

# Análise e Modelagem de Perda de Pacotes em Redes 802.11 em Ambientes *Indoor* \*

Kleber V. Cardoso<sup>1</sup>, José F. de Rezende<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GTA - PEE - COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)  
Caixa Postal 68.504 – 21.945-970 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil

{kleber, rezende}@gta.ufrj.br

**Abstract.** *This paper presents an analysis of packet loss in IEEE 802.11 networks under indoor environment restrictions and it also discusses statistical models that have been used to represent this sort of process. It was done the evaluation of the Gilbert-Elliot model which do not proper represents some important statistical features, such as loss bursts distribution and autocorrelation.*

**Resumo.** *Este artigo faz uma análise de perda de pacotes em redes IEEE 802.11 em ambientes indoor e discute os modelos estatísticos utilizados para a sua representação. É realizada ainda uma avaliação do clássico modelo de Gilbert-Elliot, o qual se mostrou incapaz de reproduzir adequadamente algumas propriedades estatísticas importantes, como a distribuição do comprimento das rajadas de perda e a autocorrelação do processo.*

## 1. Introdução

Redes sem fio vêm se tornando cada vez mais comuns, sendo o padrão IEEE 802.11 o mais adotado, sobretudo em ambientes *indoor*. Em redes sem fio, a perda de pacotes é uma métrica de avaliação muito importante, uma vez que a transmissão pelo ar expõe o sinal a um maior número de problemas, como interferência, desvanecimento e multipercurso.

Há vários trabalhos sobre perda de pacotes em redes sem fio, sendo alguns específicos sobre redes 802.11. Porém, os trabalhos sobre perda de pacotes em redes 802.11 ainda prescindem de aspectos importantes na avaliação desse processo e, sobretudo, não apresentam um modelo estatístico amplamente aceito. Alguns trabalhos defendem o uso do modelo de Gilbert-Elliot, o qual se mostrou inadequado conforme resultados apresentados nesse artigo.

## 2. Fundamentação teórica

Nessa seção é proposta uma classificação dos modelos estocásticos que têm sido usados na representação de perda de pacotes e apresentados dois conceitos fundamentais na análise e modelagem do processo de perda: estacionariedade e autocorrelação.

---

\*Este trabalho recebeu recursos dos projetos Giga/RNP (Taquara e GigaBOT), CNPq, FAPERJ e FINEP

## 2.1. Modelos

Os modelos que têm sido usados para descrever a perda de pacotes em redes sem fio podem ser agrupados em quatro categorias: cadeia de Markov de ordem  $k$ , modelo Semi-Markoviano, modelo de Markov Oculto e outros modelos baseados em estados.

Dentre os tipos de modelos citados, a cadeia de Markov de ordem  $k$  é o mais simples. Quanto maior a ordem da cadeia, maior a sua capacidade de representar processos mais complexos. Porém, o número de estados aumenta exponencialmente, o que pode levar a modelos inviáveis de implementar.

Um tipo de modelo muito utilizado em perda de pacotes é o Semi-Markoviano, como pode ser visto em [Carvalho et al. 2005]. Para representar perda de pacotes, esse tipo de modelo pode ter apenas dois estados, um no qual os pacotes sempre são perdidos e outro onde sempre são recebidos com sucesso. O tempo de permanência em cada estado é determinado por uma distribuição. Considerando o número de estados, esse modelo é simples, no entanto, identificar a melhor distribuição e parametrização desta pode tornar a tarefa de modelagem complexa.

Mais recentemente, modelos de Markov Ocultos (*Hidden Markov Models* - HMM) têm sido usados para representar perda de pacotes em redes sem fio, como pode ser visto em [Salamatian and Vaton 2001]. Um HMM consegue representar o processo de perda de forma acurada com um número reduzido de estados. O próprio modelo de Gilbert-Elliot é um modelo de Markov Oculto, porém com apenas dois estados. No entanto, a identificação do número adequado de estados e da estrutura da cadeia (transições entre os estados) são, geralmente, tarefas não triviais.

Por fim, temos outros tipos de modelos que podem utilizar algum artifício adicional ou uma modelagem totalmente direcionada ao que se quer representar. Como exemplos desses modelos, temos o MTA que combina um algoritmo com uma cadeia de Markov de ordem  $k$  ([Konrad et al. 2003]) e o *On-Off* Estendido ([Ji et al. 2004]) que usa uma combinação de distribuições geométricas. Como vantagem, esses modelos apresentam uma representação adequada do processo de perda, mantendo um número tratável de estados. No entanto, esses modelos são altamente associados aos *traces* que representam e a criação do modelo exige muita experiência e habilidade estatística.

## 2.2. Estacionariedade

A não-estacionariedade da perda de pacotes está geralmente associada a um período transiente da rede e, portanto, é importante identificar quando esse fenômeno ocorre a fim de decidir como tratá-lo. Em vários modelos estocásticos, os *traces* que apresentam comportamento não-estacionário são descartados. De acordo com [Box et al. 1994], uma definição intuitiva de um processo estacionário é dada por um processo que permanece em equilíbrio em torno de um nível médio constante. Geralmente, se um processo (ou série de tempo) é **estacionário**, o mesmo pode ser descrito através de sua **média**, **variância** e **função de autocorrelação**. Verificar a estacionariedade de dados coletados de ambientes reais é uma tarefa complexa, sendo negligenciada em vários trabalhos. Para determinados tipos de processos e dependendo do tipo de modelagem que se pretende utilizar, esse tipo de negligência pode levar a erros graves nos resultados obtidos. Nesse trabalho, utilizamos dois testes estatísticos não-paramétricos para verificação de estacionariedade:

Teste de Iteração (*Run Test*) e Teste de Arranjos Reversos (*Reverse Arrangements Test*). Maiores detalhes sobre os mesmos podem ser obtidos em [Bendat and Piersol 1986].

### 2.3. Autocorrelação

Em geral, é útil ter uma medida que seja independente de escala, a qual é obtida com o **coeficiente de correlação**. O coeficiente de correlação pode ser utilizado para variáveis aleatórias de um mesmo processo estocástico e, nesse caso, é obtida a correlação entre  $X(t)$  e  $X(t + h)$ , onde  $h$  é o atraso (*lag*) ou defasagem. Nesse caso, tem-se o coeficiente de **autocorrelação**. [Box et al. 1994] apresenta uma estimativa para a função de autocorrelação, também conhecida como **função de autocorrelação amostral** que é útil quando se precisa obter o coeficiente a partir dos dados coletados de um processo que não se conhece. Nesse documento, utilizamos a função de autocorrelação amostral como uma métrica de avaliação de modelos para perda de pacotes.

### 3. Coleta dos dados experimentais

Para realizar a coleta do tráfego que foi usado na análise e modelagem da perda de pacotes, foi criado um ambiente de testes que representa uma rede 802.11b *indoor* típica. Os testes foram realizados com equipamentos LinkSys WRT54G e uma versão modificada e portada para a plataforma MIPS da ferramenta Tangram-II *Traffic Generator*<sup>1</sup> para geração dos pacotes. A rede foi configurada em modo *ad-hoc* para permitir que os pares se comunicassem diretamente e se reduzisse a quantidade de informações de controle. Os pacotes foram gerados em *multicast* para evitar que o controle de erro da camada de enlace fosse ativado e, então, ocorressem retransmissões de pacotes perdidos. A coleta dos dados foi feita utilizando pacotes de 500 e 1400 *bytes*, interfaces configuradas com taxa fixa de 11Mbps e intervalo de 10ms entre os pacotes.

### 4. Estatísticas básicas e análise da estacionariedade

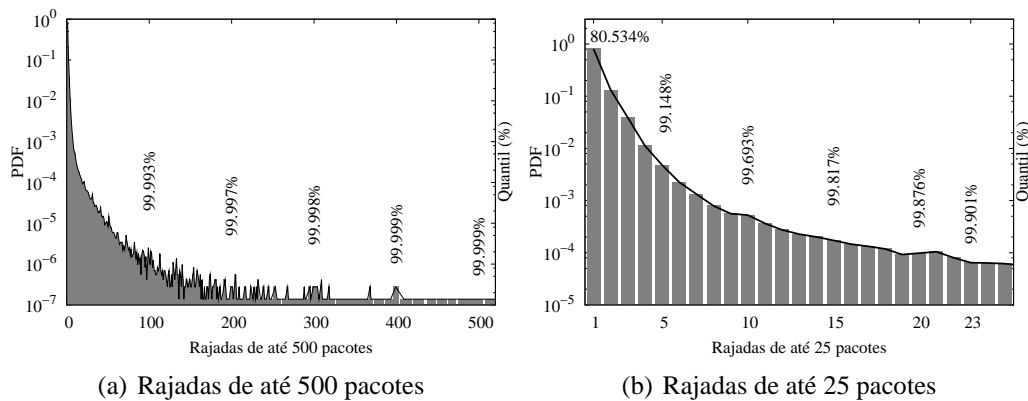
Nessa seção são analisados os resultados de 15 *traces* de 24 horas consecutivas cada, ou seja, 360 horas no total. Inicialmente foi observado o comportamento das perdas ao longo do tempo, com o intuito de identificar algum padrão que influenciasse a taxa média de perda. Observou-se que é difícil encontrar características na taxa média de perda em redes 802.11 que favoreçam a modelagem do processo. Esse fato foi notado mesmo em diferentes tamanhos de janela de observação.

Uma propriedade da perda que tem sido amplamente usada em sua modelagem é o tamanho das rajadas. O modelo de Gilbert-Elliot e outros modelos baseados em estados são construídos usando os comprimentos das rajadas de perda e sucesso, e como elas se alternam. Na Figura 1, são mostradas as rajadas de perda identificadas ao longo das 360 horas. Pela figura, se observa que menos de 0.1% das rajadas é superior a 23 pacotes e, portanto, haveria pouco ganho na acurácia de um modelo a representação de rajadas maiores que esse valor.

Antes de aplicar os testes aos *traces*, esses foram divididos em *subtraces* de 1 hora cada. Os *traces* menores facilitam a análise das propriedades estatísticas (inclusive da estacionariedade) e o tamanho escolhido é grande o suficiente para capturar as características importantes do processo aleatório associado à perda de pacotes. Portanto, os

---

<sup>1</sup><http://www.land.ufrj.br/tools/tangram2/traffic/traffic.html>



**Figura 1. Tamanho das rajadas de perda.**

testes são realizados em 360 *traces* de 1 hora cada. De forma semelhante a [Ji et al. 2004], para realizar os testes de estacionariedade assumimos que a perda de pacotes em uma rede 802.11 é descrita por um processo aleatório  $\{X_i\}_{i=1}^n$ , onde  $n$  é o número total de amostras na seqüência e cada amostra  $X_i$  pode assumir um valor "1" quando ocorre uma perda ou "0" em caso de sucesso. É importante aplicar os dois testes a cada *trace* porque o teste de iteração é mais poderoso para detectar tendências flutuantes, enquanto que o teste de arranjos reversos é mais poderoso na identificação de tendências monotônicas. A estacionariedade dos 360 *subtraces* foi testada, sendo que 14 foram considerados não-estacionários pelo teste de iteração e 19 foram reconhecidos como sendo não-estacionários pelo teste de arranjos reversos. Realizamos todos os testes com um nível de significância de 0,02.

## 5. Avaliação do modelo de Gilbert-Elliot

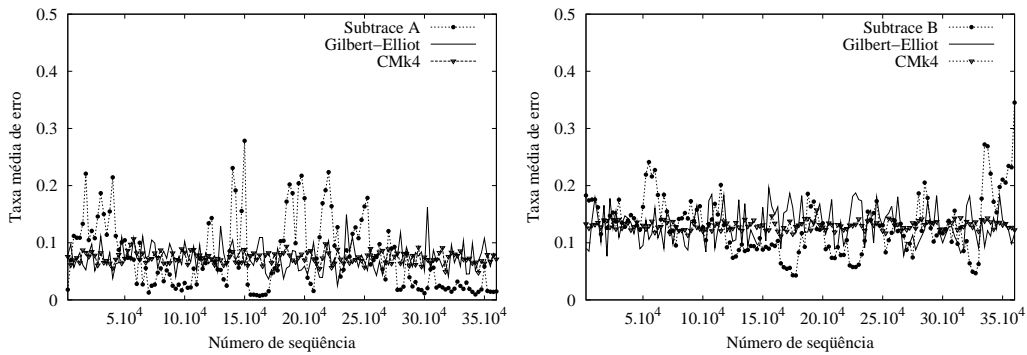
Muitos usuários necessitam de um modelo que seja fácil de parametrizar de forma que o mesmo possa capturar um novo processo de forma simples e rápida. Essa propriedade é muitas vezes tão importante que até a acurácia do modelo é negligenciada. Essa é uma das razões para modelos simples, como Gilbert-Elliot, serem tão utilizados.

Foram elaborados dois modelos Markovianos usando os *traces* coletados: o modelo de Gilbert-Elliot e uma cadeia de Markov de ordem 4. Para realizar o treinamento da cadeia, ou seja, a estimação dos parâmetros do modelo de Gilbert-Elliot, foi utilizado o algoritmo Baum-Welsh. Todos os *traces* usados na criação e avaliação dos modelos foram identificados como estacionários de acordo com os testes apresentados na Seção 2.2.

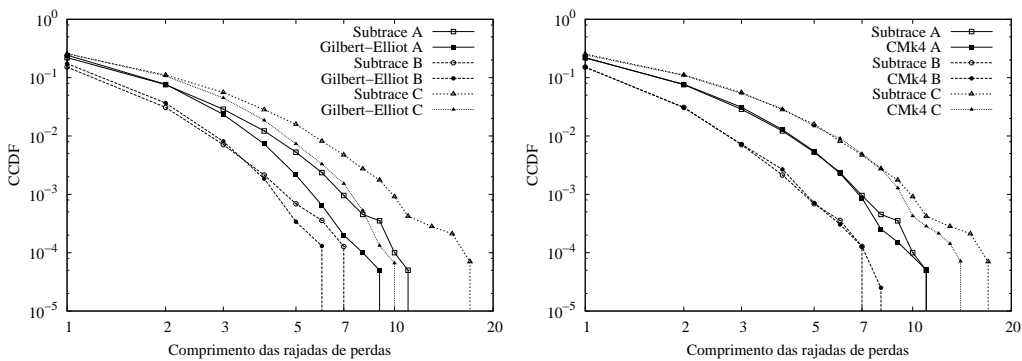
Nos gráficos da Figura 2, é mostrada a taxa média de perda em uma janela de 2.500 pacotes (ou 25 segundos). Em cada gráfico, as curvas correspondem a um *subtrace* original, a um modelo de Gilbert-Elliot e uma cadeia de Markov de ordem 4 (CMk4). É possível notar que tanto o modelo de Gilbert-Elliot como a cadeia de ordem 4 conseguem capturar a taxa média do *subtrace* completo, mas ambos são incapazes de representar adequadamente a média e a variância em intervalos mais curtos.

A Figura 3 apresenta a função distribuição de probabilidade (CDF) complementar (CCDF<sup>2</sup>) do tamanho das rajadas de perda. Os *subtraces* escolhidos mostram três distribuições diferentes de tamanho de rajadas para poder ilustrar como os modelos as

<sup>2</sup>CDF complementar é igual a  $1 - CDF$  e, nesse caso, proporciona melhor visualização dos dados



**Figura 2. Avaliação da taxa média de perda de pacotes.**



**Figura 3. Avaliação do comprimento das rajadas de perda.**

representam. Como pode ser visto, o modelo de Gilbert-Elliot é incapaz de representar adequadamente a distribuição do tamanho das rajadas. A cadeia de ordem 4 consegue criar uma distribuição de perdas semelhante a observada pelo processo original. Esse resultado ilustra como uma modelagem inadequada pode levar a resultados distorcidos, pois alguns mecanismos de controle automático de taxa e o controle de erro da camada de enlace das redes 802.11 são altamente sensíveis ao comprimento das rajadas de erro.

Na Figura 4 é mostrada a autocorrelação de dois *subtraces* e de seus respectivos modelos, usando um intervalo de confiança de 95%. O modelo de Gilbert-Elliot apresenta um desempenho melhor que a cadeia de Markov de ordem 4 nessa métrica. O modelo de Gilbert-Elliot para o *subtrace* A mostra autocorrelação não nula até uma defasagem acima de  $10^2$ , enquanto que o mesmo tipo de modelo para o *subtrace* B exibe atraso em torno de  $10^3$ . Para ambos os *subtraces*, a cadeia de Markov de ordem 4 alcança apenas um atraso da ordem de  $10^1$ . Os dois *subtraces* originais apresentam autocorrelação não nula até uma defasagem próxima de  $10^4$ , ou seja, mais alta que a exibida pelos dois modelos.

A partir desses resultados, podemos concluir que o modelo de Gilbert-Elliot pode ser usado quando se deseja capturar apenas a taxa média de perda, com pequena variância. Em alguns casos esse pode ser o comportamento mais comum da perda em uma rede, no entanto, em nossos experimentos observamos alta variância em torno da taxa média durante longos períodos de tempo. A cadeia de Markov de ordem 4 conseguiu representar com acurácia satisfatória o comprimento das rajadas de perda, no entanto, não foi capaz de modelar com precisão a variância e a autocorrelação do processo.

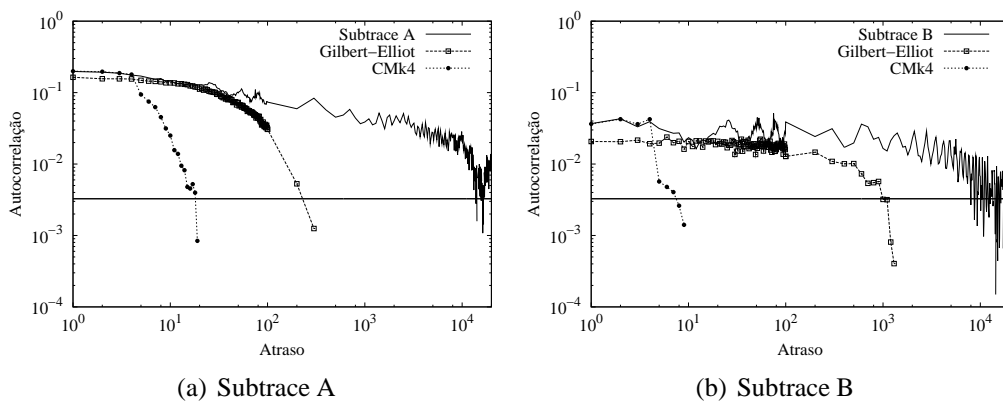


Figura 4. Avaliação da autocorrelação.

## 6. Conclusão e trabalhos futuros

Nesse trabalho, é realizada uma avaliação da perda de pacotes em redes sem fio 802.11. A perda de pacotes é tratada como um processo aleatório, nos quais as principais propriedades estatísticas são inspecionadas, a saber: taxa média de perda, distribuição do tamanho das rajadas de perda e a autocorrelação do processo. São mostrados os principais tipos de modelos usados na representação de perda de pacotes em redes sem fio, com suas vantagens e desvantagens. Em especial, é mostrada a inadequação do clássico modelo de Gilbert-Elliot na representação de perda em redes 802.11, obtendo alguns resultados comparativos com uma cadeia de Markov de ordem 4. O modelo de Gilbert-Elliot captura a taxa média de perda de pacotes, mas não descreve adequadamente a variância, a distribuição do comprimento das rajadas e a autocorrelação do processo.

Como trabalho futuro, se pretende desenvolver um modelo Markoviano para representação de perda de pacotes que consiga combinar a facilidade de parametrização da cadeia de ordem  $k$  com a eficiência de outros modelos como o HMM.

## Referências

- Bendat, J. S. and Piersol, A. G. (1986). *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*. John Wiley and Sons, Inc.
- Box, G. E. P., Jenkins, G. M., and Reinsel, G. C. (1994). *Time Series Analysis - Forecasting and Control*. Prentice Hall, Inc.
- Carvalho, L., Angeja, J., and Navarro, A. (2005). A New Packet Loss Model of the IEEE 802.11g Wireless Network for Multimedia Communications. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*.
- Ji, P., Liu, B., Towsley, D., Ge, Z., and Kurose, J. (2004). Modeling Frame-level Errors in GSM Wireless Channels. *Performance Evaluation*.
- Konrad, A., Zhao, B. Y., Joseph, A. D., and Ludwig, R. (2003). A Markov-based Channel Model Algorithm for Wireless Networks. *Wireless Networks*.
- Salamatian, K. and Vaton, S. (2001). Hidden Markov Modeling for Network Communication Channels. In *ACM SIGMETRICS International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems (SIGMETRICS)*.