

# Uma Análise da Capacidade de Transmissão na Rede de Energia Elétrica Domiciliar

Miguel Elias M. Campista, Pedro B. Velloso, Luís Henrique M. K. Costa e Otto Carlos M. B. Duarte

**Resumo**—A comunicação de dados pela rede de energia elétrica está recebendo atenção especial por utilizar uma infraestrutura disponível em qualquer ambiente doméstico. As adversidades do meio elétrico são a principal barreira para a transmissão de dados nesse tipo de canal. Porém, avanços em técnicas de processamento de sinais permitem que altas taxas de transmissão sejam alcançadas. Este artigo propõe uma equação para vazão máxima do HomePlug, que é o padrão que especifica o método de acesso ao meio elétrico mais difundido. Analisa o mecanismo contador de adiantamentos, que é uma inovação do padrão HomePlug, e verifica a sua eficiência na transmissão de dados e de voz. É mostrado através de simulações que o mecanismo melhora o desempenho em ambos os casos.

**Palavras-Chave**—Redes domiciliares, HomePlug, CSMA/CA.

**Abstract**—The powerline communications are receiving special attention since they use an infrastructure available in any domestic environment. The impairments of the electric medium are the main obstacle for data transmission in this channel type. However, advances in signal processing techniques allow higher transmission rates. This article analyzes the deferral counter mechanism which is an innovation of the HomePlug standard. Moreover, it verifies its efficiency for data and voice transmission. We observed through simulation that the mechanism improves the performance in both cases.

**Keywords**—Home networks, HomePlug, CSMA/CA.

## I. INTRODUÇÃO

Assiste-se hoje a uma grande oferta de produtos de diferentes tecnologias que implementam redes locais no lar e compartilham o acesso à Internet de alta velocidade. As tecnologias de redes que são usadas no domicílio são classificadas em *com fio*, *sem fio* e *sem novos fios* [1]. Nos últimos anos, a solução sem novos fios recebeu uma atenção especial. A idéia básica é usar fios de uma infra-estrutura já existente.

O padrão HomePlug [2] está em sua primeira versão e foi desenvolvido pela *HomePlug Powerline Alliance*. Este padrão define o método de acesso ao meio e especificações da camada física. Sua principal preocupação é a robustez da transmissão de dados para compensar as adversidades do canal. Segundo Pavlidou *et al.* [3] o meio elétrico tende a ser pior que o meio sem fio em termos de atenuação e ruído. Portanto, diferentes trabalhos foram feitos para aprimorar técnicas de modulação, de codificação e de processamento de sinais para obter altas taxas de transferência. Os trabalhos [3] e [4] estudam características do meio e técnicas hoje empregadas na comunicação por fios de eletricidade.

As características do meio elétrico como canal foram modeladas em diferentes artigos. Langfeld [5] apresenta quatro possíveis modelos de canal, onde varia-se a topologia e o nível

de ruído. Mostra suas respectivas funções de transferência e parâmetros característicos. Cañete *et al.* [6] descrevem o meio e propõem a adoção de um modelo para o canal que é função das características físicas da rede. Assim, o modelo é aplicável a qualquer cenário, desde que se conheçam o tamanho do ambiente, a quantidade de circuitos e o tipo de cabos.

Atualmente, o principal concorrente do HomePlug é o padrão IEEE 802.11 [7] de redes sem fio devido ao seu sucesso comercial. Desta forma, alguns trabalhos fazem testes de desempenho comparativos entre os dois padrões em cenários domiciliares. Lin *et al.* [1] apresentam os padrões, dando ênfase ao HomePlug, e os comparam em termos de vazão e conectividade da rede com o aumento das distâncias dos enlaces em um ambiente doméstico. Lee *et al.* [8] fazem a mesma análise em outro cenário doméstico. Ambos encontram um melhor desempenho do HomePlug, principalmente para ambientes hostis onde a presença de ruídos são mais acentadas.

Este trabalho complementa as avaliações encontradas na literatura, destacando um mecanismo introduzido pelo HomePlug. Demonstra-se, através de simulações, a eficiência dessa inovação na capacidade de transmissão do padrão. Para isto, foram implementados módulos para o simulador de redes ns-2 [9], que modelam o meio físico e a subcamada de acesso ao meio. Adicionalmente, o artigo propõe através de avaliação matemática uma equação que calcula a vazão máxima do HomePlug, utilizada para confirmar os resultados obtidos pelos módulos desenvolvidos. A partir das simulações foi possível analisar a eficácia do mecanismo de prevenção de colisões baseado em contador proposto pelo padrão HomePlug.

Este artigo está organizado da seguinte forma. A Seção II descreve o padrão HomePlug 1.0. A Seção III analisa matematicamente a vazão máxima teórica do HomePlug. A Seção IV apresenta as principais características dos módulos implementados para o simulador de redes ns-2 e analisa os resultados das simulações realizadas. A Seção V conclui este trabalho.

## II. AS REDES DOMICILIARES ATRAVÉS DA FIAÇÃO ELÉTRICA

As redes domiciliares através da fiação elétrica têm como vantagem a possibilidade de utilizar o cabeamento existente nas casas para a comunicação de dados. Porém, como as redes elétricas não foram projetadas para a transmissão de dados, a comunicação através destas linhas (*Power Line Communications* - PLC) é mais difícil se comparada aos pares trançados da rede Ethernet ou da rede telefônica.

A principal vantagem da infra-estrutura elétrica é a existência de tomadas espalhadas por toda a casa, permitindo o acesso à rede de todos os cômodos e potencialmente por todos os aparelhos. Em comparação às redes sem fio, as redes baseadas em fios de eletricidade não precisam de conversores de rádio frequência, reduzindo o custo [10].

### A. O Padrão HomePlug 1.0

Da mesma forma que o padrão IEEE 802.11, o HomePlug 1.0 utiliza o método de acesso múltiplo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) devido à incapacidade de garantir a detecção de colisão na fiação elétrica, em função principalmente da atenuação e do ruído [2].

Para dar suporte à qualidade de serviço, o padrão utiliza quatro níveis de prioridade no acesso ao meio, atribuídos em função do tipo de tráfego. As prioridades estão associadas às classes CA0 a CA3, sendo a classe CA3 a de maior prioridade.

Para evitar colisões, uma estação que deseja transmitir um quadro de dados deve inicialmente “escutar” o meio. Para determinar se o meio está ocupado, as estações usam detecção física e detecção virtual de portadora. A detecção física somente não é suficiente devido às atenuações e ruídos [2]. A detecção física funciona através do reconhecimento de preâmbulos e transmissões de sinais de prioridade. A detecção virtual de portadora usa informações do quadro “escutado” para conhecer a duração da transmissão e assim estabelecer um vetor de alocação.

Caso o meio permaneça livre por um determinado intervalo de tempo, CIFS (*Contention Distributed Interframe Space*), cujo valor é 35,84  $\mu$ s, a estação entra na fase de determinação de prioridade. São utilizados dois intervalos de tempo para determinação de prioridade (*Priority Resolution - PR*), a fim de permitir que apenas as estações com fluxos de maior prioridade disputem o meio no período de contenção (Figura 1). Cada um dos intervalos de tempo (PR0 e PR1) tem a mesma duração do intervalo CIFS, 35,84  $\mu$ s.

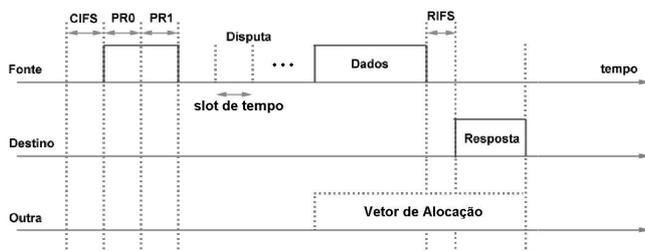


Fig. 1. Transmissão de um quadro de dados com sua respectiva resposta.

A sinalização da classe de prioridade é feita quadro a quadro através de sinais chamados PRS (*Priority Resolution Signal*), enviados nos períodos PR0 e PR1. Os sinais de determinação de prioridade usam uma modulação *on-off*, na qual o número de cada classe representa o sinal a ser transmitido em binário [10]. Assim, ao escutar o bit 1 em PR0, todas as estações com quadros de classes inferiores a CA2 adiam suas transmissões, voltando a esperar o meio ficar livre por CIFS.

No período de contenção, a estação escolhe um número aleatório uniformemente distribuído entre zero e o tamanho da janela de contenção (*Contention Window - CW*) e cria um contador de *backoff* que será iniciado com o número sorteado vezes um intervalo de tempo igual a 35,84  $\mu$ s. Como no padrão IEEE 802.11, o valor da janela de contenção depende do número de vezes que a função de *backoff* foi chamada

para o quadro a ser transmitido. Assim, nos períodos de contenção, uma estação que deseja fazer uma transmissão deve aguardar o meio ficar ocioso por um intervalo de tempo CIFS. Após este intervalo, transmitir seu sinal de prioridade nos intervalos de resolução. Caso não haja nenhuma estação com prioridade superior ao seu tráfego, deve esperar ainda o tempo de expiração do contador de *backoff* para fazer sua transmissão. Para as classes CA3 e CA2, os valores da janela de contenção são 7, 15, 15 e 31, para zero, uma, duas e mais do que duas chamadas da função de *backoff*, respectivamente. Para as classes CA1 e CA0, os valores são 7, 15, 31 e 63.

O contador de adiamento (*Deferral Counter - DC*) é um mecanismo criado para evitar colisões e influencia no número de vezes que a função de *backoff* é chamada para o quadro a ser transmitido. A função de *backoff* é chamada quando há retransmissão após uma colisão ou quando o contador de adiamentos chega a zero e há uma outra transmissão durante o *backoff*. Os valores de DC são 0, 1, 3 e 15 para zero, uma, duas e mais do que duas chamadas à função de *backoff*, respectivamente.

Uma estação decrementa seu DC quando o meio é capturado por uma outra estação que possua quadros com a mesma prioridade. Se o DC alcançar zero, assume-se que há um grande número de estações acessando o meio com a mesma prioridade, aumentando a probabilidade de colisão. Por isso, a estação chama novamente a função de *backoff* ao perceber que o meio está sendo capturado novamente. Como exemplo, se uma estação possui DC igual a zero e chama a função de *backoff*, ela incrementará seu DC para 1. Se o DC era 1, houve decréscimos, e a função foi chamada novamente, a estação incrementa o DC para 3 e assim por diante até 15.

Ao receber o quadro, o receptor verifica se o transmissor deseja receber resposta. Caso deseje, o receptor espera RIFS (*Response Interframe Space*), que é um intervalo de tempo entre o final da recepção do quadro e a transmissão da resposta. As respostas podem ser do tipo ACK (*Acknowledgement*), caso o quadro tenha sido recebido com sucesso; NACK (*Negative Acknowledgement*), caso um erro no quadro tenha sido detectado ou FAIL, caso o receptor não possua espaço na fila de recepção para armazená-lo.

O padrão HomePlug 1.0 utiliza uma faixa espectral que vai de 4,49 a 20,7 MHz. O OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*) divide a banda de 0 a 25 MHz em 128 subportadoras igualmente espaçadas, das quais são utilizadas apenas 84. Eventualmente outras 8 subportadoras são desabilitadas para evitar interferência com as frequências de rádio-amadores, restando 76 subportadoras.

A carga útil do quadro HomePlug consiste de um número de blocos de 20 ou 40 símbolos OFDM, utilizando códigos de erro convolucional e *Reed-Solomon* concatenados. Cada símbolo tem a duração de 8,4  $\mu$ s. A divisão em blocos deste tamanho é feita para combater o ruído impulsivo, que pode danificar uma seqüência de símbolos, principalmente quando se utiliza modulação diferencial, onde pelo menos dois símbolos são perdidos por vez. No codificador convolucional, utiliza-se um comprimento 7 e taxas de código de  $\frac{1}{2}$  ou  $\frac{3}{4}$ . Já o código *Reed-Solomon* usado, utiliza taxas de código que variam de  $\frac{23}{39}$  a  $\frac{238}{254}$ .

Considerando todos os possíveis parâmetros de transmissão, a camada física do HomePlug pode oferecer taxas de transmissão que variam de 1 a 14 Mbps.

Além desses modos de transmissão, há um modo de transmissão especial, chamado ROBO (*ROBust OFDM*). O modo ROBO é mais robusto, com maior redundância para suportar condições de muito ruído. O ROBO utiliza modulação DBPSK (*Differential Binary Phase Shift Keying*), com um nível de redundância que reduz a sua taxa de símbolos para  $\frac{1}{4}$  bit/símbolo/subportadora. Ele também utiliza um código Reed-Solomon com taxas de código diferentes, que variam de  $\frac{31}{39}$  a  $\frac{43}{51}$ , o que reduz a sua taxa de transmissão máxima para 0,9 Mbps.

### III. ANÁLISE DA VAZÃO MÁXIMA DO HOMEPLUG

A equação da vazão máxima do HomePlug proposta foi obtida utilizando os parâmetros de códigos corretores de erro que oferecem a menor redundância e o maior número possível de subportadoras. Assim, a taxa de símbolos por segundo é igual a  $\frac{1}{8,4\mu s}$  ou  $10^7$  símbolos/s, utilizando 84 subportadoras. Utilizando 2 bits por símbolo (modulação QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*)) chega-se a uma taxa máxima de 20 Mbps. No entanto, parte destes bits são utilizados pelos códigos corretores de erro. Assim, a taxa máxima efetiva de transmissão, descontando a redundância introduzida pelo codificador convolucional ( $\frac{3}{4}$ ) e pelo código Reed-Solomon ( $\frac{238}{254}$ ), é igual a 14 Mbps. Este valor não representa a taxa efetiva de transmissão de dados, pois desconsidera a sobrecarga de cabeçalhos, espaçamento entre quadros e tempo de *backoff*. Para tanto, deve-se considerar a seguinte expressão para a vazão máxima (t):

$$t = \frac{nb}{sc + td} \text{ (Mbps)}, \quad (1)$$

onde  $nb$  é o tamanho da parte de dados em bits,  $sc$  a sobrecarga em microssegundos e  $td$  o tempo de transmissão da parte de dados em microssegundos. A partir da Figura 2, que mostra os tempos relacionados à transmissão de um quadro em redes HomePlug, pode-se obter a sobrecarga ( $sc$ ) de transmissão de um quadro HomePlug.

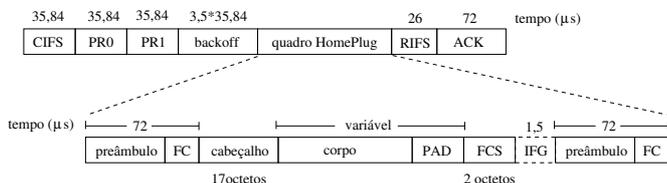


Fig. 2. Tempos associados à transmissão de um quadro HomePlug.

$$sc = 3 \times 35,84 + 3,5 \times 35,84 + 3 \times 72 + 26 + 1,5 \text{ (}\mu s\text{)}. \quad (2)$$

Os delimitadores e sinais de determinação de prioridade devem ser recebidos corretamente por todas as estações, por isso eles são enviados utilizando todas as subportadoras, com a mesma modulação e mesma codificação, independente de quem está enviando ou recebendo os dados. O segundo termo da Equação 2 representa o tempo médio de *backoff* considerando o tamanho de janela inicial, ou seja,  $\frac{7}{2} \times slot$  de tempo ( $\frac{7}{2} \times 35,84\mu s$ ). Embora o cabeçalho e o FCS (*Frame Check*

*Sequence*) de dados representem uma sobrecarga (19 octetos), eles serão incluídos no tempo de transmissão de dados, pois ambos são enviados na mesma taxa dos dados.

O tempo de transmissão dos dados ( $td$ ) está diretamente relacionado (Equação 3) ao número de símbolos ( $ns$ ) a serem transmitidos.

$$td = ns \times 8,4 \text{ (}\mu s\text{)}. \quad (3)$$

O valor  $ns$  depende do número de bits por símbolo ( $m$ ) da modulação utilizada, do número de subportadoras ( $np$ ), dos códigos corretores de erro ( $c$ ) e do número de símbolos por bloco ( $b$ ), como pode ser visto na Equação 4. Os dados são transmitidos em blocos de 20 ou 40 símbolos, dependendo da taxa de transmissão. Assim, o enchimento de bloco (PAD) preenche o bloco físico de transmissão com zeros somente no último segmento de um quadro caso o número de símbolos transmitidos não seja múltiplo do tamanho do bloco utilizado. Isto justifica a aproximação feita na Equação 4, pois o número de blocos deve ser arredondado para o inteiro seguinte.

$$ns = \left\lceil \frac{1}{b} \times \frac{nb + 19 \times 8}{m \times np \times c} \right\rceil \times b \text{ (símbolos)}. \quad (4)$$

Substituindo-se as Equações 2, 3 e 4, na Equação 1 pode-se obter a expressão geral para a vazão máxima em redes HomePlug (Equação 5).

$$t = \frac{nb}{sc + \left\lceil \frac{1}{b} \times \frac{nb + 19 \times 8}{m \times np \times c} \right\rceil \times b \times 8,4} \text{ (Mbps)}. \quad (5)$$

Desta forma, para a taxa máxima de transmissão,  $m = 2$  bits/símbolo,  $np = 84$  subportadoras,  $c = \frac{3}{4} \times \frac{238}{254}$  e  $b = 20$  símbolos por bloco [11]. Assim, a Equação 5 pode ser reescrita na seguinte forma:

$$t = \frac{nb}{sc + \left\lceil \frac{1}{20} \times \frac{nb + 152}{118,06} \right\rceil \times 20 \times 8,4} \text{ (Mbps)}. \quad (6)$$

A Figura 3 apresenta a vazão máxima de uma rede HomePlug utilizando taxa de transmissão constante de 14 Mbps. A curva foi obtida através da variação do tamanho do quadro na Equação 6. Pode-se observar que a vazão máxima varia de 2 Mbps para pacotes de 160 octetos a 8 Mbps para pacotes de 1500 octetos. Estes valores correspondem a uma variação de 14,3% a 57,1% de eficiência com relação à taxa nominal de 14 Mbps.

### IV. SIMULAÇÕES

Os módulos implementados para a camada de acesso ao meio (MAC) e para a camada física foram desenvolvidos em C++ e em oTcl por serem as linguagens do simulador de rede ns-2 (*Network Simulator*) em sua versão 2.26 [9]. O módulo MAC foi baseado no padrão HomePlug versão 1.0.

#### A. O módulo HomePlug

O módulo de camada física implementado utiliza o modelo de ecos proposto em [11] para o cálculo da atenuação que define, em última instância, o alcance das transmissões. O modelo de ecos consiste no somatório de todos os sinais que chegam ao receptor defasados e com amplitudes diferentes. Devido à série de ramificações que a rede elétrica pode possuir e às reflexões ocasionadas por descasamentos de impedâncias,

o sinal transmitido é recebido por múltiplos caminhos. Dependendo do caminho percorrido dentro da rede, das distâncias e do número de reflexões a que cada componente do sinal resultante estará sujeito, a atenuação poderá ser maior diminuindo a influência dessa componente no receptor.

A função de transferência obtida com o modelo de ecos varia com a frequência e possui parâmetros que variam com as características físicas dos fios da rede elétrica e da topologia da rede. Esta função também pode variar com o tempo, conforme equipamentos são ligados e desligados na rede. Nas simulações foi utilizado um canal bem comportado, constante no tempo, utilizando os parâmetros usados por Langfeld [5], que resulta numa função de transferência de comportamento aproximadamente linear com o aumento da frequência.

Para simular erros no canal e forçar os descartes no receptor, foi introduzida uma probabilidade de erro de  $10^{-5}$  por bit. Assim, o receptor descartaria o quadro e transmitiria um reconhecimento negativo (NACK) ao detectar o erro. O transmissor ao receber o NACK retransmite o quadro.

Na subcamada de acesso ao meio, uma característica original do HomePlug é destacada neste artigo. O contador de adiamentos (*Deferral Counter - DC*) é um mecanismo de prevenção de colisão que foi introduzido pelo padrão HomePlug.

Durante as simulações, foram empregados os mesmos parâmetros utilizados no cálculo da equação de vazão máxima: número de subportadoras (84), códigos corretores de erro ( $\frac{234}{258}$  e  $\frac{3}{4}$ ), número de símbolos por bloco (20) e modulação (QPSK).

Foram realizados três conjuntos de simulações. O primeiro visou confirmar os resultados obtidos pelo módulo HomePlug baseado na equação de vazão máxima obtida (Seção III). O segundo e o terceiro conjuntos avaliaram a eficiência do contador de adiamentos. Em todas as simulações há no máximo 16 nós transmissores, pois para um número maior o modo a utilizar é o ROBO.

#### B. Análise da vazão máxima teórica e simulada do HomePlug

No primeiro conjunto de simulações, o módulo foi testado a partir da vazão máxima alcançada por uma transmissão ideal onde a probabilidade de erro no canal vale zero. O cenário é de um nó transmissor e um receptor a 5 metros de distância.

A transmissão é feita a 14 Mbps variando o tamanho da carga útil dos quadros de dados. A fonte transmite a uma taxa de dados constante (*Constant Bit Rate - CBR*). Na Figura 3, a curva cheia representa os valores teóricos e os pontos os valores obtidos pelo módulo de simulação. Verifica-se que os pontos coincidem com a curva teórica confirmando assim o módulo desenvolvido.

O gráfico da vazão máxima teórica possui um formato dente-de-serra devido aos enchimentos feitos para que o número de símbolos por bloco seja sempre um múltiplo de 20. As quedas periódicas que ocorrem na vazão acontecem quando é necessário mais um bloco de símbolos para a transmissão. Portanto, a vazão de tráfego útil diminui devido aos enchimentos.

#### C. Análise do contador de adiamentos com tráfego CBR

O segundo conjunto de simulações analisou a eficácia do contador de adiamentos utilizando tráfego CBR. Foi com-

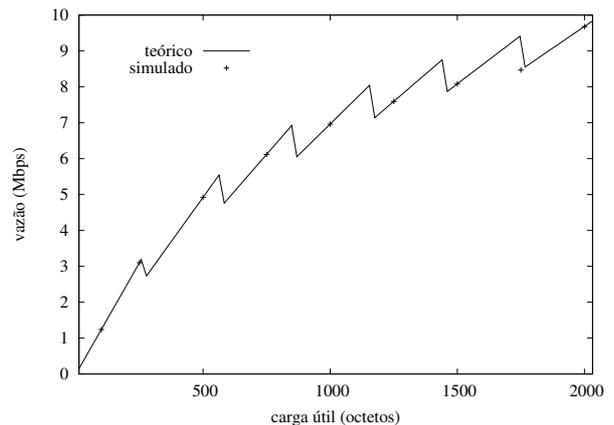


Fig. 3. Vazão máxima para uma rede HomePlug.

rado o desempenho do Homeplug com e sem o uso do contador de adiamentos, ao se transmitir a diferentes taxas, com número de nós e tamanho de carga útil variáveis. A comunicação foi feita aos pares, onde cada nó estava a 5 metros do outro numa linha reta. Todos os nós podiam se comunicar diretamente e o atraso de propagação é desprezível. Os gráficos possuem barras de erro correspondentes a um intervalo de confiança de 95%.

Na Figura 4, foi variado o número de nós mantendo-se a carga oferecida constante. O número de nós transmissores aumenta, mas a soma de suas taxas de transmissão é a mesma. A vazão obtida ao utilizar o DC é sempre maior, para o mesmo número de nós transmissores, se comparada ao caso sem DC. Portanto, verificou-se a efetividade do mecanismo contador de adiamentos para fluxos CBR. Ao diminuir o número de colisões, o mecanismo permite que taxas mais altas de transmissão sejam possíveis.

Além disso, avaliou-se a partir de que carga oferecida ocorre a saturação em cada caso. No caso de apenas um nó transmissor, os gráficos com e sem DC são coincidentes, pois não há disputa pelo meio. É importante notar que a utilização do DC faz diferença antes de ser atingida a saturação. Na Figura 4, no caso de 2 nós transmissores, entre 6000 e 7000 kbps, a vazão com DC já é superior ao sem DC. O mesmo acontece para 16 nós transmissores entre 4000 e 5000 kbps.

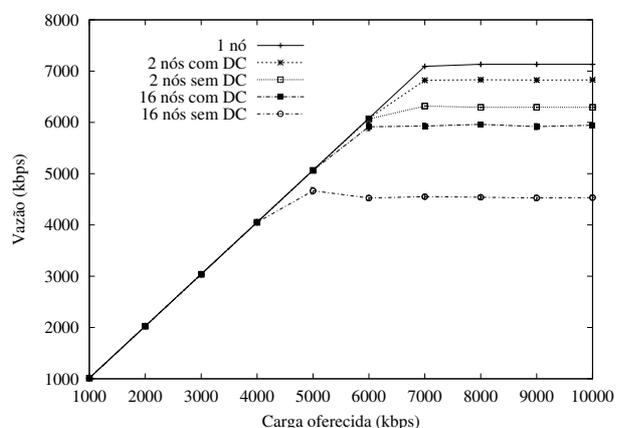


Fig. 4. Vazão dos fluxos CBR.

Na Figura 5, foi verificada a influência do tamanho da carga útil sobre a vazão obtida para uma carga oferecida constante

de 14 Mbps. Pode ser visto que para quadros menores a vazão é menor, devido à maior influência dos cabeçalhos, que representam um custo fixo de transmissão e portanto diminuem a carga útil transmitida. Com o aumento do número de nós, aumenta do número de colisões. Mantendo-se a taxa de transmissão constante, o número de vezes que há acesso ao meio é maior para quadros menores aumentando o número de colisões. No entanto, a probabilidade de haver colisões é constante no caso em que o número de nós transmissores é o mesmo.

Foi constatado que a vazão é sempre maior quando se usa o DC, independente do tamanho dos quadros. Além disso, quanto maior o número de nós mais eficiente é o DC, porque maior é a probabilidade de haver colisões. Isso demonstra que o DC é mais eficiente quando a rede tende à saturação.

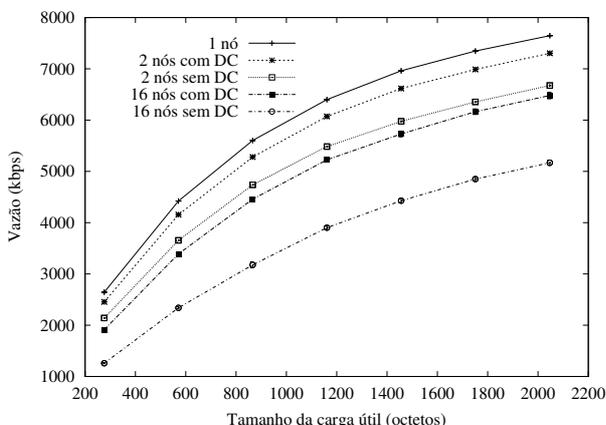


Fig. 5. Vazão dos fluxos CBR.

Em seguida, foi analisada a quantidade de colisões na rede, para melhor caracterizar o efeito do DC. Na Figura 6, o eixo X representa o número de nós transmissores e o eixo Y, a porcentagem de colisões ocorridas sobre o número de tentativas de transmissão, bem sucedidas ou não. Foi analisado o comportamento do DC com o aumento do número de nós a diferentes taxas com carga útil igual a 1500 octetos. Foram escolhidas três taxas de transmissão para a carga oferecida: baixa (1 Mbps), média (6 Mbps) e alta (14 Mbps). Foi observado que o número de colisões aumenta com a taxa de transmissão.

As curvas das taxas média e alta possuem um alto número de colisões. Na taxa baixa, a porcentagem de colisões se mantém baixa e por isso o DC não é eficaz, fazendo com que as curvas sejam coincidentes. A taxa média mostrou que antes da saturação o uso do DC é justificável, pois o número de colisões começa a ser significativo com maiores números de nós.

A porcentagem de colisões tende a aumentar com o número de nós transmissores devido ao aumento da disputa pelo meio. A Figura 6 mostra que com apenas 2 nós transmissores, o emprego de DC diminui as colisões em aproximadamente 6% ao se transmitir a 14 Mbps. Com 16 nós transmissores a diferença é ainda maior, de aproximadamente 38% transmitindo a 14 Mbps, justificando o emprego do DC.

Na Figura 7 foram utilizados dois tamanhos de carga útil, de 250 octetos e 1500 octetos, e mantida a carga oferecida

em 6 Mbps. Verifica-se um maior número de colisões para quadros menores. A eficiência do DC é maior para quadros menores que para quadros maiores, mesmo para uma taxa média oferecida de 6 Mbps.

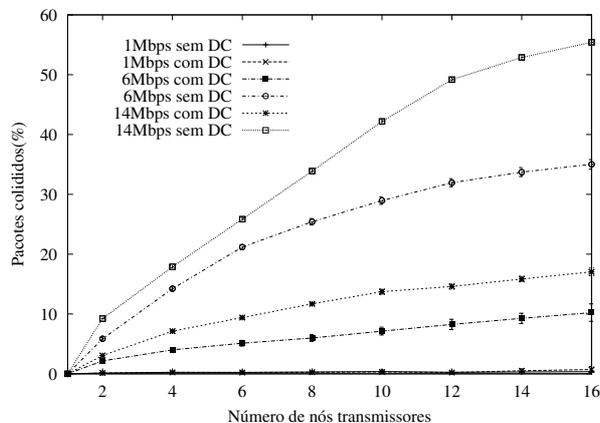


Fig. 6. Porcentagem de colisões dos fluxos CBR.

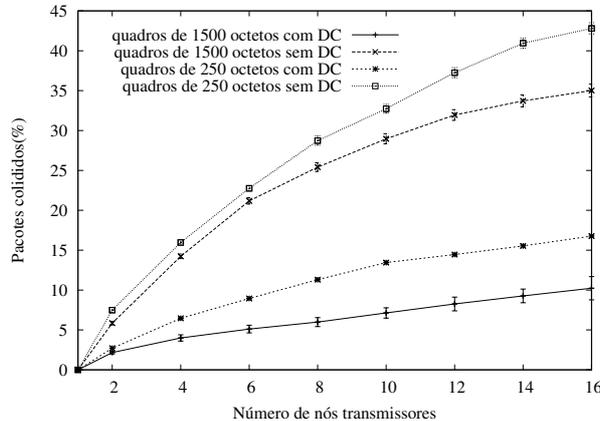


Fig. 7. Porcentagem de colisões dos fluxos CBR.

D. Análise do contador de adiamentos com tráfego misto

O terceiro conjunto de simulações analisa o impacto do uso do DC sobre a transmissão de tráfego de voz do tipo PCM (*Pulse Code Modulation*) combinado com fontes de tráfego CBR. Para simular a voz foram utilizadas fontes com fluxos do tipo *on-off*, com período ocioso de 1,8s e de rajada igual a 1,2s. Foram usados pacotes de 160 octetos, transmitidos a 64 kbps. Estes mesmos valores foram previamente empregados em [12] para a análise de transmissão de voz. O número de fontes de voz foi sendo variado ao longo da simulação. Junto com as fontes de voz, foram transmitidas duas fontes CBR de 3 Mbps transmitindo quadros de 1500 octetos, a fim de simular a transmissão de vídeo. Todos os fluxos possuem o mesmo grau de prioridade. Nesse conjunto de simulações, a topologia utilizada e o intervalo de confiança são os mesmos da sub-seção anterior.

Neste conjunto de simulações a vazão tende a diminuir com a inclusão de novos nós. Diferentemente do tipo de simulação anterior com fluxos CBR, onde a carga se mantinha constante independente do número de nós, agora a carga oferecida aumenta com o número de nós que disputam o meio.

A Figura 8 mostra a vazão global agregada da rede. O eixo X representa o número de fontes de voz e o eixo Y

a capacidade efetiva de transmissão da rede. Pôde-se verificar que o uso do DC é eficiente para um número grande de fluxos de voz onde a probabilidade da ocorrência de colisões é maior. Já para um número pequeno de fluxos de voz o uso de DC, por ser um método preventivo, não é tão eficiente pois as colisões ainda não ocorrem com tanta frequência.

Para o caso com DC, a vazão começa a diminuir com sete fontes de voz e para o caso sem DC essa queda começa com seis fontes. Para o caso sem DC a queda é mais acentuada devido ao maior número de colisões.

A Figura 9 representa o atraso médio sofrido pelos quadros de voz variando-se o número de nós e mostra um atraso maior sem o DC. O tempo foi calculado desde o recebimento do quadro pela subcamada de acesso ao meio do transmissor até a chegada ao receptor. Esse gráfico mostra que a latência média da primeira transmissão com o uso do DC é menor que o atraso médio ocasionado pelas sucessivas retransmissões ocorridas ao não utilizá-lo, devido a colisões. Nesse gráfico pode-se concluir que, sem DC, a partir da nona fonte de voz o atraso médio supera o limite máximo tolerável de 250 ms [12] (utilizado como parâmetro para a aplicação de voz se manter compreensível).

Pode ser observado nesse gráfico que, para 4 nós transmissores, a diferença de atraso médio é significativa entre os casos com e sem DC.

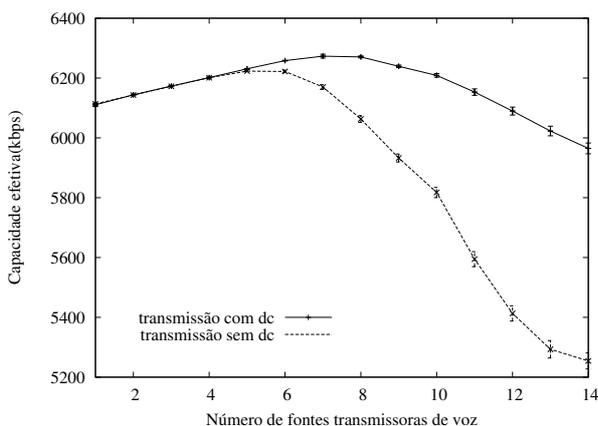


Fig. 8. Vazão de tráfego CBR e voz.

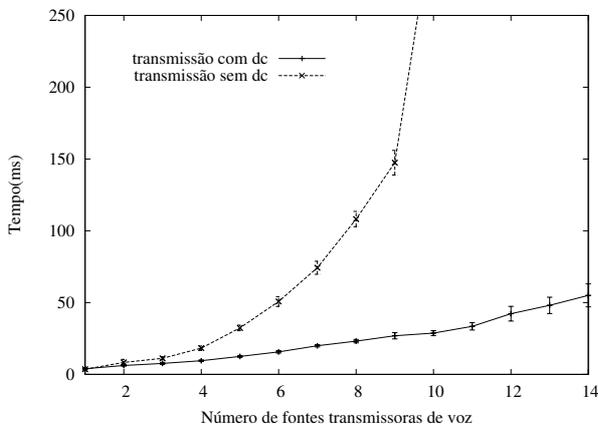


Fig. 9. Atraso do tráfego de voz.

## V. CONCLUSÕES

A transmissão de dados na rede de energia elétrica domiciliar possui grande interesse devido à infraestrutura pré-

existente e ubiquidade. No entanto, muitos desafios ainda existem, principalmente relacionados ao meio físico.

Este artigo complementa outros trabalhos da literatura propondo uma equação para vazão máxima do HomePlug, o padrão de acesso ao meio mais difundido para esse tipo de redes. Além disso, foram implementados módulos de simulação do HomePlug que modelam sua camada de acesso ao meio e camada física. Finalmente, este trabalho avalia através de simulações um mecanismo para evitar colisões proposto pelo padrão HomePlug, o contador de adiamentos (*Deferral Counter* - DC).

As simulações mostraram que a vazão sempre é maior com o uso do DC para fluxos exclusivamente CBR e, mais importante, antes mesmo de chegar à saturação. Além disso, o DC diminui o número de colisões em até 38% quando é utilizada uma taxa de transmissão de 14 Mbps. Constatou-se que o DC é mais eficaz para taxas elevadas.

No caso de fluxos de voz, mostrou-se que com o DC a queda da vazão ocorre para um número maior de fontes de voz simultâneas. Isto não acarretou um aumento acentuado do atraso médio, como ocorreu sem o DC. Foi demonstrado que a latência média inicial para a transmissão de um quadro com DC é compensada pela diminuição do número de retransmissões ocasionadas pelas colisões.

O trabalho verificou a importância e a eficiência do contador de adiamentos e mostrou que, apesar da sua influência ser maior quando a rede está próxima da saturação, seu uso já é justificável para taxas médias.

## REFERÊNCIAS

- [1] Y.-J. Lin, H. A. Latchman e R. E. Newman, "A comparative performance study of wireless and power line networks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 4, pp. 54–63, abril de 2003.
- [2] M. K. Lee, R. E. Newman, H. A. Latchman, S. Katar e L. Yonge, "Homeplug 1.0 powerline communications LANs - protocol description and performance results", *International Journal of Communication Systems*, vol. 16, no. 5, pp. 447–473, junho de 2003.
- [3] N. Pavlidou, A. J. H. Vinck, J. Yazdani e B. Honary, "Power line communications: State of the art and future trends", *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 4, pp. 34–40, abril de 2003.
- [4] E. Biglieri, "Coding and modulation for a horrible channel", *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 5, pp. 92–98, maio de 2003.
- [5] P. Langfeld, "The capacity of typical powerline reference channels and strategies for system design", em *International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC)*, Malmö, Suécia, pp. 271–278, abril de 2001.
- [6] F. J. Cañete, J. A. Cortés, L. Diez e J. T. Entrambasaguas, "Modeling and evaluation of the indoor power line transmission medium", *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 4, pp. 41–47, abril de 2003.
- [7] IEEE, "Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications". IEEE Standard 802.11, 1999.
- [8] M. K. Lee, H. A. Latchman, R. E. Newman, S. Katar e L. Yonge, "Field performance comparison of IEEE 802.11b and Homeplug 1.0", em *IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN'02)*, pp. 598–599, novembro de 2002.
- [9] K. Fall e K. Varadhan, *The ns Manual*. UC Berkeley, LBL, USC/ISI, and Xerox PARC, abril de 2002. Available at <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html>.
- [10] S. Gardner, B. Markwalter e L. Yonge, "Homeplug standard brings networking to the home", Relatório Técnico 12, CommsDesign.com, dezembro de 2000. <http://www.commsdesign.com/main/2000/12/0012feat5.htm>.
- [11] K. Dostert, *Powerline Communications*. Prentice-Hall, 1ª ed., 2001. ISBN 0130293423.
- [12] P. B. Velloso, M. G. Rubinstein e O. C. M. B. Duarte, "Uma análise da capacidade de transmissão de voz em redes ad hoc", em *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, Natal, Brasil, pp. 775–786, maio de 2003.