

Simulador para Avaliação de Desempenho de Projetos *Cross-Layer* em Redes sem Fio Adaptativas

David F. C. Moura¹, Ronaldo M. Salles¹, Juraci F. Galdino^{1*}

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Defesa
Instituto Militar de Engenharia (IME) – Rio de Janeiro, RJ – Brasil

dfcmoura@uol.com.br, {salles, galdino}@ime.eb.br

Abstract. *This work presents a simulation tool for cross-layer design over adaptive wireless networks. Such tool gathers finite-length queuing characterization, traffic arrival models for different applications and multipath fading effects over wireless channels. Besides, this work shows a case study using the developed tool to analyze four different traffic sources. Such analysis takes into account metrics such as dropping probability, average delay on queue, spectral efficiency and physical-layer packet error rate.*

Resumo. *Este artigo apresenta uma ferramenta de simulação para avaliação de desempenho de projetos cross-layer em redes sem fio adaptativas. Esta ferramenta permite considerar em um mesmo cenário os efeitos de tamanho da fila, modelos de tráfego de entrada para diferentes aplicações e efeitos de desvanecimento multipercurso em redes sem fio adaptativas. Além disso, neste trabalho é apresentado um estudo de caso utilizando a ferramenta desenvolvida para analisar o desempenho de quatro fontes de tráfego distintas. São consideradas métricas como probabilidade de descarte, atraso médio na fila, eficiência espectral e taxa de erro de pacotes na camada física.*

1. Introdução

Tradicionalmente, a comunidade de redes tem adotado estratégias modulares para projetos de transmissão de informação, nas quais existe uma separação das funcionalidades do sistema em camadas abstratas e independentes. Sob essa estratégia, cada camada realiza tarefas distintas e complementares. Entretanto, tal modelo não representa de forma precisa as interações observadas no mundo real, visto que essas ocorrem de forma mais complexa do que as descritas pelas primitivas de serviços nos modelos OSI/ISO e TCP/IP. Esse fato torna-se ainda mais marcante em sistemas de comunicações sem fio. Nesse cenário, o desempenho global do sistema é fortemente influenciado por fenômenos estocásticos, como desvanecimento multipercurso e efeitos de somreamento que podem caracterizar os diversos enlaces de comunicação.

Assim, diversos trabalhos na literatura têm proposto novos mecanismos, permitindo uma maior troca de informações entre as diferentes camadas. Nesses mecanismos, abandona-se o paradigma clássico de arquitetura em camadas independentes em

*Os autores desejam expressar seus agradecimentos ao apoio material e financeiro prestado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq ao desenvolvimento deste trabalho (Edital MCT/CNPq 15/2007 Universal)

prol de um projeto de otimização em camadas cruzadas (em inglês, *cross-layer*). Em um projeto *cross-layer*, parâmetros e funcionalidades das camadas de aplicação, transporte, rede, enlace de dados e física podem ser ajustados de forma integrada, no intuito de melhorar o desempenho global do sistema. Recentemente, atenção especial tem sido dada à integração entre as camadas física (por exemplo, técnicas de transmissão adaptativa) e de enlace (como efeitos de descarte em filas de tamanho finito), conforme apresentado em [Ishizaki and G.U.Hwang 2007, Hoang and Motani 2008, Ghavami and Ashtiani 2007, Liu et al. 2005, Tang and Zhang 2007, Zhou et al. 2008, Harsini and Lahouti 2007].

Em geral, tais propostas apresentam projetos *cross-layer* que não alteram a estrutura atual de independência das camadas. Por exemplo, os parâmetros de transmissão adaptativa em [Ishizaki and G.U.Hwang 2007, Ghavami and Ashtiani 2007, Liu et al. 2005, Zhou et al. 2008, Harsini and Lahouti 2007] são avaliados para se obter uma taxa de erro mínima para a camada física, sem levar em conta o comportamento da camada de enlace. Além disto, adota-se o modelo de Poisson para o tráfego de entrada. Assim, diversos parâmetros do sistema, como o atraso médio de pacotes, a probabilidade de descarte, a taxa global de perda de pacotes e a vazão do sistema são calculados de forma indireta; além disto, não são apresentadas avaliações para modelos mais realistas de tráfego.

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de diferentes tipos de tráfego em função das estratégias atuais de projeto *cross-layer*. Para tanto, foi desenvolvido um simulador a eventos discretos dedicado ao estudo de projetos *cross-layer*. O cenário adotado para redes sem fio adaptativas é apresentado na Seção 2. Em seguida, alguns trabalhos relacionados são discutidos na Seção 3 e o simulador a eventos discretos desenvolvido é descrito na Seção 4. Os resultados obtidos a partir de simulação numérica em um estudo de caso são apresentados na Seção 5 e, por fim, alguns comentários são feitos na Seção 6.

2. Descrição do Problema

A Figura 1 ilustra uma conexão fim-a-fim entre uma única estação transmissora e uma única estação receptora através de um enlace sem fio com desvanecimento, que emprega a técnica de acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA). O transmissor possui uma memória de tamanho finito para armazenamento de pacotes; esta memória opera de modo *first-in first-out* (FIFO). A quantidade de pacotes a serem transmitidos por divisão de tempo varia de acordo com a técnica de modulação a ser empregada, conforme indicado por um controlador de modulação adaptativa. A decisão quanto à técnica de modulação é efetuada de acordo com a relação sinal-ruído estimada no receptor e definida em um seletor de modulação adaptativa; esta decisão é informada ao transmissor através de um canal de retorno.

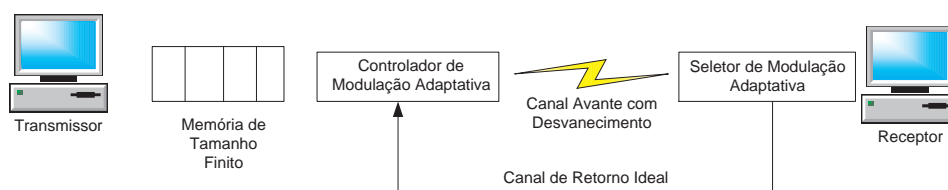


Figure 1. Modelo do Sistema.

Nesse tipo de cenário, um transmissor encontra-se conectado a um receptor através de uma rede sem fio, podendo encaminhar múltiplas conexões (voz, vídeo, dados), com características próprias de tráfego. A estação transmissora possui a capacidade de transmissão adaptativa, dispondo de N estratégias distintas de modulação. A escolha da melhor estratégia de modulação para cada quadro é feita a partir de duas informações: o estado do canal avante, dado pelo receptor através de um canal de retorno, neste trabalho admitido livre de erros e atrasos, e a ocupação da memória na camada de enlace, na estação transmissora. Um modo de transmissão n ($n \in \{1, \dots, N\}$) é adotado quando a relação sinal-ruído instantânea γ estiver compreendida no intervalo $(\gamma_{n-1}, \gamma_n]$. Denomina-se conjunto de limiares de transmissão adaptativa ao vetor Γ , onde $\Gamma = [\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N]$.

Como exemplos desses tipos de sistemas de comunicações móveis, existem não só sistemas móveis celulares, mas também redes móveis *ad hoc*, redes de sensores sem fio e os próprios sistemas de comunicações militares. Por exemplo, as redes de sensores sem fio [Akyildiz et al. 2002] são compostas de um grande número de nós móveis (os sensores), normalmente operados a base de baterias e dispersos em uma região de interesse. Os sensores são dispositivos que podem ser instalados em diversas plataformas, como veículos aéreos não tripulados, viaturas militares ou mesmo pessoas.

Cenário semelhante surge em aplicações estritamente militares, como os sistemas de comunicações empregados em combate. Como descrito na Manual de Campanha C11-30 do Exército Brasileiro, *As Comunicações na Brigada*, o planejamento de um sistema de comunicações para o combate deve produzir uma rede de alto desempenho para tropas em movimento ou estáticas, independentemente do padrão de tráfego gerado (imagens, câmeras de vigilância e reconhecimento, voz, mensagens), da patente do usuário ou das frequências disponíveis para a operação militar - requisitos equivalentes aos desejados para o cenário da Figura 1.

Uma breve descrição da estrutura adotada para encapsulamento dos dados neste cenário é apresentada na Figura 2.

Cada quadro TDMA apresenta uma duração fixa (T_f segundos), contém N_s símbolos e é dividido em N_d slots de tempo para transmissão de dados e N_c slots de tempo para informações de controle. Dessa forma, um quadro i se refere ao período de tempo entre $(i - 1)T_f$ e iT_f segundos. A estação transmissora possui uma memória de tamanho finito, com capacidade para K pacotes. E_i indica o número de pacotes que chegam ao buffer de transmissão durante o quadro i . Cada pacote possui comprimento fixo de tamanho N_b bits, divididos em cabeçalho, dados e verificação de erros. Assim, se um pacote chegar a uma memória cheia, ele é descartado e perdido.

No modo de transmissão n , o pacote é codificado em um bloco com uma quantidade variável de símbolos, dada por N_b/R_n , em que n representa a eficiência espectral do modo n . Depois, cada bloco é transmitido em um único slot de dados, contendo uma quantidade fixa de N_b símbolos; assim, pode-se afirmar que, caso o modo de transmissão adotado para um slot seja n , serão transmitidos R_n pacotes. Após a agregação de N_d blocos de dados, o quadro é transmitido através do canal avante.

Conforme diversos trabalhos na literatura listados em [Sadeghi et al. 2008], assume-se neste trabalho que o canal avante é variante no tempo e modelado pelo efeito de desvanecimento plano, porém invariante dentro de cada quadro. Sua variação temporal é

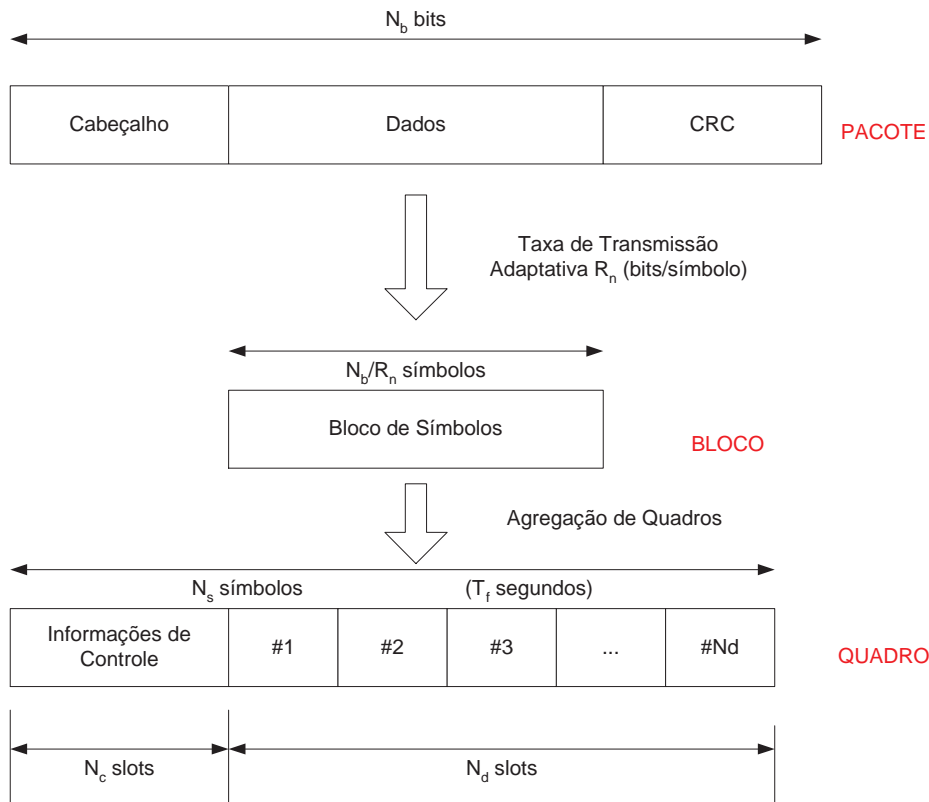


Figure 2. Estrutura de Encapsulamento de Dados.

descrita por um processo estocástico estacionário em sentido amplo com densidade espectral de potência dada pelo espectro de Jakes [Proakis 2000], cuja máxima frequência de deslocamento Doppler é expressa por f_D . A relação sinal-ruído instantânea é representada por γ , com função densidade de probabilidade expressa por $p(\gamma, \bar{\gamma})$, em que $\bar{\gamma}$ é a relação sinal-ruído média do enlace. Este modelo mostra-se adequado tanto para aplicações civis como para sistemas táticos de comunicações, nos quais a mobilidade das estações transmissoras é da ordem de poucos quilômetros por hora (por exemplo, uma tropa a pé ou deslocando-se em área urbana). Um modelo largamente adotado [Sadeghi et al. 2008] para descrição desse tipo de processo de desvanecimento do canal é a cadeia de Markov de tempo discreto (DTMC).

Neste trabalho, adota-se uma DTMC com $N + 1$ estados para modelo do conjunto canal-fila, como proposto em [Hoang and Motani 2008] e [Ghavami and Ashtiani 2007], dentre outros trabalhos. Assim, conjugam-se os efeitos de uma fila de tamanho finito na camada de enlace e de transmissão adaptativa na camada física em uma só análise. O primeiro estado representa a possibilidade de não-transmissão em função de condições severas de desvanecimento do sinal transmitido e um estado $i + 1$ indica a adoção do modo de transmissão i . Durante cada quadro, o canal permanece em um único estado.

Sejam T_n a probabilidade cruzada de transição de estados para o modo n [Liu et al. 2005] e $Pr(n)$ a probabilidade de escolha do modo n de transmissão. No cenário adotado, dado que o desvanecimento é lento, as transições de modo de transmissão entre quadros sucessivos só se dão entre modos adjacentes, sendo dependentes da relação sinal-ruído média, do vetor Γ , do modelo de desvanecimento do canal rádio-móvel

e da frequência Doppler f_D . Assim, a probabilidade de transição entre modos (estados) adjacentes é dada por uma matriz tridiagonal \mathbf{P} , cujos elementos das três diagonais podem ser expressas por:

$$P_{n,n+1} = \frac{T_{n+1}T_f}{Pr(n)}, \text{ para } n = 0, \dots, N-1 \quad (1)$$

$$P_{n,n-1} = \frac{T_n T_f}{Pr(n)}, \text{ para } n = 1, \dots, N \quad (2)$$

$$P_{n,n} = 1 - P_{n,n-1} - P_{n,n+1} \quad (3)$$

$$P_{i,j} = 0, \text{ para } |i - j| \geq 2 \quad (4)$$

3. Trabalhos Relacionados

Em [Hoang and Motani 2008], os autores descrevem duas políticas *cross-layer* de minimização global de erros em um ambiente com um único transmissor, sujeito a um processo de chegada de pacotes segundo uma distribuição de Poisson, em um canal sem fio variante no tempo. Em ambas as políticas, o problema é descrito como um processo markoviano de decisão (MDP), cujo objetivo é determinar o par potência-taxa de transmissão que permite a minimização de uma função custo. Essa função custo engloba a potência de transmissão e as taxas de descarte e de erro de pacotes, dada uma ocupação da memória do transmissor. Os resultados são obtidos estritamente a partir do modelo analítico proposto.

A primeira política considera como restrição uma taxa fixa de erro de bits; na segunda, permite-se um balanceamento entre os efeitos dos erros de camada física e de enlace na configuração do sistema. Não são analisados os efeitos da mudança das condições do canal de transmissão e dos limiares de transmissão adaptativa no desempenho do sistema. Nessa proposta, a única ação permitida na camada física é a mudança da potência média de transmissão, de acordo com a taxa de transmissão adotada.

Os autores em [Liu et al. 2005] apresentam um projeto *cross-layer* para redes sem fio adaptativas que considera parâmetros do canal de comunicação - por exemplo, a relação sinal-ruído média e o efeito de desvanecimento - e do sistema, como a taxa de erro de pacotes na camada física, o tamanho da memória no transmissor, a taxa de chegada de pacotes e o tamanho do quadro de transmissão, para maximização do desempenho do sistema. Tanto os parâmetros do canal como os do sistema são modelados a partir de cadeias de Markov de estados finitos. Considera-se que um pacote oriundo do transmissor pode ser perdido em função de distúrbios do canal de transmissão (erro na camada física) ou de descarte na memória do transmissor (erro na camada de enlace de dados).

Os autores sugerem a satisfação dos valores limite de taxa média de perda de pacotes (limitante superior) e de vazão média do sistema (limitante inferior) como métricas para avaliação do sistema. Estas medidas são calculadas para diversos valores alvo de taxas de erro na camada física. Cada um destes valores alvo implica na identificação

de um conjunto de limiares para transmissão adaptativa. Em seguida, escolhe-se a taxa de erro de camada física que permite a obtenção da menor taxa de perda de pacotes, identificando-se assim a vazão obtida. As avaliações do impacto dos parâmetros do canal e do sistema no projeto são feitas somente para um tráfego de entrada modelado segundo um processo de Poisson, tanto nas simulações numéricas realizadas como na resolução do modelo analítico desenvolvido.

Uma abordagem parecida é descrita em [Ishizaki and G.U.Hwang 2007], combinando mecanismos de retransmissão (*automatic repeat request* - ARQ) e transmissão adaptativa para otimização do desempenho do sistema. Nesse trabalho, a probabilidade de descarte de pacotes é calculada como uma aproximação, para uma fila de tamanho finito, da distribuição de ocupação no estado estacionário de uma fila infinita. Tal aproximação é feita com base em modelos dos processos de entrada e de serviço de pacotes no transmissor por meio de funções de largura de banda efetiva.

Primeiramente, os limiares para escolha dos modos de transmissão adaptativa são determinados para valores de taxas de erro na camada física que sejam menores do que um alvo preestabelecido. Em seguida, a probabilidade de descarte de pacotes é calculada para cada valor de taxa de erro na camada física determinado no passo anterior. Por fim, adota-se o conjunto de limiares que minimiza a taxa global (camada física e de enlace) de perda de pacotes. Resultados numéricos e simulações são apresentados para dois processos de entrada, Poisson e On-Off com distribuição exponencial dos estados.

O trabalho em [Ghavami and Ashtiani 2007] descreve uma análise da influência conjunta das perdas de camada física e de enlace na vazão de um enlace sem fio ponto-a-ponto com capacidade de transmissão adaptativa e canal de retorno ideal. Os parâmetros do canal e do sistema são modelados a partir de cadeias de Markov de estados finitos. Não há mecanismos de retransmissão e o tráfego de entrada atende ao modelo de Poisson.

Além da escolha de limiares de transmissão adaptativa em função de uma taxa alvo de erros de camada física, os autores propõem a utilização de dois limiares de ocupação de fila. Assim, quando houver mais pacotes na fila do que o limiar superior, o transmissor emprega o modo de transmissão com eficiência espectral imediatamente superior ao escolhido previamente, como forma de evitar um descarte de pacote. Analogamente, como medida contra a ociosidade no transmissor, quando o número de pacotes for menor do que o determinado por um limiar inferior, emprega-se a estratégia de transmissão com eficiência espectral menor. Não são analisados quaisquer outros efeitos do sistema ou do canal na qualidade de serviço oferecida pelo sistema, seja nas simulações, seja por meio de análise numérica.

Em [Harsini and Lahouti 2007] e [Zhou et al. 2008], os autores analisam o efeito do descarte de pacotes e de técnicas de transmissão adaptativa em sistemas *multiple-input multiple-output* (MIMO) com codificação *space-time block coding* (STBC) para tráfego com restrições de atraso. Após a determinação de limiares de transmissão adaptativa para atender a uma taxa alvo de erro de camada física, são calculadas a taxa de perda de pacotes e a probabilidade de violação de atraso a partir da teoria de largura de banda efetiva, tanto para cenários mono como multiusuário. O tráfego de entrada é modelado por um processo de Poisson e as probabilidades de violação de atraso e de perda de pacotes são descritas para diferentes quantidades de antenas transmissora e receptora e relações

sinal-ruído. Em [Harsini and Lahouti 2007], são apresentados os resultados somente de análises numéricas; já os autores em [Zhou et al. 2008] também descrevem os resultados de simulações.

Os autores de [Ashour and Le-Ngoc 2008] propõem uma metodologia *cross-layer* para melhoria da qualidade de transmissão de vídeo para redes sem fio em malha utilizando técnica *code-division multiple access* (CDMA). O objetivo é minimizar uma função custo composta da distorção e do atraso fim-a-fim a partir da escolha adequada de taxa de codificação, potência de transmissão e distribuição do atraso fim-a-fim pelos diversos enlaces. O tráfego de entrada é modelado por um processo de Poisson e o mecanismo de retransmissão atende a uma distribuição de Bernoulli, o que restringe a distorção verificada pelo sistema ao efeito da quantização no codificador de vídeo. Em seguida, são propostos três algoritmos (centralizado, distribuído e parcialmente distribuído) para minimização da função custo; estes algoritmos se valem de técnicas de decomposição dual por meio da função lagrangiana e seus impactos são estudados a partir de análises numéricas.

4. Descrição do Simulador

O objetivo deste trabalho é identificar o desempenho de diferentes tipos de tráfego em função das técnicas atuais de projeto *cross-layer* em redes sem fio adaptativas. Para tanto, dadas as diferenças entre os modelos de desvanecimento do canal e de atendimento em lotes da fila descritos no cenário de referência e os disponíveis em ambientes já existentes, como *ns-2* [ns 2009], *Tangram II* [de Souza e Silva et al. 2009] e *OMNeT++* [omnet 2009], foi desenvolvido em C++ um novo simulador a eventos discretos, inspirado no modelo para estudo de filas apresentado em [Law 2007].

Foram inseridos no nosso simulador novos modelos de tráfego de entrada e de atendimento, de acordo com características de comportamento do canal de comunicação sem fio com desvanecimento plano e técnicas de modulação digital existentes. Além disso, o simulador foi projetado de forma flexível, permitindo extensões através da implementação de novas métricas, modelos de entrada e técnicas de modulação, voltadas ao dimensionamento de redes sem fio adaptativas segundo uma estratégia *cross-layer*. Outra funcionalidade que merece destaque na ferramenta é a sua capacidade de utilizar *traces* reais, a partir da indicação de um arquivo texto, contendo o instante de tempo dos eventos. O laço principal de simulação é descrito no trecho de código a seguir:

```
do
{
    tempo(); // Atualiza a lista de eventos futuros
    atualiza_estatisticas(); // Estatísticas
    switch (tipo_proximo_evento)
    {
        case 1:
            chegada_pkt(); // Evento: Chegada de Pacotes
            break;
        case 2:
            saida_pkt(); // Evento: Saída de Pacotes
            break;
    }
}
```

```

case 3:
    relatorio(); // Geração de Relatório
    // ao Final da Simulação
    break;
}
} while (tipo_proximo_evento != 3);

```

O simulador desenvolvido possui três tipos de eventos: chegada de pacotes, saída de pacotes e geração de relatório. A sequência de execução dos eventos é armazenada em uma lista ordenada de eventos futuros, contendo a referência de tempo virtual dos eventos da simulação. Ao início da execução de cada evento, são atualizadas as estatísticas referentes às seguintes métricas:

- Eficiência Espectral: valor médio da quantidade de bits transmitidos por símbolo através do canal rádio móvel;
- Taxa de Erro de Pacotes : relacionado aos erros de transmissão na camada física. Esta métrica é avaliada para todo o sistema e para cada modo de transmissão;
- Probabilidade de Descarte (P_d): relacionado à perda de pacotes na memória (camada de enlace de dados), em caso de *overflow*. Também avaliada de forma global e por modo;
- Atraso médio na fila
- Ocupação média na fila (geral e por modo de transmissão)
- Percentual de Utilização dos Modos de Transmissão

A condição de parada é determinada pelo tempo virtual máximo de simulação. Foi adotado um método de geração de números aleatórios do tipo congruente linear multiplicativo, a partir de funções descritas em [Law 2007].

4.1. Modelos de Entrada de Pacotes

Os processos de entrada já implementados e escolhidos para o estudo de caso apresentado na Seção 5 foram:

- Poisson, com taxas de entrada de 2,0 pacotes por unidade de tempo.
- Modelo On-Off para voz, com taxa de transmissão de 12,2 kb/s e períodos de On e Off segundo uma distribuição exponencial de média de 3 segundos [(UMTS)].
- Tráfego de vídeo descrito por um agregado de dois processos On/Off com distribuição de Pareto com $P(X < x) = (x/a)^{-\alpha}$. Os parâmetros adotados para as duas fontes estão descritas na Tabela 1:

Table 1. Parâmetros para o agregado de vídeo, conforme [Baugh et al. 2001]

| | Tamanho do pacote | Tempo entre pacotes | a | α (ON) | α (OFF) |
|---------|-------------------|---------------------|------|---------------|----------------|
| Fonte 1 | 1080 | 0,003559352 | 0,04 | 1,14 | 1,22 |
| Fonte 2 | 1080 | 0,002587322 | 0,04 | 1,54 | 1,28 |

- Fonte de tráfego HTTP com pacotes de 1080 bits, representados por um modelo *On/Off* conforme apresentado em [Ashour and Le-Ngoc 2008]. O período *On* é modelado por uma distribuição de Weibull $P(X < x) = 1 - e^{-(x/\beta)^\alpha}$, com $\alpha = 0,7883$ e $\beta = 0,64$. No período de transmissão, os pacotes são gerados a cada 10 ms. Os períodos entre *downloads* são representados por uma distribuição exponencial de média 60 segundos.

Cabe destacar que outros valores podem ser estabelecidos para os parâmetros indicados de cada modelo de tráfego. É também possível utilizar uma distribuição de eventos de acordo com *traces* em um arquivo. Dentro deste arquivo, cujo nome é solicitado ao usuário no início da simulação, cada evento é descrito em uma linha, por meio de seu instante de ocorrência.

4.2. Modelo de Serviço de Pacotes

O cenário descrito na Seção 2 foi representado no simulador por um servidor determinístico, no qual uma cadeia de Markov relacionada ao comportamento do canal modula a quantidade de pacotes transmitidos por quadro. Assim, a cada T_f segundos, são retirados R_i pacotes da fila caso o modo de transmissão i seja o indicado para aquela condição de ocupação de fila e estado do canal. Cabe destacar que, para haver a transmissão de pacotes em um modo i , a fila deve conter, pelo menos, R_i pacotes; caso contrário, não ocorre transmissão.

O emprego do simulador representa a utilização de modos de transmissão do tipo QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), em virtude de um melhor compromisso entre taxa de erro de bits e eficiência espectral propiciado por essa modulação em relação a outras modulações clássicas, tais como ASK (*amplitude-shift keying*), PSK (*phase-shift keying*) e FSK (*frequency-shift keying*). Assim, as características de transmissão do canal sem fio são empregadas para identificar o modo mais ajustado para transmissão e, em consequência, a quantidade de pacotes transmitidos a cada quadro. Os modos já implementados estão descritos na Tabela 2:

Table 2. Modos de Transmissão Implementados

| | Modo 1 | Modo 2 | Modo 3 | Modo 4 | Modo 5 |
|-------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Mod. | BPSK | QPSK | 8-QAM | 16-QAM | 32-QAM |
| R_n | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

Os modos de transmissão utilizados na simulação e o vetor correspondente Γ , contendo os limiares de transmissão adaptativa empregados, devem ser informados pelo usuário ao início da simulação, de acordo com os valores obtidos em propostas como [Hoang and Motani 2008], [Liu et al. 2005] e [Ghavami and Ashtiani 2007].

O sinal recebido em banda básica na entrada do receptor é expresso pela fórmula $y_k = h_k s_k + \eta_k$, onde h_k representa a resposta ao impulso do canal de comunicação sem fio com desvanecimento plano, η_k descreve o ruído aditivo, que é modelado por um processo gaussiano branco de média nula e k indica um instante de tempo considerado. A simulação do canal é feita empregando-se o Método de Monte Carlo e o valor da primeira amostra da resposta ao impulso do canal é utilizada para representação da resposta do sistema em cada quadro - ou seja, o modelo utilizado hoje para o simulador é de desvanecimento invariante por bloco. Os bits são mapeados em símbolos de acordo com o código de Gray e a estratégia de detecção dos símbolos no receptor é a de máxima verossimilhança (ML) [Proakis 2000]. A implementação do canal de retorno é livre de erros ou atrasos de transmissão.

Como o tempo entre transmissões é fixo (dado por T_f) e a quantidade de pacotes transmitidos é dependente da modo de transmissão escolhido e da quantidade de pacotes na fila, o sistema pode ser uma fila finita onde o único servidor apresenta processo de

serviço determinístico, no qual a quantidade de pacotes servidos é modulada por uma cadeia de Markov de tempo discreto. Com isso, o modelo adotado de atendimento da memória do transmissor é representado como um conjunto de $N + 1$ filas, indicando o estado do canal.

Uma simplificação do modelo de serviço é representado na Figura 3, com os estados para os modos de transmissão $i - 1$, i e $i + 1$ descritos em colunas. Um estado (q, i) indica a existência de q pacotes na memória em um instante de tempo no qual o modo de transmissão é i . As retas que saem do estado (Q, i) representam as transições possíveis a partir do estado (Q, i) ; $P_c(i)$ indica a probabilidade de chegada de i pacotes à memória do transmissor. Para fins de simplificação, considere-se daqui por diante $R_i = i$ para todo $i \in \{0, \dots, N\}$.

Embora semelhante ao modelo de serviço descrito em outras propostas, como [Liu et al. 2005] e [Ghavami and Ashtiani 2007], as probabilidades de transição de estados apresentadas em 3 são diferentes. Neste trabalho, o processo de atendimento da fila ocorre somente quando sua ocupação (q) é, pelo menos, igual ao tamanho de lote de pacotes (i) a ser servido em determinado quadro (ou seja, quando $q \geq i$).

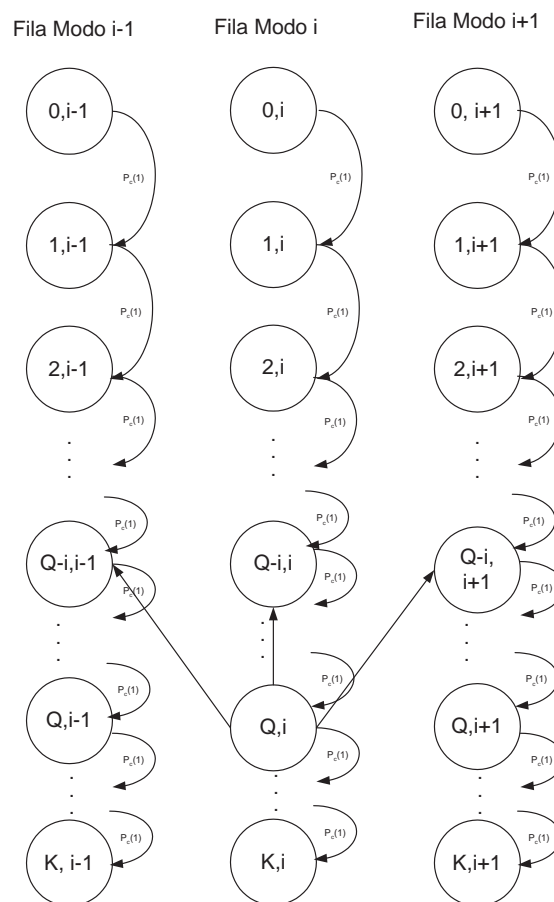


Figure 3. Modelo de Serviço.

Assim, o modelo geral da probabilidade de transição entre estados (r, j) e (q, i) , dada por $V_{(r,j),(q,i)}$, é equivalente a:

$$V_{(r,j),(q,i)} = P_{i,j} P_c(A_t = r + i - q | \text{tempo} = T_f), \text{ para } q \geq i \quad (5)$$

$$V_{(r,j),(q,i)} = P_{i,j} P_c(A_t = r - q | \text{tempo} = T_f), \text{ para } q < i \quad (6)$$

4.3. Validação

Como critério de validação, foram comparadas curvas de máxima eficiência espectral e de probabilidade de descarte advindas do modelo geral de probabilidade de transição de estados descrito na seção 4.2 com os resultados empíricos obtidos pelo simulador para a faixa de relação sinal-ruído média $\bar{\gamma}$ entre 10 e 25 dB. Tais comparações foram realizadas para os modos de transmissão e os limiares de adaptação propostos em [Liu et al. 2005], dada a semelhança entre o cenário proposto neste artigo e o descrito naquele trabalho.

Assim, considere-se um tráfego de entrada de Poisson ($\lambda = 2,0$ pacotes por unidade de tempo), tamanho da fila $K = 10$ pacotes, $N + 1 = 6$ modos de transmissão (onde o primeiro modo representa a possibilidade de não-transmissão), $f_D = 5$ Hz em um canal com processo de desvanecimento de acordo com o modelo de Rayleigh e transmissão de quadros a cada $T_f = 2$ ms. Os limiares de transmissão adaptativa foram distintos para cada $\bar{\gamma}$; em cada relação sinal-ruído média, foram empregados os limiares que determinavam o maior valor de eficiência espectral.

As figuras 4 e 5 contêm os resultados obtidos para eficiência espectral e probabilidade de descarte de pacotes, respectivamente. As simulações foram realizadas com tempo de execução de 300 segundos. Os resultados obtidos mostram um aumento da eficiência espectral e uma diminuição da probabilidade de descarte com o aumento de $\bar{\gamma}$. Além disso, percebe-se a adequação dos resultados obtidos na simulação com o modelo analítico utilizado para validação. Pequenas diferenças nos valores da probabilidade de descarte surgem nos extremos da faixa adotada para $\bar{\gamma}$, em função da quantidade de pontos utilizada na simulação.

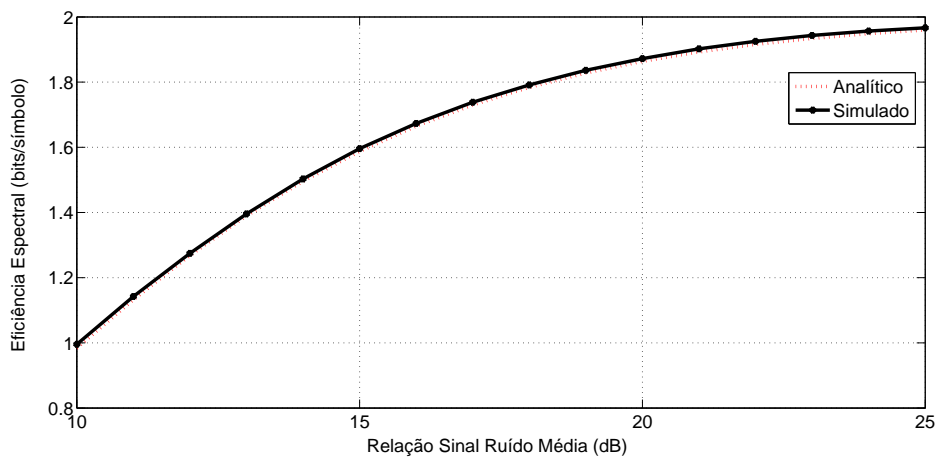


Figure 4. Comparação de Resultados - Eficiência espectral.

5. Estudo de Caso

Nesta seção é apresentado um estudo de caso com o objetivo de avaliar o desempenho de diferentes tipos de tráfego em função das estratégias atuais de projeto *cross-layer*. No cenário considerado, o transmissor dispõe dos seis modos de transmissão descritos na Seção 4.3; adota-se o vetor de limiares $\Gamma = [7, 4062; 9, 2711; 15, 2856; 16, 6486; 20, 8606]$

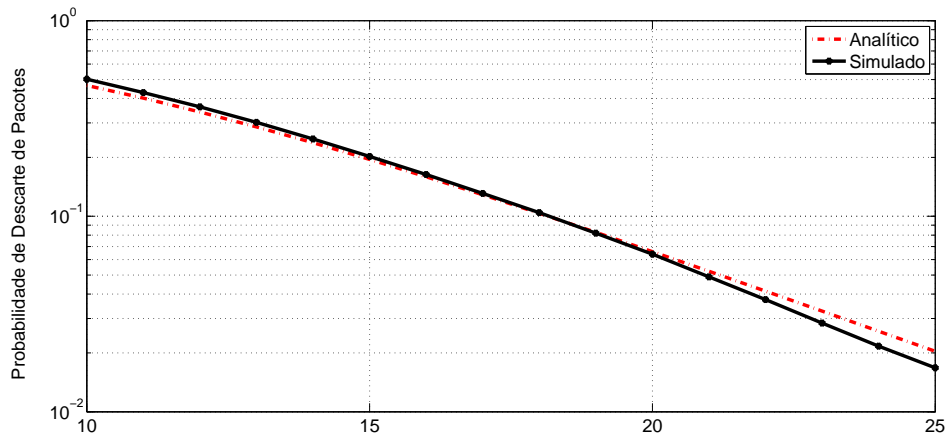


Figure 5. Comparação de Resultados - Probabilidade de Descarte.

dB. O vetor Γ foi adotado por estabelecer uma taxa alvo de erro em camada física igual a 10^{-2} em uma relação sinal-ruído média $\bar{\gamma} = 20$ dB, segundo a proposta descrita em [Liu et al. 2005]. Foram realizadas simulações com os modelos de tráfego de entrada descritos em 4.1, com duração de 300 segundos e gerando cerca de 200000 eventos em cada replicação. O tempo para transmissão de quadros foi de 2 ms para todos os tipos de tráfego, exceção para o tráfego de voz, no qual $T_f = 200$ ms.

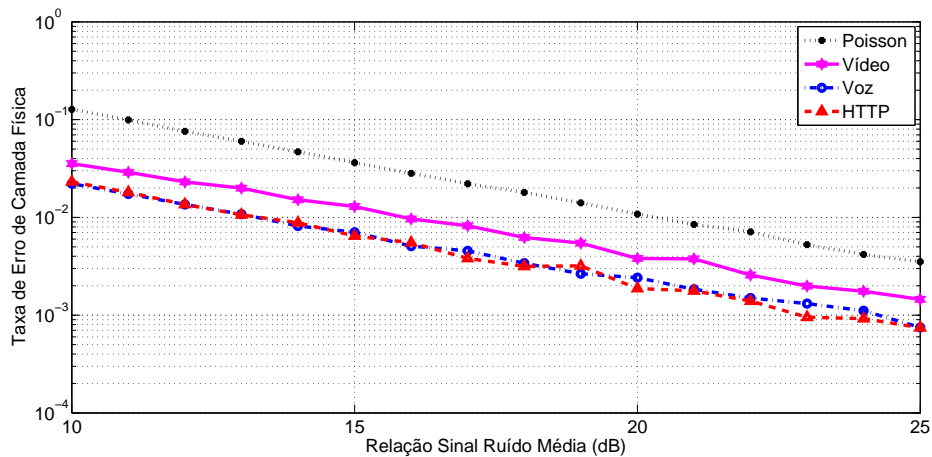


Figure 6. Taxa de Erro de Pacotes na Camada Física - Fila com tamanho $K = 10$ pacotes e $f_D = 5$ Hz

A partir da análise das figuras 6 e 7 percebe-se que há uma variação nas métricas de desempenho do sistema de acordo com o tipo de tráfego a ser transmitido, mesmo com limiares idênticos de transmissão adaptativa. Por exemplo, vê-se que, com o vetor Γ adotado, a taxa de erro de camada física para o tráfego de Poisson (que atinge o seu alvo de 10^{-2} para $\bar{\gamma} = 20$ dB) é superior à verificada para os demais tipos de tráfego.

Como consequência disto, a quantidade de bits transmitidos por símbolo é bem menor nestes outros tipos de tráfego, em especial, o tráfego de vídeo - efeito indesejado, dada a necessidade de uma maior vazão de pacotes por quadro. Assim, verifica-se a ne-

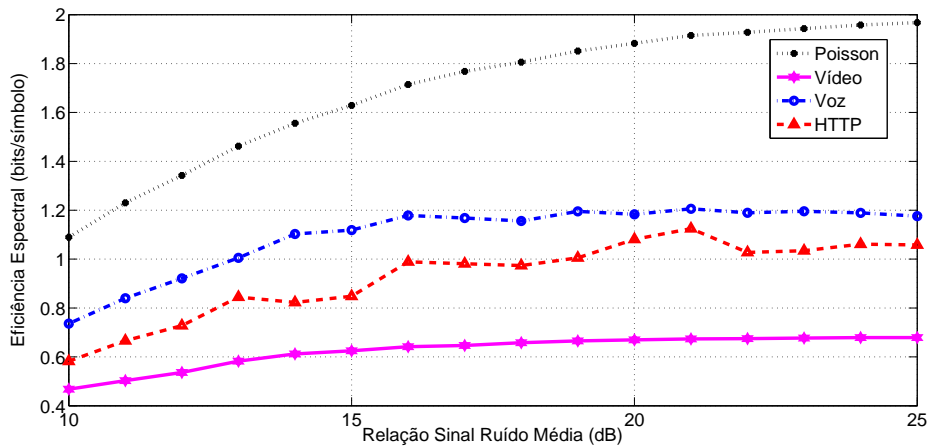


Figure 7. Eficiência Espectral - Fila com tamanho $K = 10$ pacotes e $f_D = 5$ Hz

cessidade de se levar em conta aspectos de camadas superiores para identificar os limiares de transmissão adaptativa mais ajustados para a aplicação.

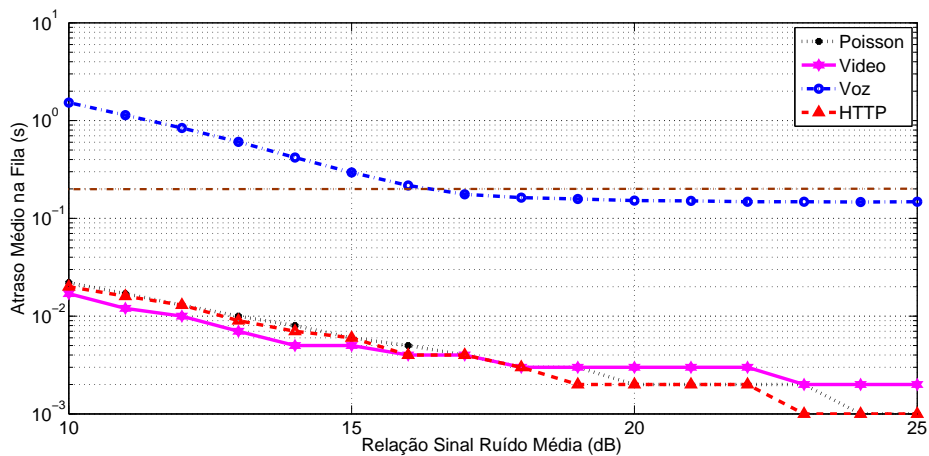


Figure 8. Atraso Médio de Pacotes - Fila com tamanho $K = 20$ pacotes e $f_D = 10$ Hz

Constata-se na Figura 8 que o atraso médio de pacotes para o tráfego de voz apresenta valores bem superiores aos verificados para os outros modelos de entrada com a adoção do vetor Γ para os limiares de transmissão adaptativa, em função do tempo entre transmissão de quadros adotado. Ainda assim, verifica-se que o atraso médio de pacotes assume valores acima de $T_f = 200$ ms para $\bar{\gamma}$ menores do que 17 dB. Isso indica que uma parcela considerável dos pacotes transmitidos aguarda, pelo menos, dois intervalos de transmissão de quadro (400 ms) na fila, efeito indesejado para tráfego de voz.

Por fim, a Figura 10 mostra o efeito conjunto das perdas em função de erros na camada física, descritos na Figura 6, e de descartes na fila, conforme mostrado na Figura 9. Verifica-se que a taxa global de perda de pacotes para o tráfego HTTP é superior a 1 % e o vídeo, superior a 0,4 % em toda a faixa de relação sinal-ruído considerada, mostrando a inadequação dos limiares obtidos para atendimento a critérios clássicos de qualidade de

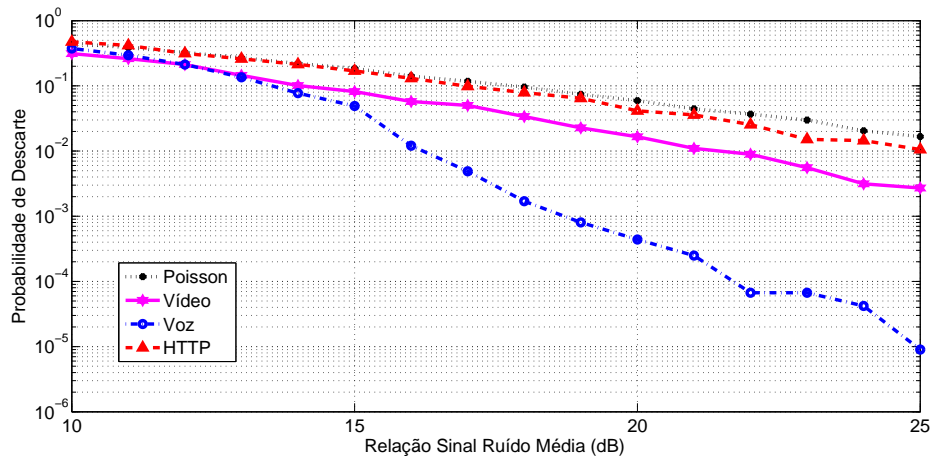


Figure 9. Probabilidade de Descarte de Pacotes - Fila com tamanho $K = 10$ pacotes e $f_D = 5$ Hz

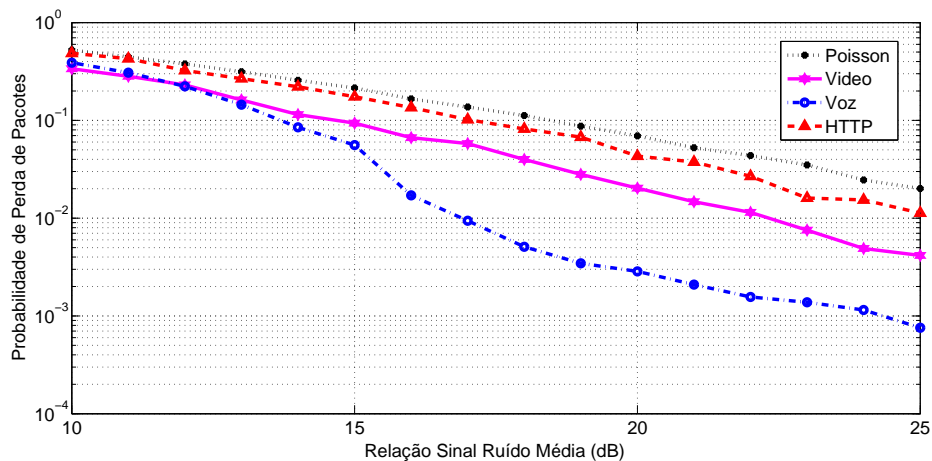


Figure 10. Taxa Global de Perda de Pacotes - Fila com tamanho $K = 10$ pacotes e $f_D = 5$ Hz

serviço para estes tipos de tráfego.

Logo, vê-se que a escolha de limiares de adaptação estritamente em função de parâmetros de camada física é uma estratégia insuficiente para a garantia de níveis de serviço desejáveis. É necessário levar em conta, por exemplo, aspectos típicos de camadas superiores para otimizar o desempenho do sistema. Além disso, os exemplos mostram a dependência dos resultados obtidos em relação aos modelos adotados para o tráfego de entrada.

6. Comentários Finais

Este artigo apresentou uma nova ferramenta de simulação para redes sem fio adaptativas. Ele foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o desempenho de aplicações típicas de cenários militares em projetos *cross-layer* para redes sem fio adaptativas. Foi apresentado também um estudo de caso utilizando a ferramenta, comparando quatro modelos de tráfego (Poisson, HTTP, voz e vídeo) em um cenário típico de operações táticas.

Esse estudo comparativo foi feito considerando métricas como probabilidade de descarte, eficiência espectral, atraso médio de pacotes na fila e taxa de erro de pacotes na camada física, de acordo com a variação do comportamento do canal de comunicação e do sistema.

Dada a disponibilidade dessa ferramenta, estudos adicionais podem ser executados, analisando o comportamento de agregados de dados em cenários táticos. Além disso, novas estratégias *cross-layer* podem ser desenvolvidas, com restrições mais ajustadas ao cenário visualizado para redes de nova geração e modelos mais precisos do canal de transmissão (por exemplo, inserção de erros e atrasos no canal de retorno, além de efeitos de seletividade em frequência). Com isso, será possível observar os valores para métricas de qualidade de serviço em cenários mais realistas do que os apresentados em trabalhos anteriores na literatura [Moura et al. 2008].

References

- Akyildiz, I., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., and Cayirci, E. (2002). A survey on sensor networks. *Communications Magazine, IEEE*, 40(8):102–114.
- Ashour, M. and Le-Ngoc, T. (2008). Priority queuing of long-range dependent traffic. *Computer Communications, Elsevier*, 31(17):3954–3963.
- Baugh, C. R., Huang, J., Schwartz, R., and Trinkwon, D. (2001). Traffic model for 802.16 tg3 mac/phy simulations. *IEEE 802.16.3c-01/30r1*, pages 1–26.
- de Souza e Silva, E., Figueiredo, D. R., and Le ao, R. M. (2009). The tangramii integrated modeling environment for computer systems and networks. *SIGMETRICS Perform. Eval. Rev.*, 36(4):64–69.
- Ghavami, A. and Ashtiani, F. (2007). A new cross layer design of adaptive modulation and coding in finite buffer wireless links. In *FGCN '07: Proceedings of the Future Generation Communication and Networking*, pages 499–504, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- Harsini, J. and Lahouti, F. (2007). Queuing with adaptive modulation over mimo wireless links for deadline constrained traffic: Cross-layer analysis and design. In *Communications, 2007. ICC '07. IEEE International Conference on*, pages 235–240.
- Hoang, A. T. and Motani, M. (2008). Cross-layer adaptive transmission: Optimal strategies in fading channels. *IEEE Trans. on Communications*, 56(5):1–9.
- Ishizaki, F. and G.U.Hwang (2007). Cross-layer design and analysis of wireless networks using the effective bandwidth function. *IEEE Trans. Wireless Communications*, 6(9):3214–3219.
- Law, A. M. (2007). *Simulation, Modeling and Analysis*. McGraw-Hill.
- Liu, Q., Zhou, S., and Giannakis, G. (2005). Queuing with adaptive modulation and coding over wireless links: Cross-layer analysis and design. *IEEE Trans. Wireless Communications*, 4(3):1142–1153.
- Moura, D., Galdino, J., and Salles, R. (2008). Autonomic radio networks channel allocation. In *Military Communications Conference, 2008. MILCOM 2008. IEEE*, pages 1–7.

- ns (2009). Ns-2, "the network simulator". <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. Acesso em 08/04/2009.
- omnet (2009). Omnet++ homepage. <http://www.omnetpp.org/>. Acesso em 08/04/2009.
- Proakis, J. G. (2000). *Digital Communications*. McGraw-Hill.
- Sadeghi, P., Kennedy, R. A., Rapajic, P. B., and Shams, R. (2008). Finite-state markov modeling of fading channels. *IEEE Signal Processing Magazine*, 25(5):57–80.
- Tang, J. and Zhang, X. (2007). Cross-layer-model based adaptive resource allocation for statistical qos guarantees in mobile wireless networks. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 6(12):1–11.
- (UMTS), U. M. T. S. Tr 101 112 v3.2.0 (1998-04), selection procedures for the choice of radio transmission technologies of the umts, annex b.
- Zhou, S., Zhang, K., Niu, Z., and Yang, Y. (2008). Queuing analysis on mimo systems with adaptive modulation and coding. In *Communications, 2008. ICC '08. IEEE International Conference on*, pages 3400–3405.