



NOAH: Protocolo Híbrido e Adaptativo de Codificação de Rede para Comunicação por Luz Visível

Douglas D. M. Silva¹, Vitor A. S. Carvalho¹,
Kristtopher K. Coelho², Matheus Nogueira Moreira¹, Marcos A. M. Vieira²,
Alex B. Vieira³, Luiz F. M. Vieira², José Augusto Nacif¹

¹Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas
Universidade Federal de Viçosa (UFV - Campus Florestal)

²Departamento de Ciência da Computação (DCC)
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

³Departamento de Ciência da Computação
Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)

{douglas.marcelino, vitor.souza.carvalho, jnacif}@ufv.br

{kristtopher.coelho, lfvieira, mmvieira@dcc}@dcc.ufmg.br

alex.borges@ufjf.edu.br

Abstract. *With the advancement of technology and the increasing demands of computer networks, Visible Light Communication (VLC) has gained prominence due to its transmission capabilities. However, since the visible light spectrum can suffer from external interference, this technology presents high packet loss, harming its transmission. This article presents NOAH (Network cOding Adaptive Hybrid protocol), a network coding protocol designed to improve network resilience in VLC systems, achieving gains of approximately 23% in the reduction of the packet loss rate compared to the ARQ mechanism. The ARQ, in turn, presented gains of up to 27% when compared to the Best-Effort scheme. In addition, a more realistic simulation model for the ns-3 VLC module is presented.*

Resumo. *Com o avanço da tecnologia e as crescentes demandas das redes de computadores, a Comunicação por Luz Visível (VLC) ganhou destaque devido às suas capacidades de transmissão. No entanto, como o espectro da luz visível pode sofrer interferências externas, essa tecnologia apresenta alta perda de pacotes, prejudicando a transmissão. Este artigo apresenta o NOAH (Network cOding Adaptive Hybrid protocol), alcançando ganhos de aproximadamente 23% na redução da taxa de perda de pacotes em relação ao mecanismo ARQ. O ARQ, por sua vez, apresentou ganhos de até 27% quando comparado ao esquema Best-Effort. Além disso, é apresentado um modelo de simulação mais realista para o módulo de VLC do ns-3.*

1. Introdução

Nas últimas décadas, observa-se um crescimento expressivo na demanda por tecnologias de comunicação capazes de suportar volumes cada vez maiores de tráfego de dados. Este aumento significativo é impulsionado pela popularização de dispositivos móveis, aplicações multimídia e serviços conectados [Krogfoss et al. 2011]. De acordo com as projeções recentes do *Ericsson Mobility Report (2024)*, o tráfego global de dados móveis, incluindo conexões de acesso fixo sem fio (*Fixed Wireless Access – FWA*), deverá atingir aproximadamente 473 exabytes por mês até o ano de 2030, o que corresponde a cerca de 5,68 zettabytes anuais [Ericsson 2024]. Esse cenário impõe desafios significativos às infraestruturas de comunicação existentes e estimula a busca por tecnologias complementares capazes de ampliar a capacidade, a confiabilidade e a eficiência das redes atuais.

Nesse contexto, a Comunicação por Luz Visível (*Visible Light Communication – VLC*) tem se destacado como uma alternativa promissora às tecnologias tradicionais baseadas em radiofrequência. Ao explorar o espectro da luz visível para a transmissão de dados, a VLC apresenta vantagens relevantes. Entre elas, ampla largura de banda disponível, elevada taxa de transmissão, maior segurança inerente ao confinamento espacial da luz e possibilidade de integração com infraestruturas de iluminação já existentes [Vijayakumari and Anusudha 2024]. Estudos recentes demonstram que sistemas VLC podem alcançar taxas da ordem de gigabits por segundo em cenários práticos, chegando a dezenas de gigabits em ambientes controlados, e até centenas de gigabits em condições experimentais específicas, evidenciando seu elevado potencial para aplicações futuras de alta demanda [Gupta et al. 2024, Zhou et al. 2024].

Apesar dessas vantagens, a VLC ainda enfrenta limitações relacionadas à confiabilidade do enlace. O desempenho desses sistemas é influenciado por fatores como variações na distância entre transmissor e receptor, interferência de fontes de luz ambiente, limitações do campo de visão dos fotodetectores, obstruções físicas no caminho óptico e até mesmo a cor utilizada na comunicação [Vijayakumari and Anusudha 2024, Matheus et al. 2019a]. Como consequência, a taxa de perda de pacotes em sistemas VLC pode atingir valores significativos mesmo em cenários controlados, comprometendo métricas essenciais de desempenho, tais como vazão efetiva, atraso e confiabilidade da comunicação. Trabalhos da literatura indicam que essas perdas impactam diretamente a experiência da aplicação e limitam a adoção da tecnologia em ambientes reais [Matheus et al. 2019b].

Diante desse cenário, torna-se fundamental o desenvolvimento de soluções capazes de aumentar a robustez e a resiliência das comunicações em redes VLC. Tradicionalmente, protocolos de controle de erro, como os baseados em Solicitação de Repetição Automática (*Automatic Repeat reQuest – ARQ*), têm sido amplamente utilizados para mitigar perdas de pacotes em diferentes tecnologias de rede [Hasan and Tahar 2008]. No entanto, quando aplicados diretamente a sistemas VLC, esses mecanismos podem introduzir sobrecarga excessiva, aumentar o atraso e reduzir a eficiência global da rede, especialmente em ambientes com altas taxas de erro [Sena et al. 2023, Vieira et al. 2025].

Com o objetivo de superar essas limitações e problemas, este trabalho propõe o NOAH¹ (*Network cOding Adaptive Hybrid protocol*), um protocolo de codificação

¹<https://github.com/lesc-ufv/NOAH>

de rede projetado especificamente para aumentar a confiabilidade de sistemas VLC. O NOAH é baseado no protocolo ARQ, mas incorpora a codificação de rede como estratégia central para reduzir eficientemente a taxa de perda de pacotes. Ao empregar operações simples de codificação XOR entre pacotes de dados, o protocolo possibilita a recuperação de informações perdidas com um número reduzido de retransmissões, explorando de maneira mais eficaz a redundância já presente no tráfego de rede.

Entre as principais contribuições deste trabalho, destacam-se: (i) Implementação e adaptação do protocolo NOAH para o contexto de redes VLC. Tal implementação utilizou-se do simulador ns-3, em conjunto com seu módulo de VLC para viabilizar o desenvolvimento e a avaliação do protocolo. (ii) Proposição de um modelo de erro de pacotes mais realista para o canal VLC, permitindo representar com maior fidelidade os efeitos de perda de pacotes observados em ambientes reais. (iii) Desenvolvimento e a incorporação ao módulo de VLC de um mecanismo ARQ, inexistente até então, possibilitando a comparação direta entre diferentes estratégias de confiabilidade, incluindo o esquema *Best-Effort*, o ARQ tradicional e o protocolo NOAH.

Os resultados obtidos demonstram que o NOAH é capaz de alcançar ganhos significativos na redução da taxa de perda de pacotes, em comparação às abordagens convencionais. Em particular, o protocolo apresenta melhorias de até aproximadamente 23% em relação ao ARQ, enquanto este, por sua vez, supera o esquema *Best-Effort* em até 27%. Portanto, evidencia-se a eficácia da combinação entre ARQ e codificação de rede proposta neste trabalho. Esses resultados reforçam o potencial do NOAH como uma solução eficiente e de baixo custo para aumentar a confiabilidade de redes VLC.

O restante deste artigo deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 descreve os trabalhos relacionados. A Seção 3 apresenta o protocolo NOAH. A Seção 4 apresenta a metodologia utilizada e descreve o cenário de simulação. A Seção 5 discute os resultados obtidos através da simulação avaliando o desempenho do NOAH e do ARQ. Finalmente a Seção 6 conclui o artigo e aponta os trabalhos futuros.

2. Trabalhos relacionados

A codificação de rede tem sido amplamente investigada como um mecanismo eficaz para aumentar a confiabilidade e a eficiência espectral em sistemas de comunicação sujeitos a elevadas taxas de erro. No contexto da Comunicação por Luz Visível, essa abordagem torna-se particularmente relevante em razão das limitações impostas pelo meio óptico, como a sensibilidade à interferência luminosa, às variações geométricas do enlace e às restrições físicas dos dispositivos emissores e receptores. Embora o protocolo NOAH seja concebido e implementado na camada de enlace, a literatura demonstra que há uma interdependência significativa entre as soluções propostas nas camadas física e de enlace, especialmente quando se empregam técnicas de codificação de rede. Dessa forma, esta seção apresenta uma análise detalhada dos principais trabalhos relacionados em ambas as camadas, evidenciando suas contribuições, limitações e diferenças em relação à proposta apresentada neste artigo.

2.1. Camada Física

Os trabalhos relacionados à camada física concentram-se majoritariamente na aplicação da codificação de rede diretamente no domínio do sinal óptico, com destaque para a abordagem conhecida como *Phase-aligned Physical-layer Network Coding*

aplicada a sistemas de VLC (PNC-VLC). Essa linha de pesquisa explora a superposição natural dos sinais luminosos no meio físico como um recurso para realizar operações de codificação antes mesmo da interpretação dos dados em níveis superiores da pilha de protocolos.

No trabalho apresentado em [Guan et al. 2019], os autores propõem uma implementação de PNC-VLC voltada para comunicações bidirecionais assistidas por retransmissão. O sistema é estruturado em um cenário composto por três nós, dois terminais finais e um nó intermediário responsável pela retransmissão. A principal contribuição reside na redução do número de *slots* temporais necessários para a troca completa de informações entre os nós, uma vez que transmissões simultâneas são exploradas de forma coordenada. Para viabilizar essa operação, o estudo propõe um *framework* que integra aspectos da camada física com mecanismos do controle de acesso ao meio (MAC), evidenciando a necessidade de sincronização precisa entre os transmissores e de alinhamento de fase dos sinais ópticos para que a codificação no nível físico seja corretamente realizada.

De forma complementar, o trabalho [Tahenni and Merazka 2024] incorpora técnicas de multiplexação por divisão ortogonal de frequência (OFDM) ao PNC-VLC. A utilização de OFDM permite uma maior robustez frente a distorções do canal e facilita a separação e recomposição dos sinais no receptor. Os autores também desenvolvem um ambiente de simulação específico para validar o desempenho da proposta, mantendo uma arquitetura semelhante à de [Guan et al. 2019], com três nós e comunicação bidirecional. Os resultados indicam ganhos de eficiência espectral e redução de retransmissões, porém reforçam a dependência de sincronização rigorosa e de maior complexidade computacional e de hardware.

Avançando nessa linha, os autores [Xiong et al. 2023] propõe a utilização de LEDs RGB como transmissores em sistemas PNC-VLC. O objetivo central é mitigar a degradação da taxa de erro de bits causada pela saturação do fotodiodo, frequentemente provocada pela presença de luz ambiente intensa. Nesse sistema, dois transmissores utilizam LEDs da mesma cor para enviar fluxos distintos de dados simultaneamente, explorando a superposição óptica como mecanismo natural de codificação. No receptor, fotodiodos equipados com filtros espectrais específicos permitem a separação dos sinais, sendo aplicada posteriormente uma operação de ou exclusivo (XOR) para a recuperação dos dados originais. Embora os resultados indiquem melhorias na taxa de erro em determinados cenários, a solução depende de componentes ópticos especializados, como filtros espectrais e fotodetectores mais sofisticados, o que eleva o custo e a complexidade do sistema.

Apesar das contribuições relevantes desses trabalhos, as soluções baseadas em codificação na camada física apresentam desafios significativos, incluindo a necessidade de alinhamento preciso de fase, sincronização temporal rigorosa entre os nós e a utilização de hardware óptico especializado. Em contraste, o protocolo NOAH adota uma abordagem mais simples e objetiva, deslocando toda a lógica de codificação para a camada de enlace. Essa decisão elimina a dependência de filtros ópticos, fotodiodos avançados ou mecanismos complexos de sincronização no domínio físico, tornando a solução mais viável para cenários práticos e de menor custo. Além disso, ao atuar acima da camada física, o NOAH mantém a independência do meio óptico subjacente, preservando a robustez da comunicação mesmo diante das variações e imperfeições inerentes ao canal VLC.

2.2. Camada de Enlace

No que se refere à camada de enlace, a literatura apresenta propostas que exploram a codificação de rede como alternativa ou complemento aos mecanismos tradicionais de retransmissão automática (ARQ). Um dos trabalhos mais relevantes nesse contexto é apresentado em [Vieira et al. 2018], no qual os autores propõem um protocolo de enlace para VLC que substitui o modelo clássico de retransmissões reativas por uma estratégia proativa baseada na transmissão contínua de pacotes codificados.

Implementado sobre a plataforma OpenVLC, o protocolo descrito em [Vieira et al. 2018] realiza a combinação de pacotes em trânsito e utiliza confirmações de recebimento agregadas por meio de *piggybacking*, reduzindo a necessidade de pacotes de controle dedicados. Os resultados demonstram uma redução significativa na latência associada aos atrasos de confirmação em cenários sem perdas, bem como melhorias no desempenho em ambientes caracterizados por múltiplas perdas de pacotes. Além disso, a abordagem mostrou ganhos no *goodput*, evidenciando que a codificação de rede na camada de enlace pode aumentar a eficiência da entrega de dados em sistemas VLC altamente sujeitos a erros. Entretanto, essa proposta parte do pressuposto de que o canal apresenta perdas frequentes, aplicando codificação de forma sistemática a toda a comunicação, independentemente da ocorrência efetiva de erros. Essa estratégia, embora eficaz em termos de latência e vazão em determinados cenários, implica um aumento no volume de pacotes transmitidos. Isso pode resultar em maior consumo de largura de banda e processamento desnecessário quando as condições do canal são favoráveis.

Em contrapartida, o protocolo NOAH adota uma abordagem mais seletiva e adaptativa. Baseado em ARQ, o NOAH realiza a codificação de rede apenas quando necessário, isto é, quando há indícios concretos de perda de pacotes. Dessa forma, os pacotes de recuperação são transmitidos somente sob demanda, reduzindo o tráfego adicional na rede e preservando a eficiência espectral. Além disso, enquanto trabalhos anteriores concentram-se principalmente na redução da latência, o NOAH tem como objetivo central a diminuição da taxa de perda de pacotes, priorizando a confiabilidade da comunicação. Essa escolha de projeto torna o protocolo particularmente adequado para aplicações em VLC nas quais a integridade dos dados é um requisito fundamental, mesmo que isso implique um pequeno aumento no atraso em comparação com soluções agressivamente proativas.

3. NOAH - Um Protocolo de Codificação de Rede para VLC

Essa seção descreve o NOAH, um protocolo de codificação de rede baseado em ARQ. Ele foi projetado para aumentar a resiliência dos sistemas VLC. Para isto, o NOAH realiza uma codificação XOR, bit-a-bit, entre mensagens de rede, sendo uma abordagem simples, porém suficiente para atingir a capacidade máxima de uma rede [da Cruz Carvalho et al. 2022]. Esta codificação tem como o maior ganho o envio de 2 pacotes em 1, fazendo com que, se o dispositivo possui o pacote codificado e qualquer um dos pacotes que o compõe, ele será capaz de recuperar o outro fazendo a operação de XOR, bit-a-bit, novamente. Ou seja, dos 3 pacotes possíveis, ele precisa somente de 2 para que a mensagem seja recebida corretamente.

A operação base do protocolo é feita com base no cabeçalho do pacote, que está exemplificado na Tabela 1, onde foi adicionado um campo extra de codificação que indica

Tabela 1. Cabeçalho de pacotes gerados pelo NOAH.

Campo	SFD	Tam.	Dest.	Origem	Protocolo	Codificação
Tam. (B)	1	2	2	2	2	2

se o pacote foi codificado e quais pacotes foram utilizados para esta operação. Expandindo este novo campo, a Tabela 2 exemplifica como estes dois Bytes adicionais foram divididos. O primeiro representando o identificador do pacote um (ID Pacote1) e o segundo o identificador do pacote dois (ID Pacote2), visto que sempre serão utilizados dois pacotes para a codificação. Em caso de pacote codificado o uso será normal e cada campo terá o identificador dos pacotes utilizados, ou seja, o ID Pacote1 terá o identificador de um dos pacotes utilizados para a codificação e o ID Pacote 2 terá o identificador do outro. Já no caso de um pacote não codificado, somente o campo ID Pacote1 é utilizado e ao ID Pacote 2 será atribuído o valor zero, dando assim ao segundo campo um papel de verificação da codificação em si e identificação do pacote utilizado.

Tabela 2. Campo de codificação do cabeçalho do NOAH.

Codificação	
ID Pacote1 (1 Byte)	ID Pacote2 (1 Byte)

Como citado anteriormente, o NOAH foi implementado na camada de enlace, ligada diretamente com a subcamada MAC, assim como [Guan et al. 2019]. Podemos descrever seu fluxo normal de transmissão como mostra o cenário um, ilustrado na Figura 1a. Este fluxo se dá no envio alternado de pacotes não codificados e codificados a fim de deixar o receptor preparado para recuperar algum pacote perdido, se houver a necessidade.

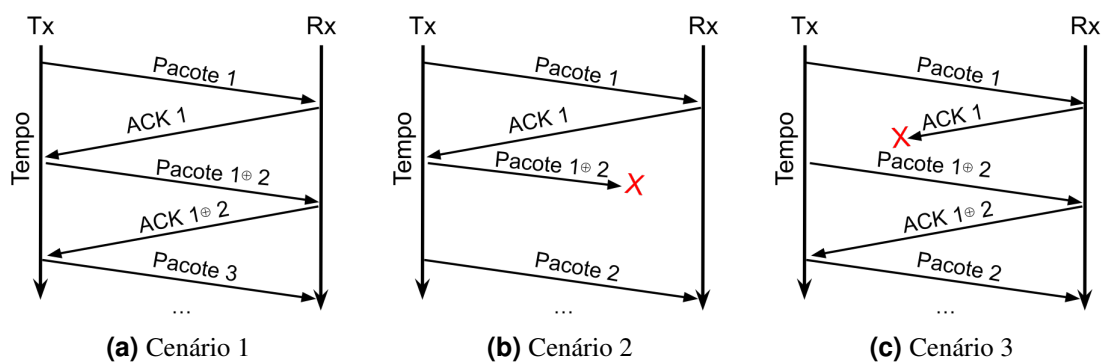


Figura 1. Cenários de funcionamento do NOAH.

Diferente do cenário comum(sem perdas) o NOAH tem seu funcionamento diferente quando se trata da codificação e transmissão nos casos de perda de pacotes. Neste cenário, duas situações atípicas podem ser observadas. A primeira situação, ilustrada pela Figura 1b, representa a perda de pacotes codificados, como por exemplo, caso o pacote codificado (1 ⊕ 2) seja perdido, o algoritmo transmite o pacote 2 logo em seguida, mudando seu fluxo original que seria transmitir o pacote 3. Desta forma o NOAH possui a

capacidade de se adaptar, dando mais uma chance de recuperar o pacote perdido mudando qual pacote será enviado logo após a perda.

Já na segunda situação de perda, representada pela Figura 1c, o NOAH não trata a perda imediatamente, devido a natureza do protocolo, um outro pacote sera enviado posteriormente que funcionará como um pacote de recuperação. No exemplo ilustrado, o pacote codificado (pacote $1 \oplus 2$) que contém os pacotes 1 e 2 é enviado após a perda do pacote não codificado (pacote 1), desta forma quando o pacote 2 for recebido NOAH será capaz de recuperar o pacote perdido (pacote 1), através da operação XOR entre o pacote $1 \oplus 2$ e o pacote 2.

Este funcionamento do protocolo proposto só é possível visto que são feitas cópias de todos os pacotes não codificados antes de serem enviados. Desta forma, conforme os cenários descritos na Figura 1 e o Algoritmo 1 exemplificam, a codificação do NOAH ocorre em três partes principais: cópia do pacote enviado, armazenamento de uma cópia do pacote atual e combinação da cópia com o pacote seguinte no próximo envio, dando assim a possibilidade de adaptação dinâmica da lógica do protocolo durante seu funcionamento. Estes três funcionamentos distintos do protocolo se dão por uma variável de controle que é alterada de acordo com a natureza do pacote. Esta variável pode assumir os seguinte estados: 0 quando o pacote é não-codificado, 1 quando o pacote em questão é codificado e 2 quando o anterior foi codificado e perdido, mostrando exatamente os cenários da Figura 1.

Algorithm 1 Transmissão

```
1: if codificado == 0 then
2:   ultimoCodificado  $\leftarrow$  NÃO
3:   numeroDoPacote  $\leftarrow$  numeroDoPacote + (1 se  $\neg$  ultimoPacoteFoiPerdido)
4:   ultimoPacoteFoiPerdido  $\leftarrow$  NÃO
5:   pacoteAnterior  $\leftarrow$  pacoteAtual
6:   gerarQuadroDeDados(pacoteAtual)
7:   codificado  $\leftarrow$  1
8: else if codificado == 1 then
9:   ultimoPacoteFoiCodificado  $\leftarrow$  SIM
10:  pacoteParaRetransmissao  $\leftarrow$  pacoteAtual
11:  numeroDoPacote  $\leftarrow$  numeroDoPacote + 1
12:  pacoteAtual  $\leftarrow$  pacoteAtual  $\oplus$  pacoteAnterior
13:  gerarQuadroDeDados(pacoteAtual)
14:  codificado  $\leftarrow$  (2 se ultimoPacoteFoiPerdido senão 0)
15: else
16:   ultimoPacoteFoiCodificado  $\leftarrow$  NÃO
17:   pacoteAnterior  $\leftarrow$  pacoteParaRetransmissao
18:   gerarQuadroDeDados(pacoteParaRetransmissao)
19:   codificado  $\leftarrow$  0;
   ultimoPacoteFoiPerdido  $\leftarrow$  NÃO
20: end if
```

Se tratando da recepção e decodificação, como ilustrado no Algoritmo 2 temos que estas operações consistem basicamente no processo inverso da transmissão, no qual o

pacote será recebido, tratado, codificado ou armazenado e por fim enviado para a camada acima. O tratamento inicial dos pacotes se dá pela verificação do cabeçalho, especificamente no campo adicionado, como mostra a Tabela 1. Após a verificação 4 possíveis situações podem ser realizadas: (i) Pacote codificado que será usado imediatamente, (ii) Pacote codificado que ficará no *buffer*, (iii) Pacote não codificado que será usado imediatamente e (iv) Pacote não codificado que ficará no *buffer*.

Algorithm 2 Recepção

```

1: if pacoteCodificado(pacoteRecebido) then
2:   pacoteRelacionado  $\leftarrow$  buscarPacoteNaoCodificado(pacoteRecebido)
3:   if pacoteRelacionado existe then
4:     pacoteRecebido.dados  $\leftarrow$  pacoteRecebido  $\oplus$  pacoteRelacionado
5:   else
6:     adicionarPacoteAoBuffer(pacoteRecebido, “codificado”)
7:   end if
8: else
9:   pacoteRelacionado  $\leftarrow$  buscarPacoteCodificado(pacoteRecebido)
10:  if pacoteRelacionado existe then
11:    pacoteRecebido.dados  $\leftarrow$  pacoteRecebido  $\oplus$  pacoteRelacionado
12:  else
13:    adicionarPacoteAoBuffer(pacoteRecebido, “nao_codificado”)
14:  end if
15: end if

```

- (i) **Pacote codificado que será usado imediatamente:** Quando um pacote codificado for recebido, o algoritmo irá avaliar o *buffer* de espera se há a possibilidade de decodificar o pacote atual com algum armazenado, se a verificação for positiva, o pacote é decodificado, enviado para a camada acima e o pacote usado para a decodificação será excluído do *buffer*, visto que se trata de uma cópia de um outro pacote que já foi processado corretamente.
- (ii) **Pacote codificado que ficará no *buffer*:** Por fim, se um pacote codificado for recebido e não houver nenhum pacote armazenado no *buffer* de espera capaz de decodificá-lo, ele será armazenado em um *buffer* de espera de decodificação até poder ser decodificado.
- (iii) **Pacote não codificado que será usado imediatamente:** Nesta situação, no momento em que o pacote for recebido o algoritmo irá verificar se há algum pacote já codificado que pode ser decodificado com este pacote que chegou. No momento que for verificado, se a decodificação for feita, ambos os pacotes serão enviados para a camada de cima na ordem correta.
- (iv) **Pacote não codificado que ficará no *buffer*:** No caso de não haver pacotes codificados esperando ou o pacote não codificado que acabou de chegar não servir para decodificar nenhum pacote em espera no *buffer*, ele será enviado para a próxima camada e uma cópia dele será salva em um segundo *buffer* para próximas decodificações

Todos os *buffers* citados acima possuem um tempo de vida útil de 5 pacotes recebidos, tendo a possibilidade de aumentar esta vida útil com base na quantidade de nós, memória disponível, etc. Após a recepção de 4 pacotes posteriores ao mais antigo armazenado em qualquer *buffer* ele irá ser sobrescrito com o pacote seguinte, limitando assim o uso de memória.

4. Metodologia

A metodologia de avaliação tem como objetivo investigar o impacto do mecanismo de retransmissão ARQ (Stop-and-wait) e do protocolo proposto NOAH no desempenho de uma rede de comunicação por luz visível (VLC), por meio da análise da perda de pacotes em função da distância entre os nós. Baseado no modelo de [Aldalbahi et al. 2016], foi desenvolvido e implementado um mecanismo de retransmissão baseado em ARQ, visto que a modelagem inicial não possuía retransmissão de qualquer tipo e utilizava do *Best-Effort* para a transmissão.

O cenário de simulação foi desenvolvido utilizando o simulador de redes ns-3, também com base no modelo proposto por [Aldalbahi et al. 2016], o qual estende a versão 3.25 do ns-3 para permitir a simulação de enlaces VLC. Esse modelo foi adotado como referência tanto para a modelagem do canal quanto para a avaliação de desempenho da comunicação. Nas simulações, considerou-se o envio total de 204.800 bytes, distribuídos em 100 pacotes de 2048 bytes cada. Além disso, cada configuração de simulação foi repetida 10 vezes, a fim de permitir uma análise estatística mais consistente dos resultados. Este cenário simulado consiste em uma comunicação ponto a ponto entre dois nós alinhados, que representam um transmissor e um receptor VLC. A distância entre os nós variou de 0 a 18 metros, permitindo a análise do impacto do afastamento físico no desempenho da comunicação óptica. Além disso, foi avaliado o número de tentativas de retransmissão de um pacote no mecanismo ARQ proposto, uma vez que esse parâmetro impacta diretamente a taxa de erro e a confiabilidade da transmissão.

Tratando-se da avaliação do desempenho do ARQ e do NOAH, considerou-se o *Packet Error Rate* (PER), utilizado para avaliar a confiabilidade da transmissão. No modelo original apresentado em [Aldalbahi et al. 2016], a PER é obtida a partir da taxa de erro de símbolos (*Symbol Error Rate* – SER), levando em conta a quantidade de símbolos que compõem cada pacote transmitido. O cálculo da PER no modelo original é dado por

$$PER = 1 - (1 - SER)^{N_s}, \quad (1)$$

onde N_s representa o número de símbolos por pacote, definido por

$$N_s = \frac{8 \cdot L}{\log_2(M)}, \quad (2)$$

sendo L o tamanho do pacote em bytes e M a ordem da modulação.

Entretanto, devido ao elevado valor de N_s , pequenas variações na SER resultam em um crescimento exponencial da PER, o que ocasiona um comportamento extremo em que a probabilidade de perda de pacotes muda rapidamente de valores próximos a 0% para valores próximos a 100%, evidenciando, assim, um modelo teórico distante da realidade. Com o objetivo de obter uma representação mais coerente com cenários reais de comunicação VLC, o modelo de erro foi adaptado neste trabalho com base em testes empíricos, que mostraram uma melhor estabilidade e um comportamento mais próximo da realidade, levando em conta as limitações existentes. A modificação consiste em associar diretamente a probabilidade de erro do pacote à taxa de erro do símbolo, de forma que a PER passe a ser definida como

$$PER = SER. \quad (3)$$

Essa adaptação elimina o crescimento exponencial da PER em função do número de símbolos por pacote, resultando em um comportamento mais estável e realista da taxa de erro, o que permite uma análise mais consistente do impacto da distância, dos mecanismos de retransmissão e do algoritmo proposto no desempenho da rede VLC.

Os principais parâmetros utilizados nas simulações estão apresentados na tabela 3, que representa os valores utilizados para a configuração do canal, das características ópticas dos dispositivos simulados, da recepção dos pacotes (características do receptor), do ruído e da comunicação em si.

Tabela 3. Parâmetros de simulação.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Semiângulo Lambertiano	$\Phi_{1/2}$	70°
Área do Fotodetector	A	$1.3 \times 10^{-5} \text{ m}^2$
Índice de Refração	n	1.5
Campo de Visão	ψ_{con}	57°
Ganho do Filtro Óptico	T_s	1
Comprimento de Onda Inferior	λ_{min}	380 nm
Comprimento de Onda Superior	λ_{max}	780 nm
Capacitância do Fotodetector	C_{pd}	112 pF/cm ²
Transcondutância do FET	g_m	30 mS
Ganho de Tensão em Malha Aberta	G_{ol}	10
Fator de Ruído do FET	Γ	1.5
Fator de Largura de Banda do Ruído	I_2	0.562
Coefficiente de Ruído	I_3	0.0868
Carga Elementar	q	$1.60217 \times 10^{-19} \text{ C}$
Constante de Boltzmann	k	$1.3806 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
Corrente de Fundo	I_B	$5 \times 10^{-6} \text{ A}$
Largura de Banda Elétrica	B	$3 \times 10^5 \text{ b/s}$
Ordem da Modulação PAM	M	2

As modificações realizadas concentram-se no tratamento dos erros de pacotes e na inclusão de mecanismos de retransmissão, permitindo avaliar o impacto dessas alterações no desempenho da rede. Dessa forma, além do modelo base, foi considerada uma abordagem alternativa de modelagem de erro, proposta neste trabalho, possibilitando a comparação direta entre os dois métodos e permitindo a implementação de um protocolo baseado em retransmissões, assim como o NOAH.

Como forma de validação, os resultados obtidos pelo protocolo e pelo modelo proposto foram comparados ao comportamento do modelo original proposto por [Aldalbahi et al. 2016], utilizando parâmetros próprios para o ambiente. Foram realizadas comparações entre o modelo original de erro, o modelo original com a adição de um ARQ *Stop-and-Wait* e o protocolo proposto neste trabalho. Dessa forma, foi possível avaliar de forma isolada o impacto do modelo de erro, da retransmissão e das modificações introduzidas pelo NOAH permitindo uma análise comparativa do desempenho da rede VLC em função da distância entre os nós.

5. Resultados e Discussão

Os resultados deste trabalho abrangem a avaliação do modelo de simulação proposto e da taxa de pacotes aceitos. O modelo em si foi avaliado em comparação ao modelo de simulação original utilizado pelos criadores do módulo do VLC para o ns-3 nos quesitos de usabilidade e adaptabilidade quando comparado a cenários reais. Já a taxa de aceite de pacotes foi avaliada sob a variação da distância, abrangendo uma análise de 0 a 18 m, para a qual, para cada distância, foram

feitas 10 simulações, com o objetivo de se extrair a média e realizar a avaliação do desempenho do protocolo utilizando um intervalo de confiança de 95%.

5.1. Novo modelo proposto

Comparando os modelos, como mostra a Figura 2, vemos uma mudança expressiva no comportamento relacionada ao aproveitamento dos pacotes, visto que, com os parâmetros utilizados, o modelo original só era capaz de transmitir até 1 m de distância, evidenciando o comportamento simplista do modelo, como citado anteriormente na Seção 4. Além disso, devido ao seu comportamento mais realista, temos mais possibilidades de implementar diversos protocolos, graças à sua variação, à taxa de perda com variação menos abrupta, entre outros fatores.

Vale ressaltar que os valores apresentados em ambos modelos mudam de acordo com os parâmetros de simulação, neste caso, a comparação foi feita baseada nos parâmetros mostrados na tabela 3 da seção 4.

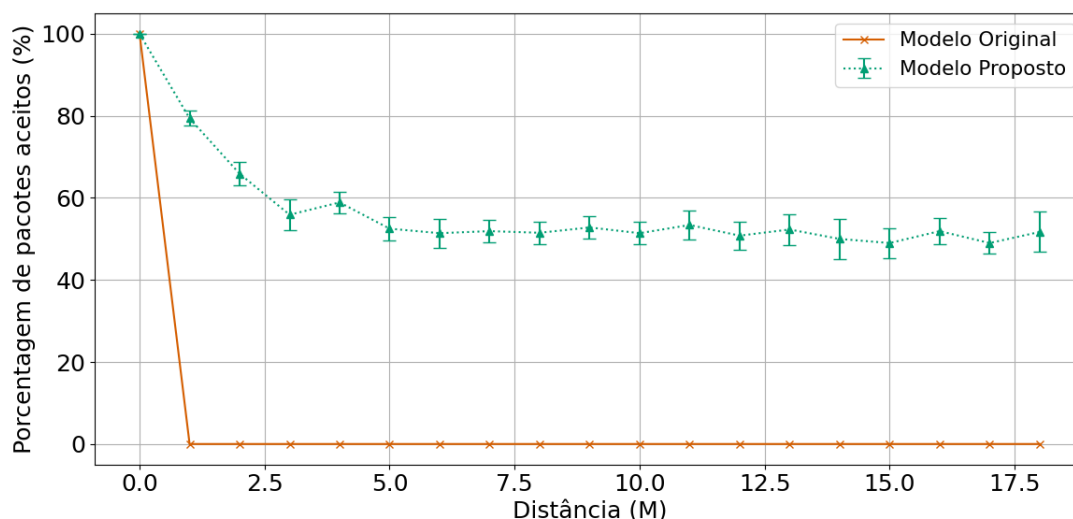


Figura 2. Modelo Original de [Aldalbahi et al. 2016] X Modelo proposto.

5.2. Taxa de perdas avaliando *Best-Effort* X ARQ X NOAH

Para a avaliação dos resultados, foram considerados 3 cenários, variando a quantidade de tentativas de retransmissão, fator extremamente relevante para o aumento da taxa de pacotes recebidos com sucesso. Foram avaliados os cenários com 2, 3 e 4 tentativas de retransmissão, valores comumente utilizados, como, por exemplo, nos OpenVLC 1.0/1.1 [Wang et al. 2015], entre outras plataformas de comunicação por luz visível. O uso de 2 tentativas de retransmissão se mostra mais comum em cenários gerais, porém, para fins de extrapolar os resultados, foram avaliados outros cenários. Como mostra a Figura 3, que representa o cenário mais comum, o de 2 tentativas de retransmissão, vemos que o ARQ desenvolvido se mostra melhor até cerca de 7 m, tendo ganhos de até 13%, onde os intervalos de confiança não se sobrepõem. Após esta distância, vemos uma sobreposição dos intervalos, mostrando que não se pode concluir uma melhora do ARQ em relação ao *Best-Effort*, comportamento que pode ser atribuído ao modelo proposto em si. Por outro lado, o NOAH se destaca fortemente até mesmo neste cenário de apenas 2 retransmissões mostrando valores cerca de 23% melhores que o ARQ, sendo o seu melhor desempenho quando se comparado as outras retransmissões, mostrando os ganhos reais do protocolo em cima do mecanismo ARQ comumente utilizado em diversas aplicações.

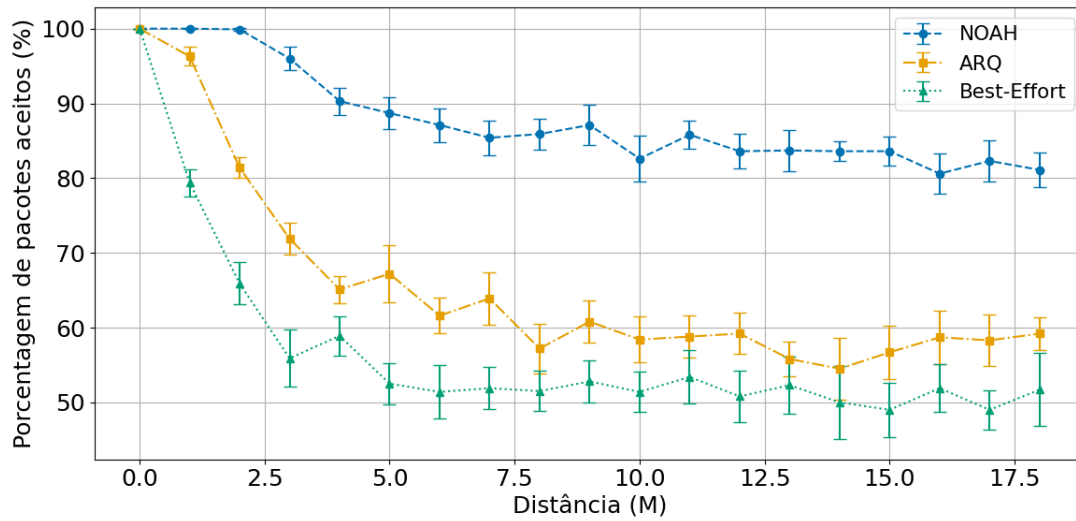


Figura 3. Taxa de pacotes aceitos com 2 tentativas de retransmissão.

Se tratando de 3 tentativas de retransmissão, a Figura 4 mostra uma melhora significativa no ARQ em relação aos testes anteriores, que agora mostra cerca de 19% de ganho em comparação ao *Best-Effort* utilizado no modelo original. Podemos notar também que o NOAH mantém o seu desempenho proporcional comparação ao ARQ, que neste cenário alcançou 19% de ganho, evidenciando como o protocolo se mantém melhor, desta forma vemos que a medida que as retransmissões vão aumentando o protocolo se mantém superior diminuindo a taxa de perda geral.

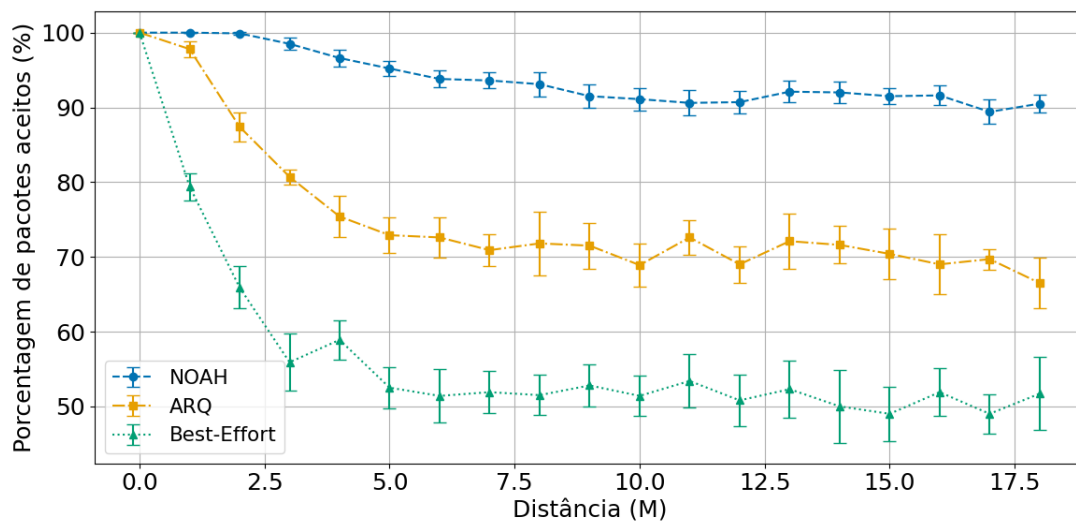


Figura 4. Taxa de pacotes aceitos com 3 tentativas de retransmissão.

Como esperado, com 4 tentativas de retransmissão, conforme Figura 5, tem-se uma melhora expressiva quando se comparam o ARQ e o *Best Effort*, chegando a cerca de 27%. No NOAH, temos um comportamento em cenários com quase nenhuma perda, tendo um ganho de cerca de 16% em comparação ao ARQ. Além disso, à medida que o número de retransmissões aumenta, o desempenho do protocolo é melhor, mitigando a taxa de perda de pacotes. Para cada tentativa extra de retransmissão estes valores se mostram mais expressivos, ou seja, quanto maior o número de retransmissões melhor o desempenho do protocolo.

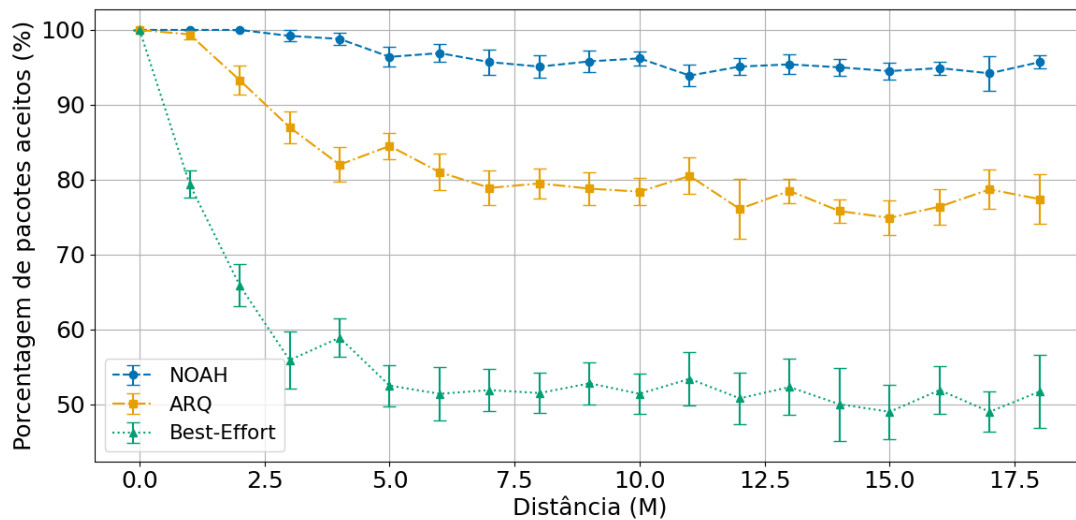


Figura 5. Taxa de pacotes aceitos com 4 tentativas de retransmissão.

6. Conclusão e trabalhos futuros

Neste artigo, foi apresentado o NOAH, um protocolo de codificação de rede baseado em XOR, utilizando um mecanismo de ARQ implementado no ns-3, com o objetivo de reduzir a taxa de perda de pacotes em cenários mais propensos a falhas na comunicação por luz visível. Além de um modelo novo de simulação que visa alcançar cenários de simulação mais realistas e propensos a novos tipos de protocolos baseados em retransmissão e outros aspectos. Os resultados indicam que o NOAH é capaz de reduzir significativamente a perda de pacotes. Em suma, foi capaz de obter uma melhora de cerca de 23% em cenários com 2 tentativas de retransmissão e taxas de 19% e 16% de melhora para 3 e 4 tentativas de retransmissão. Esses resultados demonstram que a aplicação do NOAH em sistemas VLC é promissora, incentivando a continuidade de pesquisas e de melhorias na área. Para além disso, vale o destaque para o mecanismo ARQ *Stop-and-Wait*, que obteve ganhos significativos em relação ao *Best-Effort* originalmente usado, alcançando melhorias de até 27% na taxa de perda de pacotes. Como trabalhos futuros, pretende-se aprimorar o modelo de erro para alcançar cenários cada vez mais realistas e avaliar possíveis impactos do NOAH em outros aspectos da rede, como latência e *throughput*. Ademais, espera-se aprimorar o NOAH para cenários dinâmicos, nos quais o protocolo funcione em redes com roteamento.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Fapemig (Projeto #APQ-02062-21) e CNPq também apoiaram a execução deste trabalho.

Referências

- Aldalbahi, A., Rahaim, M., Khreishah, A., Ayyash, M., Ackerman, R., Basuino, J., Berreta, W., and Little, T. D. (2016). Extending ns3 to simulate visible light communication at network-level. In *2016 23rd International Conference on Telecommunications (ICT)*, pages 1–6. IEEE.
- da Cruz Carvalho, M., Vieira, L. F., and Vieira, M. A. (2022). Codificação em rede (network coding) em redes de salto de canal sincronizado com o tempo (tsch). In *Anais do XL Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 294–307. SBC.

- Ericsson (2024). Ericsson mobility report: November 2024. <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- Guan, X., Yang, Q., Wang, T., and Chan, C. C.-K. (2019). Phase-aligned physical-layer network coding in visible light communications. *IEEE Photonics Journal*, 11(2):1–9.
- Gupta, S., Roy, D., Bose, S., Dixit, V., and Kumar, A. (2024). Illuminating the future: A comprehensive review of visible light communication applications. *Optics & Laser Technology*, 177:111182.
- Hasan, O. and Tahar, S. (2008). Performance analysis of arq protocols using a theorem prover. In *ISPASS 2008 - IEEE Int. Symp. on Performance Analysis of Systems and software*.
- Krogfoss, B., Hanson, G., and Vale, R. (2011). Impact of consumer traffic growth on mobile and fixed networks: Business model and network quality impact. *Bell Labs Technical Journal*, 16(1):105–120.
- Matheus, L., Pires, L., Vieira, A., Vieira, L. F. M., Vieira, M. A. M., and Nacif, J. A. (2019a). The internet of light: Impact of colors in led-to-led visible light communication systems. *Internet Technology Letters*, 2(1):e78.
- Matheus, L. E. M., Vieira, A. B., Vieira, L. F., Vieira, M. A., and Gnawali, O. (2019b). Visible light communication: Concepts, applications and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(4):3204–3237.
- Sena, S. P., Vieira, L. F., Vieira, M. A., Vieira, A. B., Silva, E. F., and Nacif, J. A. M. (2023). Um protocolo multicast para comunicação por luz visível (vlc). In *Anais do XLI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 560–573. SBC.
- Tahenni, A. and Merazka, F. (2024). Illuminating networks: Enhancing visible light communication with physical-layer network coding (pnc-vlc scheme). In *2024 8th International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*, pages 1–6.
- Vieira, A. G., Vieira, L. F., Veira, M. A., and Vieira, A. B. (2018). Comunicação por luz visível: redução da latência via combinação de pacotes. In *Simpósio Brasileiro de Engenharia de Sistemas Computacionais (SBESC)*. SBC.
- Vieira, A. G., Vieira, L. F., Vieira, M. A. M., Vieira, A. B., and Nacif, J. A. M. (2025). Parc: Proactive protocol for wireless optical ad hoc networks. In *13th Wireless Days Conference*.
- Vijayakumari, K. and Anusudha, K. (2024). A comprehensive study on the advances and challenges in visible light communication technologies. In *2024 Third International Conference on Smart Technologies and Systems for Next Generation Computing (ICSTSN)*, pages 1–6.
- Wang, Q., Giustiniano, D., and Puccinelli, D. (2015). An open source research platform for embedded visible light networking. *IEEE Wireless Communications*, 22(2):94–100.
- Xiong, J., Zhang, R., Lu, L., Sun, Q. T., and Long, K. (2023). Physical-layer network coding enhanced visible light communications using rgb leds. *IEEE Photonics Journal*, 15(1):1–10.
- Zhou, Y., Xu, Z., Lin, X., Lu, Z., Luo, Z., Zhou, Y., and Chi, N. (2024). State-of-the-art for high-speed visible light laser communication. In *AOPC 2024: Optical Sensing, Imaging Technology, and Applications*, volume 13496, pages 476–480. SPIE.