



ENLACE ÓPTICO SEM FIO

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA – CCN**  
**DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO**

**REDES DE COMUNICAÇÃO SEM FIO**

**ALUNOS(AS):**

Paulo Eduardo Ramos de Araújo  
Daniel Lima de Sousa  
Guilherme Eduardo Almeida Martinelis  
Ítalo Borges dos Santos  
Mateus Henrique Ferreira de Sousa

**PROFESSOR(A):**

André Castelo Branco Soares

**Teresina – PI**  
**03-11-2024**



## ENLACE ÓPTICO SEM FIO

### INTRODUÇÃO

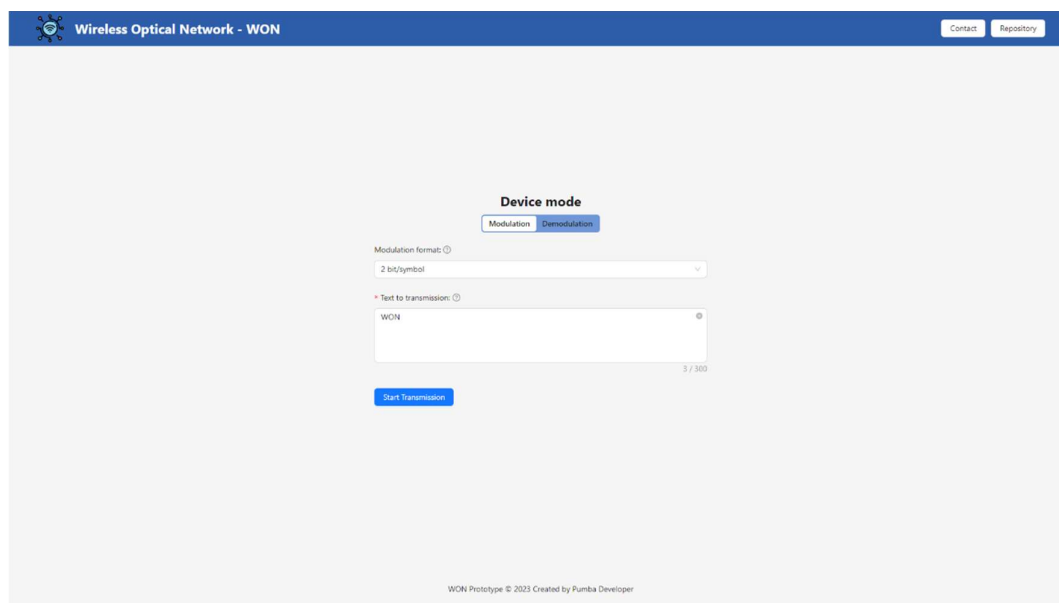
As redes WON (Wireless Optical Networks) representam uma solução avançada de comunicação que utiliza a luz como meio de transmissão de dados em espaços abertos, sem a necessidade de cabos ou fibras ópticas. Essa tecnologia permite a transferência de dados em altas velocidades e com baixa latência, utilizando espectros de luz visível, infravermelha ou ultravioleta. Redes WON são aplicadas em diversos contextos, desde a interligação de edifícios e suporte a redes de emergência, até situações em que a infraestrutura de cabos é inviável.

No entanto, os desafios enfrentados na implementação de enlaces ópticos sem fio são significativos. Fatores como condições atmosféricas adversas e a falta de alinhamento preciso entre os dispositivos podem atenuar ou interromper a transmissão da luz. Além disso, a presença de barreiras físicas e a dispersão da luz afetam a continuidade e a robustez do sinal.

O objetivo deste trabalho é projetar e implementar um enlace óptico sem fio em um ambiente controlado, explorando os desafios de modulação e demodulação de sinais por meio de tecnologias simples, como monitores e câmeras, para ilustrar as limitações e potenciais dessa abordagem em uma simulação prática de uma rede WON.

### ENLACE ÓPTICO SEM FIO

Para a implementação do protótipo de enlace óptico sem fio, foi desenvolvido uma aplicação web que realiza os processos de transmissão e recepção do sinal. O site está hospedado em: [wireless-optical-network-prototype.vercel.app](https://wireless-optical-network-prototype.vercel.app).



**Figura 1. Aplicação web simuladora de enlace sem fio óptico.**



## ENLACE ÓPTICO SEM FIO

A Figura 1 apresenta a página inicial da aplicação, que é carregada no modo de modulação. Nesse modo, a aplicação web recebe uma string de entrada por meio de um campo de texto e permite ao usuário selecionar o formato de modulação desejado (1, 2, 4, 16 ou 64 bits por símbolo). A string é convertida em uma representação binária e, juntamente com o formato de modulação escolhido, é utilizada para gerar uma imagem composta por quadrados coloridos que representam os bits: quadrados vermelhos para 0 e verdes para 1. Ao iniciar a transmissão, os símbolos — representações gráficas dos quadrados — são exibidos em sequência para que o dispositivo receptor possa capturá-los. Cada símbolo possui um tempo de vida na tela, sendo todos exibidos pelo mesmo período. Esse parâmetro deve ser ajustado de acordo com a velocidade de captura e processamento do receptor.

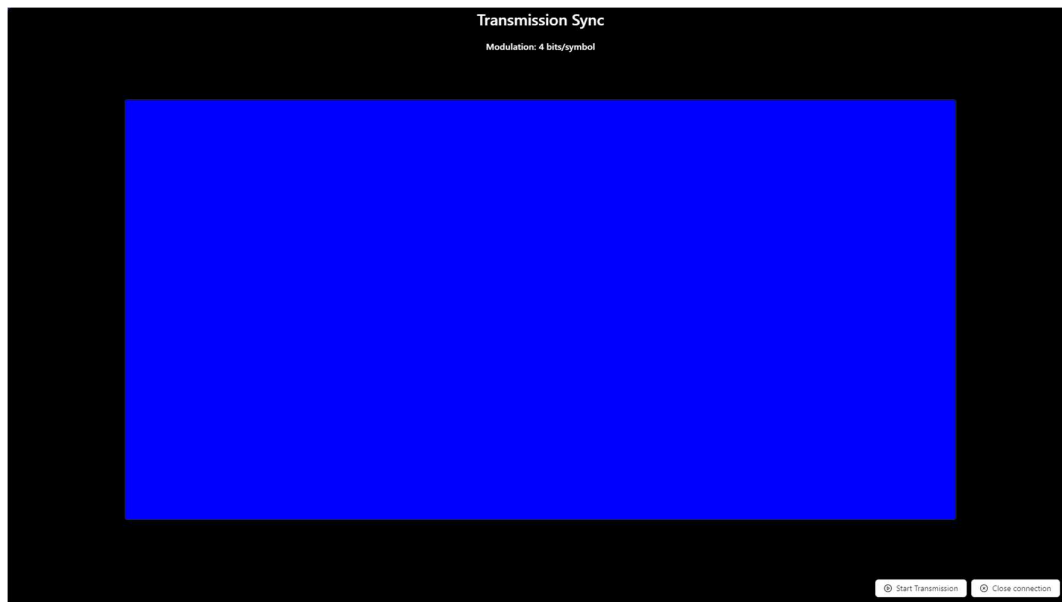


**Figura 2. Tela de transmissão de dados com símbolo de 4 bits.**

A Figura 2 ilustra um símbolo criado com a modulação de 4 bits, representando o código '0101'. A leitura e escrita do símbolo seguem o sistema RTL (*right-to-left*), similar ao modo de escrita de muitas línguas ocidentais. Nota-se que entre cada quadrado do símbolo há uma borda preta que funciona como banda de guarda, evitando a mistura de cores durante a captura pela webcam e facilitando a segmentação precisa dos bits na imagem. O tamanho dessa borda pode ser ajustado conforme a distância entre os dispositivos e o formato de modulação utilizado. Quanto maior a distância ou mais eficiente o formato de modulação, maior deve ser a banda de guarda para assegurar uma captura confiável e precisa.

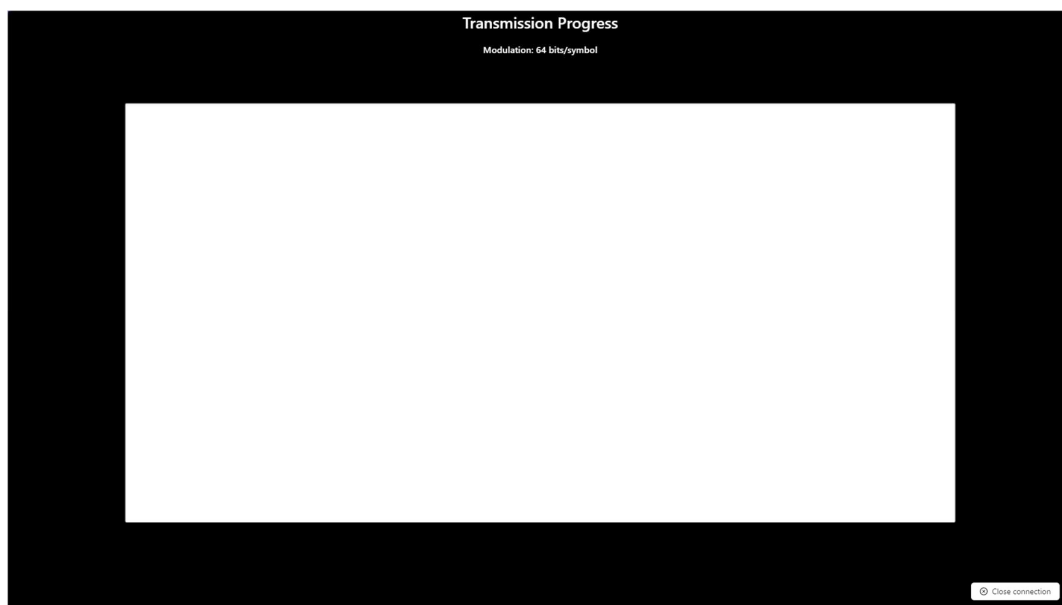


## ENLACE ÓPTICO SEM FIO



**Figura 3. Tela de transmissão de dados com símbolo de guarda.**

A Figura 3 mostra o formato do símbolo de guarda azul, que é utilizado para marcar o fim de um símbolo e o início de outro durante a transmissão. Esse mecanismo permite que o tempo de exibição dos símbolos na tela e o intervalo de captura de imagens pelo receptor não precisem estar perfeitamente sincronizados. O receptor apenas precisa garantir que as imagens sejam capturadas em um intervalo menor do que a duração de cada símbolo na tela. Assim, ao identificar um símbolo de guarda, o receptor sabe que deve armazenar o valor do próximo símbolo capturado, garantindo que cada símbolo seja lido apenas uma vez, sem a necessidade de sincronização rigorosa.



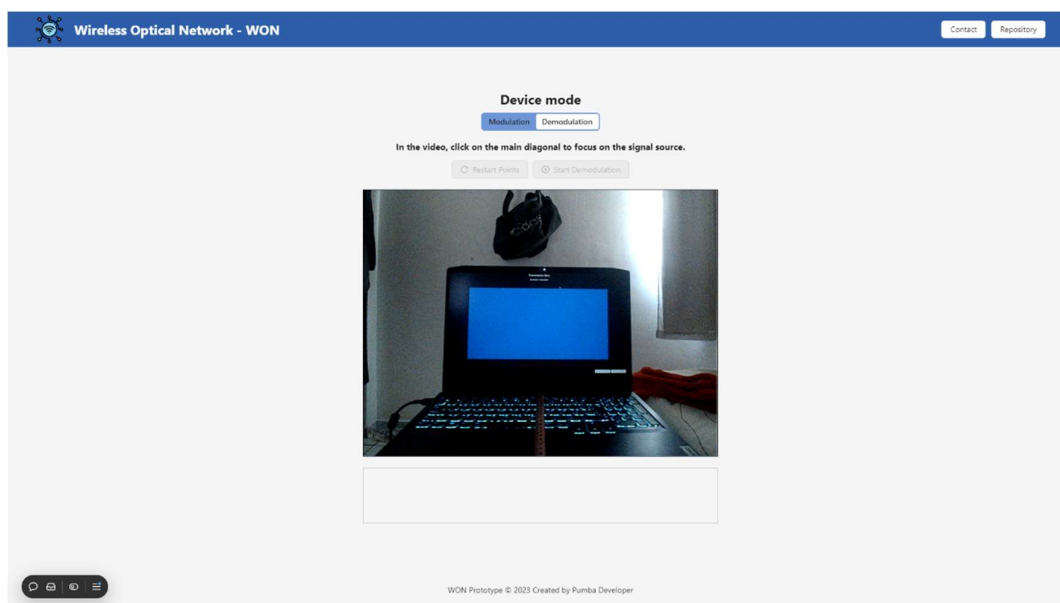
**Figura 4. Tela de transmissão de dados com símbolo de encerramento.**



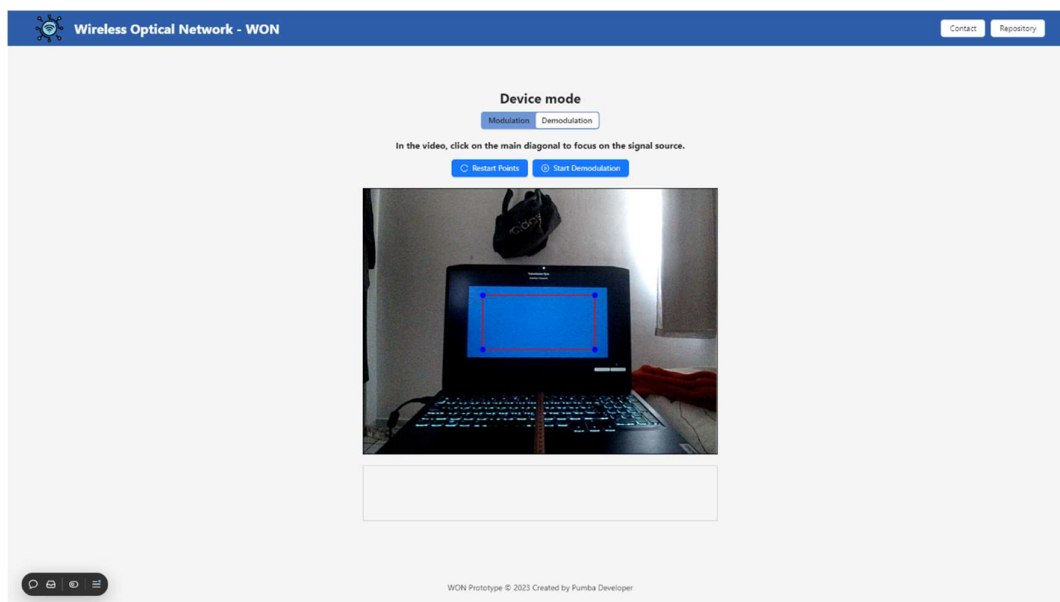
## ENLACE ÓPTICO SEM FIO

Por fim, a Figura 4 apresenta o formato do símbolo que representa o fim da transmissão. Após exibir todos os símbolos, o transmissor mostra o símbolo branco para sinalizar ao receptor que ele pode interromper a leitura do sinal.

No receptor, a aplicação deve estar configurada no modo de demodulação. Nesse modo, é solicitada a permissão para acessar a câmera, e, em seguida, a imagem é exibida na tela. Devido ao amplo campo de visão da câmera, é necessário que o receptor defina na aplicação qual área da imagem contém os símbolos. A Figura 5 ilustra a tela de demodulação.



**Figura 5. Tela de demodulação no modo de definição do foco de captura.**



**Figura 6. Tela de demodulação com o foco de captura demarcado.**



Assim que a aplicação identifica um símbolo portador, a leitura dos bits é iniciada. Primeiro, ela lê o pixel inicial e identifica sua cor; se for preto, indica uma borda de guarda, e a aplicação deve ler o próximo pixel até encontrar um que represente um bit (verde ou vermelho). Ao localizar um pixel vermelho ou verde, o algoritmo lê esse bit e avança pelos pixels até encontrar a próxima borda de guarda (pixel preto) ou o fim da imagem. Se encontrar a borda de guarda, o algoritmo segue o fluxo correspondente. Caso chegue ao fim da imagem, isso indica que a leitura do símbolo foi concluída. Devido ao modo de leitura do algoritmo, que percorre toda a imagem em busca das bordas de guarda, não é necessário definir o formato de modulação no receptor, uma vez que os bits são identificados ao encontrar uma borda de guarda.





## ENLACE ÓPTICO SEM FIO

A Figura 7 exibe a tela de demodulação após a transmissão da letra 'R', utilizando 1 bit por símbolo. O console do navegador está aberto para ilustrar o processo de decodificação dos dados, permitindo visualizar as últimas leituras antes da finalização da transmissão. Ao ler o símbolo de encerramento, o algoritmo converte os bits lidos em texto utilizando a tabela ASCII e exibe o resultado na caixa abaixo do vídeo da câmera.

### EFEITOS DA CAMADA FÍSICA

A camada física possui diversas limitações que podem impactar a eficiência da transmissão e a precisão da decodificação dos dados. Um dos principais problemas observados é a distância entre os equipamentos. À medida que a distância aumenta, as cores exibidas chegam ao receptor com mais interferências de luz externa. Além disso, a dispersão da luz mistura as cores próximas das bordas de guarda, e esse efeito se intensifica com o aumento da distância. Para mitigar esse problema, uma abordagem utilizada foi o aumento do tamanho das bordas de guarda, o que ajudou a reduzir a interferência nas leituras de símbolos próximos a essas bordas.

Outro fator relevante foi a variação da luminosidade no ambiente. Mudanças na iluminação afetavam diretamente os pixels capturados, causando um aumento nos valores de todos os canais de cor. Essa interferência é provocada pela luz externa que impacta a captação da imagem pela câmera. Para contornar esse desafio, é necessária a calibração do brilho do monitor em função da luz presente no ambiente; quanto maior a intensidade da luz externa, maior deverá ser o brilho do monitor. Essa calibração é fundamental para garantir que os símbolos sejam claramente visíveis e distinguíveis pela webcam. O inverso também é verdadeiro: em ambientes de baixa luminosidade, o monitor deve ter seu brilho reduzido.

Adicionalmente, a captura pelos sensores da câmera gera imperfeições, resultando em pixels ruidosos ou com valores estourados, o que compromete a interpretação correta dos dados. Em resposta a essa limitação, foi implementado um filtro de mediana, que se mostrou eficaz na remoção de ruídos, como o efeito "sal e pimenta". Esse filtro é capaz de eliminar valores extremos dos pixels, evitando que o algoritmo leia um pixel ruidoso e o interprete erroneamente como um bit transmitido.

Vale ressaltar que o formato de modulação escolhido deve levar em consideração esses efeitos, uma vez que formatos mais eficientes, ou seja, que transmitem mais bits por símbolo, atenuam esses efeitos da camada física, pois dividem a banda luminosa para a transmissão de diferentes bits, tornando a leitura mais complexa e suscetível a erros.

Essas limitações da camada física evidenciam a importância de um projeto cuidadoso e a necessidade de considerar fatores ambientais e de hardware para melhorar a eficácia do enlace óptico sem fio. A compreensão desses desafios é fundamental para o aprimoramento de futuros desenvolvimentos nesta área, visando uma comunicação mais robusta e confiável.



## RESULTADOS

Para testar os limites do enlace óptico criado, foram realizados diversos testes sob diferentes condições. Os parâmetros regulados durante esses testes incluíram o tempo de vida do símbolo, o tamanho da borda de guarda, o limiar para definir a cor de um pixel com base em seus canais de cores, a distância entre os equipamentos e o brilho do transmissor. Os experimentos foram conduzidos utilizando uma webcam de 1080p a 30 FPS como receptor e um monitor de 16 polegadas, também com resolução de 1080p, como transmissor. Foram testadas distâncias de 30 cm, 50 cm, 100 cm e 200 cm em todos os formatos de modulação.

Distância	Tamanho da Borda de Guarda
30 cm	20 px
50 cm	25 px
100 cm	30 px
200 cm	50 px

**Tabela 1. Tamanho da borda de guarda de acordo com a distância dos dispositivos.**

A Tabela 1 apresenta o tamanho da borda de guarda adotado para cada distância testada entre o transmissor e o receptor. Diversos valores foram testados, e aqueles que apresentaram os melhores resultados foram os utilizados.

Distância	Formatos de Modulação
30 cm	16 bit/s
50 cm	16 bit/s
100 cm	4 bit/s
200 cm	2 bit/s

**Tabela 2. Formato máximo de modulação de acordo com a distância dos dispositivos.**

Tempo de vida do símbolo	2000 ms
Limiar de cor	150
Cor do bit 0	#FF000
Cor do bit 1	#00FF00
Cor do símbolo de encerramento	#FFF
Cor do símbolo de guarda	#0000FF
Tamanho máscara filtro de mediana	5 pixels

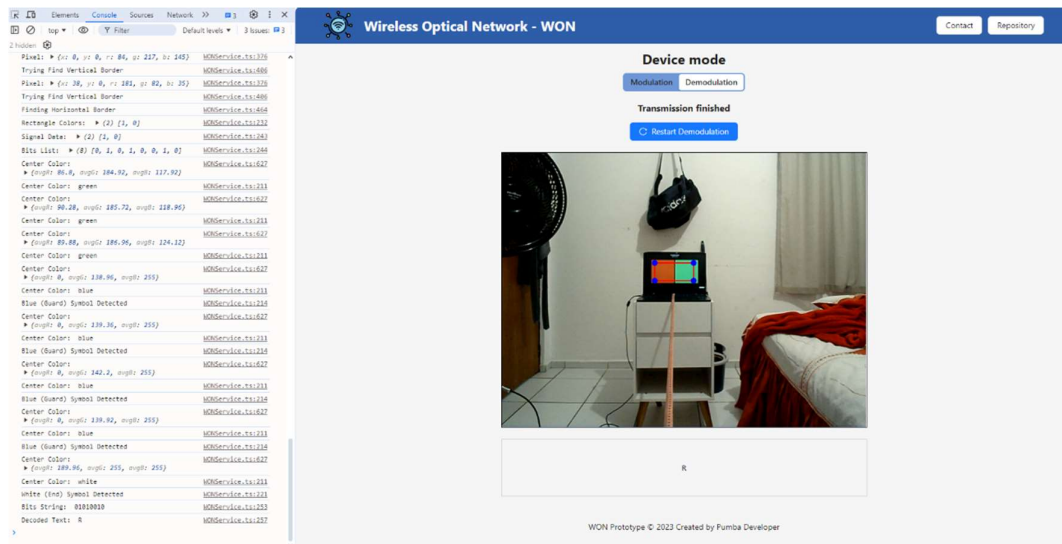
**Tabela 3. Outros parâmetros do algoritmo.**

A Tabela 2 mostra o formato de modulação mais eficiente que permitiu a transmissão sem erros de leitura. A modulação de 16 bit/s conseguiu transmitir com sucesso em todas as distâncias, enquanto a modulação de 64 bit/s não foi eficaz em nenhuma das distâncias durante os experimentos. Outros parâmetros relevantes estão definidos na Tabela 3.





## ENLACE ÓPTICO SEM FIO



**Figura 8. Decodificação de mensagem para modulação de 2 bit/s.**

A Figura 8 mostra o processo de demodulação da letra “R” utilizando a modulação de 2 bits a uma distância de 200 cm, foi utilizado uma fita métrica para medir a distância entre o transmissor e receptor. No console é possível observar a sequência de bits capturada e o valor decodificado.

## CONCLUSÃO

A pesquisa realizada sobre o enlace óptico sem fio demonstrou a viabilidade da transmissão de dados utilizando símbolos exibidos em um monitor e capturados por uma webcam. Os testes evidenciaram que diversos fatores, como a distância entre os dispositivos, a luminosidade do ambiente e a configuração dos parâmetros do sistema, influenciam significativamente a eficiência da transmissão e a precisão da decodificação dos dados.

Os resultados obtidos revelaram que a escolha adequada do tamanho da borda de guarda e o formato de modulação são cruciais para minimizar as interferências causadas pela dispersão da luz e pela captura imperfeita dos pixels. A modulação de 2 bit/s provou ser a mais eficaz em todas as distâncias testadas, enquanto configurações mais altas, como 64 bit/s, não foram bem-sucedidas.

Essas descobertas ressaltam a importância de considerar as limitações da camada física em sistemas de comunicação óptica, assim como a necessidade de ajustes dinâmicos com base nas condições do ambiente. O estudo fornece uma base sólida para futuras investigações e desenvolvimentos na área de enlaces ópticos sem fio, visando a criação de sistemas mais robustos e confiáveis para a transmissão de dados em diversas aplicações.