

Um Protocolo MAC de Cooperação para Redes PLC

Roberto M. Oliveira^{1,2}, Michelle S. P. Facina², Moises V. Ribeiro^{2,3}, Alex B. Vieira¹

¹Departamento de Ciência da Computação
Universidade Federal de Juiz de Fora – Juiz de Fora, MG – Brasil.

²Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Juiz de Fora – Juiz de Fora, MG – Brasil.

³Smarti9 Ltda. - Juiz de Fora, Brazil

{rmassi.oliveira,michelle.soares,mribeiro,}@engenharia.ufjf.br
alex.borges@ufjf.edu.br

Abstract. *This paper introduces medium access control (MAC) protocol improving the performance of in-home power line communication (PLC) systems when a cooperative single relay model is considered. The proposed protocol is able to work regardless of the idleness or busyness of the relay node to cooperate with the source node at the link layer level. To support this proposal, we briefly present a statistical analysis of packet loss and goodput performances that are obtained with an uncoded orthogonally frequency division multiplexing scheme when estimates of measured in-home cooperative PLC channels are considered. Numerical results, when an orthogonal frequency division multiple access-time division multiple access scheme, reveal in which conditions the proposed protocol can improve PLC system performance at the link layer. Overall, the proposed protocol is capable of reducing the packet loss in half and increasing up the goodput in 46%.*

Resumo. *Este artigo apresenta um protocolo de cooperação de controle de acesso ao meio (MAC) que melhora o desempenho de redes domésticas de sistemas de comunicação via rede elétrica (PLC) considerando um modelo com um único relay. O protocolo proposto é capaz de operar, independentemente, da ociosidade ou da ocupação do relay, promovendo cooperação com o nó fonte no nível da camada de enlace. Para apoiar essa proposta, nós apresentamos uma análise estatística da perda de pacotes e do goodput obtidos com um esquema de acesso múltiplo por divisão na frequência não codificado (uncoded OFDM), considerando medidas realizadas em canais PLC cooperativos de ambientes domésticos. Os resultados numéricos, quando realizado o acesso múltiplo por divisão na frequência e o acesso múltiplo por divisão no tempo (OFDMA-TDMA), revelam em quais condições o protocolo proposto melhora o desempenho de um sistema PLC na camada de enlace. Na média, o novo mecanismo proposto reduz as perdas pela metade e melhora o goodput em 46%.*

1. Introdução

Atualmente, há uma grande discussão em torno da utilização de um protocolo de cooperação adequado para melhorar desempenho da comunicação via rede elétrica

(PLC). A maior parte das contribuições nessa área discutem os tipos de melhorias que podem ser obtidos na camada física, utilizando cooperação com técnicas de combinação de sinais provenientes de canais distintos [Biagi 2011, Cheng et al. 2013, Kim et al. 2012, Valencia et al. 2014]. No entanto, há a possibilidade de implementação, tanto de técnicas de cooperação, quanto de *network coding*, em camadas superiores [Noori and Lampe 2013, Bilbao et al. 2014]. Seja na camada física, ou em camadas superiores, técnicas de cooperação têm o potencial de melhorar a confiabilidade da rede (e.g. redução da perda de pacotes) e de aumentar seu desempenho (e.g. ganhos em *goodput*). Mais ainda, as técnicas existentes em várias camadas podem ser combinadas com o objetivo de mitigar as barreiras na comunicação de dados oferecidas pela rede elétrica.

A literatura revela uma lacuna com relação a trabalhos de cooperação em sistemas PLC. Há também uma falta de conhecimento sobre o comportamento de tais sistemas na prática. Por exemplo, não conhecemos como é a taxa de erro de pacotes na camada de enlace de sistemas PLC. Consequentemente, são desconhecidas as circunstâncias nas quais a cooperação nessa camada poderia melhorar o desempenho de redes PLC.

Nesse sentido, neste trabalho propomos um mecanismo adaptativo de cooperação na camada MAC. Tradicionalmente, a cooperação explora a ociosidade de um nó cooperador (*relay*) [Lee et al. 2013] ou, simplesmente, a diversidade de canais (ou enlaces) existentes [Yang et al. 2010]. A nova abordagem que propomos explora ambos os fatores, associa a diversidade de caminhos a um esquema de acesso múltiplo de divisão de frequência ortogonal e acesso múltiplo por divisão de tempo (OFDMA-TDMA). Assim, nosso mecanismo de cooperação pode tanto melhorar o *goodput* como reduzir a perda de pacotes na rede.

Para demonstrar tais melhorias, fizemos simulações utilizando estimativas de taxa de erro de pacote em um modelo com um único *relay*. Utilizamos o esquema HS-OFDM (*hermitian symmetric - orthogonally frequency division multiplexing*) [Ribeiro et al. 2014] transmitindo símbolos com a modulação de chaveamento binário de fase (BPSK), por meio de canais domésticos PLC. Como resultados, mostramos em quais circunstâncias a cooperação na camada de enlace pode ser útil ao sistema PLC. Os resultados obtidos mostram que, quando comparado a um sistema sem cooperação, o novo protocolo é capaz de aumentar o *goodput* em 46%. Mais ainda, sistemas sem cooperação apresentam, em média, 115% a mais de perdas quando comparados com o novo protocolo.

Em suma, nossas contribuições se dividem em duas etapas: primeiro, desenvolvemos um protocolo adaptativo de cooperação na camada de enlace redes PLC; finalmente, utilizamos o protocolo desenvolvido para delimitar os cenários nos quais a cooperação na camada de enlace é viável e oferece melhoras no desempenho de redes PLC.

2. Formulação do Problema

A Figura 1 mostra uma rede PLC doméstica em um modelo com um único *relay*. Nessa rede, S, R e D equivalem aos nós fonte, *relay* e destino, respectivamente. Tal cenário é composto por três enlaces: fonte-destino (SD), fonte-*relay* (SR) e *relay*-destino. Além disso, cada canal possui taxas de erro de pacote independentes denominadas por PER_i , $i \in \{SD, SR, RD\}$. Apesar de haver apenas um *relay* nesse cenário, a proposta atual pode ser expandida ao uso de múltiplos *relays*. Além disso, espera-se que o uso de um

único *relay* seja um limite inferior de possíveis ganhos pelo uso de cooperação na camada de enlace de redes PLC.

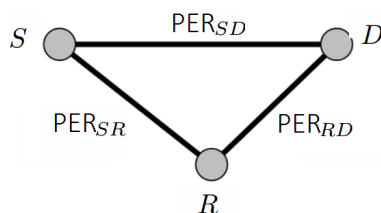


Figura 1. Modelo cooperativo com um único *relay*.

Os valores das taxas de erro de pacote (PER_i) são extraídos a partir da taxa de erro de bits (BER_i) obtida na camada física para o i -ésimo enlace. Seu cálculo é dado por $PER_i = 1 - (1 - BER_i)^{N_i}$, onde N_i corresponde ao tamanho do pacote. Essa fórmula representa a probabilidade de ocorrência de erro em, pelo menos, um bit de um pacote com N_i bits. Na prática, os valores de PER_i na camada de enlace são desconhecidos.

Realizamos uma campanha de medição em sete residências de uma área típica urbana brasileira, a fim de estimar a PER dos enlaces SD, SR e RD. Assim, adquirimos estimativas de canais PLC cooperativos e ruídos aditivos em ambientes domésticos. Para realizar as medições, utilizamos um equipamento composto por dois computadores, placas de geração e aquisição de dados e acopladores capacitivos, cujos detalhes podem ser vistos em [Colen et al. 2013]. Além disso, foi usado um sistema baseado em escuta para estimar a resposta em frequência dos canais, como visto em [Oliveira et al. 2014]. Nessa campanha, coletamos informações sobre taxas de erros de bit em mais de 36 mil canais PLC, considerando a frequência de banda entre 1.705 MHz e 100 MHz.

Consideramos um esquema *uncoded* HS-OFDM juntamente com a modulação de chaveamento de fase binário (BPSK). Consideramos também perfeita sincronização e conhecimento da informação de estado do canal por parte do receptor. A potência total é de $P = P_0 + P_1$ onde P_0 e P_1 são alocadas para os nós S e R, nessa ordem. As potências são distribuídas igualmente entre as N subportadoras do símbolo HS-OFDM (P_0/N e P_1/N para os nós S e R, respectivamente), durante um ciclo de comunicação de dados (primeiro *time-slot* alocado para o nó S e o segundo, para o nó R).

A Figura 2 apresenta as posições comumente encontradas durante nossas medições do nó R, em relação aos nós S e D. Intuitivamente, nos casos #1 e #3, os enlaces SR e RD são menores que o enlace direto. Assim, esperamos que a transmissão direta pelo enlace SD apresente uma taxa de erros maior que os enlaces indiretos. Nesses dois casos, a cooperação pode melhorar a confiabilidade do sistema e melhorar seu desempenho. Por outro lado, os casos #2 e #4 apresentam enlaces indiretos com distâncias tão grandes quanto o enlace direto (ou maiores como no caso #4). Em ambos os casos, a utilização do *relay* como cooperador pode trazer benefícios limitados ao sistema.

A Figura 3 mostra valores típicos de PERs conforme variamos a potência dos canais. Todas as PER tendem a 1 quando a potência total é reduzida; e a 0 quando há um aumento da mesma. Além disso, para todo o conjunto de potências, observamos que as PER de SD são maiores que as obtidas para os enlaces SR e RD. Para 10 dBm, por exemplo, notamos que os valores de PER para o enlace SD são de até 60%, enquanto que

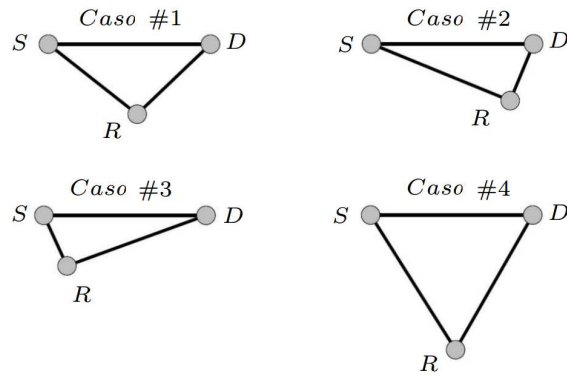


Figura 2. Posições relativas de R obtidas na campanha de medição.

para os enlaces SR e RD, esses valores são de 40% e 20%, respectivamente. Portanto, o aproveitamento de um *relay* para auxiliar o nó fonte na camada MAC, com o objetivo de melhorar a performance da rede, é um fator interessante investigado neste trabalho.

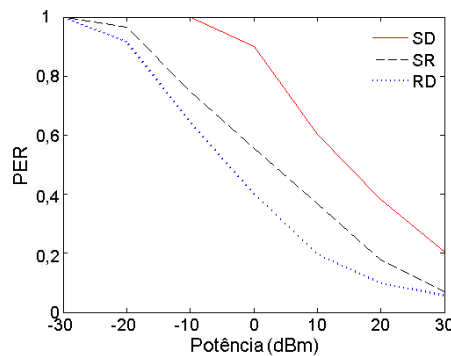


Figura 3. PER média para cada enlace com variação da potência.

Adicionalmente, a Figura 4 mostra a função de distribuição cumulativa (CDF) dos valores relativos de perda de pacotes (PER_{SR}/PER_{SD} e PER_{RD}/PER_{SD}), denotados por ρ . Nesse caso, consideramos todos os canais medidos com a potência total de 10 dBm. Como podemos observar, as probabilidades para que PER_{SR} e PER_{RD} sejam menores que PER_{SD} ($\rho < 1$), são de 0.83 e 0.71, respectivamente. Isso significa que os enlaces SR e RD, que compõem um caminho alternativo entre S e D, possuem erros proporcionais menores que o caminho SD. Então, a comunicação através do *relay* apresentará menos problemas que o envio direto ao destino.

Por fim, é importante ressaltarmos que, nas próximas seções, nossas análises se limitam a um sistema com um único *relay*, pois as medições realizadas se limitam a esse cenário. No entanto, os protocolos analisados podem ser utilizados em sistemas com *n-relays* de forma transparente.

3. Protocolo de cooperação na camada MAC para redes PLC

Como mostramos na Figura 1, redes PLC possuem características de um barramento. Mais precisamente, um pacote enviado pela origem S é recebido tanto pelo *relay* R, quanto pelo destino D. Nessa situação, pode-se assumir que os nós envolvidos possuem *buffer*

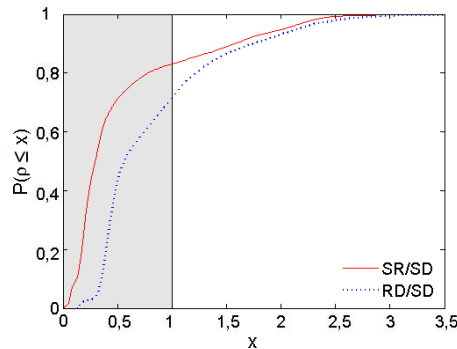


Figura 4. Valor relativo de perda de pacotes quando a potência é de 10 dbm.

suficientemente adequado para o armazenamento temporário de pacotes. Assim, caso D envie uma confirmação negativa (NACK)¹, tanto S quanto R podem tentar retransmitir os pacotes correspondentes utilizando seus próprios recursos. Nesse esquema, o nó D é responsável pela detecção de pacotes errados ou perdidos. Caso algo do tipo ocorra, D envia uma mensagem de NACK em *broadcast*, requisitando a retransmissão de um pacote específico.

Neste trabalho, consideramos um esquema TDMA para acesso à rede elétrica por parte dos usuários. Além disso, assumimos que um *frame* é dividido entre períodos de sinalização (SP) e de dados (DP). O período de sinalização SP é usado para a troca de mensagens de controle, as quais ajustam detalhes da transmissão e da cooperação. Já o período de dados DP é alocado para a transmissão de pacotes de dados. Adicionalmente, os nós S, R e D, nessa ordem, possuem *time-slots* alocados sucessivamente.

O protocolo proposto para cooperação na camada MAC (PLC-CMAC) explora a disponibilidade do *relay* para a retransmissão de dados. Apesar de analisarmos o protocolo PLC-CMAC utilizando um único *relay*, é possível aplicá-lo a um sistema com múltiplos *relays* de forma transparente. A Figura 5 ilustra o funcionamento geral do protocolo de cooperação proposto. O processo é iniciado em DP (períodos de dados), quando o nó S envia um dado para o nó D, que também é recebido por R. Tanto o *relay* R quanto a origem armazenam temporariamente o pacote (PKT) enviado. Caso haja uma confirmação positiva (ACK), ambos (S e R) descartam esse pacote e o nó S poderá enviar um novo dado em seu próximo *time-slot*. Caso haja uma confirmação negativa (NACK) e o *relay* esteja ocioso (não possua quaisquer pacotes para transmitir em seu *time-slot*), o mesmo envia uma mensagem *want to cooperate* (WTC) para o nó S oferecendo seu próprio *time-slot* para cooperação. Portanto, caso S receba uma mensagem WTC, a técnica dependente da ociosidade do *relay*, proposta em [Lee et al. 2013], é aplicada para realizar a retransmissão do pacote. Essa técnica foi desenvolvida para redes sem fio e é nomeada como *Dynamic Slot Assignment Cooperation* (DSAC).

A Figura 6 ilustra o funcionamento da técnica DSAC. Essa imagem mostra dois *frames* consecutivos. Durante o primeiro, em DP, o nó S envia um dado (PKT1) para o D, que também é recebida por R, conforme mencionado anteriormente. Então, o nó D detecta um erro de pacote e responde com uma mensagem NACK em *broadcast*. No

¹Por exemplo, em canais PLC, quadros podem ser danificados por interferências e atenuações do sinal.

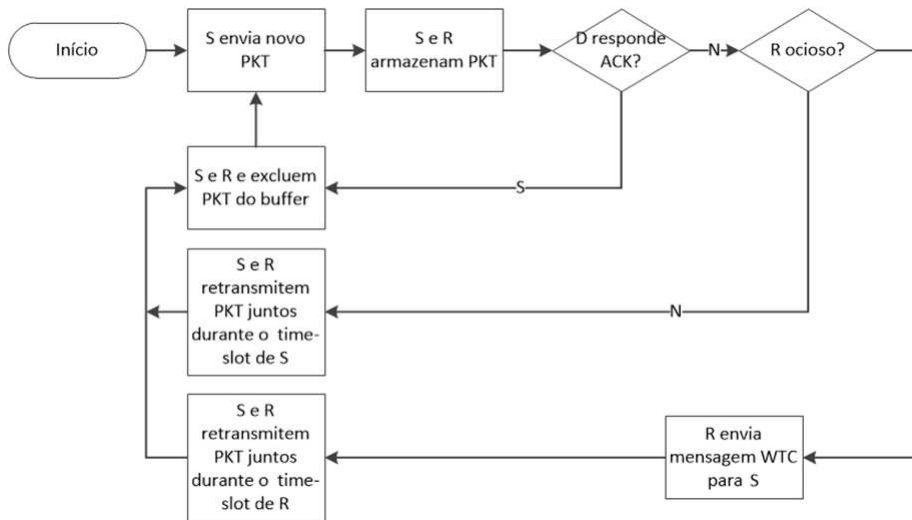


Figura 5. Protocolo MAC de cooperação para redes PLC domésticas.

próximo frame SP, o nó R envia ao S a mensagem WTC, oferecendo seu próprio *time-slot* para cooperação. O nó S poderá enviar um novo pacote (PKT2) em seu *time-slot* e retransmitir o PKT1 juntamente com o *relay* durante o *time-slot* de R. Essa retransmissão, realizada a partir de dois enlaces distintos (SD e RD), explora a vantagem da diversidade de caminhos para melhorar o desempenho do sistema em termos de redução na perda de pacotes. Além disso, como não há a necessidade de espera até que a fonte S possa usar seu próprio *time-slot* para retransmissões, pode haver um ganho em *goodput*.

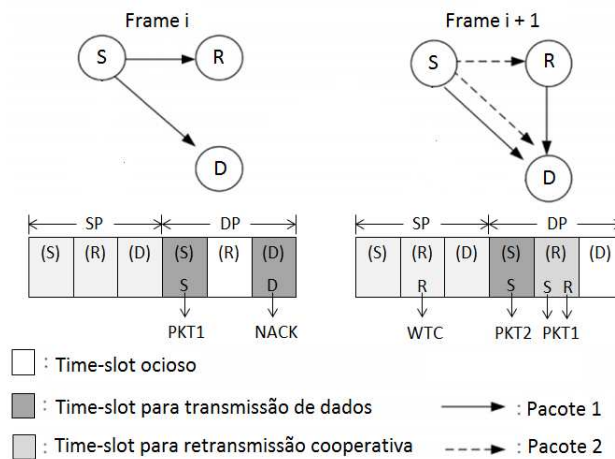


Figura 6. Modo de operação do protocolo de cooperação quando R está ocioso [Lee et al. 2013].

Caso o nó R não esteja ocioso para oferecer seu próprio *time-slot* para retransmitir, o DSAC funciona sem cooperação, como ocorreria de qualquer forma. Porém, para evitar esse problema, o PLC-CMAC utiliza o protocolo independente da ociosidade do *relay*, no qual a cooperação é realizada no *time-slot* do nó S. Essa técnica, apresentada na Figura 7, foi discutida em [Yang et al. 2010] para redes sem fio e é nomeada como *Cooperative Diversity Protocol* (CD).

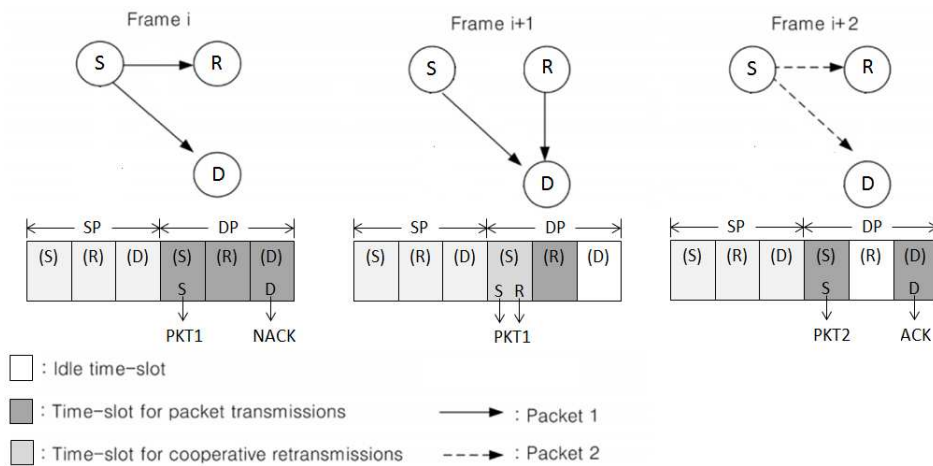


Figura 7. Modo de operação do protocolo de cooperação quando R está ocupado [Yang et al. 2010].

Na Figura 7, observamos que o nó R não envia a mensagem WTC para o nó S durante o segundo *frame*. Isso significa que não poderá haver cooperação no *time-slot* do *relay*. Sendo assim, o nó S não será capaz de transmitir um novo pacote (PKT2) em seu *time-slot*, pois PKT1 precisa ser retransmitido junto com o *relay* no *time-slot* de S. Portanto, o CD pode não resultar em um ganho de *goodput* tão bom quanto o DSAC quando o *relay* está ocioso. Para o exemplo dado, enquanto DSAC gasta dois *frames* para a transmissão de dois pacotes distintos, CD precisará de três. No entanto, o uso de CD pode manter o ganho de diversidade, melhorando a redução na perda (erros) de pacotes ao manter a retransmissão por dois caminhos distintos (SD e RD).

A partir das descrições feitas ao funcionamento do PLC-CMAC, podemos notar que o mesmo é a fusão de dois protocolos distintos de cooperação na camada MAC, que foram desenvolvidos para redes sem fio. Essa junção resulta na utilização oportunista do nó R na cooperação com o nó S. Visto isso, o protocolo proposto pode oferecer as seguintes vantagens:

- Caso o nó R esteja ocioso e uma retransmissão seja necessária, essa será executada durante o *time-slot* do *relay*. Assim, o *goodput* da rede será melhorado uma vez que a fonte poderá transmitir um novo pacote no próximo momento. Além disso, a perda de pacotes será reduzida devido ao uso de dois caminhos distintos com diferentes PER (PER_{SD} e PER_{RD}) para retransmissão.
- Caso o nó R esteja ocupado e uma retransmissão seja necessária, a mesma será realizada durante o *time-slot* do nó S. Portanto, o *goodput* da rede não será melhorado como no caso anterior, visto que a fonte terá que gastar seu próprio *time-slot* para retransmitir pacotes. Apesar disso, essa técnica é capaz de manter uma boa redução na perda de pacotes em retransmissões, devido à diversidade de caminhos utilizado no momento de cooperação.

4. Avaliação

Nesta seção, apresentamos simulações que mostram a eficiência do protocolo PLC-CMAC proposto. Nesse sentido, foram considerados os 4 cenários mais comuns em redes

PLC, mostrados na Figura 2. De forma sucinta, em uma rede PLC doméstica, o *relay* pode estar situado aproximadamente equidistante da fonte e do destino, mais próximo da fonte que do destino, mais próximo do destino do que da fonte e, em um caso extremo, longe tanto da fonte quanto do destino. Intuitivamente, a distância é relacionada a taxa de erros do canal, o que confirmamos com as caracterizações apresentadas na Seção 2.

Consideramos também um sistema *uncoded* OFDMA-TDMA, no qual metade das subportadoras (as pares) são alocadas para o nó S e a outra metade (as ímpares), para o nó R, quando ocorre cooperação. Caso não haja cooperação, o OFDMA aloca todas as subportadoras para um nó quando o mesmo está usando seu próprio *time-slot* para a transmissão de pacotes. Adotamos a modulação digital BPSK e as potências $P \in \{-20, -10, 0, 10, 20, 30\}$ dBm, sendo que $P_0 = P_1 = P/2$ são igualmente alocadas entre todas as subportadoras. A frequência de banda utilizada é de 1.7 até 100 MHz.

Além disso, a análise de desempenho é quantificada em termos de perda de pacotes e *goodput*. A primeira é definida como o número de perdas dividido pelo número de pacotes enviados. O segundo, é definido pelo número de recepções corretas pelo nó D em um dado período de tempo. Nós variamos a taxa de ociosidade do *relay* em saltos de 25%. Quando não mencionado, assumimos que a ociosidade do *relay* ocorre em 50% de seus *time-slots*. Esse número reflete um bom compromisso para ilustrar o funcionamento do nosso protocolo.

Para a obtenção dos valores de taxa de perda de pacotes e *goodput*, reproduzimos o funcionamento dos protocolos, descritos na Seção 3, no software MATLAB². Para simular a transmissão de dados, consideramos apenas a PER³ calculada para cada enlace do modelo adotado. Sendo assim, ignoramos parâmetros como taxa de transferência e atrasos da rede. Além disso, consideramos as mensagens de controle (ACK, NACK e WTC) imunes a erros nos testes executados.

Realizamos 11618 iterações no simulador, as quais correspondem a um conjunto de erros de pacote medidos para cada um dos três enlaces observados na Figura 1. Essas simulações cobrem todas as amostras de todos os casos mostrados na Figura 2. Para cada interação simulada, executamos o envio de 100 pacotes de dados de S para D, onde cada falha no envio, quando ocorre, gera uma única tentativa de retransmissão. Nesse caso, a falha na retransmissão significa a perda do dado enviado. Finalmente, para garantir que todos os 100 pacotes da lista de S fossem transmitidos, utilizamos um período de 200 *frames*.

A Figura 8 mostra a função de distribuição acumulada (CDF) da relação de perdas existente em um sistema PLC tradicional, comparado ao um sistema com o uso da proposta de cooperação. Avaliamos sistemas com diferentes potências de funcionamento (de -20 dBm a 30 dBm). A partir do gráfico, notamos que o ganho relativo em potências muito baixas é pequeno. Por exemplo, para -20 dBm, os ganhos relativos pertencem à curva mais deslocada à esquerda (menores valores). Isso ocorre, pois, em baixas potências, a taxa de erros costuma ser muito grande em todos os enlaces. Dessa forma, o *relay* não tem a oportunidade de cooperar, uma vez que seu enlace com o destino também apresenta altos valores de erros.

²Os algoritmos para simulação estão disponíveis no site <http://netlab.ice.ufjf.br/plc/>.

³As amostras utilizadas nas simulações estão disponíveis no site <http://netlab.ice.ufjf.br/plc/>.

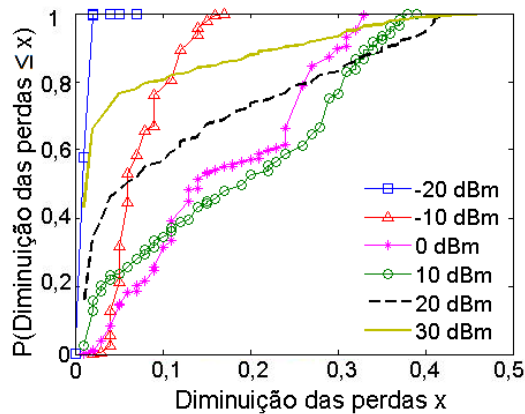


Figura 8. CDFs da redução da perda de pacotes com a variação da potência.

Para potências altas, e.g. 30 dBm, temos uma situação oposta. Os canais praticamente não apresentam erros (ou apresentam taxas muito baixas). Dessa forma, a transmissão direta entre origem e destino ocorre praticamente sem erros, o que não gera oportunidades de cooperação para o *relay*.

As potências intermediárias são mais adequadas ao nosso cenário de cooperação. De fato, de acordo com o que apresentamos na Figura 8, observamos que essas curvas tendem a estar deslocadas para a direita, indicando uma melhor taxa de melhora. Nesse sentido, adotamos valores de potência de 10 dBm avaliar o protocolo de cooperação proposto com as medidas existentes.

A Figura 9 mostra a melhora do *goodput* na aplicação do PLC-CMAC. Novamente, os melhores ganhos são verificados para níveis intermediários de potência, o que revela uma correspondência de comportamento entre o aumento do *goodput* e a redução das perdas. Para uma potência de 10 dBm, mais da metade dos casos apresentou ganhos de pelo menos 20% no *goodput*. Nesse mesmo cenário, as perdas diminuem significativamente, apresentando pelo menos 35% de redução.

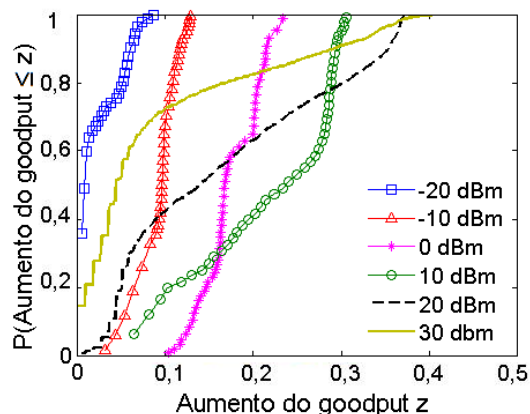


Figura 9. CDFs do aumento no *goodput* com a variação da potência.

As Figuras 10 e 11 comparam o novo protocolo PLC-CMAC com as abordagens tradicionais DSAC e CD (utilizadas em meio não cabeado). Nessas comparações, utilizamos a potência de 10 dbm para apresentar o cenário com melhores possibilidades de

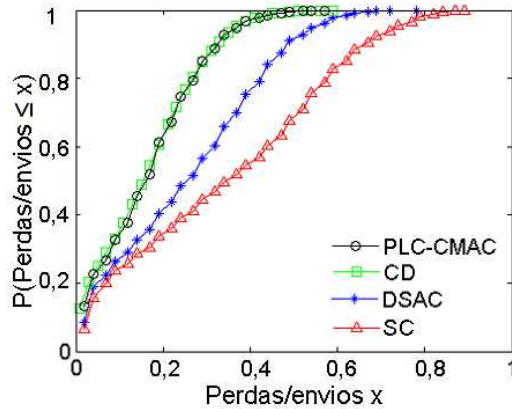


Figura 10. CDFs da perda de pacotes para a potência é de 10 dBm.

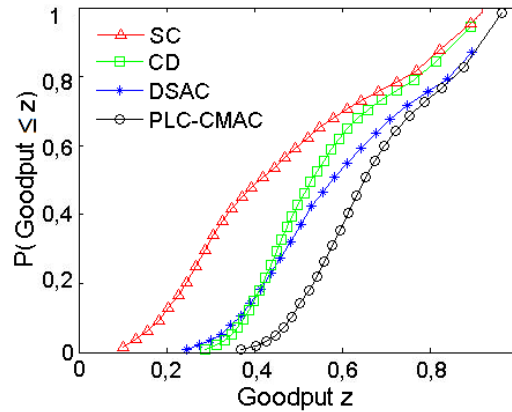


Figura 11. CDFs do *goodput* para a potência é de 10 dBm.

cooperação, conforme discutido anteriormente.

De acordo com a Figura 10, o novo protocolo atinge os mesmos resultados de perda de pacote que o esquema CD. Nesse caso, tanto PLC-CMAC quanto no protocolo CD, a cooperação é sempre realizada, independente da ociosidade do *relay*. Mais ainda, o reenvio é sempre feito pelos enlaces RD e SD, o que gera uma diversidade de caminhos equivalente para ambos os protocolos. O método sem cooperação não faz uso de nenhum caminho alternativo para retransmissões e, portanto, representa o pior caso. Enquanto o PLC-CMAC e o CD oferecem taxas de perda de pacotes inferiores a 0,35 em 90% dos resultados obtidos, o SC e o DSAC resultam nas taxas de até 0,6 e 0,5, respectivamente. Nesse contexto, um sistema sem cooperação tem taxas de erro 115% maiores quando comparados a um sistema que utiliza o PLC-CMAC.

A Figura 11 também mostra altos ganhos no uso do novo protocolo. Enquanto o CD apresenta taxas de erros tão baixas quanto o PLC-CMAC, seu *goodput* não é tão bom. Isso ocorre pois o novo protocolo explora a ociosidade do *relay* para fazer retransmissões. Assim, não há a necessidade de espera pelo *slot* de tempo da origem. Tentativas de retransmissão são realizadas mais rapidamente, melhorando, por consequência, o *goodput*.

Nesse mesmo cenário, o protocolo DSAC apresenta taxas de *goodput* superiores ao CD. Mesmo assim, o novo protocolo supera o DSAC. Isso acontece, pois, enquanto o

DSAC não coopera quando R está ocupado, o PLC-CMAC funciona tal qual o protocolo CD. Consequentemente, o novo protocolo apresenta valores de *goodput* superiores aos obtidos pelas técnicas tradicionais utilizadas em meio sem fio. Em detalhes, enquanto 50% dos casos tem taxas de *goodput* superiores a 0,65; em um sistema sem cooperação, 50% dos casos não atingem taxas de 0,3. Na média, o *goodput* oferecido pelo novo protocolo é 46% melhor que o obtido no caso sem cooperação.

Finalmente, nós avaliamos o impacto do nível de ociosidade do *relay* em cada protocolo estudado. As tabelas 1 e 2 mostram valores médios de perda de pacote e *goodput* com 99% de intervalo de confiança.

Tabela 1. Média da perda de pacotes em função da variação da ociosidade de R.

Protocolo/ Ociosidade	0%	25%	50%	75%	100%
SC	0,3448± 0,0071	0,3448± 0,0071	0,3442± 0,0071	0,3448± 0,0071	0,3448± 0,0071
DSAC	0,3447± 0,0071	0,2988± 0,0061	0,2533± 0,0052	0,2090± 0,0043	0,1640± 0,0035
CD	0,1634± 0,0035	0,1634± 0,0035	0,1641± 0,0035	0,1634± 0,0035	0,1634± 0,0035
PLC-CMAC	0,1638± 0,0035	0,1636± 0,0035	0,1633± 0,0035	0,1632± 0,0035	0,1634± 0,0035

Tabela 2. Média do *goodput* em função da variação da ociosidade de R.

Protocolo/ Ociosidade	0%	25%	50%	75%	100%
SC	0,4663± 0,0071	0,4663± 0,0071	0,4670± 0,0071	0,4663± 0,0071	0,4663± 0,0071
DSAC	0,4666± 0,0071	0,5309± 0,0066	0,6100± 0,0060	0,7078± 0,0050	0,8360± 0,0035
CD	0,5741± 0,0052	0,5741± 0,0052	0,5737± 0,0052	0,5741± 0,0052	0,5741± 0,0052
PLC-CMAC	0,5735± 0,0052	0,6211± 0,0050	0,6767± 0,0047	0,7469± 0,0042	0,8366± 0,0035

Notamos que, para 0% de ociosidade do *relay*, o DSAC funciona como o SC e o PLC-CMAC, como o CD (vide Figura 5 para o caso de *relay* ocupado). Quando a ociosidade aumenta (25%, 50% e 75%), percebemos uma melhora nos resultados de DSAC, visto que o mesmo é um protocolo dependente da ociosidade do *relay*. No entanto, o CD não apresenta variações, pois se trata de um protocolo independente da ociosidade do nó R. Independente da disponibilidade de R, o PLC-CMAC resulta nas menores probabilidades de perda de pacote e nos mais altos *goodputs* entre todos as técnicas avaliadas. Por último, vale destacar que, quando R apresenta 100% de ociosidade, o PLC-CMAC opera como o DSAC (vide Figura 5 para o caso de *relay* ocioso), e, portanto, ambos apresentam os mesmos resultados.

Observamos então que, enquanto as abordagens tradicionais apresentam ganhos em uma das métricas de interesse isoladamente, o novo protocolo apresenta ganho em

ambos. Nesse caso, ele é equivalente ao melhor caso de funcionamento de qualquer uma das abordagens anteriores.

5. Conclusões

Nesse artigo, nós propomos um protocolo de cooperação adaptativo na camada MAC para redes PLC domésticas que faz uso de um modelo com um único *relay* e de um esquema OFDMA-TDMA. O novo protocolo é capaz de operar independentemente da ociosidade ou da ocupação do *relay*, promovendo cooperação com o nó fonte no nível da camada de enlace. Nós apresentamos também dados provenientes de uma campanha de medição, a qual provê estimativas de taxas de erro de pacote em um esquema HS-OFDM. Esses dados são relevantes para a avaliação de mecanismos de cooperação em redes PLC.

Nossas simulações mostram que o uso de potências intermediárias, normalmente encontradas na prática, propiciam um meio favorável a cooperação em redes PLC. Por exemplo, para potências de 10 dbm, tanto perdas quanto o *goodput* são favorecidos. Mais ainda, as simulações mostram ganhos expressivos com a utilização do novo protocolo. Nesse caso, novo protocolo é capaz de reduzir a perda de pacotes e aumentar o *goodput*. Por exemplo, enquanto o PLC-CMAC oferece taxas de perda de pacotes inferiores a 0,35 em 90% dos resultados obtidos, um sistema sem cooperação apresenta taxas de erro de até a 0,6. Na média, um sistema sem cooperação tem taxas de erro 115% superiores a um sistema que utiliza o PLC-CMAC. Além disso, o novo protocolo é capaz de aumentar o *goodput* em 46% na média.

Portanto, nesse trabalho, nós exploramos novas possibilidades de melhoria do desempenho com o uso de cooperação na camada de enlace de redes PLC. Além disso, mostramos que a cooperação oferece os melhores resultados de taxa de perda de pacote e *goodput* quando usada em um sistema com potências intermediárias.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do CNPq, CAPES e da FAPEMIG.

Referências

- Biagi, M. (2011). MIMO self-interference mitigation effects on power line relay networks. *IEEE Communications Letters*, 15(8):866–868.
- Bilbao, J., Calvo, A., Armendariz, I., Crespo, P. M., and Medard, M. (2014). Reliable communications with network coding in narrowband powerline channel. In *Proc. IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications*, pages 316–321.
- Cheng, X., Cao, R., and Yang, L. (2013). Relay-aided amplify-and-forward powerline communications. *IEEE Trans. on Smart Grid*, 4(1):265–272.
- Colen, G. R., Marques, C. A. G., Oliveira, T. R., de Campos, F. P. V., and Ribeiro, M. V. (2013). Measurement setup for characterizing low-voltage and outdoor electric distribution grids for plc systems. In *Proc. PES Conference On Innovative Smart Grid Technologies Latin America*, pages 1–5.

- Kim, Y., Choi, S., Kim, S., and Lee, J. (2012). Capacity of ofdm two-hop relaying systems for medium-voltage power-line access networks. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 27(2):886–894.
- Lee, J., Noh, H., and Lim, J. (2013). A cooperative tdma mac protocol using dynamic slot assignment scheme. In *Proc. IEEE Conference on Information Networking*, pages 216–220.
- Noori, M. and Lampe, L. (2013). Improving data rate in relay-aided power line communications using network coding. In *Proc. IEEE Global Communications Conference*, pages 2975–2980.
- Oliveira, T. R., Marques, C. A. G., Finamore, W. A., Netto, S. L., and Ribeiro, M. V. (2014). A methodology for estimating frequency responses of electric power grids. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 25(6):720–731.
- Ribeiro, M. V., Colen, G. R., Campos, F. V. P., Quan, Z., and Poor, H. V. (2014). Clustered-orthogonal frequency-division multiplexing for power line communication: When can it be beneficial? *IET Communications*, 8(13):2336–2347.
- Valencia, J., Oliveira, T. R., and Ribeiro, M. V. (2014). Cooperative power line communication: Analysis of brazilian in-home channels. In *Proc. IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications*, pages 301–305.
- Yang, Z., Yao, Y., Li, X., and Zheng, D. (2010). A tdma-based mac protocol with cooperative diversity. *IEEE Communications Letters*, 14(6):542–544.