

Estimação de Largura de Banda em Redes PLC

Rennan J. M. Silva, Adolfo F. O. Colares, Elisângela S. Aguiar, Antonio J. G. Abelem, J. C. W. A. Costa

Resumo—Estimar a largura de banda em uma rede de computadores é necessário em aplicações multimídia, controladores de Qualidade de Serviço (*QoS*) e protocolos de controle e reserva de recurso. Métodos largamente usados em redes sem fio ou cabeadas tradicionais não são aplicáveis em redes PLC (*Power Line Communications*). Este trabalho apresenta uma proposta para estimar a largura de banda em redes PLC com medições realizadas em cenário real, utilizando envio de pares de pacotes ICMP (*Internet Control Message Protocol*) e obtendo resultados de forma simples, precisa e com baixo nível de intrusão na rede.

Palavras-Chave—Estimação, Largura de Banda, Comunicação por Rede Elétrica.

Abstract—Bandwidth estimate in a computer network is useful to multimedia applications, Quality of Service controllers and reservation and resource controls protocols. Very much utilized methods on cabled and wireless networks is not applicable on PLC (*Power Line Communications*) networks. In this paper, we present an approach to estimate bandwidth on PLC networks with measurements realized in a real scenario, sending ICMP (*Internet Control Message Protocol*) packet pairs and achieving simple, accurate and low intrusive results.

Keywords—Estimate, Bandwidth, Power Line Communications.

I. INTRODUÇÃO

Largura de banda (*bandwidth*) é um recurso crítico em vários tipos de rede. Em comunicação na camada física, o termo largura de banda está relacionado a largura de faixa do espectro de frequência ocupada pelo sinal eletromagnético, em torno de uma frequência central (portadora). Este termo está diretamente relacionado, através da fórmula de *Shannon*, à taxa de dados que o enlace da rede pode transferir [1]. Este segundo conceito será utilizado neste trabalho.

O conhecimento da largura de banda disponível em tempo real pode melhorar significativamente aplicações com tráfego intensivo de dados como aplicativos de transferência de arquivos ou *multimedia streaming* [2]. Além disso, muitas operações de gerenciamento de *QoS* (*Quality of Service* - Qualidade de Serviço), como controle de admissão, reserva de recursos, dentre outras, tomam suas decisões com base em várias características do enlace, entre elas a largura de banda [1]. Portanto, este é um conceito chave e seu conhecimento é de suma importância para um bom aproveitamento dos recursos de rede disponíveis.

Em redes PLC (*Power Line Communications* - Comunicação por rede elétrica) a largura de banda varia com o tempo devido a alguns fatores [3]. Um deles, é a adoção do protocolo de

camada de enlace CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* - Acesso Múltiplo por Detecção da Portadora com Prevenção de Colisão) que faz com que a utilização do canal de transmissão seja compartilhada. Essa característica é semelhante à transmissão de dados em redes sem fio.

Outro fator é a freqüente mudança na estrutura e na topologia das redes PLC através da adição ou remoção de equipamentos, usuários ou cabos de energia que causam reflexões e mudança nas características e topologia da rede.

A maioria dos estudos feitos para estimar largura de banda é aplicável à Internet ou a redes sem fio. Neste trabalho, é feita uma proposta para estimar a largura de banda em ambiente PLC. O *testbed* foi montado com objetivo de conhecer a largura de banda através de estimativa sem necessidade de saturação da rede.

A contribuição deste trabalho é a adaptação de um algoritmo para estimar largura de banda aplicada a uma rede PLC, fazendo com que se possa conhecer as características da rede com o mínimo de intrusão possível e fazendo o cálculo de forma rápida.

Para isto, foram feitas duas sessões de teste, com envio de 100 e 150 pares de pacotes ICMP (*Internet Control Message Protocol* - Protocolo de Mensagens de Controle da Internet) e coletados os seus respectivos RTTs (*Round Trip Time* - Tempo de ida e volta). Esses valores de *RTT* foram utilizados para cálculo da estimativa da largura de banda na rede PLC.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma. Trabalhos relacionados são discutidos na seção 2. A seção 3 apresenta conceitos relacionados à utilização de redes PLC, seguido do cenário proposto para realização dos testes na seção 4. A seção 5 apresenta os resultados obtidos durante as medições, finalizando com as considerações finais do trabalho.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

A largura de banda para redes cabeadas já foi extensivamente estudado na literatura. Vários algoritmos e técnicas foram desenvolvidos e testados em meios cabeados ou no último salto de redes sem fio [4].

Em redes PLC, este tipo de medição não foi amplamente estudado, visto que é uma tecnologia relativamente nova, embora tenha se mostrado suficientemente competitiva no mercado de acesso por banda larga, disputando com tecnologias tradicionais como o DSL (*Digital Subscriber Line* - Linha Digital de Assinante) [5].

As técnicas para medição da largura de banda de um enlace, podem ser classificadas de duas formas [6]: intrusiva [7][8][9] e não-intrusiva [4].

Na medição intrusiva, são injetados pacotes na rede e coletados os mesmos pacotes ou seus respectivos *ACKs* (*Acknowledgement Packet* - pacote de reconhecimento) gerados

Rennan J. M. Silva, Antonio J. G. Abelem e João C. W. A. Costa, Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação, Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, Brasil; Elisângela S. Aguiar, Adolfo F. O. Colares, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, UFPA, Belém, Brasil. Emails: {rennanmaia, eaguiar, abelem, jweyl}@ufpa.br, adolfocolares@yahoo.com.br.

remotamente. Com base nas informações coletadas, como atraso de RTT pode-se estimar a largura de banda do enlace. Por outro lado, na medição não-intrusiva, utiliza-se a taxa de pacotes recebidos ou outros dados para estimar as características da rede.

Em [1], é feito um estudo comparativo das ferramentas, técnicas e formas de medir não somente a largura de banda do enlace, mas também a largura de banda disponível e a capacidade no enlace de gargalo em um caminho fim-a-fim destacando quatro técnicas: VPS (*Variable Packet Size*) estima a capacidade de um único salto; PPTD (*Packet Pair/Trains Dispersion*) estima a capacidade fim-a-fim; SLoPS (*Self-Loading Periodic Streams*) e TOPP (*Trains of Packet Pair*) estimam a largura de banda disponível em um caminho fim-a-fim.

A. Detecção de largura de banda de um enlace sem fio

Em ambientes sem fio, é proposto por [6], um algoritmo que estima a largura de banda de forma contínua em redes padrão IEEE 802.11 infra-estruturado, unindo rapidez e precisão. Esta proposta utiliza-se do envio de pacotes de tamanho variado de um nó móvel (MN - *Mobile Node*) para uma estação base da rede sem fio (BS - *Base Station*) e coleta de seus respectivos ACKs.

Após a coleta dos tempos (envio do pacote e recebimento do ACK), é calculado o RTT através da subtração do tempo de recebimento do ACK (t_r) pelo tempo de envio do pacote (t_s), conforme apresentado em (1).

$$RTT = t_r - t_s = t_b + t_d + t_c = t_b + S/CL + t_c \quad (1)$$

Assim sendo, t_b é o tempo que um pacote espera para ser transmitido, t_d é o tempo de transmissão do pacote, definido como S/CL , onde S é o tamanho do pacote e CL é a capacidade do enlace, e t_c é uma constante que inclui espaços de tempo como $SIFS$ (*Short Inter-Frame Spacing* - Espaçamento curto interquadros) e $DIFS$ (*Distributed Inter-Frame Space* - Espaçamento interquadros distribuído), tempo de duração de pacotes de tamanho fixos RTS (*Request to Send* - Solicitação de envio), CTS (*Clear to Send* - Pronto para envio) e ACK , além do atraso de propagação.

Verificou-se que t_b segue um padrão de tempo que independe do tamanho do pacote, fazendo com que essa variável fosse incorporada em t_c , visto que o objetivo era o cálculo da largura de banda do enlace (CL). Padronizou-se que $CL=1/k$, para a partir disso gerar uma segunda equação:

$$RTT = k * S + t_c \quad (2)$$

Manipulando a equação (2) para chegar ao valor de k e conseqüentemente à largura de banda do enlace sem fio, foram efetuadas as seguintes derivações.

$$\begin{cases} RTT_1 = k * S_1 + t_c \\ RTT_2 = k * S_2 + t_c \\ RTT_3 = k * S_3 + t_c \end{cases} \quad (3)$$

Organizando-se em matrizes as variáveis acima, obtém-se (4):

$$RTT = \begin{pmatrix} RTT_1 \\ RTT_2 \\ RTT_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} c = \begin{pmatrix} t_c \\ k \end{pmatrix} \quad (4)$$

A partir de (4), por regressão linear, temos a seguinte resolução [6]:

$$\begin{aligned} \bar{c} = \begin{bmatrix} t_c \\ k \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} n & \sum S_i \\ \sum S_i & \sum S_i^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum RTT_i \\ \sum S_i RTT_i \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{n \sum S_i^2 - (\sum S_i)^2} \begin{bmatrix} \sum S_i^2 \sum RTT_i - \sum S_i \sum S_i RTT_i \\ - \sum S_i \sum RTT_i + n \sum S_i RTT_i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

Em ambiente sem fio *Ad Hoc*, um algoritmo chamado de *AdHoc Probe* [4] baseado no algoritmo *Capprobe* [10], foi proposto para estimar a largura de banda. Esta solução se utiliza da técnica que envia pares de pacotes para estimar a capacidade do caminho fim-a-fim em redes sem fio *Ad Hoc* em um único sentido.

AdHoc Probe difere do *Capprobe* em várias características. Primeiro, pois funciona em um único sentido (*one-way*) ao invés da técnica que usa ida e volta (*round-trip*). Segundo, ele mede a taxa máxima conseguida em um caminho não saturado (sem muitos usuários presentes) quando problemas ambientais intermitentes (por exemplo, faixa de mobilidade, erros randômicos, etc.) são ignorados. Terceiro, *AdHoc Probe* foi projetado para trabalhar sob condições atípicas de Internet, onde as redes sem fio são móveis, com múltiplos saltos, interferência e sujeita a mudanças rápidas na taxa de dados do enlace [4].

III. REDES PLC

As redes PLC utilizam a rede de distribuição de energia elétrica como meio de transmissão de sinais de comunicação. A tecnologia PLC possui a vantagem de ter uma infra-estrutura de alta capilaridade, mas possui algumas dificuldades. Por se tratar de uma tecnologia que não foi projetada para a transmissão de dados, o meio físico apresenta características que influenciam negativamente na comunicação (perdas na linha, propagação em múltiplos caminhos e ruídos, por exemplo)[5] [11].

Para reduzir este impacto negativo no meio de transmissão, redes PLC utilizam sistema de modulação eficiente como *OFDM* (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), além de mecanismos de controle de erros (como *FEC* - *Forward Error Correction* e *ARQ* - *Automatic Repeat reQuest*) [3]. Entretanto, estas aplicações consomem certa porção da capacidade da rede PLC por causa da sobrecarga e retransmissão.

Segundo [3], uma rede local PLC infra-estruturada é formada, basicamente, pelos seguintes equipamentos: Modem PLC e estação-base (BS). O modem PLC conecta o equipamento de usuário (computador, telefone IP, etc.) à rede. Conforme mostrado na Figura 1, no lado da interface para o usuário, podem existir várias padrões para diferentes dispositivos (*Ethernet e Universal Serial Bus* - USB). Pelo lado da rede elétrica, os modems PLC utilizam um método de

acoplamento específico que permite inserção e recepção de sinais de comunicação na rede de energia, que funciona como um filtro passa alta que divide o sinal de comunicação (acima 9kHz) do sinal elétrico (50 ou 60 Hz).

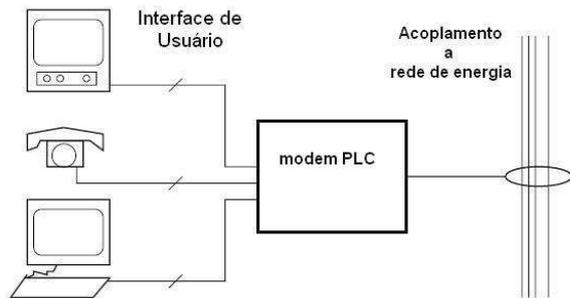


Fig. 1. Funções de um modem PLC [3]

A estação-base conecta uma rede PLC a uma rede de backbone (Figura 2). Ela pode prover múltiplas interfaces de comunicação como xDSL, Ethernet e conexão sem fio, dentre outras.

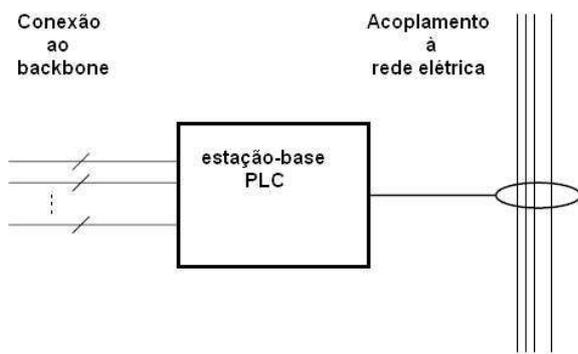


Fig. 2. Funções da estação-base PLC [3]

IV. ESTIMAÇÃO DE LARGURA DE BANDA EM REDES PLC

Os testes foram realizados com quatro modems HL300E padrão HomePlug [12] mostrados na Figura 3, interligados a quatro microcomputadores dentro do LPRAD (Laboratório de Planejamento de Redes de Alto Desempenho) na UFPA (Universidade Federal do Pará).

O algoritmo utilizado por base foi o proposto em [6] o qual possui duas formas para estimar a largura de banda do canal. Apesar de ter sido projetado para redes sem fio, ele foi usado em rede PLC pois o protocolo da camada de enlace é o mesmo nos dois tipos de rede (CSMA/CA) e essa semelhança pode ser um ponto de convergência no cálculo desta métrica.

Na primeira forma (*min*), envia-se determinado número de pares de pacotes com tamanhos variáveis entre 50 e 250 bytes, calcula-se o *RTT* de cada um deles e utiliza-se o menor *RTT* para cada tamanho de pacote na estimação da largura de banda, através da equação (5).

No segundo método (*mean*) para cada tamanho de pacote calcula-se a média aritmética dos *RTTs*. De posse do valor



Fig. 3. Modem Ethernet HomePlug HL300E [12]

dessa média, é realizado o cálculo da largura de banda, também através da equação (5).

Nos testes realizados em [6], o tráfego foi gerado utilizando o protocolo UDP (*User Datagram Protocol*) e os pacotes foram enviados de um cliente para um servidor e assim retornavam. Em nossa experimentação foram utilizados pacotes ICMP gerados pela máquina de origem.

A utilização deste tipo de pacote tem a vantagem de não necessitar de nenhum servidor aguardando conexão para medir largura de banda, e pode ser realizada para qualquer máquina ou roteador dentro da rede PLC que suporte o protocolo.

Entretanto, o uso do pacote ICMP limita a possibilidade de efetuar o cálculo da largura de banda apenas em uma rede que não esteja saturada. Isso acontece, pois os pacotes ICMP têm baixa prioridade e sofrem maior atraso quando estão em meio congestionado.

Durante a realização dos testes observou-se que a rede PLC parcialmente ocupada não influenciou na precisão dos resultados, entretanto, quando esta se encontrava congestionada, os resultados não foram satisfatórios. Isto se deve pela baixa prioridade no repasse dos pacotes ICMP.

Quando cerca de 10% até 95% da banda ocupada, o algoritmo conseguiu fazer o cálculo da largura de banda com resultados de precisão satisfatórios, entretanto, quando a taxa de ocupação da rede ultrapassa os 95%, o resultado dos cálculos do algoritmo apresenta valores distorcidos, divergentes da vazão conseguida pelo *Iperf* [13].

Os resultados foram coletados de duas formas. Primeiramente, para medir a largura de banda utilizou-se o *Iperf* como medição base. Esse software funciona como um gerador de tráfego, que satura a rede enviando o máximo de dados para calcular a largura de banda. Assim sendo, só se pode calcular a largura de banda saturando a mesma. Depois, utilizaram-se os algoritmos propostos em [6] *min* e *mean*, com suas devidas adaptações.

V. RESULTADOS OBTIDOS

Durante os testes, observou-se que quanto maior o número de pacotes, maior a precisão da estimativa no cálculo da largura de banda, entretanto, aumenta também o tempo de teste e a intrusão na rede.

A seguir, são mostrados gráficos com a vazão obtida pelo *Iperf* e estimativas calculadas a partir das duas propostas (*min* e *mean*) para o envio de 100 pares de pacotes coletados em tempos distintos.

TABELA I
COMPARATIVO DE TEMPO, INTRUSÃO E TAXA DE ERRO NAS ESTIMATIVAS DE LARGURA DE BANDA

	Iperf	100 pares		150 pares	
		Min	Mean	Min	Mean
Duração (seg)	10	de 6 a 8	de 6 a 8	de 8 a 17	de 8 a 17
Tráfego Inserido	Entre 5,73Mb e 6,16Mb	de 30Kb a 35Kb	de 30Kb a 35Kb	de 46Kb a 50Kb	de 46Kb a 50Kb
Taxa de Erro	-	Entre 0,41% e 8,86%	Entre 0,21% e 14,57%	Entre 0,20% e 5,28%	Entre 1,05% e 11,34%

Na na figura 4, pode-se observar que o método *min* consegue maior índice de precisão em relação ao método *mean*, para o envio de 100 pares de pacotes. A duração dos testes neste cenário varia entre 6 e 8 segundos, e chega a introduzir entre 0,030 e 0,034 Megabytes de tráfego, enquanto o *Iperf* introduz entre 5,73 e 6,16 Megabytes para realizar a mesma medição.

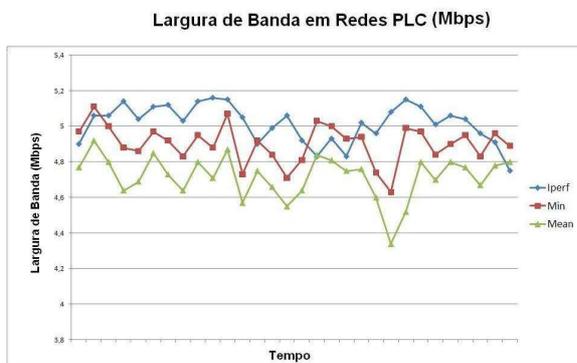


Fig. 4. Estimativa de Largura de Banda para 100 pares de pacotes

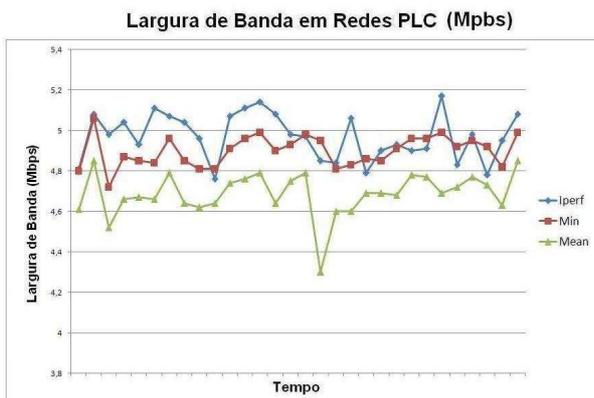


Fig. 5. Estimativa de Largura de Banda para 150 pares de pacotes

No outro cenário, para realização do cálculo de estimativa da largura de banda de um enlace de rede PLC foi realizado o envio de 150 pares de pacotes de tamanho variável entre 50 e 250 bytes. Nessa medição, conseguiu-se um índice de precisão maior, embora o tempo de duração dos cálculos fosse maior além de proporcionar maior intrusão à rede. Para se chegar aos

valores estimados, cada teste durou entre 8 e 17 segundos e foram adicionados ao tráfego entre 0,045 e 0,048 Megabytes.

A Figura 5 mostra como se comportaram as técnicas *min* e *mean* com o envio de 150 pares de pacotes. Nota-se que em relação aos testes com 100 pares de pacotes, consegue-se resultados mais satisfatórios e um valor mais aproximado à largura de banda obtida pelo *Iperf*, no cálculo da estimativa.

Para demonstrar o índice de intrusão inserido na rede, a Figura 6 mostra que ainda enviando um maior número de pares de pacotes, pode-se estimar a largura de banda em um enlace PLC sem saturar a rede, enviando-se o mínimo de pacotes em um curto espaço de tempo.



Fig. 6. Taxa de Intrusão para 150 pares de pacotes

Um comparativo geral mostrando o valor mínimo e máximo dos dados coletados nas medições para cada um dos cenários pode ser visualizado através da Tabela I. Observa-se que a técnica que utiliza o cálculo do valor mínimo de *RTT* (*min*) para estimar a largura de banda consegue, no geral, ter uma taxa de erro menor, possibilitando maior precisão na estimativa tanto no envio de 100 pares de pacotes quanto no envio de 150 pares.

Além disso, nos testes com 150 pares de pacotes, os resultados são mais satisfatórios e obtidos num tempo razoável (máximo de 17 segundos), com relativamente pouca intrusão na rede (até 50 Kb).

VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A estimativa da largura de banda é um assunto que foi muito estudado para redes cabeadas e sem fio tradicionais,

entretanto em redes PLC não é algo trivial de ser calculado. Faz-se, portanto, necessário o desenvolvimento de mecanismos capazes de estimar a largura de banda que possa dar suporte a vários tipos de aplicações que venham a operar neste tipo de rede.

Esse tipo de conhecimento pode ajudar aplicações e protocolos a melhor utilizar os recursos disponíveis, como em difusão de áudio/vídeo, aplicações de controle de QoS e protocolos de gerenciamento e reserva de recursos.

Baseado em um algoritmo proposto inicialmente para redes sem fio, foram feitas adaptações para estimar a capacidade de um enlace PLC. O mesmo consiste no envio de pares de pacotes ICMP, coleta de seus respectivos tempos de *RTT* e estimação da largura de banda realizada através de cálculo feito por duas técnicas diferentes (*min* e *mean*).

Para o cenário proposto, conseguiu-se precisão mínima, em relação à medição obtida pelo *Iperf*, de até 95% no valor estimado, em tempo de até 17 segundos, com uma intrusão relativamente baixa (até 50Kb).

O fato dos testes terem sido feitos com pacotes ICMP permite maior flexibilidade visto que a maior parte dos sistemas operacionais já vem com este protocolo instalado, sem necessidade de ter aplicação cliente e servidor para realização da medição.

O próximo passo deste trabalho é a realização de testes que tomarão como base um gerador físico de tráfego que possa medir a vazão e comparar com os resultados estimados pelo método utilizado neste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo suporte ao projeto e aos pós-graduandos do PPGEE Diego Cardoso, Rafael Marinho e Marcelino Silva pelo apoio na escrita e formatação deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Prasad, M. Murray, C. Dovrolis, K. Claffy. *Bandwidth estimation: metrics, measurement techniques, and tools*, In: IEEE Network, Volume 17, Issue 6. p. 27-35, 2003.
- [2] S. Verdú. *Wireless Bandwidth in the Making*, IEEE Communications Magazine, Volume 38, Issue 7, 6 July 2000. p. 53-58, 2000.
- [3] H. Hrasnica, A. Haidine, R. Lehnert. *Broadband Powerline Communications: Network Design*. John Wiley & Sons Ltd. England, 2004.
- [4] L. Chen, T. Sun, G. Yang, M. Y. Sanadidi, e M. Gerla. *AdHoc Probe: Path Capacity Probing in Wireless Ad Hoc Networks*. p. 156-163, 2005.
- [5] H. Meng, Y. L. Guan. *Modeling and Analysis of Noise Effects on Broadband Power-Line Communications*, In: IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2. p. 630-637, 2005.
- [6] Haohuan Fu, Lidong Lin, Weijia Jia. *Efficient Wireless Link Bandwidth Detection for IEEE 802.11 Networks*. IEEE International Conference on Communications. p. 3604-3608, 2005.
- [7] V. Jacobson. *Pathchar: A tool to infer characteristics of Internet paths*, Disponível em: <ftp://ftp.ee.lbl.gov/pathchar/>. Acesso em: 08/12/2007, 1997.
- [8] K. Lai and M. Baker. *Nettimer: A tool for measuring bottleneck link bandwidth*. Proceeding of the USENIX. Symposium on Internet Technologies and Systems. p. 122-133, 2001.
- [9] K. Lai and M. Baker. *Measuring Link Bandwidth using a Deterministic Model of Packet Delay*. Proc. ACM SIGCOM. p. 283-294, 2000.
- [10] R. Kapoor, L. Chen, L. Lao, M. Gerla and M. Y. Sanadidi. *Capprobe: A simple and accurate capacity estimation technique*. In ACM SIGCOMM. p. 67-78, 2005.
- [11] M. Zimmermann, K. Dosert. *Analysis and Modeling of Impulsive Noise in Broad-Band Powerline Communications*, In: IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 44, No. 1, Fev. 2002.
- [12] HomePlug Powerline Alliance. <http://www.homeplug.org>. Acesso em: 08/12/2007.
- [13] NLAR. *Iperf*. <http://dast.nlanr.net/Projects/Iperf/>. Acesso em: 08/12/2007, 2005.