

WIRELESS MESH NETWORK

MÚLTIPLOS-RÁDIOS/MÚLTIPLOS-CANAIS

Antonio Abílio da Costa Coutinho

Departamento de Engenharia de Telecomunicações - Escola de Engenharia –
Universidade Federal Fluminense (UFF)
Rua Passo da Pátria, 156 - 24210-240 - São Domingos - Niterói – RJ – Brasil.

abilio.coutinho@terra.com.br

***Resumo.** Este trabalho tem como objetivo apresentar os conceitos e utilização de múltiplos-rádios/múltiplos-canaís em redes ‘Wireless Mesh Network’ baseadas no padrão IEEE 802.11.*

No decorrer do assunto, será abordado: tecnologia, arquitetura, diversidade de frequências disponíveis, topologia utilizando múltiplos canais e múltiplos saltos e protocolos.

1. INTRODUÇÃO

Apesar do espectro de frequências 2.4GHz e 5GHz disponibilizar múltiplos canais não sobrepostos, muitas redes *mesh/ad-hoc* sem fio, ainda são baseadas no padrão 802.11 de um único canal.

O uso de um único canal reduz a largura de banda disponível, devido à interferência de cada nó e à interferência entre saltos sucessivos no mesmo caminho, bem como, entre caminhos vizinhos.

O objetivo deste trabalho é apresentar o uso de **Múltiplos-Rádios/Múltiplos-Canaís** em redes *Wireless Mesh*. Na primeira parte, será apresentado, de uma forma geral, o conceito e arquitetura do padrão 802.11: camada Física e camada MAC; na segunda parte será apresentado o conceito de Múltiplos-Rádios/Múltiplos-Canaís e topologias utilizadas; na terceira e última parte serão apresentados protocolos propostos usando múltiplos-Rádios/múltiplos-Canaís, avaliação dos resultados de simulações e conclusão.

2. PADRÃO IEEE 802.11

O padrão IEEE 802.11 [3], adotado em 1997, define a subcamada MAC (*Medium Access Control*), controla o acesso ao meio e o gerenciamento de protocolos e serviços, e 3 camadas físicas, PHY (*Physical layer*): Infrared, FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) e DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) na banda de frequências de 2.4GHz com taxa de dados de 1 e 2 Mbps. Na especificação original foram incluídas as especificações para os padrões 802.11a, 802.11b e 802.11g.

- **Padrão 802.11a:** especifica, para a camada física (PHY), o uso da técnica OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) para atingir taxa de dados de até 54Mbps no range de frequência de 5MHz [4]. Na camada física o sinal é dividido por 52 sub-portadoras, das quais, 4 são sub-portadoras piloto que o sistema usa como uma referência para ignorar frequência ou mudanças de fase do sinal durante a transmissão e as 48 sub-portadoras restantes são usadas para fornecerem taxas de transmissão/recepção de dados de 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, ou 54 Mbps, dependendo das técnicas de modulação usadas. As taxas de 6, 12 e 24 Mbps são obrigatórias, as demais são opcionais.

A *Tabela 1* mostra os parâmetros de modulação em função das taxas de transmissão/recepção utilizadas.

Tabela 1 – Parâmetros de modulação

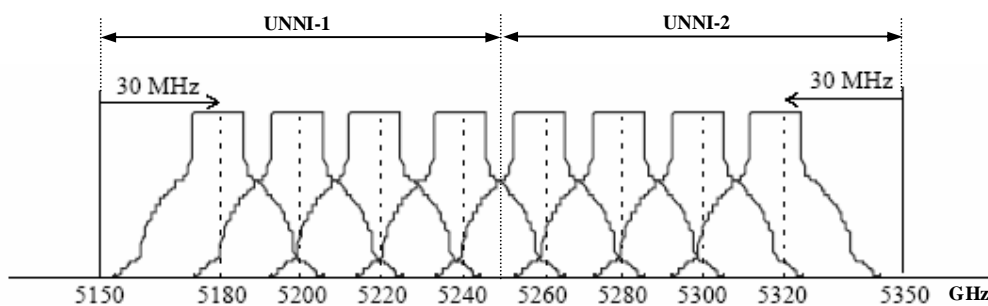
Data rate (Mbps/s)	Modulation	Coding rate (R)	Coded bits per subcarrier (N _{BPSK})	Coded bits per OFDM symbol (N _{CBPS})	Data bits per OFDM symbol (N _{DBPS})
6	BPSK	1/2	1	48	24
9	BPSK	3/4	1	48	36
12	QPSK	1/2	2	96	48
18	QPSK	3/4	2	96	72
24	16-QAM	1/2	4	192	96
36	16-QAM	3/4	4	192	144
48	64-QAM	2/3	6	288	192
54	64-QAM	3/4	6	288	216

A estrutura dos canais do padrão 802.11a faz uso da banda de frequência chamada UNNI (*Universal Networking Information Infrastructure*) e se divide em:

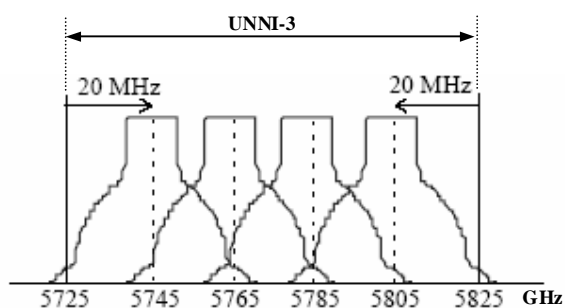
- ✓ UNNI-1: banda de frequência de 5.15 a 5.25 GHz, destinada ao uso em ambientes internos de edificações.
- ✓ UNNI-2: banda de frequência de 5.25 a 5.35 GHz, pode ser usada em ambientes internos e externos.

- ✓ UNNI-3: banda de frequência de 5.725 a 5.825 GHz, destinada ao uso em ambiente externo.

A Figura 1 mostra a estrutura de canais para o padrão 802.11a.



Banda inferior e média UNNI: 8 portadoras em 200MHz e 20MHz de espaçamento



Banda superior UNNI: 4 portadoras em 100MHz e 20MHz de espaçamento

Figura 1 - Esquema dos canais de frequência para o padrão 802.11a.

O padrão 802.11a [4] disponibiliza 13 canais ortogonais, porém, a camada física do padrão 802.11 está projetada para usar somente um único canal de frequência num determinado instante de tempo. A Tabela 2 mostra o número de canais válidos definidos para uso nos Estados Unidos.

Tabela 2 – Canais operacionais válidos para U.S.A

Regulatory domain	Band (GHz)	Operating channel numbers	Channel center frequencies (MHz)	Max. output power (mW)
United States	U-NII lower band (5.15–5.25)	36	5180	40 (2.5 mW/MHz)
		40	5200	
		44	5220	
		48	5240	
United States	U-NII middle band (5.25–5.35)	52	5260	200 (12.5 mW/MHz)
		56	5280	
		60	5300	
		64	5320	
United States	U-NII upper band (5.725–5.825)	149	5745	800 (50 mW/MHz)
		153	5765	
		157	5785	
		161	5805	

- **Padrão 802.11b:** usa tecnologia DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) para codificação dos dados na camada física na banda de frequência ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) de 2.4GHz e uma variedade de técnicas de modulação para fornecer taxas de transmissão/recepção de 1, 2, 5.5 e 11 Mbps [5], conforme mostra a *Tabela 3*.

Tabela 3 – Técnicas de codificação e modulação

Taxa (Mbps)	Codificação	Modulação	
		Obrigatório	Opcional
1	DBPSK	Barker-DSSS	
2	DQPSK	Barker-DSSS	
5.5	DBPSK	CCK-DSSS	PBCC
11	DQPSK	CCK-DSSS	PBCC

Barker-DSSS → Barker code & Direct Sequence Spread Spectrum.

CCK-DSSS → 8-Chip Complementary Code Keying & Direct Sequence Spread Spectrum.

DBPSK → Differential Binary Phase Shift Keying.

DQPSK → Differential Quadrature Phase Shift Keying

PBCC → Packet Binary Convolutional Code.

A alocação dos canais do padrão 802.11b depende da regulação de cada País, ver *Tabela 4*.

Tabela 4 – Alocação de canais de acordo com o órgão regulador

Domínio Regulador	Canais Alocados	Potência de Saída Máxima
U.S. (FCC) & Canada (IC)	1-11 (2,412 – 2,462 GHz)	1000 mW
Europa (ETSI)	1-13 (2,412 – 2,472 GHz)	100 mW
França	10-13 (2,457 – 2,472 GHz)	100 mW
Espanha	10-11 (2,457 – 2,462 GHz)	100 mW
Japan (MKN)	14 (2,484 GHz)	10 mW/MHz & 3 mW/MHz

Os canais adjacentes têm apenas 5MHz de separação, de modo que, muita da potência de cada canal cobre uma banda de 22MHz, o que significa que cada canal interfere com cada um dos outros. A *Figura 2* mostra a estrutura dos canais para o padrão 802.11b e a *Figura 3* mostra a melhor alocação para os países regulamentados pelo ETSI (*European Telecommunication Standards Institute*)

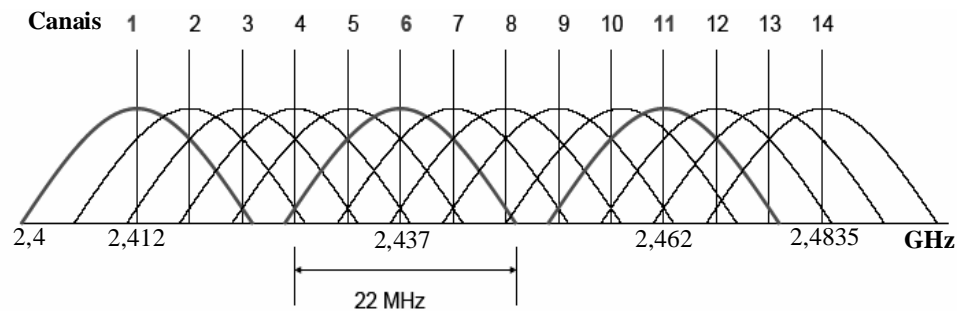


Figura 2 – Alocação dos canais para o padrão 802.11b

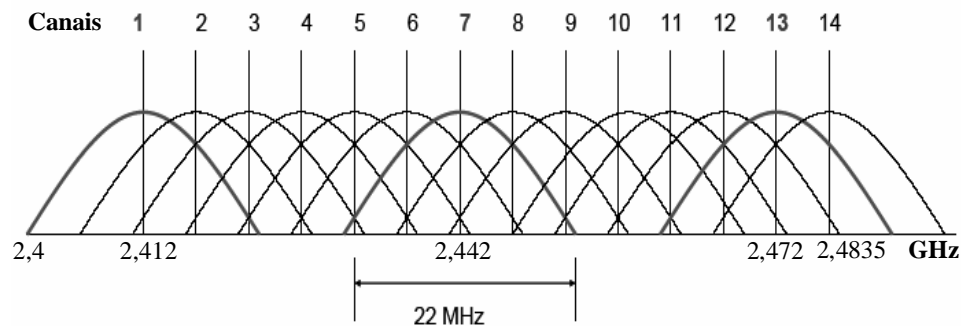


Figura 3 – Alocação dos canais do padrão 802.11b para os países regulados pelo ETSI

O padrão 802.11b [5] permite apenas 3 canais ortogonais: 1, 6 e 11 para os US.A e 1, 7 e 13 para a Europa, de modo que, devido ao pequeno número de canais não sobre-postos a instalação de redes sem fio com múltiplos pontos de acesso requer consideração de projeto cuidadoso para minimizar a interferência entre pontos de acesso que comunicam no mesmo canal.

- **Padrão 802.11g:** é uma extensão do padrão 802.11b, aprovado pelo IEEE em 1999 [6]. Este padrão foi criado para suportar alta taxa de dados, até 54Mbps, operar na mesma banda de frequência do 802.11b, 2.4 GHz, e ambos serem compatíveis. A alta taxa de dados foi conseguida introduzindo mudanças na camada física (PHY) do padrão 802.11, ERP (*Extended Rate Physical*), na tecnologia de transmissão e nas técnicas de codificação.

Para obter maior eficiência na utilização da largura de banda, o padrão 802.11g usa o mecanismo de transmissão OFDM, mesmo esquema OFDM definido para o padrão 802.11a, porém, adaptado para a banda de frequências de 2.4GHz, com técnicas de codificação baseadas na taxa de transmissão, conforme pode ser visto na *Tabela 5*.

Tabela 5 – Técnicas de codificação e modulação para o Padrão 802.11g

Taxa (Mbps)	Codificação	Modulação	
		Obrigatório	Opcional
1	DBPSK	ERP-DSSS	-
2	DQPSK	ERP-DSSS	-
5.5	DBPSK	ERP-CCK	ERP-PBCC
6	BPSK	ERP-OFDM	DSSS-OFDM
9	BPSK		ERP-OFDM e DSSS-OFDM
11	DQPSK	ERP-CCK	ERP-PBCC
12	QPSK	ERP-OFDM	DSSS-OFDM
18	QPSK		ERP-OFDM e DSSS-OFDM
22	8PSK		ERP-PBCC
24	16QAM	ERP-OFDM	DSSS-OFDM
33	8PSK		ERP-PBCC
36	16QAM		ERP-OFDM e DSSS-OFDM
48	64QAM		ERP-OFDM e DSSS-OFDM
54	64QAM		ERP-OFDM e DSSS-OFDM

- BPSK → Binary Phase Shift Keying.
- CCK-OFDM → 8-Chip Complementary Code Keying & Orthogonal Frequency Division Multiplexing.
- DBPSK → Diferential Binary Phase Shift Keying.
- DQPSK → Differential Quadrature Phase Shift Keying
- DSSS-OFDM → Direct Sequence Spread Spectrum & Orthogonal Frequency Division Multiplexing.
- ERP-CCK → Extended Rate Physical & 8-Chip Complementary Code Keying.
- ERP-DSSS → Extended Rate Physical & Direct Sequence Spread Spectrum.
- ERP-OFDM → Extended Rate Physical & Orthogonal Frequency Division Multiplexing
- ERP-PBCC → Extended Rate Physical & Packet Binary Convolutional Code.
- PSK → Phase Shift Keying.
- QAM → Quadrature Amplitude Modulation.
- QPSK → Quadrature Phase Shift Keying.

Como o padrão 802.11g [6] opera na mesma banda de frequências do padrão 802.11b e tem a mesma especificação para o número e estrutura de canais, ver *Figura 2* e *Figura 3*, apesar das altas taxas de transmissão, tem as mesmas limitações do padrão 802.11b, apenas 3 canais ortogonais disponíveis.

2.2 CAMADA FÍSICA

A camada física tem como função principal: codificar e decodificar os sinais, gerar e remover preâmbulo para sincronização, transmitir e receber bits, isto é, transmitir MPDUs (*MAC Protocol Data Units*) direcionadas pela camada MAC (*Medium Access Control*) [1] [2] [3]. No padrão 802.11 a camada física é dividida nas subcamadas:

- ✓ PLCP (*Physical Layer Convergence Procedure*): define um método de mapeamento das MPDUs para um formato de quadro apropriado para enviar e receber os dados do usuário e gerenciamento de informações entre duas ou mais estações usando a subcamada PMD associada.
- ✓ PMD (*Physical Medium Dependent*): define as características e o método (modulação e codificação/decodificação do sinal) de transmissão e recepção de dados do usuário através de um meio sem fio entre duas ou mais estações.

A *Figura 4* apresenta a estrutura da camada PHY e a *Figura 5* mostra um diagrama de blocos do hardware correspondente.

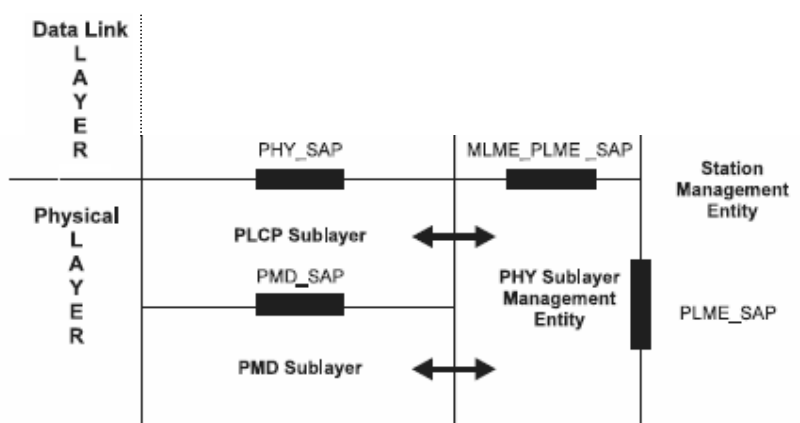


Figura 4 – Estrutura da camada física (PHY): Padrão 802.11

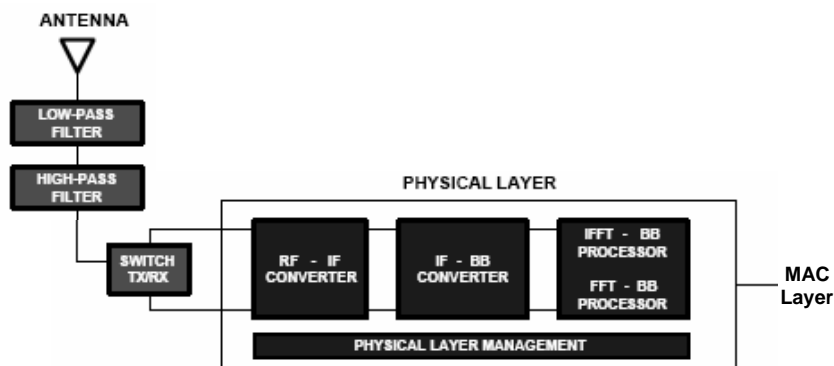


Figura 5 – Diagrama de blocos da interface de hardware da camada física.

2.2 CAMADA MAC

A camada MAC (*Medium Access Control*) tem como função principal controlar o acesso ao meio, mas também pode oferecer suporte para *roaming*, autenticação e conservação do consumo de energia [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7]. O serviço de dados MAC traduz os pedidos de serviço MAC solicitados pela subcamada LLC (*Logical Link Control*) para sinais de entrada utilizados pelas máquinas de estado MAC, bem como, traduz sinais de saída das máquinas de estado MAC para os serviços a serem enviados para a subcamada LLC.

Para o padrão 802.11 [3] [4] [5] [6] foram definidos três mecanismos básicos de acesso: um método obrigatório básico baseado na versão CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), um método opcional para evitar o problema de terminal escondido, e um método de eleição de disputa livre para serviço de *time-bounded*. Os dois primeiros métodos são definidos como DCF (*Distributed Coordination Function*) e o terceiro método denominado PCF (*Point Coordination Function*). DCF fornece somente serviços assíncronos, enquanto PCF oferece serviços assíncronos e *time-bounded*, mas necessita de um ponto de acesso para controlar o acesso ao meio e evitar disputa.

A *Figura 6* apresenta a arquitetura da camada MAC para o padrão 802.11 e a *Figura 7* o diagrama de blocos da interface de hardware correspondente.

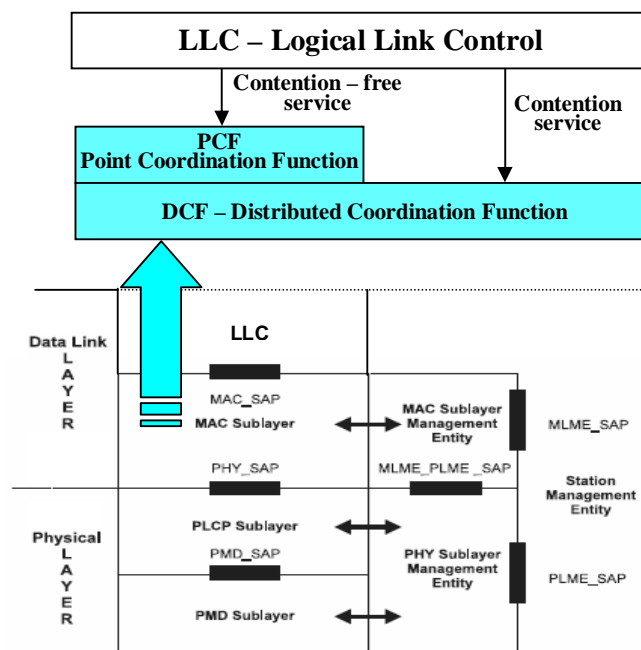


Figura 6 – Arquitetura da camada MAC: Padrão 802.11

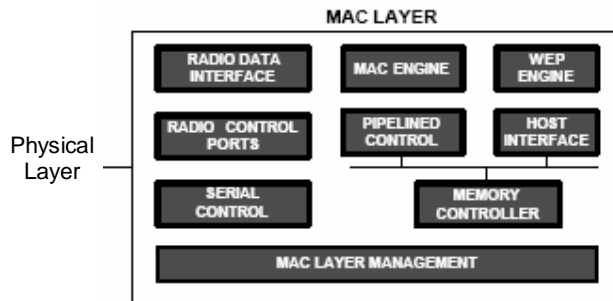


Figura 7 – Diagrama de blocos da interface de hardware da camada MAC

Por estar fora do escopo deste trabalho não serão apresentadas as funcionalidades, formatação dos quadros e protocolos utilizados pela camada MAC e pela camada física.

3. MÚLTIPLOS-RÁDIOS/MÚLTIPLOS-CANAIS

Apesar da disponibilidade de múltiplos canais não sobrepostos no espectro de frequências de 2.4GHz e 5GHz, a maioria das redes *wireless* baseadas no padrão 802.11 ainda operam num único canal, o que reduz substancialmente a largura de banda disponível para cada nó, visto que, cada nó tem que repetir cada pacote, isto é, escutar e transmitir para outros nós e, também, devido à interferência entre saltos sucessivos no mesmo caminho e entre caminhos vizinhos, ver *Figura 8*. Portanto, a arquitetura de redes de um único canal não pode ser usada para construir redes *wireless mesh* efetivas que possam adequadamente suportar os requerimentos de largura de banda.

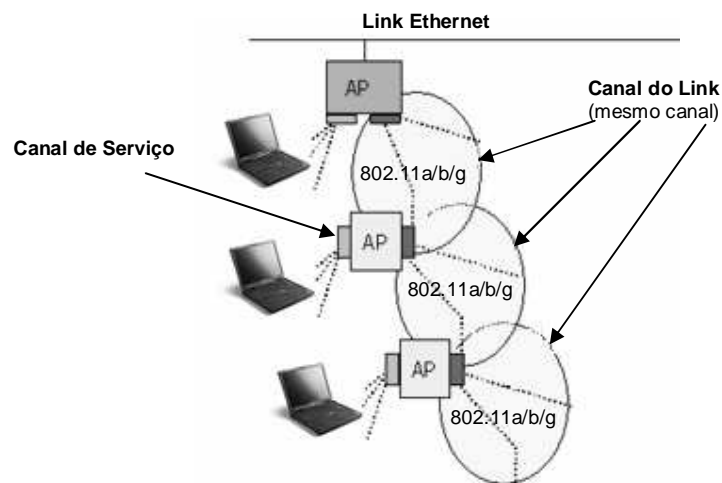


Figura 8 – Arquitetura de rede *wireless mesh* com link de canal único

3.1 TOPOLOGIA

Explorando o uso de múltiplos canais [8] [9] [10] [11] [14] [15] podemos alcançar taxas de transmissão/recepção muito mais altas que as obtidas usando um único canal, pois múltiplas transmissões poderão ocorrer sem interferência, no entanto, o DCF do protocolo MAC foi projetado para compartilhar um único canal entre *hosts*, de modo que, todo o dispositivo 802.11 corrente está equipado com um transceptor *half-duplex*. Apesar do transceptor poder chavear canais dinamicamente, só pode transmitir ou escutar um canal por vez. Assim, quando um *host* está escutando para um determinado canal, não pode escutar uma comunicação em curso em um outro canal diferente. Portanto, um novo tipo de problema de terminal escondido ocorre neste ambiente de múltiplo canal, de modo que, um protocolo MAC para canal único não funciona bem em ambiente de múltiplo canal, onde os nós podem chavear canais dinamicamente.

A Figura 9 apresenta uma topologia de rede *wireless mesh* com alocação dinâmica de canais.

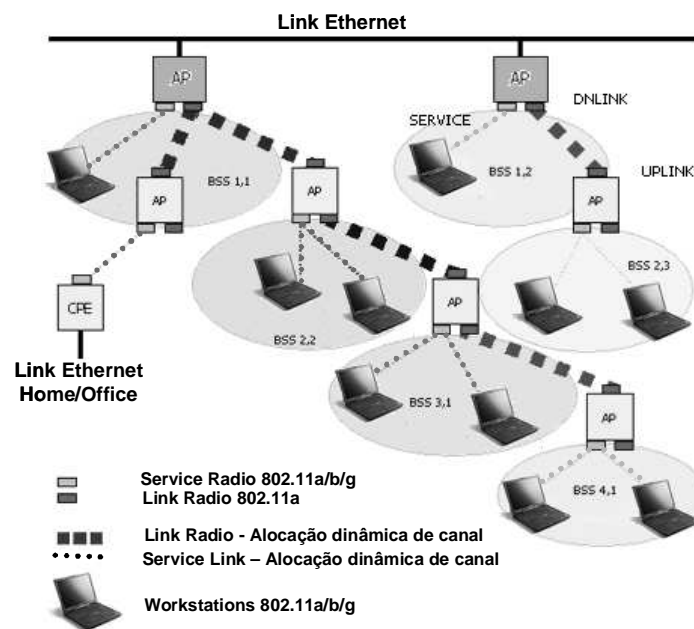


Figura 9 – Topologia de rede wireless mesh com alocação dinâmica de canais

Como podemos observar, os rádios/canais *up link* e *down link* em cada nó se comunicam em diferentes canais, linhas pontilhadas grossas, e os rádios/canais de serviço, elipses coloridas, também estão em canais sem interferência e em diferentes bandas de frequência (802.11b/g x 802.11a). Os *links* de rádio não interferem com os de serviço, operam de forma independente e os canais são alocados automaticamente para minimizar a interferência entre o conjunto de serviços, de modo que, o efeito endêmico da degradação da largura de banda usando um único rádio/canal é

eliminado, de modo que, agora são possíveis transmissões/recepções simultâneas.

O maior desafio é desenvolver protocolos que permitam um esquema de seleção de canais, fator principal para redução da disputa e possibilitar a distribuição das transmissões de pacotes por múltiplos canais.

3.2 PROTOCOLOS

Várias iniciativas têm sido tomadas para desenvolver protocolos eficientes, que permitam utilizar múltiplos rádios/múltiplos canais em redes *wireless mesh* com múltiplos saltos, sem mudar a arquitetura da camada PHY definida pelo padrão 802.11. A seguir serão apresentados alguns protocolos propostos.

□ MULTI-RADIO UNIFICATION PROTOCOL

O MUP (*Multi-Radio Unification Protocol*) [13] é um protocolo proposto para operar na camada de enlace (*link layer*) e tem como função coordenar num simples nó a operação de múltiplos rádios operando sobre múltiplos canais definidos pelos padrões 802.11, com o intuito de otimizar o uso do espectro de frequências disponíveis tão eficiente quanto possível, através de uma seleção inteligente do canal numa rede *wireless* com múltiplos saltos, para obter a maior largura de banda possível, mantendo as aplicações e os protocolos de nível mais alto sem alteração.

O protocolo MPU foi projetado para operar com múltiplos NICs (*Network Interface Cards*) sintonizados para canais de frequência ortogonal. Os NICs são ocultados das camadas superiores por meio de uma interface virtual, isto é, um único endereço virtual MAC em substituição a múltiplos endereços físicos MAC usados pelos NICs, conforme mostra a *Figura 10*.

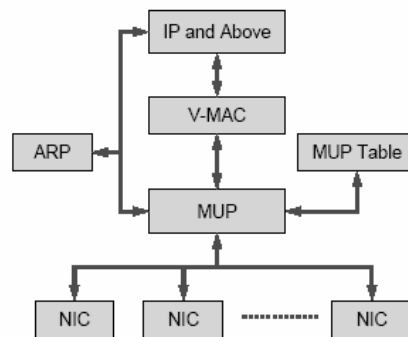


Figura 10 – Arquitetura para o protocolo MUP

MPU monitora, periodicamente, a qualidade do canal em cada interface (NIC) para cada um de seus vizinhos, e quando é a sua vez de enviar um pacote para um vizinho, seleciona a interface correta e então envia o dado.

O MPU trabalha bem em qualquer nó que tenha dois ou mais NICs *wireless*. Inicialmente, as interfaces de rede sem fio em cada nó são sintonizadas para canais ortogonais e a cada canal é atribuído um código de hardware (*hard-code*). A funcionalidade básica oferecida pelo MPU é um meio de decidir que NIC usar e, portanto, que canal usar, quando comunicando com um nó vizinho. Uma proposição simples seria simplesmente escolher um canal aleatoriamente dentre os múltiplos canais em uso, esta proposição reduz a disputa e em consequência aumenta a capacidade geral da rede, porém, um nó pode escolher um canal que esteja sendo usado por um nó vizinho em vez de um canal ocioso disponível.

O objetivo principal do MPU é achar o melhor canal disponível para comunicação baseado-se nas condições correntes de cada canal, para isso o MPU usa a métrica de qualidade de canal, cuja técnica para estimar a qualidade do canal é enviar mensagens de prova através de cada canal em um período base e então medir o RTT (*Round Trip Time*) dessas mensagens. Para cada nó vizinho, um nó calcula sua métrica de qualidade do canal independente da decisão de seus vizinhos, de modo que, a decisão sobre que canal de comunicação usar, dentre um par de nós, é baseada nas informações locais da qualidade do canal.

O protocolo MUP tem duas funcionalidades básicas:

✓ **DESCOBRIR E CLASSIFICAR OS NÓS VIZINHOS**

O MPU mantém uma tabela de informações sobre os nós vizinhos (*MUP neighbor table*). Um nó usa esta tabela para guardar o caminho com quais nós ele se comunicou e quais desses nós são MUP, armazenar o endereço por interface MAC, bem como, a qualidade do canal correspondente e informações do canal selecionado para cada vizinho. A *Tabela 6* mostra as informações mantidas na camada MUP para cada vizinho.

Tabela 6 – Tabela de vizinhos MUP (*MUP neighbor table*)

Campo	Descrição
Neighbor	Endereço IP de <i>host</i> vizinho
Status	Indica se um vizinho N é MUP
MAC list	Endereço MAC associado com vizinho N
Quality list	Valor da qualidade do canal para cada endereço MAC de vizinho N
Channel	Canal preferido corrente para comunicar com vizinho N
Selection time	Última vez que uma decisão de seleção de canal foi feita
Packet time	Última vez que um pacote foi enviado ou recebido de vizinho N
Probe time list	Lista dos tempos das mensagens de prova desconhecidas

Quando um *host* com MUP habilitado inicia a comunicação com um *host* vizinho não assume que o vizinho é MUP, portanto, a comunicação se inicia usando o protocolo ARP (*Address Resolution Protocol*), isto é, uma solicitação ARP é transmitida para todas as interfaces. Se o MUP recebe um pacote com um endereço de destino na camada de enlace, ele divulga o pacote para todas as interfaces sem fio. Todas as mensagens ARP recebidas passam através da camada MUP, e o MUP registra qualquer informação de endereço MAC destas mensagens. Quando o nó destino recebe pedidos ARP, ele envia resposta ARP assegurando que o endereço MAC contido no ARP resposta corresponde à interface de rede que recebeu o pedido ARP. Uma vez que o *host* originário recebe qualquer das respostas ARP, ele deve iniciar a comunicação usando a interface pela qual recebeu a resposta ARP. Caso alguma resposta adicional ARP seja recebida, o MUP também registra esses endereços MAC adicionais.

Após o ARP inicial, um nó MUP permitido também inicia o processo de descoberta MUP para determinar se o vizinho é um MUP habilitado. Para determinar se o nó remoto suporta MUP uma mensagem MUP “CS” (*Channel Select*) é enviada para todas as interfaces resolvidas. Um nó MUP habilitado responderá com uma mensagem “CS-ACK” (*Channel Select Acknowledgment*) ao passo que um nó não MUP não responderá. *Timeouts* são usados para retransmitir mensagens CS, de maneira que, após um certo número de falhas, o nó vizinho é classificado como um nó não MUP. As entradas na tabela de vizinhos MUP são apagadas se nenhum tráfego é trocado com aquele vizinho por um longo período de tempo.

✓ PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO ENTRE NÓS MUP

Quando dois nós MUP se comunicam, eles periodicamente testam a qualidade de todos os canais que estão disponíveis para eles e, também, de forma periódica, eles decidem qual canal de comunicação usar para o próximo período de tempo, baseando-se em sua estimativa recente da qualidade do canal, portanto, de todos os NICs disponíveis o MUP seleciona aquele que tiver melhor qualidade de canal e, uma vez selecionado o canal, o MPU fixa-o para uso por período tempo significativo, na ordem de segundos, para compensar o tempo da medida de tráfego do protocolo ajustar para as condições de mudança da rede.

Para calcular a qualidade de um determinado canal, o nó envia mensagens “CS” num período fixo de tempo, tipicamente a cada 500ms, quando um nó recebe uma mensagem “CS”, imediatamente responde com a mensagem “CS-ACK”, então o nó incorpora a medida RTT numa média ponderada chamada SRTT (*Smoothed RTT*):

$$SRTT = \alpha * RTT_{new} + (1 - \alpha) * SRTT$$

Esta média ponderada é usada como estimativa da qualidade do canal. O protocolo MUP não usa SRTT para fazer qualquer tipo de cálculo sobre a carga do canal.

Em alguns casos as mensagens CS e CS-ACK são perdidas. O MUP detecta a perda de mensagens de duas formas:

- 1) As mensagens CS e CS-ACK contêm o mesmo número de seqüência, então o nó transmissor pode detectar quando um CS-ACK chega na ordem errada e, neste caso, o MUP assume que todas as mensagens CS fora de ordem foram perdidas.
- 2) Nenhuma mensagem CS-ACK chega ao nó transmissor num período de tempo de 3 vezes o SRTT corrente, então o protocolo decide que a mensagem CS foi perdida.

Para cada mensagem de prova perdida o protocolo atribui uma penalidade de perda de pacotes de 3 vezes o SRTT corrente.

O protocolo MUP usa um intervalo de tempo aleatório para decidir quando mudar o canal selecionado para cada um dos vizinhos, valores típicos para este intervalo estão entre 10 e 20 segundos, a decisão de comutar ou não o canal é baseada no SRTT, que, compara os valores de qualidade do canal com todos os canais disponíveis, o canal com melhor qualidade, só é selecionado se assegurar uma certa percentagem de melhoria em relação ao canal corrente, um valor típico para essa percentagem é 10% . A *Tabela 7* fornece um resumo dos parâmetros que afetam o desempenho do protocolo MUP.

Tabela 7 – Parâmetros de desempenho do MUP

Parâmetro	Descrição
α	Fator peso --> Equação SRTT
T_{cs}	Período de mensagem "CS"
T_{Min}, T_{Max}	Intervalo aleatório para decidir que canal usar.
T_{gp}	Período mínimo ocioso antes que um nó seja apagado da tabela.
p	Percentagem de melhoria para comutar canal.

Uma vez tomada a decisão de comutar para outro canal, o nó imediatamente começa enviando os pacotes sobre a interface recentemente selecionada.

O protocolo MUP é resistente a falha dos nós. Sempre que um nó falha e é reinicializado, a tabela de vizinhos MUP se inicia vazia, de modo que, o nó simplesmente inicia o processo de redescobrir seus vizinhos.

□ MULTI-CHANNEL MAC PROTOCOL

O protocolo MMAC (*Multi-Channel MAC*) [12] foi proposto para permitir os *hosts* utilizarem múltiplos canais através do chaveamento dinâmico de canais usando apenas um transceptor por máquina, mas ainda solucionar o problema de terminal escondido num ambiente de múltiplos canais usando sincronização temporal.

A idéia principal foi dividir o tempo em intervalos fixos de tempo usando *beacons*, e ter uma pequena janela no início de cada intervalo para indicar tráfego e negociar canais para uso durante o intervalo. Este esquema requer sincronização de *clock* entre todos os *hosts*.

O projeto do protocolo MMAC teve como base as premissas seguintes:

- N canais estão disponíveis para uso e todos têm a mesma largura de banda. Nenhum dos canais se sobrepõe, portanto, os pacotes transmitidos nos diferentes canais não interferem uns com os outros. Os *hosts* têm conhecimento prévio de quantos canais estão disponíveis.
- Cada *host* é equipado com um único transceptor *half-duplex*. Portanto, um *host* tanto pode transmitir como escutar, mas não pode fazê-lo simultaneamente. Um *host* só pode escutar ou transmitir em um canal por vez, assim, quando escuta para um canal não pode sentir a portadora nos outros canais.
- O transceptor é capaz de chavear seus canais dinamicamente. O tempo para chaveamento de canal é de 224 μ s.
- Os nós são sincronizados, de maneira que, todos os nós iniciam seu intervalo *beacon* ao mesmo tempo. A sincronização de *clock* pode ser alcançada usando soluções fora da banda, tal como GPS, ou dentro da banda. Se uma solução “fora da banda” puder ser usada, nenhum *overhead* é imposto para os canais usados por este protocolo. Mas, se uma solução “dentro da banda” é usada, então é necessário considerar o *overhead* de sincronização. Para modelar o *overhead* da solução “dentro da banda”, foi implementado o mecanismo de *beacon* similar ao TSF (*Timing Synchronization Function*) do IEEE 802.11.

No protocolo MMAC, cada nó mantém uma estrutura de dados chamada PCL (*Preferable Channel List*), que indica qual é o canal preferível para o nó usar. O PCL registra o uso dos canais dentro do limite de transmissão do nó e baseado nestas informações, os canais são categorizados em três categorias:

- Preferência alta (*HIGH*): O canal já foi selecionado pelo nó para usar no intervalo de *beacon* corrente. Se um canal está neste estado, este canal deve ser selecionado. Para cada intervalo *beacon*, quando muito, um canal pode estar neste estado em cada nó.

- Preferência Média (MID): O canal ainda não foi ocupado para ser usado no limite de transmissão do *host*. Se não existe canal no estado *HIGH*, um canal neste estado será preferido.
- Preferência Baixa (*LOW*): O canal já está ocupado por pelo menos um dos nós dos vizinhos imediatos. Para equilibrar quanto possível a carga do canal, existe um contador para cada canal no PCL para registrar quantos pares “origem-destino” planejam usar o canal para o intervalo corrente. Se todos os canais estão no estado *LOW*, um nó seleciona o canal com a menor contagem.

Os estados do canal são mudados da seguinte forma:

- Todos os canais no PCL vão para o estado MID, quando o nó é ligado, e no início de cada intervalo *beacon*.
- Se os nós origem e destino concordam sobre o uso de um canal, ambos registram o canal para ser estado *HIGH*.
- Se um nó ouve por acaso um pacote ATIM-ACK (*Ad hoc Traffic Indication Messages – Acknowledgment*) ou ATIM-RES (*Ad hoc Traffic Indication Messages – Reservation*), muda o estado do canal especificado no pacote para ser *LOW* se previamente estava no estado MID. Quando o estado de um canal muda de MID para *LOW*, o contador associado é colocado em 1 (um). Se o canal previamente estava no estado *HIGH*, permanece no estado *HIGH*. Se o canal já estava no estado *LOW*, o contador do canal é acrescido de 1 (um).

No protocolo MMAC a negociação de canal é feita durante a janela ATIM (ATIM → PSM IEEE 802.11, embora para este protocolo tenha diferentes propósitos). Uma pequena janela chamada de *ATIM window* é colocada no início de cada *intervalo beacon* (*intervalo beacon* = tempo dividido por *beacons* transmitidos periodicamente). Os nós que tem pacotes para transmitir negociam canais com os nós destino durante a janela *ATIM window*.

✓ **NEGOCIAÇÃO DE CANAL DURANTE A JANELA ATIM**

No intervalo *ATIM window*, cada nó deve escutar para o canal *default*. O canal *default* é um dos múltiplos canais, que é predefinido assim que cada nó conhece qual canal é o canal *default*. Durante o intervalo *ATIM window*, todos os nós escutam o canal *default*, e *beacons* e pacotes ATIM são transmitidos neste canal. Fora da janela *ATIM windows*, o canal *default* é usado para transmissão de dados, similar aos outros canais.

Quando múltiplos nós começam a transmitir pacotes ATIM no início de um *intervalo beacon*, pacotes ATIM colidirão um com o outro. Para evitar tais colisões, cada nó aguarda por um intervalo *backoff* aleatório antes de transmitir um pacote ATIM. O intervalo *backoff* é escolhido na escala $[0, CW_{min}]$. Similar a pacotes RTS e CTS, os

pacotes ATIM e ATIM-ACK, também, incluem informação NAV para evitar o problema do terminal escondido numa rede de múltiplos saltos (*multi-hop*).

✓ **REGRAS PARA SELEÇÃO DE CANAL**

Quando um nó recebe um pacote ATIM, seleciona um canal e notifica o transmissor incluindo a informação do canal no pacote ATIM-ACK. O receptor tenta selecionar o melhor canal baseado na informação incluída no PCL dos transmissores (lista dos canais preferíveis) e no seu próprio PCL. O melhor canal significa o canal com o menor plano de tráfego. Este algoritmo de seleção esforça-se para equilibrar a carga do canal tanto quanto possível, de maneira que a perda de largura de banda causada pela disputa e pelo backoff seja reduzida. Por esta razão, são contados o número de pares “origem-destino” que selecionaram o canal por terem escutado por acaso pacotes ATIM-ACK e ATIM-RES, seleciona aquele que tiver a menor contagem.

Este esquema assume que cada par “origem-destino” entregará a mesma quantidade de tráfego num intervalo *beacon*, o que pode não ser verdade. O melhor caminho pode ser contar o número de pacotes planejados para serem transmitidos no canal no intervalo *beacon*. Para fazer isto, a origem precisa incluir o número de pacotes pendentes no pacote ATIM.

A *Figura 11* ilustra o processo de negociação de canal e troca de dados para o protocolo MMAC.

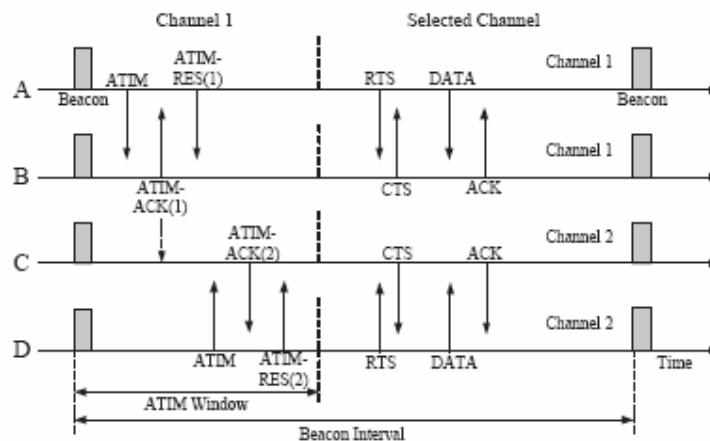


Figura 11 – Processo de seleção de canal e troca de dados MMAC

4. AVALIAÇÃO DE RESULTADOS

□ MULTI-RADIO UNIFICATION PROTOCOL

- 1) Avaliação do desempenho do protocolo MUP [13] usando uma combinação de implementação de *Kernel* e simulações.

O MUP foi implementado como um *driver* no nível do *kernel* do *Windows XP*. O *driver* é um *driver* intermediário NDIS do *Windows*, que fica armazenado abaixo da camada de rede, mas acima da camada de enlace (*Link layer*). O *driver* executa multiplexação, através de múltiplas interfaces físicas, para enviar dados e, demultiplexação para a recepção de pacotes, dando a impressão para os protocolos e aplicações das camadas superiores, de estar usando uma única interface e endereço MAC. No sistema operacional *Windows*, este acesso requer que o *driver* funcione como *driver* de mini-porta e como *driver* de protocolo.

Por estar fora do escopo deste trabalho não será apresentado um funcionamento detalhado do protocolo.

✓ CHAVEAMENTO DE CANAIS

Para ilustrar o aspecto de chaveamento de canal MUP, foi rodado um experimento com quatro máquinas denominadas A, B, C e D. Cada máquina estava equipada com 2 NICs 802.11b (Cisco 340). Em cada nó, um NIC estava sintonizado no canal 1 e o outro no canal 11. Todas as máquinas estavam a alguns pés distantes umas das outras. As máquinas A e B eram MUP habilitadas, ao passo que as máquinas C e D não eram MUP habilitadas, de modo que, para estas máquinas foram atribuídos, manualmente, endereços IP distintos para seus NICs, conforme mostra a *Figura 12*.

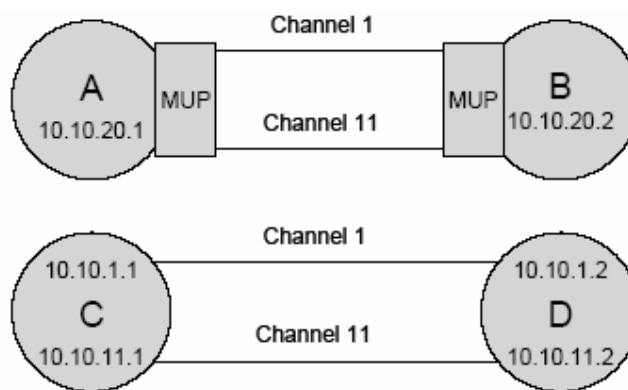


Figura 12 – Setup experimental para ilustrar chaveamento de canal

Os resultados dos experimentos estão mostrados na *Figura 13*

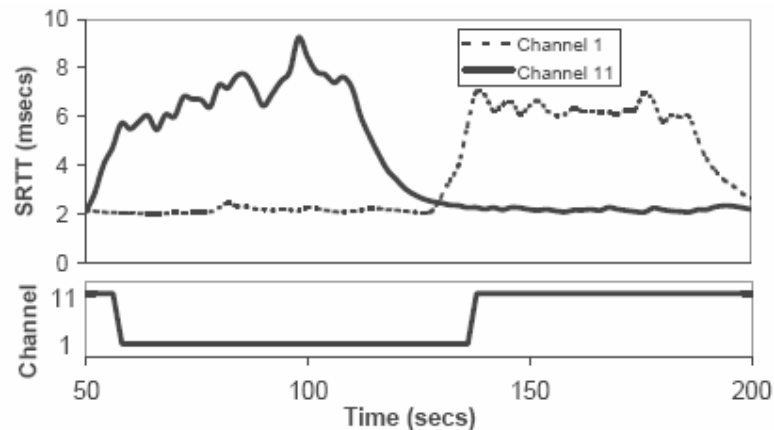


Figura 13 – Chaveamento de canal

O gráfico superior mostra a medida SRTT do nó A para o nó B, canais 1 e 11, e o gráfico inferior mostra o canal que está sendo usado pelo nó A para enviar dados para o nó B.

Durante todo este experimento, o nó A envia trafego CBR para o nó B à taxa de 50Kbps.

Num instante de tempo menor que 50s, o nó A está usando o canal 11 para enviar dados para o nó B. No instante de tempo 50s, o nó C inicia uma grande transferência TCP para o nó D usando o NIC sintonizado para o canal 11, no que resulta num aumento de disputa sobre o canal 11, evidenciado pelo aumento do SRTT daquele canal. Como resultado, após um pequeno *delay* imposto pelo mecanismo de histerese, o nó A comuta para o canal 1 para enviar dados para B. A transferência TCP entre o nó C e o nó D termina em torno do tempo 125s. A disputa sobre o canal 11 diminui, como evidenciado pela queda do SRTT. No tempo 130s, inicia uma nova transferência TCP entre o nó C e o nó D sobre o canal 1. A disputa e, conseqüentemente, SRTT do canal 1 aumentam. Após o *delay* de histerese o nó A retorna para o canal 11 para enviar dados para o nó B.

✓ IMPACTO DE ENFILEIRAMENTO

O *setup* experimental foi o mesmo utilizado para verificar os aspectos de chaveamento, mas a implementação foi ligeiramente modificada, tal que, o nó A e o nó B sempre usaram o canal 1 para enviar dados para cada um dos outros nós, indiferente dos valores de SRTT. No tempo 150s, o nó A inicia uma grande transferência TCP para o nó B, nesse mesmo instante o nó C inicia uma grande transferência de dados para o nó D usando o canal 11.

A *Figura 14* mostra o SRTT medido pelo nó A para o nó B, em ambos os canais.

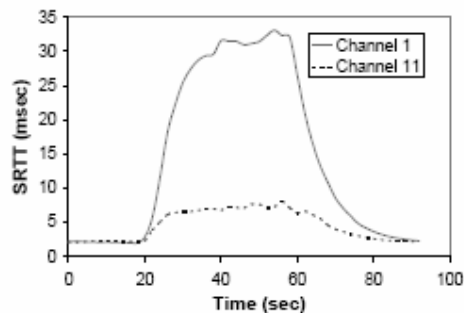


Figura 14 – Impacto de Enfileiramento

O SRTT do canal 1 é muito maior do que o SRTT do canal 11, apesar do volume de tráfego em ambos os canais ser aproximadamente igual. A razão para o grande valor de SRTT no canal 1, se deve ao fato de o pacote “CS” ser enfileirado no nó A atrás dos pacotes de dados TCP.

O impacto de enfileiramento no SRTT é muito maior do que o impacto de disputa. Para vencer o impacto de enfileiramento foi necessário inserir pacotes “CS” e “CS-ACK” no cabeçalho da fila. O hardware IEEE 802.11e permite designar alta prioridade para pacotes “CS” e “CS-ACK”.

2) Avaliação de desempenho do protocolo MUP utilizando simulador ns2.

O modelo de nó *wireless* foi modificado no simulador ns, para atribuir alta prioridade aos pacotes de prova. Não foi feita qualquer alteração para o modelo de canal da camada física e o modelo MAC do padrão 802.11. Assumido o uso de antenas omnidirecionais. O protocolo MUP foi instalado acima da camada MAC, modificando o código que manipula o encaminhamento da camada de enlace (*Link layer*) e ARP.

Por estar fora do escopo deste trabalho não será apresentado um funcionamento detalhado do protocolo.

• RTT COMO MEDIDA DE CARGA

O protocolo MUP conta com a medida do RTT de um salto (hop), entre um par de *hosts*, para determinar a qualidade do canal daqueles *hosts*, mas o MUP usa SRTT para fazer distinção entre a qualidade dos canais disponíveis.

Na simulação foram usados 12 nós *wireless*, todos localizados dentro das áreas de comunicação uns dos outros. Nenhum dos nós era MUP habilitado, apenas um canal disponível, e todos os nós sintonizados para esse canal.

Apenas 2 nós foram monitorados. Um dos nós monitorados pinga o outro nó a cada 500ms e calcula o SRTT usando estas amostras de tempo. Os outros 10 nós são agrupados em 5 pares, cada um consistindo de um

transmissor e receptor de trafego CBR. O transmissor envia dados para o receptor a 200Kbps.

A *Figura 15* mostra o valor de SRTT calculado pela monitoração do nó usando $\alpha=0,1$.

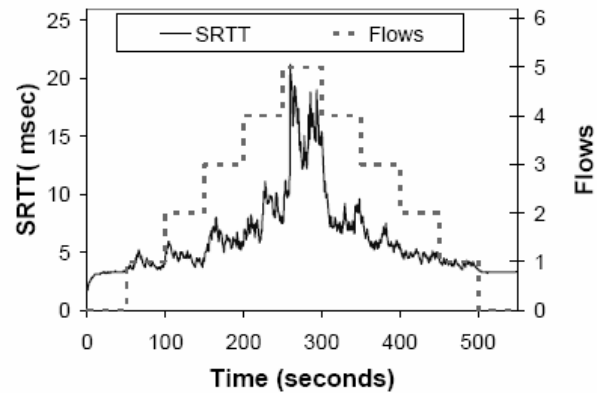


Figura 15 – Valor de SRTT com Trafego CBR e $\alpha = 0,1$

A *Figura 16* mostra o valor de SRTT calculado pelo monitoração do nó para diferentes valores de α .

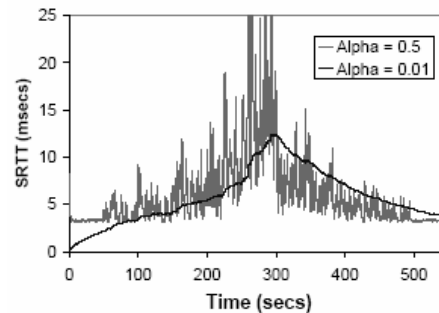


Figura 16 – Valor de SRTT com Trafego CBR, $\alpha=0,01$ e $\alpha=0,5$

- **BENEFÍCIOS DA SELEÇÃO DE CANAIS INTELIGENTES**

Nesta simulação foi considerado um cenário em que os *hosts* são MUP e operam juntos com outros *hosts* que não são MUP. Os resultados estão baseados numa topologia de grade de 16 nós *wireless*, conforme mostra a *Figura 17*.

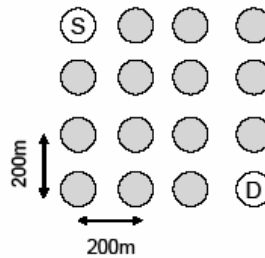


Figura 17 – Topologia de rede em forma de matriz

Os nós são estacionários, espaçados 200 metros uns dos outros, e usa o protocolo AODV para rotear pacotes.

O padrão de tráfego na rede é uma sessão de transferência de volume TCP estabelecida ente os S e D, que estão nos cantos opostos da grade. Visto que, o range nominal do modelo PHY 802.11 no ns é aproximadamente 250 metros, esta sessão tem de caminhar por múltiplos saltos. A conexão FTP roda sobre o TCP, e sempre tem dados para enviar. Em adição ao tráfego TCP, há 4 fluxos UDP na rede, cujas origens e destinos são selecionados aleatoriamente no início da simulação. Cada fluxo UDP oscila independentemente entre um período ON e um período OFF. Durante o período ON, o transmissor do fluxo UDP envia dados para o receptor a 50Kbps. O intervalo de sucessivos períodos ON são tirados de uma distribuição de *Pareto* com uma média de 2 segundos e *shape* de 1.2. Durante o período OFF o fluxo UDP não transmite dados. O intervalo de sucessivos períodos OFF também são independentemente tirados da distribuição de *Pareto* com média de *off* segundos e *shape* de 1.2. A intensidade do tráfego UDP foi definida para ser a razão entre o período médio ON e o período médio OFF.

Para o exemplo, se *off*=1 significa que a intensidade do tráfego é 2 e se *off*=4 então a intensidade do tráfego é 0,5.

A Figura 18 mostra o *throughput* da conexão TCP, para MUP e MUP aleatório. Valores médios calculados de 5 simulações.

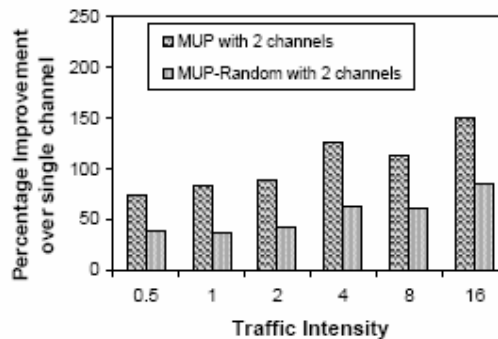


Figura 18 – Seleção de canais inteligentes na presença de nós não MUP

- **COMPARAÇÃO DO PROTOCOLO MUP COM STRIPING**

O uso de múltiplos rádios permite enviar e receber pacotes simultaneamente. Porém, a qualquer tempo o protocolo MUP usa somente uma interface de rede para enviar pacotes para seus vizinhos. Então pergunta-se, porque não usar todas as interfaces de rede para enviar pacotes, isto é, porque não incorporar retalhamento (*striping*) no protocolo MUP.

A *Figura 19* e a *Figura 20* mostram a comparação do desempenho do protocolo MUP com diferentes protocolos de retalhamento (*striping*) onde mostra que os ganhos devido ao *striping* são muito sensíveis à sobrecarga e condições do ambiente da rede.

Para esta simulação foi utilizado o algoritmo de *striping* seguinte: sempre que um nó pode falar para um vizinho usando mais de uma interface, utiliza as interfaces na forma *round-robin* para enviar pacotes para aquele vizinho. O algoritmo *round-robin* opera na base de um por vizinho, um nó pode usar a mesma interface para enviar pacotes sucessivos se eles se destinam a diferentes vizinhos.

Para avaliar o desempenho da comparação do algoritmo *striping* com o protocolo MUP, foram mantidas as mesmas condições de teste das simulações anteriores, porém, neste caso todos os 16 nós tem dois rádios.

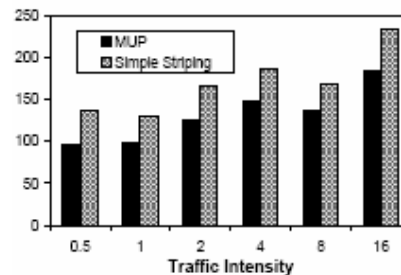


Figura 19 – Striping simples na ausência de nós não MUP

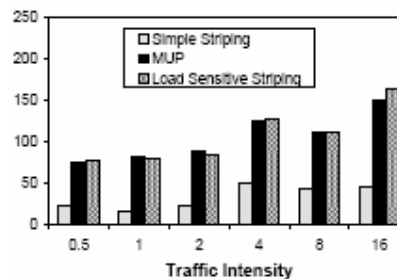


Figura 20 – Striping simples e sensível a carga na presença de nós não MUP

□ **MULTI-CHANNEL MAC PROTOCOL**

Para avaliar o desempenho do protocolo MMAC [12] foram utilizadas duas métricas e um modelo de simulação usando simulador ns2 com extensões *CMU wireless*.

• **MÉTRICAS**

1) **THROUGHPUT AGREGADO SOBRE TODOS OS FLUXOS NA REDE**

Um MAC de múltiplos canais melhorará o *throughput* total por um fator N, onde N é o número de canais disponíveis, o que só é alcançado se cada nó tiver N transceptores. Com um transceptor por nó o *throughput* ideal não pode ser alcançado devido ao *overhead* requerido para negociar canais e evitar o problema de terminal escondido.

Com o protocolo MMAC é esperado aumentar o *throughput* da rede explorando múltiplos canais com um transceptor por nó.

2) **DELAY MÉDIO DO PACOTE SOBRE TODOS OS FLUXOS NA REDE.**

O *delay* médio do pacote é a diferença entre o tempo em que a camada de enlace (*Link layer*) do transmissor recebe um pacote para transmitir, e o tempo que o pacote alcança o destino. Portanto, o *delay* é a soma dos *delays* para enfileiramento, *backoff*, negociação de canal e transmissão.

O tamanho da fila em cada nó é de 50 pacotes.

• **SIMULAÇÃO**

❖ **CONDIÇÕES DO TESTE**

- ✓ Taxa de bits/canal: 2Mbps.
- ✓ Range de transmissão de cada nó: aproximadamente 250 metros.
- ✓ Intervalo *beacon*: 100ms.
- ✓ Gera e transmite tráfego no nó origem, tipo: CBR (*Constant Bit Rate*).
- ✓ Duração da simulação: 40 segundos.
- ✓ Número de nós: 3 (quando não especificado).
- ✓ Tamanho do pacote: 512 bytes.
- ✓ ATIM window: 20ms (quando não especificado).

❖ **PARÂMETROS VARIÁVEIS**

- ✓ Número de nós na rede.
- ✓ Taxa de tráfego CBR de pacotes que chegam.
- ✓ Tamanho de ATIM window
- ✓ Número de canais.

Cada ponto no gráfico é uma média de 30 simulações. Por estar fora do escopo deste trabalho não será apresentado o funcionamento detalhado do protocolo.

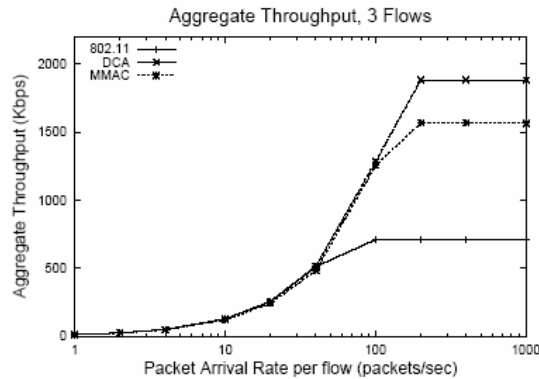
As simulações foram realizadas em dois cenários: *wireless LAN* e redes *multi-hop*.

I. WIRELESS LAN

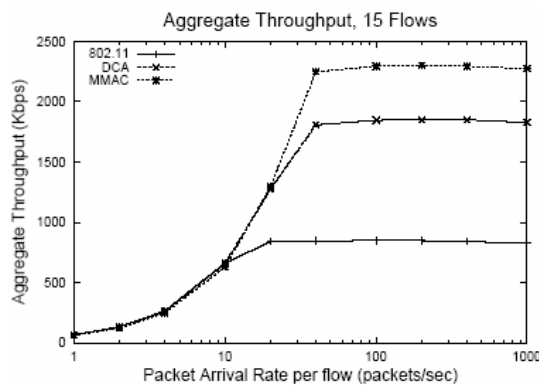
Nesta simulação todos os nós estão dentro do range de transmissão uns dos outros, de modo que, cada nó origem pode alcançar seu destino com um único salto. O número de nós usados foram 6, 30 e 64, sendo que para cada cenário, metade dos nós são origem e a outra metade são destino.

Os resultados da simulação são comparados com o MAC de canal único do padrão IEEE 802.11, o protocolo DCA e o protocolo proposto MMAC.

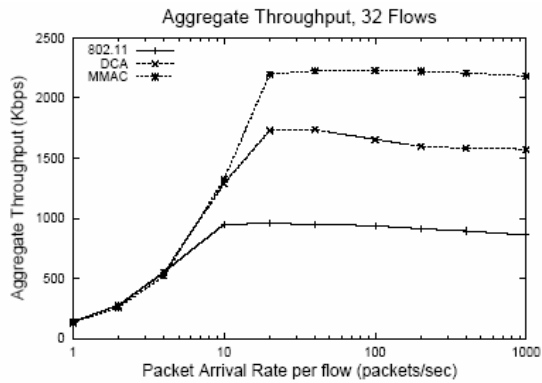
A *Figura 21* mostra o resultado da simulação para o *throughput* agregado de diferentes protocolos no ambiente *wireless LAN* à medida que a carga da rede aumenta.



(c) 6 nós



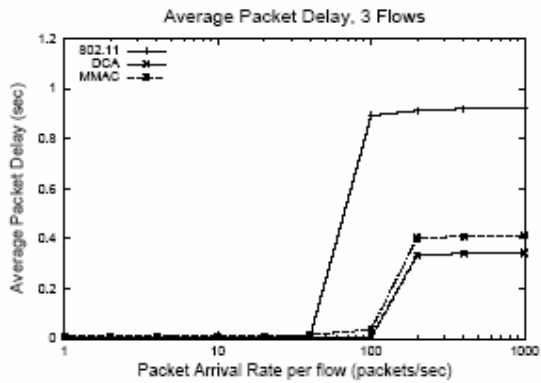
(b) 30 nós



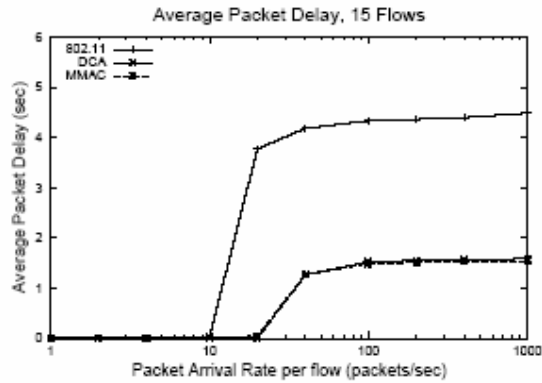
(c) 64 nós

Figura 21 – *Throughput* agregado x Taxa de chegada de pacotes. Rede wireless LAN.

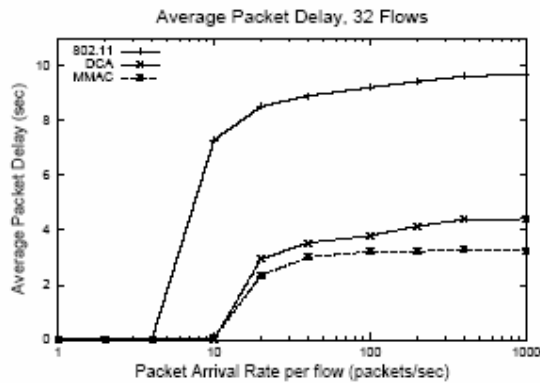
A *Figura 22* mostra o resultado da simulação para o *delay* médio do pacote. A diferença de *delay* entre o protocolo IEEE 802.11 e outros protocolos, deve-se ao fato de que com somente um canal, o pacote tem de aguardar um tempo mais longo quando a carga da rede está alta.



(a) 6 nós



(b) 30 nós



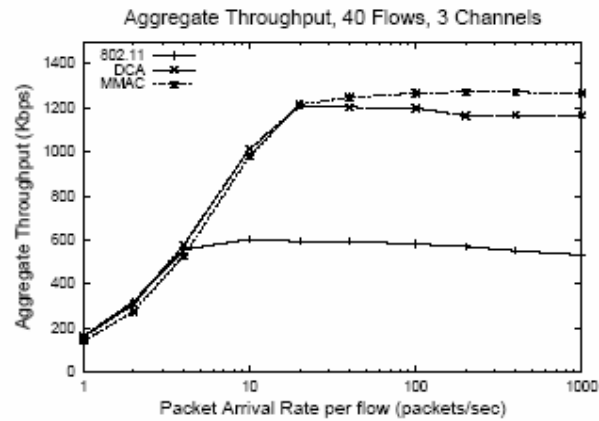
(c) 64 nós

Figura 22 – Delay médio de pacote x Taxa de chegada de pacote.
Rede *wireless LAN*.

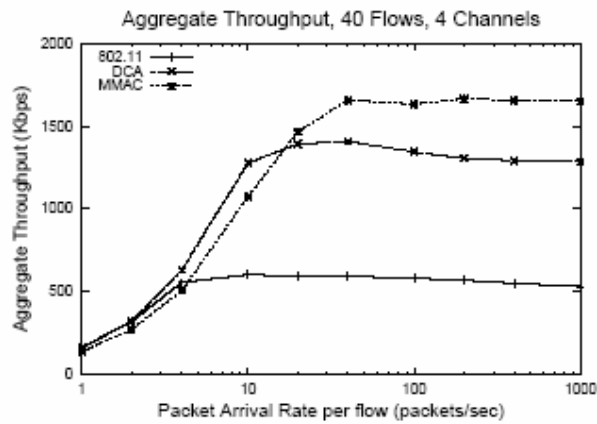
II. REDE MULTI-HOP

Rede *multi-hop* com 100 nós colocados aleatoriamente numa área de 500m x 500m. 40 nós, foram escolhidos aleatoriamente para serem origem e 40 nós foram escolhidos para serem destino. Um nó pode ser origem para múltiplos destinos e um nó pode ser destino para múltiplas origens.

A *Figura 23* mostra o resultado da simulação para o throughput de diferentes protocolos à medida que a carga da rede aumenta e pacotes de 512bytes.



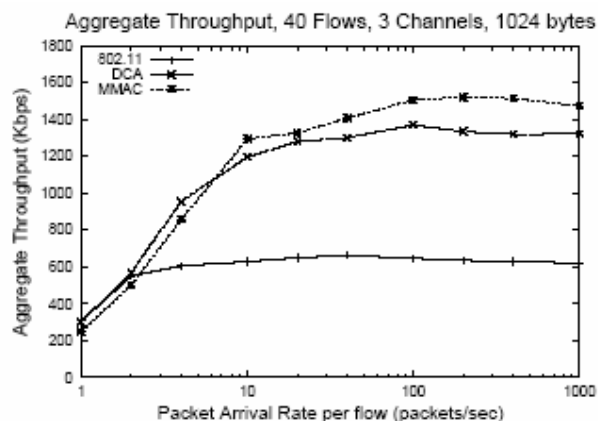
(a) 3 canais



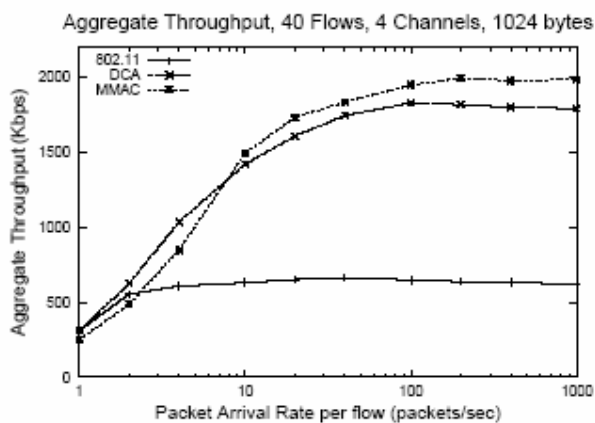
(b) 4 canais

Figura 23 – Throughput agregado x Taxa de chegada do pacote
Rede multi-hop e pacotes de 512bytes

A Figura 24 mostra o resultado da simulação para o throughput de diferentes protocolos à medida que a carga da rede aumenta e pacotes de 1024bytes.



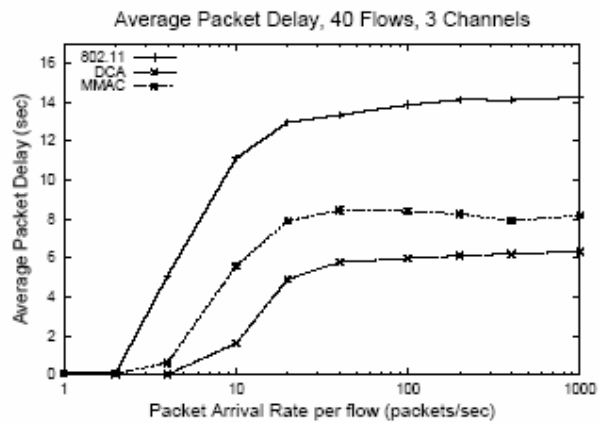
(a) 3 canais



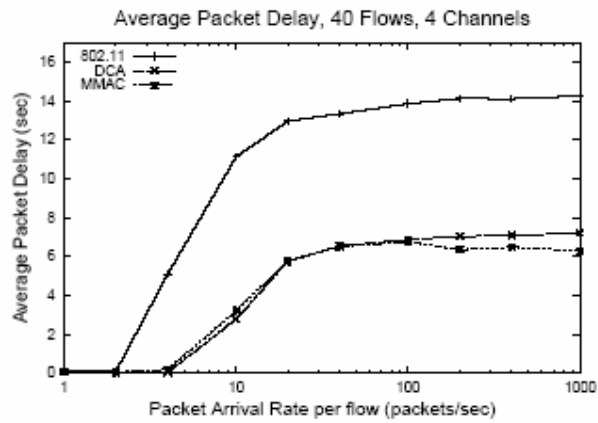
(b) 4 canais

Figura 24 – Throughput agregado x Taxa de chegada do pacote Rede multi-hop e pacotes de 1024bytes

A Figura 25 mostra o resultado da simulação para o delay médio do pacote dos protocolos à medida que a carga da rede aumenta e pacotes de 512bytes.



(a) 3 canais



(b) 4 canais

Figura 25 – Delay médio do pacote x Taxa de chegada do pacote.
Rede multi-hop.

A Figura 26 mostra o resultado da simulação para o throughput agregado usando diferentes tamanhos de janela ATIM window e tamanhos de pacote de 256bytes, 512bytes e 1024bytes.

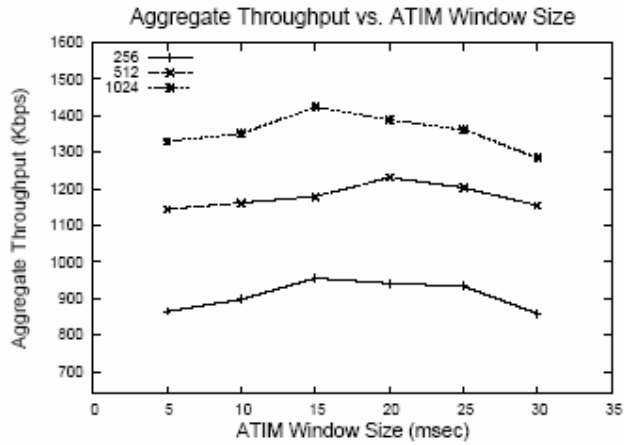
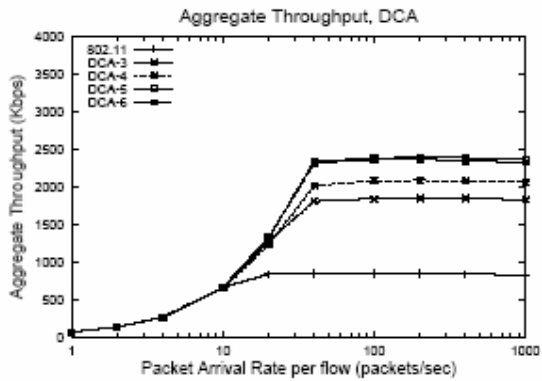
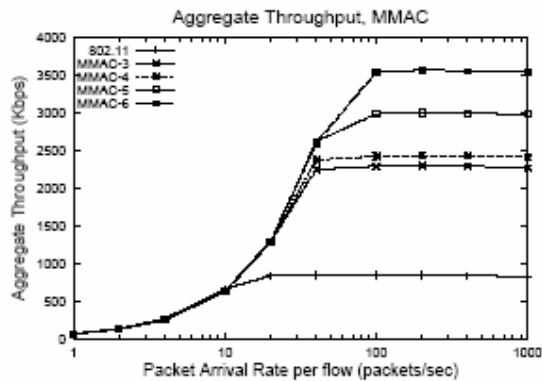


Figure 26 - Throughput Agregado x ATIM Window.
Rede multi-hop.

A Figura 27 mostra o resultado da simulação para o throughput agregado de diferentes protocolos variando o número de canais em uma rede wireless LAN com 30 nós e pacotes de 512bytes.



(a) Protocolo DCA



(b) Protocolo MMC

Figure 27 - *Throughput* Agregado x Delay de chegada do pacote.
Rede wireless LAN (30 nós).

Apesar das simulações do protocolo MMAC ter apresentado desempenho superior a outros protocolos, ainda tem algumas questões a serem resolvidas, tais como: sincronização de *clocks* para evitar o problema de terminal escondido e o balanceamento de canais considerando que cada fluxo tem a mesma quantidade de tráfego, o que pode não ser verdade.

Fluxos diferentes podem ter diferentes números de pacotes pendentes para serem transmitidos, de maneira que pode ser melhor contar o número de pacotes pendentes do que o número de pares “origem-destino”.

5. CONCLUSÃO

Explorando o uso de múltiplos rádios/múltiplos canais podemos alcançar taxas de transmissão/recepção muito mais altas que as obtidas usando um único canal, pois múltiplas transmissões poderão ocorrer sem interferência, apesar de DCF do protocolo MAC ser projetado para compartilhar um único canal entre *hosts*, pois, todo o dispositivo 802.11 corrente está equipado com um transceptor *half-duplex*, no entanto, o transceptor pode chavear canais dinamicamente.

Com a disponibilidade de múltiplos canais não sobrepostos no espectro de frequências de 2.4GHz e 5GHz, podemos desenvolver protocolos para múltiplos rádios/múltiplos canais que permitam aumentar o *throughput* das redes *wireless*.

Com o uso de um só transceptor e múltiplos canais podemos melhorar o *throughput* da rede e reduzir os custos de implementação, o que facilita a utilização de redes *wireless mesh* em comunidades.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] STALLING, William, *Wireless Communications and Network*. 2. ed. Upper Saddle River, NJ07458: Pearson Prentice Hall, 2005.
- [2] SCHILLER, Jochen H. *Mobile Communications*. 2. ed. Addison-Wesley.
- [3] ANSI/IEEE Std 802.11, *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, 1999 Edition.
- [4] IEEE Std 802.11a-1999(R2003), *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band*, 12 june 2003.
- [5] **IEEE Std 802.11b-1999 (R2003)**, *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band*, 12 june 2003.
- [6] **IEEE Std 802.11g-2003**, *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band*, 12 june 2003.
- [7] HAMMOND, John, KESSLER, Bart, MEYER, Greg, RIVERO, Juan, SKINNER, Chad, SWEENEY, Tim, *Wireless Hotspot Deployment Guide*. Intel 304197-001, September 2004.
- [8] RANIWALA, Ashish, CHIUEH, Tzi-cker, *Architecting a High-Capacity Last-Mile Wireless Mesh Network*, Computer Science Department, Stony Brook University.
- [9] GAO, Jie, ZHANG, Li, *Load Balanced Short Path Routing in Wireless Networks*, Department of Computer Science-Stanford University:Stanford, CA 94305 and Hewlett-Packard Labs, 1501 PageMill Road: Palo Alto, CA 94304.
- [10] MUIR, Andrew, ACEVES, J.J. Garcia-Luna, *A Channel Access Protocol for Multihop Wireless Networks with Multiple Channels*, Computer Engineering Department - University of California: Santa Cruz, CA 95064.
- [11] KANODIA, V., SABHARWAL, A., KNIGHTLY, E., *MOAR: A Multichannel Opportunistic Adustrate Media Access Protocol for Ad Hoc Networks*, ECE/CS Departments - Rice University: Houston, Texas.

- [12] SO, Jungmin, VAIDYA, Nitin, *Multi-Channel MAC for Ad Hoc Networks: Handling Multi-Channel Hidden Terminals Using A Single Transceiver*, Dept. of Electrical and Computer Science, and Coordinated Science Laboratory - University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [13] ADYA, Atul, BAHL, Paramvir, PADHYE, Jitendra, WOLMAN, Alec, ZHOU, Lidong, *A Multi-Radio Unification Protocol for IEEE 802.11 Wireless Networks*, Microsoft Research.
- [14] DRAVES, Richard, ZILL, Brian, PADHYE, Jitendra, *Routing in Multi-Radio, Multi-Hop Wireless Mesh Networks*, Microsoft Research.
- [15] BAHL, Paramvir, CHANDRA, Ranveer, DUNAGAM, John, *SSCH: Slotted Seeded Channel Hopping for Capacity Improvement in IEEE 802.11 Ad-Hoc Wireless Networks*, Microsoft Research, One Microsoft Way: Redmond, WA 98052 and Department of Computer Science - Cornell University: Ithaca, NY 14853.