



**Marcio Webler Emmanuel**

**Transporte eficiente de conteúdos de vídeo  
empregando Agregação de Quadros para  
transmissão de fluxos de vídeo escalável  
em redes IEEE 802.11n**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento  
de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. José Roberto Boisson de Marca

Rio de Janeiro  
Junho de 2011



**Marcio Webler Emmanuel**

**Transporte Eficiente de Conteúdo de Vídeo  
Empregando Agregação de Quadros para  
Transmissão de Fluxos de Vídeo Escalável  
em Redes IEEE 802.11n**

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. José Roberto Boisson de Marca**  
**Orientador**

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

**Prof. Guilherme Dutra Gonzaga Jaime**  
UFRJ

**Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello**  
Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**  
Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 15 de junho de 2011

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Marcio Webler Emmanuel**

Engenheiro de Telecomunicações graduado pela Universidade Católica de Petrópolis em 2007. Onde fundou o Ramo Estudantil do IEEE, que presidiu entre os anos de 2005 e 2007. Extensão em Televisão digital pela UFRJ. Experiência de 5 anos no setor de telecomunicações nos segmentos de comunicação de dados, móvel, TV e liderança de processos.

#### Ficha Catalográfica

Emmanuel, Marcio Webler

Transporte eficiente de conteúdos de vídeo empregando agregação de quadros para transmissão de fluxos de vídeo escalável em redes IEEE 802.11n / Marcio Webler Emmanuel ; orientador: José Roberto Boisson de Marca. – 2011.

139 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2011.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. IEEE. 3. 802.11n. 4. Agregação de quadros. 5. A-MSDU. 6. A-MPDU. 7. Transmissão de vídeo. 8. NS2. 9. Simulação. 10. Vídeo escalável. I. Marca, José Roberto Boisson de. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

À Deus,  
Aos meus pais André e Rita,  
Ao meu irmão Júlio,  
e a Michelle.

## Agradecimentos

Aos meus pais, André e Rita, por todo suporte, incentivo e por tudo que fizeram por mim.

Ao meu irmão, Julio, por ser meu grande amigo.

À Michelle, minha companheira, pela paciência, apoio e carinho.

Ao Prof. Boisson, pela oportunidade, compreensão, paciência, pelas orientações que tornaram esse trabalho realidade e por todo o conhecimento que me foi passado.

À Coordenação do departamento de Engenharia Elétrica, na pessoa do Prof. Ricardo Prada, pelo apoio impar no desenvolvimento e concretização deste trabalho.

À Vice Reitoria Acadêmica da PUC, pela bolsa concedida.

Ao meu amigo João Brito, pelo incentivo, conselhos e ensinamentos que tornaram essa missão um pouco menos árdua.

Ao GD, que me auxiliou com as simulações e contribuiu com a sua experiência e ensinamentos.

## Resumo

Emmanuel, Marcio Webler; de Marca, José Roberto Boisson. **Transporte eficiente de conteúdos de vídeo empregando Agregação de Quadros para transmissão de fluxos de vídeo escalável em redes IEEE 802.11n**. Rio de Janeiro, 2011. 139p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Cada vez mais as redes locais sem fio conhecidas por WLAN estão presentes no meio em que vivemos, seja em nossas casas como em escritórios, aeroportos e outros locais públicos. Na busca de possibilitar que mais aplicações sejam viabilizadas pelas redes sem fio, tais como fluxos de vídeo, a qual requer uma maior largura de banda, o IEEE desenvolveu um novo padrão da família do 802.11, o IEEE 802.11n que é capaz de oferecer uma capacidade de transmissão significativamente maior que os padrões 802.11 anteriores. Em princípio, o grande aumento de capacidade na camada física deveria ser suficiente para oferta de aplicações de multimídia, inclusive com vídeo em alta definição. Entretanto, a baixa eficiência da camada de controle de acesso ao meio (camada MAC) e de alguns protocolos da camada física poderiam restringir o uso de aplicações que necessitam de altas taxas de transmissão. Para resolver essa questão o padrão 802.11n contempla o recurso de agregação dos quadros que possui dois métodos distintos, A-MPDU (Aggregated MAC Protocol Data Unit) e A-MSDU (Aggregated MAC Service Data Unit). Neste trabalho foram realizadas simulações com sinais de vídeos reais e apresentados resultados que permitem comparar o desempenho destes métodos e avaliar se o uso de agregação permite efetivamente que o padrão 802.11n atenda os requisitos da transmissão de vídeo. Foram também sugeridos valores para os parâmetros da tecnologia 802.11n que permitem que um melhor desempenho seja alcançado.

## Palavras-chave

IEEE, 802.11n; Agregação de Quadros; A-MSDU; A-MPDU; Transmissão de Vídeo; NS2; Simulação; Vídeo Escalável.

## Abstract

Emmanuel, Marcio Webler; de Marca, José Roberto Boisson (Advisor). **Efficient Transport of Video Content employing Frame Aggregation in IEEE 802.11n**. Rio de Janeiro, 2011. 139p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Wireless LANs are gradually playing an increasingly important role in our day-to-day life. It is common now to find them in airports, hotels, office buildings as well as in individual residences. Due to this success there was an effort at IEEE to develop a new standard that would allow new high data rate applications, such as video streaming, to be provided through a WiFi access point. This new standard added to the IEEE 802.11 family is known as IEEE 802.11n and it offers a significantly higher capacity physical layer. However, to derive the full benefits of this new very powerful physical layer it was necessary to improve the efficiency of the MAC layer as well as of some physical layer protocols. One of techniques included in the standard, to allow high bandwidth services with good quality, was frame aggregation. The 802.11n standard contemplates two forms of aggregation, namely: A-MPDU (Aggregated MAC Protocol Data Unit) and A-MSDU (Aggregated MAC Service Data Unit). In this work, simulations were performed to evaluate the performance of both methods of aggregation when transporting real video signals. The objective was to verify whether 802.11n, with the use of aggregation, can indeed provide video and multimedia services with the required quality. We also suggest values for 802.11n system parameters that provide improved performance.

## Keywords

IEEE, 802.11n; Frame Aggregation; A-MSDU; A-MPDU; Streaming Video; NS2; Simulation; Video Scalable.

## Sumário

1	Introdução	17
1.1.	Trabalhos relacionados	18
2	Padrão 802.11	21
2.1.	Histórico	21
2.2.	Características dos padrões 802.11	23
2.2.1.	Padrão 802.11a	23
2.2.2.	Padrão 802.11b	24
2.2.3.	Padrão 802.11g	25
2.2.4.	Padrão 802.11e	26
2.2.5.	Comparativo entre os padrões	27
3	Padrão 802.11n	29
3.1.	Principais características e implementações na Camada Física	29
3.1.1.	MIMO-OFDM	31
3.1.2.	Largura de banda	33
3.2.	Principais características e implementações na Camada MAC	34
3.2.1.	TXOP - Transmit opportunity	36
3.2.2.	Block acknowledgement	38
3.3.	Mecanismos de proteção	38
4	Agregação de Quadros	41
4.1.	A-MSDU (Aggregated MAC Service Data Unit)	44
4.2.	A-MPDU (Aggregated MAC Protocol Data Unit)	46
4.3.	Comparativo entre os métodos de agregação A-MSDU e A-MPDU	49
5	Validação do modelo e análise dos resultados para tráfego CBR	51
5.1.	Ferramenta de simulação	51
5.2.	Métricas utilizadas	53
5.3.	Cenário das Simulações	54
5.4.	Análise dos resultados obtidos em ambiente sem erro	55

5.4.1. Análise da Vazão	56
5.4.2. Análise do Atraso	59
5.4.3. Análise da fração de pacotes recebidos	63
5.5. Análise dos resultados obtidos em ambiente com erro	64
5.5.1. Análise da Vazão	65
5.5.2. Análise da influência da quantidade de retransmissões na vazão	68
5.5.3. Análise do Atraso	70
5.5.4. Análise da influência da quantidade de retransmissões no atraso.	77
5.6. Resumo dos resultados	80
6 Análise dos resultados para tráfego de vídeo	81
6.1. Cenário da Simulação	82
6.2. Implementação e validação da geração de tráfego Poisson no NS2	85
6.3. Levantamento da curva da perda de pacotes de acordo com a carga	86
6.4. Análise dos resultados obtidos com a transmissão de vídeos reais.	88
6.4.1. Análise da Vazão	89
6.4.2. Análise do Atraso	99
6.4.3. Análise da fração de pacotes recebidos	108
6.5. Resumo dos resultados	112
6.6. Análise dos resultados obtidos com a transmissão de vídeos reais para mais de uma estação	116
6.7. Análise dos resultados obtidos com a transmissão de vídeos reais em uma estação e demais tráfegos em outra estação	122
7 Conclusão	129
8 Referências Bibliográficas	133
9 Glossário	137

## Lista de Figuras

Figura 2.1 - Distribuição das frequências de acordo com a aplicação	23
Figura 2.2 - Estrutura de canais do padrão 802.11a.	24
Figura 2.3 - Canais disponíveis no padrão 802.11b	25
Figura 3.1 - Relação de itens obrigatórios e opcionais na camada física do padrão 802.11n	30
Figura 3.2 - Sistema de transmissão e recepção utilizando a técnica MIMO.	32
Figura 3.3 - Unificação de canais através do Channel Bonding	34
Figura 3.4 - Relação de itens obrigatórios e opcionais na camada MAC do padrão 802.11n	35
Figura 3.5 - Formato do quadro do preâmbulo utilizado no modo mixed	40
Figura 3.6 - Formato do quadro do preâmbulo utilizado no modo Greenfield	40
Figura 4.1 - Quantitativo de overhead versus quantitativo de carga útil – [16].	42
Figura 4.2 - Arquitetura da camada MAC	43
Figura 4.3 - Estrutura de agregação de quadros do método A-MSDU	45
Figura 4.4 - Estrutura de agregação de quadros do método A-MPDU	47
Figura 5.1 - Cenário utilizado nas simulações	55
Figura 5.2 - Vazão máxima de cada método de agregação considerando PER=0 e taxa máxima da camada física = 135 Mb/s.	56
Figura 5.3 - Vazão máxima de cada método de agregação considerando PER=0 e taxa máxima da camada física = 130 Mb/s.	58
Figura 5.4 - Vazão máxima de cada método de agregação considerando PER=0 e taxa máxima da camada física = 150 Mb/s	58

Figura 5.5 - Atraso máximo obtido sem a utilização de um dos métodos de agregação considerando PER=0 e taxa máxima da camada física = 135 Mb/s	59
Figura 5.6 - Atraso máximo de cada método de agregação considerando PER=0 e taxa máxima da camada física = 135 Mb/s	60
Figura 5.7 - Atraso médio obtido sem e com utilização dos métodos de agregação considerando PER=0 e taxa máxima da camada física = 135 Mb/s	61
Figura 5.8 - Atraso máximo de cada método de agregação considerando PER=0 e taxa máxima da camada física = 135 Mb/s.	62
Figura 5.9 - Fração de pacotes recebidos obtidos sem a utilização de um dos métodos de agregação considerando PER=0 e taxa máxima da camada física = 135 Mb/s	63
Figura 5.10 - Vazão dos métodos de agregação obtido de acordo com o tamanho do pacote e para diferentes taxas de PER considerando taxa máxima da camada física = 135 Mb/s.	65
Figura 5.11 - Vazão do método de agregação A-MPDU obtida de acordo com o tamanho do pacote e para diferentes taxas de PER considerando taxa máxima da camada física = 135 Mb/s.	66
Figura 5.12 - Vazão do método de agregação A-MSDU obtida de acordo com o tamanho do pacote e para diferentes taxas de PER considerando taxa máxima da camada física = 135 Mb/s.	67
Figura 5.13 - Vazão dos métodos de agregação obtida de acordo com a taxa de PER fazendo relação com a BER e considerando tamanho do pacote 1500 bytes e taxa máxima da camada física = 135 Mb/s.	68
Figura 5.14 - Vazão do método A-MPDU em conjunto com o percentual dos pacotes recebidos ambos obtidos de acordo o número de retransmissões e para diferentes taxas de PER considerando taxa máxima da camada física = 135 Mb/s	69
Figura 5.15 - Vazão do método A-MSDU em conjunto com o percentual dos pacotes recebidos ambos obtidos de acordo o número de retransmissões e para diferentes taxas de PER considerando taxa máxima da camada física = 135 Mb/s	70
Figura 5.16 - Atraso máximo dos métodos de agregação obtido de acordo com o tamanho do pacote e para diferentes taxas de PER sendo a taxa máxima da camada física = 135 Mb/s.	71

Figura 5.17 - Atraso máximo do método de agregação A-MPDU obtido de acordo com o tamanho do pacote e para diferentes taxas de PER considerando taxa máxima da camada física = 135 Mb/s.	72
Figura 5.18 - Atraso máximo do método de agregação A-MSDU obtido de acordo com o tamanho do pacote e para diferentes taxas de PER considerando taxa máxima da camada física = 135 Mb/s.	72
Figura 5.19 - Atraso médio dos métodos de agregação obtido de acordo com o tamanho do pacote e para diferentes taxas de PER considerando taxa máxima da camada física = 135 Mb/s.	73
Figura 5.20 - Atraso médio do método de agregação A-MPDU obtido de acordo com o tamanho do pacote e para diferentes taxas de PER considerando taxa máxima da camada física = 135 Mb/s.	74
Figura 5.21 - Atraso médio do método de agregação A-MSDU obtido de acordo com o tamanho do pacote e para diferentes taxas de PER considerando taxa máxima da camada física = 135 Mb/s.	74
Figura 5.22 - Atraso máximo dos métodos de agregação obtido de acordo com a taxa de PER e considerando tamanho do pacote 1500 bytes e taxa máxima da camada física = 135 Mb/s.	75
Figura 5.23 - Atraso médio dos métodos de agregação obtido de acordo com a taxa de PER e considerando tamanho do pacote 1500 bytes e taxa máxima da camada física = 135 Mb/s.	76
Figura 5.24 - Atraso médio do método de agregação A-MPDU em conjunto com o percentual dos pacotes recebidos ambos obtidos de acordo o número de retransmissões e para diferentes taxas de PER considerando taxa máxima da camada física = 135 Mb/s.	78
Figura 5.25 - Atraso médio do método de agregação A-MSDU em conjunto com o percentual dos pacotes recebidos ambos obtidos de acordo o número de retransmissões e para diferentes taxas de PER considerando taxa máxima da camada física = 135 Mb/s.	78
Figura 6.1 - Cenário utilizado nas simulações com transmissão de vídeo.	82
Figura 6.2 - Curvas Analíticas e baseada nas informações geradas pelo NS2 referente a geração do tráfego Poisson.	86
Figura 6.3 – Percentual de pacotes recebidos com ambos os métodos de agregação obtidos em função do número de retransmissões , com PER igual à 1% e considerando taxa máxima da camada física = 135 Mb/s.	87

Figura 6.4 – Percentual da taxa de transmissão obtida pela vazão da transmissão de vídeo, vazão do tráfego <i>cross</i> e vazão total obtidas utilizando o método de agregação A-MPDU de acordo com a carga inserida no sistema.	91
Figura 6.5 – Percentual da taxa de transmissão obtida pela vazão da transmissão de vídeo, vazão do tráfego <i>cross</i> e vazão total obtidas utilizando o método de agregação A-MSDU de acordo com a carga inserida no sistema.	96
Figura 6.6 – Atraso Médio e Máximo da transmissão do vídeo utilizando o método de agregação A-MPDU obtido de acordo com a carga inserida no sistema.	101
Figura 6.7 – Atraso Médio e Máximo da transmissão do vídeo utilizando o método de agregação A-MSDU obtido de acordo com a carga inserida no sistema.	105
Figura 6.8 – Fração de pacotes recebidos da transmissão do vídeo utilizando o método de agregação A-MPDU e A-MSDU obtido de acordo com a carga inserida no sistema.	110
Figura 6.9 – Vazão Teórica Total e Vazão total obtida em conjunto com o somatório da vazão obtida da transmissão do vídeo para cada estações utilizando o método A-MPDU e com até 4 retransmissões.	117
Figura 6.10 – Vazão Teórica Total e Vazão total obtida em conjunto com o somatório da vazão obtida da transmissão do vídeo para cada estações utilizando o método A-MSDU e com até 4 retransmissões.	118
Figura 6.11 – Média dos atrasos médios obtidos por cada estação utilizando o método A-MPDU e com até 4 retransmissões.	118
Figura 6.12 - Média dos atrasos médios obtidos por cada estação utilizando o método A-MSDU e com até 4 retransmissões.	119
Figura 6.13 - Atraso máximo obtido entre as transmissões de vídeo de todas as estações, utilizando o método A-MPDU e com até 4 retransmissões.	120
Figura 6.14 - Atraso máximo obtido entre as transmissões de vídeo de todas as estações, utilizando o método A-MSDU e com até 4 retransmissões.	120
Figura 6.15 – Fração de pacotes recebidos obtida de acordo com o número de estação e, utilizando o método A-MPDU e com até 4 retransmissões.	121

Figura 6.16 – Fração de pacotes recebidos obtida de acordo com o número de estação e, utilizando o método A-MSDU e com até 4 retransmissões. 122

Figura 6.17 – Novo cenário utilizado nas simulações com transmissão de vídeo. 123

Figura 6.18 – Vazão do vídeo Foreman obtida utilizando os métodos de agregação A-MSDU e A-MPDU, de acordo com a carga inserida no sistema e com o cenário da simulação. 124

Figura 6.19 – Atraso Médio e Máximo do vídeo Foreman obtido utilizando o método de agregação A-MSDU, de acordo com a carga inserida no sistema e com o cenário da simulação 125

Figura 6.20 – Atraso Médio e Máximo do vídeo Foreman obtido utilizando o método de agregação A-MPDU de acordo com a carga inserida no sistema e com o cenário da simulação 126

Figura 6.21 – Fração de pacotes recebidos do vídeo Foreman obtidas utilizando os métodos de agregação A-MPDU e A-MSDU, de acordo com a carga inserida no sistema e com o cenário da simulação. 127

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Comparativo entre os padrões da família 802.11	27
Tabela 3.1 - Comparativo entre o legado da família 802.11 padrão 802.11n e os padrões	30
Tabela 3.2 - Categorias de acesso (AC) do EDCA com seus respectivos parâmetros.	37
Tabela 4.1 – Comparativo dos métodos de agregação A-MSDU e A-MPDU	50
Tabela 5.1 - Parâmetros do padrão 802.11n utilizados na simulação.	55
Tabela 5.2 - Percentual da taxa de transmissão da camada física utilizada pela camada MAC.	57
Tabela 5.3 - Atraso máximo, médio e mínimo de cada métodos de agregação considerando taxa máxima da camada física = 135 Mb/s e taxa de transmissão 100% da vazão de cada método.	62
Tabela 5.4 - Quantidade de retransmissões mínima necessárias para se transmitir todos os pacotes para o método de agregação A-MPDU sob o ponto de vista de vazão e do atraso médio.	79
Tabela 5.5 - Quantidade de retransmissões mínima necessárias para se transmitir todos os pacotes para o método de agregação A-MSDU sob o ponto de vista de Vazão e do atraso médio.	80
Tabela 5.6 - Comparativo da vazão e do atraso médio dos entre os métodos de agregação, para pacotes de 1500 bytes e PER menor ou igual a $10^{-2}$ .	80
Tabela 6.1 – Parâmetros do padrão 802.11n utilizados na simulação	83
Tabela 6.2 - Resumo das características dos vídeos utilizados	84
Tabela 6.3 – Percentual da vazão obtida por cada vídeo em relação a sua taxa de transmissão e a carga que cada vídeo manteve da vazão máxima.	92
Tabela 6.4 – Percentual da vazão obtido por cada um dos vídeos em relação a sua taxa de transmissão para o método A-MSDU.	97

Tabela 6.5 – Carga máxima transmitida pelo método A-MPDU antes que o limite de atraso seja atingido, sob o ponto de vista do atraso médio e máximo e de acordo com o número máximo de retransmissões permitidas	102
Tabela 6.6 – Atraso Máximo da transmissão do vídeo utilizando o método de agregação A-MSDU obtido de acordo com a carga 105%.	105
Tabela 6.7 – Carga máxima transmitida pelo método A-MSDU antes que o limite de atraso seja atingido, sob o ponto de vista do atraso médio e máximo e de acordo com o número máximo de retransmissões permitidas	106
Tabela 6.8 – Carga máxima transmitida pelos métodos A-MPDU e A-MSDU antes que o houvesse perda de pacotes de acordo com o número máximo de retransmissões permitidas	111
Tabela 6.9 – Resumo dos resultados obtidos de carga máxima para cada um dos parâmetros analisados utilizando o método A-MPDU.	113
Tabela 6.10 – Número máximo de retransmissões indicado sob a ótica de cada um dos parâmetros analisados utilizando o método A-MPDU.	113
Tabela 6.11 – Resumo dos resultados obtidos de carga máxima para cada dos parâmetros analisados utilizando o método A-MSDU.	114
Tabela 6.12 – Número máximo de retransmissões indicado sob a ótica de cada um dos parâmetros analisados utilizando o método A-MSDU.	115
Tabela 6.13 - Comparativo da vazão máxima e do número de retransmissões entre os métodos de agregação, para transmissões de vídeo.	116