

# Comunicação por luz visível: redução da latência via combinação de pacotes

André G. Vieira<sup>1</sup>, Luiz F. M. Vieira<sup>1</sup>, Marcos A. M. Veira<sup>1</sup>, Alex B. Vieira<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ciência da computação

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

CEP: 31270-901 – Belo Horizonte – MG – Brasil

{andregarcia,lfvieira,mmvieira}@dcc.ufmg.br, alex.borges@ufjf.edu.com

<sup>2</sup> Departamento de Ciência da Computação

Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)

CEP: 31270-901 – Belo Horizonte – MG – Brasil

alex.borges@ufjf.edu.com

**Resumo**—Espera-se um grande aumento do número de dispositivos conectados à Internet nos próximos anos. A comunicação por luz visível (VLC) está prevista como uma das soluções para a escassez da largura de banda na radiofrequência. O VLC é uma solução para garantir a conexão desse grande número de dispositivos conectados à Internet. Este artigo propõe um protocolo de camada de enlace que utiliza a técnica de codificação de rede, reduzindo a latência, permitindo o uso de frequências mais altas para transmissões. Para os experimentos usou-se o protocolo OpenVLC, um open-source de plataforma VLC definida por software. Os resultados mostram uma significativa redução da latência quando em comparação com os protocolos baseados em solicitação de repetição automática tradicionais.

**Index Terms**—VLC, visible light communication, luz visível, network coding, comunicação sem fio.

## I. INTRODUÇÃO

A Cisco [1] prevê que o tráfego global de dados móveis cresça cerca de 8 vezes no período de 2015 a 2020. Além disso, eles estimam que o volume do tráfego de dados móveis possa atingir uma taxa de execução anual de 366,8 Exabytes até 2020. O VLC é uma tecnologia potencial que pode ajudar a fornecer os parâmetros necessários para o aprimoramento de tráfego e conectividade.

Um dos sistemas que podem se beneficiar do VLC são os sistemas em tempo real [2], como na indústria, para comunicação máquina-máquina, promovendo maior segurança ao detectar humanos perto de máquinas operacionais, alertando-os ou parando a máquina e, conseqüentemente, prevenindo acidentes. O mesmo ocorre com as redes veiculares. Com comunicação veículo-veículo (V2V) ou mesmo comunicação veículo-humano (V2H), situações adversas no trânsito podem ser evitadas, portanto, pode-se prevenir acidentes e salvar vidas.

O tempo necessário para que uma mensagem chegue ao destino final é bastante significativo, fazendo com que a latência nessas aplicações seja a métrica importante. Por exemplo, considere o caso das redes veiculares. Uma mensagem enviada de um veículo para outro pode evitar um acidente e salvar vidas.

A codificação de rede é uma técnica empregada para melhorar o desempenho da rede em certos cenários, onde os elementos de rede (roteadores) misturam conteúdo de pacote enquanto estão sendo encaminhados [3]. A codificação de rede melhora o rendimento da rede [4], reduzindo o consumo de energia, melhorando a robustez da rede e atingindo total capacidade da rede. Aqui, foi utilizado essa técnica nos sistemas VLC para reduzir a latência.

Na tecnologia sem fio, atualmente, os protocolos confiáveis da camada enlace de dados alcançam confiabilidade através de retransmissões automáticas. Os protocolos de Requisição de Repetição Automática (ARQ) solicitam automaticamente a retransmissão de quadros com erros ou quadros que faltam.

Aqui é proposto um protocolo da camada de enlace de dados que envia quadros utilizando codificação de rede a uma taxa de erros de quadros, ou seja, são gerados quadros codificados na mesma taxa em que são perdidos ou recebidos com erros. Portanto, os quadros que foram perdidos podem ser recebidos mesmo antes de o receptor informar ao transmissor para retransmiti-los. O protocolo não exige tempo limite nem confirmação explícita, podendo diminuir a latência mesmo em um canal com um único salto. Com o aumento de perdas de quadros, os benefícios na redução da latência são ainda maiores.

As principais contribuições do artigo são: apresentação de um protocolo de baixa latência na camada de enlace de dados para VLC, realização de uma modelagem matemática desse protocolo e também são mostrados resultados obtidos utilizando uma plataforma experimental, o OpenVLC [5]. Os resultados mostram uma melhora na latência.

Este artigo está organizado da seguinte forma: a seção II descreve os trabalhos relacionados. A seção III apresenta o protocolo da camada de enlace com codificação de rede. A seção IV discute os protocolos ARQ e análise da latência. A seção V detalha a implementação do protocolo. A seção VI traz os resultados. Finalmente, a seção VII conclui este documento e discute os trabalhos futuros.

## II. TRABALHOS RELACIONADOS

Aqui apresenta-se os trabalhos relacionados com a codificação de rede e a comunicação por luz visível.

### A. Codificação de Rede

A codificação de rede é um método onde os elementos de rede (roteadores) combinam conteúdo de pacotes em trânsito. No roteamento tradicional os pacotes só são armazenados e encaminhados (*Store-and-forward*). Com a codificação de rede, os dados transmitidos podem ser combinados enquanto se transmitem, esse método pode levar a várias melhorias nos parâmetros da rede.

No artigo "*Network information flow*" [3] os autores mostraram que, ao combinar adequadamente os pacotes, a vazão (*throughput*) da rede poderia aumentar. Zongpeng Li e Baochun Li [6] demonstraram os benefícios da codificação de rede em redes não direcionadas. Em [7] foi proposto o uso de coeficientes aleatórios para gerar pacotes com codificação de rede. Esta codificação linear aleatória (RLC do inglês *Random Linear Coding*) gera um novo pacote, utilizando pacotes anteriores, através de uma combinação linear com coeficientes aleatórios. Os coeficientes são gerados e armazenados no cabeçalho do pacote. Os roteadores intermediários combinam os pacotes e, depois de receber  $n$  pacotes linearmente independentes, o receptor decodifica os  $n$  pacotes.

A codificação de rede tem sido utilizada em vários cenários e vem se mostrando uma técnica com bastante aplicabilidade. Em *Performance of network-coding in multi-rate wireless environments for multicast applications* [8], os autores mostraram que em cenários com múltiplas taxas a codificação de rede poderia fornecer ganhos de produção e mostraram que esse ganho poderia ser maior que 2 [9], [10]. Nas redes de sensores sem fio, a proposta *CodeDrip* [11] utiliza a codificação de rede para melhorar a disseminação de dados. Em sistemas em nuvens [12] os autores usam codificação de rede para recuperação de dados. Em *Power Line Communications*, uma codificação de rede proposta, *CodePLC* [13], observou um aumento no rendimento e uma redução na ocupação do buffer [14]. Recentemente, a codificação de rede mostrou-se útil nas redes 5G [15], reduzindo o número de retransmissões necessárias para alcançar os destinos finais.

A correção direta de erros (FEC) ainda pode ser usada nos pacotes, em paralelo com esse trabalho, no entanto, o uso de FECs aumentam a quantidade de bits transmitidos e, por si só, não são robustos o suficientes contra uma grande taxa de erros.

Portanto, a codificação de rede pode proporcionar muitos benefícios a uma rede. Até onde se sabe, este protocolo propõe pela primeira vez a usá-la na camada de enlace para diminuir a latência na comunicação através de luz visível sem fio.

### B. Comunicação com luz visível

O VLC utiliza ondas eletromagnéticas na faixa espectral da luz visível para comunicação de dados sem fio. A luz pode ser utilizada como meio de comunicação para computação dominante e onipresente com muitas áreas de pesquisa, incluindo

redes veiculares, sistemas de transporte inteligentes, redes de áreas corporais etc.

Na camada de enlace atualmente existe um padrão proposto pela IEEE [16] para o VLC. Este padrão cobre a camada física (PHY) e o controle de acesso ao meio (MAC). Porém, este padrão não propõe a codificação de rede para a camada de enlace de dados.

## III. CAMADA DE ENLACE COM CODIFICAÇÃO DE REDE

A proposta deste artigo é a utilização de codificação de rede nas comunicações sem fio de luz visível, a fim de reduzir a latência, mantendo taxas de transmissão e aumentando a confiabilidade, podendo ser empregado em aplicações de baixa latência e aplicações de alta confiabilidade.

Sem codificação de rede, os pacotes são transmitidos usando um dos protocolos ARQ. Aqui, sem nenhum tipo de perda de generalidade, foi comparado com a retransmissão seletiva. Embora a retransmissão seletiva consuma mais memória o seu canal de comunicação é usado de forma mais eficiente. Quando um pacote é perdido o remetente retransmite o pacote, mas, somente, após o receptor notificar erro do pacote através de uma mensagem de confirmação negativa (NACK) ou após um tempo limite sem a confirmação (ACK).

O protocolo com codificação de rede funciona da seguinte forma: ao invés de esperar por um tempo limite ou para que o receptor notifique que um pacote não foi entregue corretamente, são transmitidos pacotes codificados de rede que permitem ao receptor recuperar o pacote mais cedo. Isso resulta em uma menor latência.

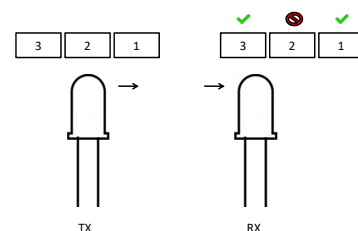


Figura 1. Comunicação por luz visível com perda de pacotes.

A figura 1 mostra a transmissão de 3 pacotes. Os pacotes 1 e 3 são recebidos corretamente e o pacote 2 está perdido. O remetente precisará retransmitir o pacote 2, mas ele só toma conhecimento de que não foi recebido após um tempo limite ou se o receptor envia uma confirmação negativa, portanto, a latência para o pacote número 2 será maior do que a transmissão de um pacote.

A figura 2 também mostra a transmissão de 3 pacotes: os pacotes número 1, número 2 e um pacote com codificação de rede formado pela combinação dos pacotes 1 e 2. O pacote 2 está perdido. Ao receber o pacote número 1 e um pacote codificado com os pacotes números 1 e 2, o receptor pode decodificar o pacote 2. O mesmo pode acontecer se o pacote perdido for o pacote 1 em vez do 2 ou se o pacote perdido fosse o codificado. Com a codificação de rede, se transmitimos

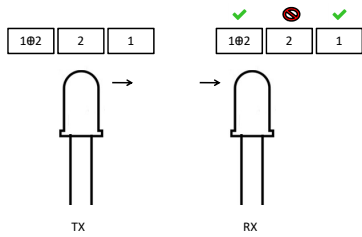


Figura 2. Comunicação por luz visível com codificação de rede.

um pacote codificado, qualquer um dos pacotes poderia ser perdido e o remetente ainda conseguiria recuperá-lo.

O protocolo proposto toma uma abordagem proativa e transmite pacotes com codificação de rede antes que o remetente saiba quais pacotes foram perdidos. Isso pode ser realizado ao manter um controle da taxa de erro de pacotes. O remetente pode determinar quantos pacotes codificados deve transmitir para permitir que o receptor obtenha todos os pacotes com baixa latência, mesmo que ocorra perda de pacotes.

Ao utilizar esse protocolo não há diminuição do rendimento da rede uma vez que o pacote com codificação de rede que está sendo transmitido também terá novas informações, mantendo a taxa de transferência. Por exemplo, na figura 1, a vazão efetiva (goodput) é  $\frac{2}{3}$  e pelo menos uma transmissão a mais é necessária para o número de pacote 2. No exemplo de codificação de rede da figura 2, o goodput também é  $\frac{2}{3}$ . O pacote número 2 será recebido, contudo, mais uma transmissão é necessária para o pacote número 3. Ambos os esquemas têm a mesma vazão efetiva, mas com a codificação de rede a latência é reduzida.

Resultados anteriores dos sistemas VLC mostraram que as frequências mais elevadas podem ser utilizadas para obter uma maior taxa de transferência, mas isso leva a maiores taxas de erro de pacotes [17]. Assim, uma vez que a codificação de rede é benéfica em ambientes com perdas de pacotes, esse protocolo pode ser empregado com as transmissões VLC de frequência mais altas.

#### IV. VISÃO GERAL

Os protocolos de Solicitação de Repetição Automática (ARQ) solicitam automaticamente a retransmissão de pacotes perdidos ou pacotes com erros. Três protocolos baseados em ARQ são bem conhecidos: *Stop-and-wait*, *Go-back-N* e *Selective-Repeat*.

O protocolo *Stop-and-wait* envia um pacote que caso não seja confirmado como recebido corretamente após um tempo limite, o remetente retransmite somente após o término desse tempo, que deve ser grande o suficiente para ambos os pacotes se propagarem. O uso do canal desta forma não é muito eficiente.

A figura 3 apresenta os elementos de latência dos protocolos ARQ. Onde  $T_{TP}$  é o tempo de transmissão do pacote,  $T_P$  é o atraso na propagação,  $T_{TA}$  o tempo de transmissão da confirmação.  $T_{Total}$  é a soma dos tempos necessários para

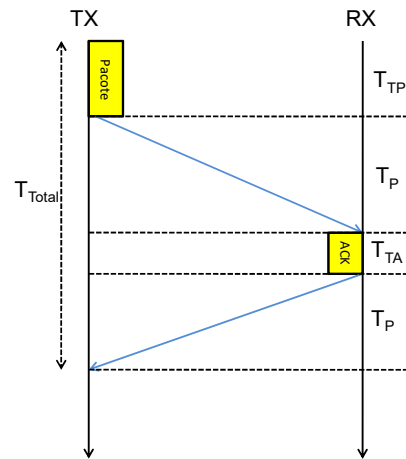


Figura 3. Protocolos ARQ – Elementos de latência.

que os pacotes sejam transmitidos  $T_{TP}$  e  $T_{TA}$  e o tempo de propagação  $T_P$  de cada um desses 2 pacotes. Desconsiderando o tempo de processamento para a manipulação de pacotes temos que:

$$T_{Total} = T_{TP} + 2T_P + T_{TA}. \quad (1)$$

Para o valor esperado do tempo total ( $E[T]$ ), temos:

$$E[T] = T_{Total} + TO * \frac{p}{1-p}. \quad (2)$$

Sendo  $TO$  o intervalo de tempo limite,  $T$  a quantidade de tempo que leva para transmitir um pacote e receber o sua confirmação. Na presença de erro,  $p$  representa a probabilidade de sua ocorrência na transmissão de um pacote ou em sua confirmação.

O protocolo *Go-back-N* é mais eficiente do que o protocolo *Stop-and-wait*, pois permite a transmissão de novos pacotes antes mesmo de os pacotes anteriores serem confirmados. Para isso, é usada uma janela onde o remetente pode transmitir todos os pacotes que estão dentro desta janela.

Utilizando o protocolo *Go-back-N*, o  $T_{Total}$  também é dado como  $T_{Total} = T_{TP} + 2T_P + T_{TA}$ . O valor esperado do tempo total é:

$$E[T] = 1 + W * \frac{p}{1-p}, \quad (3)$$

onde o tamanho  $W$  da janela dado por  $\lceil T_{Total}/T_{TP} \rceil$ .

O protocolo *Select-Repeat* tenta retransmitir apenas os pacotes que não foram confirmados *ACK*. Assim como no *Go-back-N*, o protocolo utiliza uma janela de tamanho  $W$ , onde somente os pacotes dentro desta janela podem ser transmitidos. O receptor armazena todos os pacotes corretos no intervalo da janela.

A eficiência ideal do *Select-Repeat* é dada por:

$$E[T] = 1 - p.^1. \quad (4)$$

<sup>1</sup>Detalhada em [web.mit.edu/modiano/www/6.263/lec3-4.pdf](http://web.mit.edu/modiano/www/6.263/lec3-4.pdf)

Apesar do uso do canal ser bastante eficiente os tempos limite ainda são necessários. O tempo necessário para que um pacote perdido ou corrompido seja recebido é, no melhor dos casos, pelo menos  $2T_{Total}$ . Tal cenário ainda apresenta uma alta latência em comunicações onde baixas latências são primordiais.

Portanto, é apresentado um protocolo com codificação de rede para VLC que mantém a eficiência e reduz a latência.

Este artigo propõe usar a codificação de rede e desse modo, reduzir a latência geral, evitando confirmação explícita e permitindo o uso de frequências mais altas, mesmo em cenários com maiores taxas de erro de pacotes.

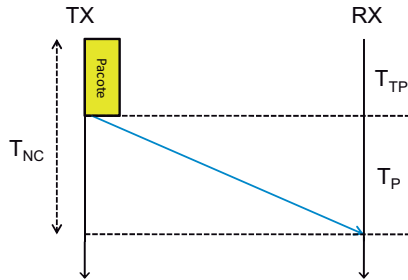


Figura 4. Elementos de latência da codificação de rede na camada de enlace.

A figura 4 mostra os elementos de latência na codificação de rede na camada de enlace. Quando comparado com a figura 3, pode-se observar a redução de latência, evitando atrasos de propagação ACKs e ACKs explícitos. Ao enviar um pacote codificado de rede redundante, o pacote perdido será recuperado pelo receptor. Para isso, é necessário garantir que sejam enviados pacotes com codificação de rede em quantidade suficiente. Isso pode ser feito rastreando a taxa de erro de pacote e informando-a em pacotes de confirmação por carona (piggyback) quando ela muda.

## V. O PROTOCOLO

O protocolo OpenVLC atual usado para comunicação de dados, tem um cabeçalho de 9 bytes e após a carga útil existem mais 16 bytes de código de correção de erros (ECC, do inglês Error Correcting Code), no caso do OpenVLC utiliza-se o código *Reed-Solomon*. Os campos de cabeçalho são mostrados na figura 5. O campo *SFD* tem um byte. Indica o tipo de dados na carga útil. Um valor de 0x3a significa que a carga útil é do tipo de dados, um valor de 0xa3 representa um quadro ACK. O campo *LENGHT* tem 2 bytes e determina o tamanho da carga útil. O campo *DEST* indica o endereço da interface de destino. O campo *SRC* contém o endereço da interface de origem se não for um quadro codificado de rede, ambos os campos, *DEST* e *SRC*, têm tamanho de 2 bytes. O campo *PROTOCOL* também tem tamanho de 2 bytes e indica o tipo de protocolo na camada acima.

Para implementar o protocolo optou-se por adicionar apenas 2 bytes ao cabeçalho do pacote, logo após o campo *PROTOCOL*. A figura 6 mostra a divisão desses bytes adicionais em quatro campos: FLAG 1, FLAG 2, ID 1 e ID 2. Enquanto

SFD	LENGHT	DEST	SRC	PROTOCOL
1 Byte	2 Bytes	2 Bytes	2 Bytes	2 Bytes

Figura 5. Cabeçalho do protocolo OpenVLC.

*FLAG 1* indica se mensagem utiliza codificação de rede, a *FLAG 2* indica se o receptor deve ou não enviar uma confirmação dos pacotes recebidos desde a última confirmação. Os campos *ID 1* e *ID 2* são identificadores de quadro. Quando o pacote for codificado, estes representam o intervalo de mensagens que estão combinadas. Caso contrário, *ID 1* representa o número do pacote e *ID 2* não é utilizado.

FLAG 1	ID 1	FLAG 2	ID 2
1 bit	7 bits	1 bit	7 bits

Figura 6. Cabeçalho do protocolo da codificação de rede.

## VI. RESULTADOS

Sem perda de generalidade, foi utilizado a plataforma OpenVLC [5] para experiências e seus resultados publicados. O OpenVLC é uma plataforma de comunicação por luz visível sem fio de baixo custo e de código aberto. A plataforma funciona com um BeagleBone Black (BBB). O software OpenVLC é implementado como um driver Linux e funciona com a pilha de protocolos de rede Linux. É importante ressaltar que o protocolo proposto é genérico e portanto, pode ser usado em qualquer tipo de sistema VLC, não ficando restrito ao OpenVLC.

A latência é dada pelo tempo de transmissão e o atraso de propagação, sendo o tempo de transmissão é dado pelo tamanho total do pacote dividido pela taxa de transmissão, e o tempo de propagação é dado pela distância dividida na velocidade de propagação. Isso pode ser resumido pela equação 5, onde  $S$  é o tamanho do pacote em bits,  $B$  é a taxa de dados em bps,  $d$  é a distância entre os dois dispositivos e  $c$  é a velocidade da luz.

$$L = \frac{S}{B} + \frac{d}{c} \quad (5)$$

A plataforma OpenVLC pode usar um LED de baixa ou alta potência para transmissão de dados, e um LED de baixa ou alta potência ou um fotodiodo (PD) para a recepção de dados. Aqui, considerou-se os casos de baixo custo onde foram usados LEDs de baixa potência para transmissão e recepção de dados. As experiências foram conduzidas em um ambiente com iluminação natural e com os LED's a uma distância de 0,1m.

A figura 7 mostra dois dispositivos OpenVLC, cada um acoplado a uma BeagleBone Black, ambos usando LED de baixa potência para comunicação.

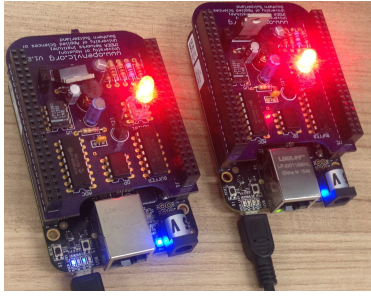


Figura 7. Dois dispositivos OpenVLC usando luz vermelha para comunicação.

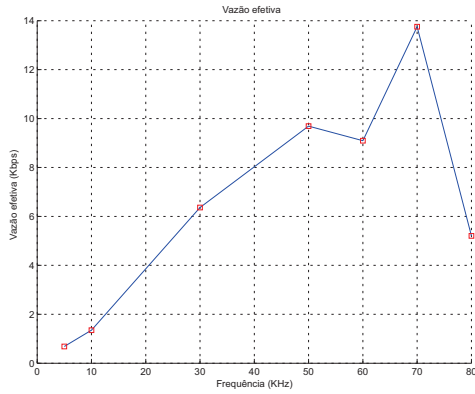


Figura 8. Vazão efetiva para várias frequências.

Os resultados iniciais dos sistemas VLC [17] mostram que o aumento da frequência de modulação resulta em um aumento da vazão, porém o canal de transferência se torna menos confiável. A figura 8 mostra a taxa de dados para várias frequências. Geralmente, à medida que a frequência aumenta a taxa de dados também aumenta. Nas experiências realizadas, a melhor frequência foi de 70 kHz, atingindo um taxa de transferência de dados média de 14 Kbps.

A figura 9 mostra a Taxa de Recepção de Pacotes (PRR, do inglês Packet Reception Rate) para várias frequências. Para frequências mais altas o PRR vai se tornando cada vez menor,

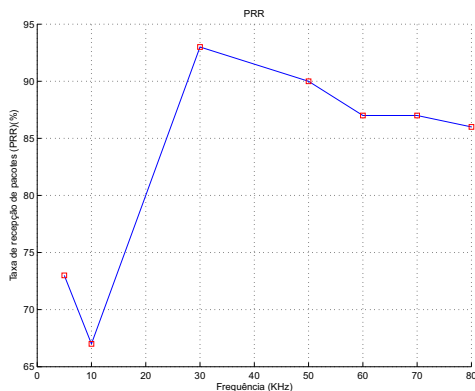


Figura 9. Taxa de Recepção de Pacotes para várias frequências.

para frequências baixas, quase não há uso do *Reed-Solomon*, entretanto para as frequências mais altas o correção de quadros com erros se torna cada vez maior.

Em cenários onde os erros em rajada são comuns, os protocolos ARQ's tradicionais são mais eficientes que o protocolo proposto. Entretanto foi observado que somente cerca de 1% dos quadros precisaram de mais do que duas retransmissões, isso mostra que os erros em rajada não são comuns neste canal, logo o uso do protocolo proposto para o VLC trás benefícios na redução da latência.

#### A. Canal Perfeito

A figura 10 mostra a latência para várias frequências considerando um cenário sem perda de pacotes. Nesta situação, têm-se o menor ganho de codificação de rede, pois a técnica apenas reduzirá a quantidade de transmissões de ACK e, consequentemente, seu atraso de propagação, quando comparado aos protocolos ARQ sem codificação de rede. A taxa de dados e a frequência são as mesmas da figura 8. Foi utilizado um quadro de 514 bytes de tamanho, uma distância de 0,1 m, a velocidade da luz de  $c = 3.10^8 m/s$ , quadro ACK de tamanho 16 bytes.

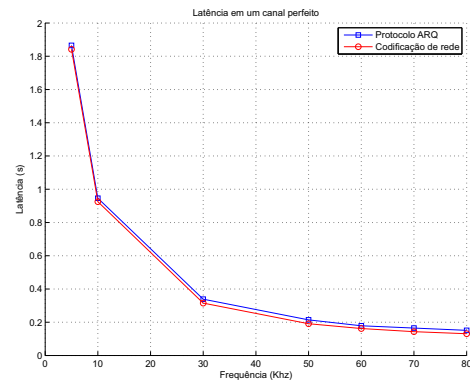


Figura 10. Latência para várias frequências.

#### B. Perda de um pacote

Considerando o caso em que um pacote é perdido e assumindo que a primeira retransmissão seria suficiente para entregar o pacote ao receptor, na obtenção da latência o pacote perdido foi considerado, ou seja, foi contado a partir do momento em que foi transmitido pela primeira vez até sua recepção. Foi considerado um tamanho de janela de 3, o protocolo ARQ deve aguardar que os pacotes que já estão na fila sejam transmitidos antes da retransmissão. A figura 11 mostra a latência para várias frequências. Pode-se observar que a utilização dessa técnica proporciona uma redução considerável na latência.

#### C. Perda de pacotes

Em seguida, o caso mais realista onde múltiplos pacotes são perdidos. Pode-se observar na figura 12 uma redução na latência para todas as frequências investigadas.

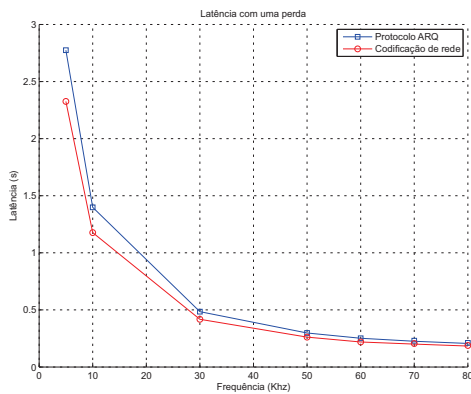


Figura 11. Latência para várias frequências considerando uma retransmissão.

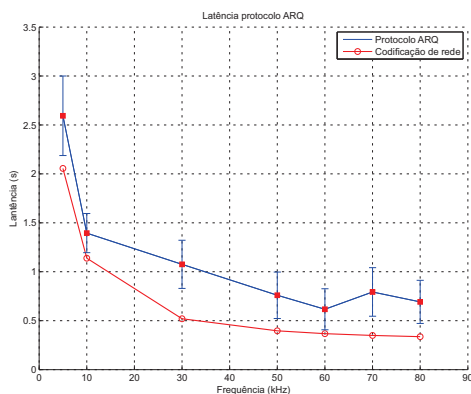


Figura 12. Latência para várias frequências considerando múltiplas retransmissões.

O protocolo proposto mostrou-se eficiente, quando comparado aos protocolos ARQ's tradicionais, conforme o esperado.

## VII. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A comunicação por luz visível pode fornecer uma solução para o problema da escassez da largura de banda, oferecendo o suporte necessário ao grande número de dispositivos conectados a Internet. A diminuição da latência é fundamentalmente importante em muitas aplicações, como máquinas operadas em rede, aplicações em tempo real e redes veiculares. O protocolo apresentado para a camada de enlace que utiliza codificação de rede para diminuir a latência, não exigindo tempo limite nem reconhecimento explícito. Os resultados mostram a diminuição da latência para vários cenários, incluindo canais perfeitos e e canais com perdas de múltiplos pacotes.

Os trabalhos futuros incluem medidas no uso do protocolo em vários cenários, incluindo cenários de múltiplos saltos. Conforme já foi comprovado, a eficiência da codificação de rede nesse cenário pode proporcionar ganhos ainda maiores quando comparados a um único salto. Também há planos de usar múltiplos canais e o uso de codificação de rede analógica (*analog network coding*). Também pretende-se integrá-lo com o IPv6 em dispositivos de baixa memória [18].

## REFERÊNCIAS

- [1] CISCO. Global mobile data traffic forecast update, 2015-2020. [http://www.cisco.com/assets/sol/sp/vni/forecast\\_highlights\\_mobile/index.html](http://www.cisco.com/assets/sol/sp/vni/forecast_highlights_mobile/index.html), 2016. [Online; acessado 17-Dezembro-2016].
- [2] Ana Luiza AP Zuquim, Luiz Filipe M Vieira, Marcos A Vieira, Alex Borges Vieira, Heraldo S Carvalho, José A Nacif, CN Coelho, DC da Silva, Antônio Otávio Fernandes, and Antonio Alfredo Ferreira Loureiro. Efficient power management in real-time embedded systems. In *Emerging Technologies and Factory Automation, 2003. Proceedings. ETFA'03. IEEE Conference*, volume 1, pages 496–505. IEEE, 2003.
- [3] R. Ahlswede, Ning Cai, S.-Y.R. Li, and R.W. Yeung. Network information flow. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 46(4):1204–1216, Jul 2000.
- [4] Y. Li, K. Sun, and L. Cai. Cooperative device-to-device communication with network coding for machine type communication devices. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17(1):296–309, Jan 2018.
- [5] Qing Wang, Domenico Giustiniano, and Omprakash Gnawali. Low-cost, flexible and open platform for visible light communication networks. In *Proceedings of the 2Nd International Workshop on Hot Topics in Wireless*, HotWireless '15, pages 31–35, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [6] Zongpeng Li and Baochun Li. Network Coding in Undirected Networks. *Proceedings of 38th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS'04)*, 2004.
- [7] Tracey Ho, Ralf Koetter, Muriel Medard, David R. Karger, and Michelle Effros. The benefits of coding over routing in a randomized setting. In *In Proceedings of 2003 IEEE International Symposium on Information Theory*, 2003.
- [8] Luiz Filipe M Vieira, Archan Misra, and Mario Gerla. Performance of network-coding in multi-rate wireless environments for multicast applications. In *Military Communications Conference, 2007. MILCOM 2007. IEEE*, pages 1–6. IEEE, 2007.
- [9] Luiz Filipe M Vieira, Mario Gerla, and Archan Misra. Bounds on network coding and multi-rate diversity gain in multicast wireless applications. In *Wireless Communication Systems, 2009. ISWCS 2009. 6th International Symposium on*, pages 221–224. IEEE, 2009.
- [10] Luiz Filipe M Vieira, Mario Gerla, and Archan Misra. Fundamental limits on end-to-end throughput of network coding in multi-rate and multicast wireless networks. *Computer Networks*, 57(17):3267–3275, 2013.
- [11] Nildo dos Santos Ribeiro Júnior, Marcos A. M. Vieira, Luiz F. M. Vieira, and Omprakash Gnawali. CodeDrip: Data dissemination protocol with network coding for wireless sensor networks. In *Wireless Sensor Networks: 11th European Conference, EWSN 2014, Oxford, UK, February 17-19, 2014, Proceedings*, pages 34–49. Springer International Publishing, 2014.
- [12] Yanbo Lu, Jie Hao, Xin-Ji Liu, and Shu-Tao Xia. Network coding for data-retrieving in cloud storage systems. In *2015 International Symposium on Network Coding (NetCod)*, 2015.
- [13] L.M.F. Silveira, Roberto M. Oliveira, Moises V. Ribeiro, Luiz F.M. Vieira, Marcos A.M. Vieira, and Alex B. Vieira. CodePLC: A Network Coding MAC Protocol for Power Line Communication. *2016 IEEE 41st Conference on Local Computer Networks (LCN)*, pages 643–646, 2016.
- [14] Vivekanand Jha, Nidhi Nagpal, Anchal Goswami, and Bhavnit Kaur. *An Approach to Network Coding at Data Link Layer*, pages 133–143. Springer India, New Delhi, 2014.
- [15] Luiz F. M. Vieira and Marcos A. M. Vieira. Network Coding for 5G Network and D2D Communication. In *International Symposium on QoS and Security for Wireless and Mobile Networks, Q2SWinet 2017*. ACM, 2017.
- [16] IEEE802.15.7. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light., 2011.
- [17] Milad Heydari, Shengrong Yin, Omprakash Gnawali, Daniele Puccinelli, and Domenico Giustiniano. Embedded Visible Light Communication: Link Measurements and Interpretation. In *Proceedings of the MadCom: New Wireless Communication Paradigms for the Internet of Things Workshop (MadCom 2016)*, February 2016.
- [18] Elerson Rubens da Silva Santos, Marcos AM Vieira, and Luiz FM Vieira. Routing ipv6 over wireless networks with low-memory devices. In *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2013 IEEE 24th International Symposium on*, pages 2398–2402. IEEE, 2013.