

Um Mecanismo Eficiente de Redução de Colisões para a Transmissão de Dados Através da Fiação Elétrica Domiciliar

Miguel Elias M. Campista, Luís Henrique M. K. Costa, Otto Carlos M. B. Duarte*

¹Grupo de Teleinformática e Automação
PEE-COPPE/DEL-POLI - Universidade Federal do Rio de Janeiro
C.P. 68504 - CEP 21945-970 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil

miguel@gta.ufrj.br, luish@gta.ufrj.br, otto@gta.ufrj.br

Resumo. *A comunicação de dados através da fiação elétrica está recebendo uma atenção especial por utilizar uma infra-estrutura já disponível e ubíqua. Este artigo propõe um mecanismo onde toda a estação que tenta acessar o meio incrementa sua janela de contenção quando verifica a presença de uma outra transmissão. A proposta é capaz de aumentar a vazão dos dados na subcamada de controle de acesso ao meio, definido pelo padrão HomePlug, ao reduzir o número de colisões na rede. As comparações entre o mecanismo proposto e o HomePlug foram realizadas através de módulos de simulação implementados e de uma expressão derivada. As análises mostraram que a melhoria de desempenho é independente do tamanho dos pacotes, da taxa de transmissão e do número de nós.*

Abstract. *PowerLine communications are receiving special attention since they use an already available and ubiquitous infrastructure. This article proposes a mechanism where every station that wants to access the medium increments its contention window after sensing another transmission presence. The proposal is capable to improve the throughput in the medium access control sublayer, defined by the HomePlug standard, reducing the number of collisions in the network. We compared our mechanism and HomePlug through simulation modules implemented and an expression derived. The analysis verified that the improvement is independently from the packets size, the transmission rates and the number of transmitters.*

1. Introdução

Uma demanda crescente por conectividade em ambientes domésticos vem surgindo devido à necessidade de compartilhar recursos e acesso à Internet em banda larga. Assim, o paradigma de redes domiciliares foi criado privilegiando características importantes como a onipresença de pontos de acesso à rede na residência [Velloso et al., 2004]. O grande mercado para os próximos anos em redes domiciliares é a interconexão, em rede e com qualidade de serviço, de equipamentos de áudio e vídeo. O custo é fator primordial em redes domiciliares e, conseqüentemente, a realização de obras civis para instalação de novos cabeamentos pode ser decisivo na escolha da tecnologia a ser adotada. Nessa direção, foram criados novos padrões de rede, classificados como “sem novos fios”, tais como o HomePlug [Lee et al., 2003] e o HomePNA [ITU-T, 2001], que se servem da fiação elétrica e de telefone, respectivamente, já existentes nas residências. Outra tecnologia concorrente

*Este trabalho foi realizado com recursos do CNPq, CAPES, FAPERJ, FINEP, RNP e FUNTTEL.

que também não requer gastos com cabeamento é o padrão IEEE 802.11 [IEEE, 1999] de redes sem fio.

A tecnologia sem fio tem a mobilidade como característica singular, além de ser uma tecnologia de grande sucesso comercial. Ela tem como desvantagens a grande atenuação por influência de obstáculos que limitam a cobertura. A tecnologia de rede através da fiação telefônica tem a grande vantagem de usar um meio dedicado entre a central telefônica e o assinante, o que permite a melhora da maioria das características acima citadas. No entanto, o número de tomadas de telefone em uma residência normalmente não é grande. Neste item relativo à ubiquidade a rede através da fiação elétrica é muito forte, pois é comum existir tomadas de energia por toda a casa e também diversas por cômodo. Por outro lado, a fiação elétrica não foi projetada para a transmissão de dados a alta velocidade e pode ser considerada um meio físico hostil para esse fim. Segundo Pavlidou *et al.* o meio elétrico tende a ser pior que o meio sem fio em termos de atenuação e ruído [Pavlidou et al., 2003]. Este artigo trata do padrão HomePlug versão 1.0 que define o método de acesso ao meio e especificações da camada física elétrica. O padrão HomePlug tem como principal preocupação a robustez durante a transmissão de dados.

Propostas para tratar as adversidades do meio são abordadas em diferentes trabalhos através do aperfeiçoamento de técnicas de modulação, de codificação e de processamento de sinais possibilitando o aumento das taxas de transmissão. Trabalhos como [Pavlidou et al., 2003] e [Biglieri, 2003] estudam características do meio elétrico para a transmissão de dados, ruído e técnicas hoje empregadas na comunicação por fios de eletricidade. O meio elétrico como canal foi modelado em diferentes artigos. Langfeld apresenta quatro possíveis modelos de canais variando a topologia e o nível de ruído e fornece suas respectivas funções de transferência e parâmetros característicos [Langfeld, 2001]. Esse trabalho é porém limitado a apenas quatro tipos de canais. Cañete *et al.* descrevem o meio e propõem a adoção de um modelo que é função das características físicas da rede [Cañete et al., 2003]. O modelo é aplicável a qualquer cenário, desde que se conheçam o tamanho do ambiente, a quantidade de circuitos e o tipo de cabos. A partir do resultado obtido são extraídas as características finais do canal.

A maioria dos trabalhos que aborda o HomePlug limita-se a fazer testes de desempenho do protocolo. Dentre esses trabalhos, alguns fazem testes comparativos entre a subcamada de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control* - MAC) do HomePlug e do IEEE 802.11. Lin *et al.* 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 [Lin et al., 2003]. Lee *et al.* fazem a mesma análise em outro cenário doméstico [Lee et al., 2002]. Ambos apontam melhor desempenho do HomePlug, principalmente para ambientes mais ruidosos.

Este trabalho propõe e avalia um mecanismo de resolução de colisões, de fácil implementação, capaz de aumentar a eficiência do padrão HomePlug. Demonstra-se, através de simulações e análise matemática, o aumento da eficiência da proposta na capacidade de transmissão. Foram implementados módulos para o simulador de redes ns-2 [Fall e Varadhan, 2002] que modelam o meio físico e a subcamada de acesso ao meio (*Medium Access Control* - MAC) do HomePlug.

Este artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 descreve o padrão HomePlug 1.0, o método de acesso ao meio utilizado e o mecanismo contador de adiamentos. A Seção 3 introduz o mecanismo proposto e o avalia através de expressão derivada para a probabilidade de colisões. A Seção 4 apresenta o modelo implementado para a camada física e os resultados obtidos através de simulações para o mecanismo proposto em comparação com o HomePlug. A Seção 5 conclui este trabalho.

2. O Padrão HomePlug

Da mesma forma que o 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 [Lee et al., 2003]. Para dar suporte à qualidade de serviço, o padrão utiliza quatro níveis de prioridade no acesso ao meio, atribuído em função do tipo de tráfego. As prioridades (*Channel Access Priority - CAP*) estão associadas às classes CA0 a CA3, sendo a classe CA3 a mais prioritária.

Para evitar colisões, uma estação que deseja transmitir um quadro 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 sozinha não é suficiente devido às atenuações e ruídos [Lee et al., 2003] e 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 corrente e assim estabelecer um vetor de alocação. Ao estabelecer um vetor de alocação, a estação só poderá fazer sua transmissão quando o vetor expirar pois esse define um intervalo de tempo suficiente para o fim da transmissão atual.

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

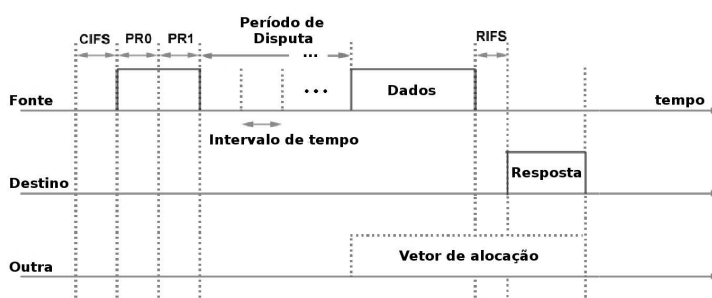


Figura 1: Transmissão de um quadro de dados com sua respectiva resposta.

A sinalização da classe de prioridade é feita para cada quadro a ser enviado 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 [Gardner et al., 2000]. 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 disputa, 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* (*Backoff Counter - BC*), onde $BC \in [0, CW]$. O valor de BC sorteado é multiplicado por um intervalo de tempo igual a $35,84 \mu s$ criando um temporizador. O valor de CW depende do número de chamadas à função de *backoff* (CFB) para o quadro a ser transmitido. Em resumo, nos períodos de contenção, uma estação que deseja transmitir 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 iniciar o seu BC e

esperar sua expiração para fazer sua transmissão. O BC é decrementado de uma unidade sempre que o meio permanecer ocioso por um intervalo de tempo igual a $35,84 \mu s$. Os valores da janela de contenção para as classes de maior prioridade (CA3 e CA2) e para as de menor prioridade (CA1 e CA0) se encontram na Tabela 1.

O contador de adiamentos (*Deferral Counter* - DC) é um mecanismo criado para evitar colisões aumentando o número de vezes que a função de *backoff* é chamada para o quadro a ser transmitido. Logo, a função de *backoff* pode ser chamada mesmo que não haja uma colisão. Uma estação faz uma chamada à função de *backoff* (CFB) sempre que ocorre uma colisão ou quando a probabilidade de ocorrência da mesma é considerável, o que é indicado pelo DC. O mecanismo empregado indica a alta probabilidade de colisão quando o contador de adiamentos atinge zero. Quando o DC é zero, a janela de contenção é incrementada ao perceber o meio sendo ocupado por uma outra estação, diminuindo a probabilidade de colisões. Quando CW e DC de uma estação atingem seus valores máximos, esses permanecerão constantes mesmo que haja novos incrementos. Os valores de DC e da janela de contenção (*Contention Window* - CW) definidos pelo padrão HomePlug são vistos na Tabela 1.

CFB	CAP: CA3, CA2		CAP: CA1, CA0	
	CW	DC	CW	DC
0	7	0	7	0
1	15	1	15	1
2	15	3	31	3
≥ 2	31	15	63	15

Tabela 1: Valores definidos pelo padrão HomePlug para CW e DC.

Durante a transmissão de um quadro, uma estação deve esperar um intervalo de tempo CIFS e após o período de resolução de prioridade, esperar mais um intervalo de tempo aleatório (*backoff*). Durante o período de disputa, uma estação transmissora deve escutar o meio, se o meio permanecer ocioso até o término do *backoff*, a estação transmite seu quadro. Se o meio for ocupado por uma outra transmissão, a estação verifica seu DC e o decrementa se este não estiver nulo. Em seguida, pausa o seu *backoff* e o reinicia quando houver uma nova oportunidade de transmissão, ou seja, quando o meio ficar livre por CIFS e a sua prioridade permitir a transmissão. Se o DC estava nulo, a estação faz uma nova chamada à função de *backoff* e aguarda o meio ficar ocioso novamente para iniciar um novo período de disputa. O pseudo-código do algoritmo de transmissão usando DC pode ser visto na Figura 2. Após transmitir um quadro de dados, a estação aguarda o reconhecimento positivo (*Acknowledgement* - ACK). Se o ACK não for recebido a estação considera que uma colisão ocorreu, faz uma chamada a sua função de *backoff* e espera o meio ficar ocioso novamente para fazer uma retransmissão. Se o ACK for recebido, a estação atribui os valores mínimos a DC e CW.

3. Proposta

Este artigo propõe, implementa e avalia um novo mecanismo que evita colisões de uma forma mais eficiente do que o empregado pelo padrão HomePlug. Toda estação irá sempre incrementar sua janela de contenção (CW) ao verificar o meio sendo ocupado por uma outra transmissão, sendo essa uma transmissão bem sucedida ou não. Equivalente a um DC constante e sempre igual a zero.

Conforme visto na seção anterior, o contador de *backoff* (*Backoff Counter* - BC) é um número aleatório sorteado no intervalo $[0, CW]$. CW maior implica num número

```

1 transmissão ()
2   espera para transmitir um quadro;
3   se o meio está ocioso por CIFS então
4   se o backoff está pausado então
5     reinicia_backoff;
6   senão
7     inicia_backoff;
8   se o backoff terminou e o meio está ocioso então
9     transmite o quadro;
10    recepção(); // Espera por reconhecimento positivo
11    se a estação estiver em backoff e o meio for ocupado então
12      // Verifica DC;
13      se DC == 0 então
14        pára_backoff;
15        incrementa_DC;
16        incrementa_CW;
17        transmissão();
18      senão
19        decrementa_DC;
20        pausa_backoff;
21        transmissão();

1 recepção ()
2   se o reconhecimento positivo não chegar // Ocorreu colisão
3     incrementa_DC;
4     incrementa_CW;
5     transmissão(); // Retransmissão
6   senão
7     retorna;

```

Figura 2: O pseudo-código do algoritmo de transmissão com o DC.

maior de possíveis valores de BC evitando que duas estações quaisquer escolham o mesmo intervalo de tempo para fazer a sua transmissão. Logo, aumentando mais rapidamente o tamanho de CW, a probabilidade de colisões diminui. A Equação 1 apresenta, para o mecanismo proposto, a probabilidade de uma determinada estação fazer uma transmissão bem sucedida num intervalo de tempo qualquer dentro de um período de disputa.

Na Equação 1, sejam i e j índices das n estações transmissoras que pertencem ao conjunto N . Seja s o intervalo de tempo escolhido para a transmissão e sejam W_i e W_j o número atual de possíveis valores para o BC (*Backoff Counter*) durante a transmissão de i e j , respectivamente. A probabilidade de uma estação i transmitir num intervalo de tempo s é igual a probabilidade da estação i escolher um intervalo de tempo s e todas as outras estações j escolherem um intervalo de tempo maior do que s . O valor de W_i é igual a $CW_i + 1$ da estação i no período de disputa corrente. Por exemplo, se $CW_i = 7$, $W_i = 8$ e $BC_i \in [0, 7]$.

$$P_t = \frac{1}{W_i} \times \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{W_j - s}{W_j}, \text{ onde } i \text{ e } j \in N | N = 0, \dots, n. \quad (1)$$

Com o aumento de W_j das estações j , a probabilidade de uma determinada transmissão ser realizada num intervalo específico s tende a $\frac{1}{W_i}$ com $W_j \rightarrow \infty$. Esse resultado é equivalente à probabilidade do meio estar sendo ocupado por uma única estação e essa escolher um determinado intervalo de tempo para a sua transmissão dentre as W_i possibilidades. Quando W_j tende ao infinito, isso significa que as chances das estações j escolherem um intervalo de tempo menor ou igual a s para sua transmissão tendem a zero. Se $W_j \rightarrow s \Rightarrow P_t \rightarrow 0$ pois todas as estações colidem. O aumento do número de estações também influencia a probabilidade de transmissão com sucesso, pois para todos os n nós competirem pelo meio, W_j deverá ser da ordem de grandeza de W_i e portanto o aumento de j ao infinito implica em $P_t \rightarrow 0$. Se j tender ao infinito, o produto $\prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{W_j - s}{W_j} \rightarrow 0$ pois $\frac{W_j - s}{W_j} < 1$.

Generalizando a Equação 1, a probabilidade de haver transmissão num determi-

nado período de disputa por uma estação dentre as n transmissoras é igual a

$$P_t = \sum_{i=0}^n \frac{1}{W_i} \times \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{W_j - s}{W_j}. \quad (2)$$

Como a transmissão pode ocorrer num intervalo s qualquer, desde que $s \in [0, W_{min}]$, onde $W_{min} = \min\{W_1, \dots, W_n\}$ para garantir que não haja nenhum fator negativo do produtório $\prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{W_j - s}{W_j}$, o que significaria $P_t = 0$, tem-se a Equação 3,

$$P_t = \sum_{s=0}^{W_{min}} \sum_{i=0}^n \frac{1}{W_i} \times \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{W_j - s}{W_j}. \quad (3)$$

Na Equação 3, se $W_j \rightarrow \infty$, o somatório $\sum_{i=0}^n \frac{1}{W_i} \times \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{W_j - s}{W_j}$ tende à transmissão de um único nó. Nesse caso, todas as componentes do somatório tendem a zero com exceção da parcela referente à probabilidade de transmissão da estação i que tende a $\frac{1}{W_i}$. Logo, $P_t = 1$ pois a transmissão desse único nó ocorrerá num dos intervalos de tempo s .

A probabilidade de colisão (P_c) é então verificada na Equação 4. Pode ser observado que aumentando W_j ao infinito $P_t \rightarrow 1$ e $P_c \rightarrow 0$. Em contrapartida, se os valores de $W_j \rightarrow s$ ou se o aumento do número das n estações tender ao infinito $P_t \rightarrow 0$. O mecanismo proposto, ao aumentar mais rapidamente os valores de W_j das estações, diminui a probabilidade de colisões tornando o método de acesso empregado (CSMA/CA) mais eficiente. Na Equação 4, observa-se também que a probabilidade de haver uma colisão é independente do tamanho dos pacotes supondo que todos os nós estão dentro de uma área alcance comum e escutam o início da transmissão dos outros.

$$P_c = 1 - \sum_{s=0}^{W_{min}} \sum_{i=0}^n \frac{1}{W_i} \times \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{W_j - s}{W_j}. \quad (4)$$

O padrão HomePlug, ao aplicar um mecanismo de reação mais lento a possíveis colisões, tende a apresentar tamanhos para janelas de contenção menores ao longo de suas transmissões. Esse fato, conforme visto na Equação 4, aumenta a probabilidade de colisões justificando o emprego do mecanismo proposto. Em contrapartida, CW não pode crescer indefinidamente pois implicaria num acréscimo da variação do atraso conforme será visto nas simulações.

4. Simulações

Para simular o mecanismo proposto, o padrão HomePlug versão 1.0 foi implementado para a subcamada MAC e o modelo de ecos para a camada física. Estes módulos foram desenvolvidos em C++ e em oTcl por serem as linguagens do simulador de redes ns-2 (*Network Simulator*) em sua versão 2.26 [Fall e Varadhan, 2002].

4.1. Camada Física

O módulo de camada física implementado utiliza o modelo de ecos visto em [Dostert, 2001] para o cálculo da atenuação que define o alcance máximo 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.

A função de transferência obtida com o modelo de ecos (Equação 5) varia com a frequência e possui parâmetros que caracterizam os fios elétricos e a topologia da rede. Na Equação 5, a parcela $a_i \times e^{-\alpha(f)l_i}$ está relacionada com a atenuação e a parcela $e^{-j2\pi f\tau_i}$ com a defasagem. Essa expressão refere-se a frequências que variam entre 500 kHz e 20 MHz. A função de transferência também pode variar com o tempo, conforme equipamentos são ligados e desligados. Nas simulações foi utilizado um canal bem comportado, constante no tempo, utilizando os parâmetros de [Langfeld, 2001], o que resulta numa função de transferência aproximadamente linear com a frequência.

$$H(f) = \sum_{i=1}^N a_i \times e^{-\alpha(f)l_i} \times e^{-j2\pi f\tau_i}. \quad (5)$$

Para modelar o canal, foi assumida uma taxa de erro binária de 10^{-5} na saída dos decodificadores [Foerster e Liebetreu, 2000]. 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.

4.2. Resultados

Nas simulações é utilizada uma topologia onde as estações estão em linha e se comunicam aos pares. Todas as estações utilizam fluxos UDP de taxa constante (*Constant Bit Rate* - CBR) e estão dentro do alcance de transmissão de todas as outras, calculado a partir do modelo de ecos. Os tamanhos de pacote são de 1500 octetos e 512 octetos e o número de estações é variado de 1 até 16 nós transmissores enviando dados a taxas de 1 Mbps e 14 Mbps. As variações nas taxas, tamanhos de pacotes e número de estações são empregadas para avaliar a proposta em diferentes situações de carga. Os efeitos do mecanismo proposto ao variar o tamanho da janela de contenção máxima ($CW_{máx}$) também são avaliados. Para tal, $CW_{máx}$ varia de 63, que é o tamanho máximo do padrão HomePlug, até 511, obedecendo a expressão $2 \times CW + 1$. Os gráficos possuem barras de erro correspondentes a um intervalo de confiança de 95%.

Na Figura 3 foi avaliada a vazão agregada da rede quando a taxa de transmissão de todos os nós é de 14 Mbps para pacotes de 1500 e 512 octetos. Verifica-se que, em cada curva, a taxa de transmissão agregada na rede diminui ao aumentar o número de fontes pois aumenta o número de colisões (Equação 4). Empregando o mecanismo proposto, porém, essa queda é menor e diminui com o aumento do $CW_{máx}$ empregado, refletindo a diminuição do número de colisões. Esse resultado confirma a Equação 3, pois ao aumentar o tamanho de CW a vazão agregada aumenta tendendo a de um único nó transmissor. A diferença de ganho de vazão entre as diferentes curvas de $CW_{máx}$ diminui para os valores mais altos de $CW_{máx}$ porque a quantidade de colisões já está baixa e um aumento no tamanho de CW não traz ganhos significativos. Esse comportamento é independente do tamanho do pacote utilizado. Porém, quanto maior o pacote, maior é a vazão agregada atingida porque proporcionalmente a sobrecarga do protocolo é menor.

A vazão agregada obtida ao variar o número de nós transmissores com carga oferecida de 1 Mbps por nó é vista na Figura 4, para pacotes de 1500 e 512 octetos, respectivamente. Tanto para 1500 quanto para 512 octetos, nota-se que o mecanismo proposto é vantajoso a partir de 4 nós porque a partir desse ponto começam a ocorrer colisões. O comportamento do mecanismo proposto e do padrão HomePlug é o mesmo até 4 nós pois não há muitas colisões. Em consequência, não há retransmissões nem aumento de CW. Analogamente ao ocorrido para a taxa de 14 Mbps, a vazão obtida é maior e as diferenças de ganho de vazão diminuem entre as curvas conforme $CW_{máx}$ cresce.

As medidas a seguir se referem ao atraso de transmissão dos pacotes. O valor medido é definido como o atraso médio de todos os nós transmissores desde o instante em

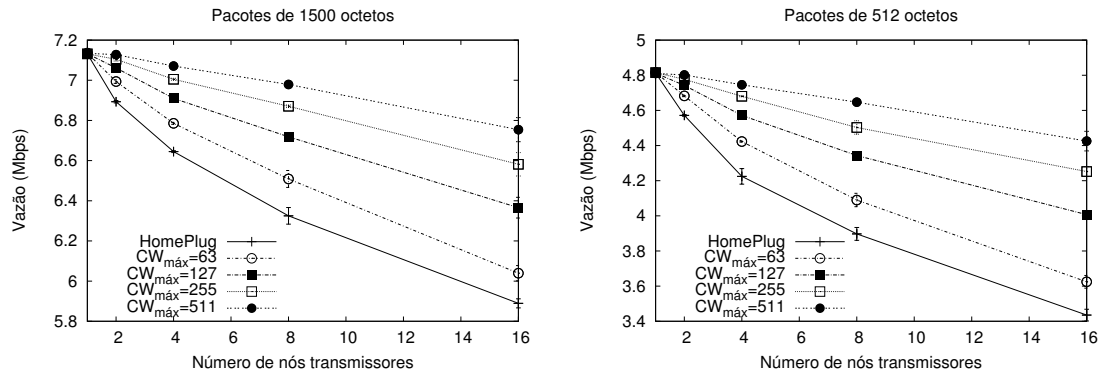


Figura 3: Vazão para taxa de transmissão de 14 Mbps por nó.

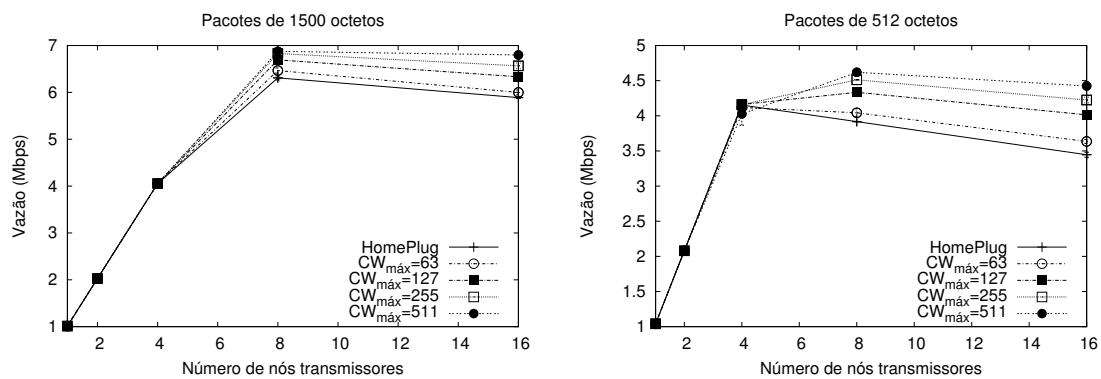


Figura 4: Vazão para taxa de transmissão de 1 Mbps por nó.

que o quadro é recebido pela subcamada MAC até o momento em que é recebido pelo nó de destino, com sucesso. Havendo colisões ou erro de canal o atraso para um determinado pacote continuará sendo considerado até que sua transmissão seja bem sucedida. O atraso de propagação é sempre negligenciável.

Na Figura 5 o atraso médio é verificado para carga oferecida de 14 Mbps por nó. Observa-se que tanto para pacotes de 1500 quanto para 512 octetos, o atraso médio é menor quando o mecanismo proposto é empregado. Aumentando CW mais rapidamente, há diminuição do número de colisões. Apesar do tempo médio de acesso ao meio ser maior, o atraso médio de transmissão diminui com o aumento do número de nós comparado ao HomePlug. Por conseguinte, ao fazer mais retransmissões, uma estação espera mais tempo na média para enviar um quadro com sucesso do que esperaria se CW fosse maior. Nota-se que aumentando $CW_{máx}$, o atraso médio diminui porque os nós que não conseguem transmitir têm as suas chances de acessar o meio reduzidas. Como consequência, o número de estações que competem pelo meio fica temporariamente menor pois será composto apenas pelas estações com CW menor. Isso resulta num aumento da variação do atraso conforme será visto mais adiante. Aumentando o valor de $CW_{máx}$, o atraso médio tende ao atraso de uma única estação transmissora. Esses resultados condizem com as equações da Seção 3. Nota-se também que a diferença de atraso médio entre as diferentes curvas de $CW_{máx}$ diminui conforme $CW_{máx}$ aumenta.

O atraso médio para transmissões de 1 Mbps é visto na Figura 6. Observa-se que o atraso médio começa a aumentar a partir de 4 nós para pacotes de 1500 octetos e a partir de 2 nós para pacotes de 512 pois é quando o número de colisões aumenta. Em ambos

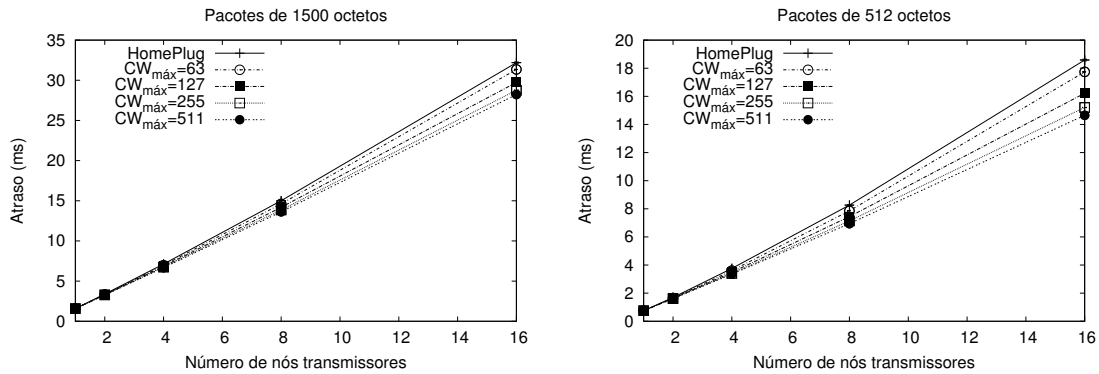


Figura 5: Atraso para taxa de transmissão de 14 Mbps por nó.

os casos, o mecanismo introduz um atraso médio menor quando o número de nós cresce. Para pacotes de 512 octetos, a diferença no atraso inicia para um número menor de nós porque a saturação é atingida mais rapidamente, visto que a sobrecarga de protocolo é proporcionalmente maior em relação às transmissões de pacotes de 1500 octetos.

Antes do início das colisões, o atraso médio do HomePlug e do mecanismo proposto é equivalente, pois tanto o número de colisões quanto o aumento da janela de contenção são eventos que não ocorrem com frequência. A estação que tentar acessar o meio terá uma alta probabilidade de fazê-lo com sucesso na primeira tentativa. Observa-se que o atraso médio de cada curva aumenta com o número de nós quando as colisões começam a ocorrer. Em contrapartida, esse aumento é menor e as diferenças entre as curvas diminuem conforme $CW_{máx}$ aumenta. Esse comportamento é semelhante ao ocorrido para transmissões a 14 Mbps.

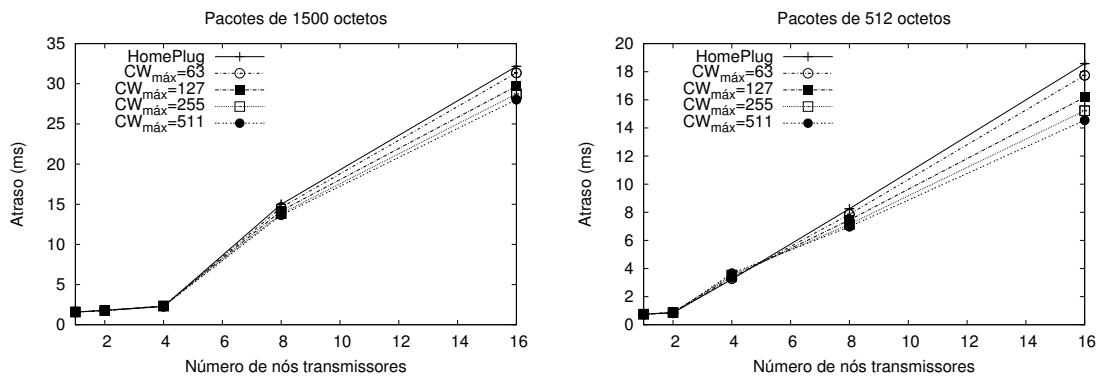


Figura 6: Atraso para taxa de transmissão de 1 Mbps por nó.

Uma colisão ocorre sempre que uma transmissão é realizada por mais de uma estação no mesmo intervalo de tempo. A porcentagem de colisões foi medida através da razão entre o número de colisões e o total de transmissões realizadas, sendo estas bem sucedidas ou não. Na Figura 7 percebe-se que para fontes de 14 Mbps, independente do tamanho dos pacotes a porcentagem de colisões é a mesma. Apesar do número de colisões ser maior para pacotes menores, pois o número de acessos ao meio é maior, o número de transmissões também é mais alto. Logo, a porcentagem de colisões é equivalente ao caso com pacotes maiores. Aumentando CW , a probabilidade de colisões diminui, pois a probabilidade de pelo menos dois nós escolherem o mesmo intervalo de tempo para transmissão é reduzida. Para valores muito grandes de CW a probabilidade

de colisão tende a zero, conforme a Equação 4. Esse resultado pode ser observado nas curvas de $CW_{máx}$, onde a probabilidade de colisão diminui de acordo com o seu aumento. Observa-se também que a diferença entre as curvas de $CW_{máx}$ diminui conforme o valor de $CW_{máx}$ aumenta. Isso ocorre porque com um $CW_{máx}$ já grande, o número de colisões não é mais tão acentuado.

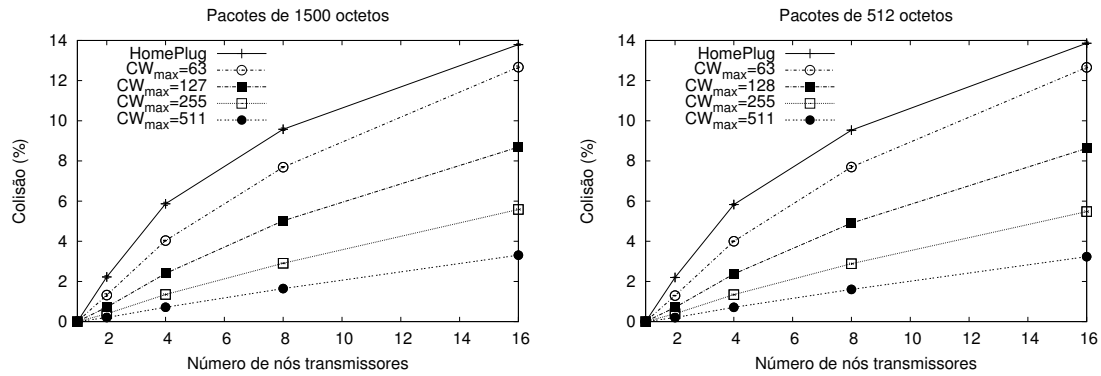


Figura 7: Colisão para taxa de transmissão de 14 Mbps por nó.

Na Figura 8, como os nós estão transmitindo à taxas mais baixas (1 Mbps), o número de colisões passa a ocorrer após um certo número de fontes. Esse número depende do momento em que a carga no meio passa a ser alta e portanto as colisões aumentam. Para pacotes de 1500 octetos as colisões são relevantes a partir de 4 nós transmissores e para 512 octetos, a partir de 2 nós. As curvas para $CW_{máx}$ possuem o mesmo comportamento da curva do HomePlug aumentando a partir de um determinado número de nós. Porém, o aumento é menor quanto maior for $CW_{máx}$.

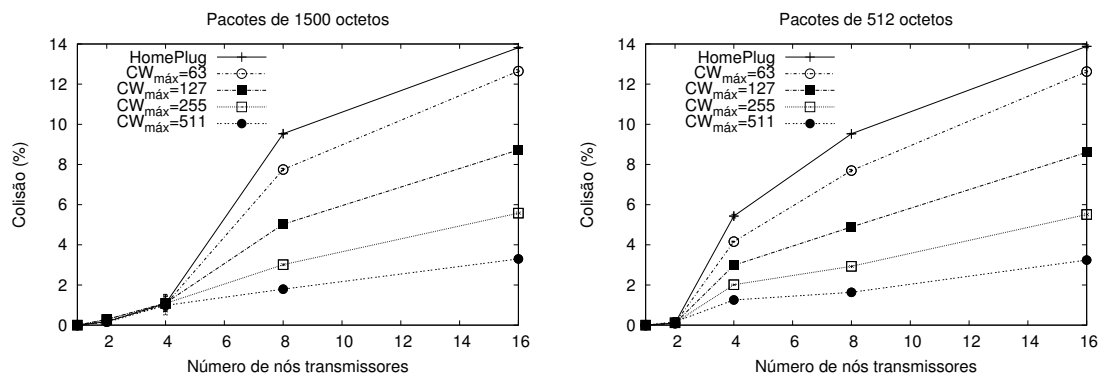


Figura 8: Colisão para taxa de transmissão de 1 Mbps por nó.

A variação do atraso (*jitter*) consiste no desvio padrão do atraso medido a partir dos pacotes recebidos pelos destinatários. Os efeitos do aumento de CW e o número de retransmissões são analisados. Uma retransmissão contribui com o aumento da variação do atraso pois introduz um atraso extra além do necessário numa transmissão bem sucedida. Em contrapartida, aumentando mais rápido CW , a probabilidade de uma estação escolher um valor pequeno para o BC (*Backoff Counter*) e acessar o meio diminui, aumentando o atraso. Se uma transmissão é realizada com sucesso, o atraso é pequeno pois as chances do mesmo nó acessar o meio novamente são maiores com CW no valor mínimo (7). Logo, o mecanismo proposto também influi na variação do atraso. Na Figura 9, é

medido a variação do atraso para transmissões a 14 Mbps. Em ambos os gráficos da figura percebe-se que utilizando o mecanismo proposto para $CW_{máx} = 63$ a variação do atraso é menor do que a do HomePlug independente do tamanho do pacote. Conclui-se que, ao fazer mais retransmissões, o HomePlug possui uma variação do atraso maior do que a proporcionada pelo aumento rápido de CW. Logo, o efeito de aumentar a janela de transmissão rapidamente do mecanismo proposto não supera o efeito das retransmissões. Observa-se, no entanto, que para $CW_{máx} > 63$ a variação do atraso aumenta. Nesses casos, o efeito do aumento mais rápido de CW supera o introduzido pelas retransmissões. Há claramente um compromisso entre a variação do atraso e a probabilidade de colisões, e em última instância entre a variação do atraso e a vazão agregada da rede.

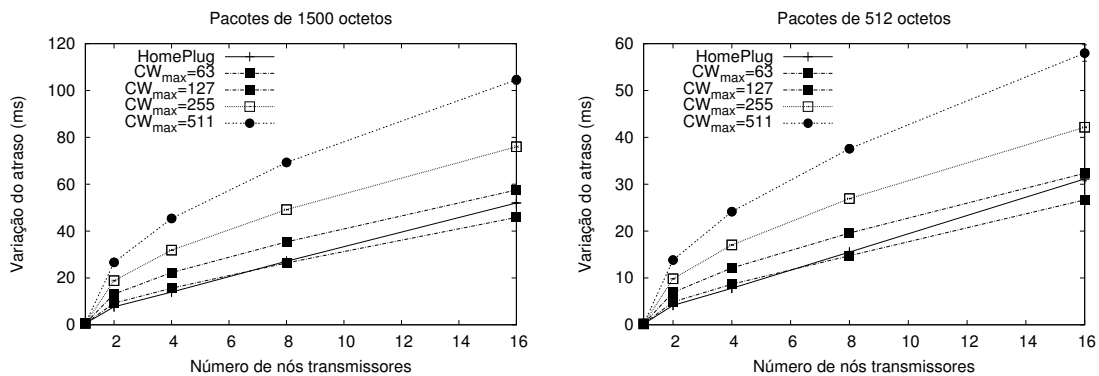


Figura 9: Variação do atraso médio para taxa de transmissão de 14 Mbps por nó.

A variação do atraso para a taxa de transmissão de 1 Mbps possui o mesmo comportamento analisado para 14 Mbps quando o número de colisões aumenta, conforme visto na Figura 10. Para pacotes de 1500 octetos isso ocorre a partir de 4 nós transmissores e para pacotes de 512 octetos, a partir de 2 nós.

Verifica-se em todas as figuras de variação do atraso (Figuras 9 e 10) que a curva do HomePlug é a que possui um crescimento mais acentuado com o aumento do número de nós. No HomePlug, o aumento do número de nós implica num aumento de colisões mais rápido do que o mecanismo proposto. A proposta possui janelas de contenção maiores e as atinge mais rapidamente, portanto a probabilidade de colisão equivalente só é atingida para um número maior de fontes. Esse número de nós é tão maior quanto maior o tamanho de $CW_{máx}$. Logo, dependendo do número de nós é vantajoso aplicar $CW_{máx} > 63$. Nos gráficos para pacotes de 512 octetos das Figuras 9 e 10, por exemplo, com 16 nós transmissores a variação do atraso entre o HomePlug e o mecanismo proposto para $CW_{máx} = 127$ é equivalente. A partir das figuras de variação do atraso, é visto novamente que o aumento das colisões é mais prejudicial do que o aumento mais rápido de CW.

O desempenho da rede pode melhorar se o tamanho de $CW_{máx}$ for estabelecido de acordo com as características do tráfego da rede e do número de nós transmissores. O valor de $CW_{máx}$ pode ser escolhido ou de uma forma fixa configurando o *driver* da placa ou adaptativamente. A forma fixa exige o conhecimento prévio do número de nós e da vazão agregada da rede, a forma adaptativa exige que o *hardware* ou *driver* seja capaz de conhecê-los dinamicamente. A complexidade na escolha de um valor para $CW_{máx}$ está relacionada com a obtenção dos parâmetros necessários.

Na Figura 11 é analisada quantas transmissões consecutivas em média uma mesma estação realiza. Assim, pode-se avaliar a relação entre a variação do atraso e transmissões

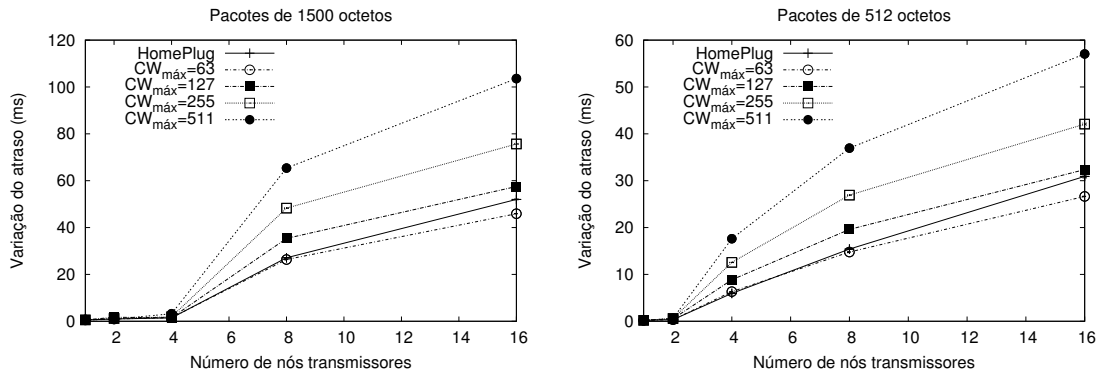


Figura 10: Variação do atraso médio para taxa de transmissão de 1 Mbps por nó.

consecutivas. Não será mostrado o resultado para 1 nó transmissor porque este é o único a transmitir.

Uma mesma estação conseguindo acessar o meio consecutivamente resultará num aumento da variação do atraso. As estações que não estão transmitindo terão que esperar mais tempo para conseguir enviar seus pacotes, introduzindo um atraso alto. Ao acessar o meio, suas chances de permanecer transmitindo são maiores introduzindo um atraso baixo. Na Figura 11 nota-se que para transmissões a 14 Mbps o número de transmissões consecutivas vai diminuindo com o aumento do número de nós porque quanto maior o número de fontes menor é a probabilidade de o mesmo nó ganhar o meio. Pode ser visto nessa figura que independentemente do tamanho dos pacotes, quanto maior a janela, mais vezes um mesmo nó ganha o meio. Isso é previsível a partir da Equação 3 que mostra que com o aumento de CW a transmissão tende a ser realizada por um único nó.

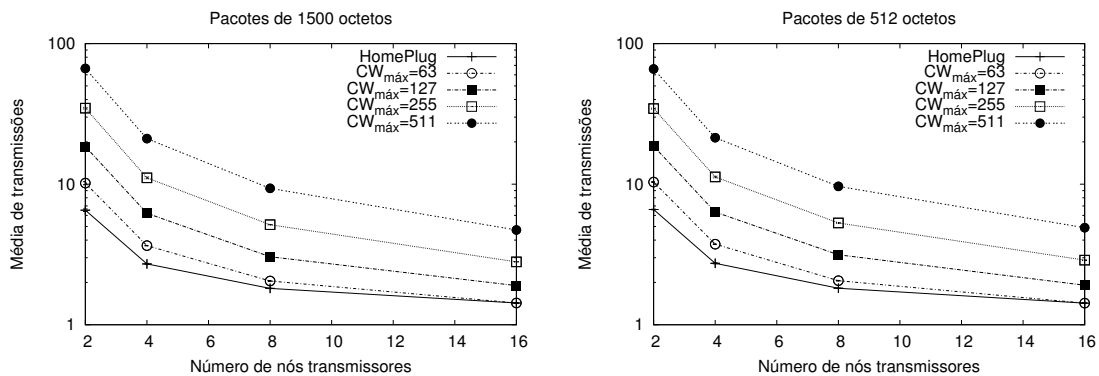


Figura 11: Número médio de vezes consecutivas que um nó transmite a 14 Mbps.

Na Figura 12 ao transmitir a 1 Mbps o número de vezes que uma mesma estação transmite na média é baixo porque a carga oferecida ainda é baixa. Tráfego baixo implica em altas chances de sucesso numa transmissão visto que a disputa ainda não é relevante. Aumentando o número de nós transmissores, há um aumento do tráfego e um mesmo nó passa a acessar o meio repetidas vezes. O incremento de CW das outras estações aumenta a probabilidade de um nó que acabou de transmitir fazê-lo novamente. Ao continuar aumentando o número de fontes, a saturação é atingida e as chances da ocorrência de transmissões seguidas diminui conforme o caso estudado para taxas de 14 Mbps. As curvas relativas ao HomePlug diminuem mais lentamente do que as outras pelos mesmos motivos que levam a sua variação do atraso a aumentar mais rapidamente. Assim, como

nas Figuras 9 e 10, as curvas do HomePlug para consecutivas transmissões são próximas da curva de $CW_{m\acute{a}x} = 63$.

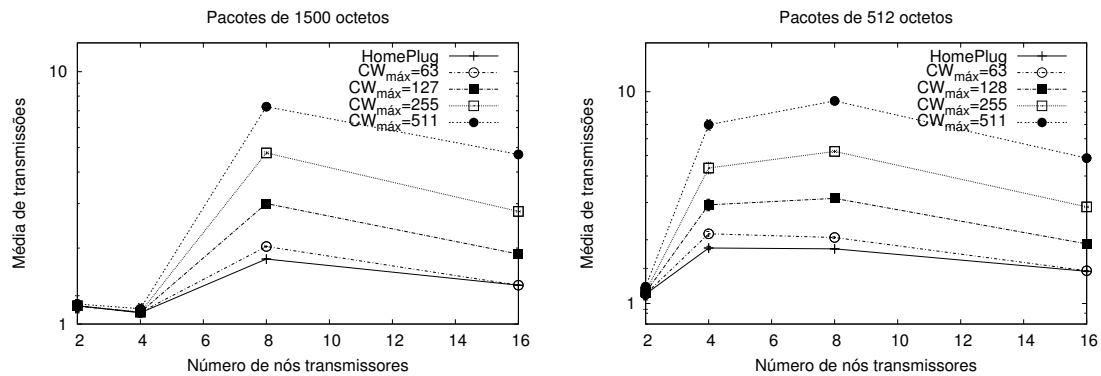


Figura 12: Número médio de vezes consecutivas que um nó transmite a 1 Mbps.

Tendo em vista que utilizando $CW_{m\acute{a}x} = 63$ o desempenho foi melhor na maioria dos casos sob todos os aspectos analisados e além disso é o que introduz menor dificuldade de implementação, a escolha de $CW_{m\acute{a}x} = 63$ é sugerida.

5. Conclusão

Este trabalho propôs e avaliou um mecanismo de redução de colisões capaz de aumentar a eficiência do protocolo de acesso ao meio do padrão HomePlug. Diferente do HomePlug, uma estação que deseja transmitir sempre incrementa a sua janela de contenção (*Contention Window - CW*) até um valor máximo, ao “escutar” o meio sendo ocupado por uma outra transmissão. Esse incremento é realizado independentemente da transmissão ter sido bem sucedida ou não, podendo ser inclusive uma colisão. O mecanismo proposto é de fácil implementação sendo este um fator desejável.

Nas simulações foi verificado que o mecanismo proposto aumenta a eficiência do padrão HomePlug independente do tamanho dos pacotes transmitidos, das taxas de transferência de dados e do número de nós. A melhoria de desempenho foi mais acentuada conforme o aumento do tráfego na rede, para tráfegos baixos o desempenho se mostrou o mesmo do HomePlug. Durante as simulações foram analisados também os efeitos da utilização de janelas de contenção mais altas. Para tal, o mecanismo proposto foi utilizado com CW máximo até 8 vezes maior do que o valor utilizado pelo padrão HomePlug. Verificou-se que ao aumentar CW , a transmissão tende à transmissão realizada por um único nó, ou seja, o aumento de CW implica no aumento da vazão da rede, na diminuição do atraso médio e do número de colisões, porém aumenta significativamente o valor do jitter médio. Foi visto que há um compromisso entre o jitter e a probabilidade de colisões. Verificou-se adicionalmente que dependendo do tráfego da rede e do número de nós, o valor de CW máximo que apresenta os melhores resultados pode variar. As simulações foram realizadas através de módulos para o simulador de redes ns-2 [Fall e Varadhan, 2002] implementados. Estes módulos modelam o meio físico e a subcamada de controle de acesso ao meio (MAC).

Complementando a simulação, a análise matemática realizada resultou em uma expressão para a probabilidade de colisões. A expressão demonstrou que para um número grande de nós a probabilidade de colisões aumenta. Foi demonstrado também que a vazão na rede tende a de um único nó ao aumentar CW .

Concluiu-se que mantendo o valor de CW máximo igual ao do padrão ($CW_{máx} = 63$), há o aumento da eficiência sob todos os aspectos analisados. Segundo a análise deste artigo, um CW máximo maior que 63 seria vantajoso somente para tráfegos muito altos e na maioria dos casos somente implicaria num aumento proporcional da variação do atraso. Em trabalhos futuros, planeja-se propor um mecanismo que adapte dinamicamente o tamanho máximo de CW conforme o tráfego da rede e explorar a expressão de probabilidade de colisões.

Referências

- Biglieri, E. (2003). Coding and Modulation for a Horrible Channel. *IEEE Communications Magazine*, 41(5):92–98.
- Cañete, F. J., Cortés, J. A., Diez, L. e Entrambasaguas, J. T. (2003). Modeling and Evaluation of the Indoor Power Line Transmission Medium. *IEEE Communications Magazine*, 41(4):41–47.
- Dostert, K. (2001). *Powerline Communications*. Prentice-Hall, 1ª edição. ISBN 0130293423.
- Fall, K. e Varadhan, K. (2002). *The ns Manual*. UC Berkeley, LBL, USC/ISI, and Xerox PARC. Acessada em <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html>.
- Foerster, J. e Liebetreu, J. (2000). FEC Performance of Concatenated Reed-Solomon and Convolutional Coding with Interleaving. Relatório técnico, IEEE. Acessada em http://iee802.org/16/phy/contrib/802161pc-00_33.pdf.
- Gardner, S., Markwalter, B. e Yonge, L. (2000). Homeplug Standard Brings Networking to the Home. Relatório Técnico 12, CommsDesign.com. Acesada em <http://www.commsdesign.com/main/2000/12/0012feat5.htm>.
- IEEE (1999). Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE Standard 802.11.
- ITU-T (2001). G.989.1: Phoneline Networking Transceivers - Foundation. Recomendação.
- Langfeld, P. (2001). The Capacity of Typical Powerline Reference Channels and Strategies for System Design. Em *International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC)*, páginas 271–278, Malmö, Suécia.
- Lee, M. K., Latchman, H. A., Newman, R. E., Katar, S. e Yonge, L. (2002). Field Performance Comparison of IEEE 802.11b and Homeplug 1.0. Em *IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN'02)*, páginas 598–599.
- Lee, M. K., Newman, R. E., Latchman, H. A., Katar, S. e Yonge, L. (2003). Homeplug 1.0 Powerline Communications LANs - Protocol Description and Performance Results. *International Journal of Communication Systems*, 16(5):447–473.
- Lin, Y.-J., Latchman, H. A. e Newman, R. E. (2003). A Comparative Performance Study of Wireless and Power Line Networks. *IEEE Communications Magazine*, 41(4):54–63.
- Pavlidou, N., Vinck, A. J. H., Yazdani, J. e Honary, B. (2003). Power Line Communications: State of the Art and Future Trends. *IEEE Communications Magazine*, 41(4):34–40.
- Velloso, P. B., Cunha, D. O., Amodei Jr., A., Rubinstein, M. G. e Duarte, O. C. M. B. (2004). Redes Domiciliares: Desafios das Tecnologias sem Novos fios. Em *Minicursos do XXII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores - SBRC2004*, Gramado, Brasil.