelhante ao *throughput* agregado do EDCA, conforme o gráfico da Figura 5.6, para a prioridade de acesso AC_BK.

Os gráficos (a) e (b) da Figura 5.7 apresentam o *throughput* individual do DCFHA para a prioridade de acesso AC_BK, o gráfico (a) apresenta o *throughput* das estações 0, 1, 2, 3 e 4 e o gráfico (b) apresenta o *throughput* das estações 5, 6, 7, 8 e 9.



(a)

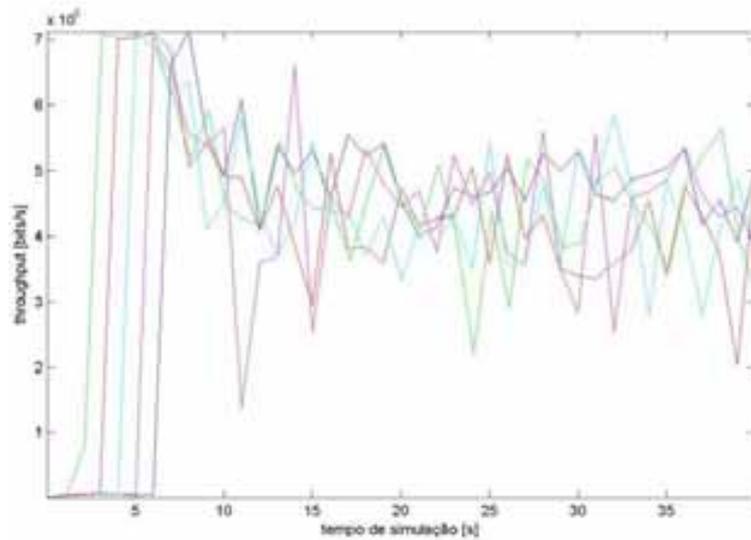


(b)

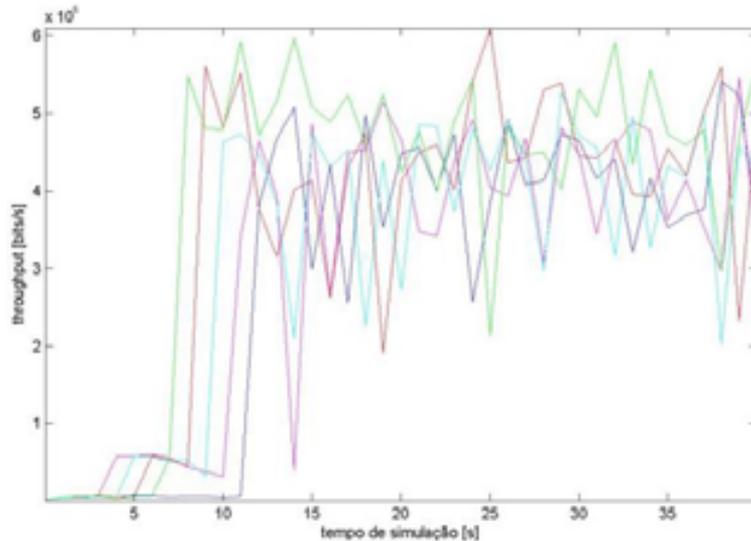
Figura 5.7 – *Throughput* individual para o DCFAH com prioridade de acesso AC_BK em (a) para as estações 0, 1, 2, 3 e 4 e em (b) par a as estações 5, 6, 7, 8 e 9.

O gráfico (a) apresentado na Figura 5.7 mostra que o decréscimo do *throughput* individual, conforme a quantidade de estações transmissoras com reservas, do DCFAH é menor para prioridade de acesso AC_BK do que para a prioridade de acesso AC_VO. Isto ocorre porque durante o período de BE depende do EDCA. Os gráficos (a) e (b) da Figura 5.7 mantêm o padrão dos gráficos (a) e (b) da Figura 5.3 demonstrando que o *throughput* individual de cada estação do DCFAH não depende da prioridade de acesso quando todas as estações utilizam o mesmo nível de prioridade de acesso.

Nos gráficos (a) e (b) da Figura 5.8 tem-se o *throughput* do EDCA para a prioridade de acesso AC_BK, o gráfico (a) apresenta o *throughput* das estações 0, 1, 2, 3 e 4 e o gráfico (b) o *throughput* das estações 5, 6, 7, 8 e 9.



(a)



(b)

Figura 5.8 – *Throughput* individual para o DCFAH com prioridade de acesso AC_BK em (a) para as estações 0, 1, 2, 3 e 4 e em (b) para as estações 5, 6, 7, 8 e 9.

O gráfico (a) apresentado na Figura 5.8 mostra que o decréscimo do *throughput* individual, conforme a quantidade de estações transmissoras com reservas, do EDCA para prioridade

AC_BK é semelhante ao apresentado no gráfico (a) da Figura 5.4 para prioridade AC_VO. Os gráficos (a) e (b) da Figura 5.8 apresentam a amplitude de oscilação maior que a amplitude de oscilação apresentada nos gráficos (a) e (b) da Figura 5.4 para o EDCA com prioridade de acesso AC_VO, conclui-se assim que o *throughput* individual de cada estação do EDCA não mantém uniformidade entre prioridades de acesso diferentes quando todas as estações utilizam o mesmo nível de prioridade de acesso.

Comparando os gráficos (a) e (b) da Figura 5.7 com os gráficos (a) e (b) da Figura 5.8 verifica-se que a amplitude de oscilação do EDCA é maior que a amplitude de oscilação do DCFAH quando todas as estações da rede utilizam a prioridade de acesso AC_BK.

As simulações realizadas até agora demonstram que o DCFAH apresenta independência entre a prioridade de acesso e o *throughput* agregado e individual das estações tanto no valor do *throughput* quanto na amplitude de oscilação dos mesmos. O EDCA apresenta um melhor desempenho do *throughput* agregado quando o nível de prioridade é menor e a amplitude de oscilação do *throughput* individual das estações é inversamente proporcional à prioridade de acesso.

Já verificado que o *throughput* do DCFAH apresenta um rendimento ligeiramente superior ao *throughput* do EDCA quando a rede encontra-se saturada e todas as estações da rede transmitem com o mesmo nível de prioridade de acesso, agora é necessário verificar o desempenho de *throughput* do DCFAH quando as estações da rede transmitem com níveis de prioridade diferentes. Para este teste foram realizadas as simulações 5 e 6 da Tabela 5.2 utilizando os quatro níveis de prioridade de acesso do EDCA.

O gráfico do *throughput* agregado do DCFAH com os quatro níveis de prioridade de acesso é apresentado na Figura 5.9. Comparando os gráficos das Figuras 4.1, 4.5 e 4.9 verifica-se que o desempenho de *throughput* do DCFAH é independente do tipo de prioridade de acesso utilizada pelas estações.

O desempenho do *throughput* agregado do EDCA com os quatro níveis de prioridade é apresentado no gráfico da Figura 5.10. Comparando os gráficos das Figuras 4.2, 4.6 e 4.10 observa-se que o desempenho do *throughput* agregado do EDCA é melhor quando todas as estações da rede utilizam prioridade de acesso AC_BK e pior quando todas as estações

utilizam a prioridade de acessos AC_VO ou os quatro níveis de prioridade ao mesmo tempo.

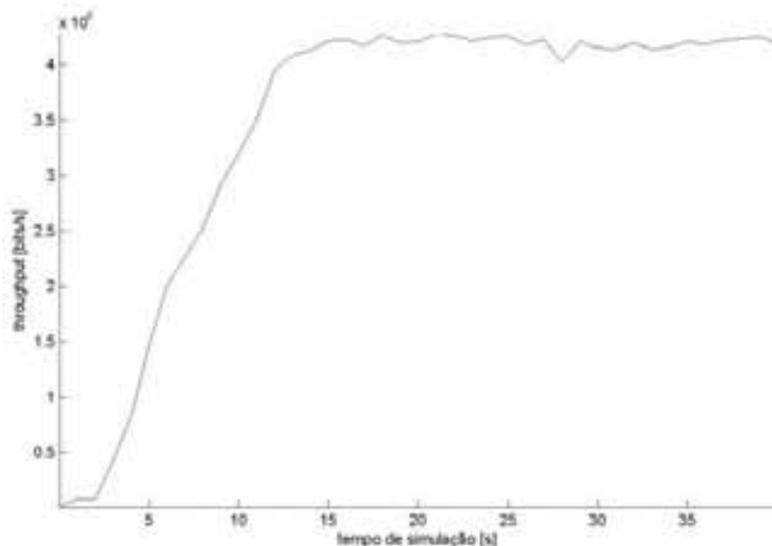


Figura 5.9 – *Throughput* agregado do DCFAH com os quatro níveis de prioridade.

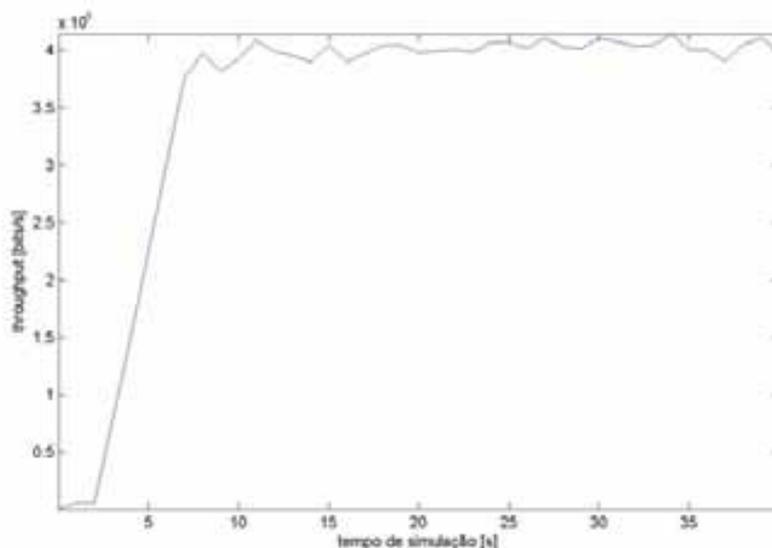
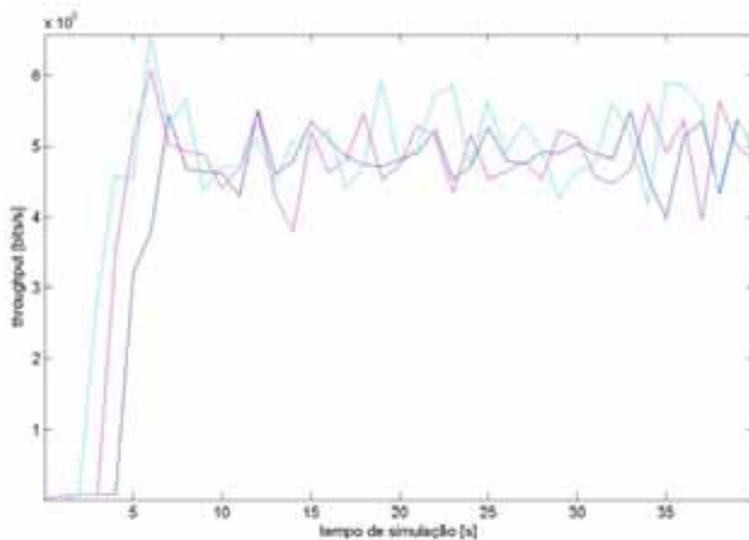


Figura 5.10 – *Throughput* agregado do EDCA com os quatro níveis de prioridade.

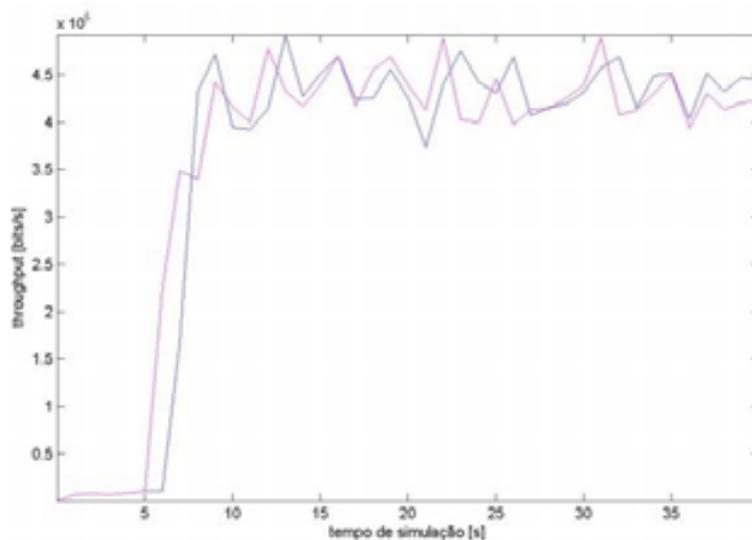
Comparando o gráfico da Figura 5.9 com o gráfico da Figura 5.10 conclui-se que o desempenho do *throughput* do DCFAH é superior ao desempenho de *throughput* do EDCA quando as estações da rede utilizam os quatro níveis de prioridade de acesso. Este resultado condiz com o esperado devido às colisões e o *Backoff* aleatório, executado antes do acesso ao meio, do EDCA e o DCFAH, apesar do *overhead* de gerenciamento das

reservas e sincronismo, garante os *Slots* com QoS para as estações transmitirem os quadros de dados livre de contenção.

As Figura 5.11 e 4.12 apresenta os gráficos para o desempenho de *throughput* individual do DCFAH para transmissões de dados com os quatro níveis de prioridade.

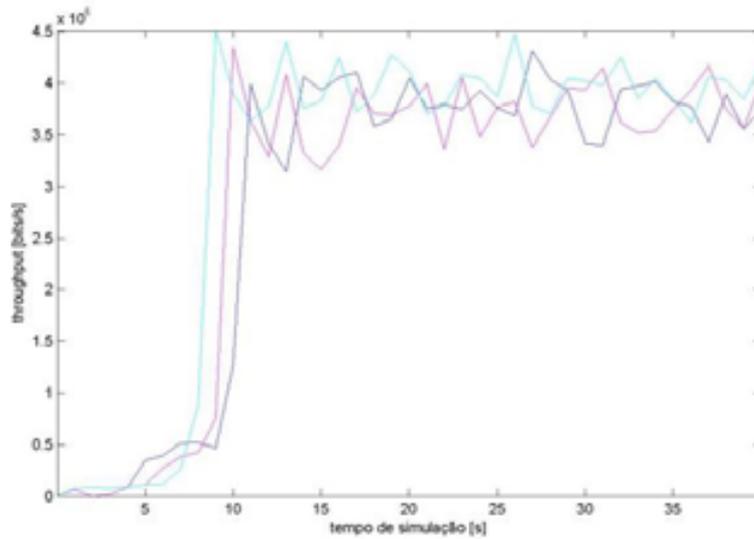


(a)

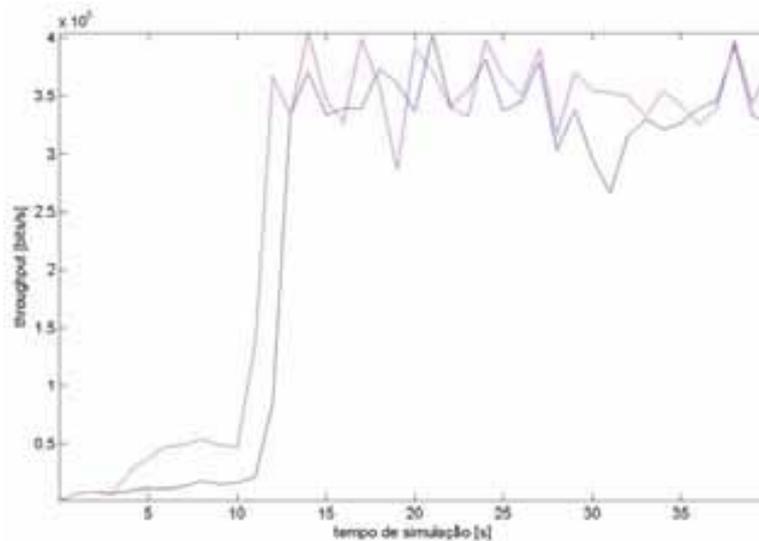


(b)

Figura 5.11 – *Throughput* individual para o DCFAH para prioridades AC_VO e AC_VI em (a) estações 0, 1 e 2 com prioridade AC_VO e em (b) estações 3 e 4 com prioridade AC_VI.



(a)



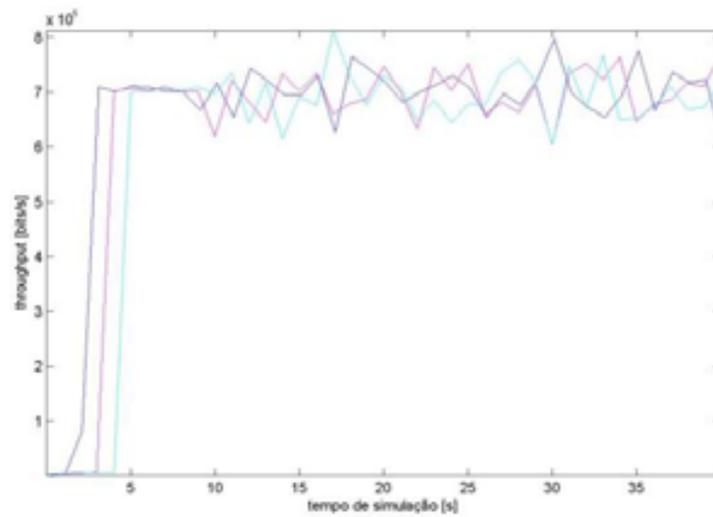
(b)

Figura 5.12 – *Throughput* individual para o DCFAH para prioridades AC_BE e AC_BK em (a) estações 5, 6, e 7 com prioridade AC_BE e em (b) estações 8 e 9 com prioridade AC_BK.

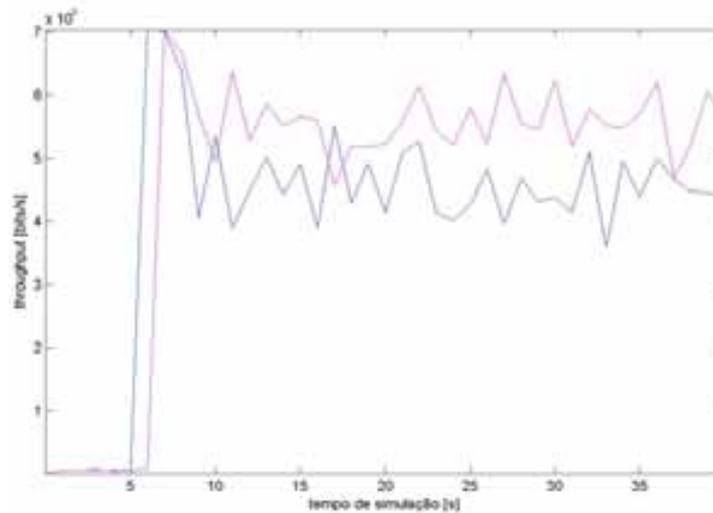
Os gráficos (a), (b) da Figura 5.11 e (a) e (b) da Figura 5.12 mostram que o desempenho de *throughput* do DCFAH varia proporcionalmente a prioridade de acesso. Isto ocorre devido ao intervalo de transmissão para tráfego BE que utiliza o método de acesso EDCA que prioriza a natureza da informação conforme a Tabela 5.2. A diferença do *throughput* da prioridade de acesso AC_VO para a AC_BK é de aproximadamente 150 kbps. O período de BE possui dois intervalos *Beacons*, conforme Tabela 5.3, que corresponde a 25% do tempo total de transmissão do SuperFrame.

Comparando os gráficos (a) e (b) apresentados na Figura 5.11 e os gráficos (a) e (b) apresentados na Figura 5.12 com os gráficos (a) e (b) apresentados na Figuras 4.3 e os gráficos (a) e (b) apresentados na Figura 4.7 observa-se que desempenho de *throughput* do DCFAH sofre uma pequena degradação conforme diminui o nível de prioridade de acesso ao meio devido ao período de BE.

As Figuras 4.13 e 4.14 apresentam desempenho do *throughput* individual do EDCA para a transmissão de dados com os quatro níveis de prioridade.

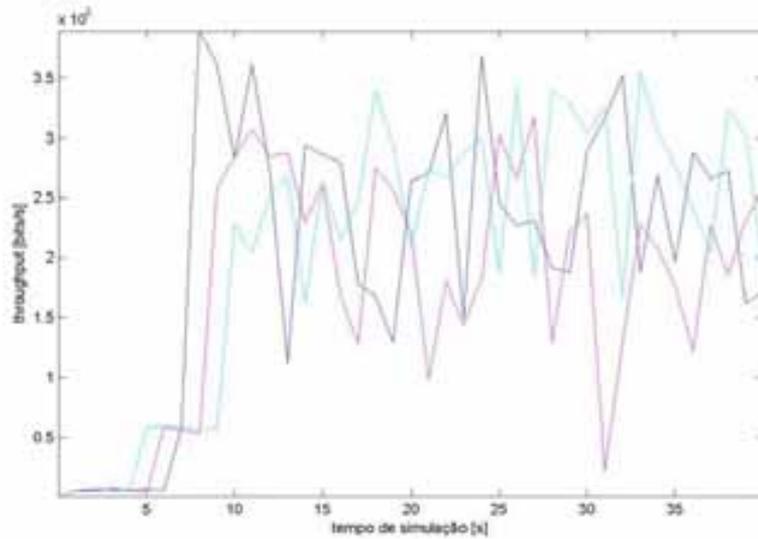


(a)

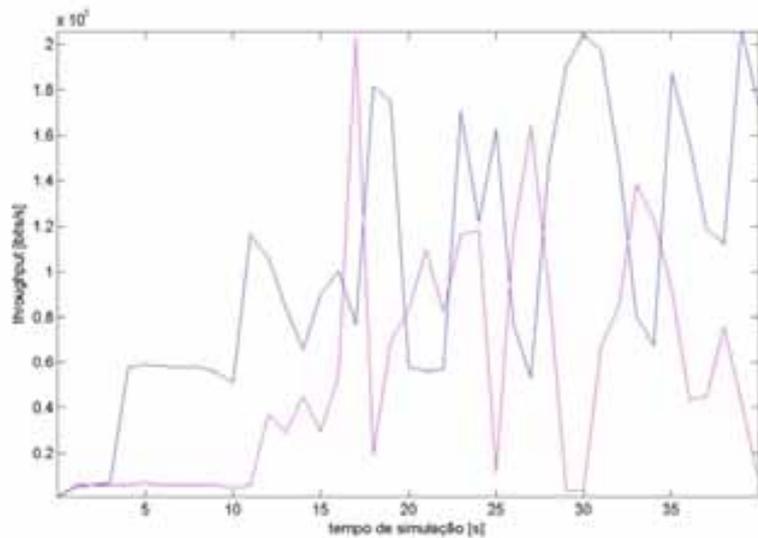


(b)

Figura 5.13 – Throughput individual para o EDCA para prioridades AC_VO e AC_VI em (a) estações 0, 1 e 2 com prioridade AC_VO e em (b) estações 3 e 4 com prioridade AC_VI



(a)



(b)

Figura 5.14 – Throughput individual para o EDCA para prioridades AC_BE e AC_BK em (a) estações 5, 6, e 7 com prioridade AC_BE e em (b) estações 8 e 9 com prioridade AC_BK.

Os gráficos (a), (b) da Figura 5.13 e (a) e (b) da Figura 5.14 mostram que o EDCA apresenta o *throughput* na ordem de 700 kbps para as estações com prioridade AC_VO, o *throughput* na ordem de 500 kbps para as estações com prioridade AC_VI, o *throughput* em torno de 200 a 250 bps para as estações com prioridade AC_BE e o *throughput* em torno de 60 a 100 kbps para as estações com prioridade AC_BK. Este resultado está em

conformidade com o esperado visto que o EDCA prioriza tráfegos conforme as classes definidas na Tabela 5.1.

O DCFAH apresenta um desempenho de *throughput* na ordem de 500 kbps para as estações com prioridade AC_VO, o *throughput* na ordem de 450 kbps para as estações com prioridade AC_VI, o *throughput* na ordem de 400 kbps para as estações com prioridade AC_BE e o *throughput* na ordem de 350 kbps para as estações com prioridade AC_BK conforme os gráficos (a) e (b) da Figura 5.11 e os gráficos (a) e (b) da Figura 5.12.

Comparando os diferentes desempenhos de *throughput* do DCFAH e do EDCA para uma rede IEEE 802.11 com quatro níveis de prioridades, conforme as simulações 5 e 6 da Tabela 5.3, conclui-se que o DCFAH apresenta um mecanismo de distribuição do *throughput* entre as estações da rede mais eficiente que o EDCA, garantindo o *Slot* de transmissão reservado de cada estação de forma independente à natureza da informação transmitida pela estação.

A gradação de serviço oferecida pelo EDCA é justa quando todas as estações da rede transmitem dados em todos os níveis de prioridade e disputam o meio entre si de forma igual. Quando cada estação utiliza um nível diferente de prioridade de acesso ao meio a gradação de serviço do EDCA não é justo na divisão da largura de banda entre as estações.

Os gráficos apresentados nas Figuras 5.11 e 5.12 mostram que o DCFAH cumpre a tarefa de divisão da largura de banda entre as estações da rede garantindo um *throughput* mínimo para cada estação. Tratando-se internamente na estação a gradação dos níveis de prioridade de acesso para os dados transmitidos o DCFAH apresenta um mecanismo de controle de acesso ao meio justo na divisão da largura de banda entre as estações de uma rede. Isto ocorre mesmo em condições como nos testes realizados com a utilização de toda a capacidade da rede.

5.3.2 Análise do atraso

Para a análise do atraso da rede também foram utilizadas as simulações 5 e 6 da Tabela 5.2 com os quatro níveis de prioridade de acesso do EDCA. As Figuras 5.15 e 5.16 apresentam

os gráficos de atraso introduzido, respectivamente, pelo DCFAH e pelo EDCA para os quatro níveis de prioridade.

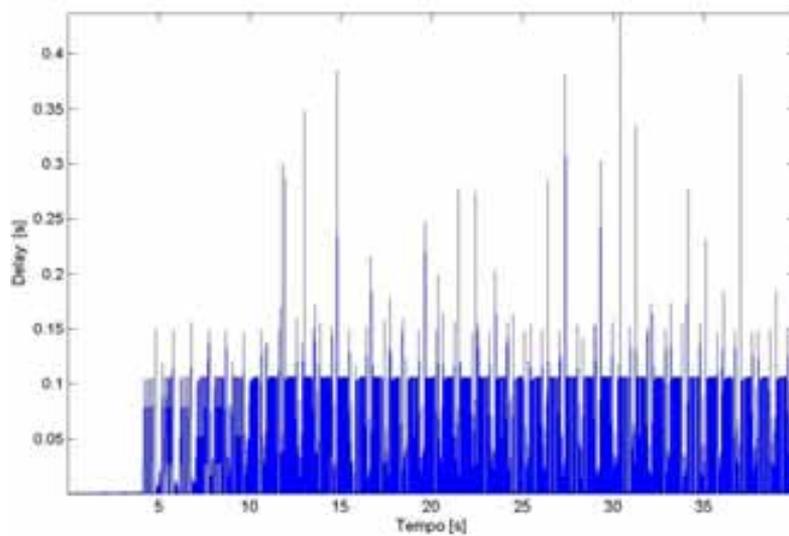


Figura 5.15 – Atraso introduzido pelo DCFAH para todas as prioridades.

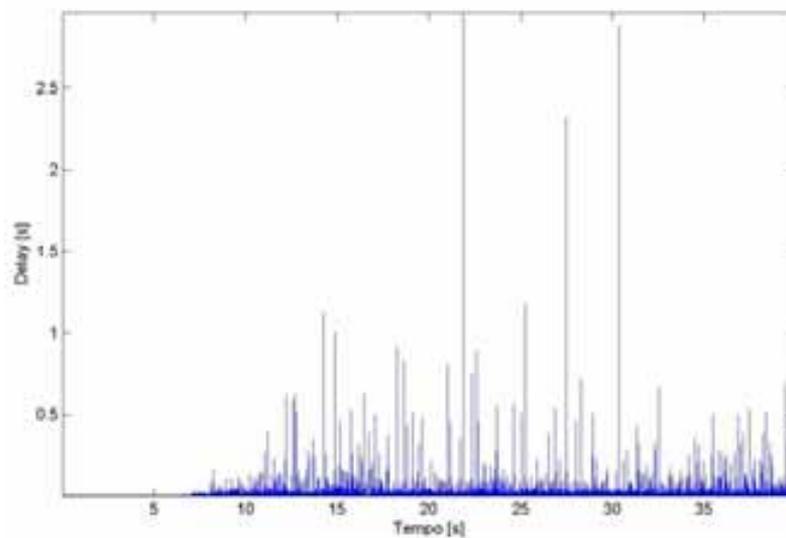
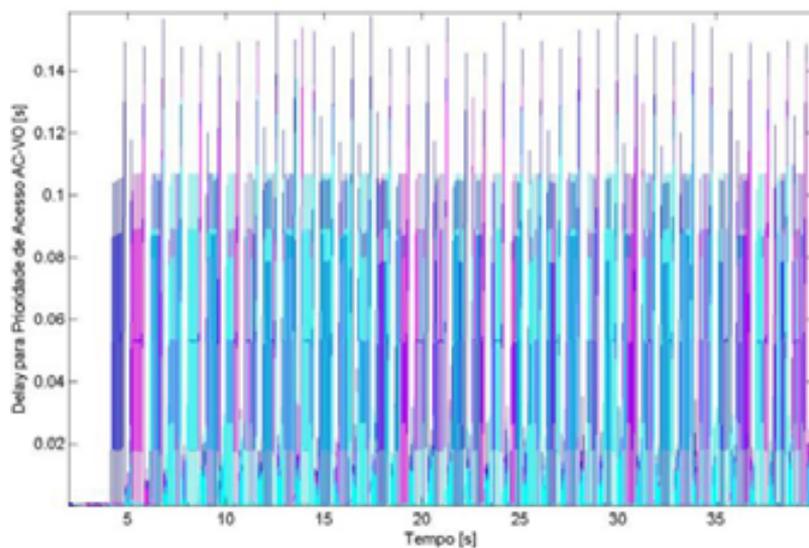


Figura 5.16 – Atraso introduzido pelo EDCA para todas as prioridades.

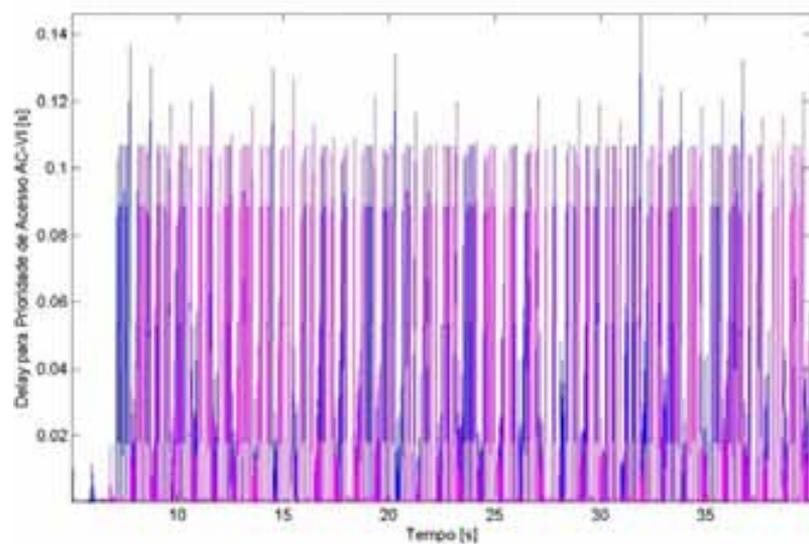
Comparado os gráficos das Figuras 5.15 e 5.16 verifica-se que o valor médio do atraso apresentado pelo DCFAH é de 0,1 segundos. O atraso do EDCA apresenta picos muito elevados com relação ao valor médio, chegando a atingir valores de 1 a 3 segundos superando em muito a média do atraso. Os picos de *delay* do DCFAH possuem valores de 0,3 a 0,4 segundos ficando mais próximos do valor médio do que os picos do EDCA. O

DCF_{FAH} apresenta picos menos elevados que o EDCA porque garante a transmissão para todas as estações independentemente da natureza da informação transmitida .

A Figura 5.17 apresenta os gráficos do atraso introduzido pelo DCF_{FAH} para os níveis de prioridade de acesso AC_VO em (a) e AC_VI em (b).



(a)

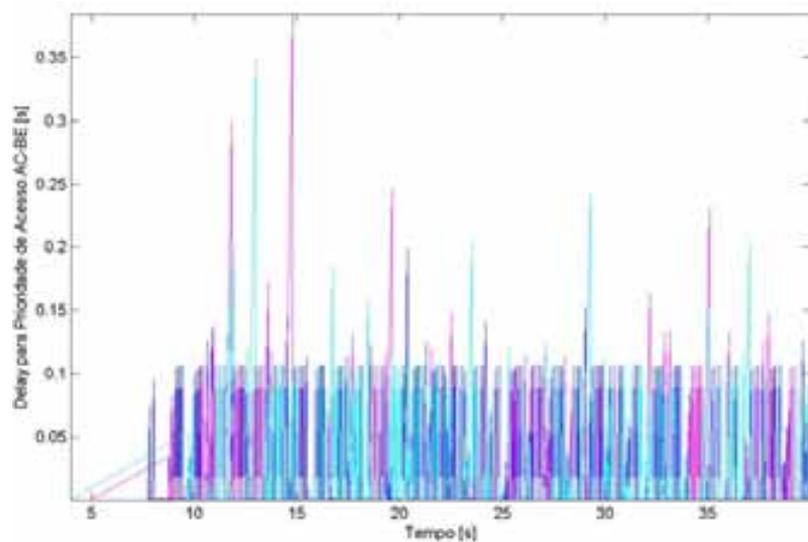


(b)

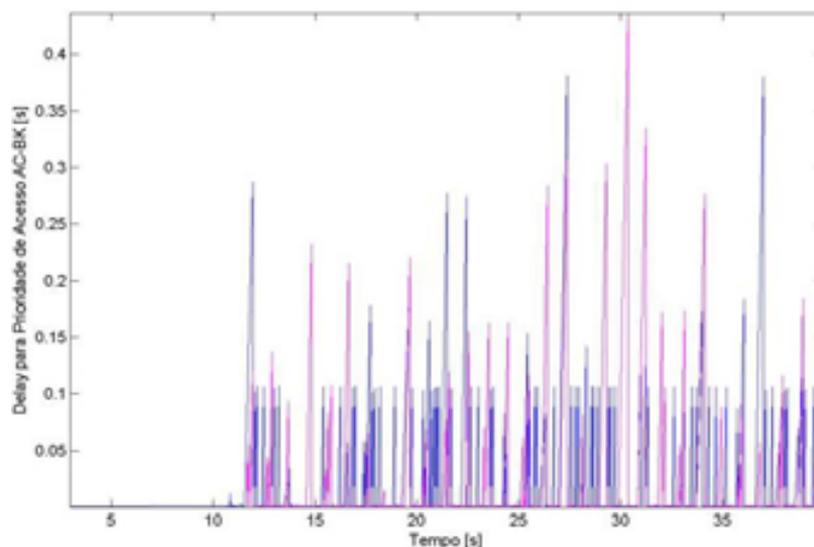
Figura 5.17 – Atraso introduzido pelo DCF_{FAH} para prioridade AC_VO e AC_VI em (a) estações 0, 1, e 2 com prioridade AC_VO e em (b) estações 3 e 4 com prioridade AC_VI.

Os gráficos (a) e (b) da Figura 5.17 mostram que o valor médio do *delay* introduzido pelo DCFAH para as prioridades de acesso AC_VO e AC_VI estão próximos ao valor médio do atraso do DCFAH e apresentam picos com amplitudes moderadas.

Os gráficos do atraso introduzido pelo DCFAH para os níveis de prioridade de acesso AC_BE e AC_BK são mostrados na Figura 5.18.



(a)



(b)

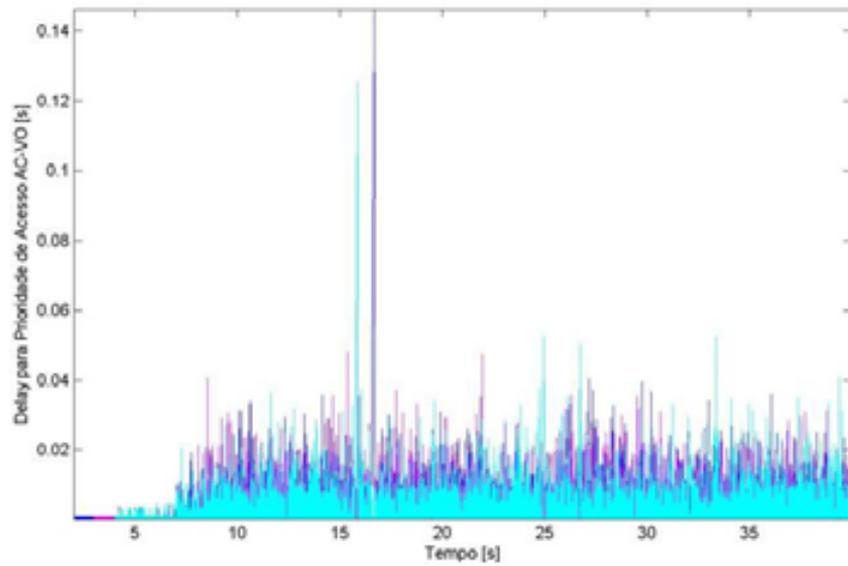
Figura 5.18 – Atraso introduzido pelo DCFAH para prioridade AC_BE e AC_BK. em (a) estações 5, 6 e 7 com prioridade AC_BE e em (b) estações 8 e 9 com prioridade AC_BK.

Comparando o gráfico (a) com o gráfico (b) da Figura 5.18 verifica-se que o atraso introduzido pelo DCFAH, para as prioridades de acesso AC_BE e AC_BK, também está próximo do atraso médio apresentando apenas a amplitude dos picos mais elevada. Comparando os gráficos (a) e (b) da Figura 5.17 com os gráficos (a) e (b) da Figura 5.18 conclui-se que o atraso introduzido pelo DCFAH possui um valor médio independente da prioridade de acesso e a amplitude dos picos varia conforme a prioridade de acesso.

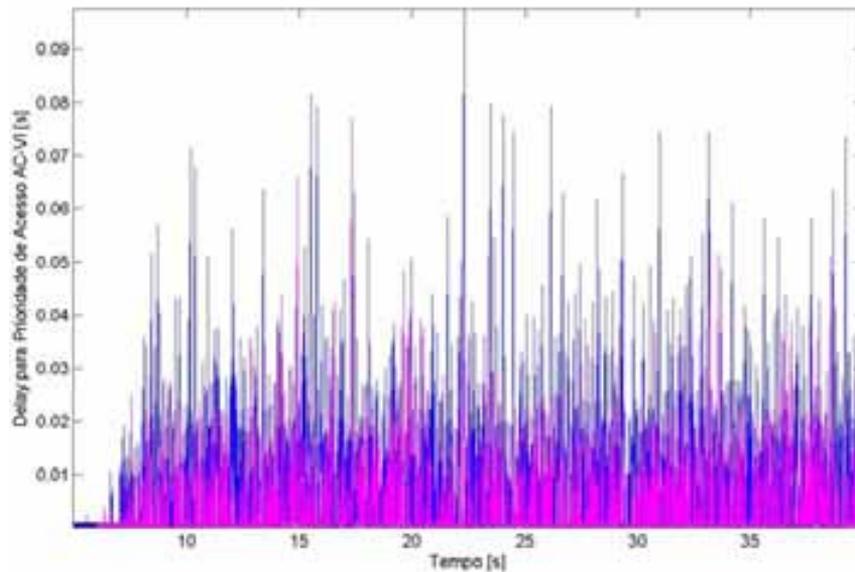
A variação da amplitude dos picos conforme diminui o nível de prioridade ocorre porque o período de BE utiliza o EDCA, que como se pode ver nas Figuras 5.19 e 5.20 verifica-se que o atraso é inversamente proporcional ao nível da prioridade de acesso utilizada.

A Figura 5.19 apresenta os gráficos do atraso introduzido pelo EDCA para os níveis de prioridade de acesso AC_VO em (a) e AC_VI em (b). Os gráficos (a) e (b) da Figura 5.19 mostram que o atraso médio do EDCA, para as prioridades de acesso AC_VO e AC_VI, é de 0,015 segundos. Comparando os gráficos (a) e (b) da Figura 5.19 com os gráficos (a) e (b) da Figura 5.17 conclui-se que o EDCA apresenta um atraso médio menor que o DCFAH para as prioridades de acesso AC_VO e AC_VI. Isto ocorre porque a janela de contenção do *backoff* é menor para as prioridades AC_VO e AC_VI garantindo um tempo de acesso pequeno para estas prioridades e consequentemente o atraso apresenta um bom desempenho. A desvantagem é que as prioridades AC_BE e AC_BK utilizam uma janela de contenção maior tornando o tempo de acesso dessas prioridades grandes e consequentemente o atraso apresenta um desempenho inferior ao experimentado pelas prioridades AC_VO e AC_VI.

O EDCA também apresenta picos de atraso muito acima da sua própria média e os picos de atraso do DCFAH estão mais próximos da média do próprio DCFAH, mas em valores absolutos os picos máximos de atraso do EDCA e do DCFAH são muito próximos chegando ao valor de 0,14 segundos. Os picos ocorrem no EDCA devido ao período de contenção para acesso ao meio realizado mais o tempo de transmissão dos quadros das outras estações, os picos mais elevados ocorrem quando todas as estações da rede possuem quadros para transmitir o que causa colisões e retransmissões atrasando ainda mais a entrega dos dados.



(a)

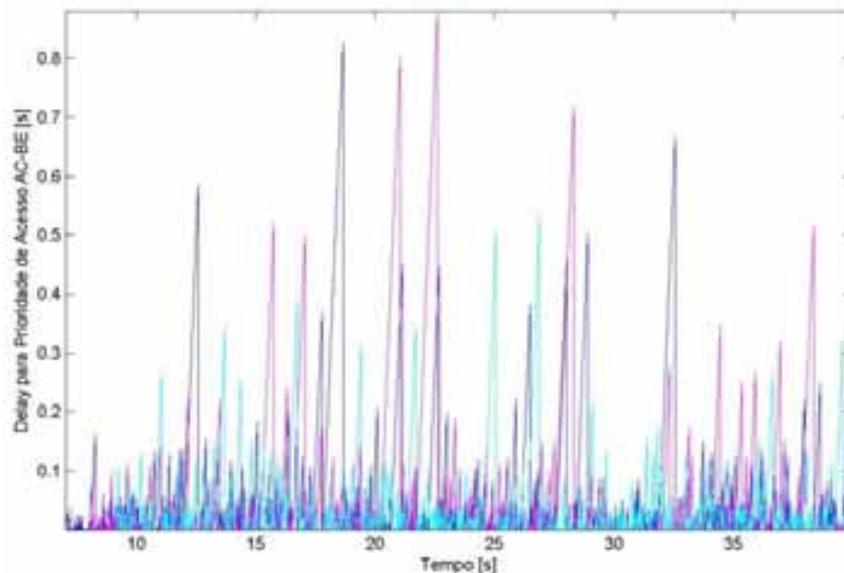


(b)

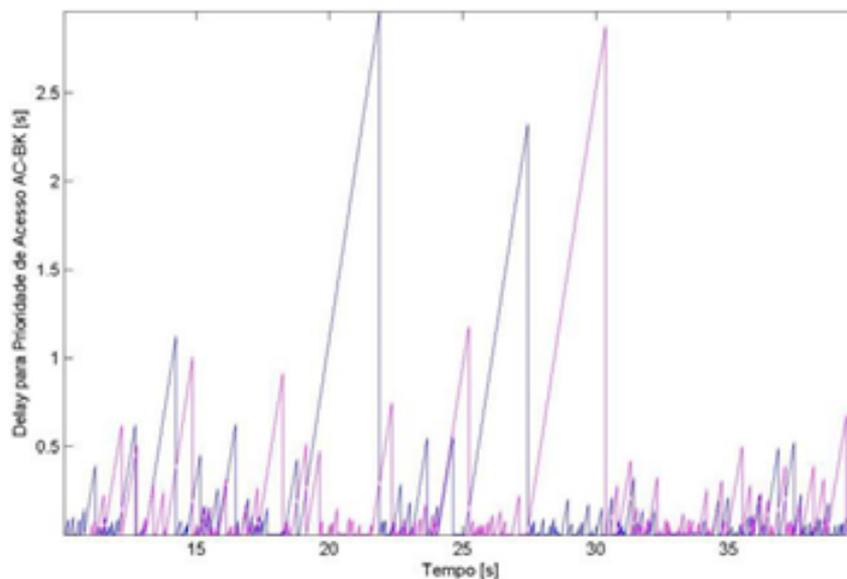
Figura 5.19 – Atraso introduzido pelo EDCA para prioridade AC_VO e AC_BK. em (a) estações 0, 1, e 2 com prioridade AC_VO e em (b) estações 3 e 4 com prioridade AC_VI.

Os gráficos do atraso introduzido pelo EDCA para os níveis de prioridade de acesso AC_BE e AC_BK são mostrados na Figura 5.20. Os gráficos (a) e (b) da Figura 5.20 mostram, respectivamente, que o valor médio do atraso para a prioridade AC_BE é aproximadamente 0,1 segundos e para a prioridade AC_BK é aproximadamente 0,2 segundos, comparando esses valores com o atraso médio do DCFAH de 0,1 segundos,

tanto para a prioridade AC_BE quanto para a AC_BK, conclui-se que o atraso introduzido pelo DCFAH está uniformemente distribuído e o atraso introduzido pelo EDCA depende diretamente da prioridade de acesso utilizada.



(a)



(b)

Figura 5.20 – Atraso introduzido pelo DCFAH para prioridade AC_BE e AC_BK. em (a) estações 5, 6 e 7 com prioridade AC_BE e em (b) estações 8 e 9 com prioridade AC_BK.

Comparando os gráficos (a) e (b) da Figura 5.19 com os gráficos (a) e (b) da Figura 5.20 verifica-se que o atraso do EDCA apresenta valores médios muito bons para as prioridades

de acesso mais altas e degrada-se à medida que a prioridade de acesso avança para os níveis mais baixos. Também nota-se que as prioridades de acesso AC_BE e AC_BK apresentam amplitudes de oscilação mais elevadas e, principalmente para a prioridade AC_BK, o atraso não está uniformemente distribuído. Isto ocorre devido a contação do *backoff* utilizado por estes níveis de prioridade.

Comparando-se os gráficos (a) e (b) de todas as Figuras 5.17, 5.18, 5.19 e 5.20 conclui-se que o atraso do EDCA é inversamente proporcional à prioridade de acesso e o atraso apresentado pelo DCFAH está uniformemente distribuído entre todos os níveis de prioridade de acesso. Os dois métodos de acesso ao meio apresentam picos de atraso com amplitudes mais elevadas à medida que a prioridade de acesso diminui, mas os picos do atraso do DCFAH são menores que os picos do atraso do EDCA.

5.3.3 Análise do *jitter*

Para a análise do *jitter* também foram utilizadas as simulações 5 e 6 da Tabela 5.2 com os quatro níveis de prioridade de acesso do EDCA. As Figuras 5.21 e 5.22 apresentam respectivamente, os gráficos do *jitter* para o DCFAH e para o EDCA.

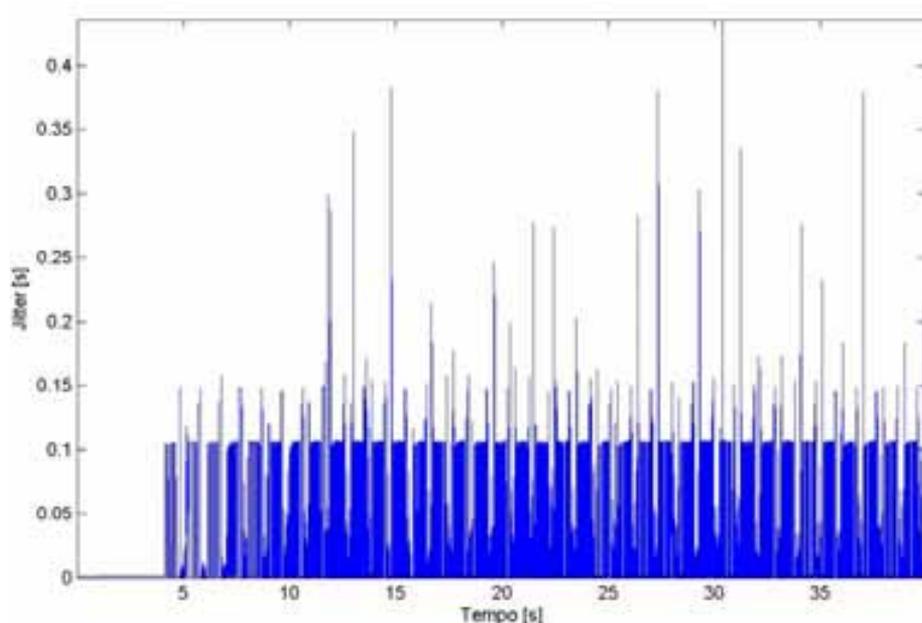


Figura 5.21 – *Jitter* do DCFAH.

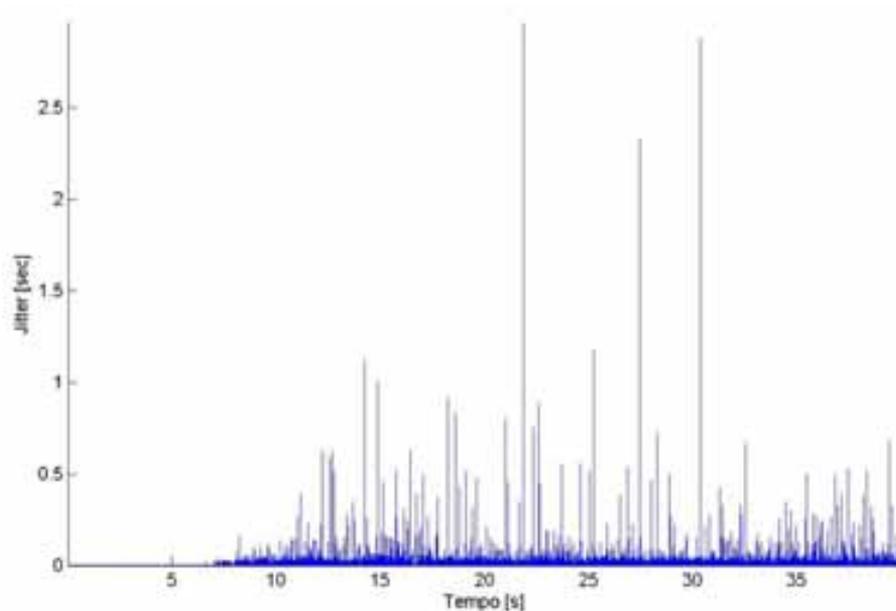
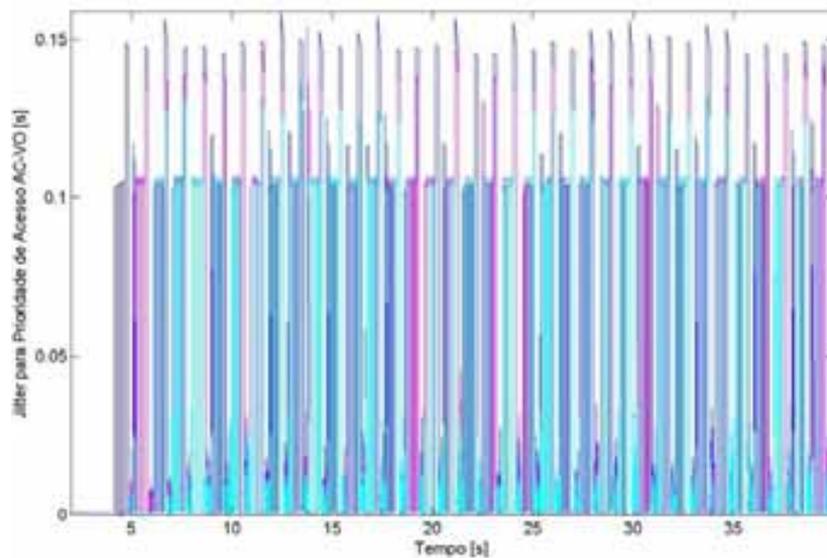


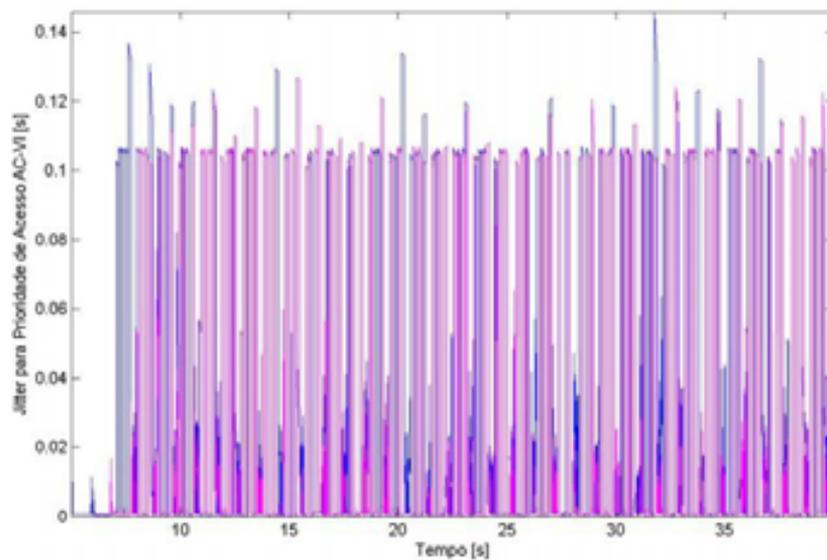
Figura 5.22 - *Jitter* do EDCA.

Através do gráfico apresentado pela Figura 5.21 obtém-se o valor médio do *jitter* do DCFAH de 0,1 segundos e picos com até 0,4 segundos de amplitude. O gráfico apresentado pela Figura 5.22 demonstra que o valor médio do *jitter* do EDCA está abaixo de 0,1 segundos e picos com amplitudes maiores que 2,5 segundos.

Os gráficos (a) e (b) apresentados na Figura 5.23 mostram, respectivamente, o *jitter* do DCFAH para as prioridades de acesso AC_VO e AC_VI. Comparando os gráficos (a) e (b) da Figura 5.23 verifica-se que o *jitter* médio do DCFAH para as prioridades AC_VO e AC_VI é igual ao *jitter* médio do DCFAH com valor de 0,1 segundos. Isto ocorre porque o DCFAH garante os *Slots* reservados para todas as estações que efetuaram as suas reservas distribuindo desta forma o *jitter* médio para todos os níveis de prioridade de acesso porque todas as estações possuem reservas iguais.



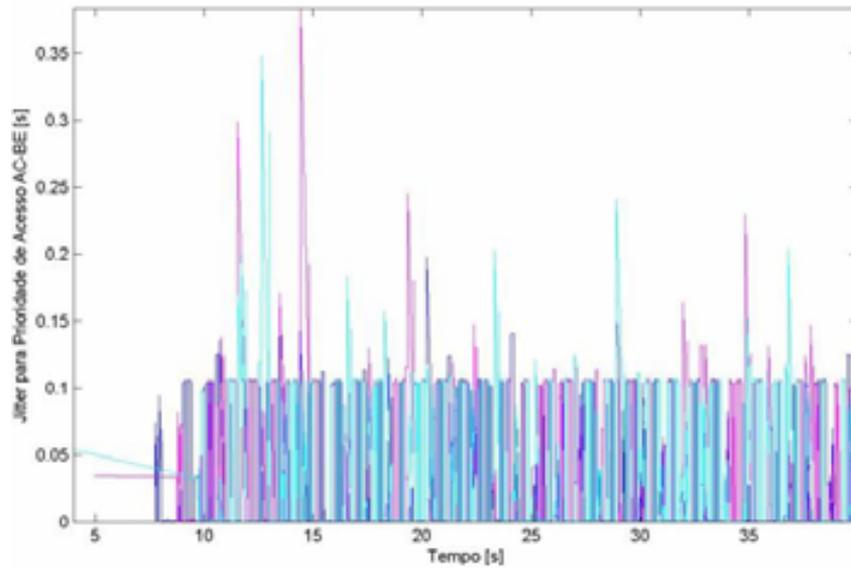
(a)



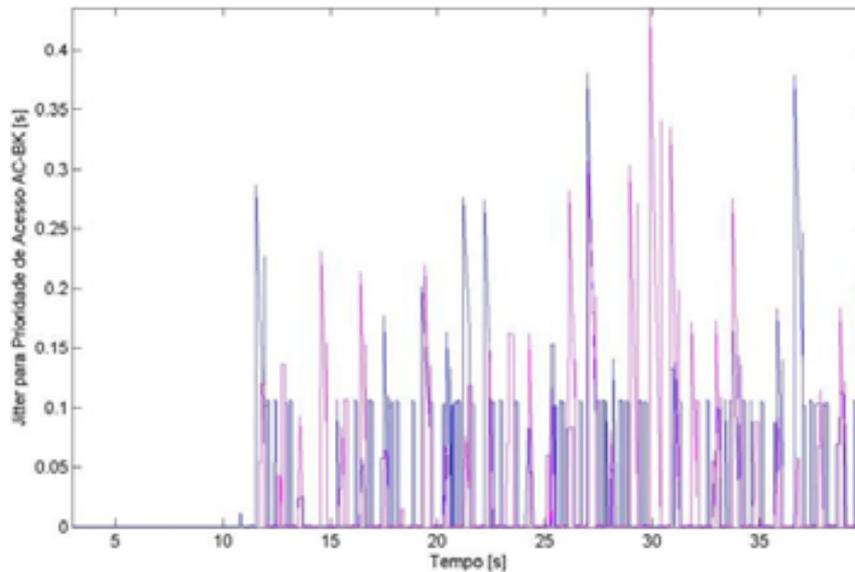
(b)

Figura 5.23 – *Jitter* do DCFAH para prioridades AC_VO e AC_VI em (a) estações 0, 1, e 2 com prioridade AC_VO e em (b) estações 3 e 4 com prioridade AC_VI.

A Figura 5.24 apresenta os gráficos do *jitter* do DCFAH em (a) para a prioridade AC_BE e em (b) para a prioridade AC_BK.



(a)



(b)

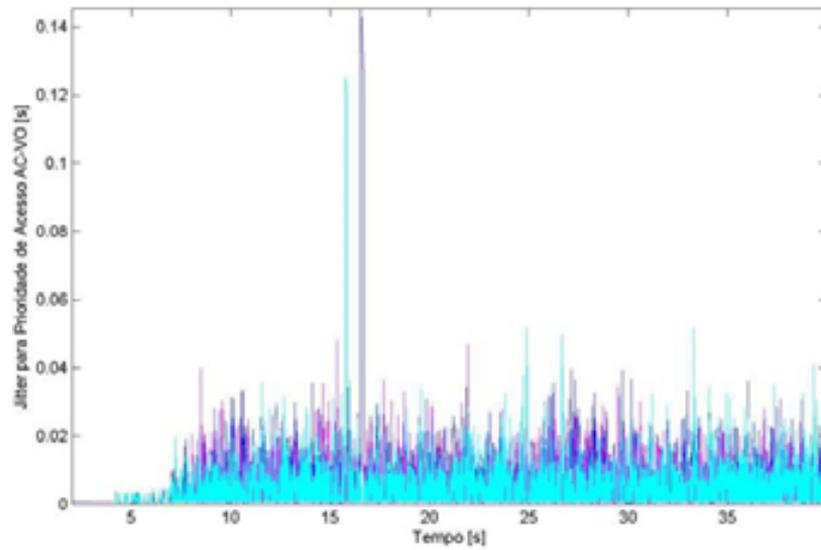
Figura 5.24 – *Jitter* do DCFAH para prioridade AC_BE e AC_BK.

em (a) estações 5, 6, e 7 com prioridade AC_BE e em (b) estações 8 e 9 com prioridade AC_BK.

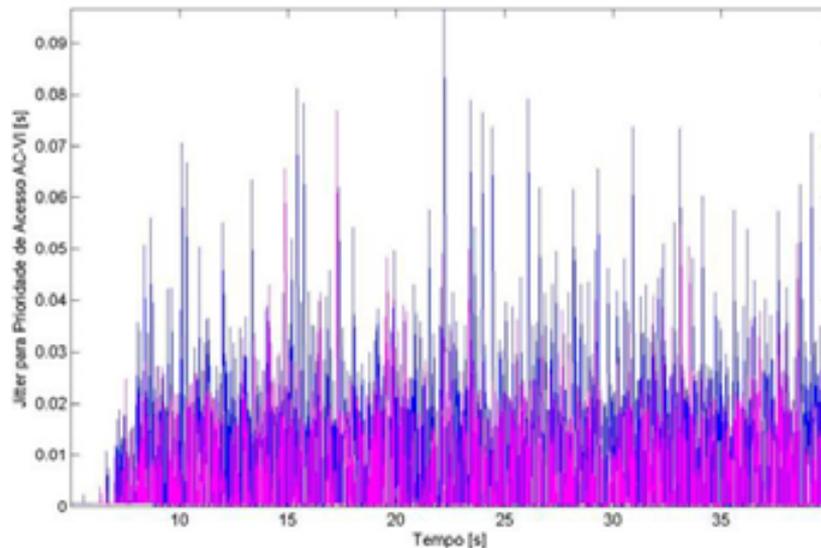
Os gráficos apresentados nas Figura 5.24 mostram que o *jitter* do DCFAH para as prioridades AC_BE e AC_BK apresenta o valor médio de 0,1 segundos e comparando com os gráficos (a) e (b) Figura 5.24 conclui-se que o valor médio do *jitter* do DCFAH não depende do nível de prioridade porque o DCFAH disponibiliza os *Slots* com QoS para as estações efetuarem as suas transmissões livre de contenção, desta forma o *jitter* do DCFAH está relacionado com o tamanho do *Slot* com QoS da estação e com a frequência de

ocorrência dos *slots* com QoS, como estes parâmetros dependem da quantidade de estações com reservas na rede o *jitter* de todas prioridades não está relacionado com o *backoff* de cada prioridade como ocorre no EDCA. Também se verifica que o *jitter* do DCFAH apresenta picos inversamente proporcionais ao nível de prioridade.

A Figura 5.25 apresenta os gráficos do *jitter* do EDCA para os níveis de prioridade em (a) AC_BE e em (b) AC_BK.



(a)

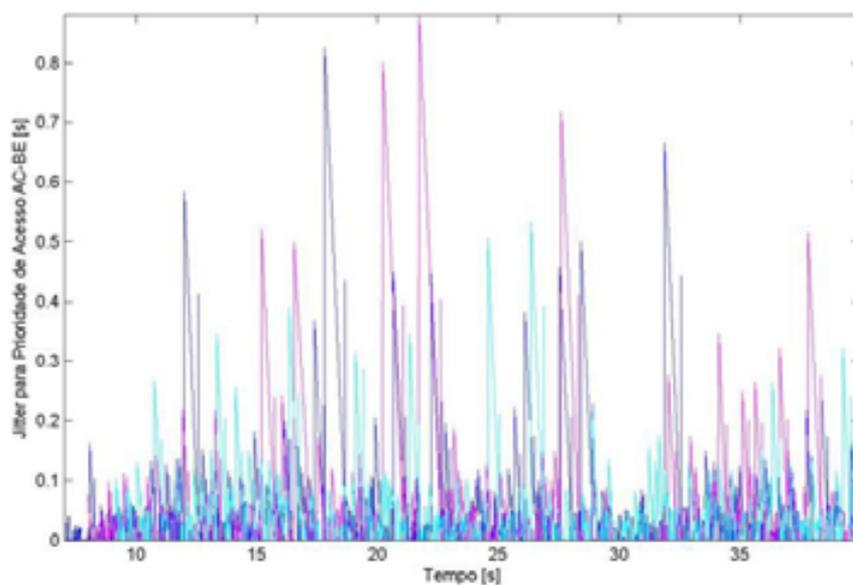


(b)

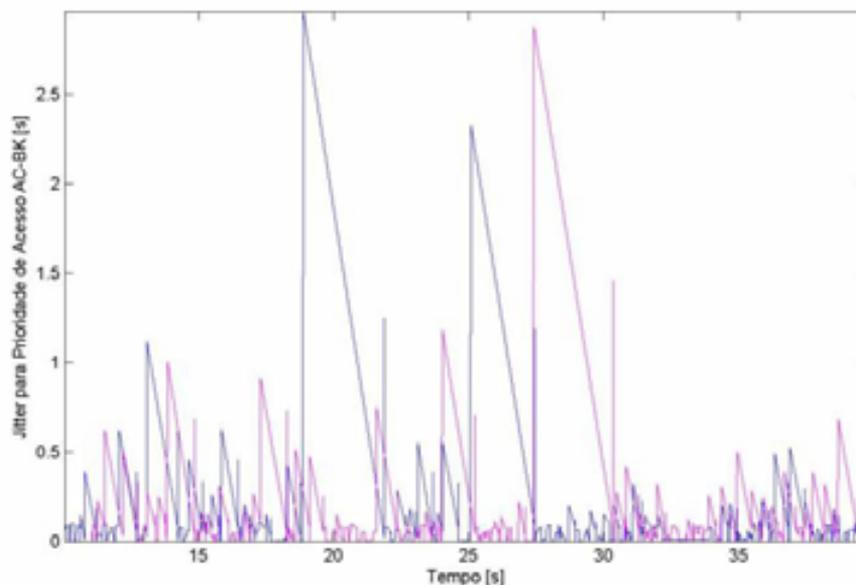
Figura 5.25 – *Jitter* do EDCA para prioridade AC_VO e AC_VI.

em (a) estações 0, 1, e 2 com prioridade AC_BE e em (b) estações 3 e 4 com prioridade AC_BK.

Os gráficos do *jitter* do EDCA para as prioridades AC_BE e AC_BK são apresentados, respectivamente, em (a) e (b) da Figura 5.26.



(a)



(b)

Figura 5.26 – *Jitter* do EDCA para prioridade AC_BE e AC_BK.

em (a) estações 5, 6, e 7 com prioridade AC_BE e em (b) estações 8 e 9 com prioridade AC_BK.

Através dos gráficos (a) e (b) da Figura 5.25 obtém-se o valor médio do *jitter* do EDCA de 0,02 segundos para as prioridades AC_VO e AC_VI. O gráfico (a) Figura 5.25 apresenta

apenas dois picos com valores elevados de 0,12 e 0,14 segundos e valores de pico de 0,04 segundos com maior frequência para a prioridade AC_VO. A prioridade AC_VI apresenta, conforme gráfico (b) da Figura 5.25, uma oscilação maior que a prioridade AC_VO e com picos que varia de 0,04 a 0,09 segundos com maior frequência que os picos para a prioridade AC_VO.

Comparando os gráficos (a) e (b) da Figura 5.26 tem-se que o *jitter* do EDCA está um pouco abaixo de 0,1 segundos para prioridade AC_BE e um pouco acima de 0,1 para a prioridade AC_BK, verifica-se também que a prioridade AC_BE apresenta muitos picos com amplitude que varia de 0,2 a 0,8 segundos, já a prioridade AC_BK apresenta amplitudes de pico que atingem de 0,5 até 3 segundos.

O *jitter* do EDCA depende da prioridade de acesso utilizada, sendo que para prioridades altas o *jitter* é baixo aumentando proporcionalmente ao decréscimo da prioridade. Comparando o *jitter* do DCFAH com *jitter* do EDCA conclui-se que DCFAH distribui o *jitter* de forma uniforme para todos os níveis de prioridade de acesso e o EDCA beneficia os níveis de prioridade mais altos com menores *jitter*. O comportamento do *jitter* do EDCA não é eficaz quando as estações transmitem somente um tipo de tráfego porque as estações que transmitem dados com as prioridades de acesso mais altas tem preferência sobre as estações que transmitem dados com as prioridades de acesso mais baixas.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com o desenvolvimento deste trabalho.

6.1 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma nova proposta de controle de acesso ao meio com QoS para redes IEEE 802.11 operando em modo *Ad Hoc* chamado de DCFAH conforme descrito no capítulo 4. O desempenho do DCFAH foi comparado com o desempenho do EDCA através de simulações realizadas no simulador de redes NS 2 [15] versão 2.29.

O NS 2 não contempla a implementação de todo o padrão IEEE 802.11 sendo necessário a utilização de contribuições de [17] e de [21] para a implementação do EDCA e da transmissão dos quadros *Beacons* do padrão IEEE 802.11 conforme apresentado no capítulo 5.

A DCFAH foi implementada no simulador NS 2, conforme descrito no capítulo 5, e foram analisados o desempenho de *throughput*, atraso e *jitter* quando o meio físico encontra-se saturado, o que foi garantido através de geração do tráfego agregado total maior que os recursos da rede. Os dados para comparação com o EDCA também foram obtidos através de simulações com o NS 2.

Através das comparações do desempenho do DCFAH com o EDCA conclui-se que o EDCA apresenta um excelente mecanismo de gradação de serviço priorizando a natureza da informação, mas não garante que, em situações extremas de saturação da rede, todas as estações tenham um tempo mínimo de transmissão. O EDCA não prioriza os fluxos de maior prioridade contendo os fluxos de menor prioridade atendendo as expectativas do padrão.

O DCFAH garante um tempo mínimo de transmissão para cada estação da rede independente da natureza informação transmitida, garantindo que todas as estações tenham

as suas reservas atendidas. O período de BE do DCFAH permite que as estações dêem preferência aos fluxos de maior prioridade e atendam as necessidades de cada aplicação.

O *Throughput* do EDCA decai à medida que a rede satura e os fluxos com menor prioridade experimentam um *throughput* muito baixo comparado ao *throughput* obtido pelos fluxos de maior prioridade. Isto ocorre devido ao tempo de *backoff* mais alto dos fluxos de menor prioridade o que gera uma contenção maior para estes fluxos e assim os fluxos de menor prioridade transmitem seus dados com uma taxa mais elevada.

O *Throughput* do DCFAH é dividido entre as estações garantindo um mínimo para cada estação conforme a reserva solicitada. A gradação de serviço conforme a natureza da informação é obtida através do período de BE que utiliza o EDCA para acessar ao meio. O DCFAH divide os recursos da rede para todos os tipos de fluxos baseado nas reservas realizadas pelas estações e não pela natureza dos fluxos transmitidos garantindo que nenhuma estação monopolize o meio através da transmissão de fluxos de maior prioridade de que as outras. O *Throughput* total da rede com DCFAH é semelhante ao *throughput* total da rede com o EDCA diferenciando-se apenas na distribuição entre os diferentes níveis de prioridade utilizados.

Os valores médios do atraso e *jitter* do DCFAH são muito próximos aos valores apresentados pelo EDCA, sendo que o DCFAH apresenta picos menores e uma melhor distribuição entre todas as estações da rede. O EDCA apresenta melhores valores de *jitter* e atraso que o DCFAH para os fluxos com maior prioridade, mas o DCFAH mantém os seus valores de *jitter* e atraso quase que independente da prioridade do fluxo, provendo valores médios de atraso e *jitter* constantes.

Os resultados obtidos no capítulo 5 mostram que o DCFAH cumpre a sua proposta de dividir os recursos da rede sem fios IEEE 802.11 com garantias mínimas de QoS para cada estação da rede. Mesmo com o *overhead* de controle do DCFAH o seu desempenho de *throughput*, atraso e *jitter* não foram menores que os desempenhos do EDCA e em vários casos até se mostrou melhor e mais justo entre as diversas prioridades dos fluxos .

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros a este se indica a implementação do mecanismo de empréstimo de *slots* com QoS no simulador ns 2 e a sua análise de desempenho para verificar o seu impacto sobre o *throughput*, o atraso e o *jitter*. Sendo que os *slots* ociosos serem utilizados pelas estações vizinhas o que deve melhorar o desempenho do *Throughput*, do atraso e do *Jitter*.

Como a proposta trabalha com redes *Ad Hoc* também se indica a análise do comportamento do DCFAH em redes *multihops* juntamente com os protocolos de roteamento existentes nestas redes.

Como o padrão IEEE 802.11 possui novas camadas físicas com taxas superiores o teste do desempenho do DCFAH em redes que apresentem capacidades de transmissão mais elevadas como 54 Mbps e 108 Mbps também pode ser considerado um trabalho futuro.

E como último trabalho futuro indica-se a análise de escalabilidade do DCFAH com relação ao número de estações que disputam o acesso ao meio e necessitam de QoS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE 802.11 WG, “Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification.” Agu. 1999 (Reaffirmed June 2003).
- [2] Tiago Trindade da Silva e Cláudia Jacy Barenco Abbas. Função de Coordenação Distribuída para Acesso ao Meio com QoS em Redes Ad Hoc IEEE 802.11. CLEI'2007 – October, 2007. San Jose, Costa Rica.
- [3] A. Chandra, C. Gummalla, e J. O. Limb. Wireless Medium Access Control Protocols. IEEE Communications Surveys, URL: <http://www.comsoc/pubs/surveys>, 2000.
- [4] IEEE 802.11 WG, “Draft Supplement to Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification. Amendment: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements.” IEEE Std 802.11e/D13.0, January 2005; draft supp. To IEEE Std 802.11, 1999 Edition (Reaffirmed June 2003).
- [5] I. Aad. Quality of service in wireless local area networks. PhD Thesis, Université Joseph Fourier and INRIA, 2002.
- [6] N. H. Vaidya, P. Bahl e S. Gupta. Distributed Fair Scheduling in a Wireless LAN. In Proceedings of ACM The Sixth Annual Conference on Mobile Computing and Networking, pg.167-178, 2000.
- [7] A. Veres, A. Campbell e Michael Barry. Supporting Service Differentiation in Wireless Packet Networks Using Distributed Control. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Special Issue on Mobility and Resource Management in Next-Generation Wireless Systems, vol.19, pg. 2094-2104, 2001.
- [8] J. L. Sobrinho, e A. S. Krishnakumar. Real-time traffic over the IEEE 802.11 medium access control layer. Bell Labs Technical Journal, vol. 1, pg. 172-187, 1996.
- [9] J. Deng, e R. S. Chang. A priority scheme for IEEE 802.11 DCF access method. IEICE Transactions in Communications, vol. 82 -B, pg. 96-102, 1999.
- [10] Y. XIAO, “IEEE 802.11e: QoS Provisioning at the Mac Layer,” IEEE Communications, June 2004, pp 72-79.
- [11] Grilo, A., and Nunes, M. Performance Evaluation of IEEE 802.11e. In 2002

- International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (Lisbon, Portugal, September 2002), vol. 1, pp. pp. 511 –517.
- [12] Daqing Gu and Jinyun Zhang, “QoS Enhancement in IEEE 802.11 Wireless Local Area Networ,” IEEE Communications Magazine, June 2003, pp 120 -124.
- [13] K. Xu, Q. Wang, H. Hassanein, “Performance Analysis of Differentiated QoS Supported by IEEE 802.11e Enhanced Distributed Coordination Function (EDCF) in WLAN”, Globecom, 2003, pp 1048-1053.
- [14] H. Zhu, M. Li, I. Chlamtac, B. Prabhakaran, “A Survey of Quality of Service in IEEE 802.11 Networks,” IEEE Wireless Communications, August 2004, pp 6 -14.
- [15] The Network Simulator ns 2. URL: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [16] Matteo Rosi e Leonardo Maccari. Ns 2 Patch for Use Beacon Frame in MAC 802.11 Telecommunication Network Lab, Department of Electronics and Telecommunications, University of Florence. URL: <http://lart.det.unifi.it/>
- [17] Ilango Purushothaman e Sumit Roy. Technical Report – IEEE 802.11 implementation issue/bugs in ns2. Fundamental Network Lab Departament of Eletctrical Engineering. University of Washington
URL: <http://ee.washington.edu/research/funlab/>
- [18] IEEE 802.11e HCCA simulation using the Network Simulator 2. Computer Networking Group of the University of Pisa.
URL: <http://info.iet.unipi.it/~cng/ns2hcca/>
- [19] The Ns-users Archives.
URL: <http://mailman.isi.edu/pipermail/ns-users/>
- [20] Ni Qiang. ns-802.11e EDCF for IEEE 802.11e Wireless LAN. Member of Planete Group, INRIA Sophia Antipolis, France.
URL: <http://www-sop.inria.fr/planete/qni/>
- [21] Sven Wiethölter, Christian Hoene e Adam Wolisz. TKN EDCA Model for ns-2. Telecommunication Network Group (TKN). University of de Berlin.
URL: <http://www.tkn.tu-berlin.de/>
- [22] IEEE 802.11 WG, “Draft Supplement to Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification. Amendment: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhance ments.” IEEE Std 802.11e/D4.3, 2005; draft supp. To IEEE Std 802.11, 1999 Edition (Reaffirmed June 2003).

- [23] IEEE 802.11 WG, “Draft Supplement to Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification. Amendment: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements.” IEEE Std 802.11e/D4.3, 2005; draft supp. To IEEE Std 802.11, 1999 Edition (Reaffirmed June 2003).
- [24] K. Fall, e K. Varadhan. *The NS Manual*. Relatório Técnico, UC Berkeley, The VINT Project, 2005.
- [25] E. Pelletta e H. Velayos. Performance measurements of the saturation throughput in IEEE 802.11 access points. KTH, Royal Institute of Technology, 16440 Kista, Sweden.

ANEXOS

A - SEQUÊNCIA DE TROCA DE QUADROS

As seqüências permitidas de troca de quadros estão listadas nas Tabelas A.1, A.2, A.3, A.4, A.5 e A.6. A legenda para todas as tabelas e encontra após a tabela A.6. A seqüência de troca de quadros também está ilustrada nas Figuras A.1 até A.6.

Tabela A.1 – Seqüência de quadros.

| Seqüência | Número de Quadros | Utilização |
|---|-------------------|---|
| {CTS-} Data (bc/mc) | 1 ou 2 | MSDU de <i>Broadcast</i> ou <i>Multicast</i> |
| {CTS-} Mgmt (bc) | 1 ou 2 | MMPDU <i>Broadcast</i> |
| CTS – [Frag – Ack –] Last – Ack | 3 ou mais | Proteção Dirigida MSDU ou MMPDU |
| {RTS – CTS –} [Frag – Ack –] Last – Ack | 2 | MSDU ou MMPDU Dirigido |
| PS-Poll – Ack | 2 | Resposta a PS-Poll Deferida |
| PS-Poll – [Frag – Ack –] Last – Ack | 3 | Resposta a PS-Poll Imediata |
| DTIM(CF) – [≤CF – Sequence> –]{CF-End} | 2 ou mais | Início do CFP |
| [<CF-Sequence> –] {CF-End} | 2 ou mais | Continuação do CFP após perda do Ack ou limite de ocupação do meio. |
| <HCF-Sequence> | 1 ou mais | Início da seqüência de quadros indicada pela QSTA. |

Tabela A.2 – Seqüência de quadros CF.

| Seqüência de Quadros CF | Número de Quadros | Utilização |
|---|-------------------|---|
| Beacon(CF) | 1 | <i>Beacon</i> durante CFP. |
| Data(bc/mc) | 1 | MSDU <i>Broadcast</i> ou <i>Multicast</i> . |
| Mgmt(bc) | 1 ou 2 | MMPDU <i>Broadcast</i> . |
| Mgmt(dir) – Ack | 2 ou 3 | MMPDU <i>Dirigido</i> . |
| Data(dir)+CF-Poll{+CF-Ack} – Data(dir)+CF-Ack – {CF-Ack(no data)} | 2 | <i>Poll</i> e Ack enviado como MPDUs. |
| Data(dir)+CF-Poll{+CF-Ack} – CF-Ack(no data) | 2 | <i>Poll</i> da STA com fila vazia, tempo insuficiente para MPDU enfileirado, ou também pequeno tempo restante antes do tempo de permanência ou limite de tempo de ocupação do meio para |

| | | |
|---|-----------|---|
| | | enviar um quadro enfileirado. |
| CF-Poll(no data){+CF-Ack} – Data(dir) – {CF-Ack(no data)} | 2 | <i>Poll</i> separado, Ack enviado com MPDU. |
| CF-Poll(no data){+CF-Ack} – Data(dir) – Ack | 3 | STA <i>Polled</i> enviada para STA em BSS. |
| CF-Poll(no data){+CF-Ack} – Null(no data) | 2 | <i>Poll</i> Separado, fila da STA vazia, ou tempo insuficiente para o MPDU enfileirado ou também pequeno tempo restante antes do tempo de permanência ou limite de ocupação do meio para enviar o quadro enfileirado. |
| Data(dir){+CF-Ack} – Ack | 2 | Ack se não CF-Pollable ou não <i>polled</i> . |
| <HCF-Sequence> | 1 ou mais | Início da seqüência de quadros indicada pela QSTA. |

Tabela A.3 – Seqüência HCF

| Seqüência de Quadros HCF | Número de Quadros | Utilização |
|---|-------------------|--|
| {CTS-}[Data (bc/mc) =] Data(bc/mc) | 1 ou mais | MSDU <i>Broadcast</i> ou <i>multicas</i> enviado pelo QAP |
| {CTS-}[QoS Data (bc/mc) =] QoS Data(bc/mc) | 1 ou mais | MSDU <i>Broadcast</i> ou <i>multicas</i> enviado pelo QAP como quadros QoS Dados. |
| {CTS-} [Mgmt (bc) =] Mgmt (bc) | 1 ou mais | MMPDU <i>Broadcast</i> enviado pelo QAP. |
| {CTS-} Mgmt (bc) | 1 ou 2 | MMPDU <i>Broadcast</i> enviado por uma QSTA. |
| {CTS-} <TXOP-Sequence> [-<TXOP-Sequence>] | 1 ou mais | Início de uma seqüência de TXOP usando contenção. |
| QoS CF-Poll self | 1 | Quadro QoS CF-Poll enviado pelo HC com o mesmo endereço de destino do endereço MAC do HC. |
| <CF-Ack-Piggybacked-QoS-Poll-Sequence> | 2 ou mais | <i>Poll</i> iniciado por um QoS CF-Poll sobre o qual o reconhecimento está usando <i>piggyback</i> . |
| {RTS – CTS - } <Non-CF-Ack-Piggybacked-QoS-Poll-Sequence> | 2 ou mais | <i>Poll</i> iniciado por um QoS CF-Poll sobre o qual o reconhecimento não está usando <i>piggyback</i> . |

Tabela A.4 – Sequência de *Poll*

| Sequência de <i>Poll</i> | Número de Quadros | Utilização |
|--|-------------------|---|
| QoS CF-Poll{+CF-Ack} (sem dados) {- CTS self} -<TXOP-Sequence> [-<TXOP-Sequence>] {- QoS Null(dir,normal ack)(no data) – Ack} | 2 ou mais | Início de uma seqüência TXOP iniciada com um <i>poll</i> de separação do HC. (*1), (*3), (*4). |
| QoS CF-Poll {CF-Ack}(no data) – QoS Null(dir,normal ack)(no data) – Ack | 3 | QoS CF-Poll separado de um HC para uma QSTA com fila vazia, tempo insuficiente para o MPDU enfileirado, ou tempo restante pequeno antes do limite de ocupação do meio para enviar um quadro enfileirado. (*1). |
| QoS Data(dir,normal ack)+CF-Poll{+CF-Ack} - <CF-Ack-Piggybacked-QoS-Data-Sequence> | 3 ou mais | Início de uma seqüência TXOP com um <i>poll</i> do HC “ <i>piggybacked</i> ” dentro de um quadro de dados. A política de Ack do quadro de dados está ajustada para Ack normal. O quadro de resposta é uma Ack “ <i>piggybacked</i> ” no quadro de dados com a política Ack ajustada para reconhecimento normal. (*1), (*2), (*3). |
| QoS Data(dir,normal ack)+CF-Poll{+CF-Ack} – Ack - <TXOP-Sequence>[- <TXOP-Sequence>] {QoS Null(dir,normal ack)(no data) – Ack} | 2 ou mais | Início de uma seqüência TXOP com um <i>poll</i> do HC que é “ <i>piggybacked</i> ” no quadro de dados. A política Ack do quadro de dados está ajustada para reconhecimento normal. O quadro de resposta é um quadro Ack. (*1), (*3). |
| QoS Data(dir,normal ack)+CF-Poll{+CF-Ack}-Ack-QoS Null(dir,normal ack)-Ack | 4 | QoS <i>poll</i> “ <i>piggybacked</i> ” em um quadro de Dados com QoS com a política Ack ajustada para reconhecimento normal, do HC para a QSTA com a fila vazia, tempo insuficiente para o MPDU enfileirado, ou limite de tempo restante de ocupação do meio insuficiente para enviar o quadro enfileirado (*1). |
| QoS Data(dir,block ack no ack)+CF-Poll{+CF-Ack}{-CTS self}-<TXOP-Sequence> [-<TXOP-Sequence>] {-QoS Null(dir,normal ack)(no data) – Ack} | 2 ou mais | Início de uma seqüência TXOP com um <i>poll</i> do HC com CF-Ack com a política Ack ajustada para reconhecimento em bloco ou sem Ack. (*1), (*2), (*3). |

| | | |
|---|---|--|
| QoS Data(dir,block ack no ack)+CF-Poll{+CF-Ack} QoS Null(dir,normal ack)(no data) – Ack | 3 | QoS <i>Poll</i> do HC para uma QSTA com a fila vazia, tempo insuficiente para o MPDU enfileirado, ou limite de tempo restante insuficiente para enviar o quadro enfileirado. (*1). |
|---|---|--|

Tabela A.5 – Seqüência TXOP

| Seqüência de quadros TXOP | Número de Quadros | Utilização |
|---|-------------------|--|
| {RTS - CTS -} Mgmt(dir) -Ack | 2 | MMPDU Dirigido. |
| {RTS - CTS -} Data(dir) - Ack | 2 | MPDU Dirigido, transmitido somente pelo QoS. |
| {RTS - CTS -} QoS Data(dir, normal ack) – Ack | 2 | MPDU dirigido com política de reconhecimento normal respondida por um Ack. |
| {RTS - CTS -} QoS Data(dir,normal ack) - <CF-Ack-Piggybacked-QoS-Data-Sequence> | 2 ou mais | MPDU dirigido com política de reconhecimento normal respondida com um novo TXOP. |
| {RTS - CTS -} QoS Data(dir,normal ack) - <CF-Ack-Piggybacked-QoS-Poll-Sequence> | 2 ou mais | MPDU dirigido com política de reconhecimento normal respondida com um novo TXOP. |
| {RTS - CTS -} QoS Data(dir,normal ack) Data+CF-Ack | 2 | MPDU dirigido com política de reconhecimento normal respondida com um Data+CF-Ack. |
| RTS - CTS - QoS Data(dir, no ack) | 3 | MPDUs Dirigidos com política de reconhecimento sem Ack quando são os primeiros quadros em um <i>burst</i> de quadros dentro do EDCA. |
| {RTS – CTS -} QoS Data(dir,no ack) | 3 | MPDUs dirigidos com política de reconhecimento sem Ack quando são enviados dentro de um TXOP <i>polled</i> . |
| RTS - CTS - QoS Data(dir,block ack) | 3 | MPDUs dirigidos com política de reconhecimento Ack em bocó quando são enviadas como os primeiros quadros em um <i>burst</i> de quadros dentro do EDCA. |
| {RTS - CTS -} QoS Data (dir, block, ack) | 3 | MPDUs dirigidos com política de reconhecimento Ack em bloco quando são enviados dentro de um TXOP <i>polled</i> . |
| {RTS - CTS -} QoS Null(dir, normal ack)(no data) – Ack | 2 | Quadro QoS Null para indicar que não há dados para transmitir ou enfileirados. |
| {RTS - CTS -} QoS Null(dir, normal ack) (no data) -<CF-Ack-Piggybacked-QoS-Data-Sequence> | 2 ou mais | QoS Null com política de reconhecimento normal respondido com um novo TXOP. |
| {RTS - CTS -} QoS Null(dir, normal | 2 ou mais | QoS Null com política de reconhecimento normal |

| | | |
|---|-----------|---|
| ack) (no data) - <CF-Ack-Piggybacked-QoS-Poll-Sequence> | | respondido com um novo TXOP. |
| {RTS - CTS -} QoS Null(dir, normal ack) (no data) – Data+CF-Ack | 2 | QoS Null com política de reconhecimento normal respondido com um Data+CF-Ack. |
| {RTS - CTS -} BAR-BA | 2 | Requisição de Bloqueio de Ack Imediato e este é o quadro de resposta. |
| {RTS - CTS -} BAR-Ack | 2 | Requisição de Ack em Bloco Atrasado e este é o quadro de resposta. |
| {RTS - CTS -} BAR -<CF-Ack-Piggybacked-QoS-Data-Sequence | 2 ou mais | Requisição de Ack em Bloco Atrasado respondido com um novo TXOP. |
| {RTS - CTS -} BAR -<CF-Ack-Piggybacked-QoS-Poll-Seq | 2 ou mais | Requisição de Ack em Bloco Atrasado respondido com um novo TXOP. |
| {RTS - CTS -}BAR - Data+CF-Ack | 2 | Requisição de Ack em Bloco Atrasado respondido com um Data+CF-Ack. |
| {RTS - CTS -} BA-Ack | 2 | Resposta de Ack em Bloco Atrasado. |
| {RTS - CTS -} BA - <CF-Ack-Piggybacked-QoS-Data-Sequence> | 2 ou mais | Ack em Bloco Atrasado respondido com um novo TXOP. |
| {RTS - CTS -} BA - <CF-Ack-Piggybacked-QoS-Poll-Sequence> | 2 ou mais | Ack em Bloco Atrasado respondido com um novo TXOP. |
| {RTS - CTS -} BA - Data+CF-Ack | 2 | Ack em Bloco Atrasado respondido com um Data-CF-Ack. |

Tabela A.6 – Sequência de Dados com QoS CF-ACK *Piggybacked*

| CF-Ack Piggybacked QoS Data Sequence | Quadros na Sequência | Utilização |
|---|----------------------|--|
| QoS Data(dir,normal ack)+CF-Ack - Ack [-TXOP-Sequence] {QoS Null(dir,normal ack) (no data) - Ack} | 2 ou mais | Início de uma sequência TXOP com um quadro de dados QoS “ <i>piggybacked</i> ” em um reconhecimento para o quadro de dados enviado na sequência anterior. (*1), (*2), (*3). |
| QoS Data(dir,normal ack)+CF-Ack - <CF-Ack-QoS-Piggybacked Poll Sequence> | 3 ou mais | Início de uma sequência TXOP com um quadro de Dados QoS “ <i>piggybacked</i> ” em um quadro de reconhecimento para o quadro de dados enviado na sequência anterior. O quadro de resposta iria iniciar uma nova Sequência <i>Poll</i> “ <i>piggybacked</i> ”. (*1), (*2), (*3), (*5). |
| QoS Data(dir,normal ack)+CF-Ack - <CF-Ack-Piggybacked-QoS-Data-Sequence> | 3 ou mais | Início de um sequência TXOP com um quadro de Dados QoS “ <i>piggybacked</i> ” em um quadro de reconhecimento para o quadro de dados enviado na sequência anterior. O quadro de resposta iria iniciar uma sequência de quadro de dados |

| | | |
|--|------------|--|
| | | <i>non-pollled</i> (“ <i>piggybacked</i> ”). (*1), (*2), (*3), (*5). |
| QoS Data(dir,normal ack)+CF-Ack - Data+CF-Ack | 2 | Início de uma seqüência TXOP com um quadro de Dados QoS com a política ack ajustada para reconhecimento normal e “ <i>piggybacked</i> ” no quadro de reconhecimento para o quadro de dados enviado na seqüência anterior. O quadro de resposta é um quadro de Dados+CF-Ack, endereçado para uma nQSTA. (*1), (*2), (*3), (*5). |
| QoS Data(dir,block ack no ack)+CF-Ack [-<TXOP-Sequence>] {-QoS Null(dir,normal ack) (no data) – Ack} | 1 ou mais. | Início de uma seqüência TXOP com um quadro de Dados QoS com a política ack ajustada para ack bloqueado ou sem ack e “ <i>piggybacked</i> ” no reconhecimento do quadro de dados enviado na seqüência anterior. (*1), (*2), (*3). |

Legenda para Tabelas Tabela A.1, Tabela A.2, Tabela A.3, Tabela A.4, Tabela A.5 e Tabela A.6

1 – Itens dentro de colchetes “[...]” podem nunca ocorrer ou ocorrer mais que uma vez na seqüência.

2 – Itens dentro de chaves “{...}” podem nunca ocorrer ou ocorrer uma única vez na seqüência.

3 – Um hífen isolado “-” representa um intervalo SIFS separando o par de quadros.

4 – “Data(bc/mc)” representa qualquer quadro do tipo Dados com um endereço de *Broadcast* ou *Multicast* no campo de endereços 1.

5 – “Mgmt(bc)” representa qualquer tipo de quadro de Gerenciamento com um endereço *Broadcast* no Campo DA.

6 – “RTS” representa um quadro de Controle do subtipo RTS.

7 – “CTS” representa um quadro de Controle do subtipo CTS.

8 – “Ack” representa um quadro de Controle do subtipo Ack.

9 – “Frag” representa um MPDU do tipo Dados ou um MMPDU do tipo Gerenciamento com um endereço individual no campo Endereço 1 que tem o campo Mais Fragmentos igual a “1”.

10 – “Last” representa um MDPU do tipo Dados ou um MMPDU do tipo Gerenciamento com um endereço individual no campo endereço 1 que tem o campo Mais Fragmentos igual a “0”.

11 – “PS-Poll” representa um quadro de Controle do subtipo PS-Poll.

- 12 – “DTIM(CF)” representa um quadro de gerenciamento do subtipo *Beacon* que contém um elemento de informação DTIM com um valor diferente de zero no campo CFPDurRemaining dos seus elementos do Conjunto de Parâmetros.
- 13 – “CF-End” representa um quadro de Controle do tipo CF-End, ou (se o quadro final da imediatamente anterior <CF - Sequência> foi um quadro de dados ou gerenciamento dirigido requerendo reconhecimento pelo AP) do tipo CF-End+Ack.
- 14 – “Beacon(CF)” representa um quadro de gerenciamento do subtipo *Beacon* com o valor diferente de zero no campo CFPDurRemaining do seu elemento do Conjunto de Parâmetros.
- 15 – “Data(dir)” representa qualquer MPDU do tipo Dados com um endereço individual no campo Endereço 1.
- 16 – “Mgmt(dir)” representa qualquer MMPDU do tipo Gerenciamento com um endereço individual no campo Endereço 1.
- 17 – “CF-Ack(no data)” representa um quadro de dados do subtipo CF -Ack (sem dados).
- 18 – “CF-Poll(no data)” representa um quadro de dados do subtipo CF -Poll (sem dados).
- 19 – “Null(no data)” representa um quadro de dados do subtipo Função Nula (sem dados).
- 20 – “{+CF-Ack}” indica que o quadro pode ou não pode incluir um reconhecimento livre de contenção (CF).
- 21 – “+CF-Ack” indica que o quadro inclui um reconhecimento livre de contenção (CF).
- 22 – “+CF-Poll” indica que o quadro inclui um *poll* livre de contenção (CF).
- 23 – <CF-Sequence> Representa uma seqüência de um ou mais quadros enviados durante o CFP. Um <CF-Sequence> válido deve consistir em um ou mais seqüências de quadros mostrados na Tabela 22. A coleção da seqüência de troca de quadros corresponde para [<CF-Sequence>] pode ocorrer em qualquer ordem dentro do CFP.
- 24 – Um “|” entre dois itens indica que um ou outro item, mas não os dois, são usados.
- 25 – “QoS Data(dir,normal ack)” representa qualquer quadro de dados do subtipo Dados com QoS, que não use “*piggybacking*” de reconhecimento ou *polling*, com um endereço individual no campo de Endereços 1 e a política de reconhecimento está ajustada para normal.
- 26 – “QoS Data(dir,no ack)” representa qualquer quadro de dados do subtipo Dados com QoS, que não use “*piggybacking*” de reconhecimento ou *polling*, com um endereço individual no campo de Endereços 1 e a política de reconhecimento está ajustada para sem Ack.

- 27 – “QoS Data(dir,block ack)” representa qualquer quadro de dados do subtipo Dados com QoS, que não use “*piggybacking*” de reconhecimento ou *polling*, com um endereço individual no campo de Endereços 1 e a política de reconhecimento está ajustada para Ack em Bloco.
- 28 – “BAR” representa qualquer quadro BlockAckReq.
- 29 – “BA” representa qualquer quadro BlockAck.
- 30 – “QoS CF-Poll(no data)” representa um quadro de dados do subtipo QoS CF -Poll (sem dados).
- 31 – (*1) implica que o quadro é transmitido após um intervalo SIFS do MPDU transmitido anteriormente.
- 32 – (*2) implica que o “*piggybacking*” de reconhecimento para quadros de dados é permitido somente no primeiro quadro de resposta.
- 33 – (*3) implica que a o final da seqüência QoS Null deve ser inserida se o dono do TXOP não tem tempo suficiente para o MPDU enfileirado, ou o tempo restante é muito pequeno antes do limite de ocupação do meio para enviar o quadro enfileirado, e se o TXOP restante é grande o suficiente para enviar a seqüência QoS Null, ou o dono do TXOP não tem MPDU enfileirado.
- 34 – (*4) implica que o CTS para si-mesmo é permitido se a QSTA pretende ajustar o NAV da sua vizinhança. O quadro que segue o CTS é enviado pela QSTA que transmitiu o CTS.
- 35 – (*5) Seqüência de “*piggybacking*” *poll* ou uma nova seqüência somente é iniciada quando o quadro recebido tem o campo duração ajustado para cobrir somente o quadro de resposta.
- 36 – Um sinal de igualdade “=” isolado representa a separação do par de quadros por um intervalo PIFS.
- 37 – Quadros individuais dentro de cada seqüência estão separados por um SIFS.

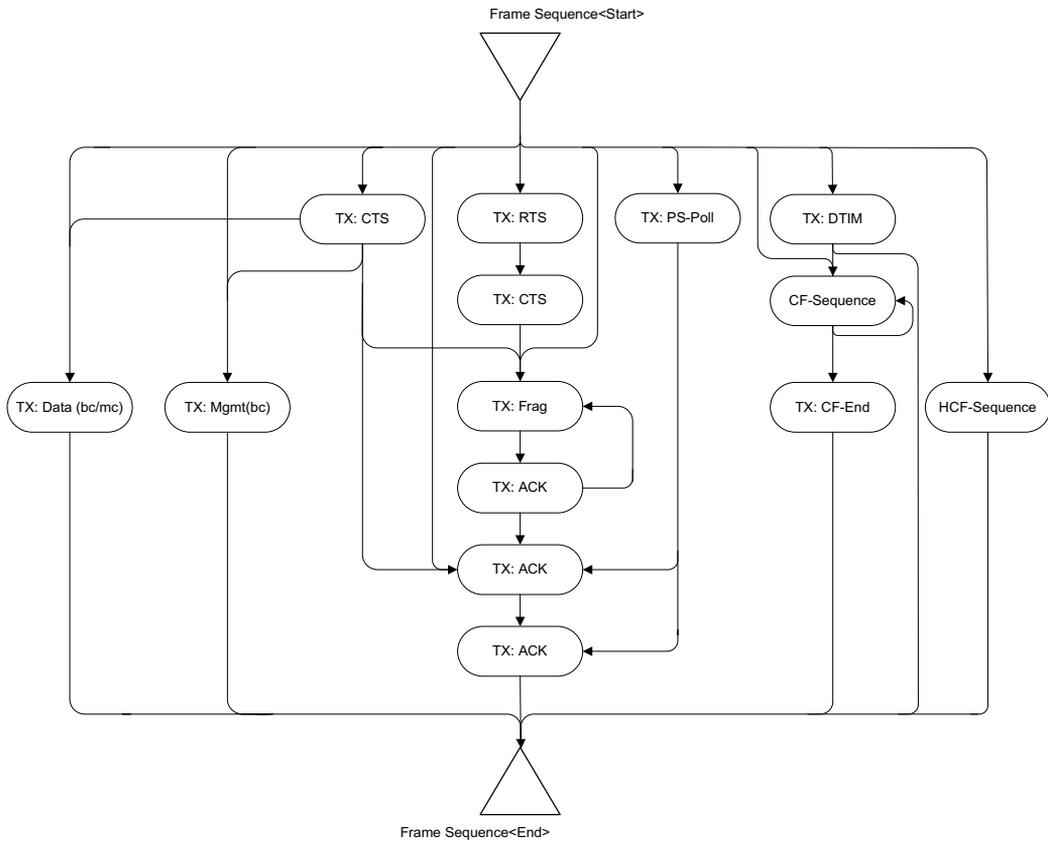


Figura A.1 – Sequência de quadros.

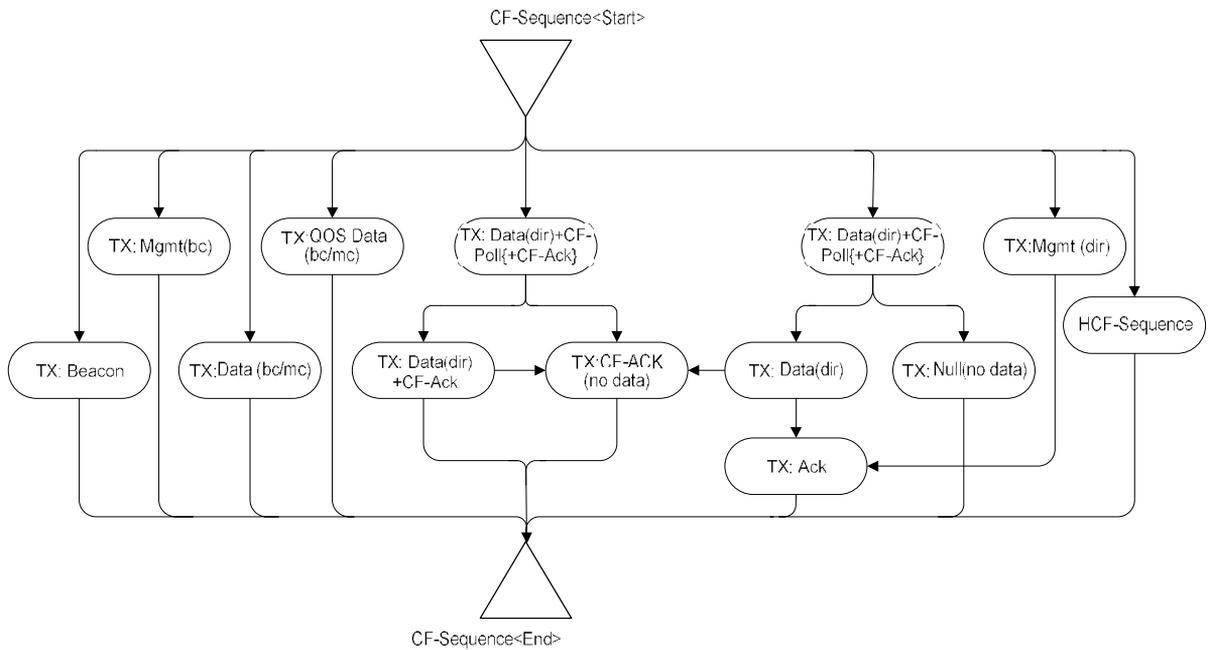


Figura A.2 – Sequência de quadros CF.

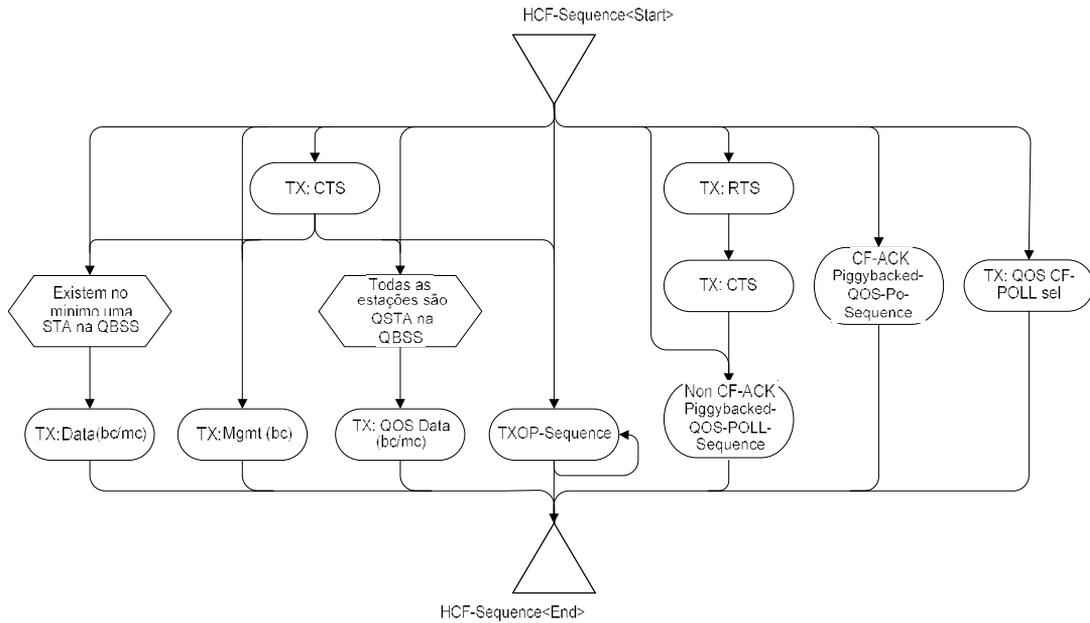


Figura A.3 – Seqüência HCF.

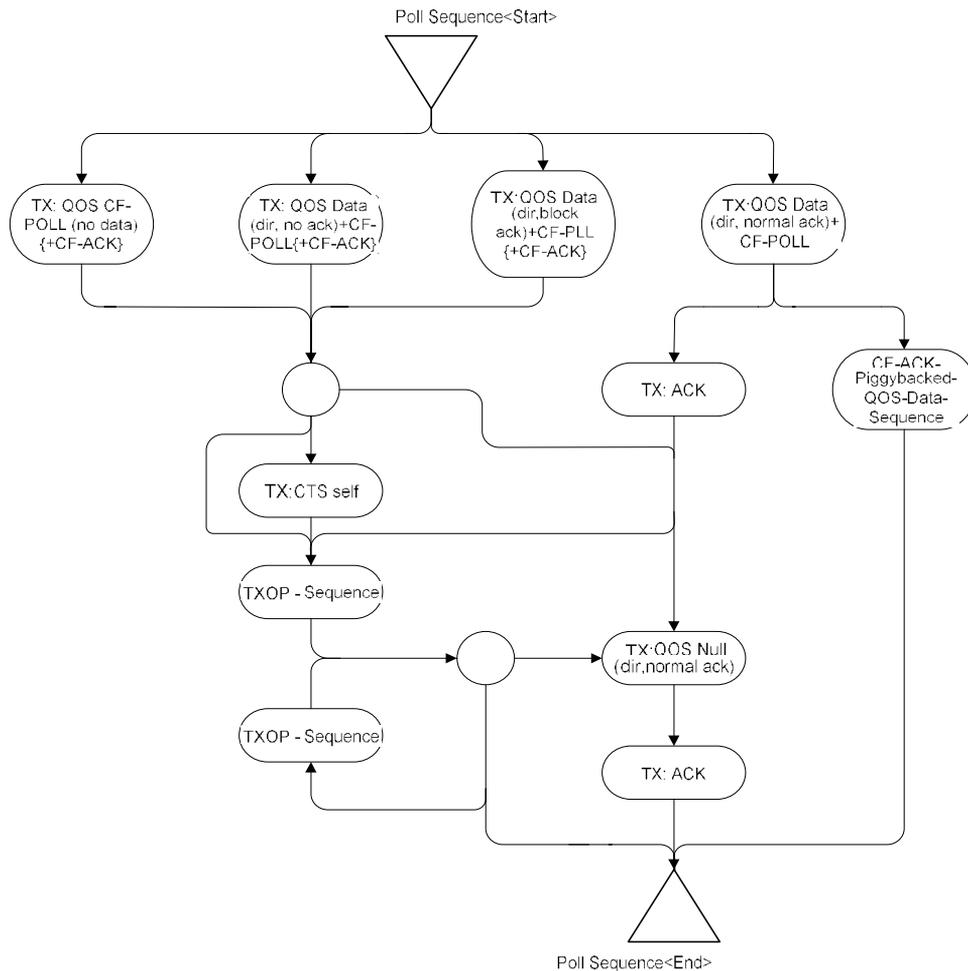


Figura A.4 – Seqüência de Poll.

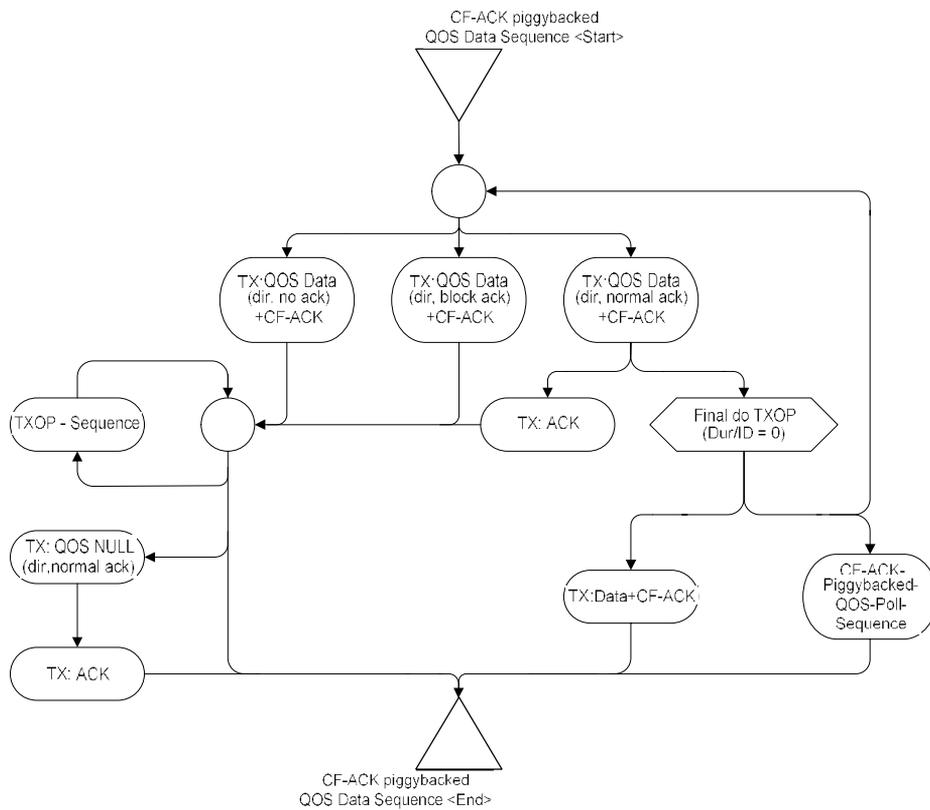


Figura A.5 – Sequência de dados com QoS Piggybacked em CF-Ack.

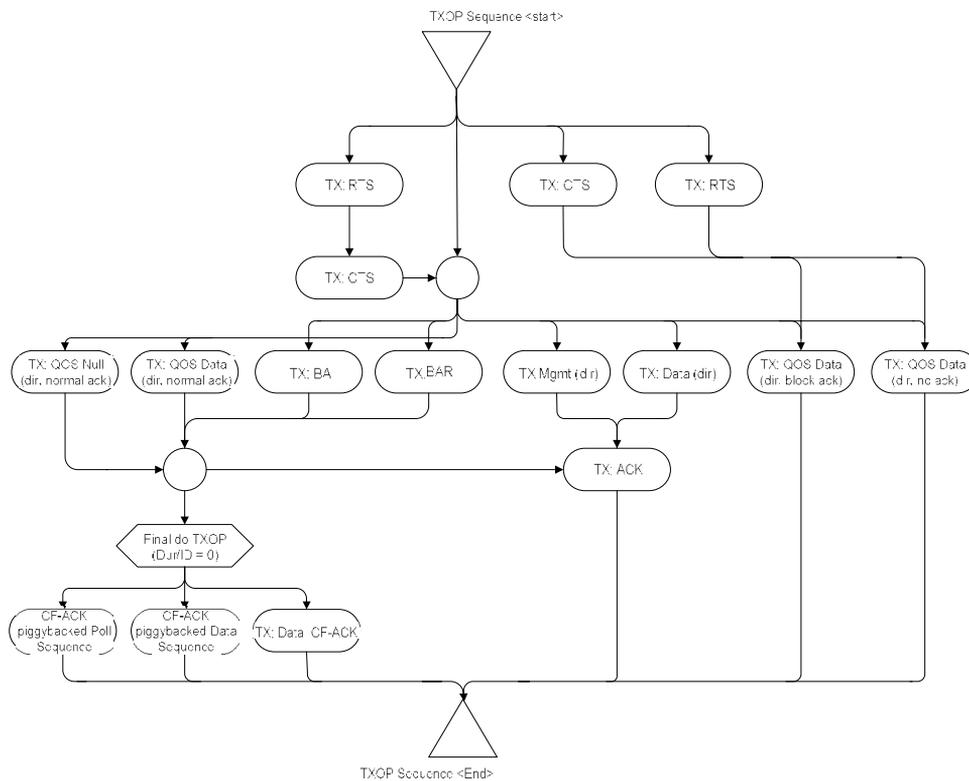


Figura A.6 – Sequência TXOP

B - Comparação do Tempo de Transmissão dos Quadros de Dados com o Tempo de *Backoff* Aleatório.

O tempo de deferência do *backoff* aleatório é dado pela equação (2.1). O tempo total antes do início da transmissão do quadro de dados é dado pelo tempo de *Backoff* aleatório mais o período AIFS [AC], calculado conforme a equação (2.2), conforme o nível de prioridade de acesso do quadro. O tempo de transmissão de um quadro de dados é dado pela equação (B.1).

$$T_{x_{time}} = \frac{8 \times B}{R} \quad (B.1)$$

Onde:

$T_{x_{time}}$: Tempo de transmissão do quadro de dados;

B : tamanho do quadro de dados em *bytes*;

R : taxa de transmissão utilizada.

Conforme o item 15.3.3 do padrão IEEE 802.11 [1], para a taxa de 11 Mbps, o valor de `aSlotTime` é de 20 μ s e o valor de `aSIFSTime` é de 10 μ s. A janela de contenção `CW` assume os valores conforme a Tabela 5.1 e pode variar de 7 a 1023 para os quatro níveis de prioridade. A Tabela B.1 apresenta os valores máximos e mínimos do tempo de *Backoff* aleatório e o AIFS [AC] para cada nível de prioridade de acesso quanto a taxa de transmissão é de 11 Mbps.

Tabela B.1 – Valores máximos e mínimos do *BackoffTime*.

| Nível de Prioridade | AIFS [AC] | CW _{min} | <i>BackoffTime</i> Mínimo | CW _{max} | <i>BackoffTime</i> Máximo | Tempo Total de Deferência | |
|---------------------|-------------|-------------------|------------------------------|-------------------|------------------------------|---------------------------|-------------|
| | | | | | | Mínimo | Máximo |
| AC_VO | 50 μ s | 7 | 140 μ s | 15 | 300 μ s | 190 μ s | 350 μ s |
| AC_VI | 50 μ s | 15 | 300 μ s | 31 | 620 μ s | 350 μ s | 670 μ s |
| AC_BE | 70 μ s | 31 | 620 μ s | 1023 | 20,460 ms | 690 μ s | 20,530 ms |
| AC_BK | 150 μ s | 31 | 620 μ s | 1023 | 20,460 ms | 690 μ s | 20,530 ms |

A Tabela B.2 apresenta o tempo de transmissão dos quadros de dados de 50 à 2000 *bytes* de tamanho com incrementos de 50 *bytes* transmitidos a taxa de 11 Mbps.

Tabela B.2 – Tempo de transmissão para quadros de dados.

| Tamanho do quadro em bytes. | $T_{x_{time}}$ | Tamanho do quadro em bytes. | $T_{x_{time}}$ |
|--|----------------------------------|--|----------------------------------|
| 50 | 36,4 μ s | 1050 | 764 μ s |
| 100 | 72,7 μ s | 1100 | 800 μ s |
| 150 | 109 μ s | 1150 | 836 μ s |
| 200 | 145 μ s | 1200 | 873 μ s |
| 250 | 182 μ s | 1250 | 909 μ s |
| 300 | 218 μ s | 1300 | 945 μ s |
| 350 | 255 μ s | 1350 | 982 μ s |
| 400 | 291 μ s | 1400 | 1,0182 ms |
| 450 | 327 μ s | 1450 | 1,0545 ms |
| 500 | 364 μ s | 1500 | 1,0909 ms |
| 550 | 400 μ s | 1550 | 1,1272 ms |
| 600 | 436 μ s | 1600 | 1,1636 ms |
| 650 | 473 μ s | 1650 | 1,2000 ms |
| 700 | 509 μ s | 1700 | 1,2363 ms |
| 750 | 545 μ s | 1750 | 1,2727 ms |
| 800 | 582 μ s | 1800 | 1,3090 ms |
| 850 | 618 μ s | 1850 | 1,3454 ms |
| 900 | 655 μ s | 1900 | 1,3818 ms |
| 950 | 691 μ s | 1950 | 1,4181 ms |
| 1000 | 727 μ s | 2000 | 1,4545 ms |

Conforme a Tabela B.1 tem-se que o menor tempo de deferência do *Backoff* aleatório acrescido do respectivo AIFS [AC] é de 190 μ s sendo maior que os tempo de transmissão de 182 μ s de um quadro de dados de 250 *bytes* conforme a tabela Tabela B.2 *ckoff* pode assumir valores maiores que o tempo de transmissão dos quadros de dados.