

Protocolo MAC de correção de pacotes para sistemas híbridos PLC/wireless

Roberto Massi de Oliveira, Moisés Vidal Ribeiro e Alex Borges Vieira

Resumo— Este artigo introduz um novo protocolo de correção de pacotes que atua na camada de enlace de sistemas híbridos PLC/wireless. O objetivo da presente proposta é a redução da necessidade de retransmissões e até mesmo da perda de pacotes de dados. Por atuar na camada de enlace, a presente proposta é capaz de introduzir melhorias e preservar o legado de camadas físicas padronizadas. Resultados numéricos mostram que, mesmo no pior caso, no qual uma taxa de erro de bit de 10^{-5} é considerada, sistemas de comunicações apresentam perdas de pacotes de $10^{-14.78}$ quando consideram o uso do protocolo proposto, e de $10^{-2.81}$ quando não o consideram.

Palavras-chave— Power line communication, Redes wireless, Camada de enlace, Cooperação, Correção de pacotes.

I. INTRODUÇÃO

O advento da Indústria 4.0, bem como aplicações de *Smart Grid* e o conceito de *Internet of Things* (IoT) têm reforçado o interesse de pesquisadores ao redor do mundo para tópicos relacionados às tecnologias *power line communication* (PLC) e *wireless*. De fato, tais tecnologias são apropriadas para as demandas de ubiquidade exigidas por tais aplicações emergentes [1], [2]. Porém, o uso isolado de tecnologias PLC ou *wireless* pode não ser suficiente para suprir as demandas de flexibilidade relacionadas às heterogêneas aplicações de *Smart Grid*, IoT e Indústria 4.0 [3]. Por isso, sistemas híbridos PLC/wireless¹ têm sido estudados, para que as tecnologias envolvidas se complementem de modo a oferecer a flexibilidade e a confiabilidade adequadas à comunicação de dados [4].

No entanto, existem desafios que precisam ser superados para que seja possível o uso de sistemas híbridos PLC/wireless. A comunicação de dados através da rede de energia elétrica, por exemplo, é afetada por fatores como ruído impulsivo, atenuação do sinal com o aumento da frequência ou da distância e interferências eletromagnéticas [5]. No contexto de redes *wireless*, são comuns problemas referentes a interferências e ao comportamento variável dos canais *wireless*, que podem ser afetados, inclusive, por questões geográficas [6]. Propostas de protocolos e técnicas para lidar com esses desafios são comumente encontrados na literatura [7].

Os desafios supracitados são geralmente inerentes ao canal de comunicação e, portanto, as soluções propostas para os mesmos se concentram, majoritariamente, na camada física.

Roberto Massi de Oliveira, Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Brasil, e-mail: rmassi@ice.ufjf.br; Moisés Vidal Ribeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Brasil, e-mail: mribeiro@engenharia.ufjf.br; Alex Borges Vieira, Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Brasil, e-mail: alex.borges@ice.ufjf.br.

¹PLC/wireless refere-se ao uso de tecnologias PLC e *wireless* em paralelo para transmissão de um mesmo pacote entre dois nós de comunicação.

Güzelgöz et al. [8] e Mathur et al. [9], por exemplo, investigaram, no nível da camada física, o aproveitamento da diversidade obtida com o uso de sistemas híbridos PLC/wireless com o objetivo de proporcionar melhorias de desempenho e confiabilidade na comunicação. Técnicas de *forward error correction* (FEC) também são comumente utilizadas com esse propósito [10]. Em síntese, na literatura, são comuns as propostas que visam melhorias de desempenho e confiabilidade através da construção ou modificação de blocos da camada física. Outra abordagem, ainda pouco explorada, consiste na utilização, para os mesmos fins, de protocolos na camada de enlace. Tal abordagem tem como vantagem a possibilidade de preservar o legado de camadas físicas padronizadas, evitando a necessidade de novos *hardwares* e, até mesmo, o surgimento de problemas de compatibilidade com sistemas legado.

Nesse contexto, Oliveira et al. [11] mostra que protocolos de cooperação, na camada de enlace de sistemas PLC, podem oferecer melhorias no *goodput* e na confiabilidade da comunicação. Porém, quando técnicas e protocolos preexistentes não são suficientes para assegurar essa confiabilidade, excessos de retransmissões e até mesmo perdas de pacotes de dados podem ocorrer. Para mitigar esse problema, a presente proposta defende o uso de uma etapa a mais de correção de pacotes de dados no nível da camada de enlace de sistemas híbridos PLC/wireless. Essa proposta foi introduzida por Oliveira et al. [12] em sistemas PLC através do protocolo EPLC-CMAC. Porém, tal protocolo faz o uso apenas da diversidade oferecida por um protocolo de cooperação para realizar a correção de pacotes de dados corrompidos. A presente proposta visa expandir essa ideia para sistemas híbridos PLC/wireless, que, além da diversidade oriunda de protocolos de cooperação, oferece a diversidade inerente ao uso de dois canais de comunicação de natureza distinta (PLC e *wireless*). Desse modo, as principais contribuições do presente artigo são:

- Proposição de um novo protocolo que atua na camada de enlace de sistemas híbridos PLC/wireless. Tal protocolo, referido como PC-MAC, faz uso da diversidade oferecida por sistemas híbridos PLC/wireless e por um protocolo de cooperação para efetuar a correção de pacotes de dados corrompidos. Consequentemente, há a melhoria da confiabilidade da comunicação de dados através da redução da necessidade de retransmissões e, até mesmo, da perda de pacotes de dados.
- A análise dos ganhos advindos do uso do PC-MAC através de resultados de simulações que consideram o pior caso, no qual os canais de comunicação apresentam elevada taxa de erro de bit (BER).

Os resultados analisados são referentes à quantidade de retransmissões e de perdas de pacotes em sistemas híbridos PLC/*wireless*. Para tanto, são comparados sistemas que consideram o uso do PC-MAC com sistemas que usam apenas a correção de pacotes, sem cooperação, sistemas que utilizam apenas cooperação, sem correção de pacotes e sistemas que não consideram nem correção de pacotes nem cooperação no nível da camada de enlace. Para uma BER de 10^{-5} na camada de enlace, por exemplo, um sistema híbrido PLC/*wireless* que não considera nem cooperação e nem correção de pacotes apresenta uma razão de perda de pacotes de $10^{-2.81}$, enquanto no sistema que considera o uso do PC-MAC esse resultado é de apenas $10^{-14.78}$.

O restante do presente artigo está organizado como segue. A Seção II apresenta o modelo do sistema considerado, bem como as considerações assumidas para o desenvolvimento do protocolo proposto e análise de seus resultados. A Seção III explica o funcionamento do protocolo proposto. A Seção IV apresenta a metodologia das simulações bem como a análise dos resultados das mesmas. Finalmente, a Seção V contém os tópicos conclusivos.

II. MODELO DO SISTEMA

O modelo de sistema considerado no presente artigo é ilustrado na Figura 1. Tal modelo pode ser representado por um multigrafo conexo $G(V, K)$, no qual $G(\cdot)$ representa o multigrafo com $V = 3$ nós (fonte S, *relay* R e destino D) e $K = 6$ enlaces. Mais especificamente, esses seis enlaces são os fonte-destino PLC (SD_P) e **wireless!** (SD_W), os fonte-*relay* PLC (SR_P) e **wireless!** (SR_W) e os *relay*-destino PLC (RD_P) e *wireless* (RD_W). Além disso, observem que o grau $deg(\cdot)$ de cada nó é dado por $deg(S) = deg(R) = deg(D) = 2$, visto que cada nó é interconectado por um enlace PLC (linha contínua) e um enlace sem fio (linha tracejada). Por fim, a cada enlace está associada uma BER_k , $k \in \{SD_P, SR_P, RD_P, SD_W, SR_W, RD_W\}$, obtida na camada de enlace, que pode corromper cada bit de um pacote de dados transmitido pelo mesmo.

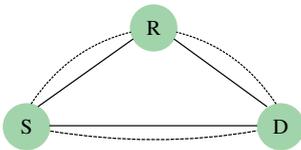


Fig. 1: Cenário *single-relay*.

Nesse modelo, o nó R está posicionado no meio do caminho entre os nós S e D, visto que esse é o cenário mais apropriado para protocolos de cooperação intermediados por *relays* [13]. Além disso, no sistema híbrido PLC/*wireless* considerado, quando um pacote de dados é enviado do nó S para o nó D pelo canal PLC, uma cópia do mesmo é enviada, paralelamente, pelo canal *wireless*, visando a maximização da confiabilidade na comunicação de dados. A camada física de tal sistema é analisada por Fernandes et al. [14]. Um pacote de dados m é visto como uma sequência binária com o comprimento de N bits, ou seja, $m \in \{0, 1\}^N$.

Ademais, assumimos o uso do esquema *orthogonal frequency-division multiplexing* (OFDM) e o uso de FEC juntamente com técnicas de *interleaving* [15] na camada física. Tais técnicas são responsáveis por embaralhar os bits dentro de um símbolo OFDM ou entre símbolos OFDM distintos. Por consequência, rajadas de bits errôneos são espalhadas fazendo com que os bits errôneos remanescentes, na camada de enlace, sejam virtualmente descorrelacionados [16]. Ainda, assumimos que todos os pacotes transmitidos são recebidos, corrompidos ou não. Todos os nós possuem *buffers* de transmissão e recepção suficientemente grandes para que problemas relacionados aos mesmos não ocorram. Pacotes de controle, como mensagens de *automatic repeat request* (ARQ), são imunes a erros.

A estrutura de *frame* considerada é representada na Figura 2. Nesse *frame time division multiple access* (TDMA), cada nó possui dois *time-slots*, durante os quais o mesmo ganhará acesso ao canal de comunicação. O primeiro *time-slot* de cada nó está contido no período de sinalização (SP), durante o qual pacotes de controle são trocados. O segundo *time-slot* de cada nó está contido no período de dados (DP), durante o qual pacotes de dados são transmitidos. Nesse *frame*, assumimos que, durante SP, cada *time-slot* comporta a transmissão de pacotes de até 100 Bytes (B) em sua duração. Durante DP, como os pacotes de dados são maiores, assumimos que cada *time-slot* comporta a transmissão de pacotes de até 500 B em sua duração. Isso significa que pacotes maiores que o tamanho máximo limitado pela duração de cada *time-slot* levariam a casos de fragmentação de pacotes que não serão abordados no presente artigo por questões de simplicidade. Esses tamanhos (100 B e 500 B) são valores próximos aos tamanhos dos blocos da camada física que encapsulam pacotes da camada de enlace [15].

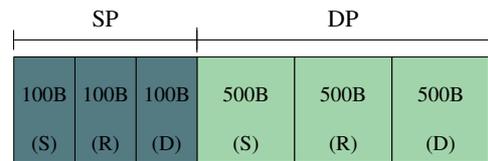


Fig. 2: Estrutura do frame TDMA.

III. FUNCIONAMENTO DO PC-MAC

Atualmente, quando o nó S envia um pacote de dados ao nó D, duas cópias do mesmo são recebidas e armazenadas no *buffer* de recepção do nó D. Caso as duas cópias tenham sido corrompidas devido à BER_{SD_P} e à BER_{SD_W} , respectivamente, técnicas e protocolos são aplicados, na camada física, para tentar corrigir os bits errôneos em prol da confiabilidade da comunicação de dados. Porém, quando essas técnicas não são suficientes, as cópias corrompidas são descartadas do *buffer* de recepção do nó D e um *negative acknowledgment* (NACK) é enviado do nó D ao nó S pedindo a retransmissão do pacote de dados em questão. Esse processo é repetido até que pelo menos uma cópia correta do pacote de dados enviado pelo nó S seja recebida por D. Quando isso não ocorre, após repetidas falhas de retransmissão, o pacote de dados é descartado e perdido. Para mitigar esse problema, propõe-se o

uso de uma etapa a mais de correção de pacotes no nível da camada de enlace.

Essa proposta funciona após a falha de todos os protocolos e técnicas pré-existentes aplicados na camada física. Nessa proposta, os pacotes corrompidos armazenados no *buffer* não são descartados e, ao invés disso, são utilizados na tentativa de corrigi-los. Como o funcionamento da presente proposta ocorre na camada de enlace, ela pode ser capaz de introduzir melhorias de confiabilidade preservando o legado de camadas físicas padronizadas, sem a necessidade de alterações em *hardware*.

O algoritmo 1 descreve o processo de recepção de pacotes, no nó D. Quando o nó S transmite um pacote de dados, m , para o nó D, tanto o nó R quanto o nó D recebem duas cópias de m e as armazenam em seus respectivos *buffers* de recepção, $bfrRX_R$ e $bfrRX_D$. Uma dessas duas cópias é oriunda do canal PLC, m_{P_T} , e a outra é oriunda do canal *wireless*, m_{W_T} . Caso pelo menos uma dessas cópias seja recebida corretamente pelo nó D, o mesmo envia um *acknowledgment* (ACK) ao nó S. Caso contrário, o nó D ativa o protocolo de correção de pacotes, que utilizará as duas cópias corrompidas de m , presentes em $bfrRX_D$. Apenas após uma falha do protocolo de correção, o nó D envia um NACK ao nó S, que também é recebido por R. Quando isso ocorre, um processo de retransmissão se inicia, que ocorre de forma cooperativa com o uso do protocolo PLC-CMAC [11]. Depois da retransmissão, o nó D recebe duas cópias do pacote retransmitido, m_{P_R} e m_{W_R} . Caso pelo menos uma delas esteja correta, o nó D envia um ACK ao nó S. Caso contrário, nesse ponto, o nó D possui, em $bfrRX_D$, quatro cópias corrompidas de m , que são aproveitadas por uma segunda ativação do protocolo de correção de pacotes. Caso essa correção seja bem-sucedida, o nó D envia um ACK ao nó S. Caso contrário, ocorre uma perda de pacote. Observem que uma única retransmissão é considerada no presente artigo e, assim, uma falha na mesma e no protocolo de correção utilizado resultam em uma perda de pacote. Quando o nó D envia um ACK ou quando o mesmo envia um NACK após uma retransmissão, tais mensagens são recebidas tanto pelo nó S quanto pelo nó R. Nesse caso, o nó R e o nó D limpam $bfrRX_R$ e $bfrRX_D$ e o nó S enviará o próximo pacote de dados ($m + 1$) presente em $bfrTX_S$, recomeçando o processo.

O algoritmo 2 descreve o funcionamento do protocolo de correção de pacotes proposto. Esse protocolo de correção faz uso de duas técnicas simples, combinação OU exclusivo (XOR)+*brute force search* (BFS) (*brute force search*) e *Majority Voting* (MV).

A combinação XOR+BFS é composta por duas etapas. A primeira etapa faz uso de operações XOR bit a bit entre um dado par pr de cópias de m contidas em um dado *buffer* de recepção $bfrRX$. Para aproveitar ao máximo a diversidade oriunda do uso de canais de comunicação de diferentes naturezas, pr será sempre composto por um m_P e um m_W , independente do número de cópias de m presentes em $bfrRX$. Nesse contexto, o XOR em pr é realizado para detectar bits que difiram em suas respectivas posições binárias i , $i \in \mathbb{N}$, $1 \leq i \leq N$. Em outras palavras, $q_{i,pr} = m_{P_{i,pr}} \oplus m_{W_{i,pr}}$, no qual q_{pr} é o resultado das operações XOR, representadas por

Algoritmo 1 Processo de recepção de pacotes

```

início
    enquanto nó D recebe novos pacotes faça
        bfrRXD ← {mPT, mWT};
        se mPT ou mWT corretos em bfrRXD então
            nó D envia "ACK";
        senão
            r ← correção(bfrRXD, "TX");
            se r = "sucesso" então
                nó D envia "ACK";
            senão
                nó D envia "NACK";
                r ← retransmissão();
                bfrRXD ← {mPR, mWR};
                //bfrRXD = {mPT, mWT, mPR, mWR}
                se r = "sucesso" então
                    nó D envia "ACK";
                senão
                    r ← correção(bfrRXD, "RX");
                    se r = "sucesso" então
                        nó D envia "ACK";
                    senão
                        perdas ← perdas + 1;
                fim
            fim
        fim
    fim
    bfrRXD ← ∅;
fim
    
```

Algoritmo 2 Protocolo de correção de pacotes

```

início
    Entrada: bfrRX, flag
    Saída: "sucesso" ou "falha"
    se flag = "TX" então
        //2 cópias de m em bfrRX
        se XORBFS(bfrRX) = "falha" então
            retorna "falha";
        fim
    senão
        //flag = "RX"
        //4 cópias de m em bfrRX
        se MV(bfrRX) = "falha" então
            se XORBFS(bfrRX) = "falha" então
                retorna "falha";
            fim
        fim
    fim
    retorna "sucesso"
fim
    
```

\oplus , ao longo das i posições binárias dos pacotes de dados de tamanho N que compõem pr . O número de bits diferentes de zero contidos em q_{pr} é identificado como o número γ de bits potencialmente errôneos detectados em pr , de modo que $\gamma \in \mathbb{N} | 1 \leq \gamma \leq N$. Na segunda etapa, um algoritmo BFS é utilizado, o qual executa, no pior caso, $2^\gamma - 2$ iterações com possíveis combinações de valores binários para os γ bits errôneos detectados na primeira etapa. A cada iteração, uma verificação de *cyclic redundancy checking* (CRC) é realizada para constatar se a correção foi realizada.

O MV, de forma mais simples, utiliza todas as cópias de m contidas em $bfrRX$ para efetuar a correção do mesmo. Para cada posição binária i na qual os valores binários diferem entre as cópias envolvidas no MV, considera-se o valor binário mais frequente em tais posições como o valor binário correto. Por isso, o MV só pode ser aplicado quando o número de cópias de m em $bfrRX$ é maior que 2. Caso contrário, sempre haverá um empate de valores binários nos casos de divergência dos mesmos entre os pacotes envolvidos no MV.

Vale ressaltar que o protocolo de correção só é ativado após a constatação de que as cópias recebidas de m estão corrompidas. Inicialmente, isso ocorre após a transmissão de m do nó S para o nó D, antes do envio do NACK do nó D para o nó S. Nesse ponto, como $bfrRX$ possui apenas duas cópias de m , apenas a combinação XOR+BFS é utilizada. Em caso de falha da mesma, o protocolo de correção finaliza retornando "falha". A segunda situação na qual o protocolo de correção é ativado ocorre após a retransmissão de m do nó S para o nó D, também antes do envio do NACK do nó D para o nó S. Nesse momento, $bfrRX$ possui quatro cópias corrompidas de m . Nesse caso, primeiro aplica-se o MV e, em caso de falha do mesmo, a combinação XOR+BFS é utilizada. Caso ambas a técnicas falhem, o protocolo de correção retorna "falha". Observem que, quando possível, o MV é usado com prioridade sobre a combinação XOR+BFS, de modo a evitar o uso do algoritmo de força bruta, cujo número de iterações cresce, no pior caso, exponencialmente conforme o valor de γ aumenta.

IV. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na presente análise, duas métricas são consideradas: razão média de retransmissões e razão média de perdas de pacotes. A primeira, definida como $\mathbb{E}\{\alpha\}$, é obtida da média total de pacotes retransmitidos em relação à média do total de pacotes transmitidos do nó S ao nó D. A segunda, definida como $\mathbb{E}\{\beta\}$, corresponde à média total de pacotes perdidos em relação à média do total de pacotes retransmitidos dos nós S ou R ao nó D. Essas médias, apresentadas com intervalo de confiança de 99%, são extraídas de um conjunto de simulações cujos parâmetros são resumidos na Tabela I.

Tabela I: Lista de parâmetros considerados em simulação

BER	$10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}$
Tamanho dos pacotes	500 B
Total de transmissões	10^6
Total de simulações	10^2

Os parâmetros apresentados, na Tabela I, foram considerados em sistemas PLC/wireless que consideram o uso do

protocolo proposto, PC-MAC; que consideram apenas cooperação, sem correção de pacotes, W/O Corr.; que consideram apenas correção de pacotes, sem cooperação, W/O Coop.; e que não consideram nem cooperação e nem correção de pacotes, W/O. O protocolo de cooperação considerado pelo PC-MAC e pelo W/O Corr. foi o PLC-CMAC [11]. Por fim, vale ressaltar que a camada física foi tratada como uma "caixa preta", tendo sido utilizados, nas simulações, apenas valores de BER associados a cada enlace (SR, SD e RD PLC e sem fio), que podem corromper cada bit das sequências binárias (pacotes) transmitidos.

A Figura 3 mostra os resultados referentes a $\mathbb{E}\{\alpha\}$ e $\mathbb{E}\{\beta\}$. Mais especificamente, a Figura 3.a mostra o resultado $\mathbb{E}\{\alpha\}$ do PC-MAC em relação ao W/O. Como o $\mathbb{E}\{\alpha\}$ é extraído anteriormente às retransmissões, protocolos de cooperação não são considerados nesse ponto. Nota-se que o PC-MAC apresenta os melhores resultados, mesmo para os elevados valores de BER analisados. De fato, para uma BER de 10^{-5} , por exemplo, o $\mathbb{E}\{\alpha\}$ do PC-MAC é de $10^{-5.46}$, enquanto o do W/O é de $10^{-2.79}$. O melhor resultado de $\mathbb{E}\{\alpha\}$ associado ao PC-MAC ocorre pois, quando o mesmo é utilizado, retransmissões só são requeridas após a falha do protocolo de correção de pacotes. Para o W/O, retransmissões já são necessárias assim que apenas cópias corrompidas de um dado m , transmitidas pelo nó S, são recebidas pelo nó D, não havendo, nesse caso, nenhuma tentativa de corrigi-las.

A Figura 3.b mostra o resultado $\mathbb{E}\{\beta\}$ do PC-MAC em relação aos demais sistemas híbridos PLC/wireless analisados. Observa-se, novamente, que os melhores resultados estão associados ao uso do PC-MAC. De fato, para a BER de 10^{-5} , por exemplo, os resultados de $\mathbb{E}\{\beta\}$ são de $10^{-2.81}$, $10^{-4.80}$, $10^{-11.38}$ e $10^{-14.78}$ para o W/O, W/O Corr., W/O Coop. e PC-MAC, respectivamente. Esses resultados mostram que o uso de técnicas simples de correção de pacotes no nível da camada de enlace é capaz de prover melhorias significativas na confiabilidade da comunicação de dados. É interessante notar que, tanto na Figura 3.a quanto na Figura 3.b, conforme a BER diminui, a distância vertical entre as barras correspondentes aos resultados de W/O e PC-MAC aumenta. Em outras palavras, os resultados de $\mathbb{E}\{\alpha\}$ e de $\mathbb{E}\{\beta\}$ associados ao uso de correção de pacotes na camada de enlace (tanto em PC-MAC quanto em W/O coop) tendem a zero mais rapidamente que os demais conforme a BER diminui.

Por fim, a Figura 4 mostra que, em média, mesmo para os elevados valores de BER analisados, o número de bits errados por pacote (γ) é pequeno. De fato, para uma BER de 10^{-5} , por exemplo, os valores de $\mathbb{E}\{\gamma\}$ são próximos de 0 para todos os valores de pacote verificados (100 B, 500 B, 1000 B e 1500 B). Esse resultado mostra que, mesmo no pior caso, o uso do algoritmo de força bruta não depende de um número elevado de iterações para que um dado pacote seja corrigido.

V. CONCLUSÕES

No presente artigo, propusemos uma nova abordagem na qual a correção de pacotes é realizada na camada de enlace. A vantagem da adesão de técnicas simples de correção de pacotes, na camada de enlace, está na possibilidade de inserção

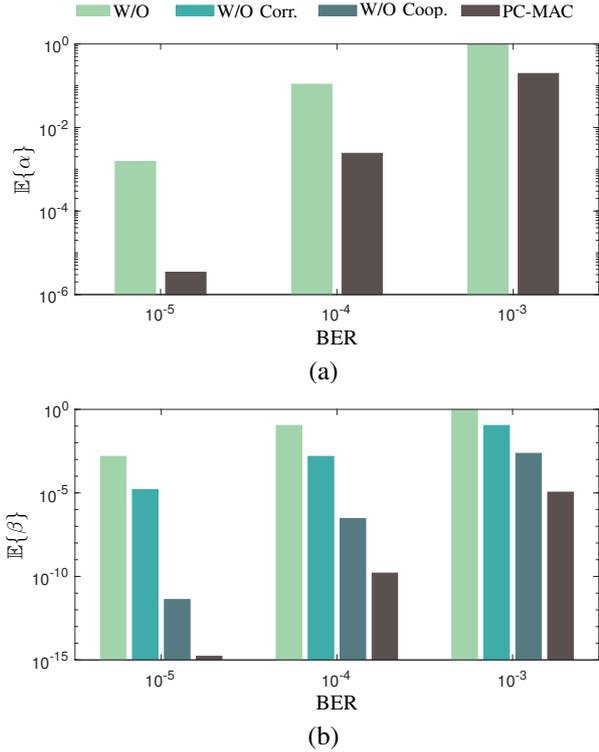
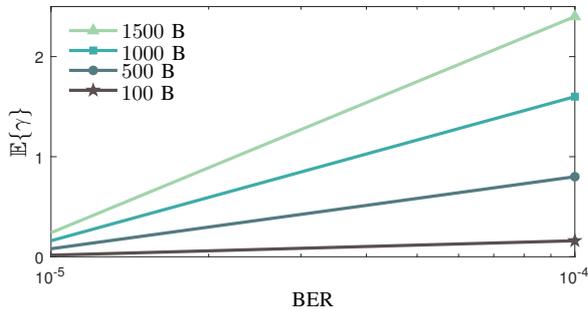
Fig. 3: $\mathbb{E}\{\alpha\}$ e $\mathbb{E}\{\beta\}$ para cada valor de BER.

Fig. 4: Número médio de bits errôneos para diferentes tamanhos de pacote.

de melhorias de confiabilidade sem a necessidade de modificações no legado de camadas físicas padronizadas. Isso pode evitar a necessidade de novos *hardwares* ou a modificação dos preexistentes, por exemplo. O protocolo de correção proposto, se beneficia da diversidade oriunda de sistemas híbridos PLC/wireless bem como do uso de protocolos de cooperação.

A presente proposta é capaz de reduzir a necessidade de retransmissões à medida que pedidos de retransmissão só ocorrerão quando o protocolo de correção falha. Consequentemente, perdas de pacote também são evitadas, visto que pacotes de dados corrompidos só serão descartados após a falha do protocolo de correção. De fato, resultados obtidos de simulações mostram que, quando a presente proposta é considerada, mesmo para uma elevada taxa de bits errados, como a de 10^{-5} , a razão de perdas de pacotes é de apenas 10^{-14} .⁷⁸ Comparativamente, quando a presente proposta não é considerada, para a mesma BER, a razão de perda de

pacotes sobe para 10^{-2} .⁸¹ Por fim, concluímos que, mesmo para valores altos de taxa de erro de bits, o número de bits errados por pacote é, em média, pequeno. Isso mostra que, no pior caso, o algoritmo de força bruta não terá que fazer um número elevado de iterações para que pacotes de dados sejam corrigidos.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, CNPq, FAPEMIG, INERGE e Smarti9.

REFERENCES

- [1] C. Garrido-Hidalgo, D. Hortelano, L. Roda-Sanchez, T. Olivares, M. C. Ruiz, and V. Lopez, "IoT heterogeneous mesh network deployment for human-in-the-loop challenges towards a social and sustainable industry 4.0," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 28417–28437, May 2018.
- [2] R. M. Oliveira, A. B. Vieira, H. A. Latchman, and M. V. Ribeiro, "Medium access control protocols for power line communication: A survey," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 21, no. 1, Feb. 2019.
- [3] S. Galli, A. Scaglione, and Z. Wang, "For the grid and through the grid: The role of power line communications in the smart grid," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 998–1027, Jun. 2011.
- [4] M. Sayed, T. A. Tsiftsis, and N. Al-Dhahir, "On the diversity of hybrid narrowband-PLC/wireless communications for smart grids," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 7, pp. 4344–4360, Jul. 2017.
- [5] M. Zimmermann and K. Dostert, "A multipath model for the powerline channel," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, no. 4, pp. 553–559, Apr. 2002.
- [6] R. Nagarajan and R. Dhanasekaran, "Analyzing the effect of interference in wireless industrial automation system (WIAS)," *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 10, no. 6, pp. 2621–2626, Apr. 2015.
- [7] M. Elgenedy, M. M. Awadin, R. Hamila, W. U. Bajwa, A. S. Ibrahim, and N. Al-Dhahir, "Sparsity-based joint NBI and impulse noise mitigation in hybrid plc-wireless transmissions," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 30280–30295, May 2018.
- [8] S. Güzelgöz, H. B. Çelebi, and H. Arsian, "Analysis of a multi-channel receiver: Wireless and PLC reception," in *Proc. European Signal Processing Conference*, Aug. 2010, pp. 1106–1110.
- [9] A. Mathur, M. R. Bhatnagar, and B. K. Panigrahi, "Performance of a dual-hop wireless-powerline mixed cooperative system," in *Proc. International Conference on Advanced Technologies for Communications*, Oct 2016, pp. 401–406.
- [10] K. Wang and Z. Ding, "FEC code anchored robust design of massive MIMO receivers," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 12, pp. 8223–8235, Dec. 2016.
- [11] R. M. Oliveira, M. S. Facina, M. V. Ribeiro, and A. B. Vieira, "Performance evaluation of in-home broadband PLC systems using a cooperative MAC protocol," *Computer Networks*, vol. 95, pp. 62–76, Dec. 2015.
- [12] R. M. Oliveira, A. B. Vieira, and M. V. Ribeiro, "EPLC-CMAC: an enhanced cooperative MAC protocol for broadband PLC systems," *Computer Networks*, vol. 153, pp. 11–22, Jan. 2019.
- [13] M. S. Facina, H. A. Latchman, H. V. Poor, and M. V. Ribeiro, "Cooperative in-home power line communication: Analyses based on a measurement campaign," *IEEE Trans. on Communications*, vol. 64, no. 2, pp. 778–789, Feb. 2016.
- [14] V. Fernandes, W. A. Finamore, H. V. Poor, and M. V. Ribeiro, "The low-bit-rate hybrid power line/wireless single-relay channel," *IEEE Systems Journal*, pp. 1–12, Dec. 2017, accepted for publication.
- [15] *IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications*, IEEE Communications Society Std., Dec. 2010.
- [16] V. L. R. da Costa, "A prototype of a narrowband hybrid PLC/wireless transceiver," Master's thesis, Federal University of Juiz de Fora, Brazil, 2017.