INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

CAP DAVID FERNANDES CRUZ MOURA

COOPERAÇÃO ENTRE CAMADAS PARA ADAPTAÇÃO DE MODULAÇÃO EM REDES MILITARES SEM FIO

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Defesa do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Defesa.

Orientador: Maj Ronaldo Moreira Salles, Ph.D.
Orientador: Maj Juraci Ferreira Galdino, D.C.

Rio de Janeiro
2011

c2011

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
Praça General Tibúrcio, 80-Praia Vermelha
Rio de Janeiro-RJ CEP 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmar ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

A773a Moura, D.F.C.
Cooperação entre Camadas para Adaptação de Modulação em Redes Militares Sem Fio, David Fernandes Cruz Moura.
– Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2011.
104 p.: il, graf., tab.

Tese: (doutorado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2011.

1. Sistemas Táticos de Comunicações. 2. Modulação Adaptativa. 3. Teoria das Filas. 4. Projeto de Cooperação entre Camadas.

CDD 511.8

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

CAP DAVID FERNANDES CRUZ MOURA

COOPERAÇÃO ENTRE CAMADAS PARA ADAPTAÇÃO DE MODULAÇÃO EM REDES MILITARES SEM FIO

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Defesa do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Defesa.

Orientador: Maj Ronaldo Moreira Salles, Ph.D.

Orientador: Maj Juraci Ferreira Galdino, D.C.

Aprovada em 18 de Fevereiro de 2011 pela seguinte Banca Examinadora:

Maj Ronaldo Moreira Salles, Ph.D. do IME - Presidente

Maj Juraci Ferreira Galdino, D.C. do IME

José Ferreira de Rezende, Dr. da COPPE/UFRJ

Marcello Luiz Rodrigues de Campos, Ph.D. da COPPE/UFRJ

Ernesto Leite Pinto, D.C. do IME

Maj Maurício Henrique Costa Dias, D.C. do IME

Rio de Janeiro
2011

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, Mestre dos Mestres, cujas palavras dão luz e entendimento aos simples. A Ele, toda a glória, honra e louvor!

A minha esposa Rafaela, agradeço por toda a compreensão e todas as noites em vigília de oração, sempre presentes neste período de estudos. Aceitar minhas ausências em vários momentos desta jornada não foi tarefa fácil; no entanto, mais difícil foi saber exigir minha presença quando absolutamente necessário. Seu apoio, carinho e presença foram determinantes para a conclusão desta etapa de meus estudos.

A meus pais, Helcy e Josias, meus primeiros incentivadores, por todo seu esforço em me fornecer uma sólida base de educação e valores que me permitiram as condições de chegar a este momento de minha vida.

A minhas irmãs, Kelly e Simone, meu cunhado Eduardo, minha sobrinha Alice, e meus demais familiares, por todo o amor e carinho a mim dispensados ao longo de minha vida.

A meus orientadores, Dr. Ronaldo Moreira Salles e Dr. Juraci Ferreira Galdino, pela amizade, disponibilidade e prontidão a atender e esclarecer minhas dúvidas e pelo conhecimento transmitido ao longo destes quatro anos.

Aos professores Dr. José Ferreira de Rezende, Dr. Marcello Luiz Rodrigues de Campos, Dr. Ernesto Leite Pinto e Dr. Maurício Henrique Costa Dias, pelas contribuições e sugestões ao texto final, bem como aos trabalhos posteriores a esta tese.

Ao Exército Brasileiro, pela oportunidade concedida de realizar o Curso de Doutorado em Engenharia de Defesa.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estágio doutoral, momento de desenvolvimento profissional e pessoal.

Ao professor Dr. Allen MacKenzie, pela disponibilidade em me receber como pesquisador visitante, bem como pelas ideias e colaborações ao longo de meu estágio doutoral em Virginia Tech.

Aos meus colegas de pesquisa, alunos de Mestrado e Doutorado dos cursos de Engenharia de Defesa, Engenharia Elétrica e de Sistemas e Computação, ao longo do período 2007-2011, pela amizade, ideias e debates nos laboratórios do IME.

Por fim, a todos os professores e funcionários do IME que, de alguma forma, contribuíram com esta jornada que aqui se encerra.

"É muito melhor arriscar coisas grandiosas, alcançar triunfos e glórias, mesmo expondo-se à derrota, do que formar fila com os pobres de espírito, que não gozam muito e nem sofrem muito, porque vivem na penumbra cinzenta que não conhece nem vitória nem derrota."

Theodore Roosevelt

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES 8

LISTA DE TABELAS 11

1 INTRODUÇÃO 14

1.1 Motivação 14

1.2 Descrição do Sistema de Referência 19

1.3 Objetivos da Tese e Organização do Texto 22

2 PROJETOS DE COOPERAÇÃO ENTRE CAMADAS PARA REDES SEM FIO ADAPTATIVAS 25

2.1 Introdução 25

2.1.1 Modulação Adaptativa 26

2.2 Otimização com Cooperação entre Camadas 30

2.3 Otimização com Cooperação entre Camadas - Trabalhos Relacionados 34

2.4 Resumo 40

3 NOVA PROPOSTA EM TEORIA DE PROJETO DE FILAS: O MODELO COM ENTRADAS GENERALIZADAS E SERVIÇO DETERMINÍSTICO 41

3.1 Introdução 41

3.2 Motivação 42

3.2.1 Tráfego de Entrada 43

3.2.2 Resultados 43

3.3 Trabalhos Relacionados 46

3.4 Descrição do Modelo de Entradas Generalizadas e Serviços Determinísticos - EGSD 50

3.4.1 Modelo de Tráfego 50

3.4.2 Modelo de Atendimento 51

3.4.3 Cadeia de Markov associada ao sistema 52

3.4.4 Avaliação de Desempenho 53

3.5 Aplicações e Resultados Numéricos 54

3.6 Resumo 62

4 PROJETOS DE COOPERAÇÃO ENTRE CAMADAS PARA REDES SEM FIO ADAPTATIVAS 64
4.1 Projeto de Cooperação entre Camadas - Abordagem com Cálculo de Limiares em função do desempenho na Camada Física 64
4.2 Projeto de Cooperação entre Camadas - Abordagem Integradora 69
4.2.1 Estudo de Caso 72
4.3 Resumo 86

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS 87
5.1 Conclusões 87
5.2 Perspectivas para Trabalhos Futuros 90
5.3 Publicações 92

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 93

A APÊNDICES 98
A.1 Descrição do Simulador 98
A.1.1 Modelos de Entrada de Pacotes 99
A.1.2 Modelo de Serviço de Pacotes 100
A.1.3 Validação 101

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG.1.1 Modelo de um Sistema Tático de Comunicações nível Brigada. 16
FIG.1.2 Modelo do Sistema. 21
FIG.1.3 Seqüência de processamento em cada camada. 21

FIG.2.1 Funcionamento geral da Técnica de Modulação Adaptativa. 28

FIG.3.1 Taxa de Erro de Pacotes na Camada Física - Fila com tamanho B = 10 pacotes. 44
FIG.3.2 Eficiência Espectral - Fila com tamanho B = 10 pacotes. 44
FIG.3.3 Probabilidade de Descarte de Pacotes - Fila com tamanho B = 10 pacotes. 45
FIG.3.4 Taxa Global de Perda de Pacotes - Fila com tamanho B = 10 pacotes. 45
FIG.3.5 Descrição dos Processos de Entrada e de Saída da Fila EGSD. 50
FIG.3.6 Impacto do tamanho da fila no descarte de pacotes do sistema. 55
FIG.3.7 Impacto do tamanho da fila na vazão do sistema. 56
FIG.3.8 Impacto do tamanho da fila na probabilidade de descarte de pacotes para diferentes valores de relação sinal-ruído média. 57
FIG.3.9 Impacto do tamanho da fila na eficiência espectral média para diferentes valores de relação sinal-ruído média. 57
FIG.3.10 Impacto do tamanho da fila na probabilidade de descarte do agregado de pacotes em diferentes valores de relação sinal-ruído média. ... 58
FIG.3.11 Impacto do tamanho da fila na eficiência espectral média de transmissão do agregado de pacotes em diferentes valores de relação sinal-ruído média. 58
FIG.3.12 Impacto do efeito da probabilidade de transmissão P_{on} na probabilidade de descarte de pacotes em diferentes valores de relação sinal-ruído média. Tamanho da memória = 80 pacotes. 60
FIG.3.13 Impacto do efeito da probabilidade de transmissão P_{on} na eficiência espectral média do sistema em diferentes valores de relação sinal-ruído média. Tamanho da memória = 80 pacotes. 60
FIG.3.14 Impacto do efeito de rajadas de transmissão na probabilidade de descarte de pacotes em diferentes valores de relação sinal-ruído

média. 61
FIG.3.15 Impacto do efeito de rajadas de transmissão na eficiência espectral média do sistema em diferentes valores de relação sinal-ruído média. 62

FIG.4.1 Taxa de descarte de pacotes (camada de enlace - eixo vertical) em função da taxa de erro de transmissão (camada física - eixo horizontal). 69
FIG.4.2 Eficiência espectral média. 69
FIG.4.3 Taxa mínima de perda de pacotes ξ_{min}, dada pela comparação entre os valores de ξ alvo propostos e os obtidos. 73
FIG.4.4 Influência do comprimento da fila no valor de ξ para $\bar{\gamma}$ entre 10 e 25 dB. 74
FIG.4.5 Influência do comprimento da fila no valor de S para $\bar{\gamma}$ entre 10 e 25 dB 75
FIG.4.6 Influência da frequência Doppler no valor de ξ para $\bar{\gamma}$ entre 10 e 25 dB. 76
FIG.4.7 Influência da frequência Doppler no valor de S para $\bar{\gamma}$ entre 10 e 25 dB. 76
FIG.4.8 Influência da taxa de entrada de pacotes no valor de ξ para $\bar{\gamma}$ entre 10 e 25 dB. 77
FIG.4.9 Influência da taxa de entrada de pacotes no valor de S para $\bar{\gamma}$ entre 10 e 25 dB. 77
FIG.4.10 Comparação dos modelos de tráfego a partir da vazão do sistema. 81
FIG.4.11 Comparação dos modelos de tráfego a partir da taxa de perda de pacotes do sistema. 82
FIG.4.12 Influência do tamanho da fila no valor de ξ para diferentes valores de relação sinal-ruído média. 83
FIG.4.13 Influência do tamanho da fila no valor de S para diferentes valores de relação sinal-ruído média. 83
FIG.4.14 Influência da taxa média de chegada de pacotes no valor de ξ para diferentes valores de relação sinal-ruído média. 84
FIG.4.15 Influência da taxa média de chegada de pacotes no valor de $\bar{S}$ para diferentes valores de relação sinal-ruído média. 84

FIG.4.16 Influência da Taxa de Chegada de Pacotes em ξ de acordo com γ. 85
FIG.4.17 Influência da Taxa de Chegada de Pacotes em $\bar{S}$ de acordo com γ 85

FIG.A.1 Modelo de Serviço. 102
FIG.A.2 Comparação de Resultados - Eficiência espectral. 103
FIG.A.3 Comparação de Resultados - Probabilidade de Descarte. 104

LISTA DE TABELAS

TAB.3.1 Parâmetros para o agregado de vídeo, conforme BAUGH (2001) 43

TAB.4.1 Parâmetros dos Modos de Transmissão 66

TAB.4.2 Valores de P_o^{opt} para RSR entre 17 e 22 dB 69

TAB.4.3 Estudo de Caso - Comparação entre as abordagens tradicional e integradora para otimização com cooperação entre camadas. 79

TAB.4.4 Estudo de Caso - Parâmetros do sistema otimizados para o tráfego IPP. 79

TAB.A.1 Parâmetros para o agregado de vídeo, conforme BAUGH (2001) 100

TAB.A.2 Modos de Transmissão Implementados 100

RESUMO

Durante muitos anos, tem sido empregada uma arquitetura em camadas para projetos de redes. De acordo com essa proposta, cada camada desempenha funções complementares e que são executadas por protocolos implementados de forma independente. Entretanto, verifica-se que as funções realizadas pelas diferentes camadas interagem de forma mais complexa do que a representada por meio de modelos tradicionais de referência em redes. Esse problema é ainda maior em sistemas de comunicações militares sem fio, visto que seu desempenho global é fortemente influenciado por fatores como desvanecimento multipercurso, sombreamento e efeitos de dispersão temporal provocados pela propagação de ondas eletromagnéticas.

A investigação da relação entre diferentes camadas e o projeto de novos mecanismos que não utilizem a divisão clássica em camadas independentes têm estimulado o desenvolvimento de estratégias de otimização em camadas cruzadas. Com o emprego de tais estratégias, elementos das camadas de aplicação, transporte, rede, enlace e física interagem e são ajustados de novas formas, permitindo um melhor desempenho do sistema. Dentre as interações mais estudadas, destaca-se o relacionamento entre parâmetros de camada física (como técnicas de modulação adaptativa) e de enlace (por exemplo, probabilidade de descarte em memórias de tamanho finito), como forma de otimizar o desempenho do sistema sob o ponto de vista do usuário, calculando parâmetros como taxa de perda, atraso e vazão de pacotes no sistema.

De uma forma geral, os limiares de modulação adaptativa têm sido calculados estritamente com o objetivo de minimizar a taxa de erro de transmissão de pacotes através do canal sem fio, levando em conta tão somente o comportamento da camada física, acompanhada da adoção do modelo tradicional de Poisson para o tráfego de entrada. Assim, diversos parâmetros do sistema, como a probabilidade de descarte, a taxa global de perda de pacotes e a vazão do sistema são calculados de forma indireta e para modelos pouco realistas de tráfego. Além disso, não há propostas de modelos analíticos de filas que permitam o estudo de estratégias de otimização com cooperação entre camadas em redes militares sem fio.

Com isso, este trabalho de tese apresenta o desenvolvimento de um novo modelo de fila e de novas estratégias de cooperação entre camadas para adaptação de modulação em redes militares sem fio. São considerados os efeitos da modulação adaptativa, o tamanho da fila nos equipamentos transmissores e modelos de tráfego dos usuários típicos. Isso posto, avalia-se o impacto que os parâmetros da camada física da arquitetura de rede exercem sobre o desempenho de todo o sistema, a saber, camadas física, enlace e aplicação.

Assim, modelos de análise e projeto em filas são descritos e é apresentado o modelo de fila com entradas generalizadas e serviços determinísticos (EGSD). Os resultados obtidos com o modelo EGSD são comparados aos indicados pelo simulador desenvolvido para o trabalho, mostrando a validade do modelo para o estudo de diversos cenários típicos em redes sem fio adaptativas. Por fim, é apresentada uma nova proposta de projeto de cooperação entre camadas com a integração de métricas de diferentes camadas, seguida de experimentos numéricos que sinalizam o aumento de desempenho obtido com esta abordagem integradora.

ABSTRACT

For many years, it was adopted a modular approach to network design, based on the use of independent layers, each one playing different but complimentary tasks. However, the interactions among the different layers are more complex than those represented by traditional reference models, such as ISO/OSI and TCP/IP. This problem is even greater for wireless communication systems, since its overall performance is strongly influenced by factors such as multipath fading, shadowing and effects of temporal dispersion caused by propagation of electromagnetic waves.

Such investigations regarding the relationship between different layers and the design of new mechanisms that do not use the classic division into independent layers have stimulated the development of cross-layer design (CLD) approaches. In a CLD, elements of several layers, such as application, transport, network, link, and physical, present new configuration and interaction ways, enabling better system performance. Among the most studied interactions, we highlight the relationship between physical (such as adaptive modulation techniques) and data link layer parameters (e.g., packet dropping probability in a finite length memory) as a way to optimize the system performance under user's point of view, by calculating parameters such as packet loss rate, delay and average flow in the system.

In general, the optimization of adaptive modulation thresholds proposed in several studies is calculated to minimize the error rate based solely on physical layer parameters. Furthermore, it is usual to adopt the Poisson model for inbound traffic. Thus, not only several system parameters, such as average packet delay, packet drop probability, overall packet loss rate, and system throughput are calculated indirectly, but also unrealistic models of traffic are taken into account. In addition, there were no available analytical queue models to enhance CLD study for typical military scenarios.

So, this work presents the development of a new queuing model and new cross-layer design strategies for providing adaptive modulation in wireless tactical networks. The effects of adaptive modulation and the size of the queue in the transmitting equipment are considered, as well as the traffic patterns of typical users. Based on that, we evaluate the impact that the parameters of a single layer of the network architecture (e.g., physical layer) present on the whole system performance (in this work, physical, link, and application layers).

At first, it is presented the generalized batch inputs and deterministic services queue model (EGSD). The results obtained with EGSD model are compared to those presented by the simulator specially developed for the work, indicating the validity of the model for the study of several typical scenarios in adaptive wireless networks. Finally, we present a new cross-layer strategy proposal, comprising the integration of metrics from different layers; the following numerical experiments indicate a performance increase obtained from this integrative approach.

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Constata-se nos últimos anos uma demanda crescente pela utilização de redes de comunicações sem fio. Esse crescimento tem se traduzido no lançamento de aplicações cada vez mais sofisticadas, caracterizadas por elevados requisitos de qualidade de serviço, expressos em métricas como vazão, taxa de erro de dados e atraso de transmissão. No entanto, atender a tais requisitos constitui-se em um grande desafio, dado que o desempenho dessas redes pode ser severamente degradado em função de limitações de largura de banda e potência de transmissão disponíveis para os equipamentos. Além disso, não se pode omitir que distúrbios como o ruído e o desvanecimento contribuem para a degradação do sinal transmitido, provocando erros na detecção da informação. Assim, a elaboração de propostas mais eficientes para o emprego de sistemas de comunicações sem fio assume uma importância fundamental.

Este assunto também reveste-se de importância em sistemas de comunicações militares. A organização, instalação e funcionamento dos Centros de Comunicações (C Com) apoiados pelo computador no Exército Brasileiro constituem-se em assuntos de grande interesse, sendo descritos no Manual de Campanha *Centro de Comunicações*, do Estado-Maior do Exército. A Força Terrestre se vale de diversos sistemas de enlace para promover a integração da tropa em combate. No caso particular do Exército Brasileiro, o Sistema de Comunicações do Exército (SICOMEx) é estruturado nos Sistemas Estratégico e Tático de Comunicações, respectivamente SEC e SISTAC conforme descrito em SALLES (2008).

O SEC se destina ao estabelecimento das ligações de longa distância, dentro do território nacional, para o atendimento das necessidades correntes e estratégicas do Exército, podendo, excepcionalmente, prestar apoio de comunicações a qualquer escalão do Exército Brasileiro no exterior. Já o SISTAC é o conjunto de meios de comunicações e informática pertencente a unidades operacionais do Exército Brasileiro, destinado ao preparo e emprego de tropas; assim, seu emprego se dá em missões de adestramento ou em operações de campanha.

Para esse último caso, a base é constituída de sistemas de comunicações sem fio, em função de sua flexibilidade e rapidez de desdobramento, de acordo com a situação tática,

pois os sistemas sem fio são indicados como a melhor alternativa para o atendimento de requisitos como o funcionamento em tempo integral, rapidez, confiabilidade e estabelecimento de mecanismos de prioridade entre mensagens, conforme preconizado no Manual de Campanha C11-1 do Exército Brasileiro, *O Emprego das Comunicações*. Assim, novos sistemas táticos têm sido desenvolvidos e implantados no Exército Brasileiro, como o Módulo de Telemática Operacional e o Sistema Tático de Comunicações, versão Divisão de Exército.

Como topologia de referência de uma rede rádio de um SISTAC, adota-se o Diagrama da Rede Rádio de uma Grande Unidade valor Brigada[1]. Uma ilustração é apresentada na Figura 1.1. Nesse tipo de cenário, descrito em SALLES (2008) como a ligação entre uma Brigada e as unidades militares a ela subordinadas, como batalhões [2] e companhias[3], diversos nós móveis, dotados de sensores, encontram-se conectados a uma estação base através de redes sem fio. O acesso entre as estações móveis e a central é feita com o emprego de técnicas de multiplexação por divisão de tempo e cada estação pode encaminhar múltiplas conexões com a estação base.

Os sistemas táticos de comunicações modernos, como o Módulo de Telemática Operacional e o Sistema Tático de Comunicações, versão Divisão de Exército[4], se caracterizam pelo emprego de aplicações cada vez mais sofisticadas, com elevados requisitos de qualidade de serviço, expressos em termos de vazão, taxa de erro de dados e atraso de transmissão. Ademais, conforme observado em exercícios de campanha, o desempenho dessas redes pode ser severamente degradado, em função de limitações de largura de banda e potência de transmissão disponíveis para os equipamentos, e dos distúrbios como o ruído e o desvanecimento.

Outros tipos de sistemas, presentes em ambientes não militares, apresentam topologia semelhante, como sistemas móveis celulares, redes móveis *ad hoc* e redes de sensores sem fio, como descrito em LIU (2005). Por exemplo, as redes de sensores sem fio apresentados

[1]Grande unidade de menor escalão de cada exército a ser comandada por oficial-general. Em geral, cada brigada é composta por 3000 militares, distribuídos em vários batalhões.

[2]Unidade militar, composta em média por 800 militares, normalmente dividida em três companhias e a comando de um tenente-coronel. Tradicionalmente, trata-se da menor unidade de um exército capaz de realizar operações independentes. Em alguns casos, também denominada de regimento ou grupo.

[3]Unidade militar, composta em média por 300 militares, normalmente dividida em três pelotões e a comando de um capitão. Trata-se da menor unidade de um exército a dispor de autonomia administrativa e logística.

[4]Grande unidade militar das forças terrestres, normalmente compreendendo um efetivo de entre 10000 e 30000 soldados. Em geral, é composta por vários regimentos ou brigadas.

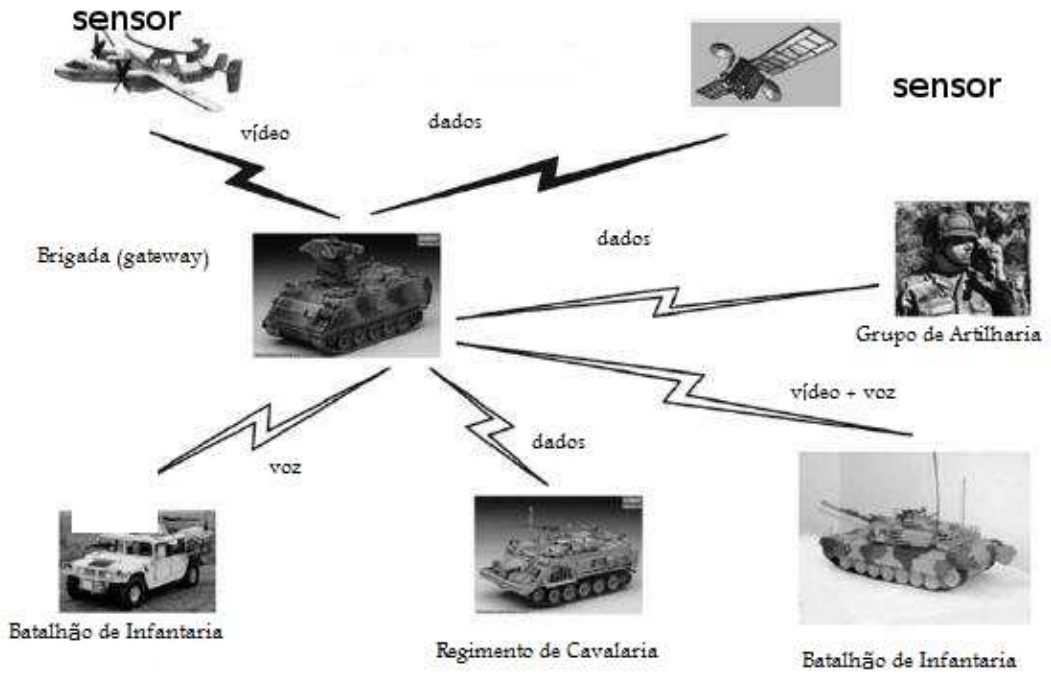

FIG. 1.1: Modelo de um Sistema Tático de Comunicações nível Brigada.

em AKYILDIZ (2002) são compostas de um grande número de nós móveis (os sensores), normalmente operados à base de baterias e dispersos em uma região de interesse. Os sensores são dispositivos que podem ser instalados em diversas plataformas, como ilustrado na Figura 1.1 - veículos aéreos não tripulados, viaturas militares ou até mesmo portados por pessoas.

Tal proliferação tecnológica, tanto no meio militar como no civil, por sua vez, provocou um aumento sem precedentes do número de padrões de acesso sem fio, bem como das pilhas de protocolos a eles associados. A necessidade de prover novos padrões de comunicações de forma cada vez mais rápida, para atender à demanda por estas redes móveis, é resolvida via de regra por meio de um simples aproveitamento e adaptação de pilhas de protocolos já definidos anteriormente. Como protocolos são normalmente especificados com pressupostos diferentes, percebe-se que o desempenho fim-a-fim de tais pilhas de protocolo nas redes móveis implantadas nem sempre tem sido satisfatório.

Parte de tal inadequação, tanto no ambiente militar como no civil, se deve ao fato de que o mecanismo tradicional de composição de pilhas de protocolos utiliza uma abordagem estratificada. Segundo esse modelo de referência, o intercâmbio de informações de controle e os dados ocorrem tão somente entre as camadas de protocolo adjacentes, através dos denominados pontos de acesso ao serviço (SAP, do inglês *Service Access Pro-*

tocol). Os SAP fornecem acesso a um subconjunto selecionado de funcionalidades do protocolo de forma precisa, através de um conjunto definido de operações primitivas. Essa abordagem faz parte do cerne do princípio de interligação de sistemas em padrão aberto (OSI, do inglês *Open Systems Interconnection*), o qual é modelo de referência e tem sido a abordagem dominante de projeto de todas as arquiteturas de redes modernas. No entanto, isso acaba por tornar cada camada de protocolo impermeável à funcionalidade incorporada dentro de outros protocolos, pertencentes às demais camadas.

Nesse sentido, o projeto de cooperação entre camadas - no inglês, *cross-layer* - apresenta-se como uma alternativa capaz de promover ganhos significativos de desempenho, a partir de uma abordagem conjunta de características das camadas física e superiores em um problema de alocação de recursos. Em um projeto de cooperação entre camadas, a configuração de um conjunto de parâmetros das camadas inferiores, (por exemplo, informações sobre o estado do canal) é efetuada de forma a otimizar o desempenho de serviços pertencentes a diferentes camadas, como o processo de funcionamento do TCP através de redes sem fio, a maximização da quantidade de usuários por área de serviço e a adaptação de estratégias de modulação e codificação para transmissão de conteúdos multimídia, em resposta ao estado do canal sem fio.

Assim, tal estratégia de projeto permite melhorar o desempenho global do sistema, civil ou militar, solucionando problemas de desempenho de rede sem fio cujas causas podem ser atribuídas ao pressuposto original de uma arquitetura de rede estratificada em camadas. Logo, o emprego de soluções com cooperação entre camadas é também uma estratégia candidata para a otimização de desempenho em tais sistemas militares, pois o compartilhamento do meio de transmissão faz com que o desempenho global do sistema seja fortemente dependente das características tanto do canal, das técnicas de modulação e codificação empregadas, como do perfil de tráfego gerado pelas aplicações.

A importância de uma proposta de cooperação entre camadas para aumento de desempenho em redes militares sem fio é ainda maior, em função da inexistência de um modelo de referência. Mesmo nos manuais de campanha hoje em vigor no Exército Brasileiro, não são descritas características importantes para o emprego de Sistemas de Comunicações, como número de equipamentos rádio, sistemas de enlace utilizados, número de usuários, número de redes rádio e tráfego médio gerado para os diversos escalões. Além da ausência de padronização nos requisitos tecnológicos dos Sistemas de Comunicações empregados em combate, tem-se que a garantia de níveis mínimos de serviço é um grande desafio em aplicações militares, especialmente para os SISTAC, tanto em situações de calamidade

pública, garantia da lei e da ordem, ou mesmo em combate convencional.

Atualmente, é amplamente reconhecido o potencial do emprego de cooperação entre camadas como uma estratégia de otimização de desempenho nas modernas redes sem fio; além disto, a capacidade de suporte a padrões de interação *cross-layer* em toda a pilha de protocolos é considerada uma importante propriedade de sistemas de comunicações móveis. Isso se dá porque o projeto de cooperação entre camadas permite a comunicação entre as camadas não adjacentes através de entidades adicionais introduzidas na arquitetura do sistema.

De uma forma geral, percebe-se que funções de camada física, como técnicas de modulação e codificação adaptativas, controle de energia, alocação de subportadora e técnicas de diversidade multiusuário, assumem um lugar de destaque em aplicações *cross-layer*. Em particular, dentre as interações mais estudadas, destaca-se o relacionamento entre mecanismos de camada física (como técnicas de modulação adaptativa) e de enlace (por exemplo, probabilidade de descarte em filas de tamanho finito), como forma de otimizar o desempenho do sistema, militar ou civil, sob o ponto de vista do usuário, calculando parâmetros como probabilidade de perda, atraso e vazão de pacotes no sistema.

No entanto, ainda não existe uma estratégia de referência que especifique as funcionalidades que devem fazer parte do projeto de cooperação na solução *cross-layer*, seja para sistemas de comunicações militares, seja para aplicações civis. De uma forma geral, os limiares de modulação adaptativa têm sido calculados estritamente com o objetivo de minimizar a taxa de erro de transmissão de pacotes através do canal sem fio - ou seja, levando em conta tão somente o comportamento da camada física. Além disso, adota-se o modelo de Poisson para o tráfego de entrada. Assim, diversos parâmetros do sistema, como o atraso médio de pacotes, a vazão do sistema e as probabilidades de descarte e de perda de pacotes são calculados de forma indireta e para modelos pouco realistas de tráfego. Esse é o principal problema tratado nesta tese.

Além disso, o cenário de comunicações a ser estudado se caracteriza por um processo de chegada de pacotes com rajadas e taxa variante no tempo e um processo determinístico de saída, cujo modelo de atendimento da fila se dá em lotes, em função do emprego de técnicas de modulação adaptativa. Dessa forma, a quantidade de pacotes transmitida em cada quadro depende do estado do canal de comunicação indicado pelo seletor de modulação adaptativa. No entanto, não há propostas de modelos analíticos de filas que permitam o estudo de projetos de otimização com cooperação entre camadas (POCC) para tal cenário - problema também tratado nesta tese.

Isso posto, persiste a necessidade de uma nova estratégia de otimização com cooperação entre camadas. Tal estratégia deve levar em consideração métricas de diversas camadas na identificação do desempenho do sistema e utilizar modelos de tráfego mais elaborados. Além disso, resta em aberto uma avaliação de desempenho dessa estratégia em sistemas adaptativos de comunicações, bem como um modelo analítico que permita o estudo de tráfego multimídia em redes sem fio adaptativas, considerando os efeitos de rajadas e correlação temporal nos processos de entrada e de atendimento de pacotes.

Assim, tem-se que as contribuições propostas neste trabalho de tese são duais, pois são válidas para os sistemas de comunicações sem fio em geral, e sistemas de defesa em particular. Em ambos os cenários, é importante a investigação da relação entre diferentes camadas e o projeto de novos mecanismos que não utilizem a divisão clássica em camadas independentes, mas em camadas cruzadas, para redes sem fio. Tal estratégia pode fazer com que elementos das camadas de aplicação, enlace e física interajam e sejam ajustados de novas formas, permitindo um melhor desempenho dos sistemas sem fio - em especial, os sistemas militares.

1.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA

Uma rede militar deve prover comunicações com alta taxa de transmissão e atender a requisitos de qualidade de serviço para aplicações de comando e controle. Um cenário de referência é o descrito na Figura 1.1. Os usuários (batalhões de infantaria, regimentos de cavalaria, grupos de artilharia, dentre outros) se comunicam com o escalão superior através de um centro de interface e integração (*gateway*), disponível no Posto de Comando (PC) do escalão. Em redes móveis sem fio, o desempenho global do sistema é fortemente degradado em função de aspectos de difícil predição, como os efeitos de sombreamento e de desvanecimento multipercurso.

Da mesma forma que em diversos sistemas militares de Comando e Controle SALLES (2008), considera-se que os usuários estão conectados ao *gateway* através de canais rádio móveis sujeitos a desvanecimento. O sistema emprega a técnica de acesso em intervalos de tempo fixos e previamente estipulados. Considera-se neste trabalho que os canais típicos do sistema de comunicações são modelados pelo efeito de desvanecimento plano. Além disso, considera-se que a resposta ao impulso do canal permanece invariante dentro de um quadro. Tal assunção é adequada, pois mesmo canais caracterizados pelo efeito de desvanecimento seletivo, como as subportadoras de um sistema de modulação

OFDM (do inglês *Orthogonal frequency-division multiplexing*), apresentam distúrbios de comportamento parecido ao de canais com desvanecimento plano.

A Figura 1.2 ilustra uma conexão fim-a-fim entre um transmissor (a Brigada) e um receptor (uma de suas unidades subordinadas; por exemplo, um Batalhão de Infantaria). Como em diversos equipamentos rádio utilizados pelo Exército Brasileiro, o transmissor possui uma memória descrita por uma fila de tamanho finito, com capacidade de armazenamento de até B pacotes; esta memória opera de modo *first-in first-out* (FIFO) com o emprego da técnica de modulação adaptativa. Essa técnica traz vantagem em relação à estratégia de transmissão fixa, visto que nesta o esquema de transmissão utilizado pode provocar tanto taxas de erro elevadas em situações de grande degradação do canal como uma utilização ineficiente da capacidade do canal em momentos mais favoráveis. Já a adoção de estratégias de transmissão adaptativa permite atingir uma melhor solução de compromisso entre velocidade de transmissão e taxa de erro.

Os pacotes armazenados em uma fila de tamanho finito são transmitidos através de um canal sujeito ao efeito de desvanecimento plano; a quantidade de pacotes a ser transmitida por divisão de tempo é indicada por um controlador de modulação adaptativa. O receptor encaminha a informação de estado do canal (IEC) ao transmissor através de um canal paralelo de controle, denominado de canal de retorno, admitido como ideal, ou seja, livre de erros e atrasos. A IEC é definida em um seletor de modulação adaptativa, via de regra utilizando a relação sinal-ruído instantânea como o indicador da qualidade do canal de transmissão.

O controlador de transmissão adaptativa no *gateway* adota a estratégia de modulação definida pelo receptor, com base na estimativa do canal obtida pelo receptor e enviada pelo canal de retorno ao transmissor. Com isso, o pacote com N_b bits é transformado em um *bloco*, com $\frac{N_b}{S_n}$ símbolos (S_n representa a eficiência espectral obtida com a escolha do modo de transmissão n)[5].

A estrutura adotada para transmissão de dados neste tipo de rede sem fio, a *rede sem fio adaptativa*, é descrita na Figura 1.3. Cada *pacote* possui um número fixo de N_b bits, compreendendo bits de cabeçalho e de dados. Existem diversos modos de transmissão para cada usuário, em que cada modo representa uma técnica de modulação.

Já na camada física, a unidade de processamento é o *quadro*, consistindo de N_s símbolos. Como adota-se uma taxa de símbolos constante, o tamanho de quadro T_f é fixo.

[5] Ao longo deste trabalho, os termos eficiência espectral e vazão serão utilizados como sinônimos, salvo em casos expressamente informados.

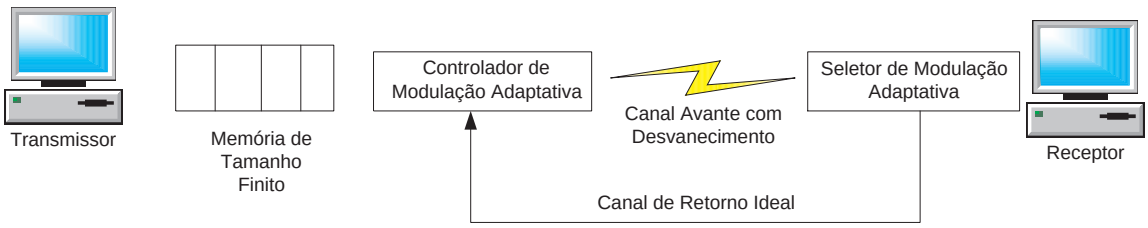

FIG. 1.2: Modelo do Sistema.

Cada quadro é dividido em $N_c + N_d$ fatias (*slots*) de tempo. Os N_c *slots* de tempo veiculam informações de controle e tons piloto; os N_d *slots* de tempo transmitem dados, escalonados para diferentes usuários de forma dinâmica a cada quadro.

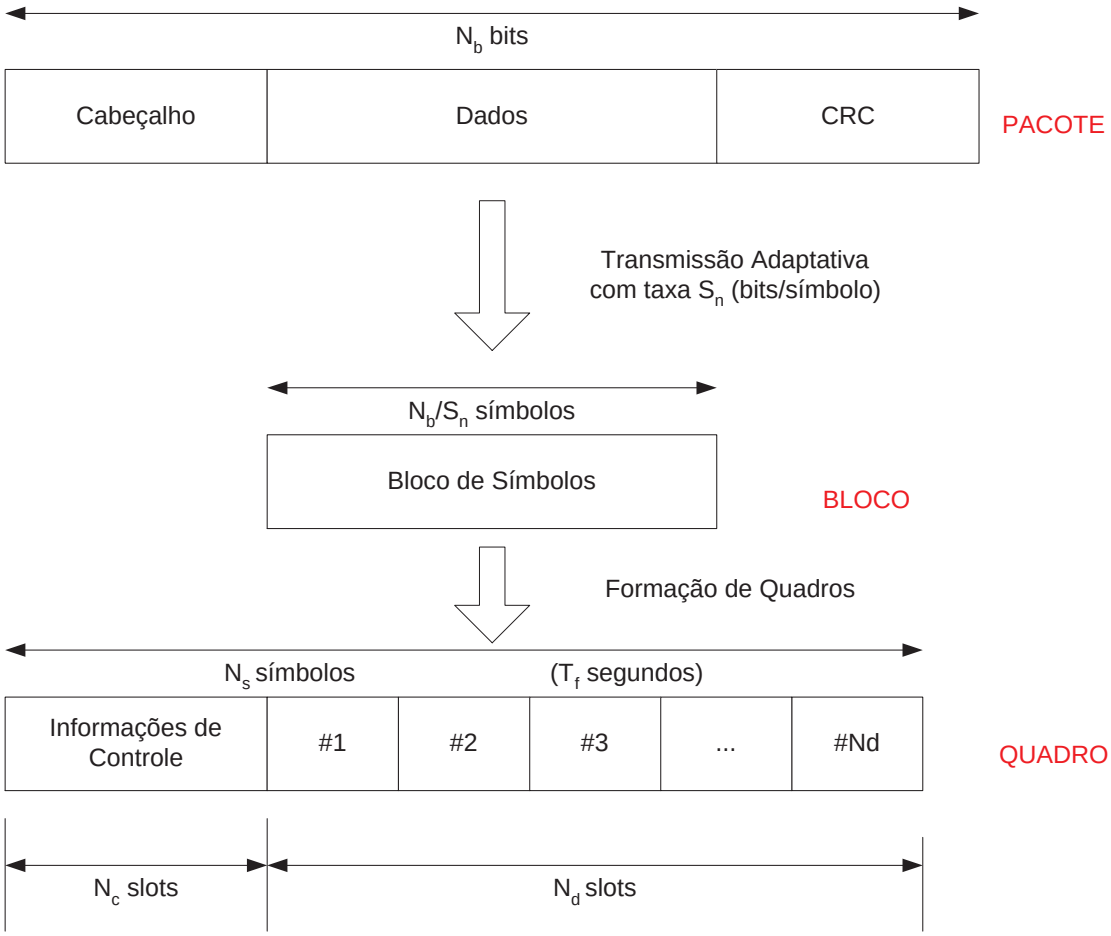

FIG. 1.3: Seqüência de processamento em cada camada.

Cada *slot* contém $\frac{N_b}{S_1}$ símbolos (S_1 representa o modo de transmissão disponível com menor eficiência espectral). Com isso, um *slot* de tempo transmite $\frac{S_n}{S_1}$ pacotes caso o modo n tenha sido selecionado. Cada usuário recebe um número inteiro de pacotes em cada *slot* de tempo; tais pacotes podem ser perdidos por erros do canal de transmissão,

descarte na fila (*overflow*) ou não-atendimento a restrições de QoS (por exemplo, atraso médio, variação de atraso, vazão mínima).

Considera-se a existência de N modos de transmissão distintos. Os valores de relação sinal-ruído instantânea γ_i, $i \in \{1, ..., N-1\}$ representam os limiares de chaveamento entre os modos de transmissão - os denominados limiares de transmissão adaptativa. Um modo de transmissão i, $i \in \{1, ..., N\}$, com taxa de S_i bits por símbolo, é escolhido quando a relação sinal-ruído instantânea γ é tal que $\gamma_i \leq \gamma < \gamma_{i+1}$, $\gamma_0 = 0$ e $\gamma_N = \infty$. Em suma, a técnica de modulação para transmissão de cada quadro é escolhida de forma adaptativa às variações das condições das camadas física, enlace e de aplicação.

1.3 OBJETIVOS DA TESE E ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Os pontos em aberto identificados neste trabalho são:

a) Modelos analíticos simplificados para avaliação de desempenho de diferentes tipos de tráfego multimídia em sistemas adaptativos de comunicações.

b) Avaliação de desempenho para modelos mais simples de tráfego em sistemas adaptativos de comunicações.

c) Utilização de métricas de camada física em estratégias de otimização *cross-layer*.

Assumindo a definição de *desempenho* em comunicações como a provisão de comunicações em tempo integral, rápidas, confiáveis, contínuas e que permitam o estabelecimento de prioridades, conforme descrito em SALLES (2008), o presente trabalho de tese tem como objetivo desenvolver um modelo analítico que promova a cooperação entre as camadas física, de enlace e aplicação, para o estabelecimento de comunicações com alto desempenho em sistemas de comunicações móveis.

Para alcançar tal objetivo, este trabalho de tese apresenta duas propostas. A primeira é o desenvolvimento de um novo modelo de fila; a segunda é a elaboração de uma nova estratégia de cooperação entre camadas para aumento de desempenho em redes sem fio adaptativas, voltada a aplicações militares, na qual o transmissor se vale da IEC, da ocupação instantânea da fila e da taxa de transmissão de dados descrita pelo tráfego oriundo da camada de aplicação para escolher a técnica de transmissão mais adequada para cada fatia de tempo. Como vantagem adicional, contempla-se a chegada de pacotes da camada de aplicação no transmissor em rajadas, padrão típico de sistemas de comunicações em operações militares SALLES (2008).

Assim, diferentemente de outros trabalhos na literatura, que utilizam projetos de cooperação entre camadas empregando modulação adaptativa e controle da taxa de transmissão na camada de aplicação, neste trabalho de tese são considerados os efeitos da modulação adaptativa e do tamanho da fila nos equipamentos transmissores, bem como dos modelos de tráfego dos usuários típicos. Além disso, avalia-se o impacto que os parâmetros de uma camada da arquitetura de rede (por exemplo, física) exercem sobre o desempenho de todo o sistema (neste trabalho, camadas física, enlace e aplicação).

As principais contribuições deste trabalho, listadas a partir dos pontos em aberto identificados, são:

a) Desenvolvimento de um modelo analítico em Teoria das Filas - a fila $MM(\sum_1^K)CPP/D^Y/1/B$, o modelo de fila com entradas generalizadas e serviços determinísticos. O objetivo particular desta contribuição é apresentar uma nova alternativa de modelo de tráfego multimídia em redes sem fio adaptativas, considerando os efeitos de rajadas e correlação temporal nos processos de entrada e de atendimento de pacotes;

b) Avaliação de desempenho em sistemas adaptativos de comunicações considerando modelos de tráfego mais elaborados (agregados de voz e dados, multimídia). Com esta contribuição, deseja-se analisar o comportamento de diferentes tipos de tráfego em cenários civis e militares.

c) Proposta de nova estratégia *cross-layer* de modulação adaptativa, considerando parâmetros das camadas física, enlace e aplicação, em lugar do emprego de métricas estritamente de camada física em projetos de cooperação entre camadas.

O texto da tese obedece à seguinte disposição: no Capítulo 2, e apresentada uma revisão sobre Projetos de Cooperação entre Camadas para redes sem fio adaptativas e são mostrados exemplos importantes desse tipo de estratégia. No Capítulo 3, são descritos modelos de análise e projeto em filas e é apresentado o modelo de fila com entradas generalizadas e serviços determinísticos; além disto, são mostrados os resultados obtidos com o modelo proposto, com a descrição do simulador desenvolvido para o trabalho e análises feitas para cenários típicos em redes sem fio adaptativas. No Capítulo 4, é apresentada a proposta de projeto de cooperação entre camadas com integração de métricas de diferentes camadas, seguida de experimentos numéricos que indicam o aumento de desempenho obtido com esta abordagem integradora. No Capítulo 5, são apresentadas

as conclusões do trabalho, indicando as contribuições da tese, bem como oportunidades de trabalhos futuros.

2 PROJETOS DE COOPERAÇÃO ENTRE CAMADAS PARA REDES SEM FIO ADAPTATIVAS

2.1 INTRODUÇÃO

Em sistemas de comunicações com transmissão adaptativa, a potência de transmissão e as técnicas de modulação e codificação empregadas podem variar ao longo da transmissão, de acordo com as características de desempenho do enlace estabelecido - por exemplo, em sistemas de comunicações móveis, bem como em comunicações ionosféricas na faixa de HF. O objetivo da técnica de transmissão adaptativa é maximizar o desempenho do sistema (avaliado por meio de métricas, como o aumento da eficiência espectral, a minimização da potência de transmissão ou o aumento da taxa de sigilo do sistema), sem deixar de atender a restrições pré-estabelecidas de probabilidade de erro de bit. A técnica de transmissão adaptativa traz vantagem em relação à estratégia de transmissão fixa, pois nesta o esquema de transmissão utilizado pode provocar tanto taxas de erro elevadas em situações de grande degradação do canal como uma transmissão ineficiente em momentos mais favoráveis. Logo, a adoção de estratégias de transmissão adaptativa permite atingir uma melhor solução de compromisso entre velocidade de transmissão e taxa de erro.

Ainda assim, é importante mencionar que a simples melhoria das características de desempenho da camada física não implica em uma garantia de qualidade de serviço em sistemas práticos de comunicações. Por exemplo, o desempenho do sistema é degradado com o descarte de pacotes; este, por sua vez, é dependente de fatores como as limitações das camadas de enlace e a intensidade do tráfego de entrada, bem como com a sua modelagem estatística. Assim, o comportamento de mecanismos de provisão de qualidade de serviço em camadas superiores deve ser levado em conta não apenas na análise do desempenho global, mas também no projeto de sistemas de comunicações móveis.

Tais características integradoras não são levadas em conta nos mecanismos de indicação de qualidade de canal (em inglês, CQI - *channel quality indicator*) nas redes de quarta geração, as quais se valem tão somente do valor da relação sinal-ruído instantânea, nem tampouco nas estratégias de gerência de recursos rádio (em inglês, RRM - *radio resource management*) nas redes de terceira geração, que utilizam as informações

das camadas de aplicação e de enlace para a indicação de estados de atividade e de silêncio na transmissão.

Isso posto, a estratégia de projeto de cooperação entre camadas permite a configuração de um conjunto de parâmetros das camadas inferiores, (por exemplo, informações sobre o estado do canal) de forma a otimizar o desempenho de funções tipicamente implementadas em camadas superiores, como o tráfego de dados oriundo da camada de aplicação e mecanismos de minimização de descarte de pacotes. Além desta capacidade de sintonização, tal estratégia de projeto permite a abordagem de problemas de desempenho de rede sem fio, cujas causas podem ser atribuídas ao pressuposto original de uma arquitetura de rede estratificada em camadas.

Nas seções seguintes deste capítulo, é apresentada uma descrição de conceitos fundamentais de transmissão adaptativa, os quais são utilizados ao longo deste trabalho de tese, seguida de uma revisão de estratégias de cooperação entre camadas, com destaque para as utilizadas em sistemas de comunicações ponto-a-ponto, tal qual no cenário de referência definido, listando-se as principais características, vantagens e limitações dos respectivos modelos propostos.

2.1.1 MODULAÇÃO ADAPTATIVA

Com o intuito de promover a maximização do desempenho da rede através de uma melhor alocação de recursos, as técnicas de transmissão adaptativa se apresentam, de acordo com TORRANCE (1996a), como uma alternativa viável em sistemas de comunicações sem fio, cujos canais são variantes com o tempo. O conceito de transmissão adaptativa se refere à adoção de estratégias de adaptação de parâmetros de transmissão em resposta às variações do canal. Assim, recursos como a potência de transmissão e as estratégias de modulação e codificação são alterados com base em informações enviadas ao transmissor, normalmente através de um canal de retorno. Em geral, tais adaptações de estratégia devem ser realizadas de tal forma que uma taxa de erro de bit máxima seja respeitada.

Os sistemas de comunicações que empregam modulação, codificação de canal e potência de transmissão fixas mostram-se bastante adequados para ambientes cujos canais podem ser modelados pelo efeito do ruído aditivo gaussiano branco (AWGN - do termo em inglês Additive White Gaussian Noise). Assim, como a relação sinal-ruído (γ) na entrada do receptor não varia com o tempo, a adoção de uma potência fixa de transmissão

permite atingir um desempenho constante em termos de taxa de erro de bit (BER, do termo em inglês *bit error rate*).

Para atender os requisitos de desempenho nesses sistemas de comunicações, como, por exemplo, a máxima taxa de erro de bit, é comum realizar o dimensionamento dos sistemas que adotam técnicas de transmissão fixa com base nas condições de propagação severas ou no comportamento médio do canal, o que leva ao uso inadequado dos recursos de transmissão, conforme descrito em TORRANCE (1996a).

No entanto, o emprego de técnicas de transmissão fixa em canais com características de propagação variante no tempo não é o mais adequado. O motivo é o desperdício de recursos valiosos como a largura de banda e a potência de transmissão. Em excelentes condições de propagação, seria possível atingir as taxas de erro alvo usando códigos corretores de erros com taxa elevada (ou seja, pouca redundância), técnicas de modulação com elevada eficiência espectral (muitos pontos na constelação) ou até mesmo baixa potência de transmissão. Já em condições de propagação mais desfavoráveis, as técnicas de transmissão fixa resultam em perda de desempenho, pois baixos valores de BER requerem o uso de mecanismos mais conservadores de transmissão, como códigos corretores de taxas baixas, esquemas de modulação com baixa eficiência espectral ou elevada potência de transmissão.

A técnica de modulação adaptativa apresenta algumas limitações, como, por exemplo, a variação da taxa de transmissão (inconveniente para algumas aplicações) e, na maioria das vezes, a necessidade de um canal de retorno, empregado para transmitir a estimativa do canal avante, mas nem sempre disponível nas aplicações, como, por exemplo, em transmissões de áudio e vídeo com base no protocolo UDP. A despeito de tais restrições, os sistemas de comunicações que adotam transmissão adaptativa mostram-se mais interessantes do que aqueles que empregam transmissão fixa. Em sistemas nos quais a potência de transmissão é fixa e apenas a técnica de modulação varia, consegue-se o aumento da taxa de transmissão em bits por segundo (bps). Isso se dá através do ajuste conveniente dos parâmetros de camada física às condições instantâneas do canal.

Um exemplo do modelo genérico de modulação adaptativa é descrito na Figura 2.1.

Considere-se uma fonte de informação geradora de dígitos binários (bits) estatisticamente independentes e equiprováveis, bem como um par transmissor-receptor que compartilha um conjunto de N modos de transmissão, onde cada modo indica uma técnica de modulação, escolhida de acordo com as condições de propagação do canal avante, neste trabalho modelado pelo efeito de desvanecimento plano e variante no tempo.

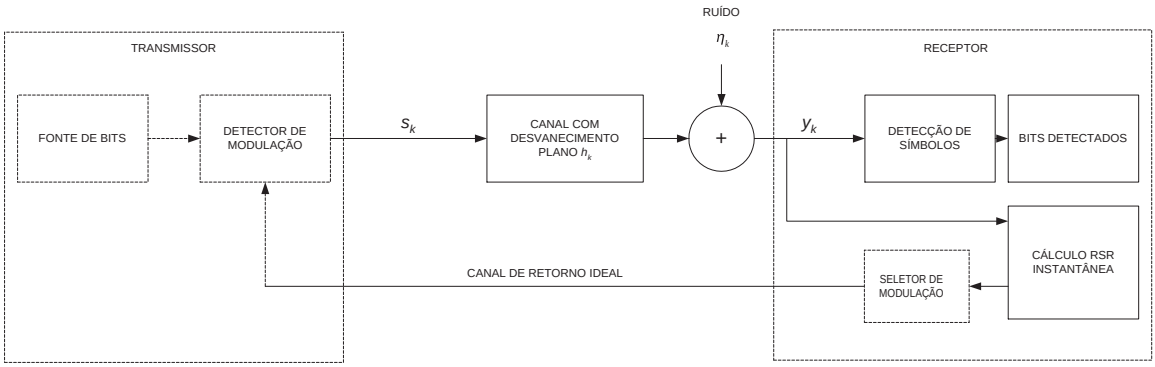

FIG. 2.1: Funcionamento geral da Técnica de Modulação Adaptativa.

Um parâmetro bastante considerado para realizar a estimativa das condições de propagação desse tipo de canal é a relação sinal-ruído instantânea [6] (γ) no receptor, por sua boa correlação com a quantidade de erros no bloco, apresentando forte associação tanto com o estado do canal de comunicação quanto com o próprio desempenho do sistema.

Assim, o modulador digital mapeia blocos de bits consecutivos em símbolos (s_k), disponíveis no alfabeto do esquema de transmissão, selecionando um modo de transmissão. A saída do canal avante é contaminada não só pela ação do ruído aditivo (η_k), mas pelos próprios distúrbios do canal com desvanecimento plano variante no tempo (h_k), gerando a sequência de entrada no receptor (y_k). A informação é transmitida em blocos de N_s símbolos.

No receptor, o sinal recebido é empregado para detectar a informação transmitida. De igual modo, realiza-se a estimação do comportamento do canal, permitindo a escolha da técnica de transmissão (N_i) a ser adotada no próximo bloco de dados, com o objetivo de maximizar a eficiência espectral média do sistema no enlace transmissor-receptor, desde que a taxa de erro experimentada pelo sistema seja menor que um limite predeterminado. Em seguida, um conjunto de bits indicando a estimativa de N_i é enviado, através do canal de retorno, ao transmissor.

Cabe mencionar que o impacto do erro no canal de retorno é avaliado em EKPENYONG (2006), indicando a existência de uma região de inviabilidade para provisão de qualidade de serviço segundo as técnicas de modulação adaptativa. Além disto, são propostos dois tipos de receptores para o canal de retorno: o primeiro é baseado no modelo de canal de Markov de estado finito, e o outro é um receptor Bayesiano. Ambos permitem uma melhora no desempenho do mecanismo de detecção da informação transmitida pelo canal

[6] Define-se *relação sinal-ruído instantânea* como o valor médio da relação sinal-ruído experimentada por um quadro ao longo da transmissão através do canal avante.

de retorno, com a redução da região de inviabilidade, porém introduzem uma redução na eficiência espectral, como mostrado em MACHADO (2009). Ainda assim, grande parte dos trabalhos trata o canal de retorno como ideal, ou seja, sem erro e sem atraso, baseados na hipótese de que tais erros podem ser desprezíveis com o emprego de códigos corretores de erro, tal qual mencionado em GALDINO (2008). Isso posto, por questão de limitação de escopo, nesta tese admite-se um canal de retorno ideal na topologia de referência, conforme mencionado no primeiro capítulo.

Diversas pesquisas foram realizadas nos últimos anos, voltadas para a análise de técnicas de modulação adaptativa. Em TORRANCE (1996c), por exemplo, são apresentadas as expressões de desempenho, em termos de probabilidade de erro e de eficiência espectral, para a técnica de modulação adaptativa (sem o emprego de técnicas de codificação e com potência de transmissão fixa) em canais com desvanecimento plano e canal de retorno ideal.

No referido trabalho, considera-se a existência de N modos de transmissão distintos. Os valores γ_i, $i \in \{1, ..., N\}$ representam os limiares de chaveamento entre os modos de transmissão - os denominados *limiares de modulação adaptativa*. Assim, um modo i, $i \in \{1, ..., N\}$, com k_i bits por símbolo, é escolhido quando a relação sinal-ruído instantânea γ é tal que $\gamma_i \leq \gamma < \gamma_{i+1}$. Assumindo que a relação sinal-ruído média igual a $\bar{\gamma}$ e $M_i = 2^{k_i}$, tem-se que a probabilidade de erro de bit média $BEP(\bar{\gamma})$ e a eficiência espectral $S(\bar{\gamma})$ do sistema de modulação adaptativa são calculadas pelas equações a seguir:

$$BEP(\bar{\gamma}) = \frac{1}{S(\bar{\gamma})} \sum_{i=1}^{N} k_i \int_{\gamma_i}^{\gamma_{i+1}} P_{M_i}(\gamma) f(\gamma, \bar{\gamma}) d\gamma \tag{2.1}$$

$$S(\bar{\gamma}) = \sum_{i=1}^{N} k_i \int_{\gamma_i}^{\gamma_{i+1}} f(\gamma, \bar{\gamma}) d\gamma. \tag{2.2}$$

em que $P_{M_i}(\gamma)$ é a probabilidade de erro de bit do modo de transmissão i em canal AWGN e $f(\gamma, \bar{\gamma})$ representa a função densidade de probabilidade da relação sinal-ruído γ de um canal com desvanecimento plano, cuja relação sinal-ruído média é $\bar{\gamma}$.

Na técnica de modulação adaptativa proposta, os limiares γ_i são igualmente estabelecidos no sentido de maximizar a eficiência espectral, desde que não se supere uma probabilidade de erro de bit máxima (BEP_{max}). Assim, trata-se de um problema de otimização não linear com restrições, conforme descrito a seguir:

$$\max_{\gamma_i} \; S(\bar{\gamma}), \quad sujeito\ a\ BEP(\bar{\gamma}) \leq BEP_{max} \tag{2.3}$$

Uma solução para esse problema de otimização foi apresentada em TORRANCE (1996b), a partir da utilização do método de otimização por direções conjugadas empregando o algoritmo de Powell - descrito, por exemplo, em IZMAILOV (2007) - para minimizar uma função (a denominada *função custo*) para transmissões contínuas de voz e de dados em um canal com desvanecimento Rayleigh. Essa função custo é definida pela diferença entre o desempenho desejado e o apresentado a partir da escolha de um conjunto γ_i, no qual o desempenho é avaliado com o emprego das equações (2.1) e (2.2). Em ambos os casos, verifica-se que a técnica de modulação adaptativa é capaz de atender às restrições de BEP_{max} para toda a faixa de relação sinal ruído; contudo, não são analisados os efeitos de uma memória de tamanho finito na camada de enlace, nem tampouco de modelos de tráfego com transmissões em rajadas.

Outros autores, como CONTI (2005), propõem a obtenção dos limiares de chaveamento de modos de transmissão de forma direta, a partir da adoção de limitantes inversíveis das curvas de desempenho dos esquemas de modulação M-QAM em canais com desvanecimento Rayleigh. O autor investiga, ainda, o desempenho dos sistemas desenvolvidos pela técnica de modulação adaptativa com estas aproximações e as faixas de γ que permitem a provisão da qualidade de serviço requerida pelas aplicações - a denominada *região de viabilidade*.

Contudo, trabalhos na literatura como ALOUINI (2000) mostram que a adaptação conjunta de potência e taxa de transmissão promove um ligeiro ganho em relação a uma abordagem que varie somente a taxa de transmissão, a despeito do inerente aumento de complexidade na implementação. Assim, neste trabalho de tese, emprega-se a técnica de modulação adaptativa no projeto de cooperação entre camadas, como um caso particular da transmissão adaptativa em que apenas parâmetros da modulação variam ao longo do tempo.

2.2 OTIMIZAÇÃO COM COOPERAÇÃO ENTRE CAMADAS

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 multi-percurso e efeitos de sombreamento que podem caracterizar os diversos enlaces de comunicação.

Com isso, recentemente, numerosos esforços de pesquisa de todo o mundo têm usado soluções *cross-layer* para melhorar o desempenho de sistemas de comunicação sem fio, a partir de novos projetos de arquiteturas e pilhas de protocolo em áreas de aplicação selecionadas, desde o processo de funcionamento do TCP através de redes sem fio para tópicos mais avançados como a maximização da quantidade de usuários por área de serviço e a adaptação de estratégias de modulação e codificação para transmissão de conteúdos multimídia, em resposta ao estado do canal sem fio. As vantagens advindas dessa estratégia são ainda mais importantes em aplicações militares, as quais necessitam irradiar os sinais empregando baixos valores e de potência de transmissão e são reconhecidamente sujeitas aos efeitos de interferências oriundas de tropas inimigas.

Segundo FOUKALAS (2008), mecanismos de cooperação entre camadas têm sido utilizados para resolução de diferentes problemas, como o desenvolvimento de protocolos e tecnologias de segurança, a provisão de qualidade de serviço, o suporte à mobilidade de terminais sem fio entre áreas com diferentes pontos de acesso e a adaptação do comportamento de protocolos de camadas superiores ao estado do canal de comunicações sem fio. Para resolver esses problemas, os mecanismos desenvolvidos tentam atingir objetivos igualmente diferentes em sistemas de comunicações sem fio, como a melhoria do desempenho dos protocolos da camada de transporte, o aumento da quantidade de usuários atendidos, a maximização da vazão do sistema ou a adaptação da camada de aplicação ao estado do sistema para reduzir a degradação do serviço.

Além disso, não só os problemas e os objetivos são diversificados, como também não existe um padrão para o gerenciamento das interações entre as camadas. De maneira geral, segundo FOUKALAS (2008), as propostas utilizam um dos seguintes tipos de mecanismos para sua implementação:

- Gerente de coordenação - de acordo com esta proposta, é criada uma entidade central, em um terminal da rede, que recebe as notificações dos eventos das diversas camadas nos demais equipamentos e, de acordo com o estado de todo o sistema (identificado a partir dos estados particulares de cada protocolo), decide a ação a ser tomada. Como desvantagem, este mecanismo gera uma sobrecarga de mensagens

de controle contendo as informações encaminhadas entre a entidade central e os demais terminais da rede.

- Escalonador - tais propostas utilizam uma função que se vale do estado de diversas camadas (por exemplo, física, enlace e aplicação) para implementar um mecanismo de ordenação de transmissões rádio, dando prioridade a usuários de acordo com valores como a qualidade do canal, o número médio de pacotes na fila ou o atraso médio do tráfego gerado pela camada de aplicação. Como desvantagem, este mecanismo gera uma sobrecarga de mensagens de sinalização, em função do tamanho e da topologia da rede.

- Otimizador - o estado das diversas camadas de rede são encaminhadas a um algoritmo de otimização, o qual, de forma conjunta, identifica os parâmetros mais adequados de configuração e redistribui os valores obtidos para os protocolos correspondentes dentro da arquitetura da rede. O otimizador implementa um algoritmo ajustado à resolução de um problema específico de cooperação entre camadas. Dessa forma, diversos protocolos podem ser criados, de acordo com o objetivo do sistema.

  O processo de coleta e disseminação de configurações pode ser implementado em cada protocolo (a partir de uma camada de abstração responsável por identificar o comportamento de cada camada e implementar as configurações de otimizador), em cada terminal (com uma camada de abstração que, desta feita, reúne as informações de múltiplas camadas) ou mesmo em um terminal externo (por exemplo, em uma estação base, dotada de uma maior capacidade de processamento, e que notifica os usuários da rede a respeito das configurações a serem adotadas).

Atualmente, é amplamente reconhecido o potencial do emprego de cooperação entre camadas como uma estratégia de otimização de desempenho nas modernas redes sem fio. Além disso, a capacidade de suporte a padrões de interação *cross-layer* em toda a pilha de protocolos é considerada uma importante propriedade de sistemas de comunicações móveis. Isso se dá porque o projeto de cooperação entre camadas permite a comunicação entre as camadas não adjacentes através de entidades adicionais introduzidas na arquitetura do sistema.

Percebe-se que a padronização de mecanismos e interfaces de cooperação entre camadas e a identificação de mecanismos comuns para comparação de projetos de cooperação entre camadas permanecem como pontos em aberto para pesquisa. No entanto,

já é possível identificar que os parâmetros mais utilizados nas propostas de otimização em camadas cruzadas pertencem às camadas física (relação sinal-ruído, relação sinal-ruído-interferência, estratégias de modulação e codificação adaptadas ao comportamento do canal, eficiência espectral, potência de transmissão), enlace (atraso de transmissão, tamanho da fila, número de retransmissões, tamanho do pacote, mecanismos de correção e detecção de erros, *round-trip time*) e de aplicação (taxa máxima de perda de pacotes, codificação da fonte de vídeo, taxa máxima de transmissão).

Assim, por questão de limitação de escopo, nesta tese estuda-se uma proposta de otimização em camadas cruzadas cujo objetivo é maximizar a eficiência espectral média em um sistema de comunicações ponto-a-ponto em um canal sujeito a desvanecimento plano, sem emprego de técnicas de retransmissão. Em nossa proposta, o otimizador é implementado em cada terminal de comunicações que se liga à estação central, e a solução proposta indica o conjunto de estratégias de modulação adequadas ao comportamento do sistema, que é descrito por parâmetros das camadas física, enlace e de aplicação. A escolha de tal cenário se justifica pela semelhança com sistemas táticos de comunicações utilizados pelo Exército Brasileiro, como os SISTAC de Brigada e de Divisão de Exército, bem como os Módulos de Telemática.

Com base em tal escopo, vale destacar que diversos trabalhos não utilizam as equações 2.1 e 2.2 para avaliação de desempenho do sistema. Em lugar da taxa de erro de bits (BER), emprega-se a probabilidade de erro de pacotes na camada física (PER, do inglês *packet error rate*), o que também é feito neste trabalho de tese. Aqui, assume-se que ocorre um erro de transmissão de pacotes quando, pelo menos, 1 dos N_b bits do pacote está corrompido, provocando assim seu descarte.

Assim, a probabilidade de perda de pacotes, dada uma relação sinal ruído média $\bar{\gamma}$, pode ser definida como:

$$PER(\bar{\gamma}) = \sum_{j=1}^{N_b} \binom{N_b}{j} BER(\bar{\gamma})^j (1 - BER(\bar{\gamma}))^{(N_b - j)} \tag{2.4}$$

Isso posto, o problema de maximização da eficiência espectral sujeito a uma probabilidade de erro de pacotes máxima (PER_{max}), é redefinido como:

$$\max_{\gamma_i} \; S(\bar{\gamma}), \quad sujeito\ a\ PER(\bar{\gamma}) \leq PER_{max} \tag{2.5}$$

2.3 OTIMIZAÇÃO COM COOPERAÇÃO ENTRE CAMADAS - TRABALHOS RELACIONADOS

Os autores de RAMIS (2009) apresentam uma estratégia de cooperação entre as camadas física (emprego de modulação e codificação adaptativas) e de enlace (mecanismo de controle de erros com retransmissões automáticas) com o objetivo de maximizar a vazão em um sistema de comunicações sem fio ponto-a-ponto no qual o transmissor é dotado de uma memória de tamanho finito. Assim, formula-se um problema de otimização com restrições, o qual busca analisar o efeito das estratégias adotadas nas camadas física e de enlace no desempenho do sistema, atendendo a restrições descritas por métricas como o número de pacotes perdidos (tanto em função de *overflow* na fila como por exceder um limite de tentativas de retransmissão) e o atraso médio de transmissão de pacotes. No entanto, os limiares adotados para os modos disponíveis de transmissão adaptativa são impostos para atender a uma taxa de erro de pacotes calculada estritamente em função de erros de transmissão na camada física, sem levar em conta os demais requisitos de qualidade de serviço; além disto, o modelo de tráfego utilizado não contempla a possibilidade de chegada de rajadas de pacotes à fila do transmissor, pois é descrito por um processo de Poisson.

A mesma limitação no cálculo dos limiares de transmissão adaptativa - o cálculo estritamente em função de erros de camada física - ocorre na proposta apresentada em ZHENG (2010), na qual os autores promovem uma estratégia de cooperação entre as camadas física (mecanismos de modulação e codificação adaptativas) e de enlace (transceptores dotados de uma memória de tamanho finito) para maximizar a vazão média em um sistema de comunicações sem fio ponto-a-ponto com mecanismos de retransmissão. Para estudo do referido cenário, os autores propõem um modelo de uma cadeia de Markov de estados finitos, para análise do atraso médio, vazão e taxa de perda de pacotes no sistema, bem como a identificação da configuração ótima, i.e., a escolha dos limiares de transmissão adaptativa para maximização da vazão do sistema. O modelo de tráfego utilizado também é descrito por um processo de Poisson.

Já em VASSILARAS (2010), o objetivo proposto é identificar o vetor de limiares de transmissão (modulação e codificação) adaptativa que minimize uma taxa global de perda de pacotes. No referido trabalho, essa taxa global é composta dos erros de transmissão (camada física), do atraso na transmissão de pacotes em um sistema de comunicações ponto-a-ponto com uma fila de tamanho infinito e um modelo de tráfego caracterizado

por um processo de chegada markoviano. A partir de uma aproximação para o cálculo do atraso médio de pacotes no sistema, o modelo desenvolvido permite capturar a correlação temporal entre os processos de chegada de pacotes e de atendimento no canal avante com desvanecimento plano. Assim, é construído um problema de otimização com base em um processo de decisão markoviano para a política proposta, que termina por oferecer uma redução na taxa global de perda de pacotes e um aumento na taxa de chegada de pacotes oriundos da camada de aplicação. Contudo, não há uma expressão exata para o descarte de pacotes; além disto, o modelo de tráfego utilizado não contempla a possibilidade de chegada de rajadas de pacotes à fila do transmissor.

Os autores de HARSINI (2009) apresentam um modelo analítico para estudo de um sistema de comunicações sem fio ponto-a-ponto dotado de recursos de retransmissão através de um canal avante sujeito a desvanecimento plano. A partir de uma estratégia de cooperação entre as camadas física (controle da potência de transmissão e adaptação das estratégias de modulação e codificação) e enlace (atraso de transmissão), elabora-se um problema de otimização cujo objetivo é identificar o vetor ótimo de limiares para minimizar o atraso médio de transmissão de pacotes no referido sistema, sujeito a uma taxa de erro de transmissão estritamente de camada física. A despeito dos ganhos apresentados, não só atendendo aos requisitos de atraso, mas também com um aumento da vazão média do sistema, percebe-se que o vetor de limiares é calculado a partir do estabelecimento prévio de uma taxa alvo de erros de camada física, sem levar em conta o efeito do descarte de pacotes ou mesmo o próprio atraso na camada de enlace.

A proposta anterior é estendida pelos autores de SHADMAND em um ambiente de compartilhamento espectral, no qual usuários primários e secundários coexistem, desde que o limite de interferência sobre o usuário primário não ultrapasse um limite prescrito anteriormente. Assim, a estratégia de cooperação envolve as camadas física (controle da potência de transmissão e adaptação das estratégias de modulação e codificação) e de enlace (atraso de transmissão). Dessa forma, os limiares de transmissão adaptativa são escolhidos a partir de valores calculados para a razão entre as potências de transmissão dos usuários primário e secundário, com o objetivo de respeitar os limites de taxa de erro de transmissão e o nível médio de interferência gerado pelo usuário secundário. Além disto, o modelo de tráfego utilizado também é descrito por um processo de Poisson.

O trabalho de DUONG (2010) emprega a cooperação entre as camadas física, enlace e de aplicação para analisar o comportamento de diferentes classes de tráfego em em um sistema de comunicações sem fio ponto-a-ponto sob efeito de desvanecimento plano. O

modelo analítico proposto agrega características como estratégias de modulação e codificação adaptativas, efeitos de descarte em memórias de tamanho finito e modelos de tráfego empregando um processo de Poisson modulado por uma cadeia de Markov em tempo discreto (d-MMPP) para identificar as taxas de descarte e de erro de pacotes, a eficiência espectral média e o atraso médio de transmissão para duas classes de tráfego (alta e baixa prioridade). No entanto, os autores não sugerem um equacionamento do problema de otimização em camadas cruzadas para garantia dos requisitos de qualidade de serviço, mas apenas indicam uma estratégia de cálculo dos limiares de transmissão adaptativa estritamente em função de erros de camada física. Além disto, o modelo de tráfego sugerido não permite a identificação de chegada de tráfego em rajada no sistema.

O trabalho de KARMOKAR (2009) utiliza uma estratégia de cooperação entre as camadas física, enlace e de aplicação para o estudo de um sistema de comunicações ponto-a-ponto, descrito por um único transmissor e um receptor dotado de múltiplas antenas, empregando técnicas de diversidade na seleção do sinal. O objetivo é projetar um escalonador *cross-layer* que determine a estratégia de modulação escolhida e, em consequência, a quantidade de pacotes a ser transmitida a cada quadro, de forma a minimizar a potência média de transmissão, desde que respeitadas as restrições impostas pela camada de aplicação para o descarte e o atraso de pacotes.

Com isso, o modelo analítico desenvolvido permite concluir que a política proposta permite não só economia de energia, mas também um aumento da vazão do sistema a partir da redução das perdas na camada de enlace. No entanto, os limiares de modulação adaptativa são calculados apenas para restrições da camada de enlace, sem considerar os erros de transmissão através do canal avante e o modelo de tráfego utilizado não contempla a possibilidade de chegada de rajadas de pacotes à fila do transmissor.

Em HOANG (2008), os autores descrevem duas estratégias de cooperação entre camadas para maximizar a vazão do sistema em um sistema com um único transmissor em um canal sem fio variante no tempo, sujeito a um processo de chegada de pacotes segundo uma distribuição de Poisson. Em ambas as estratégias, o problema é descrito como um processo markoviano de decisão (MDP, do inglês *Markov decision process*), cujo objetivo é determinar o par potência-taxa de transmissão que permite a minimização de uma função custo englobando a potência de transmissão e as taxas de descarte e de erro de pacotes. Os resultados são obtidos estritamente a partir do modelo analítico proposto. A primeira estratégia emprega uma taxa fixa de erro de pacotes; na segunda, permite-se um balanceamento entre os efeitos dos erros de camada física e de enlace na configuração

do sistema, sem garantias de maximização da vazão. Além disso, 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 (2005) apresentam um projeto de cooperação entre camadas 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 as taxas de erro de pacotes na camada física (conforme a equação 2.4) e de descarte na camada de enlace, o tamanho da fila no transmissor, a taxa de chegada de pacotes (somente segundo um processo de Poisson) 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 fila do transmissor (erro na camada de enlace de dados).

O objetivo da proposta é atender valores alvo de taxa média de perda de pacotes (limitante superior) e de vazão média do sistema (limitante inferior). Em primeiro lugar, essas 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 troca das estratégias de modulação e codificação que serão empregadas. Em seguida, escolhe-se a taxa de erro de camada física que permite a obtenção da menor taxa de perda de pacotes, determinando-se assim a vazão obtida.

A mesma sequência de cálculos apresentada em LIU (2005) é utilizada pelos autores de ISHIZAKI (2007) para um sistema que combina mecanismos de retransmissão (*automatic repeat request* - ARQ) e de transmissão adaptativa na otimização de seu desempenho. 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. Resultados numéricos e simulações são apresentados para dois processos de entrada, Poisson e On-Off com distribuição exponencial dos estados.

O trabalho em GHAVAMI (2007) descreve uma análise da influência conjunta das perdas de camada física e de enlace na eficiência espectral média observada em um sistema de comunicações sem fio ponto-a-ponto, dotado de capacidade de transmissão adaptativa e com canal de retorno modelado de forma ideal. Os parâmetros do canal e do sistema são descritos a partir de cadeias de Markov de estados finitos. Não há mecanismos de retransmissão e o tráfego de entrada atende ao modelo de Poisson.

Adicionalmente, o modelo emprega 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. Contudo, apesar da proposta de análise conjunta dos efeitos das camadas física e de enlace, os limiares desejados (não só os de transmissão adaptativa, mas também os de ocupação da fila) são calculados somente em função de uma taxa alvo de erros de camada física.

Em HARSINI (2007) e ZHOU (2008), os autores analisam o efeito do descarte de pacotes em sistemas *multiple-input multiple-output* (MIMO) com codificação *space-time block coding* (STBC) e que empregam técnicas de modulação adaptativa para aplicações com restrições de atraso. Em ambas as propostas, são calculados vetores de limiares de modulação adaptativa para atender a uma probabilidade alvo de erro de camada física. A partir dos valores obtidos, é escolhido o vetor que minimiza a taxa global de perda de pacotes, englobando-se o descarte de pacotes na camada de enlace e a probabilidade de violação de atraso. Tal avaliação é conduzida tanto para cenários mono como multiusuário, com diferentes quantidades de antenas transmissora e receptora e valores de relação sinal-ruído média. O tráfego de entrada é modelado por um processo de Poisson. Em HARSINI (2007), são apresentados os resultados somente de análises numéricas; já os autores em ZHOU (2008) também descrevem os resultados de simulações.

Propostas com métricas integradas são descritas em alguns trabalhos na literatura; entretanto, não são utilizados mecanismos de transmissão adaptativa para otimização do desempenho nos sistemas considerados. Por exemplo, em KHAN (2006), os autores apresentam uma cooperação entre as camadas de enlace e de aplicação, elaborando um problema de otimização para maximizar o valor de pico da relação sinal-ruído experimentada pela fonte de vídeo em um canal descrito segundo o modelo de Gilbert-Elliot; utiliza-se como restrição no desempenho do sistema uma função custo dependente da capacidade de reconstrução de vídeo, calculada a partir da taxa de perda de pacotes. Com isso, a quantidade de quadros transmitidos, bem como as taxas de transmissão e de distorção de fluxos de vídeo são calculados a partir de experimentos numéricos.

Já em CHENG (2007), os autores estudam o controle de acesso ao meio diferenciado por classes de tráfego em uma rede local sem fio IEEE 802.11. O objetivo proposto é identificar as taxas ótimas de atendimento e a quantidade máxima admissível de fontes de

tráfego de voz para o sistema. Assim, é descrita uma abordagem analítica para determinar tal quantidade máxima de fluxos de voz no sistema, com restrições de qualidade de serviço. Dessa forma, os parâmetros de configuração no projeto pertencem às camadas de aplicação (taxas de entrada) e enlace (tamanhos das janelas de contenção no modo de acesso DCF (*distributed coordination function*) e o número de usuários); com isto, são determinadas as taxas médias de serviço e as probabilidades de colisão. São considerados modelos *on/off* para o tráfego de entrada.

Em HAI-BO (2008), o sistema estudado consiste em um transmissor OFDM, dotado de uma memória de tamanho finito na camada de enlace, para o qual a largura de banda alocada é variável. O objetivo do trabalho é identificar os valores ótimos para a largura de banda a ser alocada e o vetor de limiares de modulação adaptativa, sujeito a restrições de desempenho (taxa de erro de transmissão, atraso médio e taxa média de transmissão). Uma formulação analítica é desenvolvida, descrevendo a melhor combinação de parâmetros de camada física (largura de banda), enlace (tamanho da fila) e aplicação (taxa de entrada de pacotes), que atenda aos requisitos impostos em um sistema com múltiplos usuários. São considerados modelos *on/off* idênticos para o tráfego de entrada de todos os usuários; mais uma vez, o vetor de limiares de modulação adaptativa é calculado tão somente para atender a uma restrição estritamente de camada física (taxa de erro de transmissão).

Assim, boa parte dos trabalhos identificados na literatura apresentam projetos de cooperação entre camadas que, na prática, não alteram a estrutura atual de independência das camadas. Por exemplo, os parâmetros de transmissão adaptativa em ISHIZAKI (2007), GHAVAMI (2007), LIU (2005), ZHOU (2008) e HARSINI (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. Com isso, diversos parâmetros do sistema, como o atraso médio de pacotes, a probabilidade de descarte, a taxa global de perda de pacotes e a vazão são calculados de forma indireta; além disto, não são apresentadas avaliações para modelos mais realistas de tráfego.

A proposta deste trabalho de tese é utilizar uma nova abordagem no problema de otimização do desempenho da aplicação, integrando os efeitos das camadas física, de enlace e aplicação, a partir da alteração das estratégias de modulação adaptativa com base na taxa de entrada da aplicação, controle da fila na camada de enlace e modulação adaptativa em um canal com desvanecimento plano. Em lugar da determinação de limiares

de modulação adaptativa otimizados para uma taxa máxima de erro na camada física, propõe-se uma abordagem realmente em camadas cruzadas, a partir da determinação de limiares adequados para maximizar a eficiência espectral sujeito a uma taxa de erros global, calculada a partir dos erros de camada física, enlace e aplicação, utilizando a obtenção direta de limiares para uma métrica integrada, em lugar de uma abordagem camada a camada.

2.4 RESUMO

Neste capítulo, foi mostrada uma classificação das estratégias de cooperação entre camadas e foram apresentados importantes modelos propostos na literatura para sistemas de comunicações ponto-a-ponto. Pode se constatar que as estratégias de cooperação entre camadas propostas na literatura apresentam uma abordagem que não altera a estrutura de independência das camadas. Por exemplo, os parâmetros de transmissão adaptativa em ISHIZAKI (2007), GHAVAMI (2007), LIU (2005), ZHOU (2008) e HARSINI (2007) são avaliados para se obter uma taxa de erro mínima para a camada física, sem levar em conta a ocupação do *buffer* na camada de enlace.

Além disto, tais trabalhos empregam tão somente 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 outros modelos de tráfego, mais realistas e que podem promover alterações no desempenho global do sistema.

No próximo capítulo, é apresentado um novo modelo analítico em Teoria das Filas - a fila $MM(\sum_1^K)CPP/D^Y/1/B$, o modelo de fila com Entradas Generalizadas e Serviços Determinísticos (EGSD), como o objetivo de permitir o estudo de modelos de tráfego multimídia em redes sem fio adaptativas. O modelo EGSD contempla a cooperação entre camadas, com a agregação dos efeitos de rajadas e da correlação temporal nos processos de entrada (camadas de aplicação e enlace) e de atendimento de pacotes (camada física) em seu equacionamento.

3 NOVA PROPOSTA EM TEORIA DE PROJETO DE FILAS: O MODELO COM ENTRADAS GENERALIZADAS E SERVIÇO DETERMINÍSTICO

3.1 INTRODUÇÃO

O estudo de processos de chegada e atendimento em lotes ocupa um lugar especial em Teoria das Filas, dada a variedade de suas aplicações, seja em logística em LEE (2008), transportes em BAYKAL-GURSOY (2006), telecomunicações ou mesmo outros sistemas caracterizados por processos estocásticos, segundo CHANG (2006). O cenário militar de referência identificado na introdução deste trabalho é mais um exemplo desses sistemas, dadas as características do tráfego de entrada e do processo de saída:

- Processo de entrada com taxa variante no tempo, com rajadas - em função dos tipos de aplicações existentes em um SISTAC (voz, dados, multimídia) em ADAS (1997);
- Processo determinístico de saída, em virtude da escolha de intervalos de tempo fixos para transmissão de pacotes através do canal avante; e
- Atendimento da fila com a capacidade de transmissão de múltiplos pacotes de uma só vez - a denominada disciplina de atendimento em lotes de pacotes ou simplesmente processo em lotes. Dessa forma, a quantidade de pacotes transmitida em cada quadro depende do estado do canal de comunicação indicado pelo seletor de modulação adaptativa. Cabe destacar que a variação do estado do canal não ocorre de forma independente e identicamente distribuída em cada instante de atendimento, mas correlacionada ao longo do tempo, em função não só da densidade espectral de potência que modela o ganho do canal, mas também da ocupação da fila e do comportamento da aplicação do usuário.

As propostas existentes, não só para filas com processos em lotes, mas em Teoria das Filas de uma maneira geral, podem ser reunidas em dois grandes tipos. O primeiro tipo, empregado na maior parte dos estudos, apresenta uma descrição do comportamento do sistema sob estudo. Assim, dados os valores de alguns parâmetros, como os tipos de processo de entrada e saída de consumidores, além da quantidade e do padrão de atendimento de pacotes pelo(s) servidor(es), são calculadas diversas métricas de desempenho do

sistema como a distribuição de ocupação da fila, a carga do sistema e a taxa de ocupação do servidor. Esse tipo de modelo, que tão somente descreve o comportamento do sistema, é classificado por GROSS (1998) como Modelo Descritivo de Filas.

Em outras situações, entretanto, os modelos de filas desenvolvidos são utilizados não para descrever um comportamento de um sistema, mas para indicar a configuração mais adequada para os processos de entrada e saída, além da disciplina de atendimento da fila - por exemplo, para o estudo de problemas de alocação de recursos. Esses são os denominados Modelos Normativos de Filas, nos quais as configurações são alteradas para obter um desempenho ótimo do sistema, de acordo com funções custo ou utilidade pré-estabelecidas - em telecomunicações, por exemplo, a maximização da eficiência espectral ou a minimização da taxa de perda de pacotes. Segundo TADJ (2005), esses modelos constituem exemplos da Teoria de Projeto de Filas (do inglês *Queueing Design Theory*).

A próxima seção deste capítulo descreve um estudo de caso que ilustra a necessidade do emprego de modelos de tráfego mais completos para a determinação de limiares apropriados de adaptação entre as estratégias de modulação disponíveis em sistemas adaptativos de comunicações. Em seguida, são identificados alguns trabalhos relacionados a filas com processos em lotes e com disciplinas de serviço variantes no tempo, as denominadas filas moduladas por processos markovianos (do inglês *Markov-Modulated queues* em MITRANI (2005)). Posteriormente, é proposto neste capítulo o modelo de filas com entrada generalizada e serviço determinístico (fila EGSD) como uma nova alternativa para análise de desempenho de sistemas multimídia em redes sem fio que empregam modulação adaptativa em canais com desvanecimento plano. A seção seguinte apresenta uma análise do comportamento estacionário da distribuição de ocupação da fila em diversos instantes de tempo; em seguida, são descritas as equações para diversas métricas de desempenho de interesse. Por fim, mostra-se um estudo de caso numérico para ilustrar a eficácia do método proposto.

3.2 MOTIVAÇÃO

O estudo de caso desta seção mostra a importância da caracterização mais completa dos modelos de tráfego empregados, com a identificação de estatísticas de ordem superior, para a determinação de limiares apropriados de adaptação entre as estratégias de modulação disponíveis para os equipamentos de rede. O objetivo é avaliar o impacto de diferentes tipos de tráfego no desempenho em sistemas desenvolvidos sob a estratégia de

cooperação entre camadas.

No cenário considerado, o transmissor dispõe de seis modos de transmissão - não-transmite, BPSK, QPSK, 8-QAM, 16-QAM e 32-QAM. Adota-se o vetor de limiares $\Gamma = [7,4062; 9,2711; 15,2856; 16,6486; 20,8606]$ dB, dado que ele permite 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 (2005).

3.2.1 TRÁFEGO DE ENTRADA

Como forma de permitir a análise e a comparação de desempenho, todos os processos de entrada escolhidos foram implementados com taxa média de entrada de 2 pacotes por intervalo de tempo entre as transmissões de quadros. Os processos avaliados foram:

- Poisson.
- 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 uma composição 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 3.1:

	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

TAB. 3.1: Parâmetros para o agregado de vídeo, conforme BAUGH (2001)

- Fonte de tráfego HTTP com pacotes de 1080 bits, representados por um modelo *On/Off* conforme apresentado em ASHOUR (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.

3.2.2 RESULTADOS

Foram realizadas simulações com os modelos de tráfego de entrada descritos em 3.2.1, com duração de 300 segundos e gerando cerca de 200000 eventos. O tempo para trans-

missão de quadros foi de 2 ms para todos os tipos de tráfego, exceto para o tráfego de voz, no qual $T_f = 200$ ms.

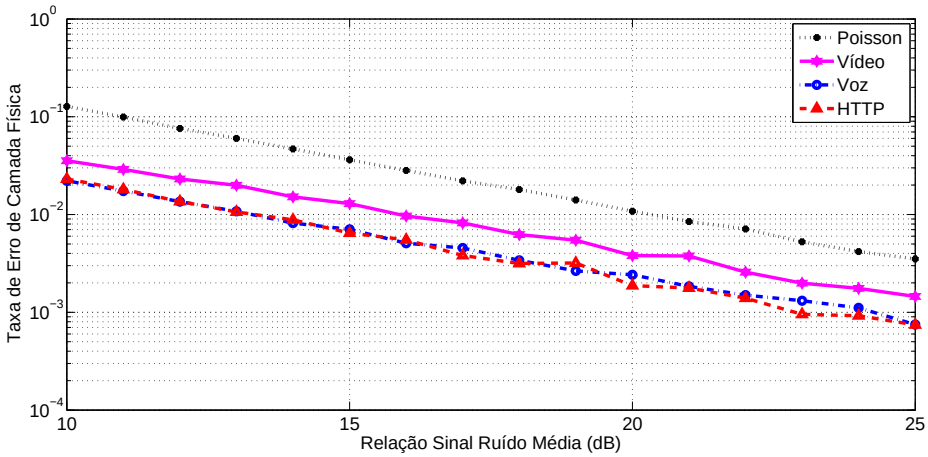

FIG. 3.1: Taxa de Erro de Pacotes na Camada Física - Fila com tamanho B = 10 pacotes.

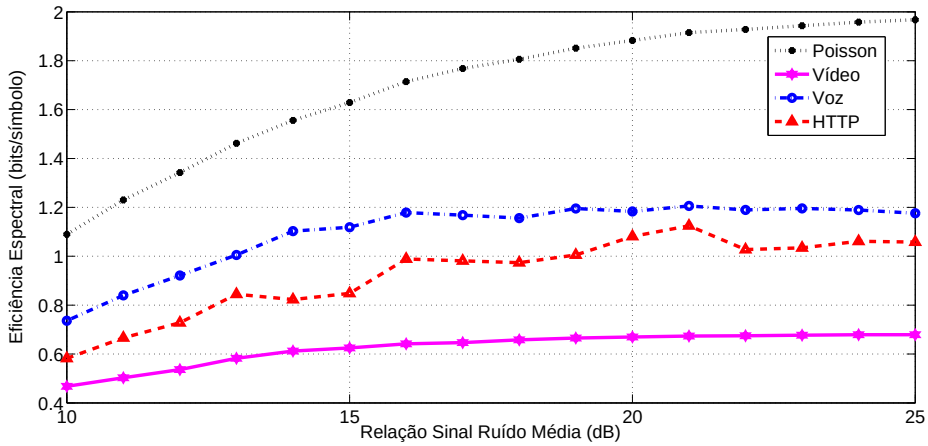

FIG. 3.2: Eficiência Espectral - Fila com tamanho B = 10 pacotes.

A partir da análise das figuras 3.1 e 3.2, 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 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, indicando que o desempenho de sistemas de comunicações em ambientes com modulação adaptativa não depende apenas dos limiares adotados, mas também do modelo utilizado

na camada de aplicação.

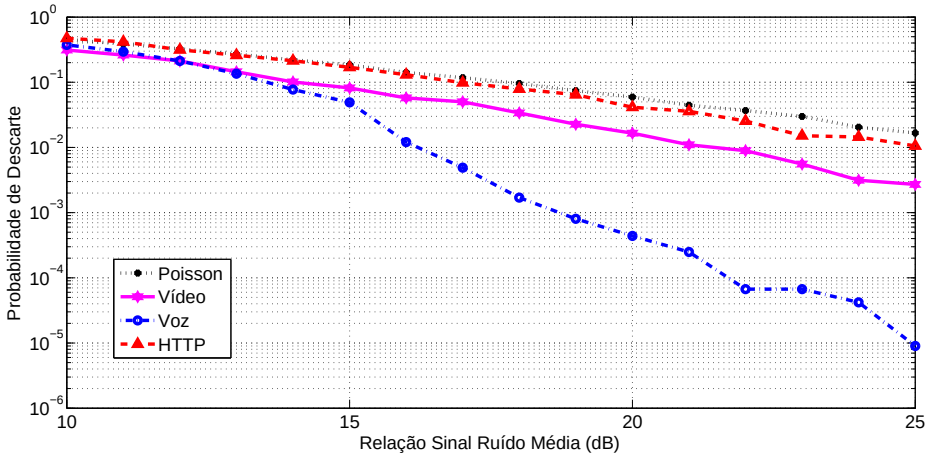

FIG. 3.3: Probabilidade de Descarte de Pacotes - Fila com tamanho B = 10 pacotes.

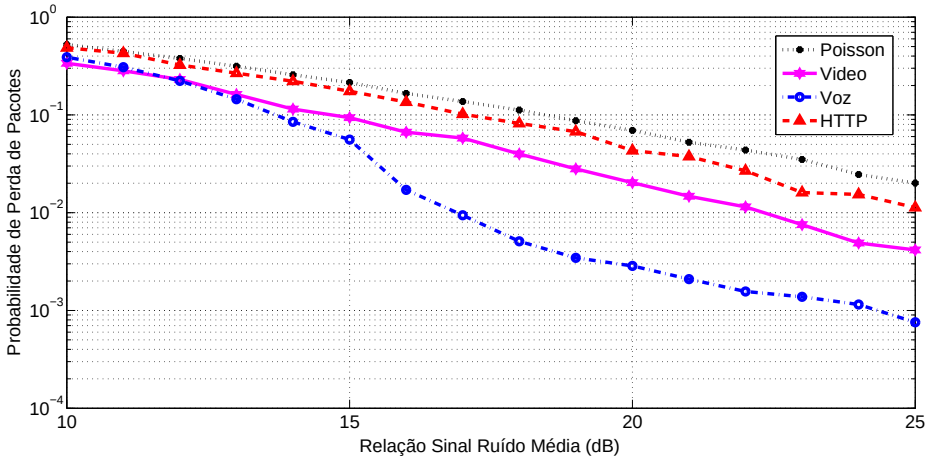

FIG. 3.4: Taxa Global de Perda de Pacotes - Fila com tamanho B = 10 pacotes.

Por fim, a Figura 3.4 mostra o efeito conjunto das perdas em função de erros na camada física, descritos na Figura 3.1, e de descartes na fila, conforme mostrado na Figura 3.3. 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 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.

3.3 TRABALHOS RELACIONADOS

Uma categoria de interesse em teoria das filas, principalmente em virtude de suas aplicações em telecomunicações e redes de computadores, é o estudo de processos em rajadas para sistemas de tempo discreto. Ferng e Chang em FERNG (2000) e FERNG (2001) apresentam uma abordagem analítica descrevendo matrizes de probabilidade de transição de estados, utilizando processos markovianos de chegada em lotes (BMAP, do termo em inglês *Batch Markovian Arrival Process*) e processos genéricos de saída. Com isso, identifica-se o impacto do processo de saída, da carga de entrada e da capacidade do sistema nas estatísticas de atendimento da fila, como média, variância e momentos de ordem superior.

Em GUPTA (2002), é apresentado um modelo analítico para avaliação de desempenho de uma fila com serviço em lotes. As métricas de desempenho consideradas são o atraso médio, a distribuição da ocupação e a probabilidade de descarte, tanto para os instantes de chegada de pacotes como para os instantes posteriores ao serviço da fila. O processo de entrada é descrito por intervalos de tempo entre chegadas independentes e geometricamente distribuídos. Já o processo de saída de pacotes não varia em função do estado do canal de comunicação, mas em resposta à ocupação da fila pelo tráfego de entrada.

O trabalho apresentado em PARK (2002) descreve o comportamento de uma fila finita com tempo de serviço determinístico e processo de entrada em rajadas; o tráfego de entrada é descrito por um processo de Bernoulli modulado por uma cadeia de Markov em tempo discreto (MMBBP). O objetivo dos autores é investigar mecanismos dinâmicos de alocação de largura de banda para um tráfego IP. O desempenho do sistema é avaliado em função dos períodos de transmissão e a taxa efetiva no tráfego de entrada, o tamanho da fila e o intervalo de tempo entre atendimentos. No entanto, o comportamento do servidor varia em resposta ao número de pacotes na fila.

Assim, as modificações de largura de banda ocorrem somente quando limiares de ocupação são superados. Um modelo semelhante de fila foi adotado pelo autor de WANG (2004) para estudo da taxa de erro de transmissão para sistemas multimídia em canais com desvanecimento de Rayleigh. No entanto, não são apresentadas métricas adicionais de desempenho e emprega-se somente a modulação BPSK, com variação da taxa de

símbolos a cada serviço de acordo com o comportamento do canal de transmissão.

O efeito da variação na taxa de serviço em filas tem sido igualmente alvo de estudos, também em função de sua adequação a diversos cenários de interesse, como a vazão de pacotes em redes sem fio adaptativas. Em BAYKAL-GURSOY (2006), os autores analisam a interrupção no fluxo de veículos em vias urbanas e rurais empregando processos de Poisson para a entrada de veículos e processos markovianos de serviço (MSP, do inglês Markovian Service Process) variantes no tempo, para descrever eventos como incidentes de trânsito e retomadas do fluxo normal. Os autores apresentam uma contribuição importante ao identificar critérios de estabilidade e de distribuição de ocupação de fila em diversos cenários de serviço, até mesmo com distribuições genéricas de tempo de serviço; contudo, os modelos se aplicam somente a filas de tamanho infinito e os intervalos de tempo entre atendimentos são caracterizados por variáveis aleatórias independente e identicamente distribuídas (i.i.d).

Em MAHABHASHYAM (2005), estuda-se o comportamento de uma fila de tamanho infinito com um único servidor e taxas de serviço em estados ou fases variantes de acordo com uma cadeia de Markov de tempo contínuo (CMTC). A disciplina de atendimento executada pelo servidor é independente do processo de entrada e dos requisitos de serviço dos pacotes, os quais chegam à fila de acordo com um processo de Poisson. Métricas de desempenho como o tempo médio de espera e a ocupação média na fila são deduzidas e avaliadas, à luz de experimentos numéricos. O tempo de atendimento em cada fase do servidor é descrito por uma distribuição exponencial; não são considerados processos de entrada e saída em lotes.

Os autores em ADAN (2003) estudam a dependência entre os processos de entrada e saída de pacotes em uma fila infinita com um único servidor. Em ambos os processos, os intervalos de tempo entre eventos são dependentes de uma cadeia de Markov de tempo discreto (DTMC) comum, descrevendo o que os autores denominam de filas semi-Markovianas. As distribuições estacionárias de ocupação e de tempo de espera na fila são deduzidas, empregando transformadas de Laplace-Stieltjes; além disto, é analisado o impacto da correlação entre os processos de entrada e saída nestas distribuições. São considerados intervalos de tempo exponenciais entre atendimentos na fila; não são considerados processos de entrada e saída em lotes.

Os métodos mais referenciados para o estudo das filas moduladas por processos markovianos, conforme descrito em MITRANI (2005), são o método geométrico matricial e o de expansão espectral. O primeiro consiste de um algoritmo inspirado na teoria clássica

de sistemas que permite a determinação da distribuição estacionária da ocupação da fila a partir das potências de uma matriz R, que é a solução mínima positiva de uma equação matricial não-linear; a matriz R é obtida a partir da decomposição da matriz de probabilidade de transição de estados pelo método de Schur, segundo AKAR (1998). Esse método foi utilizado para filas de tempo discreto com processos em lotes com correlação em JAFARI (2000) e em filas G/G/1 em JAFARI (2001). Em telecomunicações, foi empregado pelos autores de KOBBANE (2008) para análise de desempenho (descarte, número de retransmissões e atraso) de um tráfego segundo o modelo de Poisson em um canal com desvanecimento. Já no método de expansão espectral, apresentado em MITRANI (1995), a solução é obtida a partir dos autovalores e dos autovetores à esquerda de uma matriz polinomial, construída com a combinação dos estados dos processos de entrada e saída da fila.

Recentemente, Chakka e Do em CHAKKA (2007) apresentaram o modelo *HetSigma* para avaliação de desempenho em redes sem fio, considerando processos de entrada e de saída modulados por uma CTMC, superposição de processos de Poisson representando agregados de dados e um ambiente com múltiplos servidores com tempos de serviço exponenciais. São descritas as equações de balanço do estado estacionário, como um passo intermediário para utilização dos dois métodos anteriores. Estes métodos apresentam como desvantagem a complexidade dos algoritmos envolvidos, como consequência das diversas transformações matriciais envolvidas.

Já a proposta de Chang e Choi em CHANG (2006) (utilizada, por exemplo, por Sikdar e Gupta em SIKDAR (2008)) para o estudo de filas moduladas por processos markovianos adota uma estratégia mais simples. A partir do emprego de cadeias de Markov embutidas, é descrito um sistema de equações lineares com as distribuições de ocupação de um fila no estado estacionário e, a partir da teoria da renovação, são estabelecidas diversas relações para ocupação na fila (antes do serviço, na chegada de pacotes e em instantes arbitrários). Por fim, são apresentadas métricas de desempenho, como a probabilidade de descarte e o atraso na fila, com resultados numéricos.

Assim, percebe-se que, de maneira geral, os métodos tradicionais de cálculo da distribuição de equilíbrio e das métricas de desempenho relacionadas em filas moduladas por processos markovianos, como os de solução-matriz geométrica, os métodos de expansão espectral e as funções geradoras de probabilidade são numericamente complexas MITRANI (2005), exigindo várias transformações matriciais.

Propostas recentes e mais simples, inspiradas em cadeias de Markov agregadas,

definem sistemas de equações lineares para analisar as distribuições estacionárias do tamanho da fila, em diferentes instantes de tempo. Como exemplo, os trabalhos descritos em DIETER CLAEYS (2008) e CLEGG (2010) analisam um sistema de filas em tempo discreto com aplicações em telecomunicações. A chegada de pacotes é modelada por um processo de Poisson com chegadas em lotes moduladas por uma cadeia de Markov. O processo de atendimento no servidor é descrito por uma única fila com intervalos fixos de serviço. Um sistema de filas com atendimento em intervalos fixos de tempo também é descrito em JI-HONGLI (2010). Nesse último trabalho, os autores incluem uma política de interrupção de atendimento (*working vacations*), permitindo a variação da taxa média de serviço. Soluções analíticas exatas são apresentadas para a ocupação e o atraso médio na fila, bem como é descrita a probabilidade de a fila exceder um determinado comprimento. Contudo, nos três trabalhos, a fila adotada é de tamanho infinito e o modelo de serviço proposto é independente do canal de comunicações.

A partir da revisão bibliográfica realizada, constata-se a inadequação dos modelos existentes na literatura em representar, a um só tempo, as características do tráfego de entrada e do processo de saída próprias do cenário de referência. Em particular, a representação adequada das filas moduladas por processos markovianos se faz importante em projetos de otimização com cooperação entre camadas, pois assim se torna possível capturar os momentos de ordem superior da distribuição estacionária de ocupação da fila.

Com isso, na seção 3.4, apresenta-se o modelo de fila com entradas generalizadas e serviços determinísticos (EGSD), como proposta para contemplar essas características. Nessa contribuição, são contemplados processos de entrada com múltiplas fases e de saída correlacionados, para promover uma maior adequação ao cenário de referência. É apresentado um conjunto de equações lineares para o comprimento da fila de distribuição estacionária em instantes de tempo arbitrários, bem como as expressões para as métricas relevantes - a carga de trabalho do servidor, a vazão média do sistema de produção e a taxa média de descarte de pacotes. Por fim, apresentamos uma aplicação do modelo EGSD à avaliação de desempenho dos típicos sistemas de comunicação sem fio, comparando-o com experimentos numéricos.

3.4 DESCRIÇÃO DO MODELO DE ENTRADAS GENERALIZADAS E SERVIÇOS DETERMINÍSTICOS - EGSD

O modelo proposto foi desenvolvido para o estudo de uma fila de capacidade limitada a B pacotes, um único servidor, com processos de chegada e saída com correlação temporal e serviços em lotes, de acordo com os atributos descritos para a topologia de referência deste trabalho. A Figura 3.5 apresenta de forma compacta os processos de entrada e saída da fila EGSD.

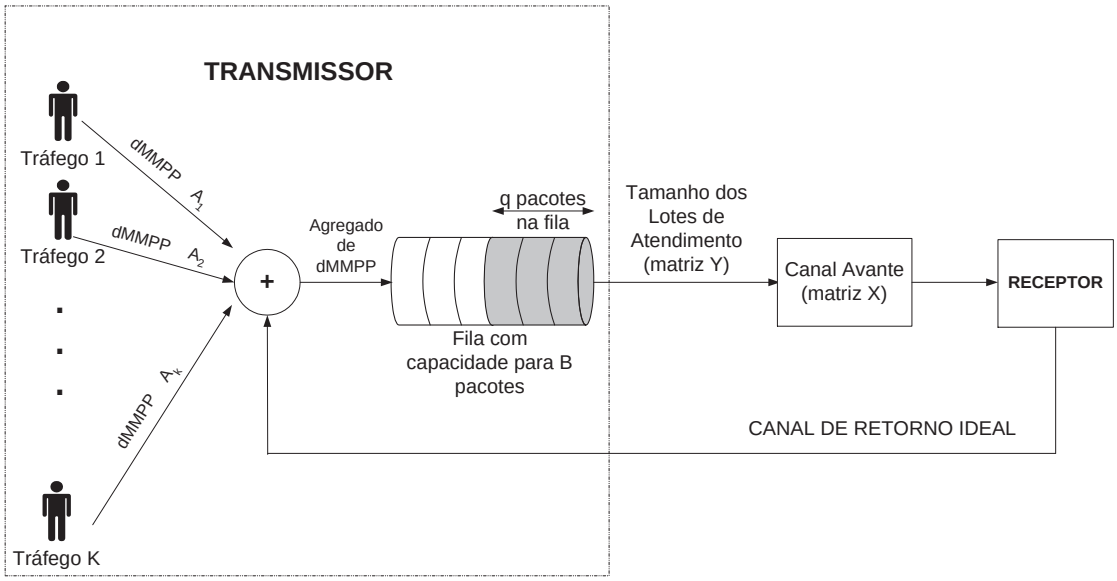

FIG. 3.5: Descrição dos Processos de Entrada e de Saída da Fila EGSD.

3.4.1 MODELO DE TRÁFEGO

Foi adotado um processo de Poisson composto como modelo de tráfego, dada sua adequação para descrever diversos tipos de tráfego multimídia, como voz, vídeo e modelos com auto-similaridade. Isso se dá pois modelos como o processo de Poisson modulado por uma cadeia de Markov em tempo discreto (d-MMPP) não só podem ser utilizados para descrever tráfego com características de dependência de longa duração, como também permitem uma descrição mais precisa das estatísticas de ordem superior referentes ao comportamento da fila, além de seu comportamento médio. Tais características, aliadas à simplicidade no tratamento analítico, fazem com este modelo tenha sido escolhido em meio aos outros disponíveis na literatura, como em ADAS (1997).

Cada fonte de tráfego i é representada por um d-MMPP A_i, descrita pelas matrizes T_i e Λ_i SALVADOR (2003). Cada elemento $t_i^{h,l}$ da matriz T_i representa a probabilidade de

transição de um estado h para um estado l na fonte de tráfego. Para cada estado de tráfego h, $\Lambda_i^h \in \Lambda_i$ representa a taxa média de eventos de chegada de pacotes para o processo i. A quantidade efetiva de pacotes recebidos em cada estado l é dada por $\left\{X_i^l\right\}_{i=1}^{\infty}$, e é composta por variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas (IID). A distribuição de probabilidade de X_i^l é dada por $P(X_i^l = j) = p_j, j = 1, 2, ...$, onde j representa a quantidade de pacotes recebidos.

Logo, tem-se para cada d-MMPP A_i:

$T_i = \left(t_i^{h,l}\right)$, para $h, l \in (0, ..., m-1)$ e $L_i = diag(L_0, L_1, ..., L_{m-1})$

Isso posto, pode-se descrever o modelo global de tráfego, com a agregação de todos os K processos de Poisson compostos e independentes entre si A_1,A_2,...,A_K, por meio das matrizes de superposição T e Λ, onde $T = T_1 \otimes T_2 \otimes ... \otimes T_K$ e $L = L_1 \oplus L_2 \oplus ... \oplus L_K$, sendo que $\oplus$ e $\otimes$ representam a soma e o produto de Kronecker, respectivamente.

3.4.2 MODELO DE ATENDIMENTO

Assume-se que o canal é modelado por uma cadeia de Markov de estados finitos (FSMC), com $N + 1$ estados (o primeiro estado, identificado como estado 0, indica a opção de não-transmissão) e que cada estado n ($n \in \{0, ..., N\}$) representa não somente um modo específico de modulação, mas também a transmissão de uma rajada de n pacotes durante uma fatia de tempo. Assim, a sequência de tamanhos de rajadas no processo de atendimento é composta de uma variável aleatória Y, que é governada por uma FSMC com $N+1$ estados. Em nosso modelo, quando o número de pacotes na fila q, onde $q < B$, for pelo menos igual à capacidade de atendimento j, $j \in (0, ..., N)$ em uma dada fase do processo de atendimento, somente j pacotes são transmitidos e os $q - j$ pacotes restantes são mantidos na fila. Caso contrário, q pacotes são transmitidos.

Logo, o processo de atendimento em rajadas pode ser modelado por duas matrizes, $\mathbf{X}$ e $\mathbf{Y}$. A matriz $\mathbf{X}$ denota as probabilidades de transição da FSMC do processo de atendimento, contemplando o comportamentos do canal de transmissão e a variação da quantidade de pacotes na fila de transmissão. Já a matriz $\mathbf{Y}$ descreve os tamanhos das rajadas no atendimento. As matrizes $\mathbf{X}$ e $\mathbf{Y}$ são dadas por:

$X = \left(x_{kl}\right)$, para $k, l \in (0, ..., N)$ e $Y = [0, 1, ..., N]$

onde x_{kl} indica a probabilidade de transição do estado k para o estado l na matriz $\mathbf{X}$.

3.4.3 CADEIA DE MARKOV ASSOCIADA AO SISTEMA

Assuma-se que as matrizes de probabilidades de transição $\mathbf{T}$ e $\mathbf{X}$ são descritas para o mesmo intervalo de tempo entre quadros (T_{ts}). Dessa forma, o comportamento global da fila sob o modelo EGSD é descrito pela matriz $\mathbf{D}$, onde $\mathbf{D} = \mathbf{T} \otimes \mathbf{X}$. $\mathbf{D}$ é modelado por um processo d-MMPP de ordem $F = Kmn$, onde F representa o número total de estados da cadeia de Markov, contemplando todas as combinações possíveis para as fases de atendimento e de chegada de pacotes, tal qual ilustrado em SALVADOR (2003). Semelhantemente, cada fase $f, 1 \leq f \leq F$, apresenta um padrão típico de atendimento em rajadas, dado por $Y(f)$. Assim, tal modelo descreve as probabilidades de transição de cada conjunto de processos de chegada e de atendimento, a cada fase.

Para $n \geq 1$, Q_n^- descreve o número de pacotes na fila imediatamente antes do n-ésimo evento de atendimento em rajadas, Y_n denota o tamanho da n-ésima rajada e A_n representa o número de pacotes que chegam no intervalo de tempo compreendido entre os eventos de atendimento n e $n+1$, incluídos os pacotes descartados por *overflow* na fila. Assim, define-se uma cadeia de Markov embutida $\mathbf{Q}$, descrevendo o processo de ocupação da fila nos instantes de tempo imediatamente anteriores ao processo de atendimento.

Tal qual descrito nos cenários apresentados nos trabalhos de referência em estratégias de cooperação entre camadas, assume-se que as cadeias de Markov $\mathbf{T}$ e $\mathbf{X}$ são irredutíveis, dado que existe uma probabilidade não-nula de transição entre os estados destas cadeias de Markov em tempo discreto (DTMC). Por construção, pode-se afirmar que as duas DTMC são homogêneas, pois a probabilidade de transição entre estados não depende do instante de tempo considerado. Conforme demonstrado em LIU (2005), toda cadeia de Markov de estados finitos homogênea e irredutível também é recorrente positiva. Assim, como ambas as cadeias são homogêneas, irredutíveis e recorrentes positivas, a distribuição estacionária de $\mathbf{Q}$ existe e é única, de acordo com KLEINROCK (1975). Desta forma, tal modelo engloba elementos como a agregação de tráfego, rajadas e atendimentos em lotes, em função da superposição do processo de chegada de pacotes (descrito pelo modelo MM $\sum_{k=1}^{K}$ CPP) com a disciplina determinística de atendimento em lotes.

Para o cálculo da distribuição estacionária na fila, descreve-se $\mathbf{Q}$ como um processo recursivo, dado por:

$$Q_{n+1}^- = \begin{cases} \min(Q_n^- - Y_n + A_n, B) & \text{se} \quad Q_n^- \geq Y_n \\ \min(A_n, B) & \text{if} \quad Q_n^- < Y_n \end{cases} \tag{3.1}$$

A probabilidade de chegada de j pacotes entre eventos de atendimento quando o

sistema se encontra na fase f é expressa por $c_{j,f}$, descrita por:

$$c_{j,f} = e^{-\lambda_i} \frac{\lambda_i^j}{j!}, \tag{3.2}$$

onde o índice i denota que a fonte de tráfego A_i está associada ao processo de chegada de pacotes referente ao estado f do sistema.

Seja $P_{k,f}^{-}$ a probabilidade de haver k pacotes na fila imediatamente antes de um processo de atendimento, dado que o sistema esteja na fase f. Assim, dado que k $= 0, 1, ..., B$ e f $= 1, ..., F$, a distribuição estacionária da ocupação na fila $P_{k,f}^{-}$ é determinada por

$$P_{k,f}^{-} = \sum_{b=0}^{B} \sum_{g=1}^{F} P_{b,g}^{-}.c_{q,g}.D_{g,f} \text{ , para } 0 \leq k < B \tag{3.3}$$

$$P_{k,f}^{-} = \sum_{b=0}^{B} \sum_{g=1}^{F} P_{b,g}^{-}.(\sum_{s=q}^{\infty} c_{s,g}).D_{g,f} \text{ , para } k = B \tag{3.4}$$

onde $q = k - b + \max(b - g, 0)$ e $D_{g,f}$ representa a probabilidade de transição do estado g para o estado f. A condição de normalização é dada por

$$\sum_{b=0}^{B} \sum_{g=1}^{F} P_{b,g}^{-} = 1 \tag{3.5}$$

Isso posto, o vetor $\hat{\pi}$ de distribuição estacionária desta DTMC pode ser calculado por

$$\hat{\pi} = \hat{\pi}\mathbf{P}, \sum_{0 \leq b \leq B, 1 \leq f \leq F} \hat{\pi}_{(b,f)} = 1, \tag{3.6}$$

onde $\hat{\pi}_{(b,f)} = \lim_{t \to \infty} P(Q_{t-1} = b, D_t = f)$ existe e é única, de acordo com as propriedades exibidas pelo sistema e a demonstração contida em KLEINROCK (1975).

3.4.4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Considere-se que, no sistema em estudo, a fila esteja ocupada por b pacotes e que o estado seja g. Assim, $q = \max(b, Y(g))$ indica a quantidade de pacotes transmitidos no processo subsequente de atendimento da fila, em que $Y(g)$ representa a eficiência espectral média da técnica de modulação adotada pelo sistema em seu estado g.

O número médio de pacotes descartados em cada estado g do sistema é determinado por $\sum_{s=B-b+q}^{\infty} c_{s,g}(T_{ts})$ e a probabilidade de *overflow* na fila P_d é dada por:

$$P_d = \sum_{b=0}^{B} \sum_{g=1}^{F} P_{b,g}^{-} \sum_{s=B-b+q}^{\infty} c_{s,g}(T_{ts}) \tag{3.7}$$

em que $c_{s,g}(T_{ts})$ indica a probabilidade de chegada de s pacotes, em um dado estado g do sistema, durante um intervalo de tempo x tal que $0 \leq x \leq T_{ts}$.

A vazão média do sistema (E) é diretamente relacionada ao tamanho adotado para as rajadas na disciplina escolhida para o atendimento de pacotes em cada estado g do sistema. O tamanho da rajada é indicado pela matriz Y. Assim, E é dado por:

$$E = \sum_{b=0}^{B} \sum_{g=1}^{F} Y(g).P_{b,g}^{-} \text{ , para } b \geq Y(g) \tag{3.8}$$

Semelhantemente, pode-se avaliar a carga do servidor por meio do cálculo da probabilidade de transmissão de pacotes, que é calculada por:

$$W = \sum_{b=1}^{B} \sum_{g=1}^{F} P_{b,g}^{-} \text{ , para } b \geq Y(g) \tag{3.9}$$

3.5 APLICAÇÕES E RESULTADOS NUMÉRICOS

No cenário considerado, o transmissor dispõe de seis fases de transmissão - BPSK, QPSK, 8-QAM, 16-QAM e 32-QAM, além da opção de não-transmissão, caso o canal esteja sendo momentaneamente submetido a condições severas de desvanecimento. Adota-se o vetor de limiares $\Gamma = [7,4062; 9,2711; 15,2856; 16,6486; 20,8606]$ dB para determinação do modo de transmissão a ser escolhido no sistema quando submetido a uma relação sinal-ruído média $\bar{\gamma} = 20$ dB e uma frequência máxima de deslocamento Doppler $f_D = 5$ Hz.

Com base na descrição de modelo de canal empregado e na probabilidade de transição entre os seis modos de operação, a partir da formulação matemática apresentada em LIU (2005), o modelo de canal empregado é determinado pelas matrizes $\mathbf{X}$ e $\mathbf{Y}$, dadas por:

$$X = \begin{pmatrix} 0,9188 & 0,0812 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,1620 & 0,6464 & 0,1916 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0278 & 0,9351 & 0,0371 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1024 & 0,7992 & 0,0983 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,0307 & 0,9543 & 0,0150 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0348 & 0,9652 \end{pmatrix} \text{ e } Y = diag(0,1,2,3,4,5).$$

Para o tráfego de entrada, adotou-se um tráfego *Interrupted Poisson Process* IPP com matrizes $T = \begin{pmatrix} 0,95 & 0,05 \\ 0,03 & 0,97 \end{pmatrix}$ e $\Lambda = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1600 \end{pmatrix}$, o que promove um tráfego médio de 2 pacotes a cada intervalo T_{ts} para o modelo EGSD. Comparou-se o resultado obtido com o apresentado pelos autores de CHANG (2006) (denominado modelo Choi); ambos os resultados foram validados numericamente por meio de simulações.

Na figura 3.6, mostra-se a probabilidade de descarte de pacotes em função do tamanho da fila (B). Além de identificar a diminuição da probabilidade de descarte de pacotes e sua tendência à saturação para valores maiores de B, verifica-se que o modelo pode ser utilizado para determinar tamanhos de fila adequados para atender a requisitos de QoS pré-determinados tanto em cenários táticos como em redes sem fio adaptativas.

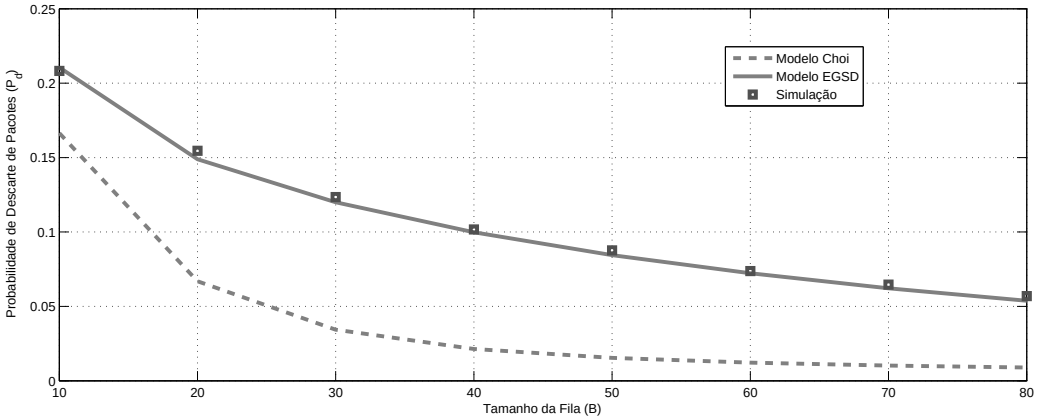

FIG. 3.6: Impacto do tamanho da fila no descarte de pacotes do sistema.

Com base na figura 3.7, é possível afirmar que o aumento de B promove um aumento na vazão do sistema, porém a taxas cada vez menores. Esse resultado se deve à diminuição da probabilidade de descarte verificada neste cenário. Tal qual na figura 3.6, pode-se também determinar valores de B apropriados para aumentar a vazão do sistema em estudo. De igual modo, a partir da diferença entre os modelos EGSD e Chang, pode se constatar o efeito da correlação temporal dos processos de saída em lotes nos valores obtidos, pois o processo de atendimento em CHANG (2006) indica eventos independentes e identicamente distribuídos. Tal fato ocasiona um menor descarte e, como consequência, uma maior vazão do que a verificada nos experimentos numéricos.

A seguir, o processo de chegada de pacotes é modelado por um processo IPP (Interrupted Poisson process) com duas fases, onde $T = \begin{pmatrix} 0,98916 & 0,01084 \\ 0,001445 & 0,98555 \end{pmatrix}$ e $\Lambda = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 2916,5 \end{pmatrix}$. Tal processo é adequado para ilustrar o modelo de tráfego na Internet de um assinante individual, com uma taxa média de dados $\overline{\lambda} = 1250$ pacotes por segundo, como sugerido em BAUGH (2001). São analisadas a vazão e a probabilidade de descarte de pacotes no sistema para valores diferentes de tamanho de fila e de relação sinal-ruído média; os resultados encontrados são comparados aos obtidos em experimentos numéricos.

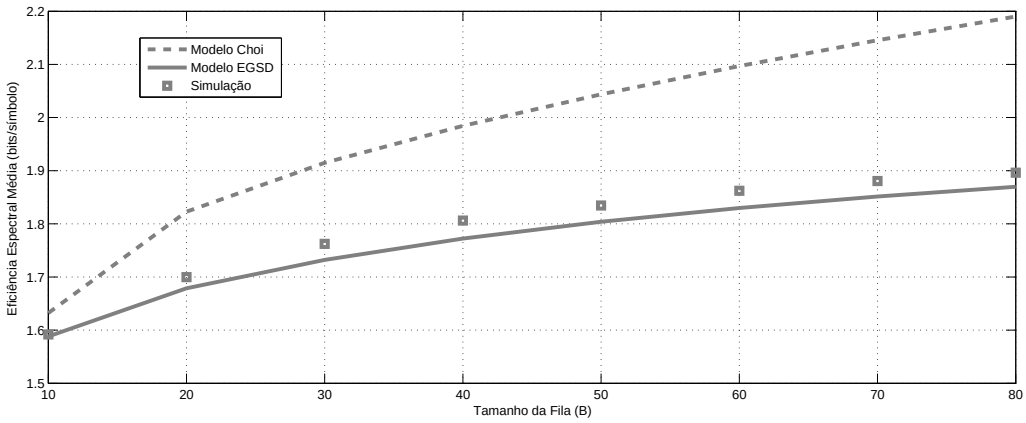

FIG. 3.7: Impacto do tamanho da fila na vazão do sistema.

Em Fig. 3.8 e 3.9, são apresentadas a probabilidade de descarte de pacotes e a vazão média do sistema em função do tamanho da fila para valores de relação sinal-ruído média de 10, 15, 20 e 25 dB, respectivamente [7]. Mais uma vez, pode se observar que o método EGSD apresenta resultados ajustados aos valores obtidos na simulação. Além disto, a probabilidade de descarte de pacotes diminui e a vazão média do sistema aumenta para valores maiores de relação sinal-ruído média. Tal comportamento se dá porque é mais provável a adoção de modos de transmissão de maior eficiência espectral com o aumento da relação sinal-ruído média; assim, o número médio de pacotes na fila é reduzido e, em consequência, a probabilidade de descarte de pacotes. Além disso, observa-se que o tamanho da fila influencia de forma significativa o desempenho do sistema, ilustrando a possibilidade de uso deste modelo no projeto de um sistema de Comando e Controle, com a determinação de tamanhos adequados de fila para atingir níveis desejados de qualidade de serviço em cenários táticos, levando em contas aspectos das camadas física e de aplicação.

Para avaliar a adequação do modelo EGSD a agregados de tráfego de dados, dois modelos d-MMPP com o mesmo número de estados e diferentes características são escolhidos. As matrizes Λ_k e $T_k, (k = 1, 2)$ são dadas por $T_1 = \begin{pmatrix} 0,9543 & 0,0457 \\ 0,0343 & 0,9657 \end{pmatrix}$, $\Lambda_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 4601,5 \end{pmatrix}$, $T_2 = \begin{pmatrix} 0,9856 & 0,0144 \\ 0,0108 & 0,9892 \end{pmatrix}$, e $\Lambda_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 2916,5 \end{pmatrix}$. Estes valores para as matrizes foram escolhidos para representar a agregação de tráfego de assinantes

[7] As linhas com a legenda *anly* descrevem os resultados analíticos, enquanto *sim* representa os experimentos de simulação

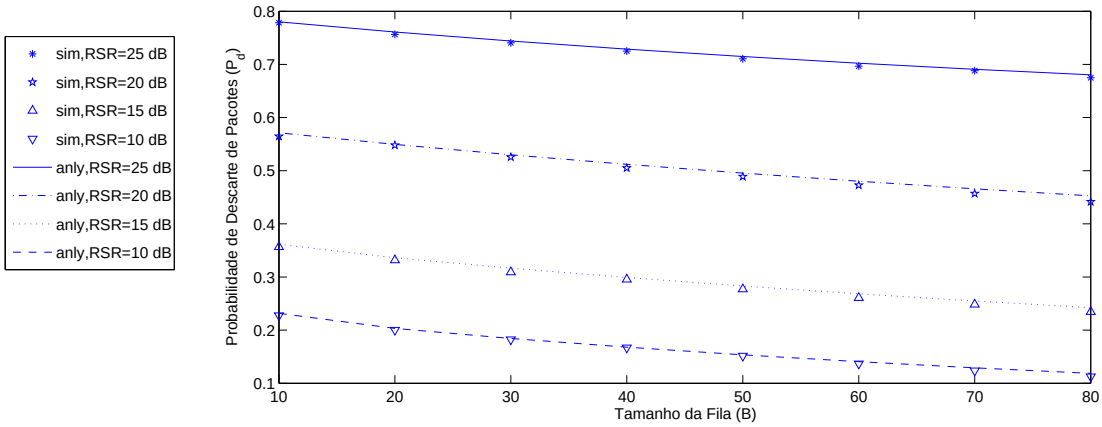

FIG. 3.8: Impacto do tamanho da fila na probabilidade de descarte de pacotes para diferentes valores de relação sinal-ruído média.

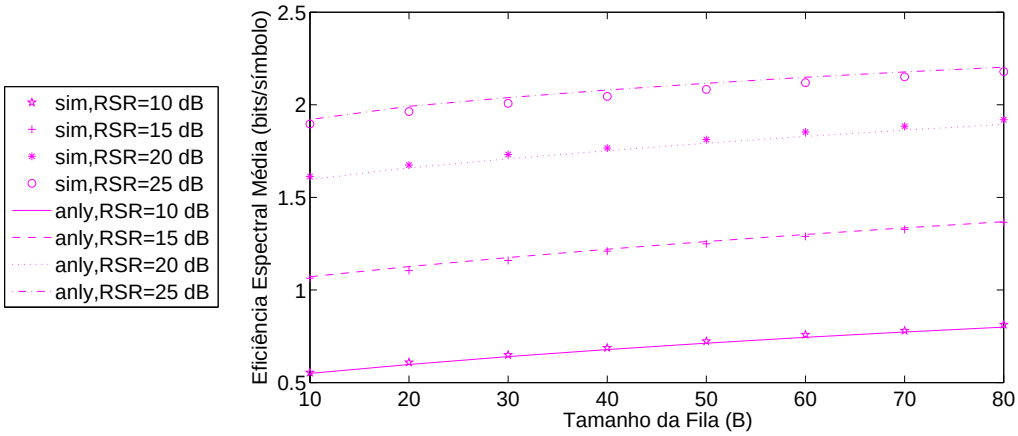

FIG. 3.9: Impacto do tamanho da fila na eficiência espectral média para diferentes valores de relação sinal-ruído média.

individuais através de um enlace tático sem fio, como sugerido em BAUGH (2001). A matriz X escolhida é a mesma do caso com um único assinante.

A probabilidade de descarte de pacotes do tráfego agregado em função do tamanho da fila para valores de relação sinal-ruído média de 10, 15, 20 e 25 dB na Fig. 3.10. Como descrito para o caso de tráfego individual, observa-se que o método EGSD apresenta resultados ajustados aos obtidos por meio de simulação. Também verifica-se que a probabilidade de descarte de pacotes diminui com o aumento da relação sinal-ruído média, em função da adoção de modos de transmissão de maior eficiência espectral para todos os valores de tamanho da fila.

Analisando a Fig. 3.11, pode-se constatar o aumento da vazão do sistema com o aumento da relação sinal-ruído média, tal qual descrito para o caso do assinante indi-

vidual. Portanto, observa-se que o modelo proposto para determinar o modelo agregado de tráfego produz resultados analíticos ajustados aos resultados de simulação, de forma semelhante ao descrito para o tráfego individual.

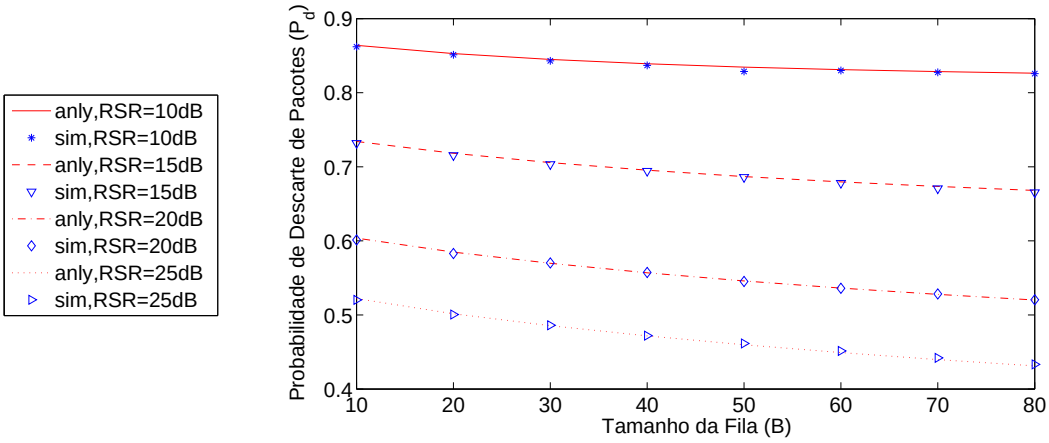

FIG. 3.10: Impacto do tamanho da fila na probabilidade de descarte do agregado de pacotes em diferentes valores de relação sinal-ruído média.

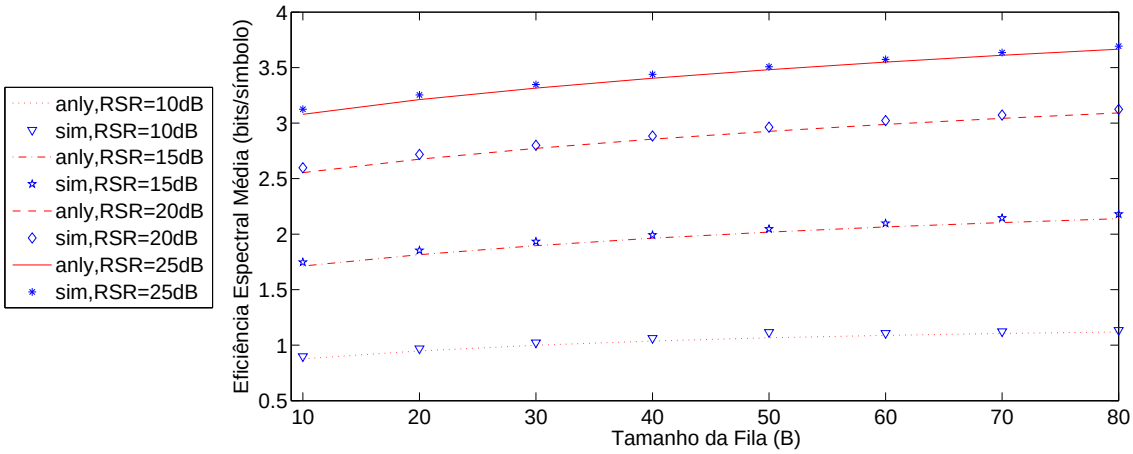

FIG. 3.11: Impacto do tamanho da fila na eficiência espectral média de transmissão do agregado de pacotes em diferentes valores de relação sinal-ruído média.

No estudo de caso seguinte, avalia-se a relação entre o desempenho do sistema e a impulsividade do tráfego de entrada. Foi considerado um sistema tático sem fio com intervalo de tempo entre quadros de $T_{ts} = 2$ ms; os demais parâmetros do processo de atendimento são os mesmos dos adotados para o modelo de tráfego individual.

Considerando uma taxa média de chegada de pacotes $\overline{\lambda} = 2,5$ pacotes por intervalo entre quadros, foram representados nove modelos de tráfego d-MMPP de dois estados cada, descrevendo eventos de transmissão (on) e de interrupção (off). Por exemplo, para

um modelo de tráfego de dados com $P_{on} = 0,5$, os eventos de transmissão ocorrem durante 1 ms a cada fatia de tempo com uma quantidade média de chegada de pacotes dada por $\overline{\lambda} = 5,0$ pacotes, permanecendo em silêncio ao longo de 1 ms. Semelhantemente, para um modelo de tráfego de dados com $P_{on} = 0,1$, os eventos de transmissão de pacotes ocorrem a uma taxa média de $\overline{\lambda} = 25,0$ pacotes durante $0,2$ ms, permanecendo em silêncio por $1,8$ ms.

Assim, tem-se que a diferença entre os dois exemplos do parágrafo anterior se dá em função da probabilidade de transmissão P_{on}, pois valores menores de P_{on} indicam um padrão mais impulsivo para o tráfego de dados, de forma a alcançar o mesmo valor de $\overline{\lambda}$. As matrizes X contendo as probabilidades de transição foram avaliadas para representar cada valor de P_{on}.

As figuras 3.12 e 3.13 mostram o desempenho obtido pelo sistema com a variação de $P_{on} \in \{0,1; 0,2; ...; 0,9\}$; os valores de relação sinal-ruído média variam de 10 a 25 dB. Considera-se o tamanho da fila $B = 80$ pacotes; resultados semelhantes foram obtidos para valores diferentes de B. Tais avaliações numéricas indicam uma tendência à saturação para valores maiores de relação sinal-ruído média e P_{on}, o que mostra a importância de um procedimento adequado de ajuste dos parâmetros de projeto à impulsividade do tráfego de entrada.

Pode ser também observado que, fixados os valores dos parâmetros do sistema, o aumento da impulsividade do tráfego (indicado por valores menores de P_{on}) implica na redução da vazão média e no aumento da probabilidade de descarte de pacotes do sistema. Tais consequências se devem ao fato de que, durante um intervalo entre transmissão de quadros no qual o modelo de tráfego seja de P_{on} menor, haverá um número maior de tentativas de entrada de pacotes na fila. Como consequência, os eventos de descarte de pacotes se tornam mais comuns, e a vazão média de pacotes é reduzida. Tal cenário se torna ainda mais acentuado para sistemas com valores menores de relação sinal-ruído média, dado que a quantidade média de pacotes transmitidos por quadro é reduzida em função das condições do canal de transmissão.

Adicionalmente, pode se constatar que a semelhança do desempenho global para os valores de $P_{on} \in \{0,7; 0,8; 0,9\}$, especialmente para valores maiores de relação sinal-ruído média. Isso se justifica pelo fato de que o número médio de pacotes que chegam à fila torna-se menor que o número médio de pacotes transmitidos por quadro, reduzindo substancialmente a probabilidade de descarte e aumentando a vazão média do sistema, que se aproxima da taxa média de atendimento para uma fila de tamanho infinito.

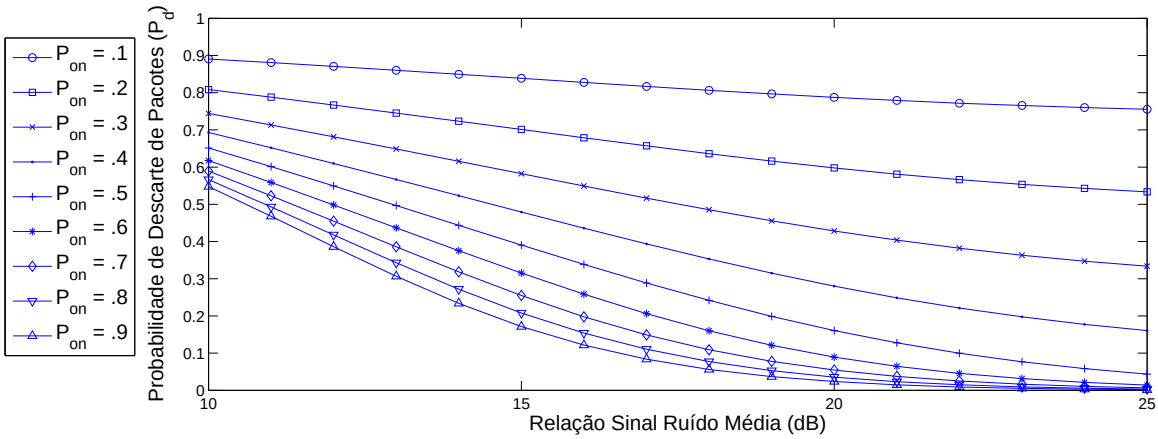

FIG. 3.12: Impacto do efeito da probabilidade de transmissão P_{on} na probabilidade de descarte de pacotes em diferentes valores de relação sinal-ruído média. Tamanho da memória = 80 pacotes.

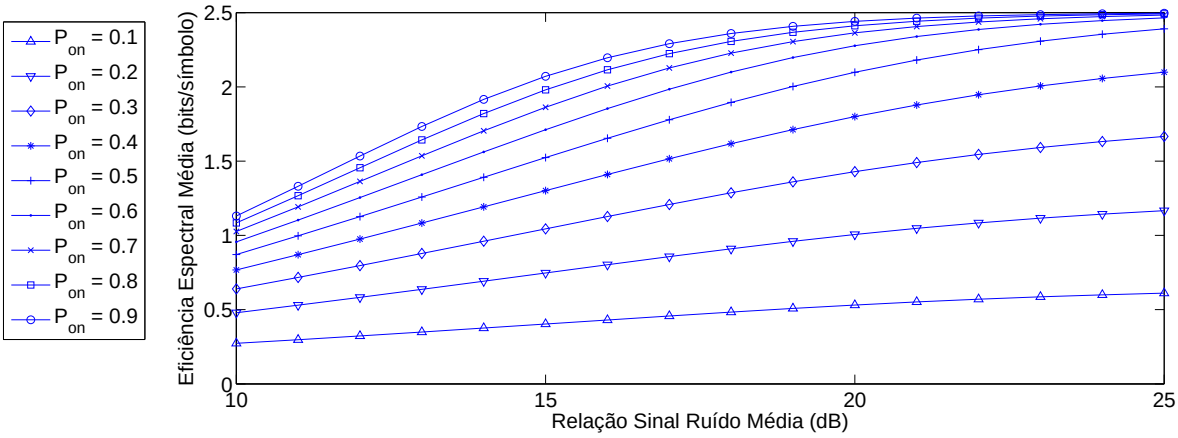

FIG. 3.13: Impacto do efeito da probabilidade de transmissão P_{on} na eficiência espectral média do sistema em diferentes valores de relação sinal-ruído média. Tamanho da memória = 80 pacotes.

Finalmente, são avaliadas as relações entre o desempenho do sistema e a existência de rajadas no processo de chegada de pacotes. Considere-se um sistema tático com intervalo entre atendimentos de $T_{ts} = 2$ ms; os demais parâmetros do processo de atendimento são idênticos ao do caso com tráfego de um único assinante. Tome-se a distribuição do tamanho das rajadas como $p_1 = 3/4$, $p_2 = 1/8$, e $p_3 = 1/8$, de forma a descrever um processo de chegada de pacotes em rajadas na Internet, como sugerido em BAUGH (2001). Tal processo é comparado a um modelo de tráfego de entrada IPP, sem rajadas ($p_1 = 1$).

Adotam-se $T = \begin{pmatrix} 0,9874 & 0,0126 \\ 0,0126 & 0,9874 \end{pmatrix}$ e $\Lambda = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 2500 \end{pmatrix}$, adequados para ilustrar o comportamento do tráfego gerado por um assinante individual na Internet com tráfego médio de 2.5 eventos de chegada de pacotes por intervalo entre atendimentos BAUGH (2001) - a cada evento de chegada de pacotes, o primeiro processo pode enviar um, dois ou três pacotes, enquanto o segundo processo sempre envia um único pacote. Com tal configuração do experimento, é importante perceber que os dois processos apresentam valores distintos de taxa de chegada de pacotes, dada a probabilidade de ocorrência de rajadas. Além disso, tome-se $\Gamma = [7,4062; 9,2711; 15,2856; 16,6486; 20,8606]$ dB como vetor de limiares de modulação adaptativa, de forma a prover uma matriz de probabilidade de transição de estados do processo de atendimento X de acordo com a técnica apresentada em LIU (2005) para cada valor de relação sinal-ruído média.

Pode-se observar que o modelo de tráfego com rajadas apresenta uma probabilidade maior de descarte de pacotes, como ilustrado na Fig. 3.14, em função do aumento no número de pacotes que chegam à fila durante um intervalo entre transmissões de quadros. Tal comportamento do tráfego poderia sugerir uma diferença maior na vazão do sistema na Fig. 3.15. Contudo, a taxa de eventos de descarte de pacotes no modelo de tráfego com rajadas faz com que os resultados sejam semelhantes, especialmente para os valores mais baixos de relação sinal-ruído, nos quais aumenta a probabilidade de emprego dos modos de transmissão com menor eficiência espectral. Portanto, pode-se afirmar que a quantidade de descarte de pacotes no sistema oferece um grande impacto sobre a eficiência espectral média do sistema submetido a um processo de chegada de pacotes em rajadas.

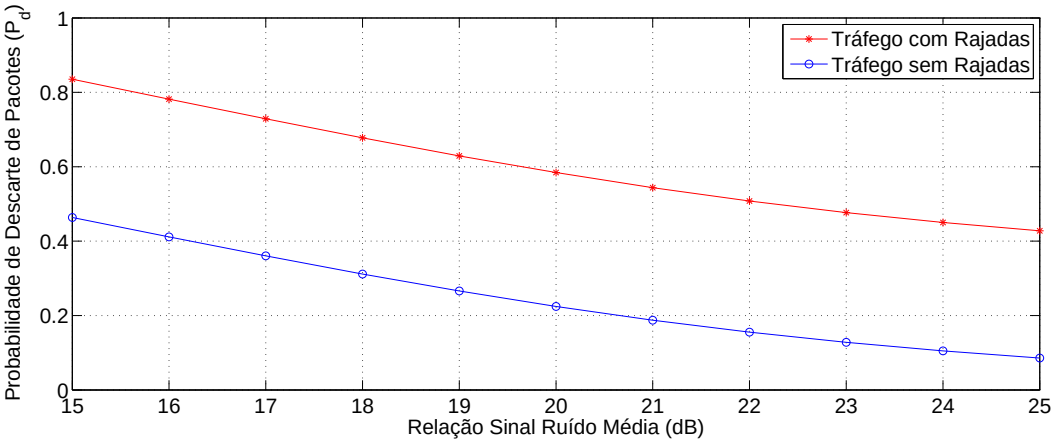

FIG. 3.14: Impacto do efeito de rajadas de transmissão na probabilidade de descarte de pacotes em diferentes valores de relação sinal-ruído média.

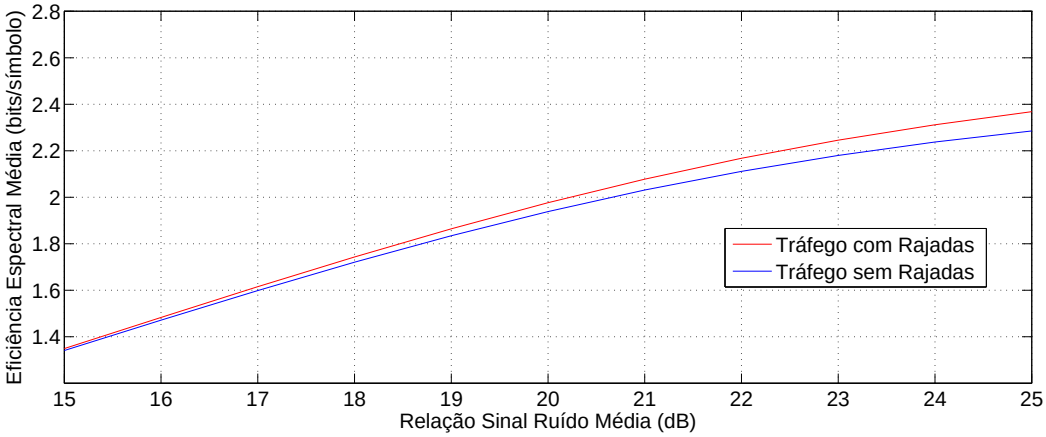

FIG. 3.15: Impacto do efeito de rajadas de transmissão na eficiência espectral média do sistema em diferentes valores de relação sinal-ruído média.

3.6 RESUMO

Neste capítulo, após uma revisão de trabalhos existentes na literatura em filas moduladas por processos markovianos, é proposto o modelo de fila com entradas generalizadas e serviços determinísticos - a fila EGSD: $MM(\sum_1^K)CPP/D^Y/1/B$ - para processos com entrada e saída em lotes, governados por processos markovianos para intervalos de tempo fixos entre serviços. Além de se identificar a distribuição da ocupação da fila no estado estacionário, métricas de desempenho de rede são discriminadas.

O modelo EGSD analisa o desempenho de sistemas sujeitos a processos correlacionados de chegada de pacotes e atendimentos em lotes em uma fila de tamanho finito. Como ilustração do modelo, o modelo EGSD é aplicado em um estudo de caso para redes sem fio adaptativas; os resultados obtidos para as distribuições de ocupação na fila em diversos modos de transmissão são comparados aos descritos segundo proposta já existente na literatura. Mostra-se assim o melhor ajuste do modelo EGSD ao cenário sob estudo, estimulando sua utilização em novas configurações de emprego da topologia de referência, dada a captura de efeitos de correlação temporal.

Dentre as possibilidades de emprego do modelo EGSD, indica-se a avaliação de sistemas táticos sem fio com base em estratégias de otimização apoiadas por técnicas de cooperação entre camadas. O objetivo é avaliar o desempenho do sistema sob condições mais realistas, a partir da consideração do estado do canal de comunicações, a ocupação da memória de tamanho de finita e o modelo de tráfego oriundo da camada de aplicação, contemplando chegadas de pacotes em rajadas e em agregados, como será indicado no

próximo capítulo.

4 PROJETOS DE COOPERAÇÃO ENTRE CAMADAS PARA REDES SEM FIO ADAPTATIVAS

Conforme descrito no Capítulo 2, as estratégias de cooperação entre camadas investigadas ao longo deste trabalho avaliam o desempenho do sistema a partir de cálculos indiretos de parâmetros como o atraso médio de pacotes, a probabilidade de descarte, a taxa global de perda de pacotes e a vazão do sistema; além disto, não são apresentados estudos para modelos mais realistas de tráfego.

Com isso, neste trabalho de tese, propõe-se uma nova estratégia de otimização com cooperação entre camadas. Em trabalhos anteriores, são estabelecidas estratégias de transmissão independentes para otimização de cada camada, com verificação posterior do desempenho global do sistema com modelos de tráfego pouco realistas. Aqui, apresenta-se uma estratégia integrada de cooperação entre camadas, por levar em consideração métricas das camadas física e de enlace como restrições do problema de otimização. Além disto, a estratégia proposta utiliza modelos de tráfego mais elaborados, de acordo com o exposto no capítulo anterior. Por fim, avalia-se o impacto de parâmetros de uma camada da arquitetura de rede (por exemplo, física) no desempenho do sistema estudado(neste trabalho, camadas física, de enlace e aplicação).

Nas seções seguintes deste capítulo, são analisadas duas propostas: a primeira, um exemplo disponível na literatura, cuja abordagem de cálculo de limiares leva em conta tão somente métricas de camada física (doravante denominada abordagem tradicional). Já a segunda é a proposta de projeto desta tese, na qual a otimização com cooperação entre camadas é calculada segundo a integração de métricas de camada física e de enlace às restrições do problema. Em seguida, as duas propostas são comparadas a partir de estudos de caso, o que permite identificar a melhoria de desempenho obtida com esta abordagem integradora.

4.1 PROJETO DE COOPERAÇÃO ENTRE CAMADAS - ABORDAGEM COM CÁLCULO DE LIMIARES EM FUNÇÃO DO DESEMPENHO NA CAMADA FÍSICA

Como exemplo da abordagem tradicional, na qual o cálculo de limiares é realizado em função do desempenho na camada física, descreve-se a seguir a proposta dos autores de

LIU (2005), em função da semelhança do modelo de sistema utilizado com o cenário de interesse desta tese. O objetivo do método descrito em LIU (2005) (doravante denominado *método LZG*, em função das iniciais dos autores) é realizar uma escolha adequada de parâmetros de camada física que permitam a maximização da eficiência espectral (S_e) na camada de enlace em um sistema dotado de capacidade de modulação adaptativa e sujeito a um valor máximo na taxa de erro de transmissão na camada física (P_o). Com esse objetivo, os autores de LIU (2005) consideram os efeitos de uma fila de tamanho finito na camada de enlace, avaliando a probabilidade de descarte de pacotes (P_d) e, como consequência, a taxa global de perda de pacotes (ξ), em função de erros nas camadas física e enlace.

Os resultados numéricos do método LZG são função de parâmetros não só de camada física (como a máxima frequência de deslocamento Doppler f_D, a relação sinal-ruído média $\bar{\gamma}$, o parâmetro de desvanecimento m referente ao modelo de canal Nakagami-m), mas também de camadas superiores (tamanho da fila na camada de enlace B, taxa de chegada de pacotes λ e duração do quadro de transmissão T_f). Emprega-se modulação adaptativa dotada de potência de transmissão constante e $N+1$ modos de operação (no qual o primeiro modo se refere à estratégia de não-transmissão, quando em condições severas de desvanecimento do canal), com o consequente particionamento da faixa de valores de relação sinal-ruído em $N+1$ intervalos consecutivos, sem sobreposição.

Como aspectos positivos do método LZG, destacam-se a compatibilidade com projetos tradicionais sem cooperação entre camadas (os denominados projetos *single-layer*), fácil obtenção da menor taxa possível de erro na camada física P_o por meio de técnicas de busca numérica e a descrição de expressões integrais para as diversas métricas de desempenho do sistema.

Seja $P_o(\vec{\Gamma})$ a probabilidade de erro de pacotes de camada física para um conjunto de limiares $\vec{\Gamma}$ e uma dada relação sinal-ruído média $\bar{\gamma}$. $P_o(\vec{\Gamma})$ pode ser expressa por:

$$P_o(\vec{\Gamma}) = \frac{\sum_{n=1}^{N} S_n \overline{PER}(n, \vec{\Gamma})}{\sum_{n=1}^{N} S_n Pr(n, \vec{\Gamma})} \tag{4.1}$$

em que S_n é a eficiência espectral na camada física, $Pr(n, \vec{\Gamma})$ representa a probabilidade de adoção do modo n de transmissão. $Pr(n, \vec{\Gamma})$ é dada por:

$$Pr(n, \vec{\Gamma}) = \int_{\gamma_n}^{\gamma_{n+1}} p(\gamma, \overline{\gamma}) d\gamma \tag{4.2}$$

onde $p(\gamma, \overline{\gamma})$ é a função densidade de probabilidade Gamma para o modelo de canal

Nakagami-m para um valor de relação sinal-ruído média $\bar{\gamma}$. $\overline{PER}_n$ denota a probabilidade de erro de transmissão de pacotes para o modo de transmissão n, expressa por:

$$\overline{PER}(n, \vec{\Gamma}) = \int_{\gamma_n}^{\gamma_{n+1}} PER(n, \gamma) p(\gamma, \overline{\gamma}) d\gamma \tag{4.3}$$

A probabilidade de erro de transmissão de pacotes $PER(n, \gamma)$ para o modo de transmissão n em presença de ruído branco aditivo gaussiano (AWGN) na condição de regime estacionário, definida na equação 2.4, pode ser aproximadamente expressa por:

$$PER(n, \gamma) \approx \begin{cases} 1, & \text{se} \quad 0 < \gamma < \gamma_{pn} \\ a_n exp(-g_n \gamma), & \text{se} \quad \gamma \geq \gamma_{pn} \end{cases}$$

De acordo com o expresso em LIU (2005), os valores dos parâmetros a_n, g_n e γ_{pn} são ajustados para a modulação empregada e o tamanho do bloco de dados. Os valores adequados para os modos de transmissão adotados são apresentados na Tabela 4.1 para um tamanho de quadro $N_b = 1080$ bits.

	Modo 1	**Modo 2**	**Modo 3**	**Modo 4**	**Modo 5**
Mod.	BPSK	4-QAM	8-QAM	16-QAM	32-QAM
S_n	1	2	3	4	5
a_n	67,7328	73,8279	58,7332	55,9137	50,0552
g_n	0,9819	0,4945	0,1641	0,0989	0,0381
$\gamma_{pn}(dB)$	6,3281	9,3945	13,9470	16,0938	20,1103

TAB. 4.1: Parâmetros dos Modos de Transmissão

A probabilidade de descarte $P_d(\vec{\Gamma})$ é definida como a razão entre as médias de descarte e de chegada de pacotes na fila, sendo dada por:

$$P_d(\vec{\Gamma}) = \frac{E(D, \vec{\Gamma})}{\lambda T_f} \tag{4.4}$$

onde o tráfego de entrada é modelado por um processo de Poisson com taxa média λ, D denota a distribuição estacionária do número de pacotes descartados e $E(D)$ o valor médio de D, sendo dado por:

$$E(D, \vec{\Gamma}) = \sum_{a \in \mathcal{A}, u \in \mathcal{U}, c \in \mathcal{C}} D(a, u, c) \times P(A = a) \times P(U = u, C = c, \vec{\Gamma}) \tag{4.5}$$

Os conjuntos $\mathcal{A}$, $\mathcal{U}$ e $\mathcal{C}$ representam, respectivamente, o conjunto de valores possíveis para a quantidade de pacotes na fila, seja na chegada de pacotes oriundos da camada de aplicação, em espera na fila na camada de enlace ou sendo transmitidos através do canal

avante. $P(A = a)$ denota a probabilidade de chegada de a pacotes segundo um processo de Poisson e $P(U = u, C = c, \vec{\Gamma})$ descreve a distribuição estacionária do estado (u pacotes na fila, c pacotes servidos no evento de transmissão) no modelo de fila.

O modelo do canal, o tráfego de chegada e o processo de atendimento de pacotes pelo transmissor são descritos por meio de cadeias de Markov de tempo discreto (DTMC, do termo em inglês *Discrete-Time Markov Chain*). Assim, os valores de P_o e P_d, bem como da eficiência espectral média S e da taxa global de perda de pacotes ξ são calculados.

Sejam:

- $P_{(u,c),(v,d)}$ - modelo DTMC de probabilidade de transição no modelo fila-atendimento no transmissor. Representa a transição do estado (u pacotes na fila, c pacotes transmitidos) para o estado (v pacotes na fila, d pacotes transmitidos);
- π - distribuição estacionária do modelo canal-fila-atendimento;
- $\pi_{(u,c)}$ - distribuição estacionária do estado (u pacotes na fila, c pacotes transmitidos);
- c_n - pacotes transmitidos por quadro no modo de transmissão n;
- $S(U = u, C = c)$ - eficiência espectral dada a existência de u pacotes na fila e o atendimento de c pacotes pelo transmissor.

Tais grandezas são expressas em LIU (2005) pelas fórmulas a seguir:

$$P_{(u,c),(v,d)} = P_{(c,d)} P\left(U_t = v | U_{t-1} = u, C_t = c\right), \tag{4.6}$$

$$\pi = \left[\pi_{(0,c_0)}, ..., \pi_{(0,c_N)}, ..., \pi_{(K,c_0)}, ..., \pi_{(K,c_N)}\right], \tag{4.7}$$

$$S_e(U = u, C = c) = \begin{cases} c, & \text{se } u \geq c. \\ \frac{u}{c}, & \text{se } u < c \end{cases} \tag{4.8}$$

A taxa global de perda de pacotes $\xi(\vec{\Gamma})$ é dada por:

$$\xi(\vec{\Gamma}) = 1 - (1 - P_d(\vec{\Gamma})).(1 - P_o(\vec{\Gamma})). \tag{4.9}$$

A eficiência espectral média $S_{e,\bar{\gamma}}(\vec{\Gamma})$ para uma relação sinal ruído $\bar{\gamma}$, considerando os efeitos do descarte de pacotes na camada de enlace pode ser calculada como

$$S_{e,\bar{\gamma}}(\vec{\Gamma}) = \sum_{u \in U, c \in C, c \neq 0} S(U = u, C = c, \vec{\Gamma}) P(U = u, C = c, \vec{\Gamma}). \tag{4.10}$$

Após a formulação analítica apresentada, o *método LZG* emprega os quatro passos descritos a seguir para determinação dos limiares adotados de modulação adaptativa:

- Discriminar um conjunto P, contendo todos os valores-alvo de interesse para P_o - as probabilidades de erro de transmissão de pacotes na camada física. Em seguida, obter os valores dos limiares $\{\gamma_n\}_{n=1}^{N}$ que determinam uma taxa previamente estabelecida de erro de transmissão de pacotes para todos os valores de $P_o \in P$, em cada modo de transmissão $n, n \in \{1...N\}$.

- Calcular a probabilidade de descarte de pacotes na fila, com base em uma cadeia de Markov em tempo discreto (DTMC), para todos os vetores de limiares obtidos no passo anterior.

- Identificar o valor ótimo de taxa global de perda de pacotes na camada física (${P_o}^{opt}$), onde:

$$ {P_o}^{opt} = \underbrace{arg\min \xi(P_o)}_{P_o \in P} \tag{4.11} $$

- Calcular o conjunto $\vec{\Gamma}$ de limiares de modulação adaptativa que maximiza a eficiência espectral $S_{e,\bar{\gamma}}(\vec{\Gamma})$ sujeito à restrição $P_o = {P_o}^{opt}$.

Como exemplo, descreve-se a seguir uma aplicação do método LZG, para maximização da eficiência espectral. Adota-se um tamanho de pacote $N_b = 1080$ bits, máxima frequência de deslocamento Doppler $f_D = 10$ Hz, relação sinal-ruído descrita pelo modelo geral de desvanecimento Nakagami-m, com parâmetro de desvanecimento $m = 1$. A duração de transmissão de quadros é fixa e igual a $T_f = 2$ ms. O tamanho da fila na camada de enlace é $B = 50$ pacotes e o tráfego de entrada apresenta uma taxa média de 2 pacotes a cada quadro.

Em primeiro lugar, identifica-se o valor de ${P_o}^{opt}$ para cada relação sinal-ruído, como descrito na figura a seguir para valores de RSR entre 17 e 22 dB.

A Tabela 4.2 descreve os valores de ${P_o}^{opt}$ encontrados:

Com tais valores, o método LZG permite a identificação do valor máximo de S, como descrito na Figura 4.2.

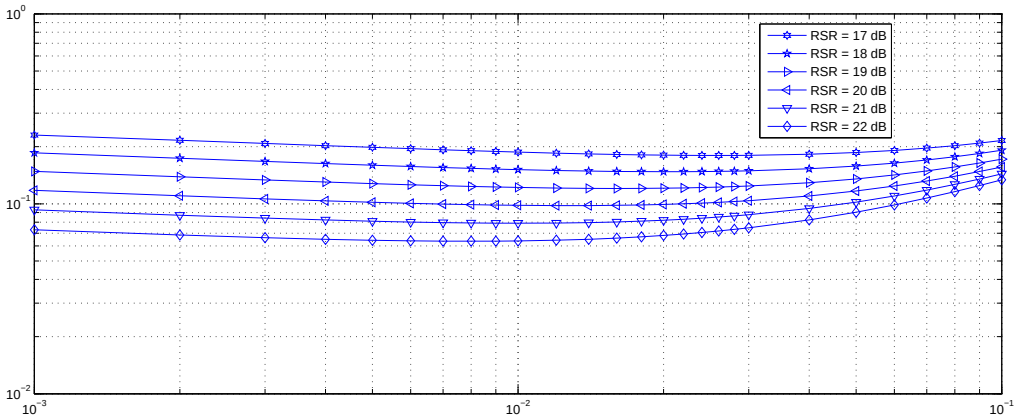

FIG. 4.1: Taxa de descarte de pacotes (camada de enlace - eixo vertical) em função da taxa de erro de transmissão (camada física - eixo horizontal).

Relação Sinal Ruído (dB)	P_o^{opt}
17	0,1797
18	0,1476
19	0,1205
20	0,09788
21	0,07907
22	0,06357

TAB. 4.2: Valores de P_o^{opt} para RSR entre 17 e 22 dB

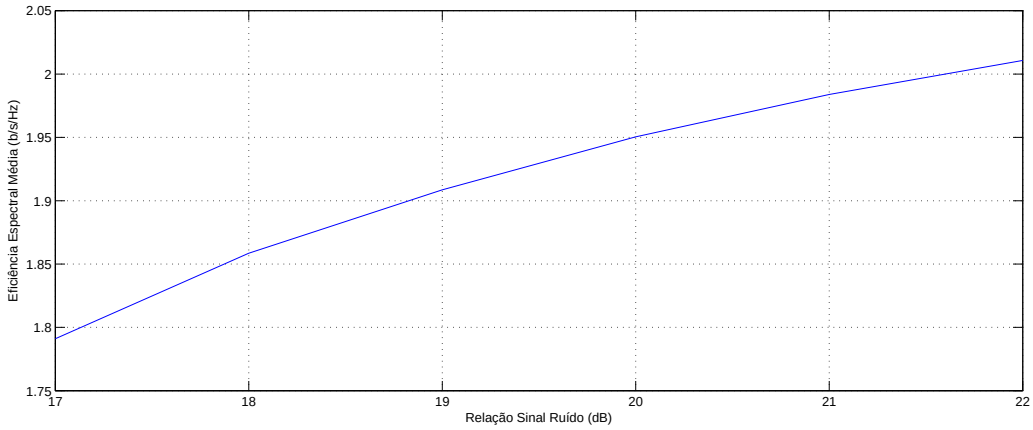

FIG. 4.2: Eficiência espectral média.

4.2 PROJETO DE COOPERAÇÃO ENTRE CAMADAS - ABORDAGEM INTEGRADORA

Apesar de suas boas características de desempenho, métodos como o LZG apresentam como limitação a incapacidade de se determinar diretamente a taxa mínima global de

perda de pacotes (ξ_{min}) para um valor de $\bar{\gamma}$ - esta taxa só pode ser calculada indiretamente, partindo inicialmente do valor da taxa de erro de transmissão na camada física ${P_o}^{opt}$ para, em seguida, calcular os erros associados na camada de enlace. Portanto, os valores dos limiares dos modos de modulação adaptativa (γ_n) não são obtidos de forma integrada, para maximizar a eficiência espectral e minimizar a taxa de perda de pacotes (seja em função de erros de transmissão na camada física, seja em função de descarte de pacotes na camada de enlace). Nesta tese, é apresentada uma proposta que busca solucionar tais inconvenientes.

A partir da formulação tradicional, percebe-se que a taxa global de perda de pacotes, aqui indicada como a agregação dos erros oriundos da transmissão na camada física e do descarte de pacotes na camada de enlace, depende de parâmetros não só de camada física (como a máxima frequência de deslocamento f_D, a relação sinal-ruído média $\bar{\gamma}$, o parâmetro de desvanecimento m referente ao modelo de canal Nakagami-m), mas também de camadas superiores (tamanho da fila na camada de enlace B, taxa de chegada de pacotes λ, estatísticas de ordem superior do tráfego de entrada e duração do quadro de transmissão T_f).

É sabido que os erros de camada física dependem tão somente de parâmetros da própria camada física; contudo, pode ser necessária um aumento da taxa de erros nesta camada para que se diminua a taxa de descarte de pacotes de tal forma que a taxa global de perda de pacotes seja reduzida. Assim, os dois tipos de parâmetros, de camada física e das camadas superiores, influenciam na escolha do conjunto de limiares de modulação adaptativa $\vec{\Gamma}$ e, como consequência, na probabilidade de transmissão em um determinado modo n ($Pr(n)$), dados por:

$$\vec{\Gamma} = [\gamma_1, \gamma_2, ..., \gamma_N]^T \tag{4.12}$$

$$Pr(n) = \int_{\gamma_n}^{\gamma_{n+1}} p_\gamma(\gamma) d\gamma \tag{4.13}$$

Neste trabalho, considerando o conjunto canal-fila, são avaliadas as seguintes métricas de qualidade de serviço:

- Eficiência Espectral na Camada de Enlace (S_e): valor médio da quantidade de bits transmitidos por símbolo através do canal de comunicação adotado;

- Probabilidade de Erro de Pacotes (P_o) Média: relacionado aos erros de transmissão na camada física;

- Probabilidade de Descarte (P_d): relacionado à perda de pacotes na memória (camada de enlace de dados), em caso de *overflow*;

- Probabilidade de Perda de Pacotes (ξ): agregado das perdas de camada física e de enlace de dados.

Assim, sejam S a eficiência espectral e ξ a probabilidade de perda de pacotes verificadas pelo sistema como um todo, seja por erros de transmissão (camada física), seja pelo descarte de pacotes (camada de enlace). A estratégia aqui proposta busca determinar um conjunto $\vec{\Gamma}^*$, contendo N limiares de modulação adaptativa (parâmetros de camada física) para escolha dos modos de transmissão adequados para maximizar S, dado que seja identificada a menor taxa global de perda de pacotes, representada por ξ_{min}. A formulação do POCC é descrita a seguir:

$$S(\vec{\Gamma}^*) = \max S_{\tilde{\gamma}}(\vec{\Gamma}) \qquad s.a.\ \xi = \xi_{min} \tag{4.14}$$

onde $\vec{\Gamma} \in \mathbb{R}^N$.

Esta proposta - daqui por diante denominada *método MSG* - visa a resolver o problema de otimização estabelecido acima, empregando os dois passos seguintes:

- Discriminar um conjunto Ξ, contendo todos os valores-alvo de interesse para ξ - as probabilidades de erro de transmissão de pacotes na camadas física e de enlace. Em seguida, obter os valores dos limiares $\{\gamma_n\}_{n=1}^{N}$ que determinam uma taxa ξ previamente estabelecida para todos os valores de $\xi \in \Xi$, em cada modo de transmissão $n, n \in \{1...N\}$.

- Identificar o valor ótimo de taxa global de perda de pacotes na camada física ($P_o{}^{opt}$), onde:

$$\xi_{min} = \underbrace{arg\min \xi}_{\xi \in \Xi} \tag{4.15}$$

- Calcular o conjunto $\vec{\Gamma}$ de limiares de modulação adaptativa que maximiza a eficiência espectral $S_{e,\tilde{\gamma}}(\vec{\Gamma})$ sujeito à restrição $\xi(\vec{\Gamma}) = \xi_{min}$.

Assim, em lugar da determinação de limiares de modulação adaptativa otimizados para uma probabilidade de erro alvo de camada física ($P_o(\vec{\Gamma})$), propõe-se uma abordagem realmente em camadas cruzadas, a partir da determinação de limiares adequados para atender a uma restrição mais geral, como a taxa global de perda de pacotes, agregando as

perdas oriundas pela configuração adotada nas camadas física e de enlace, dada por $\xi(\vec{\Gamma})$. Além disto, ressalta-se que a proposta contempla modelos de tráfego mais elaborados. Pode-se declarar que esta nova proposta não só considera contribuições e características dos métodos anteriores, como apresenta como vantagem a obtenção de limiares ajustados para uma métrica integrada, em vez de camada a camada.

4.2.1 ESTUDO DE CASO

Como exemplo, seguem os resultados analíticos da comparação entre a abordagem proposta neste trabalho (denominado método MSG) e o descrito em LIU (2005) (identificado como método LZG). O trabalho em LIU (2005) foi adotado nesta comparação por utilizar um cenário de estudo semelhante à topologia de referência desta tese. Nos testes, foram utilizadas funções da $MATLAB^{©}$ Optimization Toolbox para resolução de problema de otimização não linear com múltiplas restrições.

Os resultados obtidos para o método LZG foram idênticos aos descritos em LIU (2005), mostrando a adequação da ferramenta de resolução adotada. Para o conjunto de teste, adota-se um tamanho de pacote $N_b = 1080$ bits, máxima frequência de deslocamento Doppler $f_D = 10$ Hz, relação sinal-ruído descrita pelo modelo geral de desvanecimento Nakagami-m, com parâmetro de desvanecimento $m = 1$. A duração de transmissão de quadros é fixa e igual a $T_f = 2$ ms.

Em nosso primeiro teste, avalia-se a taxa mínima de perda de pacotes (ξ_{min}) para diferentes valores de relação sinal-ruído média $\bar{\gamma}$ ($\bar{\gamma} = 16, 18, 20$ e 22 dB). Isto é feito a partir da variação de um valor alvo de perda de pacotes ξ de 10^{-1} até 10^{-4}, seguido da comparação com o valor efetivamente alcançado (denominado ξ_{ach}). Com isso, é possível verificar se um determinado valor, proposto como ξ_{min}, é viável para determinado $\bar{\gamma}$.

A Figura 4.3 apresenta os resultados alcançados, considerando-se uma fila finita de tamanho $B = 50$ pacotes, com um processo de chegada de pacotes segundo o modelo de Poisson de taxa $\lambda T_f = 2$ pacotes por intervalo de tempo entre a transmissão de quadros. As linhas inclinadas a 45° representam os valores de ξ realizáveis para cada valor de $\bar{\gamma}$. Portanto, definindo-se $\Xi_{\bar{\gamma}}$ como o conjunto de ξ viáveis para um determinado valor de $\bar{\gamma}$, a taxa mínima de perda de pacotes, dada por ξ_{min}, é o menor valor de ξ tal que $\xi \in \Xi_{\bar{\gamma}}$.

Os resultados confirmam a previsão de que o valor de ξ_{min} diminui à medida que $\bar{\gamma}$ aumenta. Além disso, mostra também a viabilidade de uma determinação direta do valor de ξ_{min} em uma determinada $\bar{\gamma}$, integrando características das camadas física e de enlace.

Assim, esse método pode ser utilizado em lugar de uma abordagem indireta em duas fases, como descrito no método LZG, que leva em consideração apenas a taxa de erro de pacotes de camada física para determinar os limiares de transmissão adaptativa.

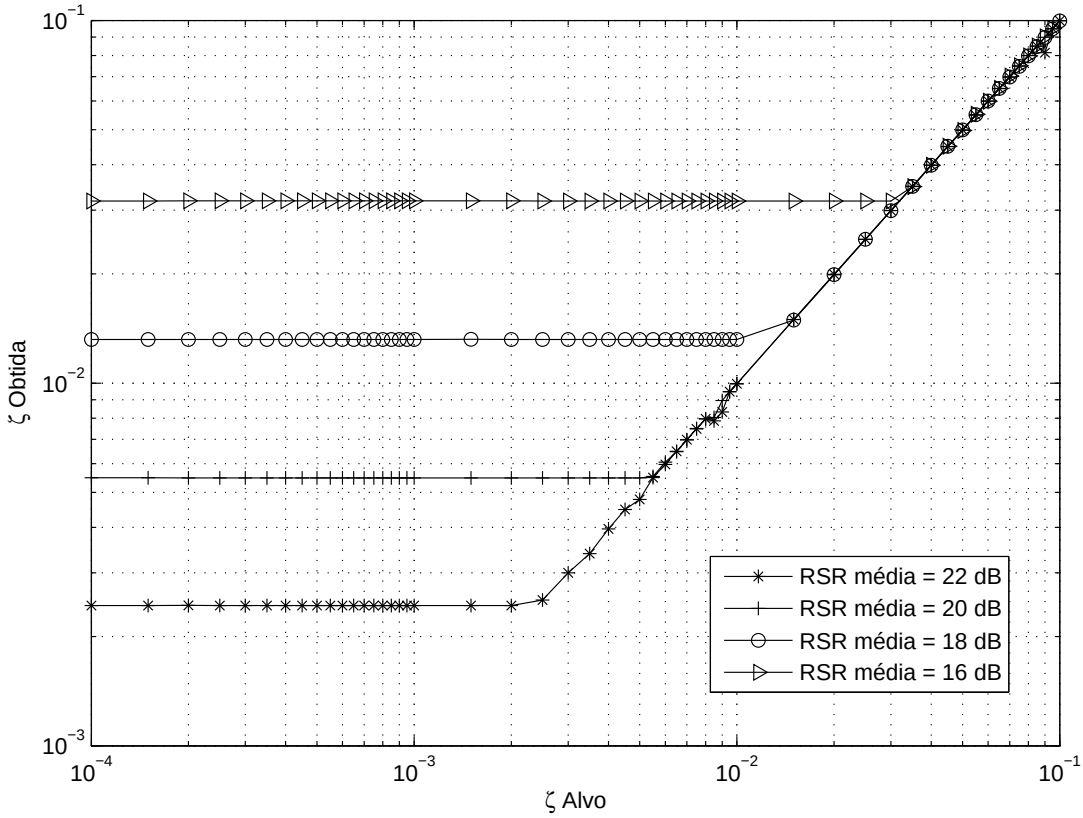

FIG. 4.3: Taxa mínima de perda de pacotes ξ_{min}, dada pela comparação entre os valores de ξ alvo propostos e os obtidos.

Em segundo lugar, considerando-se o tamanho da fila $B = 50$ e 100 pacotes de dados e uma taxa de chegada de pacotes $\lambda T_f = 2$ pacotes por intervalo de tempo entre a transmissão de quadros, os valores de ξ_{min} e de eficiência espectral média na camada de enlace foram avaliados para os métodos MSG e LZG, a fim de analisar a influência do tamanho da fila no desempenho do sistema. Os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 4.4 e 4.5, indicando que o aumento no tamanho da fila promove uma significativa redução do valor de ξ_{min}. Tal redução se deve por dois fatores: em primeiro lugar, o aumento do tamanho da memória reduz a probabilidade de descarte de pacotes na camada de enlace; além disto, constata-se a adoção de estratégias de transmissão mais conservadoras, com o aumento da probabilidade de escolha de modulações com menor eficiência espectral.

Além disso, verifica-se que a abordagem MSG supera o método LZG para todos os valores de $\bar{\gamma}$. Por exemplo, pode se notar na Figura 4.4 que o método MSG para um comprimento de fila $B = 50$ pacotes fornece resultados muito próximos para ξ_{min} aos obtidos com o método LZG para um comprimento de fila $B = 100$ pacotes em todo o intervalo considerado de relações sinal-ruído médias. Além disso, conforme mostrado na Figura 4.5, que o método MSG oferece um valor maior para a eficiência espectral média S. Portanto, pode-se afirmar que a abordagem MSG para B = 50 apresenta melhor desempenho do que LZG para B = 100 pacotes.

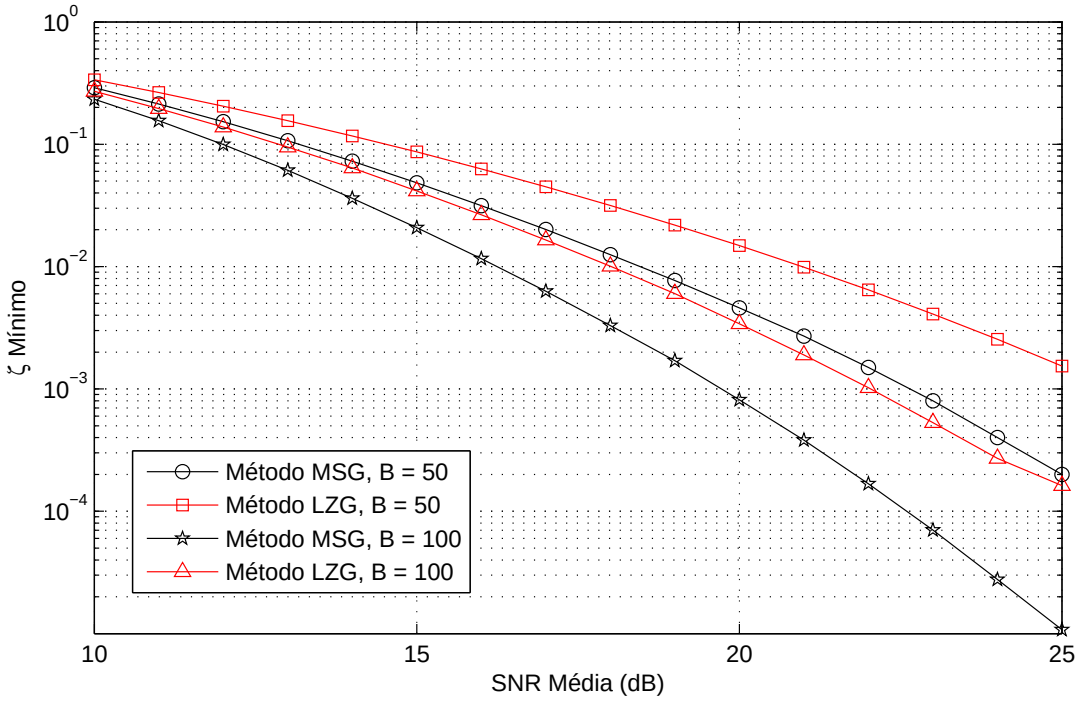

FIG. 4.4: Influência do comprimento da fila no valor de ξ para $\bar{\gamma}$ entre 10 e 25 dB.

Analisando a influência do desvanecimento de canal no cenário considerado, foram avaliados ξ_{min} e S como função de $\bar{\gamma}$, utilizando as abordagens LZG e MSG, conforme descrito nas Figuras 4.6 e 4.7. Foram adotados os valores de $f_D = 5$ e 10 Hz para máxima frequência Doppler normalizada, uma fila de tamanho $B = 50$ pacotes, canal segundo o modelo Nakagami-m de parâmetro de desvanecimento $m = 1$, intervalo entre quadros de 2 ms e um processo de chegada de pacotes de taxa $\lambda T_f = 2$ pacotes por intervalo de tempo entre a transmissão de quadros.

Observa-se que um valor menor de f_D conduz a uma maior taxa global de perda de pacotes, em função do aumento da taxa de erro na camada física (P_o). Além disso, a

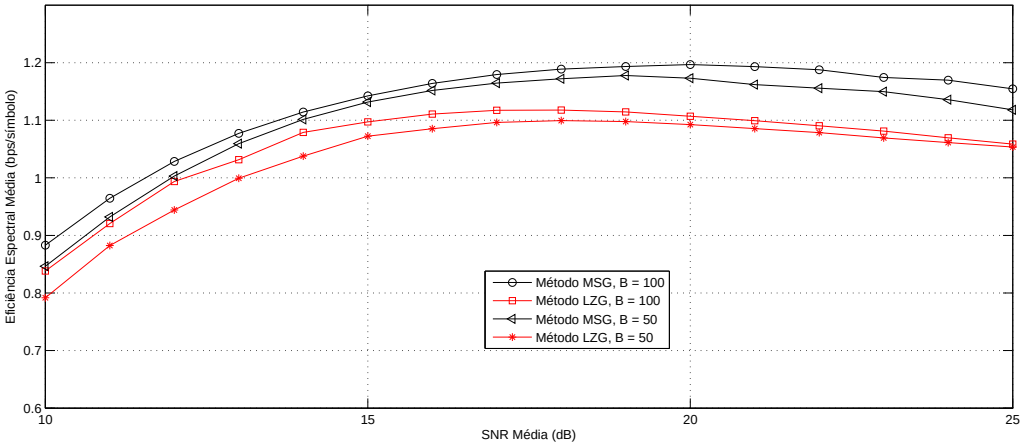

FIG. 4.5: Influência do comprimento da fila no valor de S para $\bar{\gamma}$ entre 10 e 25 dB

maior freqüência Doppler provoca um aumento na taxa de troca de modos de transmissão, conduzindo a uma maior eficiência espectral média no intervalo de $\bar{\gamma}$. Tal situação se verifica devido ao emprego de um canal avante conhecido e de um canal de retorno ideal. Uma vez mais, o método MSG fornece melhores resultados para todos os valores de $\bar{\gamma}$, resultando em uma menor taxa de perda mínima de pacotes e maior eficiência espectral média para $f_D = 5$ Hz, mesmo quando comparado ao método LZG para $f_D = 10$ Hz.

Por fim, avalia-se também a influência da taxa de entrada de pacotes em ξ_{min} e S de acordo com os métodos LZG e MSG. Os resultados numéricos mostrados nas Figuras

O fato de o método MSG proporcionar uma redução no valor de ξ_{min} e um aumento no valor de S em todos os valores de $\bar{\gamma}$ nos três casos mencionados anteriormente se justifica pela forma de construção do problema de otimização. Em lugar de se restringir a identificar os valores de P_o pertencentes a um conjunto de busca e, somente em seguida, avaliar as perdas de pacotes em função do descarte na fila, o método proposto amplia o espaço de busca a partir da avaliação direta de ξ, permitindo a obtenção de ξ_{min} em um único passo.

Além disso, dado que o objetivo é obter o menor valor possível para ξ_{min}, independentemente do valor de ξ verificado para cada modo de transmissão, o método MSG permite o aumento da eficiência espectral média, a partir de uma estratégia de compensação - o aumento da quantidade de pacotes descartados para as transmissões efetuadas com estratégias de modulação com menor eficiência espectral atua como um regulador para o aumento da quantidade de erros de transmissão quando as estratégias de modulação adotadas possui maior eficiência espectral. Assim, relaxando-se a restrição de que o valor

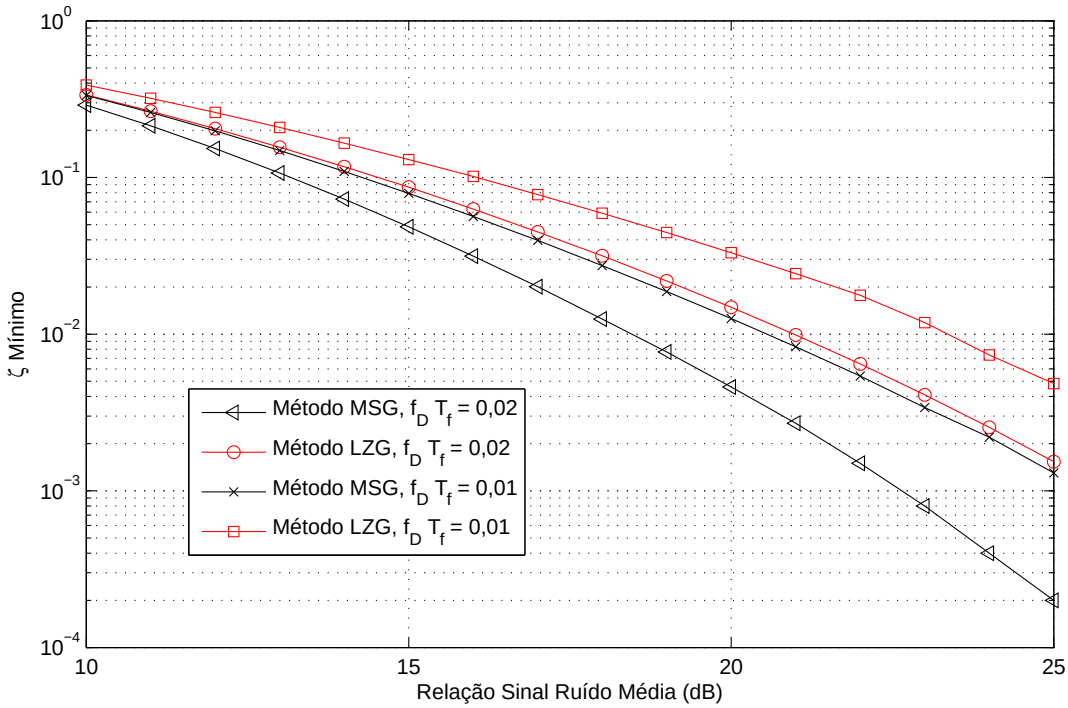

FIG. 4.6: Influência da frequência Doppler no valor de ξ para $\bar{\gamma}$ entre 10 e 25 dB.

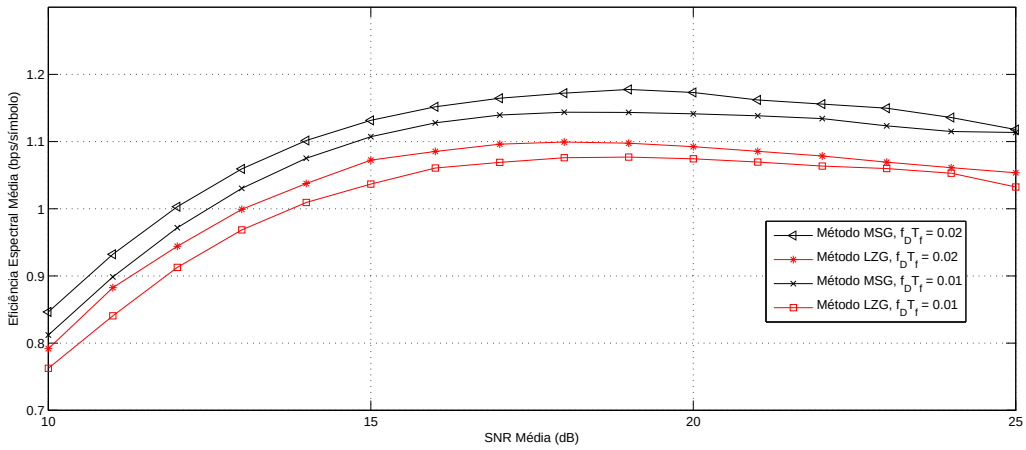

FIG. 4.7: Influência da frequência Doppler no valor de S para $\bar{\gamma}$ entre 10 e 25 dB.

de P_o seja o mesmo para todos os modos de transmissão, alcançam-se ganhos duplos a um só tempo - a redução de ξ_{min} e o aumento de S.

Propostas tradicionais de otimização com cooperação entre camadas ISHIZAKI (2007); GHAVAMI (2007); LIU (2005); ZHOU (2008); HARSINI (2007) promovem a avaliação de diversos parâmetros do sistema, como a probabilidade de descarte, atraso médio na fila, taxa de perda de pacotes e a vazão média do sistema. Via de regra, em

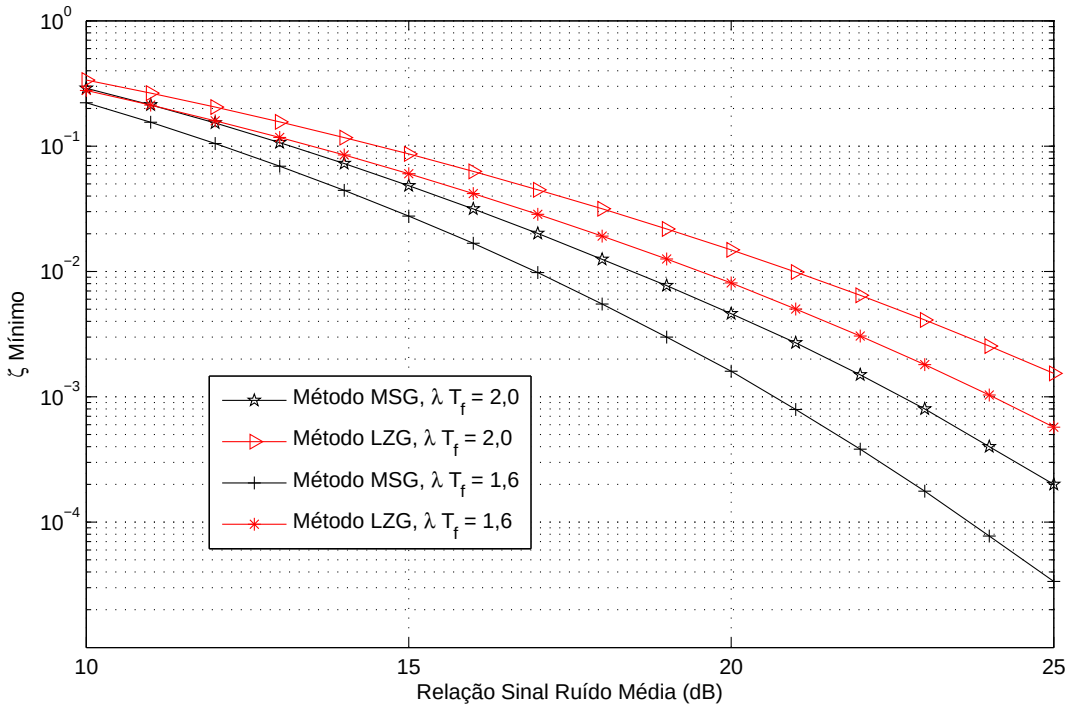

FIG. 4.8: Influência da taxa de entrada de pacotes no valor de ξ para $\bar{\gamma}$ entre 10 e 25 dB.

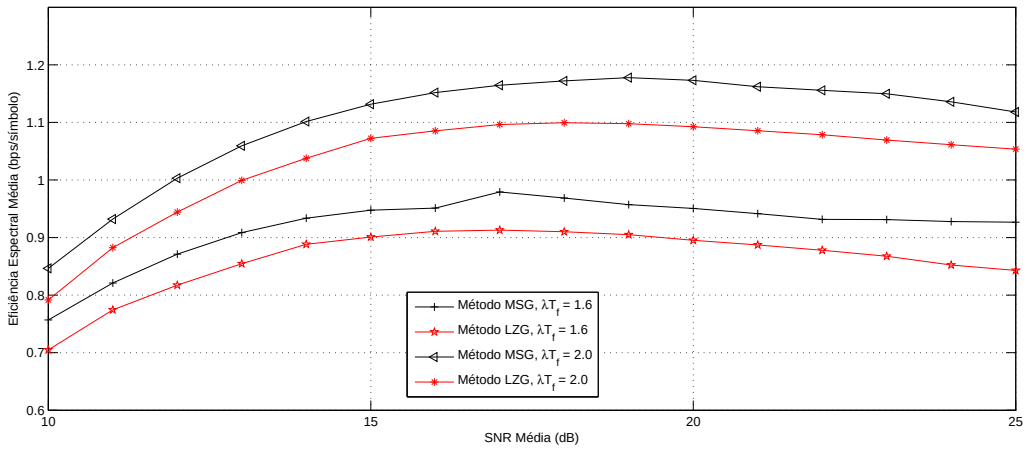

FIG. 4.9: Influência da taxa de entrada de pacotes no valor de S para $\bar{\gamma}$ entre 10 e 25 dB.

tais estudos é adotado um processo de chegada de pacotes segundo uma distribuição de Poisson; desta forma, deixam de ser considerados modelos mais realistas de tráfego.

Neste trabalho de tese, deseja-se investigar o impacto do modelo sobre a ocupação média na fila em estado estacionário, comparando os resultados obtidos a partir do emprego do modelo de entradas generalizadas em lotes descrito no capítulo anterior com os des-

critos quando o processo de chegada obedece a uma distribuição de Poisson. Para tanto, adota-se um modelo de sistema no qual o transmissor dispõe de seis estratégias distintas de operação, a saber, modo sem transmissão (NT), BPSK, 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM e 32-QAM, no qual o modo de não-transmissão é o escolhido em caso de condições severas de desvanecimento. Como descrito em casos de estudo do capítulo anterior, cada modo de transmissão representa uma fase do processo de atendimento na fila, sendo equivalente à maior quantidade de pacotes permitida para transmissão.

Outros parâmetros configurados são $T_{ts} = 2$ ms, que representa o intervalo de tempo escolhido entre transmissões de pacotes, e $\vec{\Gamma} = [7,4062; 9,2711; 15,2856; 16,6486; 20,8606]$ dB como o vetor de limiares de modulação adaptativa que foi obtido para uma taxa de erro de camada física igual a 10^{-2} para uma relação sinal-ruído média de 20 dB, de acordo com o modelo descrito em LIU (2005); como consequência, $\vec{\Gamma}$ define a matriz das probabilidades de transição das estratégias de atendimento na fila. Portanto, o processo de transmissão de pacotes em lotes é representado por um modelo em 6 fases, adequado para modelar um sistema de comunicações dotado de 6 modos de operação (NT, BPSK, QPSK, 8-QAM, 16-QAM e 32-QAM), em um canal avante sujeito aos efeitos do desvanecimento. Tal configuração permite a transmissão de $n = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ pacotes a cada intervalo de tempo, dependendo da relação sinal-ruído instantânea observada no canal durante o intervalo de tempo imediatamente anterior.

Consideramos dois modelos de tráfego, de acordo com processos de Poisson e IPP (*Interrupted Poisson Process*), ambos com taxa média de 2 pacotes por intervalo de tempo como representação do tráfego de entrada. Os parâmetros do tráfego IPP são descritos pelas matrizes $\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 0.8 & 0.2 \\ 0.12 & 0.88 \end{pmatrix}$ e $\Lambda = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1600 \end{pmatrix}$; adicionalmente, tem-se como relação sinal-ruído média $\bar{\gamma} = 20$ dB, frequência máxima de deslocamento Doppler $f_D = 10$ Hz, e tamanho da fila $B = 100$ pacotes.

Com isso, a Tabela 4.3 apresenta os valores[8] de taxa global de perda de pacotes (ξ), probabilidade de descarte (P_d) e eficiência espectral média ($\bar{S}$) para três cenários diferentes: o modelo de otimização apresentado em LIU (2005) (LZG) como exemplo da abordagem tradicional (com processo de Poisson como modelo de chegada de pacotes) e a nossa proposta integradora (MSG), com dois tipos de entrada: Poisson e IPP como modelos de geração de tráfego. O conjunto de limiares adotado nos três cenários é o mesmo, calculado para o modelo de tráfego de Poisson.

[8]Valores obtidos de forma analítica e corroborados através de experimentos numéricos de simulação.

	LZG	MSG com tráfego de Poisson	MSG com tráfego IPP
PER	0,01	0,01	0,01
P_d	0,0097	0,0096	0,0130
ξ	0,0196	0,0195	0,0228
$\bar{S}$	2,4277	2,4277	2,3988

TAB. 4.3: Estudo de Caso - Comparação entre as abordagens tradicional e integradora para otimização com cooperação entre camadas.

A primeira constatação é a de que o cenário em que se adota o processo de chegada de pacotes de acordo com a distribuição de Poisson pode ser considerado um caso particular da abordagem integradora. A igualdade dos valores obtidos nos três casos para a taxa de erro de pacotes na camada física é esperada, dado que a probabilidade de escolha de modos de transmissão depende estritamente do valor $\vec{\Gamma}$, não sofrendo qualquer influência do modelo de tráfego adotado. É também relevante perceber que o modelo LZG é adequado para a avaliação de desempenho do sistema quando sujeito ao tráfego IPP, dado que diferenças marcantes podem ser percebidas nos valores das demais métricas, como a probabilidade de descarte P_d, cuja variação é de 35%. Além disso, pode-se também constatar que o emprego dos limiares calculados para o modelo de Poisson provoca um degradação no desempenho do sistema submetido ao tráfego IPP, em função do desajuste do modelo de tráfego.

No estudo de caso seguinte, busca-se determinar o vetor $\vec{\Gamma}$ ajustado para obter, no sistema submetido ao tráfego segundo o modelo IPP, o mesmo valor de ξ (ξ =0,0196) obtido para o modelo de Poisson, dada uma mesma taxa de chegada de pacotes. Isso posto, dados os mesmos valores para os parâmetros $\mathbf{T}$, Λ, $\bar{\gamma}$, f_D e B do estudo de caso anterior, a Tabela 4.4 descreve os valores encontrados:

Métrica	Valor
PER	0,0059
P_d	0,0137
$\vec{\Gamma}(dB)$	[8,6350; 10,9479; 17,1120; 18,6771; 23,2709]
$\bar{S}$	2,3988

TAB. 4.4: Estudo de Caso - Parâmetros do sistema otimizados para o tráfego IPP.

Comparando-se os resultados apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4, observa-se que o vetor de limiares de modulação adaptativa indica uma estratégia diferente de transmissão para o tráfego IPP em relação à adotada para o tráfego de Poisson. Neste estudo de caso, por exemplo, cada estratégia de modulação passa a ser empregada a partir de valores de

relação sinal-ruído instantânea mais elevados no caso do modelo IPP. Como consequência, o sistema submetido a uma entrada segundo o modelo IPP apresenta uma taxa menor de erro de camada física ($0,0059 < 0,01$) do que o submetido ao modelo de Poisson; por outro lado, existe uma probabilidade maior de descarte de pacotes ($0,0137 > 0,0097$), em função do aumento da taxa média observada de chegada de pacotes, dado o período menor de transmissão ($P_{on} = 0,625$ no caso IPP, $P_{on} = 1$ no caso Poisson). Percebe-se também que nem mesmo o vetor de limiares de modulação adaptativa se manteve nos dois casos, pois, no primeiro caso, tem-se $\vec{\Gamma} = [7,4062; 9,2711; 15,2856; 16,6486; 20,8606]$.

Assim, pode-se concluir que não é suficiente considerar os resultados para o caso de modelo de entrada segundo um processo de Poisson como um padrão de comportamento a ser exibido para outros modelos de tráfego com uma mesma taxa de chegada de pacotes, pois as diferenças se mostram não só nas escolhas das diversas estratégias disponíveis de modulação adaptativa, como também no próprio desempenho do sistema. Além disso, pode-se afirmar que uma estratégia de modulação adaptativa construída em função de restrições estritamente de camada física são insuficientes para garantir os níveis desejáveis de qualidade de serviço. De fato, é necessário que sejam considerados parâmetros de camadas superiores para produzir a otimização do desempenho do sistema.

No próximo caso de estudo, promove-se a comparação do desempenho de dois sistemas submetidos a modelos de tráfego distintos (Poisson e IPP), de mesma taxa média de chegada de pacotes em três situações distintas, de acordo com o vetor $\vec{\Gamma}$ de limiares de modulação adaptativa - em primeiro lugar, com o vetor ajustado ao modelo de Poisson, com o vetor ajustado ao modelo IPP e, por fim, com o vetor otimizado ao modelo de Poisson, mas aplicado a uma entrada IPP. Assim, adotada uma taxa média de chegada de pacotes $\lambda = 1000$ pacotes por segundo, um intervalo de transmissão de quadros de 2 ms, frequência máxima de deslocamento Doppler $f_D = 10$ Hz, e tamanho de fila $B = 20$ pacotes, os três casos foram avaliados. As matrizes de descrição do modelo IPP adotado foram $\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 0,8 & 0,2 \\ 0,4 & 0,6 \end{pmatrix}$ e $\Lambda = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 3000 \end{pmatrix}$.

Em caso de igualdade dos resultados obtidos nos dois casos submetidos ao modelo de tráfego IPP, seria razoável afirmar que somente o modelo de Poisson precisaria ser utilizado não só para avaliar o desempenho, mas também para realizar o projeto em camadas cruzadas, em função de sua simplicidade. Em caso contrário, seria possível avaliar o impacto no desempenho do sistema em função do desajuste do vetor $\vec{\Gamma}$ de limiares de modulação adaptativa.

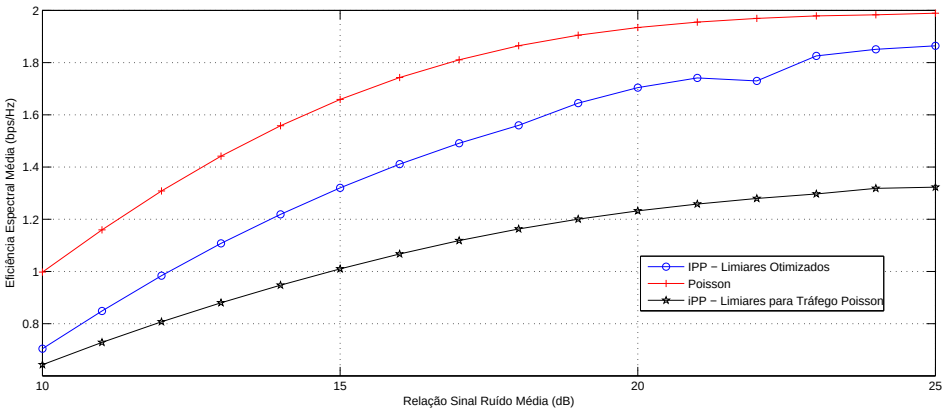

FIG. 4.10: Comparação dos modelos de tráfego a partir da vazão do sistema.

A Figura 4.10 permite observar que o desempenho do sistema submetido ao modelo de tráfego de Poisson é melhor, visto que a eficiência espectral média apresenta degradação no caso do modelo IPP - isto se dá em função do aumento na quantidade de eventos de descarte de pacotes durante os períodos de transmissão de pacotes no segundo modelo, no qual a quantidade média de pacotes chegando à fila é maior, tornando o sistema mais sujeito aos efeitos de *overflow* na memória de tamanho finito na camada de enlace.

Enquanto isso, a partir da Figura 4.11, pode-se constatar que a taxa de perda de pacotes é especialmente sujeita ao valor da relação sinal-ruído média. A taxa global de perda de pacotes sob o modelo de tráfego IPP é melhor para valores maiores de $\bar{\gamma}$, dado que, com o aumento na probabilidade de utilização de estratégias de modulação com maior eficiência espectral, o ganho é maior para modelos de tráfego com maior taxa de transmissão em um mesmo intervalo de tempo; por sua vez, o oposto ocorre para os valores menores de $\bar{\gamma}$. Mais uma vez, constata-se a importância da adoção de limiares ajustados ao modelo de tráfego, pois o valor de ξ para o tráfego IPP é maior quando os limiares são calculados segundo o modelo que utiliza um tráfego de Poisson para todos os valores de $\bar{\gamma}$.

Além disso, pode-se verificar que o desempenho do sistema submetido ao modelo de tráfego IPP é fortemente degradado com o desajuste do vetor de limiares de modulação adaptativa - em outras palavras, o desempenho com limiares otimizados é bem melhor para o tráfego IPP, não sendo adequada a adoção do vetor $\vec{\Gamma}$ proposto para o modelo de Poisson, pois a taxa de perda de pacotes aumenta e a eficiência espectral média diminui quando comparada ao caso em que $\vec{\Gamma}$ é escolhida de forma ajustada ao tráfego IPP. Portanto, é possível afirmar que o desempenho do sistema é fortemente influenciado pelo

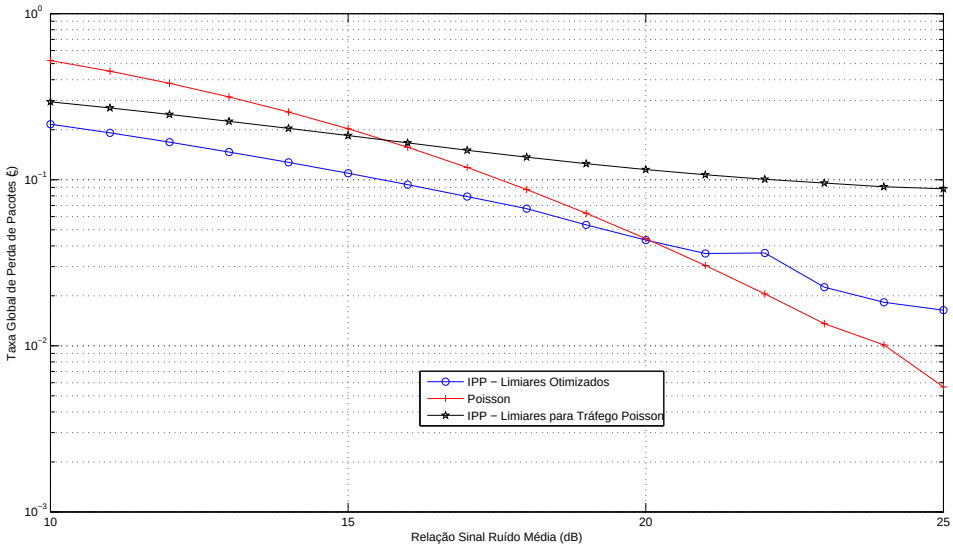

FIG. 4.11: Comparação dos modelos de tráfego a partir da taxa de perda de pacotes do sistema.

modelo de tráfego adotado.

Além disto, não é razoável simplesmente adotar o vetor ajustado ao modelo de Poisson para o cenário sob o tráfego IPP, dado que o desempenho do sistema decresce em toda a faixa investigada de valores de relação sinal-ruído média. Os trabalhos que adotam o modelo de Poisson superestimam o desempenho do sistema quando submetido ao tráfego IPP, fazendo com que os requisitos de qualidade de serviço não sejam atendidos. Tal cenário é ainda pior para realizar o dimensionamento e projeto de redes, pois, caso os recursos disponíveis fossem subestimados, haveria tão somente o desperdício de capacidade do sistema.

Após identificar a necessidade da adoção de modelos de tráfego ajustados para avaliação de desempenho de sistemas, considera-se no caso de estudo descrito a seguir um modelo de tráfego IPP com matrizes $\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 0.8 & 0.2 \\ 0.3 & 0.7 \end{pmatrix}$ e $\Lambda = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 3000 \end{pmatrix}$ em um sistema com um comprimento de fila no transmissor dado por $B = 20$ e 40 pacotes. Assim, a menor taxa alcançável de perda de pacotes, dada por ξ_{min}, e a eficiência espectral média, expressa por S, são avaliadas de forma a descrever o impacto do comprimento da fila sobre o sistema em tela. Os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 4.12 e 4.13.

Tais figuras mostram que o aumento no comprimento da fila promove um pequeno aumento no valor de S para valores mais baixos de relação sinal-ruído média. O aumento

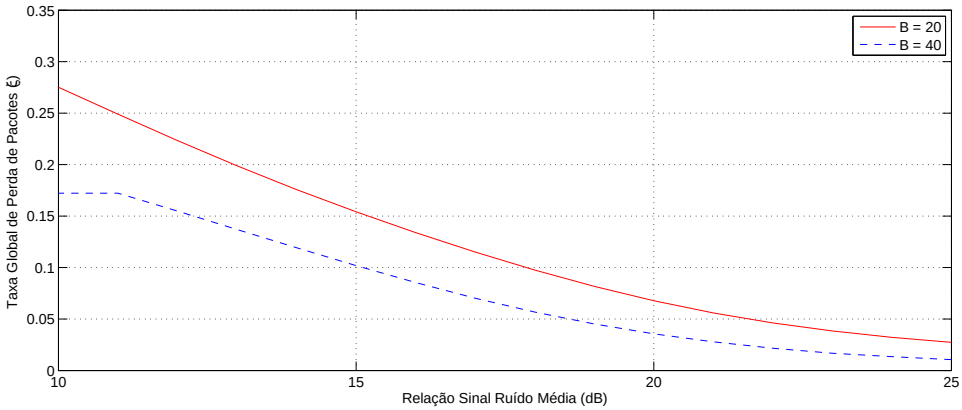

FIG. 4.12: Influência do tamanho da fila no valor de ξ para diferentes valores de relação sinal-ruído média.

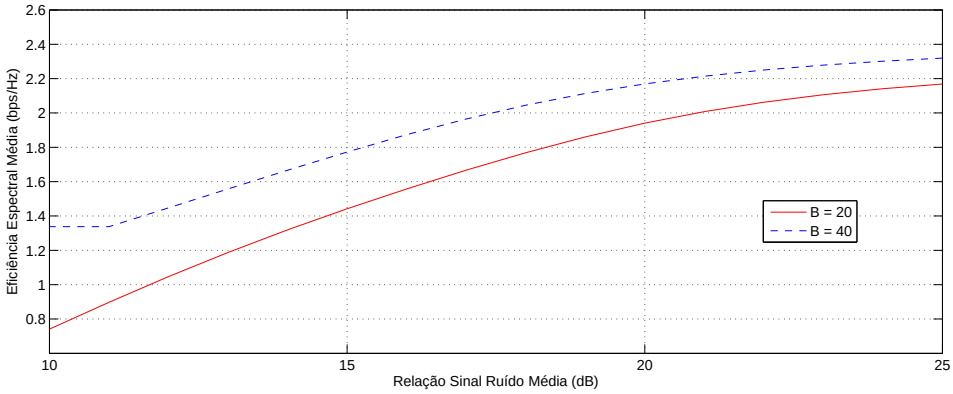

FIG. 4.13: Influência do tamanho da fila no valor de S para diferentes valores de relação sinal-ruído média.

na diferença observada para valores maiores de $\bar{\gamma}$ se justifica pela adoção de estratégias de modulação de maior eficiência espectral média, efeito este conjugado à diminuição na probabilidade de descarte de pacotes verificada em tais cenários. Confirma-se aqui que o aumento no comprimento da fila B diminui a taxa de perda de pacotes ξ.

No estudo seguinte, avalia-se a influência da taxa de chegada de pacotes nos valores de ξ_{min} e $\bar{S}$, a partir da comparação de dois sistemas submetidos a fontes de tráfego de diferentes taxas de chegada de pacotes. As taxas de chegada de pacotes nas duas fontes são descritas pelas matrizes $\Lambda_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 3000 \end{pmatrix}$ e $\Lambda_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 6000 \end{pmatrix}$, respectivamente - logo, tem-se que a taxa média de chegada de pacotes em um sistema sob o modelo de tráfego descrito em Λ_2 é o dobro da verificada sob o modelo Λ_1. Os resultados numéricos apresentados nas Figuras 4.14 e 4.15 foram obtidos para valores de $B = 20$ pacotes.

Assim, o aumento da taxa de chegada de pacotes conduz a valores maiores de ξ; contudo, verifica-se também um aumento de $\bar{S}$, dado que há um maior número de pacotes a serem transmitidos por intervalo de tempo, especialmente para valores maiores de $\bar{\gamma}$.

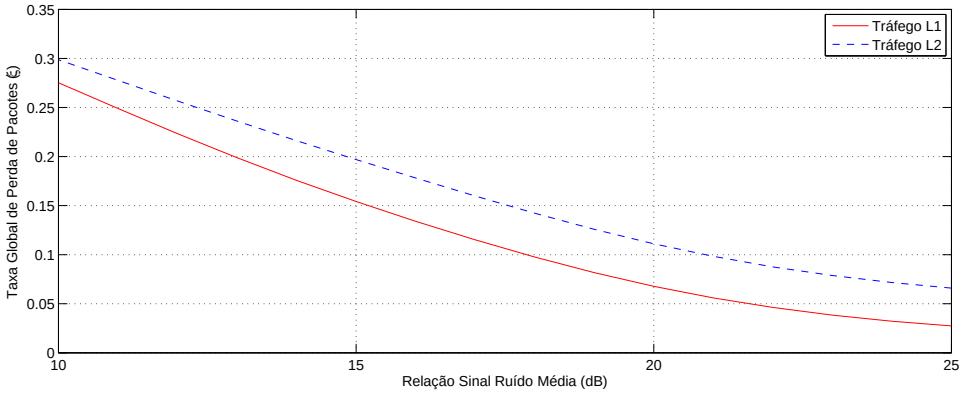

FIG. 4.14: Influência da taxa média de chegada de pacotes no valor de ξ para diferentes valores de relação sinal-ruído média.

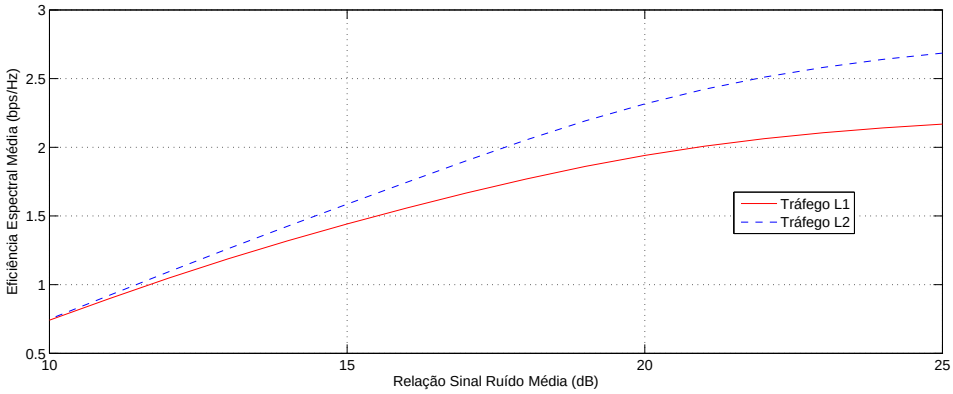

FIG. 4.15: Influência da taxa média de chegada de pacotes no valor de $\bar{S}$ para diferentes valores de relação sinal-ruído média.

Por fim, neste estudo considera-se a influência de períodos de rajada na transmissão de pacotes sobre a taxa mínima de perda de pacotes ξ_{min} e a eficiência espectral média S, a partir da comparação do desempenho do sistema sob duas fontes de tráfego distintas, de mesma taxa média de chegada de pacotes, mas com períodos distintos de transmissão - uma com $P_{on} = 0,4$ e a segunda com $P_{on} = 0,6$, respectivamente. Os resultados numéricos mostrados nas Figuras 4.16 e 4.17 foram obtidos para uma taxa média de chegada de pacotes de $2,4$ pacotes por intervalo de tempo, frequência máxima de desvanecimento Doppler $f_D = 10$ Hz e tamanho de fila $B = 20$ pacotes.

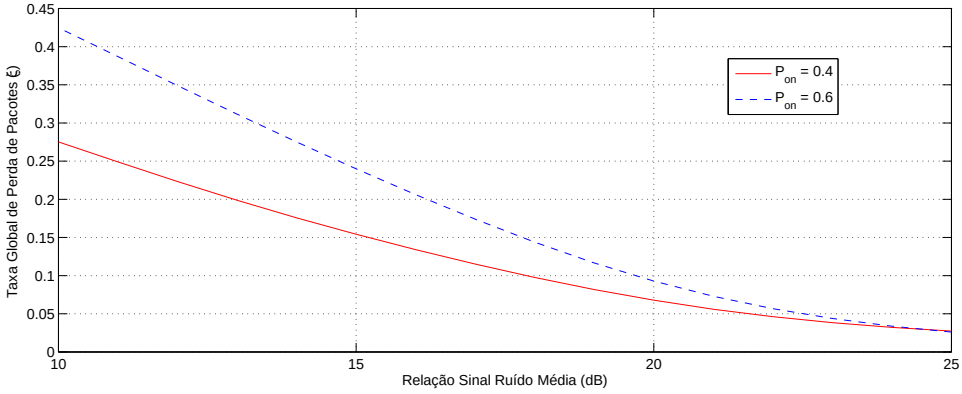

FIG. 4.16: Influência da Taxa de Chegada de Pacotes em ξ de acordo com γ.

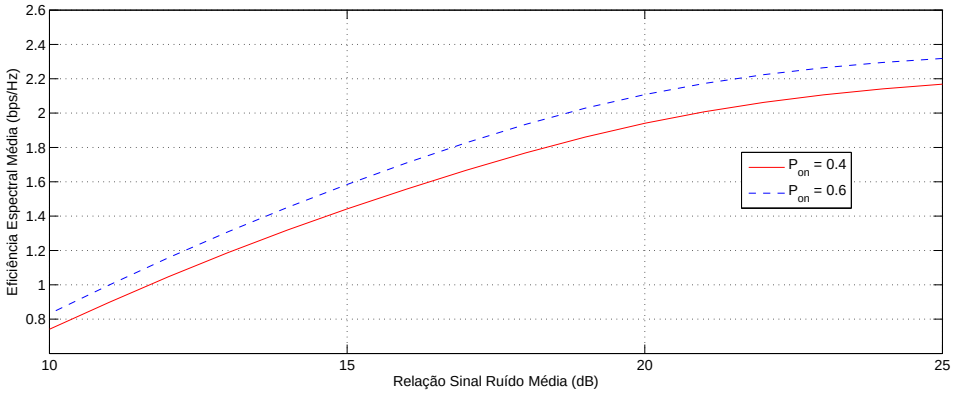

FIG. 4.17: Influência da Taxa de Chegada de Pacotes em $\bar{S}$ de acordo com γ

Neste estudo de caso, observa-se que o modelo com o maior período de transmissão (P_{on} maior) apresenta uma maior eficiência espectral média $\bar{S}$. Tal resultado se mostra coerente, dado que, para um mesmo intervalo entre transmissão de quadros, existe uma maior quantidade de eventos de transmissão quando $P_{on} = 0,6$, pois, em média, existem pacotes chegando à fila em sessenta por cento do tempo. Desta forma, o limitante para a vazão do sistema deixa de ser a relação sinal-ruído instantânea, mas o processo de chegada de pacotes, dado que um período maior de silêncio do transmissor acaba por reduzir a vazão média do sistema.

Por outro lado, o aumento do período de transmissão também conduz a valores de ξ mais elevados, especialmente para os valores mais baixos de γ, em função do aumento da probabilidade de descarte de pacotes. A quantidade de pacotes descartados diminui em $P_{on} = 0,4$ porque há uma quantidade menor de eventos de chegada, o que reduz a possibilidade de sobrecarga na fila do transmissor durante os intervalos de tempo em que poucos ou mesmo nenhum pacote é transmitido através do canal. Assim, percebe-se

mais uma vez que o limitante para a taxa de perda de pacotes do sistema é o processo de chegada de pacotes para valores de γ mais baixos e o comportamento do canal para valores de γ mais altos - o que explica o fato de os valores de ξ se aproximarem à medida que aumenta o valor de γ.

4.3 RESUMO

Neste capítulo, após uma revisão de alguns trabalhos existentes na literatura nas áreas de transmissão adaptativa e projetos de cooperação entre camadas para redes sem fio, é proposta uma nova estratégia de projeto, com a integração de métricas de camadas física e de enlace. Isso se verifica, pois os limiares de transmissão adaptativa são calculados não só com base no estado do canal de transmissão, mas também do comportamento da fila na camada de enlace. No estudo de caso, o comportamento do sistema na topologia de referência é avaliado, a partir da identificação do impacto de parâmetros de camada física, enlace e aplicação no desempenho da rede. Mesmo para um modelo de tráfego simplista como o de Poisson, percebe-se o ganho da integração de métricas neste tipo de projeto, conduzindo a configurações de rede melhor orientadas sob o ponto de vista da aplicação.

Os resultados obtidos mostram que não basta simplesmente considerar os resultados advindos do emprego do modelo de Poisson como um caso geral para outros modelos de tráfego com mesma taxa média. Verifica-se também que os trabalhos que adotam o modelo de Poisson superestimam o desempenho do sistema quando submetido ao tráfego IPP, fazendo com que os requisitos de qualidade de serviço não sejam atendidos - problema grave para o dimensionamento e projeto de redes. Além disso, constata-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. Com isto, mostra-se o ganho auferido com a adoção de uma nova estratégia *cross-layer* de adaptação de camada física, considerando parâmetros das camadas física, enlace e aplicação, como o aumento da eficiência espectral média associado a uma diminuição da taxa de perda de pacotes.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

Boa parte dos trabalhos identificados na literatura relacionados ao desenvolvimento de estratégias de cooperação entre camadas para redes sem fio adaptativas não se vale de mecanismos integrados nas propostas de cooperação entre camadas; mesmo os modelos de tráfego empregados, muitas vezes, apresentam simplificações. Em geral, tais propostas apresentam projetos de cooperação entre camadas que não alteram a estrutura de independência das camadas. Além disto, na maioria dos trabalhos investigados, 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 são calculados de forma indireta. Não são apresentadas avaliações para modelos mais realistas de tráfego, e os resultados aqui apresentados para o modelo de Poisson indicam que as previsões obtidas para o desempenho do sistema são otimistas em relação à realidade, o que prejudica o dimensionamento correto de redes militares sem fio.

Neste trabalho de tese, propõe-se uma nova estratégia para otimização com cooperação entre camadas em redes militares sem fio. Diferentemente de trabalhos anteriores, que estabelecem estratégias de transmissão independentes para otimização de cada camada e depois verificam o desempenho global do sistema com modelos de tráfego pouco realistas, apresenta-se uma estratégia integrada de cooperação entre camadas. Aqui, avalia-se o impacto que parâmetros selecionados da camada física (a relação sinal-ruído média e a frequência máxima de desvanecimento Doppler), de enlace (tamanho máximo da fila no transmissor) e de aplicação (a taxa média de chegada de pacotes, a probabilidade de transmissão de rajadas e a relação entre períodos de transmissão e de silêncio) exercem sobre o desempenho de todo o sistema, avaliado com métricas como a eficiência espectral média e a taxa global de perda de pacotes.

Os pontos em aberto que motivaram esta tese são:

a) Modelos analíticos simplificados para avaliação de desempenho de diferentes tipos de tráfego multimídia em sistemas adaptativos de comunicações.

b) Avaliação de desempenho para modelos mais simples de tráfego em sistemas adaptativos de comunicações.

c) Utilização de métricas de camada física em estratégias de otimização *cross-layer*.

d) Os trabalhos versando sobre cooperação entre camadas em redes sem fio adaptativas utilizam modelos simplificados para descrever, a um só tempo, o efeito do canal, o estado da camada física e os requisitos de qualidade de serviço na descrição do comportamento e estabilidade do sistema.

As contribuições desta tese são: a proposta do modelo de entradas generalizadas e serviços determinísticos (EGSD), o emprego de um novo modelo para avaliação de desempenho de redes sem fio adaptativas e uma nova estratégia integradora de projeto de cooperação entre camadas, reunindo informações das camadas física, de enlace e de aplicação, todas elas validadas a partir da comparação dos resultados apresentados pelos modelos propostos com os obtidos nos experimentos de simulação numérica. São considerados os efeitos da modulação adaptativa e do tamanho da fila, bem como dos modelos de tráfego dos usuários típicos.

Isso posto, esta tese apresenta as seguintes conclusões:

a) Desenvolvimento de um modelo analítico em Teoria das Filas - o modelo de fila $MM(\sum_1^K)CPP/G^Y/1/B$, com entradas generalizadas e serviços determinísticos (EGSD). O objetivo particular desta contribuição é apresentar uma nova alternativa de modelo de tráfego multimídia em redes sem fio adaptativas, considerando a taxa média de chegada de pacotes, eventos de transmissão em rajadas e a correlação temporal nos processos de entrada e de atendimento de pacotes. Assim, com o modelo EGSD, é possível descrever de forma precisa o impacto de parâmetros de camada física e de enlace no comportamento de filas do tipo $MM(\sum_1^K)CPP/G^Y/1/B$, permitindo escolhas mais apropriadas de estratégias de modulação e de tamanhos de fila, bem como o estudo do efeito da correlação temporal dos processos de saída em lotes nos valores obtidos.

b) Avaliação de desempenho em sistemas adaptativos de comunicações considerando modelos de tráfego mais elaborados (agregados de voz e dados, multimídia). Os resultados obtidos mostram que não basta simplesmente considerar o modelo de Poisson como um caso geral para outros modelos de tráfego com mesma taxa média, não só pela mudança na eficiência espectral observada, mas especialmente pelas

sensíveis diferenças na vazão do sistema e na perda verificada na camada de enlace, quando comparadas aos valores descritos por modelos mais realistas de tráfego. Os resultados apresentados para o modelo de Poisson indicam que as previsões obtidas para o desempenho do sistema são otimistas, o que prejudica o dimensionamento e o projeto corretos de redes militares sem fio. Considerando o contexto maior da tese - o projeto de cooperação entre camadas - vê-se que a escolha de limiares de adaptação estritamente em função de parâmetros de camada física é uma estratégia sub-ótima 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.

c) Proposta de nova estratégia *cross-layer* de adaptação de camada física, considerando parâmetros das camadas física, enlace e aplicação, em lugar do emprego de métricas estritamente de camada física em projetos de cooperação entre camadas. A partir da metodologia integradora de parâmetros de diversas camadas, pode-se constatar ganhos expressivos para valores de relação sinal-ruído média, inclusive com vantagens que, em primeira análise, seriam antagônicas, como o aumento da eficiência espectral média associado a uma diminuição da taxa de perda de pacotes. Percebe-se que a metodologia integradora de escolha dos limiares de modulação adaptativa permite a identificação de configurações mais ajustadas do que as descritas anteriormente.

d) Simulador para Avaliação de Desempenho de Estratégias de Cooperação entre Camadas em Redes sem Fio Adaptativas: este trabalho de tese apresenta uma nova ferramenta de simulação para redes sem fio adaptativas, desenvolvida com o objetivo de avaliar o desempenho de aplicações típicas de cenários militares em projetos *cross-layer* para redes sem fio adaptativas. São apresentados estudos de caso utilizando a ferramenta, comparando quatro modelos de tráfego (Poisson, HTTP, voz e vídeo) e agregados de dados em um cenário típico de operações táticas, 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 estado da camada de enlace no transmissor.

5.2 PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

A despeito das contribuições oriundas do presente trabalho, certamente há diversas oportunidades de pesquisa em aberto. Desta forma, o trabalho de avaliação e projeto de redes sem fio adaptativas aplicadas em sistemas táticos militares podem ser estendidos de diversas formas, como:

a) Avaliação do impacto dos distúrbios do canal de retorno na estratégia proposta: mesmo nas situações em que o uso da transmissão adaptativa é possível e recomendado, restam aspectos em aberto, associados à aquisição da informação de estado do canal, como atraso e erro no canal de retorno, como descrito em BERNAT JUNIOR (2007) e EKPENYONG (2007), respectivamente. Este trabalho dedicou-se à análise e avaliação de sistemas adaptativos sem fio, tendo por objetivo a maximização da eficiência espectral em um cenário típico de redes táticas militares - a ligação entre o Posto de Comando de uma Brigada e o comando de unidades subordinadas, como batalhões, regimentos e companhias isoladas - considerando a existência de um canal de retorno ideal.

   Grande parte dos trabalhos trata o canal de retorno como ideal, ou seja, sem erro e sem atraso, baseados na hipótese de que tais erros podem ser desprezados com o emprego de códigos corretores de erro, tal qual mencionado em GALDINO (2008). Contudo, na prática, essa abordagem tem o inconveniente de desperdiçar largura de banda do canal de retorno com a transmissão de redundâncias para corrigir erros e, principalmente, de aumentar o atraso existente entre a estimação das condições de propagação e o emprego desta informação na transmissão do próximo bloco de dados, face a necessidade de emprego de entrelaçadores.

   A condição de invariância no comportamento do canal ao longo da transmissão de um bloco, os efeitos de atraso e erros de estimação e de transmissão no canal de retorno podem ser inseridos no simulador apresentado em D.F.C. MOURA, J.F. GALDINO AND R. M. SALLES (2009) e no modelo EGSD. Assim, valores mais realistas de desempenho do sistema podem ser determinados, com grande contribuição em relação aos modelos relacionados na literatura.

b) Avaliação de desempenho e compartilhamento espectral em sistemas adaptativos de comunicações: o estudo contemplado na proposta descreve apenas um ambiente mono-usuário. Situações de competição entre usuários já foram contempladas em

trabalhos preliminares deste trabalho de tese (MOURA (2008a)), indicando a importância da análise dos parâmetros de camada física na alocação espectral de um cenário de combate; entretanto, os modelos de canal e tráfego são simplificados.

Desta forma, uma extensão natural do presente trabalho é a investigação da coexistência de redes sem fio adaptativas. Por exemplo, permanecem em aberto a identificação de existência e unicidade das condições de equilíbrio do sistema com múltiplos regimentos instalados no terreno, bem como a comparação dos resultados obtidos com as situações desejadas pelo comandante da operação militar. Além disso, resta saber se a velocidade de convergência é compatível e oportuna às necessidades do combate, bem como se existem mecanismos de incentivo à cooperação entre os diferentes escalões do combate. Trabalhos versando sobre acesso espectral em redes sem fio adaptativas utilizam modelos simplificados para descrever o efeito do canal, o estado da camada física e os requisitos de qualidade de serviço na descrição do comportamento e estabilidade do sistema.

Situações de competição entre usuários já foram contempladas em trabalhos preliminares desta tese, indicando a importância da análise dos parâmetros de camada física na alocação espectral de um cenário de combate; entretanto, não são utilizados modelos de desvanecimento de canal mais elaborados, como Nakagami ou Rayleigh.

c) Aprimoramento do Simulador para Avaliação de Desempenho de Estratégias de Cooperação entre Camadas em Redes sem Fio Adaptativas: encontram-se em desenvolvimento evoluções ao simulador original, com o objetivo de permitir a representação de outros modelos de redes táticas sem fio. A primeira mudança diz respeito à forma de atendimento, permitindo o simulador trabalhar também na forma não-determinística. Além disso, percebe-se que 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 do emprego de técnicas de modulação OFDM). Por fim, vislumbra-se a inserção de cenários de compartilhamento espectral, contemplando os efeitos da coexistência de redes sem fio adaptativas, não só como representação de ambientes militares, mas também civis. 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

(2008b).

5.3 PUBLICAÇÕES

Esta seção descreve os trabalhos publicados e submetidos diretamente relacionados a esta tese.

- Novas perspectivas tecnológicas para o emprego das comunicações no Exército Brasileiro. In: Revista Militar de Ciência e Tecnologia (RMCT), Ago 2008.
- Avaliação do Compartilhamento Espectral em Redes Cognitivas utilizando Jogos Evolucionários. Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, (SBrT), Brasil, Set 2008.
- Autonomic Radio Networks Channel Allocation, IEEE MILCOM, EUA, Nov 2008.
- Simulador para Avaliação de Desempenho de Projetos Cross-Layer em Redes sem Fio Adaptativas, WPerformance, SBC, Brasil, Jul 2009.
- Generalized Input Deterministic Service queue model: analysis and performance issues for wireless tactical networks, IEEE Communications Letters, Dez 2009.
- A Joint Method for Cross-Layer Design over Adaptive Wireless Networks, 8th International Information and Telecommunication Technologies Symposium, Brasil, Dez 2009.
- Multimedia Traffic Robustness and Performance Evaluation on a Cross-Layer Design for Tactical Wireless Networks, 9th International Information and Telecommunication Technologies Symposium, Brasil, Dez 2010.
- Generalized Batch Input Deterministic Service queue model: capacity dimensioning method for wireless tactical networks, submetido ao Elsevier Simulation Modelling Practice and Theory.
- Avaliação de Desempenho de Tráfego Multimídia em Sistema Tático de Comunicações do Exército Brasileiro, submetido ao Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, (SBrT), Brasil, Out 2011.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAN, I. J. B. F. e KULKARNI, V. G. **Single-server queue with markov-dependent inter-arrival and service times**. *Queueing Syst. Theory Appl.*, 45(2):113–134, 2003. ISSN 0257-0130.

ADAS, A. **Traffic models in broadband networks**. *IEEE Communications Magazine*, 35:82–89, 1997.

AKAR, N., OGUZ, N. e SOHRABY, K. **Matrix-geometric solutions of m/g/1-type markov chains: a unifying generalized state-space approach**. *IEEE JSAC*, 16 (5):626–639, Jun 1998. ISSN 0733-8716.

AKYILDIZ, I., SU, W., SANKARASUBRAMANIAM, Y. e CAYIRCI, E. **A survey on sensor networks**. *Communications Magazine, IEEE*, 40(8):102–114, Aug 2002.

ALOUINI, M. S. e GOLDSMITH, A. J. **Adaptive modulation over nakagami fading channels**. *In: Wireless Personal Communications*, 13(1-2):119–143, May 2000.

ASHOUR, M. e LE-NGOC, T. **Priority queuing of long-range dependent traffic**. *Computer Communications, Elsevier*, 31(17):3954–3963, Nov 2008.

BAUGH, C. R., HUANG, J., SCHWARTZ, R. e TRINKWON, D. Traffic model for 802.16 tg3 mac/phy simulations. Technical report, IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group - IEEE 802.16.3c-01/30r1, Bellevue, WA, USA, 2001.

BAYKAL-GURSOY, M. e DUAN, Z. M/m/c queues with markov modulated service processes. Em *Valuetools '06: Proceedings of the 1st international conference on Performance evaluation methodolgies and tools*, pág. 38, New York, NY, USA, 2006. ACM. ISBN 1-59593-504-5.

BERNAT JUNIOR, S. C. ***Modulação Adaptativa baseada na Predição da Métrica de Adaptação para Canais com Desvanecimento Plano***. Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia (IME), Dezembro 2007.

CHAKKA, R. e DO, T. **The MMCPPk/GE/c/L G-queue with heterogeneous servers: Steady state solution and an application to performance evaluation**. *Perform. Eval.*, 64(3):191–209, 2007. ISSN 0166-5316.

CHANG, S. H. e CHOI, D. W. **Modeling and performance analysis of a finite-buffer queue with batch arrivals, batch services, and setup times: The MX/GY/1/K + B queue with setup times**. *INFORMS J. on Computing*, 18 (2):218–228, 2006. ISSN 1526-5528.

CHENG, Y., LING, X., SONG, W., CAI, L., ZHUANG, W. e SHEN, X. **A cross-layer approach for wlan voice capacity planning**. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 25(4):678–688, May 2007. ISSN 0733-8716.

CLEGG, R. G. **A discrete-time markov-modulated queuing system with batched arrivals**. *Perform. Eval.*, 67(5):376–385, 2010. ISSN 0166-5316.

CONTI, A., M. Z. W. e CHIANI, M. **Invertible bounds for m-qam in rayleigh fading**. *In: IEEE Transactions on Wireless Communications*, 4(5):1994–2000, Sep 2005.

DE SOUZA E SILVA, E., FIGUEIREDO, D. R. e LEÃO, R. M. **The tangramii integrated modeling environment for computer systems and networks**. *SIGMETRICS Perform. Eval. Rev.*, 36(4):64–69, 2009. ISSN 0163-5999.

D.F.C. MOURA, J.F. GALDINO AND R. M. SALLES. Simulador para Avaliação de Desempenho de Projetos Cross-Layer em Redes sem Fio Adaptativas. Em *VIII WPerformance, SBC*, págs. 1–16, Bento Gonçalves, Brazil, Jul 2009. SBC - Sociedade Brasileira de Computação.

DIETER CLAEYS, KOENRAAD LAEVENS, J. W. e BRUNEEL, H. Delay in a discrete-time queueing model with batch arrivals and batch services. Em *Fifth International Conference on Information Technology: New Generations, 2008.*, págs. 1040–1045, New Orleans, LA, USA, Dec 2008. IEEE Computer Society.

DUONG, T., ZEPERNICK, H.-J. e FIEDLER, M. Cross-layer design for integrated mobile multimedia networks with strict priority traffic. Em *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2010 IEEE*, págs. 1 –6, April 2010.

EKPENYONG, A. e HUANG, Y.-F. **Feedback constraints for adaptive transmission**. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 24(3):69–78, May 2007.

EKPENYONG, A. E. e HUANG, Y.-F. **Feedback-detection strategies for adaptive modulation systems**. *In: IEEE Transactions on Communications*, 54(10):1735–1740, Oct 2006.

FERNG, H.-W. e CHANG, J.-F. **The departure process of discrete-time queueing systems with markovian type inputs**. *Queueing Syst. Theory Appl.*, 36(1/3):201–220, 2000. ISSN 0257-0130.

FERNG, H.-W. e CHANG, J.-F. **Departure processes of bmap/g/1 queues**. *Queueing Syst. Theory Appl.*, 39(2/3):109–135, 2001. ISSN 0257-0130.

FOUKALAS, F., GAZIS, V. e ALONISTIOTI, N. **Cross-layer design proposals for wireless mobile networks: a survey and taxonomy**. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 10(1):70–85, 2008.

GALDINO, J. F. e GURJÃO, E. C. **Otimização de limiares para adaptação de modulação diante de erros do canal de retorno**. *XXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, Set 2008.

GHAVAMI, A. e ASHTIANI, F. A new cross layer design of adaptive modulation and coding in finite buffer wireless links. Em *FGCN '07: Proceedings of the Future Generation Communication and Networking*, págs. 499–504, Washington, DC, USA, 2007. IEEE Computer Society. ISBN 0-7695-3048-6.

GROSS, D. e HARRIS, C. ***Fundamentals of Queueing Theory***. Wiley-Interscience, February 1998. ISBN 0471170836.

GUPTA, U. C. e GOSWAMI, V. **Performance analysis of finite buffer discrete-time queue with bulk service**. *Computers Operations Research*, 29(10):1331 – 1341, 2002. ISSN 0305-0548. URL `http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VC5-45D8KPF-4/2/bef042ccab2cf0ab0d8acc3e8768a76f`.

HAI-BO, X., HUI, T. e YUAN, F. **Cross-layer resource allocation for qos guarantee with finite queue constraint in multirate ofdma wireless networks**. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 15(3):87–94, Sep 2008.

HARSINI, J. S. e LAHOUTI, F. **Adaptive transmission policy design for delay-sensitive and bursty packet traffic over wireless fading channels**. *Trans. Wireless. Comm.*, 8:776–786, February 2009. ISSN 1536-1276. URL `http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1657673.1657711`.

HARSINI, J. e LAHOUTI, F. Queuing with adaptive modulation over mimo wireless links for deadline constrained traffic: Cross-layer analysis and design. Em *Communications, 2007. ICC '07. IEEE International Conference on*, págs. 235–240, June 2007.

HOANG, A. T. e MOTANI, M. **Cross-layer adaptive transmission: Optimal strategies in fading channels**. *IEEE Trans. on Communications*, 56(5):1–9, maio 2008.

ISHIZAKI, F. e G.U.HWANG. **Cross-layer design and analysis of wireless networks using the effective bandwidth function**. *IEEE Trans. Wireless Communications*, 6(9):3214–3219, setembro 2007.

IZMAILOV, A. e SODOLOV, M. ***Otimização - volume 2, Métodos Computacionais***. Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada, Rio de Janeiro, 2007.

JAFARI, R. e SOHRABY, I. Combined m/g/1-g/m/1 type structured chains: a simple algorithmic solution and applications. volume 2, págs. 1065–1074, 2001.

JAFARI, R. e SOHRABY, K. General discrete-time queueing systems with correlated batch arrivals and departures. volume 1, págs. 181–188 vol.1, 2000.

JI-HONG LI, W.-Q. L. e SHUO TIAN, N. **Steady-state analysis of a discrete-time batch arrival queue with working vacations**. *Performance Evaluation*, 67(11): 897–912, 2010. ISSN 0166-5316.

KARMOKAR, A. e BHARGAVA, V. **Performance of cross-layer optimal adaptive transmission techniques over diversity nakagami-m fading channels**. *Communications, IEEE Transactions on*, 57(12):3640 –3652, December 2009. ISSN 0090-6778.

KHAN, S., PENG, Y., STEINBACH, E., SGROI, M. e KELLERER, W. **Application-driven cross-layer optimization for video streaming over wireless networks**. *Communications Magazine, IEEE*, 44(1):122–130, 2006.

KLEINROCK, L. ***Theory, Volume 1, Queueing Systems***. Wiley-Interscience, 1975. ISBN 0471491101.

KOBBANE, A., EL-AZOUZI, R. e BOUYAKHF, E. A queuing analysis of packet dropping for real-time applications in wireless networks. págs. 556–561, July 2008.

LAW, A. M. ***Simulation, Modeling and Analysis***. McGraw-Hill, 2007.

LEE, H. W., CHEON, S. H., LEE, S. W. e BAEK, J. W. **Performance of the map/g/1 queue under the dyadic control of workload and server idleness**. *Discrete Event Dynamic Systems*, 18(4):537–562, 2008. ISSN 0924-6703.

LIU, Q., ZHOU, S. e GIANNAKIS, G. **Queuing with adaptive modulation and coding over wireless links: Cross-layer analysis and design**. *IEEE Trans. Wireless Comm.*, 4(3):1142–1153, maio 2005.

MACHADO, I. F. C. e GALDINO, J. F. **Erros do canal de retorno em sistemas que empregam modulação adaptativa**. *XXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, Set 2009.

MAHABHASHYAM, S. R. e GAUTAM, N. **On queues with markov modulated service rates**. *Queueing Syst. Theory Appl.*, 51(1-2):89–113, 2005. ISSN 0257-0130.

MITRANI, I. **Approximate solutions for heavily loaded markov-modulated queues**. *Perform. Eval.*, 62(1-4):117–131, 2005. ISSN 0166-5316.

MITRANI, I. e CHAKKA, R. **Spectral expansion solution for a class of markov models: application and comparison with the matrix-geometric method**. *Perform. Eval.*, 23(3):241–260, 1995. ISSN 0166-5316.

MOURA, D., GALDINO, J. e SALLES, R. Autonomic radio networks channel allocation. Em *Military Communications Conference, 2008. MILCOM 2008. IEEE*, págs. 1–7, Nov. 2008a.

MOURA, D., GALDINO, J. e SALLES, R. Autonomic radio networks channel allocation. Em *Military Communications Conference, 2008. MILCOM 2008. IEEE*, págs. 1–7, Nov 2008b.

ns. Ns-2, "the network simulator". http://www.isi.edu/nsnam/ns/, 2008.

omnet. Omnet++ homepage. http://www.omnetpp.org/, 2009.

PARK, C. G., HAN, D. H. e LEE, Y. Queueing analysis of dynamic bandwidth allocation scheme for ip traffic on atm networks. Em *ISCC '02: Proceedings of the Seventh International Symposium on Computers and Communications (ISCC'02)*, pág. 653, Washington, DC, USA, 2002. IEEE Computer Society. ISBN 0-7695-1671-8.

PROAKIS, J. G. ***Digital Communications***. McGraw-Hill, 2000.

RAMIS, J., FEMENIAS, G. e CARRASCO, L. Cross-layer design of multi-rate wireless networks based on link layer truncated arq. Em *Cross Layer Design, 2009. IWCLD '09. Second International Workshop on*, págs. 1 –5, June 2009.

SALLES, R. M., MOURA, D. F. C., CARVALHO, J. M. A. e SILVA, M. R. **Novas perspectivas tecnológicas para o emprego das comunicações no exército brasileiro**. *In: Revista Militar de Ciência e Tecnologia (RMCT)*, XXV:68–80, Ago 2008.

SALVADOR, P., VALADAS, R. T. e PACHECO, A. **Multiscale fitting procedure using markov modulated poisson processes**. *Telecommunication Systems*, 23(1-2):123–148, 2003.

SHADMAND, A., NEHRA, K. e SHIKH-BAHAEI, M. **Cross-layer design in dynamic spectrum sharing systems**. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2010.

SIKDAR, K. e GUPTA, U. C. **On the batch arrival batch service queue with finite buffer under server's vacation: Mx/gy/1/n queue**. *Comput. Math. Appl.*, 56 (11):2861–2873, 2008. ISSN 0898-1221.

TADJ, L. e CHOUDHURY, G. **Optimal design and control of queues**. *TOP: An Official Journal of the Spanish Society of Statistics and Operations Research*, 13(2):359–412, December 2005. URL `http://ideas.repec.org/a/spr/topjnl/v13y2005i2p359-412.html`.

TORRANCE, J. M., D. D. e HANZO, L. **The potential and limitations of adaptive modulation over slow rayleigh fading channels**. *In: IEEE*, 1996a.

TORRANCE, J. M. e HANZO, L. **Optimisation of switching levels for adaptive modulation in slow rayleigh fading**. *In: IEE Electronics Letters*, 32(13):1167–1169, June 1996b.

TORRANCE, J. M. e HANZO, L. **Upper bound performance of adaptive modulation in a slow rayleigh fading channel**. *In: Electronics Letters*, 32(32):718–719, Apr 1996c.

(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**.

VASSILARAS, S. **A cross-layer optimized adaptive modulation and coding scheme for transmission of streaming media over wireless links**. *Wirel. Netw.*, 16:903–914, May 2010. ISSN 1022-0038. URL `http://dx.doi.org/10.1007/s11276-009-0176-z`.

WANG, Y.-C. Performance evaluation of multimedia services over rayleigh fading channel. Em *International Computer Symposium, 2004*, págs. 1–5, Dec. 2004.

ZHENG, K., WANG, Y., LEI, L. e WANG, W. **Cross-layer queuing analysis on multihop relaying networks with adaptive modulation and coding**. *IET Communications*, 4(3):295–302, 2010. URL `http://link.aip.org/link/?COM/4/295/1`.

ZHOU, S., ZHANG, K., NIU, Z. e YANG, Y. Queuing analysis on mimo systems with adaptive modulation and coding. Em *Communications, 2008. ICC '08. IEEE International Conference on*, págs. 3400–3405, May 2008.

A APÊNDICES

A.1 DESCRIÇÃO DO SIMULADOR

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* em ns, Tangram II em DE SOUZA ESILVA (2009) e OMNeT++ em omnet, 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 de técnicas de modulação digital utilizadas em redes sem fio adaptativas. 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: relacionado à perda de pacotes na fila (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).

A.1.1 MODELOS DE ENTRADA DE PACOTES

Os processos de entrada já implementados 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 A.1:

	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

TAB. A.1: Parâmetros para o agregado de vídeo, conforme BAUGH (2001)

- Fonte de tráfego HTTP com pacotes de 1080 bits, representados por um modelo *On/Off* conforme apresentado em ASHOUR (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.

A.1.2 MODELO DE SERVIÇO DE PACOTES

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 A.2:

	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

TAB. A.2: Modos de Transmissão Implementados

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 (2008), LIU (2005) e GHAVAMI (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_{ts}) e a quantidade de pacotes transmitidos é dependente do 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 deterministíco, 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 fila 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 A.1, 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 fila 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 fila do transmissor. Assim, o modelo geral da probabilidade de transição entre estados (r, j) e (q, i) é dado por $V_{(r,j),(q,i)} = P_{i,j} Pc(A_t = r + i - q | tempo = T_{ts})$.

A.1.3 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

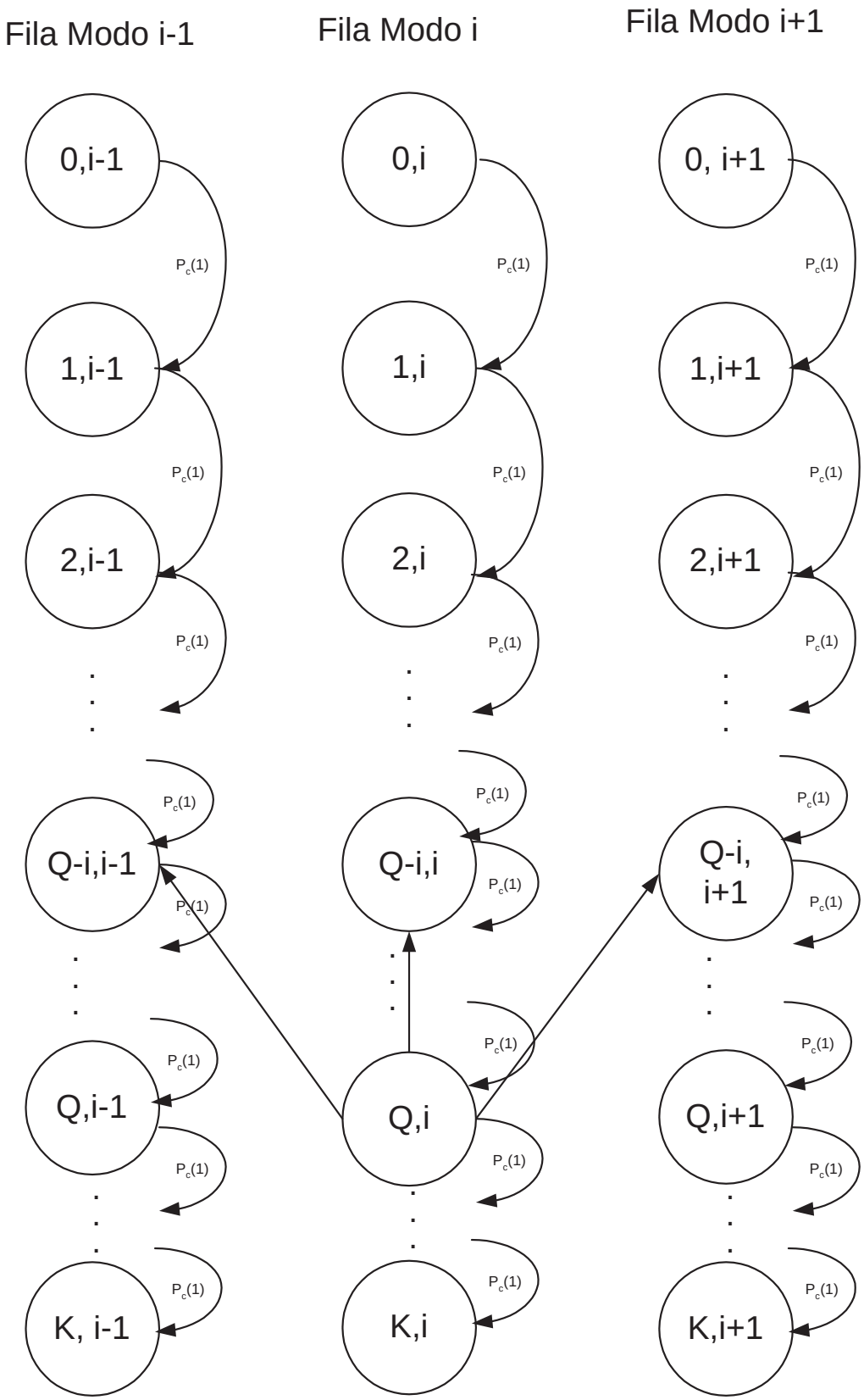

FIG. A.1: Modelo de Serviço.

de estados descrito na Seção A.1.2 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 (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 $B = 10$ 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 pacotes a cada $T_{ts} = 2$ ms.

As figuras A.2 e A.3 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.

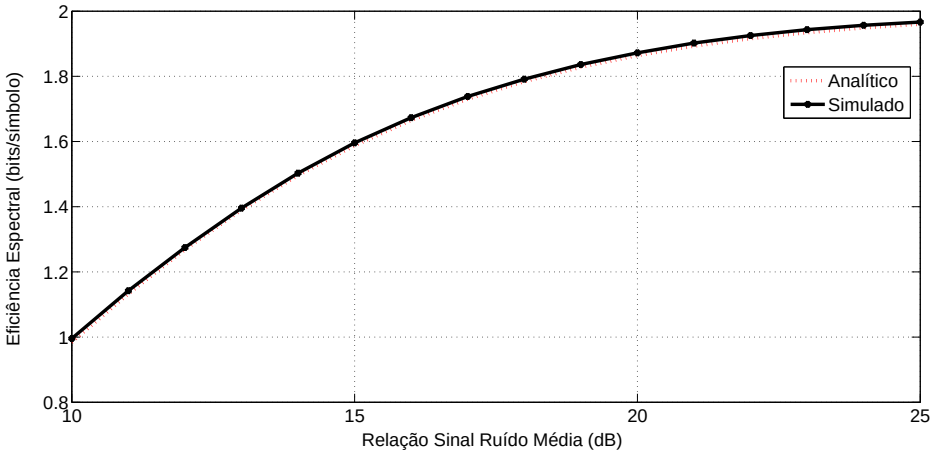

FIG. A.2: Comparação de Resultados - Eficiência espectral.

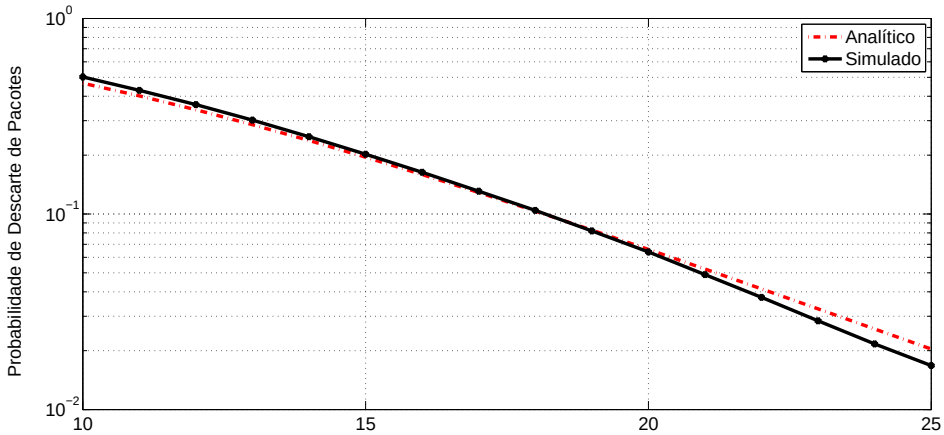

FIG. A.3: Comparação de Resultados - Probabilidade de Descarte.