

Proposta de Extensão do Protocolo 802.11 MAC para Codificação de Rede na Camada Física

Rodrigo Farias e Danilo Silva

Resumo— Codificação de rede na camada física (PNC) é uma estratégia de cooperação em redes sem fio que se beneficia da interferência entre usuários para alcançar maiores taxas de transmissão de dados. Em um cenário de cruzamento de fluxos através de um *relay*, a técnica PNC é, teoricamente, capaz de até duplicar o *throughput* da rede em comparação com as técnicas tradicionais. Este artigo apresenta uma extensão do protocolo IEEE 802.11 para a camada de Controle de Acesso ao Meio (MAC) de forma a permitir o uso de PNC. Ao contrário das demais propostas existentes na literatura, o protocolo proposto nesse artigo tem o diferencial de preservar a separação entre as camadas de rede, tornando-o facilmente compatível com o protocolo 802.11 tradicional. Resultados de simulação demonstram uma melhoria de aproximadamente 80% no *throughput* da rede na topologia *two-way relay*.

Palavras-Chave— Codificação de rede na camada física, protocolo IEEE 802.11 MAC, redes sem fio, comunicação cooperativa.

Abstract— Physical-layer network coding (PNC) is a relaying strategy for wireless networks that exploits signal interference among users to achieve higher transmission rates. When applied to a two-way relay channel, PNC is theoretically capable of doubling the network throughput in comparison to conventional techniques. This paper presents an extension of the IEEE 802.11 MAC protocol enabling the use of PNC. Differently from previous works, our proposed protocol has the advantage of not requiring cross-layer interactions, making it easily compatible with standard 802.11. Simulations results show an overall throughput improvement of approximately 80% in the two-way relay topology.

Keywords— Physical-layer network coding, IEEE 802.11 MAC protocol, wireless networks, cooperative communications.

I. INTRODUÇÃO

A técnica de codificação de rede, originalmente apresentada em [1], permite que os nós de uma rede, ao invés de apenas reencaminhar os pacotes recebidos, possam também combiná-los algebricamente, produzindo novos pacotes codificados. Desde então, diversos trabalhos tem mostrado que, em muitos cenários importantes, o uso dessa técnica é capaz de proporcionar um aumento significativo no *throughput* da rede [1]–[5].

Para ilustrar a codificação de rede, consideremos a topologia *two-way relay*, onde há a necessidade de uma transmissão bidirecional entre os nós A e B passando por um *Relay* (R). Na figura 1a é apresentado como essa transmissão ocorre com roteamento tradicional, onde é necessário ocupar o canal por quatro vezes para completar as transmissões dos pacotes x e y .

Rodrigo Farias e Danilo Silva, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil, E-mails: rodrigofarias08@gmail.com, danilo@eel.ufsc.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq (475482/2012-3).

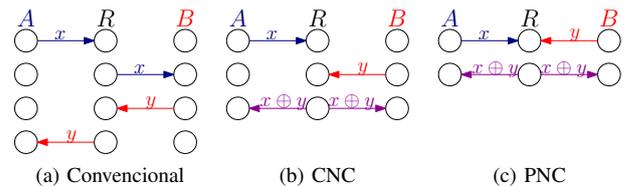


Fig. 1: Diferentes esquemas de troca de mensagens entre os nós A e B em uma rede sem fio *two-way relay*.

Na figura 1b, é apresentado a troca de pacotes utilizando a técnica CNC (*Conventional Network Coding*) onde o diferencial está na combinação *xor* de pacotes realizada pelo nó *Relay* e o modo de transmissão *multicasting*. Observa-se que o canal foi utilizado por 3 vezes aumentando assim a taxa de transmissão. Para que o nó A extraia a informação y de um pacote $x \oplus y$ basta realizar a mesma operação *xor* do pacote recebido com o enviado: $y = x \oplus y \oplus x$.

Recentemente foi proposta a técnica PNC (*Physical-layer network coding*), através da qual é possível extrair diretamente a combinação *xor* de quadros de dados na camada física quando os mesmos são recebidos em sincronia [5] [6]. Na figura 1c, é apresentado a troca de pacotes utilizando a técnica PNC onde os quadros x e y se combinam na antena do nó *Relay* e este consegue extrair o *xor* dos quadros originais para, em seguida, retransmitir o quadro codificado.

Para CNC, [4] propõe um protocolo compatível ao 802.11, entretanto necessita ter controle sobre a fila de pacotes para identificar oportunidades de codificação. Para PNC, [7] também propõe um protocolo compatível ao 802.11 que no mesmo caminho do anterior necessita ter controle sobre a fila de pacotes para prover CNC e PNC.

A principal desvantagem dos protocolos em [4] e [7] é a necessidade para identificar oportunidades de codificação através do controle da fila de transmissão própria e dos vizinhos. Tais protocolos também exigem que os quadros *xor* sejam decodificados na camada de enlace. Isso subotimiza o possível uso de técnicas de roteamento ciente de codificação (*CAR – Coding-Aware Routing*) [8]. Outra desvantagem do protocolo em [7] é que o esquema PNC é realizado dentro de uma só sessão, o que também prejudica o CAR pois com isso é inibido a possibilidade do pacote *xor* ser recodificado.

No presente artigo apresentamos um novo protocolo onde a camada MAC (*Media Access Control*) não necessita identificar oportunidades de codificação. A principal contribuição é fornecer um novo método de uso das técnicas de CNC e PNC sem necessidade de nenhum tipo de controle sobre as filas de

pacotes para identificar oportunidades e realizar combinações de codificação de rede. Assim a camada de enlace continua, neste contexto, somente com a tarefa de transmitir quadros sob demanda e deste modo pode vir a ser integrado ao protocolo 802.11 mais facilmente. As tarefas de identificação e codificação passam a ser realizadas pela camada de rede pois a mesma possui controle direto sobre a fila de pacotes, conhecimento da topologia da rede e dispõe das técnicas de CAR.

O protocolo aqui apresentado dispõe à camada de rede diferentes tipos de entrega, que combinadas de formas diferentes realizam os diferentes esquemas da figura 1. Através de simulações na topologia *two-way relay*, observamos uma melhoria de aproximadamente 80% do esquema PNC em relação ao modo convencional.

Este artigo está organizado da seguinte forma: Na sessão II há comentários a respeito dos principais trabalhos relacionados. Na sessão III é descrito o modo de operação do protocolo. Na seção IV são descritos detalhes das simulações realizadas e seus resultados. E finalmente, nas seções V e VI são apresentados os resultados e conclusões do trabalho.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Em [4] é realizada a proposta de transmissão de dois novos tipos de quadros de informação para realizar CNC com escuta oportunista. Um deles é a transmissão de um quadro de informação sem codificação destinado aos nós que fazem escuta oportunista. E o outro trata-se da transmissão de pacote codificado destinado a múltiplos destinos. Este último pode ser usado para a terceira transmissão no esquema CNC ou a segunda transmissão no esquema PNC, ambas apresentadas na figura 1. O nosso esquema de transmissão para quadros codificados é baseado neste esquema *multicasting* para dois destinos e é apresentado na subseção III-A.

Em [7] são apresentadas modificações no protocolo 802.11 para permitir o uso da técnica PNC. No artigo em questão é proposto que a camada de enlace tenha conhecimento da topologia da rede a dois saltos de distância e da fila de pacotes nos nós vizinhos. Nesta fila, para cada pacote consta o endereço de destino do próximo salto e, possivelmente, do segundo salto. Com isso, um nó qualquer pode se identificar como *Relay* quando dois vizinhos opostos, que não se escutam, têm pacotes de dados para trocar. E assim o protocolo requisita aos dois vizinhos que realizem uma sessão PNC. Após receber a confirmação de ambos os vizinhos o *Relay* coordena o primeiro momento de transmissão de dados PNC. Em seguida, ainda no mesmo período de contenção do meio, retransmite o pacote PNC e aguarda as confirmações de recebimento. O protocolo sugerido também pode executar o procedimento CNC proposto em [4] onde combina pacotes da sua própria fila provenientes de nós vizinhos e, com o esquema de transmissão *multicasting*, entrega o pacote codificado a ambos os destinos.

Atualmente a camada MAC do padrão 802.11 [9], que realiza somente o procedimento convencional, não tem conhecimento da fila de pacotes dos nós vizinhos, conhecimento de topologia e gerenciamento da própria fila de transmissão para identificar oportunidades de codificação. Com a estrutura de

rede atual sugerimos que a camada de rede é mais adequada para executar tais tarefas. Baseado nisso, na sessão III propomos um novo protocolo que forneça os mesmos esquemas de transmissão apontados em [7], entretanto com um modo de operação mais próximo do protocolo 802.11 atual, ou seja, mais dependente da camada de rede e que opere sob demanda.

III. FUNCIONAMENTO DO PROTOCOLO

O protocolo proposto neste artigo permite três diferentes sessões para transmissão, de forma compatível com o protocolo 802.11 em modo DCF (*Distributed Coordination Function*), as quais são classificadas como:

- 1) **Sessão convencional:** é a troca de quadros necessária para transmitir um quadro de dados ponto-a-ponto determinada pelo protocolo 802.11;
- 2) **Sessão MC (*multicasting*):** é a troca de quadros necessária para o nó *relay* transmitir um quadro de dados para dois destinos A e B;
- 3) **Sessão PNC:** é a troca de quadros necessária para que dois nós A e B que não se escutam transmitirem ao mesmo tempo, um quadro de dados cada, para o nó *Relay*;

Em conjunto, estes três serviços contemplam todos os esquemas da figura 1. Note que o esquema PNC, apresentado na figura 1c, é composto de uma sessão PNC seguida de uma sessão MC. A camada de rede deve informar se o pacote a ser transmitido é um pacote comum, um pacote comum que pode ser envolvido em uma comunicação PNC ou se é pacote MC destinado a dois destinos, além dos endereços envolvidos na sessão.

A seguir detalhamos a operação das sessões MC e PNC.

A. Sessão MC

A sessão *multicasting* utilizada neste protocolo é uma versão simplificada daquela apresentada em [4], a qual é revisada a seguir.

A sessão MC é inicializada quando o nó com a demanda para este serviço tem o seu contador de *Backoff Time* encerrado. Este nó sempre se encontra na situação de *Relay* e sua comunicação para o caso da topologia *two-way relay* segue ilustrada na figura 2. O único quadro com formato diferente do padrão 802.11 é o RTS-MC (*Request to Send-MC*) que possui apenas um campo adicional em relação ao RTS comum, o campo Destino B.

O nó *Relay* envia um RTS-MC e aguarda a chegada dos CTS (*Clear to Send*) convencionais a partir dos nós destinos A e B. Quando o nó A recebe o RTS-MC, este responde de imediato com um CTS comum e aguarda o quadro de informação. O nó B sabe que o nó A deve confirmar primeiro, assim transmite seu CTS no período seguinte.

Após o recebimento de ambos os CTS, o nó *Relay* transmite seu quadro DATA utilizando o campo endereço 4, definido em [9], para colocar o endereço de destino B. Em seguida, aguarda o recebimento dos ACK (*Acknowledge*). Havendo pelo menos uma confirmação de recebimento, a camada MAC deve informar a camada superior quem recebeu o quadro, para que esta decida, dependendo do tipo de codificação que

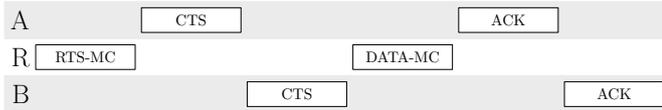


Fig. 2: Diagrama de tempo para a sessão MC.



Fig. 3: Diagrama de tempo para a sessão PNC.

está aplicando, se é necessário o reenvio para o nó que não recebeu. Este *feedback* permite o desenvolvimento de um protocolo de codificação de rede fim-a-fim mais eficiente. Deste modo as sessões MC não servirão apenas para reencaminhar quadros DATA-PNC mas também para transmitir combinações aleatórias de uma geração [2]. No entanto, por simplicidade, em nossa simulação sempre que for recebido apenas um ACK, o *Relay* deverá retransmitir o quadro de dados.

No caso em que o nó *Relay* envia um RTS-MC e recebe somente um CTS, o mesmo deve transmitir o quadro DATA-MC para ambos os destinos, porém redefinindo como nó A aquele que transmitiu o CTS. Em seguida, deve aguardar apenas o ACK do nó A.

B. Sessão PNC

O nó em questão inicializa a sessão PNC após o contador de *Backoff Time* zerar, no caso um dos nós das extremidades, que será denotado por A, conforme a figura 3. Os tipos de pacotes estão descritos na subseção III-C. O nó A envia um RTS-PNC e aguarda o retorno do RTR-PNC (*Request to Receive-PNC*) a partir do *Relay*. Quando o nó A recebe o RTR-PNC, este sabe que o *Relay* está livre para receber e está verificando se o nó B dispõe de um pacote com endereço PNC igual ao do nó A e por isso deve aguardar a chegada do CTS-PNC.

O *Relay* ao receber o RTS-PNC procede respondendo com um RTR-PNC. O nó B recebe o RTR-PNC e, após verificar que seu endereço PNC é igual ao endereço do nó A, responde com o quadro ATS-PNC (*Agree to Send-PNC*).

O *Relay*, por sua vez ao receber o ATS-PNC, envia o CTS-PNC, para servir como gatilho e ajuste de sincronismo para a chegada dos quadros DATA.

Os quadros DATA dos nós A e B são transmitidos simultaneamente e os sinais correspondentes combinados (somados) na antena receptora. Utilizando técnicas PNC [10] [11], a camada física deve extrair o *xor* dos dois pacotes.

A camada física deve informar, além do quadro recuperado, os coeficientes da combinação linear recebida. Tais situações são denotadas por um par $[c_A; c_B]$ que será igual aos coeficientes $[1; 1]$ quando um pacote *xor* for recebido, $[0; 1]$ ou $[1; 0]$ quando apenas um dos pacotes originais foi recebido, ou ainda $[0; 0]$ quando nenhuma combinação pode ser extraída do sinal recebido.

Os coeficientes recebidos da camada física devem ser encaminhados para a camada de rede juntamente com o quadro de dados, exceto quando se trata da combinação $[0; 0]$, pois

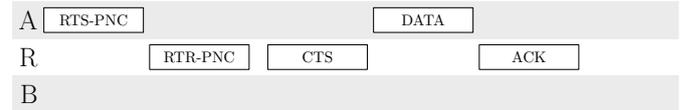


Fig. 4: Diagrama de tempo para a sessão convertida de PNC para convencional quando não há resposta para o RTR-PNC.

não pode ser recuperada nenhuma informação. Os coeficientes também são encaminhados no ACK-PNC, informando quais pacotes foram recebidos. Quando se trata da combinação $[0; 0]$ o ACK-PNC não é enviado, o nó *Relay* retorna ao seu estado anterior e os nós transmissores iniciam o processo de retransmissão.

É importante mencionar que o campo FCS de ambos os quadros de informação a serem recebidos pelo nó *Relay* também devem ser somados (*xor*) para que a camada MAC possa checar a integridade do quadro de forma convencional. O cálculo de CRC será válido para este caso pois a codificação CRC é linear [12]. O CRC da soma de quadros é igual à soma dos CRC's individuais dos quadros.

É possível o nó *Relay*, ao transmitir o RTR-PNC, não obtenha resposta do nó B, pois este pode estar com o NAV ativado devido a outro vizinho, ou simplesmente não tem quadro de dados para realizar PNC com o nó A, ou ainda que recebeu o quadro com erros. Sendo assim, o nó *Relay* envia um CTS convencional em resposta ao nó A e a transmissão segue de modo convencional até o fim da sessão de contenção do meio. Na figura 4 é possível ver que a sessão iniciou em PNC mas se alterou para convencional após o RTR-PNC seguido do *timeout*.

C. Descrição dos novos tipos de quadros

Seguindo o padrão 802.11, os novos quadros possuem os campos *Frame Control* (FC), *Duration* e *Frame Check Sequence* (FCS) nos mesmos locais. Na figura 5 é apresentado o detalhamento dos campos para os novos quadros utilizados na sessão. Em seguida é comentado cada quadro individualmente.

Os campos que estão em cinza são novos ou que operam de maneira diferente em relação aos quadros semelhantes do padrão 802.11.

1) *RTS-PNC*: Este quadro de controle é semelhante ao RTS do 802.11. Entretanto possui campos adicionais. O campo *Destine B*, neste quadro não é um destino direto, mas o endereço do nó B a dois saltos de distância com que se pretende realizar o PNC. O campo *Length* serve para informar ao nó *Relay* o tamanho do Quadro de Dados a ser transmitido. Os demais campos já são definidos pelo padrão 802.11.

2) *RTR-PNC*: Este quadro é semelhante ao quadro RTS convencional, porém ele tem um campo adicional *Destine B*.

3) *ATS-PNC*: Este quadro serve para confirmar o interesse do nó B em fazer PNC com o solicitante. Ele também traz o campo *Length* pelo mesmo motivo que o RTS-PNC. Já o campo *Sequence Control* tem como objetivo informar número de sequência do quadro de dados a ser enviado. Este campo é normalmente utilizado diretamente no quadro de dados, entretanto, o quadro de dados a ser enviado por B possui

RTS-PNC						
FC	Duration	Dest A	Dest B	Source	Length	FCS
2	2	6	6	6	2	4

RTR-PNC					
FC	Duration	Dest A	Dest B	Source	FCS
2	2	6	6	6	4

ATS-PNC					
FC	Duration	Dest A	Seq. Con.	Length	FCS
2	2	6	2	2	4

CTS-PNC					
FC	Duration	Source	Sync	Larg. Len.	FCS
2	2	6	1	2	4

DATA-A-PNC								
FC	Duration	Dest A	Source	BSSID	Seq. Con.	Dest B	Body	FCS
2	2	6	6	6	2	6	?	4

DATA-B-PNC								
Null Header							Body	FCS
30							?	4

ACK-PNC				
FC	Duration	Source	Coeff.	FCS
2	2	6	1	4

Fig. 5: Detalhamento dos diversos frames utilizados e diferentes do padrão 802.11. Os números abaixo dos quadros são os tamanhos, em bytes, dos campos.

cabeçalho nulo. Isso é feito para que o nó *Relay* consiga decodificar o cabeçalho do quadro DATA somado no ar.

4) *CTS-PNC*: Este quadro é semelhante um quadro CTS convencional, exceto pela adição de dois novos campos, *Largest Length* e *Sync*, e pela substituição do campo de endereço *Receiver* pelo campo de endereço *Source*. O campo *Largest Length* informa o maior comprimento dentre os dois quadros DATA. Isto é necessário para que o nó com o menor quadro possa realizar um *padding* (enchimento com zeros) logo após o cabeçalho, pois para que o PNC ocorra com sucesso é necessário que ambos o quadros transmitidos tenham mesmo comprimento. Já o campo *Sync* serve para ajustar o sincronismo de recepção, conforme descrito em [7]. É importante mencionar que o CTS-PNC opera como um gatilho para o início da transmissão do quadro de dados, que deve ser sincronizada.

5) *DATA-A-PNC*: O quadro DATA-A-PNC possui os mesmos campos que o quadro DATA convencional entretanto o campo como endereço 4 é utilizado como *Destine B*, endereço de origem do nó B.

6) *DATA-B-PNC*: O quadro DATA-B-PNC não possui cabeçalho, ao invés disso, possui um vetor de 240 bits nulos.

7) *ACK-PNC*: Este quadro tem a mesma função do convencional ACK, entretanto neste protocolo, ele precisa confirmar a recepção para ambas as origens. O campo *Coefficients* é utilizado para enviar os dois bits que representam os coeficientes da combinação de pacotes recebida. Os demais seis bits não são usados.

IV. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Para simular este protocolo na topologia *two-way relay* utilizamos a plataforma Matlab/Simulink.

A comunicação simulada se dá a uma taxa fixa de 1Mbits/s. Há apenas uma camada física para todos os nós e atua como um controlador de topologia, uso do meio e controle de colisão. Nesta camada não são utilizados cabeçalhos e códigos e corretores de erro. Para simplificar a inserção de erros,

utilizamos um canal BSC (*Binary Symmetric Channel*) para o receptor de cada nó com probabilidade de erro de bit 10^{-7} .

A camada física se comunica individualmente com a camada MAC de cada nó. Todas as camadas MAC operam de maneira exatamente igual e o que designa o modo de operação de cada um é a demanda atribuída pela camada de rede e a topologia da rede. Em nosso simulador não foi adicionado o cabeçalho da camada física.

Todos os controles da camada MAC são realizados por máquinas de estado que se comunicam entre si, para gerenciar a recepção e transmissão de quadros, e entre as camadas de rede e física.

Para controlar o tipo de comunicação realizada foi utilizada uma camada de rede simples sem interpretação de cabeçalho e específica para cada nó com o intuito de auxiliar o teste do protocolo em questão.

Somente os nós A e B geram demanda em datagramas para serem entregues aos nós opostos na rede. O nó *Relay* não tem demanda própria e a camada de rede simplesmente encaminha os datagramas de volta para a camada de enlace com novos destinos.

Todos os datagramas encaminhados à camada MAC têm tamanho de 1KByte e são vetores de bits gerados aleatoriamente nos nós de origem. Ao chegarem na camada MAC, recebem um cabeçalho, que pode ser alterado dependendo o modo de transmissão disponível. Antes de serem transmitidos, os quadros recebem o FCS.

Para esta simulação determinamos a transmissão de 100 datagramas em ambos os fluxos AB e BA passando pelo nó *Relay*. A simulação acaba quando os 100 datagramas são recebidos em ambos os destinos. Para avaliar o protocolo proposto, executamos uma simulação onde a camada de rede dos nós A e B solicita somente sessões PNC, e a camada de rede do *Relay* solicita sessões MC e convencional, no caso de insucesso em uma sessão PNC. Para comparar com o protocolo 802.11, executamos uma simulação onde a camada de rede de todos os nós solicita apenas a sessão convencional.

As figuras 6 e 7 mostram os resultados para duas realizações independentes da comparação entre os protocolos. Em cada uma, consta o número total de pacotes recebidos ao longo do tempo em cada um dos receptores finais operando com PNC e 802.11 convencional.

Em ambas as comparações o protocolo PNC conseguiu manter a taxa de transmissão maior ao longo da transmissão. Na figura 6, levando em consideração o tempo total para a transmissão dos 200 quadros, o resultado de *throughput* foi de 796Kbits/s para PNC enquanto que o esquema convencional foi de 443,3Kbits/s. Na figura 7, o resultado de *throughput* foi de 812Kbits/s para PNC enquanto que o esquema convencional foi de 441Kbits/s.

V. DISCUSSÃO

Este protocolo provê à camada de rede dois novos tipos de entrega além do tipo convencional, PNC e *multicasting*, de tal modo que os diferentes esquemas de transmissão apresentados na figura 1 possam ser realizados a partir da camada de rede.

Vale ressaltar que nos trabalhos relacionados [4] e [7] é exigido que a camada de enlace decodifique o *xor* dos pacotes

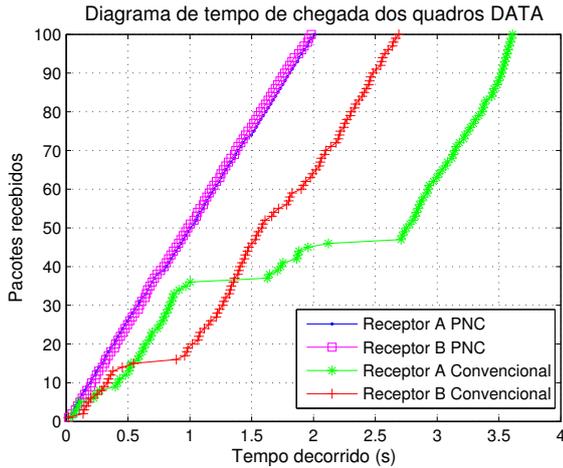


Fig. 6: Número de quadros DATA recebidos em função do tempo para a primeira realização.

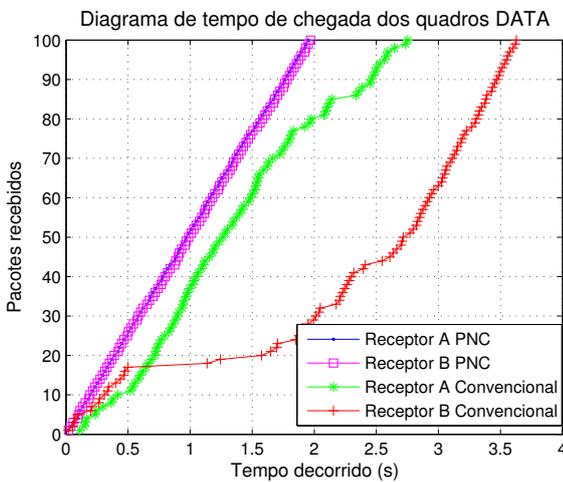


Fig. 7: Número de quadros DATA recebidos em função do tempo para a segunda realização.

combinados. Tais técnicas necessitam ter controle sobre a fila de pacotes a ser transmitida e ter ciência da fila de pacotes nos nós vizinhos através do controle de filas virtuais. Tais tarefas podem ser feitas mais facilmente pela camada de rede. Com isso, a principal desvantagem dessa abordagem é que técnicas de CAR [8], presentes na camada de rede, terão acesso apenas ao tipo de entrega convencional. Ao contrário, no esquema proposto no presente artigo tais técnicas terão flexibilidade e poderão optar também pelos tipos de entrega PNC e MC.

Além disso, o protocolo permite que, quando apenas um dos quadros de dados transmitidos em uma sessão PNC é recuperado pela camada física, este pacote seja repassado à camada de rede, sem necessariamente haver retransmissão. Isto possibilita que dois pacotes originais recebidos individualmente em sessões diferentes possam ser combinados através de *xor* na camada de rede e em seguida transmitidos em uma sessão MC, o que não acontece no protocolo de [7], em que tais pacotes seriam descartados.

Nas figuras 6 e 7 também é possível notar que no modo convencional, em certos momentos, os nós A e B ficam longos

intervalos sem receber informação. Isso se deve à fila FIFO (*First In, First Out*) no *Relay* quando recebe muitos quadros seguidos de uma só origem. Esta disparidade ocorre devido a um dos nós A ou B gerar um período de *Backoff Time* muito grande dando margem para várias transmissões seguidas dos outros nós. Isso raramente acontecerá quando se faz uso do esquema PNC pois quando A ou B consegue o meio, provavelmente ambos transmitirão o quadro DATA na mesma sessão, e assim ambos reiniciarão seus contadores de *Backoff Time* para a transmissão de um próximo quadro.

VI. CONCLUSÃO

Neste artigo apresentamos um novo protocolo MAC que permite a realização da técnica PNC de forma compatível com o protocolo 802.11 tradicional. O protocolo também permite a realização de CNC quando o uso de PNC não é possível ou não é vantajoso, sendo que essa decisão é deixada a cargo da camada de rede.

O protocolo aqui sugerido coordena a transmissão de apenas um quadro DATA por vez sem se preocupar com a transmissão passada ou futura de modo a se aproximar mais do padrão 802.11. Deste modo a camada de rede ganha mais liberdade para executar as diversas técnicas de CAR.

Em trabalhos futuros pretendemos comparar o uso exclusivo de PNC com o uso exclusivo de CNC. Também pretendemos aperfeiçoar o modelo da camada física, assim como implementar uma camada de rede mais completa, incorporando técnicas de CAR com topologias mais complexas.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Ahlswede, N. Cai, S.-Y. Li, and R. W. Yeung, "Network information flow," *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 46, no. 4, pp. 1204–1216, 2000.
- [2] P. A. Chou, Y. Wu, and K. Jain, "Practical network coding," in *Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, 2003.
- [3] S. Katti, H. Rahul, W. Hu, D. Katabi, M. Médard, and J. Crowcroft, "Xors in the air: practical wireless network coding," in *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 36, pp. 243–254, ACM, 2006.
- [4] A. Argyriou, "Wireless network coding with improved opportunistic listening," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 4, pp. 2014–2023, 2009.
- [5] S. Zhang, S. C. Liew, and P. P. Lam, "Hot topic: physical-layer network coding," in *Proceedings of the 12th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp. 358–365, ACM, 2006.
- [6] B. Nazer and M. Gastpar, "Compute-and-forward: Harnessing interference through structured codes," *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 57, no. 10, pp. 6463–6486, 2011.
- [7] S. Wang, Q. Song, X. Wang, and A. Jamalipour, "Distributed MAC protocol supporting physical-layer network coding," *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, vol. 12, no. 5, pp. 1023–1036, 2013.
- [8] M. A. Iqbal, B. Dai, B. Huang, A. Hassan, and S. Yu, "Survey of network coding-aware routing protocols in wireless networks," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 34, no. 6, pp. 1956–1970, 2011.
- [9] "IEEE standard for information technology – IEEE telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications." IEEE, 2012.
- [10] C. Feng, D. Silva, and F. R. Kschischang, "An algebraic approach to physical-layer network coding," *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 11, pp. 7576–7596, 2013.
- [11] L. Lu, T. Wang, S. C. Liew, and S. Zhang, "Implementation of physical-layer network coding," *Physical Communication*, vol. 6, pp. 74–87, 2013.
- [12] T. Moon, *Error Correction Coding: Mathematical Methods and Algorithms*. Wiley, 2005.