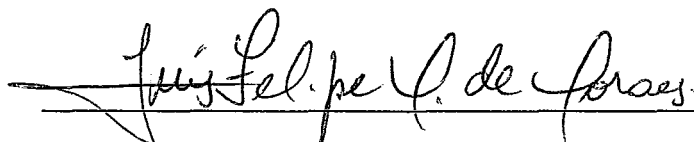


MODELAGEM E ANÁLISE DO RETARDO DAS MENSAGENS NO PADRÃO
IEEE 802.16 EM MODO MESH COM ESCALONAMENTO DISTRIBUÍDO
COORDENADO

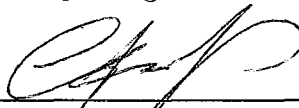
Gustavo Neves Dias

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO
DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO.

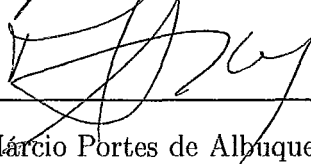
Aprovada por:



Prof. Luís Felipe Magalhães de Moraes, Ph. D.



Prof. Cláudio Luís de Amorim, Ph. D.



Prof. Márcio Portes de Albuquerque, Dr.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2008

DIAS, GUSTAVO NEVES

Modelagem e Análise do Retardo das Mensagens no Padrão IEEE 802.16 em Modo Mesh com Escalonamento Distribuído Coordenado [Rio de Janeiro] 2008

XVIII, 97 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia de Sistemas e Computação, 2008)

Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Redes Sem Fio de Banda Larga
2. Redes *Mesh*
3. Avaliação de Desempenho

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Dedicatória

Aos meus pais Ademir (em memória) e Altamira pela dedicação e incentivo incondicionais.

Agradecimentos

Primeiramente, quero agradecer a Deus pelo dom da vida, pelas bênçãos derramadas sobre mim e pela graça de poder realizar este trabalho.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Luís Felipe, pelos grandes ensinamentos e pelo total apoio desde o início do meu trabalho e aos demais membros da banca, os Professores Claudio Luis de Amorim e Márcio Portes de Albuquerque, pela valiosa ajuda nesta fase final.

A minha família: Vovó Joanna, que durante todos esse período do mestrado foi muito mais do que avó, foi duas vezes mãe, amiga e protetora, tia Ivana e tio Parrini, que foram meus segundos pais me acolhendo em Duque de Caxias/RJ e, principalmente, a minha tia Ivana sempre confortando-me nos momentos de desespero, sendo uma brilhante conselheira, tio Cacá que foi o primeiro incentivador e financiador deste desafio, minha mãe Altamira que mesmo à distância acompanhou todos os meus passos rumo a essa vitória, meus irmãos Leonardo e Elizabeth sempre me apoiando e incentivando, minha sobrinha-afilhada Raphaela pelos telefones simples e doces que me proporcionavam imensa alegria, tio Almir, tia Nede, tia Jussara pelo apoio familiar, meus primos e primas Aline, Juliana, Rodrigo pelas caronas para o Fundão. A minha namorada Cristiane, pela compreensão nas horas em que não pude estar junto, pelo carinho e atenção.

Aos amigos e amigas de Vitória/ES: Gabriel, Júnior, Rendrigson, Felipe, Stella, Katiúcia, Lourenço, Raquel, Júlia, Gustavo Kraus, Keitty, Leninha, Fernando Grativol, Wendell, Valdinei, Joelma, Lanuze e Lucirlei.

Aos amigos e amigas do Mestrado: Cristiane, Luciana, Ivomar, Sérgio Gonzalez, André Oliveira, Patrícia e Vivian.

Aos amigos e amigas do RAVEL e do LCP: Bruno, Airon, Marcos César, Cláudia, Rafael Fernandes, Tiago, Rafael Bezerra, Julio, Eduardo, Vilela, Fernando Ve-

ríssimo, Paulo, Michelini, Vitor Buarque, Diogo, Felipe Schiller, Alexandre Mendes, Leonardo Pinho e Lauro Whately

Agradecimento muito especial a Danielle pela amizade que firmamos no decorrer deste mestrado, pelas horas ao telefone resolvendo exercícios de probabilidade, pelas madrugadas implementando algoritmos de busca em grafos (credo!), pelas horas no laboratório resolvendo problemas analíticos e simulados, pelos churrascos em sua linda casa com quintal, sauna e piscina.

Outro agradecimento muito especial ao Beto pelos conselhos, pelas várias horas de conversa no “RAVELho”, pelas brilhantes correções e ajustes no decorrer do desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos e amigas do FAPERJ/REDE RIO/CBPF: Daniela, Daniele, Gilson, Josevan, Janete, Prof. Marília, Prof. Washington, Marcelo, Jaime e Jabur.

Aos amigos e amigas do Rio de Janeiro/RJ: Letícia, Alécio, Rosane, Aline e Alan.

As secretárias do Programa de Engenharia de Sistemas e Computação: Solange, Sônia, Cláudia, Mercedes e Lúcia, pelas inúmeras e brilhantes soluções dadas aos problemas enfrentados por mim junto ao Programa.

E a todos os outros, que porventura tenha esquecido, pelo apoio no início da minha jornada e pela grande amizade que foi selada. Muito Obrigado a todos pelo apoio nas horas difíceis, pelas alegrias nos momentos de tristeza, pelo carinho nos momentos de aflição, pela ternura nos momentos complicados. Espero um dia poder retribuir toda a felicidade que vocês me proporcionaram.

Ao SENAI: Diretor Geral Prof. José Manuel de Aguiar Martins, Presidente da FINDES Lucas Izoton Vieira, Diretor Regional do SENAI/DR-ES Robson Santos Cardoso e todos os demais colaboradores do Sistema FINDES/SENAI pelo apoio operacional, investimento e confiança em mim depositados.

À Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), pelo financiamento da pesquisa e ao Programa de Engenharia de Sistemas e Computação (PESC/COPPE/UFRJ), pelo apoio operacional.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

MODELAGEM E ANÁLISE DO RETARDO DAS MENSAGENS NO PADRÃO
IEEE 802.16 EM MODO MESH COM ESCALONAMENTO DISTRIBUÍDO
COORDENADO

Gustavo Neves Dias

Junho/2008

Orientador: Luís Felipe Magalhães de Moraes

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

As Redes *Mesh* Sem Fio surgiram como uma alternativa para a criação de uma infra-estrutura de comunicação em *backbone* sem fio. Diversas tecnologias sem fio, tais como IEEE 802.11 e IEEE 802.16, podem ser utilizadas como solução para implementação destas redes. Em especial, o padrão IEEE 802.16 prevê um modo de operação *mesh* que especifica mecanismos de escalonamento para mensagens de controle baseado em reserva cíclica, entretanto, não define como escalonar as mensagens de dados, sendo isso um problema em aberto. Alguns trabalhos propostos na literatura avaliam somente o retardo das mensagens de controle, não considerando o retardo devido a alocação das mensagens de dados. Dentro deste contexto, este trabalho propõe um modelo analítico que incorpora um algoritmo de escalonamento para alocação das mensagens de dados. Além disso, foi desenvolvido uma ferramenta de simulação para representar o protocolo de acesso ao meio do padrão IEEE 802.16 em modo de operação *mesh*, usando o mecanismo de escalonamento distribuído coordenado para avaliação do retardo médio das mensagens de controle e de dados. Nessa avaliação, alguns resultados numéricos foram obtidos para dois cenários: (1) onde todas as estações com uma mesma vizinhança e (2) diferentes estações com diferentes vizinhanças, a fim de observar sua influência no desempenho do protocolo, verificando que o modelo analítico proposto apresentou um comportamento próximo aos resultados obtidos por simulação, demonstrando assim a aplicabilidade do modelo analítico na área de avaliação de desempenho dessas redes.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MODELING AND ANALYSIS OF THE DELAY MESSAGES AT IEEE 802.16 IN
MESH MODE WITH COORDINATED DISTRIBUTED SCHEDULING

Gustavo Neves Dias

June/2008

Advisor: Luís Felipe Magalhães de Moraes

Department: Systems Engineering and Computer Science

Wireless Mesh Networks have become an attractive alternative solution to provide a backbone infrastructure for data communications systems. Several wireless technologies, such as IEEE 802.11 and IEEE 802.16, can be used to build these networks. In particular, the IEEE 802.16 standard specifies a mesh mode operation that defines the scheduling mechanisms for control messages based on cyclic reservation, however, doesn't define how to schedule the data messages, which is an open issue. Some studies in the literature only evaluate the delay of control messages, not considering the allocation delay of data messages. In this context, the present work proposes an analytical model that incorporates an algorithm for data messages allocation. Moreover, it presents a simulator tool to represent the media access protocol defined in the IEEE 802.16 standard in mesh mode, using the coordinated distributed scheduling mechanism that was developed to evaluate the average delay of control and data messages. During this evaluation, some numerical results were obtained for two scenarios: (1) where all stations are in the same neighborhood and (2) stations are spread over different neighborhoods, to see how it influences the protocol performance, showing that the proposed analytical model presented a behavior that was closed to simulation results and demonstrating the applicability of the analytical model in the area of performance evaluation for these networks.

Sumário

Resumo	vi
Abstract	vii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Acrônimos	xv
Definições e Notação Utilizada no Modelo Analítico	xvi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Contribuições do Trabalho	3
1.4 Organização do Texto	3
2 Referencial Teórico	4
2.1 O padrão IEEE 802.16	6
2.1.1 Modo de Operação PMP	6

2.1.2	Modo de Operação <i>Mesh</i>	7
	Estrutura do Sistema	7
	Mecanismo de Escalonamento Distribuído Coordenado	14
	Algoritmo de Eleição Distribuído	16
2.2	Escalonamento de Pacotes	21
2.2.1	<i>First-Come-First-Served</i>	21
2.2.2	Fila com Prioridades	22
2.2.3	<i>Weighted Fair Queuing (WFQ)</i>	23
2.3	Trabalhos Relacionados	24
2.3.1	Esquemas de Acesso com Reserva	31
3	Modelagem Analítica	35
3.1	Visão Geral	36
3.2	Modelo Analítico do Escalonador Distribuído Coordenado	36
3.3	Análise do Retardo Total das Mensagens	40
3.3.1	Descrição do Modelo e Definições	40
	Análise para o caso 1	45
	Análise para o caso 2	53
4	Resultados Numéricos	57
4.1	Ferramenta de Simulação para 802.16 <i>Mesh</i>	57
4.1.1	Mecanismo de Acesso ao Subquadro de Controle	60
4.1.2	Mecanismo de Alocação no Subquadro de Dados	66
4.2	Cenários de Avaliação	66

4.2.1	Cenário Simplificado	66
	Decomposição do Retardo Total no Cenário Simplificado . . .	72
4.2.2	Cenário Geral	76
	Decomposição do Retardo Total no Cenário Geral	79
4.2.3	Cenário Desbalanceado	84
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	91
5.1	Conclusões	91
5.2	Trabalhos Futuros	93
	Referências Bibliográficas	94

Lista de Figuras

2.1	Arquitetura Infra-estruturada/ <i>Backbone</i> [1].	5
2.2	<i>Backbone Mesh</i> em áreas metropolitanas [1].	6
2.3	Estrutura do Quadro <i>Mesh</i> [2].	8
2.4	Composição de Subquadros de controle, escalonamento e dados [2].	8
2.5	Subquadro de Controle de Rede [2].	10
2.6	Subquadro de Controle de Escalonamento/Reserva [2].	11
2.7	Procedimento de troca de mensagens de 3-vias para requisição, concessão e confirmação [3].	16
2.8	Diagrama ilustra as estações no procedimento para determinar o próximo segmento alocado para transmissão de mensagem MSH-DSCH [4].	18
2.9	Visão geral do procedimento para determinar o próximo segmento de transmissão de mensagem MSH-DSCH [3].	19
2.10	Critérios de “eleição” [3].	20
2.11	Critérios de “eleição” [5].	20
2.12	Abstração de uma fila FCFS [6].	22
2.13	Fila com Prioridades [6].	22
2.14	Disciplina WFQ [6].	23

2.15	Barramento CRMA [7].	31
2.16	Ciclos no CRMA [7].	32
2.17	Ciclos no CRMA [7].	33
3.1	Decomposição do Retardo Total das Mensagens.	46
3.2	Decomposição do Retardo de Reserva para o caso 1.	47
3.3	Decomposição do Retardo de Transmissão para o caso 1.	49
3.4	Decomposição do Retardo de Reserva para o caso 2.	53
4.1	Intervalo Médio de Reserva (acesso ao subquadro de controle) para Cenário Simplificado.	61
4.2	Intervalo Médio de Reserva (acesso ao subquadro de controle) para Cenário Geral.	62
4.3	Intervalo Médio de Reserva (acesso ao subquadro de controle) obtido por Min Cao e outros [8].	63
4.4	Tempo Médio de Reserva (tempo de conexão) para Cenário Simplifi- cado.	64
4.5	Tempo Médio de Reserva (tempo de conexão) para Cenário Geral. . .	65
4.6	Retardo Médio Total das Mensagens de Dados no Caso 1 em Cenário Simplificado para $M = 16$ Estações.	67
4.7	Retardo Médio Total das Mensagens de Dados no Caso 1 em Cenário Simplificado para $M = 49$ Estações.	68
4.8	Retardo Médio Total das Mensagens de Dados no Caso 2 em Cenário Simplificado para $M = 16$ Estações.	70
4.9	Retardo Médio Total das Mensagens de Dados no Caso 2 em Cenário Simplificado para $M = 49$ Estações.	71

4.10 Retardo Médio de Latência das Mensagens de Dados no Caso 1 em Cenário Simplificado para $M = 16$ Estações.	73
4.11 Retardo Médio de Reserva das Mensagens de Dados no Caso 1 em Cenário Simplificado para $M = 16$ Estações.	74
4.12 Retardo Médio de Transmissão das Mensagens de Dados no Caso 1 em Cenário Simplificado para $M = 16$ Estações.	75
4.13 Retardo Médio Total das Mensagens de Dados no Caso 1 em Cenário Geral para $M = 16$ Estações.	77
4.14 Retardo Médio Total das Mensagens de Dados no Caso 1 em Cenário Geral para $M = 49$ Estações.	78
4.15 Retardo Médio Total das Mensagens de Dados no Caso 2 em Cenário Geral para $M = 49$ Estações.	80
4.16 Retardo Médio de Latência das Mensagens de Dados no Caso 2 em Cenário Geral para $M = 49$ Estações.	81
4.17 Retardo Médio de Reserva das Mensagens de Dados no Caso 2 em Cenário Geral para $M = 49$ Estações.	82
4.18 Retardo Médio de Transmissão das Mensagens de Dados no Caso 2 em Cenário Geral para $M = 49$ Estações.	83
4.19 Retardo Médio Total das Mensagens de Dados da Estação 1 no Caso 1 em Cenário Desbalanceado para $M = 16$ Estações.	86
4.20 Retardo Médio Total das Mensagens de Dados da Estação 16 no Caso 1 em Cenário Desbalanceado para $M = 16$ Estações.	87
4.21 Retardo Médio Transmissão das Mensagens de Dados da Estação 1 no Caso 1 em Cenário Desbalanceado para $M = 16$	89
4.22 Retardo Médio Transmissão das Mensagens de Dados da Estação 16 no Caso 1 em Cenário Desbalanceado para $M = 16$	90

Lista de Tabelas

2.1	Códigos de duração do quadro OFDM [2].	12
2.2	Símbolos OFDM por Quadro [9].	13
4.1	Parâmetros de Simulação.	59

Lista de Acrônimos

BS	: <i>Base Station;</i>
SS	: <i>Subscriber Station;</i>
MBS	: <i>Mesh Base Station;</i>
MSS	: <i>Mesh Subscriber Station;</i>
TDD	: <i>Frequency Division Duplex;</i>
FCFS	: <i>First Come, First Serverd;</i>
PMP	: <i>Point Multi-Point;</i>
MSH-CTRL-LEN	: <i>Mesh Control Length;</i>
MSH-NENT	: <i>Mesh Network Entry;</i>
MSH-DSCH-NUM	: <i>Mesh Distributed Scheduling Number;</i>
MSH-DSCH	: <i>Mesh Distributed Scheduling;</i>
DSCH	: <i>Distributed Scheduling;</i>
MSH-NCFG	: <i>Mesh Network Configuration;</i>
MSH-CSCH	: <i>Mesh Centralized Schedule;</i>
MSH-CSCF	: <i>Mesh Centralized Schedule Configuration;</i>
OFDM	: <i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing;</i>
IE	: <i>Information Element;</i>
WFQ	: <i>Weighted Fair Queuing;</i>
CRMA	: <i>Ciclic Reservation Multiple Access;</i>
FIFO	: <i>First In First Out;</i>
TDMA	: <i>Time Division Multiple Access;</i>
FRAC	: <i>Fixed Reservation Access Control;</i>

Definições e Notação Utilizada no Modelo Analítico

- M : Número de estações no sistema;
- \aleph_i : Conjunto das estações vizinhas até 2-saltos da estação i ;
- M_i : Número de elementos do conjunto \aleph_i (ou seja, $|\aleph_i|$, a cardinalidade de \aleph_i);
- $\aleph_i^{\text{desconhecidas}}$: Conjunto das estações vizinhas da estação i cujas informações de escalonamento são desconhecidas ou desatualizadas dentro do conjunto \aleph_i ;
- $M_i^{\text{desconhecidas}}$: Número de elementos do conjunto $\aleph_i^{\text{desconhecidas}}$ (ou seja, $|\aleph_i^{\text{desconhecidas}}|$, a cardinalidade de $\aleph_i^{\text{desconhecidas}}$);
- $\aleph_i^{\text{conhecidas}}$: Conjunto das estações vizinhas da estação i cujas informações de escalonamento são conhecidas ou atualizadas dentro do conjunto \aleph_i ;
- $M_i^{\text{conhecidas}}$: Número de elementos do conjunto $\aleph_i^{\text{conhecidas}}$ (ou seja, $|\aleph_i^{\text{conhecidas}}|$, a cardinalidade de $\aleph_i^{\text{conhecidas}}$);
- x_i : Expoente de atraso de reserva da estação i ;
- H_i : Tempo de atraso de reserva da estação i ;
- V_i : Intervalo de elegibilidade da estação i ;
- S_i : Número de segmentos de controle pelo qual a estação i perde a disputa antes de vencer;
- $E[S_i]$: Número médio de segmentos de controle pelo qual a estação i perde a disputa antes de vencer;
- τ_i : Intervalo de reserva da estação i (medido em segmentos);

- $E[\tau_i]$: Intervalo médio de reserva da estação i (medido em segmentos);
- T_{τ_i} : Tempo de reserva da estação i (medido em milisegundos);
- $E[T_{\tau_i}]$: Tempo médio de reserva da estação i (medido em milisegundos);
- $T_{handshake}^{AB}$: Intervalo de conexão entre duas dadas estações A e B (medido em segmentos);
- $E[T_{handshake}^{AB}]$: Intervalo médio de conexão entre duas dadas estações A e B (medido em segmentos);
- $\tilde{T}_{handshake}^{AB}$: Tempo de conexão entre duas dadas estações A e B (medido em milisegundos);
- $E[\tilde{T}_{handshake}^{AB}]$: Tempo médio de conexão entre duas dadas estações A e B (medido em milisegundos);
- $E[e_i]$: Tempo residual da estação i ;
- N_Q : Número de segmentos do quadro mesh;
- N_C : Número de segmentos de controle do quadro mesh;
- N_D : Número de mini-segmentos de dados do quadro mesh;
- S_{MS} : Tamanho dos mini-segmentos do sub-quadro de dados (em símbolos OFDM);
- N_{MS} : Número de mini-segmentos no sub-quadro de dados;
- $A_{n,i}$: Número de mensagens que chegam durante o n -ésimo mesh-slot na estação i ;
- $B_{n,i}$: Número de mesh-slots associado com a n -ésima mensagem da estação i ;
- $R_{n,i}$: Número de mensagens da estação i para o qual reservas são feitas durante o n -ésimo período de reserva;
- $T_{n,i}$: Intervalo entre duas consecutivas chegadas de reservas da estação i ;
- $D_{n,i}$: Retardo total da n -ésima mensagem da estação i ;
- $D_{n,i}^{(R)}$: Retardo de reserva da n -ésima mensagem da estação i ;

- $D_{n,i}^{(S)}$: Retardo de transmissão da n -ésima mensagem da estação i ;
- $L_{n,i}$: Período de latência da n -ésima mensagem da estação i ;
- $W_n^{(L)}$: Tempo de espera para a primeira dentre todas as mensagens que são transmitidas durante o n -ésimo ciclo;
- $W_{n,i}^{(a)}$: Tempo total necessário para transmitir todas as mensagens das estações $1, 2, \dots, i - 1$, o qual pertencem ao mesmo supergrupo de reserva e estão a frente da estação i durante o n -ésimo ciclo;
- $W_{n,i}^{(b)}$: Tempo de espera sofrido por uma mensagem o qual é devido a transmissão de todas as mensagens que estão antes dela na estação i durante o n -ésimo ciclo;

Capítulo 1

Introdução

AS Redes sem fio em malha, *Wireless Mesh Networks* [1, 10], vêm sendo estudadas desde 1990 quando a *Defense Advanced Research Projects Agency* - DARPA (agência de defesa para projetos avançados de pesquisa dos EUA) iniciou suas pesquisas para fins de comunicação em campos de batalha. Desta data aos dias atuais o conceito destas redes permanece e se combina com o advento das diversas tecnologias de rede sem fio, muitas delas já consolidadas, tais como aquelas nos padrões IEEE 802.11 (*Wi-Fi*) [11] e IEEE 802.16 (*WiMax*) [2]. Neste contexto, o padrão IEEE 802.16 define duas especificações de modos de operação: o modo ponto-multi-ponto (PMP) e o modo malha (*Mesh*). Em especial, o modo de operação *Mesh* define mecanismos de escalonamento (centralizado ou distribuído) para mensagens de controle, o qual permite que recursos de rede sejam compartilhados para transmissão de mensagens de dados das estações.

1.1 Motivação

Muitos estudos têm sido feitos em torno da aplicação do padrão IEEE 802.16 [2] em redes *mesh*. Estas redes possibilitam implementar uma infra-estrutura de comunicação sem fio (*backbone*) gerando maior flexibilidade e acrescentando novas aplicações às tecnologias sem fio WiMax e outras. No entanto, nestas redes, a

maneira de escoar o tráfego acrescenta problemas que devem ser tratados, como, por exemplo, a regra de compartilhamento dos recursos, controle de admissão e policiamento entre as estações. Além disso, o desempenho de soluções propostas (aplicações e subsistemas) para redes *mesh* são afetados diretamente pela topologia da rede, fazendo com que esta deva ser levada em consideração em qualquer avaliação de protocolos e soluções propostas. Sendo assim, avaliar o seu impacto no funcionamento das redes *mesh* ainda são desafios a serem alcançados.

1.2 Objetivos

Como será visto mais adiante, o padrão IEEE 802.16 [2] suporta dois modos de operação: PMP e *Mesh*. O modo PMP suporta mecanismos para prover qualidade de serviço (QoS), mas não inclui uma solução completa para fornecer garantias às várias aplicações e ainda não define como escalonar eficientemente o tráfego para satisfazer tais requisitos. Já o modo *mesh* define os mecanismos de escalonamento para mensagens de controle, porém estes não incluem uma solução para alocação do subquadro de dados utilizado para transmissão das mensagens de dados das aplicações. Dessa forma, é necessário a introdução de alguma regra de alocação destes recursos oferecidos pelo IEEE 802.16 [2] modo *mesh*.

Diversos trabalhos têm sido propostos na literatura com foco nos mecanismos de escalonamento definidos no IEEE 802.16 [2] modo *mesh*. Porém, muitos destes abordam somente o mecanismo de controle e poucos têm sido apresentados envolvendo uma avaliação do retardo total das mensagens para que o tráfego escalonado possa ser eficientemente avaliado. O objetivo desta dissertação é apresentar uma proposta para avaliação do retardo médio total das mensagens em solução a alocação do subquadro de dados para infra-estrutura de *backbone mesh* em redes metropolitanas sem fio, que incorpora as funções de escalonamento de tráfego baseada em reserva cíclica.

1.3 Contribuições do Trabalho

Dentre os principais resultados alcançados com a elaboração deste trabalho, as seguintes contribuições podem ser relacionadas:

- A elaboração de um modelo analítico para a avaliação de desempenho de redes *mesh* utilizando o padrão IEEE 802.16 [2] em modo *mesh* com mecanismo de escalonamento distribuído coordenado, observando a métrica de avaliação retardo médio total das mensagens de dados transmitidas no subquadro de dados;
- O desenvolvimento de uma ferramenta de simulação que representa o comportamento das estações de acordo com o mecanismo de controle definido no padrão visando à validação da modelagem analítica através de resultados simulados.

1.4 Organização do Texto

Os capítulos que seguem estão organizados da seguinte forma. No capítulo 2 é feita uma revisão da literatura acerca das redes *mesh*, é também apresentado o mecanismo de escalonamento de mensagens de controle distribuído coordenado do padrão IEEE 802.16 [2] modo *mesh*, alguns algoritmos de escalonamento da literatura, trabalhos relacionados ao modo de operação *mesh*, usando o mecanismo de escalonamento e, ainda, alguns esquemas de acesso com reserva utilizados como base deste trabalho. O capítulo 3 apresenta o modelo analítico proposto para o cálculo do retardo das mensagens de dados no padrão IEEE 802.16 [2] modo *mesh*. No capítulo 4 é apresentada uma ferramenta de simulação desenvolvida para o modo de operação *mesh* com escalonamento distribuído coordenado, são descritos cenários de avaliação do modelo proposto e da ferramenta de simulação desenvolvida, bem como seus resultados e comparações. Por fim, no capítulo 5 são feitas as conclusões, comentários finais sobre o trabalho e as perspectivas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Referencial Teórico

AS Redes *Mesh* sem fio, *Wireless Mesh Networks* [1, 10], surgiram como uma importante contribuição para as redes sem fio da próxima geração. Essas redes são dinamicamente auto-organizadas e autoconfiguradas, onde as estações adotam a arquitetura *adhoc*, tendo capacidade de comunicação direta umas com as outras sem a necessidade de uma infra-estrutura ou ponto central.

Essas redes invertem o paradigma de uso da rede cabeada para a espinha dorsal da rede (*backbone*) e acesso sem fio na última milha. O *backbone* de uma rede *mesh* é formado por estações sem fio (roteadores *mesh*), como pode ser observado na figura 2.1, e a interligação com outras redes ou estações clientes ao pode ser com ou sem fio.

A figura 2.1 mostra a arquitetura Infra-estruturada/*Backbone* [1, 10] onde roteadores *mesh* atuam para formar o *backbone* de comunicação entre estações clientes *mesh* e também entre outras redes, tais como as redes *Wi-fi*, redes de celular, redes de sensores e entre outras, fornecendo conectividade e ampliando a área de cobertura a quilômetros de distância.

Como as estações do *backbone* deste tipo de rede têm localização fixa, essas podem facilmente ser alimentadas, não possuindo, desta forma, limitação de energia, eliminando, por conseguinte, muitas das restrições das redes *adhoc*.

A comunicação entre as estações nessas redes pode ser feita através de variantes dos padrões IEEE 802.11 e 802.16, e cujo roteamento é dinâmico [12].

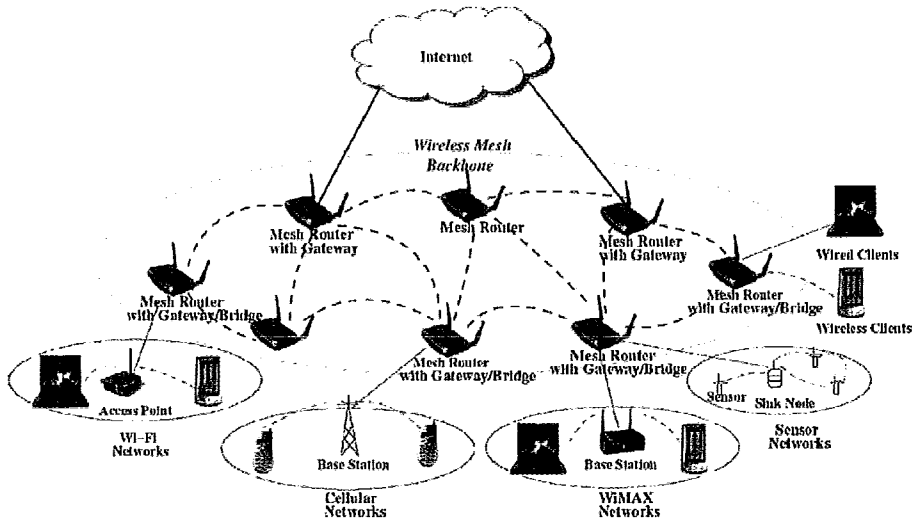


Figura 2.1: Arquitetura Infra-estruturada/*Backbone* [1].

O padrão IEEE 802.16 [2], tem como escopo especificar a interface aérea para sistema fixo de acesso sem fio banda larga, incluindo a camada de acesso ao meio (MAC) e a camada física (PHY) para redes metropolitanas sem fio (WMAN), bem como a arquitetura de qualidade de serviço (QoS), tornando-o um forte candidato a integrar arquitetura Infra-estruturada/*Backbone* nas redes *mesh* [1, 10].

Alguns trabalhos com o padrão IEEE 802.16 [2] têm focado principalmente o modo ponto-multi-ponto (*PMP mode*) [13, 14] onde as estações são organizados dentro de uma estrutura de células que consiste em uma Estação Base (*BS - Base Station*) e em Estações Assinantes (*SS - Subscriber Station*), sendo a Estação Base responsável por coordenar e encaminhar as transmissões das Estações Assinantes.

O outro modo de operação definido no padrão é o modo malha (*Mesh mode*), onde as estações são organizadas de forma *ad hoc*, podendo atuar como roteadores *mesh* para transmissão e encaminhamento de pacotes entre estações vizinhas. Eventualmente algumas destas estações, denominadas MBS (*Mesh BS*), podem estar conectadas a outras redes ou mesmo à Internet fornecendo conectividade às demais estações, denominadas de MSSs (*Mesh SS*).

O padrão descreve no modo de operação *mesh* mecanismos de escalonamento

de mensagens de controle (centralizado ou distribuído) que se comportam como esquema de reserva [15] e possibilitam sua utilização nas redes *mesh*. Um exemplo de uso é visto na figura 2.2 que mostra um *backbone mesh* em áreas metropolitanas.

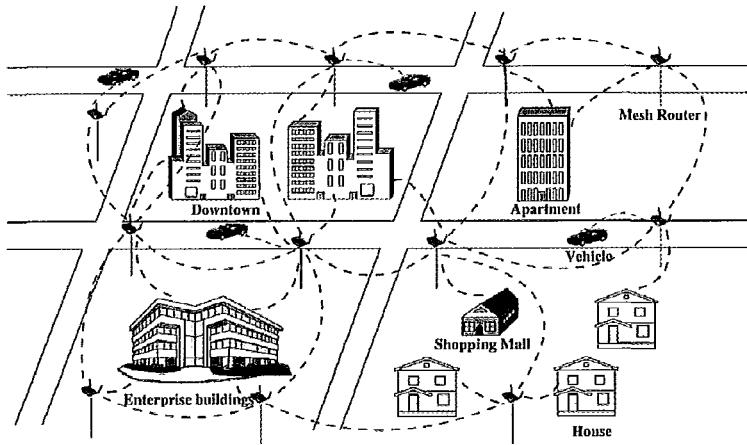


Figura 2.2: *Backbone Mesh* em áreas metropolitanas [1].

2.1 O padrão IEEE 802.16

O padrão IEEE 802.16 [2] para redes metropolitanas sem fio de banda larga define dois modos de operação na camada de acesso ao meio: o modo ponto multi-ponto (PMP) e o modo malha (*Mesh*).

2.1.1 Modo de Operação PMP

No modo PMP (ponto-multi-ponto) as estações são organizadas dentro de uma estrutura de célula que consiste de uma Estação Base (*BS - Base Station*) e de Estações Clientes (*SS - Subscriber Station*) onde a BS, de forma centralizada, é responsável por coordenar e encaminhar as transmissões entre as SS's.

As transmissões ocorrem em dois canais diferentes: um canal de descida (*downlink - DL*), com o fluxo de dados direcionado da BS para as SS's, e outro de subida (*uplink - UL*), com o fluxo de dados direcionado das SS's para a BS. No DL os dados são transmitidos por difusão, enquanto no UL o meio é compartilhado através de

múltiplo acesso. São definidas quatro classes de *QoS* baseadas em conexão: UGS (*Unsolicited Grant Service*), rtPS (*real-time Polling Service*), nrtPS (*non-real-time Polling Service*) e BE (*Best Effort*).

O padrão não define nesse modo de operação: (i) o algoritmo de escalonamento do UL para serviços rtPS, nrtPS e BE; (ii) controle de admissão e (iii) o policiamento do tráfego.

2.1.2 Modo de Operação *Mesh*

No modo *mesh*, diferente do modo PMP, as SS's são organizadas de forma *ad hoc*. Cada SS pode comunicar-se diretamente com outras SS's vizinhas sem, necessariamente, haver a coordenação por parte de uma BS. Eventualmente algumas dessas estações, denominadas MBS (*Mesh BS*), podem estar conectadas a outras redes ou mesmo a Internet fornecendo conectividade às demais estações, denominadas MSS's (*Mesh SS*). Nesse modo, não existem definidas classes de *QoS*, tal como no modo PMP, e apenas TDD é suportado, não existindo uma separação clara entre canais de *downlink* e *uplink*.

O modo de operação *mesh*, sua estrutura, mecanismos de escalonamento, algoritmos, tipos de mensagens e demais detalhes do protocolo são apresentados nas seções a seguir.

Estrutura do Sistema

No modo de operação *mesh* o eixo do tempo é segmentado (*slotted*) e utiliza-se apenas o TDD (*Time Division Duplex* - Duplexação por Divisão de Tempo) para o acesso ao meio. Diferente do modo *PMP*, não existe uma separação clara entre subquadros de *downlink* (fluxo de dados direcionado da BS para as SSs) e *uplink* (fluxo de dados direcionado das SSs para a BS).

Períodos de tempo fixos e sucessivos são definidos como **quadros *mesh*** e suas estruturas consistem em um subquadro de controle e um subquadro de dados.

O subquadro de controle permite duas funções básicas: *controle de rede* - cria e mantém a coesão entre as estações no sistema; e *controle de escalonamento de reservas* - coordena o escalonamento (alocação) de transmissões de mensagens de dados entre as estações. Existem dois tipos de subquadro de controle: (i) Subquadro de controle de rede (*Network control subframe*); e (ii) Subquadro de escalonamento (*Schedule control subframe*), como mostra a figura 2.3.

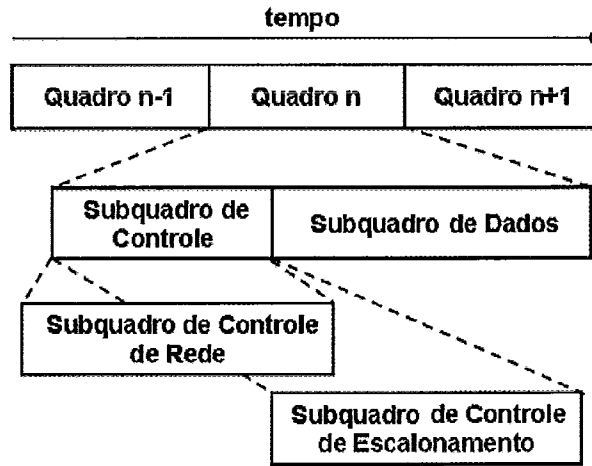


Figura 2.3: Estrutura do Quadro *Mesh* [2].

Quadros contendo um subquadro de controle de rede ocorrem periodicamente, conforme indicado pelo parâmetro *Scheduling Frames* no descritor de rede, informando a quantidade de quadros que contêm um subquadro de controle de escalonamento entre dois quadros que contêm um subquadro de controle de rede, em múltiplos de 4, como ilustrado na figura 2.4.

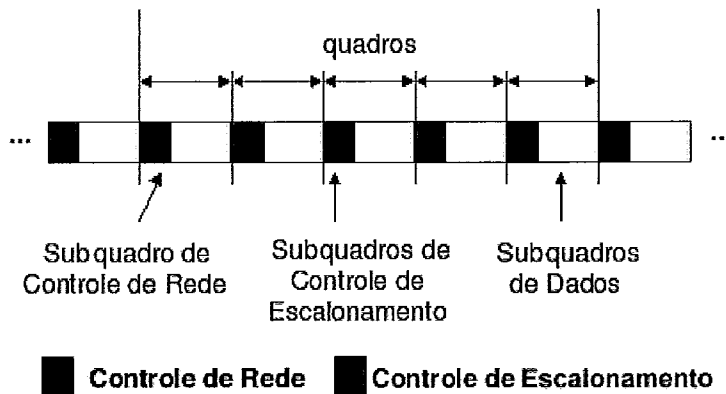


Figura 2.4: Composição de Subquadros de controle, escalonamento e dados [2].

O subquadro de controle é fixo e de tamanho igual a MSH-CTRL-LEN segmentos, conforme indicado no descritor de rede, sendo cada segmento correspondente a 7 (sete) símbolos OFDM¹.

Durante um subquadro de controle de rede, o primeiro segmento é alocado para o envio de mensagens de controle de entrada na rede (MSH-NENT - *mesh network entry*), seguido por (MSH-CTRL-LEN - 1) segmentos que são alocados para o envio de mensagens de controle de configuração da rede (MSH-NCFG - *mesh network configuration*), fornecendo assim meios para que as estações aprendam os parâmetros da rede, ganhem sincronismo e possam entrar na rede.

Durante um subquadro de controle de escalonamento, o descritor de rede indica quantos segmentos são destinados ao envio de mensagens de escalonamento distribuído. Os primeiros (MSH-CTRL-LEN - MSH-DSCH-NUM) segmentos são alocados para o envio de mensagens de controle que pertencem ao mecanismo de escalonamento centralizado [*CSCH*: (i) MSH-CSCH - *mesh centralized scheduling* e (ii) MSH-CSCF - *mesh centralized scheduling configuration*], enquanto os segmentos restantes (MSH-DSCH-NUM) são alocados para o envio de mensagens de controle que pertencem ao mecanismo de escalonamento distribuído [*DSCH*: MSH-DSCH - *mesh distributed scheduling*]. As figuras 2.5 e 2.6 ilustram a estrutura desses subquadros.

Diferentes parâmetros de modulação OFDM permitem calcular o número de símbolos por quadro *mesh*, podendo ser obtido de acordo com Sierra [9]:

$$\#_{\text{símbolos}} = \frac{T_{\text{quadro}}}{T_{\text{símbolo}}} \quad (2.1)$$

onde: T_{quadro} é o tempo de duração do quadro, dado pela tabela 2.1 e $T_{\text{símbolo}}$ é o tempo de duração do símbolo OFDM [9].

¹OFDM, do inglês *Orthogonal frequency-division multiplexing*, também conhecido como *discrete multitone modulation (DMT)*, é uma técnica de modulação baseada na idéia de multiplexação por divisão de frequência (FDM) onde múltiplos sinais são enviados em diferentes frequências [16].

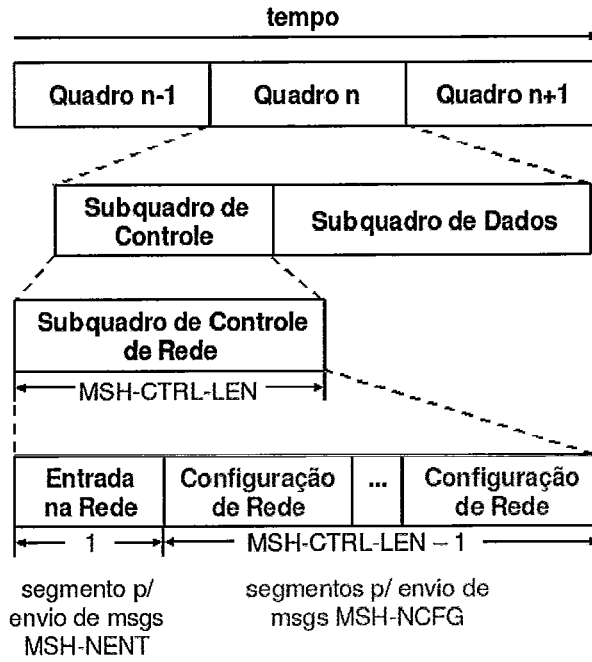


Figura 2.5: Subquadro de Controle de Rede [2].

Existem algumas limitações no uso do quadro pelas estações. O subquadro de controle tem uma duração de $(MSH_CTRL_LEN \times 7)$ símbolos OFDM. O restante dos símbolos no quadro correspondem ao subquadro de dados. Baseado em diferentes valores dos parâmetros OFDM, o número de símbolos por quadro pode ser encontrado. Pode ser visto na tabela 2.2 o número de símbolos por quadro para diferentes larguras de banda e tempos de símbolo [9].

O subquadro de dados corresponde à porção do quadro para transmissão de mensagens de dados. O subquadro de dados é dividido em minisegmentos (MS), os quais são, com possível exceção do último minisegmento em um quadro, de tamanho S_{MS} (em símbolos OFDM) igual a:

$$S_{MS} = \left\lceil \frac{\#simbolos - (MSH_CTRL_LEN \times 7)}{256} \right\rceil \quad (2.2)$$

onde: $\#simbolos$ corresponde ao número de símbolos OFDM por quadro $mesh$ e MSH_CTRL_LEN é o tamanho do subquadro de controle.

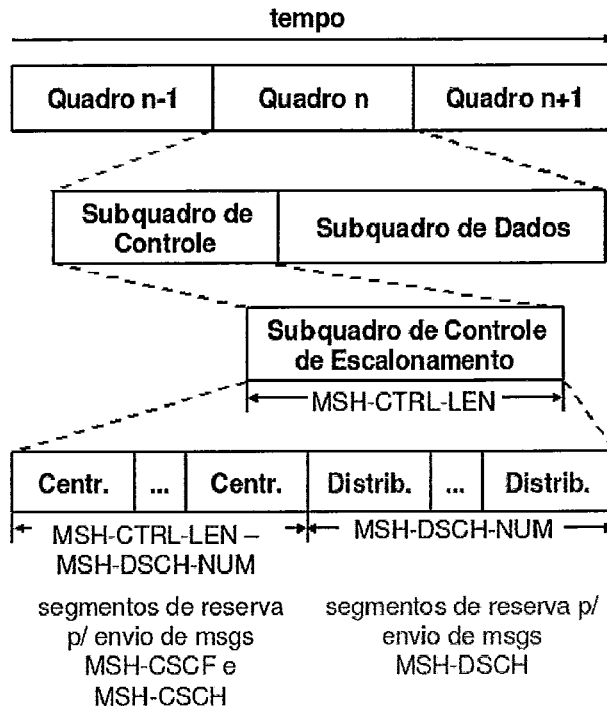


Figura 2.6: Subquadro de Controle de Escalonamento/Reserva [2].

O número de minisegmentos N_{MS} em um quadro *mesh* é dado por:

$$N_{MS} = \frac{\#simbolos - (MSH_CTRL_LEN \times 7)}{S_{MS}} \quad (2.3)$$

O padrão define os mecanismos utilizados para escalonamento das mensagens de reserva que permitem a alocação de um ou mais minisegmentos, porém não define um algoritmo de alocação dos minisegmentos dos subquadros de dados, o qual é deixado em aberto permitindo diversas implementações para essa alocação.

Os mecanismos para escalonamento das mensagens de reserva definidos no padrão IEEE 802.16 [2] são:

(i) Mecanismo Centralizado: onde uma MBS é responsável por coordenar as transmissões entre as MSS's. Entretanto, ao contrário do modo PMP, a transmissão das mensagens de dados é feita diretamente entre elas;

(ii) Mecanismo Distribuído Coordenado: um algoritmo de eleição distribuído, executado por todas as estações, considera as informações anunciadas pelas estações

Código	Duração do Quadro (ms)	Quadros por Segundo
0	2.5	400
1	4.0	250
2	5.0	200
3	8.0	125
4	10.0	100
5	12.5	80
6	20.0	50
7-255	<i>reservado</i>	<i>reservado</i>

Tabela 2.1: Códigos de duração do quadro OFDM [2].

na sua vizinhança de 2-saltos para o escalonamento das mensagens de reserva entre as estações de forma livre de colisão (*collision free transmissions*);

(iii) Mecanismo Distribuído Não-Coordenado: assim como no mecanismo distribuído coordenado, as estações podem realizar transmissões de mensagens de dados diretamente com estações vizinhas, podendo também utilizar o subquadro de dados para escalonamento das mensagens de reserva, ocasionando neste caso possíveis colisões, no entanto sem afetar o escalonamento feito pelo mecanismo distribuído coordenado.

As mensagens de controle utilizadas pelos mecanismos de escalonamento são:

- Mensagem MSH-NENT (*Mesh Network Entry*) - Mensagens de Entrada na Rede: fornecem meios para uma nova estação adquirir sincronização e entrar na rede;
- Mensagem MSH-NCFG (*Mesh Network Configuration*) - Mensagens de Configuração de Rede: fornecem nível básico de comunicação entre estações e outros parâmetros, como o descritor de rede, que permitem a coordenação das transmissões entre as estações;
- Mensagem MSH-DSCH (*Mesh Distributed Schedule*) - Mensagens de Escalonamento

BW	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
$T_{simbolo} (\mu s)$	56	28	18.667	14
$T_{quadro} = 2.5 \text{ ms}$	44.6	89.3	133.9	178.6
$T_{quadro} = 4.0 \text{ ms}$	71.4	142.9	214.3	285.7
$T_{quadro} = 5.0 \text{ ms}$	89.3	178.6	267.9	357.1
$T_{quadro} = 8.0 \text{ ms}$	142.9	285.7	428.6	571.4
$T_{quadro} = 10.0 \text{ ms}$	178.6	357.1	535.7	714.3
$T_{quadro} = 12.5 \text{ ms}$	223.2	446.4	669.6	892.9
$T_{quadro} = 20.0 \text{ ms}$	357.1	714.3	1071.4	1428.6

Tabela 2.2: Símbolos OFDM por Quadro [9].

Distribuído: contém informações de requisição, concessão e confirmação de recursos de rede, e outros parâmetros que permitem a coordenação das transmissões entre as estações;

- Mensagem MSH-CSCF (*Mesh Centralized Schedule Configuration*) - Mensagens de Configuração do Escalonamento Centralizado;
- Mensagem MSH-CSCH (*Mesh Centralized Schedule*) - Mensagens de Escalonamento Centralizado.

O descritor de rede, contido nas mensagens de configuração de rede, MSH-NCFG, possui alguns parâmetros importantes, tais como: MSH-CTRL-LEN (*Mesh Control Length*) - define o tamanho do subquadro de controle; MSH-DSCH-NUM (*Number of Distributed Slots*) - define o número de segmentos do subquadro de controle destinados ao envio de mensagens MSH-DSCH; e *Scheduling Frames* - define a quantidade de quadros que contém o subquadro de controle de escalonamento entre dois quadros que contém subquadro de controle de rede, em múltiplos de 4.

Uma mensagem MSH-DSCH carrega os seguintes campos:

1. Disponibilidades (*Availabilities IE*): indicando o número do quadro de início, o número do minisegmento de início dentro do quadro e o número de miniseg-

- mentos disponíveis para a alocação do conessor;
2. Requisições (*Request IE*): indicando o número de minisegmentos requeridos pela estação;
 3. Concessões (*Grants IE*): comunicando o número do quadro de início da concessão, o número do minisegmento de início dentro do quadro e a faixa (*range*) de minisegmentos concedidos;
 4. Escalonamento (*Scheduling IE*): mostrando o próximo segmento de transmissão da mensagem MSH-DSCH, *NextXmtTime*, e o expoente de atraso, *XmtHoldoffExponent*, da estação;

Mecanismo de Escalonamento Distribuído Coordenado

As estações que possuem links diretos entre si são chamadas vizinhas. As estações vizinhas, que formam uma vizinhança, são aquelas que estão a 1-salto umas das outras. Uma vizinhança estendida de 2-saltos contém, adicionalmente, todas as estações vizinhas da vizinhança. Neste mecanismo, todas as estações (MBS e MSS's) irão coordenar suas transmissões em sua vizinhança estendida de 2-saltos.

Mensagens de controle de escalonamento distribuído (*MSH-DSCH*) carregam informações que serão usadas pelas estações na rede para determinação dos instantes de transmissão das mensagens MSH-DSCH. Dentro de um dado canal todas as estações vizinhas recebem as mesmas transmissões com informações de escalonamento contidas nas mensagens MSH-DSCH.

Todas as estações na rede irão usar este mesmo canal para transmitir suas informações de escalonamento: requisição, concessão e confirmação de recursos. As informações de escalonamento distribuído coordenado, carregadas nas mensagens MSH-DSCH, serão usadas para determinar o segmento alocado para transmissão da mensagem MSH-DSCH, *CurrentXmtTime* (*cxmt*).

Cada estação irá reportar informações de escalonamento, entre elas, dois parâmetros relativos à própria estação e a todos os seus vizinhos. As informações incluem,

entre outros parâmetros, os seguintes:

- *NextXmtMx* (*mx*) - utilizado para encontrar o *NextXmtTime* (*nxmt*): o próximo segmento dentro do intervalo de segmentos disponíveis para transmissão de mensagem MSH-DSCH da estação, *NextXmtTimeInterval* (*nxmti*), intervalo este que é calculado da seguinte forma:

$$2^{exp} \cdot mx < nxmt \leq 2^{exp} \cdot (mx + 1)$$

onde: *exp* \Leftrightarrow *XmtHoldoffExponent* é o Expoente de Atraso;

- *XmtHoldoffExponent* (*exp*) - utilizado para encontrar o *XmtHoldoffTime* (*H*): o número de segmentos do subquadro de controle o qual uma estação deve aguardar após a transmissão de uma mensagem MSH-DSCH (não sendo permitido, portanto, o envio de mensagens MSH-DSCH durante esse período) sendo calculado da seguinte forma:

$$XmtHoldoffTime = 2^{exp+4}$$

As estações na rede, utilizando escalonamento distribuído coordenado e não-coordenado, empregam um procedimento de troca de mensagens de 3-vias (*three-way handshaking*) para coordenar a alocação de minisegmentos do subquadro de dados para transmissão de suas mensagens de dados e contêm dentre outras informações:

1. Requisição e Disponibilidade: **MSH-DSCH:Request** \rightarrow a informação de requisição é enviada juntamente com a informação de disponibilidade, a qual indica possíveis minisegmentos para resposta ao escalonamento atual;
2. Concessão: **MSH-DSCH:Grant** (*Grant direction* = 0) \rightarrow a informação de concessão é enviada em resposta a uma requisição, indicando um subconjunto de minisegmentos disponíveis que se ajustem, se possível, à mesma. As estações vizinhas dessa estação (concessora) que não estão envolvidas neste escalonamento irão assumir que foi realizada a concessão do respectivos minisegmentos do subquadro de dados, e assim não mais os utilizarão;

3. Confirmação: **MSH-DSCH: Confirmation** (*Grant direction* = 1) → a informação de confirmação é enviada pelo requisitor contendo uma cópia da concessão enviada pelo concesso para confirmar o escalonamento. As estações vizinhas desta estação (requisitora) que não estão envolvidas neste escalonamento irão assumir que foi realizada a concessão do respectivos minisegmentos do subquadro de dados, e assim não mais os utilizarão.

A figura 2.7 ilustra tal procedimento:

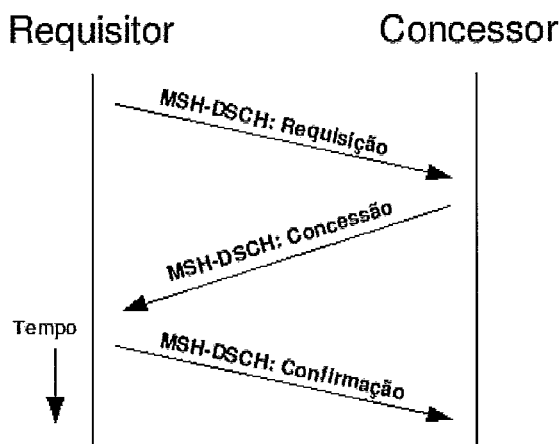


Figura 2.7: Procedimento de troca de mensagens de 3-vias para requisição, concessão e confirmação [3].

Algoritmo de Eleição Distribuído

Durante o segmento atual, *CurrentXmtTime* ($cxmt$), alocado para transmissão de mensagem MSH-DSCH, a estação executa o seguinte procedimento a fim de determinar o próximo segmento a ser alocado, *NextXmtTime* ($nxmt$):

1. Ordena sua tabela de vizinhos pelo $nxmt$;
2. Para cada entrada da tabela de vizinhos:
 - Obtém o *EarliestSubsequentXmtTime* ($esxmt$): o próximo subsequente segmento “possivelmente” alocado para transmissão de mensagem MSH-DSCH, através de: $esxmt \leftarrow nxmt + H$.

3. Escolhe o primeiro segmento dentro do intervalo $NextXmtTimeInterval$ ($nxmti$), após o atraso H , como sendo o $TempXmtTime$ ($txmt$), ou seja, $txmt$ é obtido como: $txmt \Leftarrow cxmt + H + 1$;

4. Ajusta a variável SUCESSO \Leftarrow falso;

5. **Enquanto** (SUCESSO = falso) **Faça**

- Determina as estações que estão na disputa pelo $txmt$, sendo estas todas as estações da tabela de vizinhos, cujo intervalo de segmentos disponíveis, $nxmti$, inclui o $txmt$ ($txmt \in nxmti$); ou cujo $esxmt$ seja menor ou igual a $txmt$ ($esxmt \leq txmt$);
- Usa a Função de Eleição ($MeshElection$) entre o conjunto de estações na disputa e a estação local, usando como parâmetros de entrada: $txmt$, ID da estação local e lista de ID's das estações na disputa:

$MeshElection(txmt, NodeID, CompetingNodeIDsList[])$.

- **Se** (estação local **NÃO** vencer a $MeshElection$) **Então**

- Escolhe o $txmt$ como o próximo segmento dentro do intervalo de segmentos disponíveis $nxmti$ ($txmt \Leftarrow txmt + 1$).

- **Senão**

- SUCESSO \Leftarrow verdadeiro;
- $nxmt$ da estação local recebe $txmt$ ($nxmt \Leftarrow txmt$).

A figura 2.8 ilustra a disputa para determinar o próximo segmento alocado para transmissão de mensagem MSH-DSCH.

Conforme descrito anteriormente o padrão 802.16 define, entre outros, dois parâmetros principais: (1) $NextXmtMx$ (mx) e (2) $XmtHoldoffExponent$ (exp).

Esses parâmetros são incluídos em cada mensagem MSH-DSCH e, além dos próprios parâmetros, as estações incluem os parâmetros de todas as suas estações vizinhas de 1-salto. Cada estação é capaz de calcular o $NextXmtTimeInterval$ ($nxmti$) de todas as estações em sua vizinhança de 2-saltos. $XmtHoldoffTime$ (H) é o número

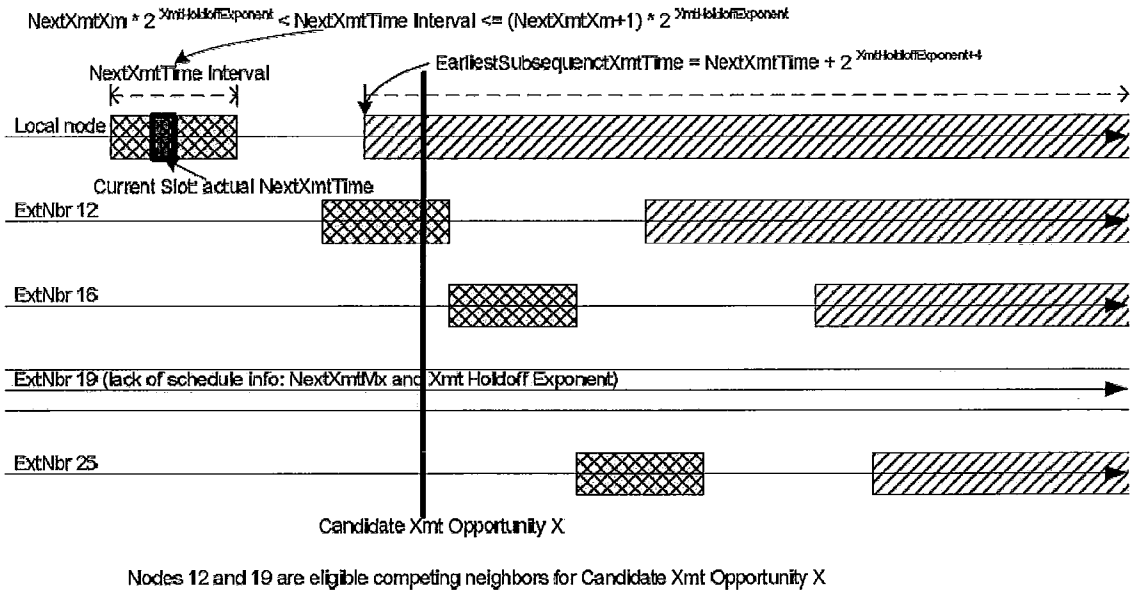


Figura 2.8: Diagrama ilustra as estações no procedimento para determinar o próximo segmento alocado para transmissão de mensagem MSH-DSCH [4].

de segmentos para a transmissão de mensagem MSH-DSCH depois do último segmento $LastXmtTime$ ($lxmt$) o qual não é permitido à estação transmitir mensagens MSH-DSCH e é calculado da seguinte forma: $H = 2^{exp+4}$.

Isso mostra que uma estação tem de esperar um mínimo de H segmentos de controle depois do último ($lxmt$) antes de ter outra (a próxima) oportunidade para transmitir. Depois de esperar H segmentos, a estação disputa com seus vizinhos um segmento, $NextXmtTime$ ($nxmt$) para transmitir a próxima mensagem MSH-DSCH.

O $NextXmtTime$ ($nxmt$) está contido no $nxmti$, que consiste em uma série de segmentos (oportunidades) do subquadro de controle, tem tamanho igual a 2^{exp} e é calculado da seguinte forma: $2^{exp} \cdot mx < nxmt \leq 2^{exp} \cdot (mx + 1)$.

O $EarliestSubsequentXmtTime$ ($esxmt$) é o segmento subsequente ao $nxmt$ em que é permitido a estação transmitir uma mensagem MSH-DSCH e é calculado da seguinte forma: $esxmt = nxmt + H + 2^{exp} \cdot mx$. A figura 2.9 ilustra os passos deste procedimento:

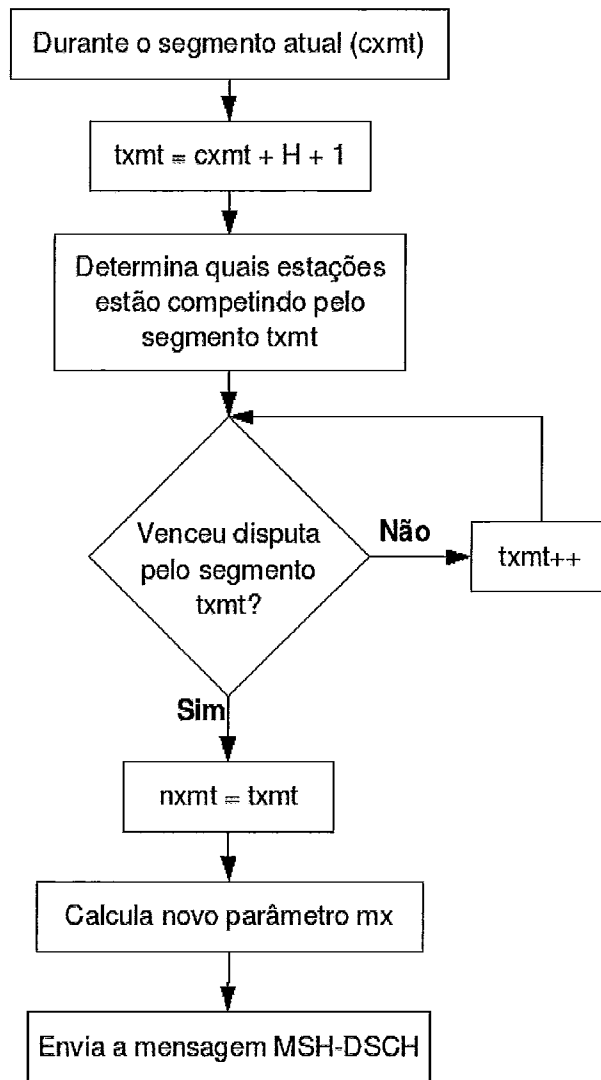


Figura 2.9: Visão geral do procedimento para determinar o próximo segmento de transmissão de mensagem MSH-DSCH [3].

Uma estação calcula seu próprio $nxmt$ durante o $cxmt$, isto é, o segmento quando a estação transmite sua mensagem MSH-DSCH. Então, a estação escolhe o *TempXmt-Time* ($txmt$) como $cxmt + H + 1$. Depois a estação deve determinar o conjunto de estações na disputa por este segmento $txmt$. Para isso, a estação irá incluir neste conjunto:

- a estação cujo intervalo $nxmt_i$ inclui o $txmt$ ($txmt \in nxmt_i$);
- a estação cujo $esxmt$ é menor ou igual a $txmt$ ($esxmt \leq txmt$);
- a estação cujo $nxmt$ é desconhecido (*desatualizado*).

As figuras 2.10 e 2.11 ilustram estes critérios de “eleição”:

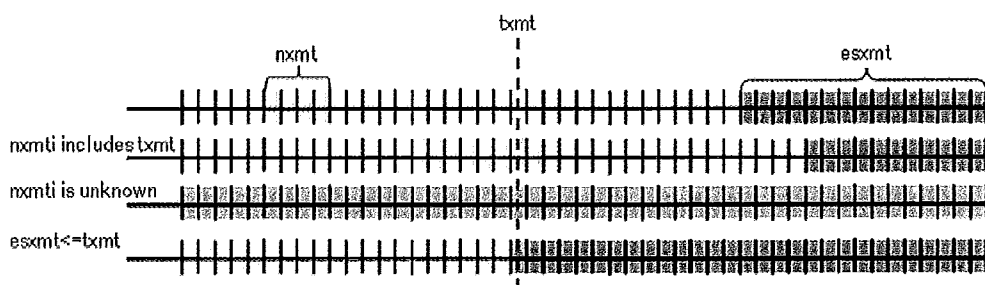


Figura 2.10: Critérios de “eleição” [3].

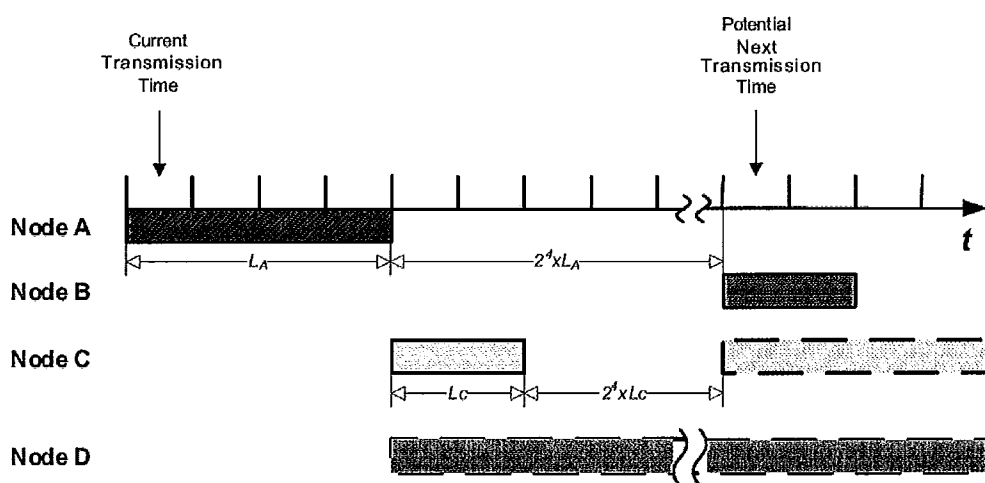


Figura 2.11: Critérios de “eleição” [5].

A “*mesh*” disputa é realizada entre este conjunto de estações, usando o $txmt$ como “semente” junto com os ID’s de todas as estações. Se a estação que executa o algoritmo de eleição não vence a “*mesh*” disputa, o $txmt$ é escolhido como o próximo segmento dentro do intervalo de elegibilidade ($txmt = txmt + 1$). Por outro lado, se vencer a “*mesh*” disputa, o $nxmt$ é escolhido como o $txmt$. Como a eleição é baseada no valor de $txmt$ e nos ID’s das estações, o resultado será o mesmo para todas as estações. Se uma estação vence a disputa por um específico segmento de transmissão de mensagem MSH-DSCH, nenhuma outra estação em sua vizinhança de 2-saltos irá vencer a disputa por este segmento. Depois que o $nxmt$ foi encontrado a estação precisa calcular o correspondente valor de mx para adicioná-lo junto com o valor de exp na mensagem atual MSH-DSCH para informar seus vizinhos sobre o $nxmti$.

