MODELAGEM DE TRÁFEGO EM REDES PLC UTILIZANDO CADEIAS DE *MARKOV*

Christiane Borges Santos
EEEC – Universidade Federal de Goiás
Praça. Universitária Bloco A. Piso 3 Setor Universitário, Goiânia, GO 74605-220 Brasil
E-mail: cbs@posgrad.ufg.br

Flávio Geraldo Coelho Rocha
EEEC – Universidade Federal de Goiás
Praça. Universitária Bloco A. Piso 3 Setor Universitário, Goiânia, GO 74605-220 Brasil
E-mail: flavio.geraldo@gmail.com

Flávio Henquire Teles Vieira
EEEC – Universidade Federal de Goiás
Praça. Universitária Bloco A. Piso 3 Setor Universitário, Goiânia, GO 74605-220 Brasil
E-mail: flavio@eee.ufg.br

Sérgio Granato de Araújo
EEEC – Universidade Federal de Goiás
Praça. Universitária Bloco A. Piso 3 Setor Universitário, Goiânia, GO 74605-220 Brasil
E-mail: granato@eee.ufg.br

José Gonçalves Vieira
CELG Distribuição S.A.
Rua 2 Qd. A-37, S/N, Jardim Goiás, Goiânia, GO 74805-180 Brasil
E-mail: vieira@celg.com.br

Thiago Lara Vasques
EEEC – Universidade Federal de Goiás
Praça. Universitária Bloco A. Piso 3 Setor Universitário, Goiânia, GO 74605-220 Brasil
E-mail: thiago_lv@hotmail.com

RESUMO

Neste artigo, apresentamos uma análise do tráfego VoIP (Voz sobre IP) e da transferência de dados utilizando a rede PLC como meio de transmissão. Propomos um modelo baseado no MMFM (*Markov Modulated Fluid Models*) para o tráfego de dados e de VoIP em rede PLC. Simulações e comparações foram realizadas com outros modelos como *Poisson* e o MMPP (*Markov Modulated Poisson Process*). Os resultados foram obtidos através de experiências realizadas em redes PLC de baixa tensão, utilizando largura de faixa entre 4,3MHz a 20,9MHz.

PALAVRAS-CHAVE: PLC, VoIP, Cadeias de *Markov*.

ABSTRACT

In this paper, we present an analysis of VoIP (Voice over IP) traffic and data transfer for PLC network. We propose a model based on MMFM (Markov Modulated Fluid Models) for data traffic and VoIP in PLC networks. Simulations and comparisons were carried out with other models such as Poisson and MMPP (Markov Modulated Poisson Process). The results were obtained by experiments in low-voltage PLC networks presenting bandwidth between 4,3MHz to 20,9 MHz.

KEYWORDS: PLC, VoIP, Markov Chains.

1. Introdução

Desde o início do século XX as redes elétricas têm sido utilizadas pelas empresas de energia elétrica para suportar serviços de telecomunicações em usos internos, Hrasnica et al. (2005). Atualmente, tanto empresas de energia elétrica como pesquisadores vem voltando os seus olhares para a tecnologia PLC/BPL (*Powerline Communication / Broadband Powerline*), por ser uma alternativa promissora para acesso em banda larga.

Em 13 de abril de 2009, a ANATEL publicou a Resolução 527, que estabelece critérios e parâmetros técnicos que permitem a utilização dessa tecnologia, de forma harmônica com aplicações de radiocomunicação que utilizam radiofreqüência na faixa entre 1.705kHz e 50MHz. Posteriormente, em 25 de agosto de 2009 foi a vez da ANEEL aprovar sua Resolução Normativa 375, que visa regulamentar a utilização das instalações de distribuição de energia elétrica como meio de transporte para a comunicação digital ou analógica de sinais, ANATEL (2009) e ANEEL (2009).

Segundo dados da ANEEL, o mercado de distribuição de energia elétrica é atendido por 64 concessionárias (estatais ou privadas) que abrangem todo o País e atendem a cerca de 47 milhões de unidades consumidoras, das quais 85% são consumidores residenciais.

Através de mecanismos de gerência, planejamento e operação dos sistemas de geração, distribuição e transmissão de energia elétrica, é possível que a tecnologia PLC/BPL venha a se tornar uma solução das chamadas tecnologias de última milha, permitindo o surgimento de uma série de serviços que poderão ser oferecidos por concessionárias de energia elétrica, entidades públicas e provedores de serviços de telecomunicações, como descrito em Hrasnica et al. (2005) e apresentado em Santos et al. (2008), conforme Figura 1.

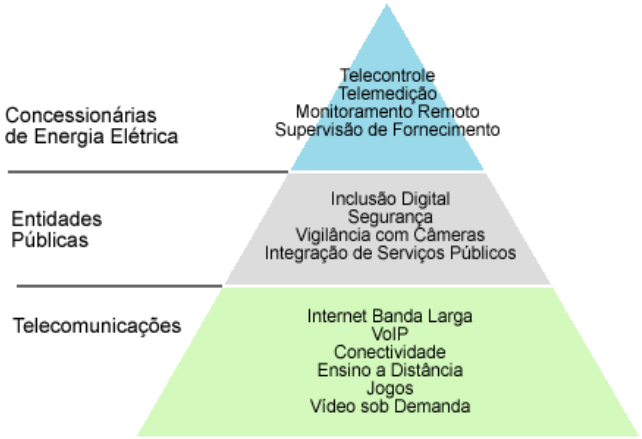

Fig. 1. Aplicações da tecnologia PLC, Hrasnica et al.(2005).

Desta forma, a rede de energia elétrica para transmissão de dados em alta velocidade, tem surgido como uma opção atrativa no oferecimento de serviços de comunicação de banda larga aos usuários residenciais e comerciais. A viabilidade operacional e econômica da utilização dessa tecnologia baseia-se na utilização da própria infra-estrutura da rede de energia já instalada e na atual disponibilidade de equipamentos e soluções PLC de baixo custo, Hrasnica el al. (2005) e ANATEL (2009). Um dos padrões para aplicações *in-door* é o *HomePlug*. O padrão *HomePlug* foi desenvolvido pela *HomePlug Powerline Alliance*, definindo o método de acesso ao meio e especificações da camada física para redes de baixa tensão. Sua principal preocupação é a robustez da transmissão de dados para compensar as adversidades do canal, HOMEPLUG (2009).

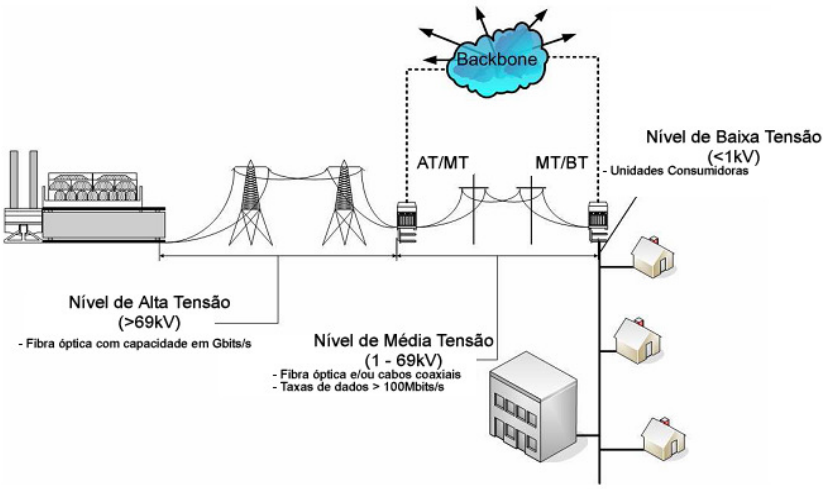

Fig. 2. Sistema típico de fornecimento de energia elétrica e dados, Hrasnica et al.(2005).

O sinal PLC é transmitido sobre os fios de cobre (ou alumínio) das redes de distribuição de baixa e média tensão, como mostra a Figura 2. A faixa típica de freqüências utilizada pela rede PLC/BLP está entre 1,7MHz e 30MHz, com espalhamento de harmônicos até freqüências mais altas. A capacidade teórica de transmissão dos canais PLC ultrapassa 500Mbps. Analisando-se apenas os canais PLC em ambiente prediais, estimativas recentes apontam capacidades de canais PLC de até 600Mbps e já existem equipamentos sendo comercializados que operam em 200Mbps, Ribeiro (2005).

Os sinais em redes PLC são transmitidos utilizando–se modulação OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*), um sistema de modulação multiportadora. O número de portadoras adotadas varia conforme o tipo de padrão PLC usado. Neste artigo, foi considerado o padrão *HomePlug,* que pode ser encontrado em HOMEPLUG (2009), utilizando equipamentos que operam com freqüência de 4,3 a 20,9MHz, com taxa de linha efetiva de 56Mbps, e taxa de dados de vazão efetiva acima de 16Mbps.

Neste artigo, descrevemos algumas características da tecnologia PLC/BPL, realizando uma análise de aplicações VoIP e transferência de dados utilizando a rede PLC como meio de transmissão. Propomos então um modelo do tipo MMFM com ajuste da função de autocorrelação para descrever o comportamento do tráfego em redes PLC.

Foram feitas coletas de *traces* de dados e VoIP para modelagem de tráfego em redes PLC, gerando dados sintéticos a partir de modelos baseados em cadeias de *Markov*, para posterior análise e comparação com dados reais.

Este artigo está dividido em seis seções. A seção 1 apresenta uma breve introdução à tecnologia PLC/BPL. A seção 2 mostra alguns conceitos de modelagem de tráfego e cadeias de *Markov*, e apresenta o modelo proposto. A seção 3 revela os cenários dos testes realizados de transferência de dados e aplicações VoIP. A seção 4 apresenta a modelagem feita a partir da coleta dos *traces* de tráfego gerados pela comunicação de dados e VoIP através da rede PLC, bem como uma comparação entre os dados reais e sintéticos. Finalmente, a seção 5 expõe as conclusões do trabalho.

2. Modelagem de tráfego baseada em cadeias de *Markov*

A utilização de redes de energia elétrica para transmissão de dados incorre em problemas importantes como perdas e ruído, já que estas redes não foram inicialmente projetadas para este fim. Neste sentido, para a utilização eficiente do meio de transmissão, a modelagem de tráfego pode ser utilizada para planejamento e dimensionamento destas redes.

As cadeias de *Markov* são processos estocásticos de tempo discreto. Uma cadeia de *Markov* pode representar vários estados possíveis para uma determinada situação e as transições, entre um estado e outro, ocorrem segundo valores de probabilidades.

Para modelagem do tráfego de voz, um dos modelos de tráfego mais simples é o processo ON/OFF, em que o estado OFF representa o estado quando não existe atividade de voz, enquanto o estado ON representa a fonte quando existe um surto de conversa, Daigle e Langford (1985).

O modelo clássico de tráfego de *Poisson* foi proposto na década de 20 para análise de sistemas de telefonia e depois foi adaptado para a análise de fila em redes de pacotes. Se x for a ocorrência de algum evento aleatório em um intervalo de tempo, a probabilidade de ocorrência de x é:

$$f(x) = \frac{e^{-\lambda}\lambda^{x}}{x!}, x = 0,1,2,... \quad (1)$$

onde λ é o parâmetro de distribuição (média de ocorrência de x).

No modelo MMPP (Modelo de *Poisson* Modulado por uma Cadeia de *Markov*), as chegadas ocorrem segundo uma distribuição de *Poisson* com uma taxa que varia de acordo com um estado k da cadeia de *Markov* de tempo contínuo. Este tipo de modelo é muito usado para caracterizar tráfegos de voz e dados. A soma de processos de *Poisson* resulta em um novo processo de *Poisson* cuja taxa média corresponde à soma das taxas médias dos processos originais. Em um modelo MMPP, o estado i representa uma transmissão de dados em intervalos exponencialmente distribuídos com média $1/\lambda_i$, Daigle e Langford (1985) e Maglaris et al. (1988).

2.1 Modelo MMFM

Modelos de fluidos caracterizam o tráfego como um fluxo contínuo, com uma taxa de fluxo parametrizado (por exemplo, *bits* por segundo). Estes modelos são adequados em casos onde unidades individuais de tráfego (pacotes ou células), têm pouco impacto sobre o desempenho da rede. Um modelo fluido que é tipicamente usado para modelar tráfego é o Modelo Markoviano Fluido (MMFM).

Quando a média no modelo MMPP é muito menor que o tempo médio de permanência no estado i, esse modelo é caracterizado como um modelo MMFM, um modelo relevante para a modelagem de determinados fenômenos em telecomunicações, Daigle e Langford (1985).

No modelo MMFM, o estado corrente da cadeia subjacente determina a taxa de fluxo (tráfego). No estado S_K, o tráfego chega com uma taxa constante λ_K. O estado $\overline{\lambda}_k(t)$ do processo da Fig. 3 representa o nível de quantização de taxa de bit agregado de N fontes. Seu espaço de estado é o conjunto dos níveis quantizados até um nível máximo, Daigle e Langford (1985), Maglaris et al. (1988) e Adas (1997).

Para melhor entendimento do modelo MMFM, é preciso entender o conceito de processo de nascimento e morte. Em cadeias de *Markov*, tem-se como processo de "*birth and death*" (nascimento e morte), uma classe especial de processo markoviano em que são permitidas somente transições aos estados vizinhos. Um processo simples de nascimento e morte que tem autocovariância exponencial, é dado pelo diagrama de transição de estados na Figura 3.

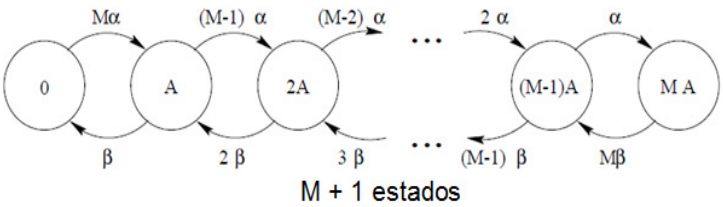

Fig. 3. Processo de nascimento e morte

Essa cadeia de *Markov* possui *M+1* estados, variando de zero a *M*. Cada estado deste modelo representa o número de fontes ativas. As transições entre os níveis ocorrem com taxas exponenciais, que dependem do estado atual. Na etapa de quantização, o número de estados, e as taxas de transição poderão ser sintonizadas para se ajustarem à média, a variância e à função de autocovariância dos dados reais, Maglaris et al. (1988) e Adas (1997).

No modelo MMFM, a taxa de transição exponencial $r_{i,j}$ do estado *iA* para o estado *jA* (processo de nascimento e morte) é apresentado por Maglaris et al. (1988), é dado por:

$$\left\{\begin{array}{ll} r_{i,i+1} = (M-i)\alpha & i < M \\ r_{i,i-1} = i\beta & i > 0 \\ r_{i,i} = 0 & \\ r_{i,j} = 0 & |i-j| > 1 \end{array}\right\} \tag{2}$$

A probabilidade de estado estacionário de taxa de fonte agregada é dada por:

$$P\{(\overline{\lambda_N}) = kA\} = \binom{M}{k} p^k (1-p)^{M-k}, p = \frac{\alpha}{\alpha+\beta} \tag{3}$$

onde N é o número de fontes agregadas, M é a quantidade de estados, k é o estado considerado, A é o tamanho do passo de quantização e p o processo de nascimento e morte.

Em um estado estacionário, $\overline{\lambda_N}(t)$ tem-se uma distribuição binomial com média $E(\overline{\lambda_N})$, variância $\overline{C_N}(0)$ e autocovariância exponencial $\overline{C_N}(\tau)$, Maglaris et al. (1988).

A média $E(\overline{\lambda_N})$, a variância $\overline{C_N}(0)$ e a autocovariância são dados por:

$$E(\overline{\lambda_N}) = MAp \tag{4}$$

$$\overline{C_N}(0) = MA^2 p(1-p) \tag{5}$$

$$\overline{C_N}(\tau) = \overline{C_N}(0) e^{-(\alpha-\beta)\tau} \tag{6}$$

onde τ é a variação de tempo.

Os parâmetros utilizados para a criação do modelo (M, A, α e β), são obtidos através das equações de (3) a (6). O procedimento de *curve fitting* é aplicado na modelagem para se obter uma curva sintética que melhor se adapta aos dados reais.

3. Cenário de testes

Os testes realizados visam verificar o funcionamento da tecnologia PLC, observar as características do sinal e verificar o desempenho do modelo sugerido para modelar o tráfego em redes PLC.

Os resultados foram obtidos com experiências realizadas no Laboratório de

Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG) e no Laboratório de Simulação da Universidade Federal de Goiás (UFG), utilizando aparelhos PLC *Powerline Ethernet Bridge*, em ambiente *indoor*.

Para a modelagem dos dados, foram feitos estudos e medições utilizando os softwares *Network Probe* (versão 2.7), que fornece em tempo real a taxa de transmissão da rede e *Wireshark* (versão 1.1.3), para a coleta dos *traces* das transmissões.

A topologia dos testes de transmissão de dados pode ser vista na Figura 4. Foram utilizados dois terminais PLC já disponíveis comercialmente, da marca *PlugFácil Powerline Ethernet Bridge*, que opera com freqüência de 4,3MHz a 20,9MHz e tem distância entre os dispositivos limitada em 100 metros.

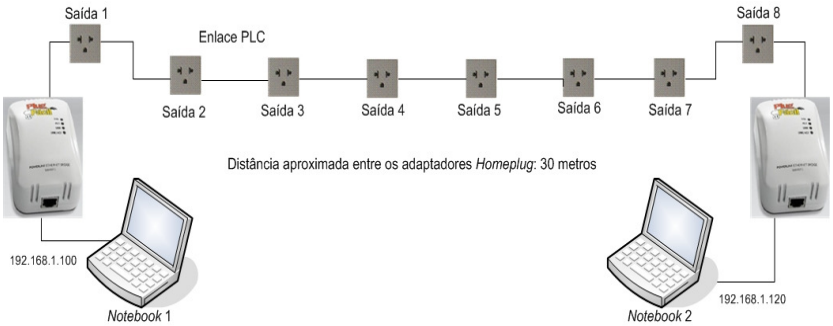

Fig. 4. Topologia utilizada nos testes de transferência de dados

O osciloscópio utilizado é da marca *Tektronix*, modelo THS720P (portátil), sendo utilizado como parâmetro nos testes 0,2V/div e 5ms/div no canal 1. O analisador de espectro é da marca *Minipa*, modelo MSA810, com parâmetros definidos em freqüência central de 12Mhz, 2Mhz/div e atenuação de -30dBm. Ambos os equipamentos foram alimentados com energia elétrica vinda de outro circuito próximo.

Para conectar os equipamentos à rede a ser analisada, foi utilizado um divisor de tensão, conectado diretamente ao circuito, que entregava aproximadamente 11,76Vrms ao analisador de espectro e ao osciloscópio. Nos testes com o osciloscópio, foi utilizado um filtro Passa-Altas, como mostra a Figura 5, responsável por filtrar as baixas freqüências não utilizadas pelo PLC, incluindo os 60Hz da rede de 220VAC.

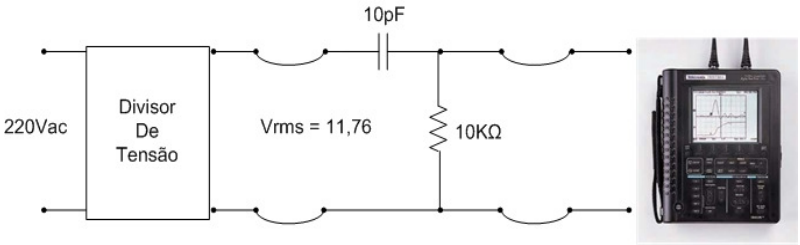

Fig. 5. Circuito do Filtro Passa-Altas

4. Resultados de desempenho do modelo MMFM

Para a modelagem do tráfego de dados e VoIP foi utilizado o MMFM com ajuste da função de autocorrelação. Como notou-se que a função de autocorrelação tendia a uma exponencial, o *curve fitting* (MatLab®) foi utilizado para encontrar o parâmetro dessa exponencial. Para análise foram utilizados 1000 amostras dos de VoIP e dados coletados.

Os parâmetros estatísticos considerados foram:

- Média;

- Variância;
- Desvio padrão;
- Valor Máximo;
- Pico/Média.

O modelo inicia-se com a modelagem da função de autocovariância através do ajuste de uma função exponencial para a função de autocorrelação do processo real. Os parâmetros encontrados a partir do *curve fitting* são utilizados para calcular as intensidades de nascimentos e mortes de uma cadeia de *Markov* do tipo "*birth and death*", e então uma série sintética é gerada.

As Figuras 6, 7 e 8 apresentam os *traces* reais e os sintéticos gerados a partir dos dados reais de uma transferência de dados em uma rede PLC.

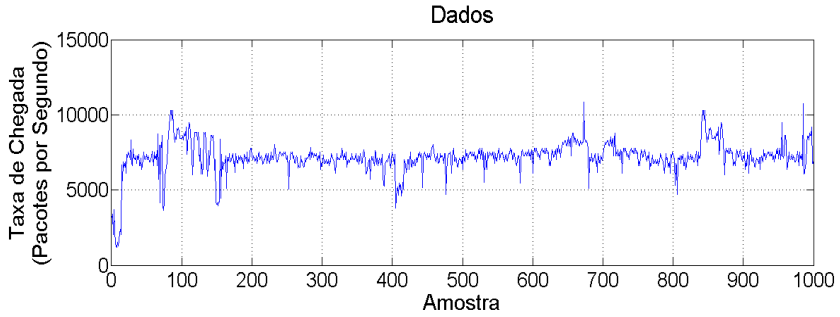

Fig. 6. *Trace* de transferência de dados real

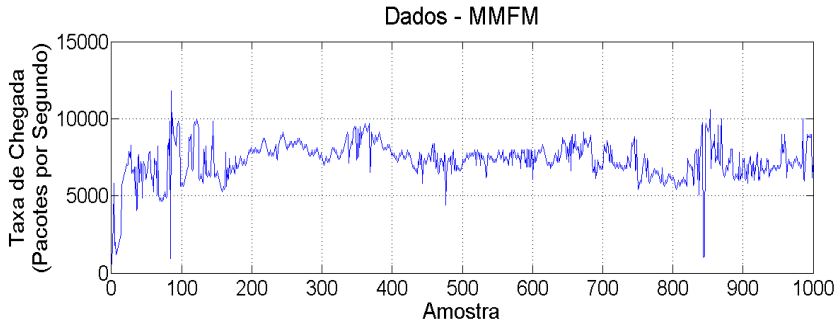

Fig. 7. *Trace* de transferência de dados sintético – MMFM

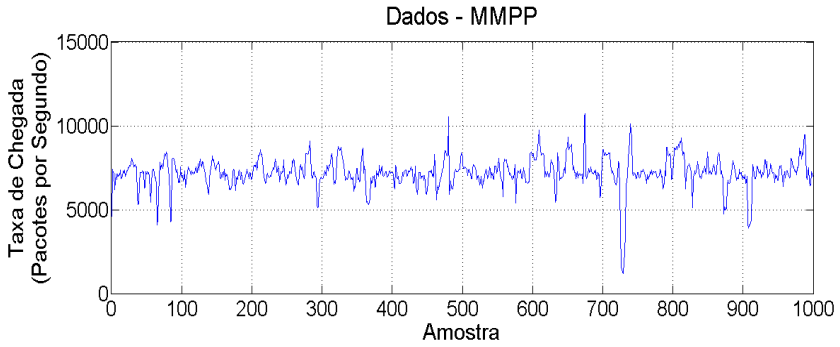

Fig. 8. *Trace* de transferência de dados sintético – MMPP

A Tabela 1 apresenta uma comparação entre as estatísticas do *trace* real e das séries geradas relacionadas ao tráfego de dados na rede PLC. Como pode ser observado, os parâmetros estatísticos calculados para o modelo MMFM estão mais próximos dos parâmetros calculados

para o *trace* real da transferência de dados. Os modelos MMPP e *Poisson* não se mostraram adequados para modelagem desse tipo de tráfego, visto que obtiveram valores para estes parâmetros estatísticos bem distantes dos valores do *trace* real.

Tabela 1. Comparação de parâmetros estatísticos - dados

Estatísticas	Real	MMPP	MMFM	*Poisson*
Variância	1,07E+06	7,31E+05	1,57E+06	6,36E+03
Média (pps)	7,20E+03	7,29E+03	7,30E+03	7,21E+03
Desvio Padrão	1,04E+03	8,55E+02	1,25E+03	7,98E+01
ValorMáximo (pps)	1,09E+04	1,06E+04	1,18E+04	7,44E+03
Valor Mínimo (pps)	1,17E+03	3,81E+03	5,82E+02	6,95E+03
Pico/Média	1,506	1,449	1,62	1,03

O coeficiente de correlação mede o grau da correlação (e a direção dessa correlação - se positiva ou negativa) entre duas variáveis, e pode assumir os seguintes intervalos de valores:

- Menor ou igual a |0.3|: a correlação é fraca;
- Maior que |0.7|: a correlação é forte;
- Entre |0.3| e |0.7|: a correlação é moderada

A Tabela 2 apresenta o coeficiente de correlação das amostras com os *traces* reais (transferência de dados). Como pode ser observado, a correlação entre os dados reais e a série MMFM é forte, enquanto para as outras séries é considerada fraca.

Tabela 2. Coeficiente de correlação - dados

Série	Coeficiente de correlação com a série real
MMFM	0,8931
MMPP	-0,2173
Poisson	0,0211

A Figura 9 apresenta o gráfico da função de autocorrelação para os dados reais e para os modelos considerados. Pode-se notar que o MMFM apresenta uma função de autocorrelação mais próxima do *trace* real.

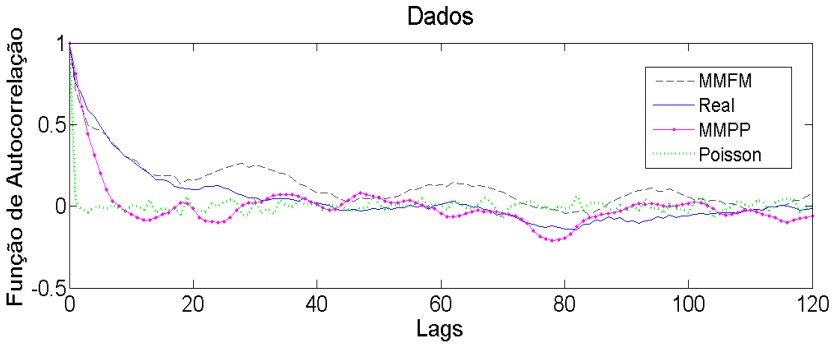

Fig. 9. Função de autocorrelação

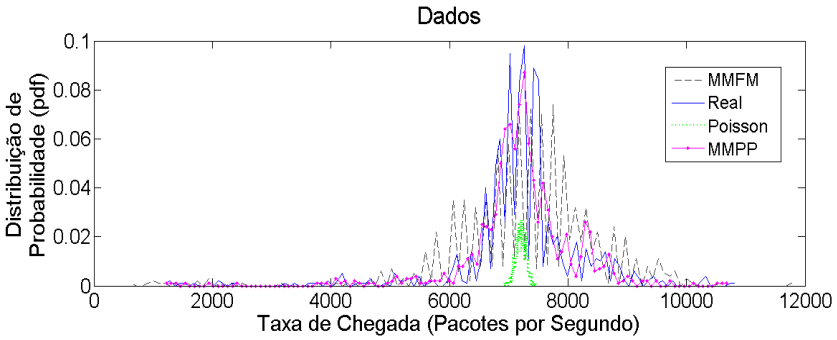

Fig. 10. Distribuição de probabilidade (pdf)

A função de distribuição de probabilidade (*pdf - probability density function*) é utilizada para representar as probabilidades com as quais a variável aleatória poderá assumir valores quaisquer. A Figura 10 apresenta a distribuição de probabilidade para o *trace* real e para os *traces* sintéticos gerados.

Analisaremos agora a modelagem do tráfego de VoIP em redes PLC. As Figuras 11, 12 e 13 representam os *traces* reais e os sintéticos gerados a partir de uma comunicação VoIP em redes PLC.

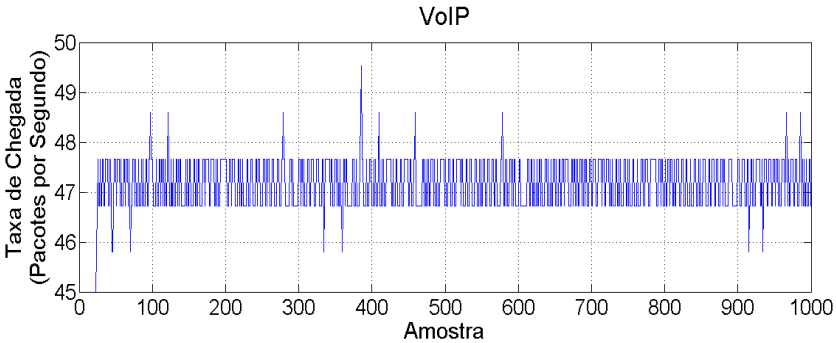

Fig. 11. *Trace* de VoIP dados real

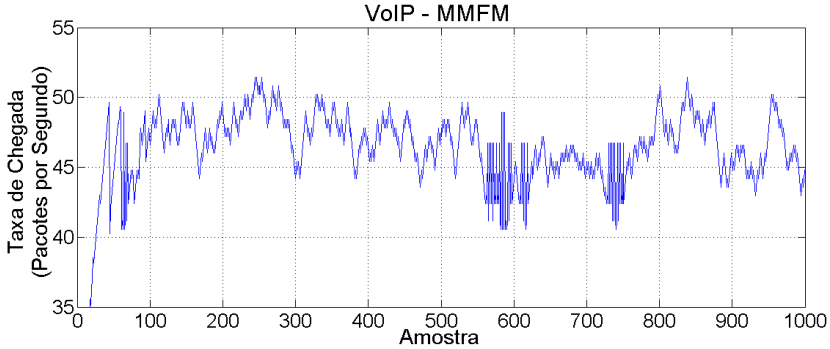

Fig. 12. *Trace* de VoIP sintético – MMFM

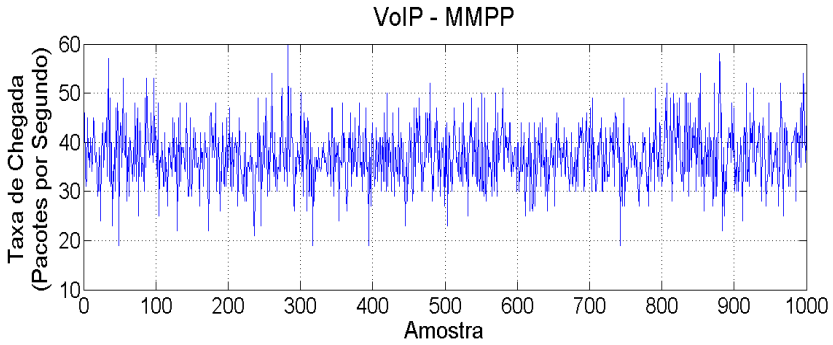

Fig. 13. *Trace* de VoIP sintético – MMPP

A Tabela 3 apresenta uma comparação entre as estatísticas do *trace* real e as séries geradas, relacionadas à comunicação VoIP através da rede PLC. Como pode ser observado, os parâmetros estatísticos calculados para o modelo MMFM estão mais próximos dos parâmetros calculados para o *trace* real da comunicação VoIP. Os modelos MMPP e *Poisson* também não se mostraram adequados para modelagem desse tipo de tráfego, com parâmetros de valores bem distantes do *trace* real.

Tabela 3. Comparação de parâmetros estatísticos - VoIP

Estatísticas	**Real**	**MMPP**	**MMFM**	***Poisson***
Variância	17,3085	36,9628	26,6979	41,1815
Média (pps)	46,6468	37,3580	45,9587	45,3060
Desvio Padrão	4,1603	6,0797	5,1670	6,4173
Valor Máximo (pps)	49,5327	60,0000	51,4484	69,0000
Valor Mínimo (pps)	0	19,0000	0	26,0000
Pico/Média	1,0619	1,6061	1,1194	1,5230

A Tabela 4. apresenta o coeficiente de correlação das amostras com os *trace* real (comunicação VoIP). Como pode ser observado, a correlação entre os dados reais e a série MMFM é moderada, enquanto para as outras séries é considerada fraca.

Tabela 4. Coeficiente de Correlação - VoIP

Série	**Coeficiente de Correlação com a Série Real**
MMFM	0,6562
MMPP	0,0379
Poisson	0,0117

A Figura 14 apresenta o gráfico da função de autocorrelação para a comunicação VoIP.

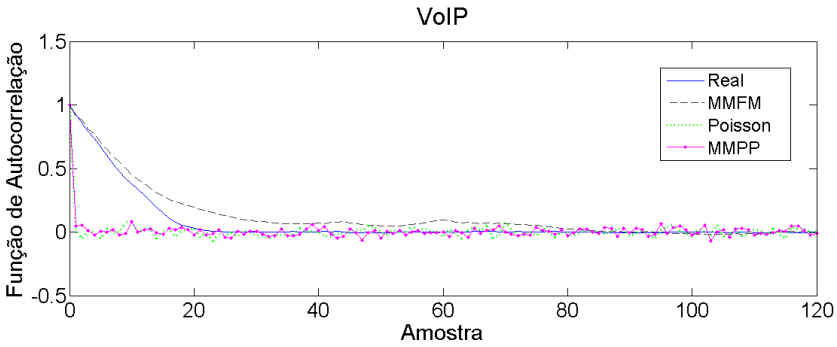

Fig. 14. Função de autocorrelação

A Figura 15 apresenta a distribuição de probabilidade, comparando o *trace* real com o *trace* sintético gerado, para a comunicação VoIP. Pode-se observar que a densidade de probabilidade dos dados gerados pelo modelo MMFM está próxima do *trace* real de VoIP.

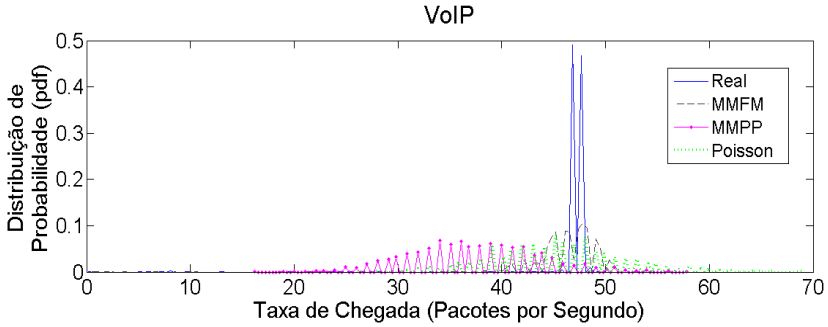

Fig. 15. Distribuição de Probabilidade (pdf)

5. Conclusões

A tecnologia PLC vem sendo desenvolvida há algum tempo e é uma alternativa promissora para comunicação na última milha e nos últimos metros, devido à capilaridade da rede de energia elétrica.

A tecnologia PLC se insere num contexto atual de prestação de serviços, aproveita tendências atuais de convergência para redes IP e busca gerar competitividade no fornecimento de Rede de Acesso, e a telefonia VoIP está atingindo os níveis de qualidade da telefonia tradicional comutada.

A modelagem do tráfego de redes permite um melhor planejamento, dimensionamento e análise de desempenho de redes.

A partir de análise realizada, pode-se concluir que o modelo proposto MMFM se mostrou eficiente em descrever o tráfego em redes PLC, em comparação com outros modelos Markovianos. Os resultados obtidos com o modelo MMFM foram satisfatórios para os tráfegos reais de VoIP e de dados em redes PLC.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a CELG Distribuição S.A. pelo apoio a este trabalho.

Referências

Adas, A. *Traffic Models in Broadband Networks*. Department Of Eletrical Engineering - Georgia Institute of Technology. Atlanta, 1997.

ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações. Resolução Nº 527, de 8 de Abril de 2009 – *Regulamento sobre Condições de Uso de Radiofreqüências por Sistemas de Banda Larga por meio de Redes de Energia Elétrica*. http://www.anatel.gov.br em 5 de Julho de 2009.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa Nº 375, de 25 de Agosto de 2009 – *Utilização das instalações de distribuição de energia elétrica como meio de transporte para a comunicação digital ou analógica de sinais*. www.aneel.gov.br em 5 de Julho de 2009.

Daigle, John N., Langford, Joseph D. *Models for Analysis of a Packet Voice Communication System*, IEEE INFOCOM'85, Washington, DC, 1985, pp. 18-26.

HOMEPLUG Powerline Alliance. *HomePlug 1.0 Technology White Paper*. www.homeplug.org em 5 de julho 2009.

Hrasnica, H., Haidine, A., Lehnert, R. *Broadband Powerline Communications: Network Design*. John Wiley & Sons: West Sussex, England, 2005.

Maglaris, B., Anastassiou, D., Sen, P., Karlsson, G., Robbins, J. *Performance Models of Statistical Multiplexing in Packet Video Communications*. IEEE Trans. Commun., vol. 36, July 1988.

Magro, J. C. *Estudo da Qualidade de Voz em Redes IP*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2005. 156p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia Elétrica).

Ribeiro, M. V. *Técnicas de Processamento de Sinais Aplicadas à Transmissão de Dados Via Rede Elétrica e ao Monitoramento da Qualidade de Energia*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2005. 362p. (Tese – Doutorado em Engenharia Elétrica).

Santos, C. B., Marques, F. S., Fernandes, D. C., Araújo, S. G., Pereira, J. B. J., Fleury, C. A. *Análise de Transmissão e Desempenho em Redes PLC em Baixa Tensão*. 7th International Information and Telecommunication Technologies Symposium - Foz do Iguaçu, 2008.