

Design de Comunicação por Luz Visível com Múltiplas Superfícies Inteligentes Reconfiguráveis de Cristal Líquido

Everton Alex Matos¹, Lucas Dias Hiera Sampaio², Luiz Carlos Pessoa Albini¹

¹Programa de pós-graduação em Informática (PPGInf),
Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Paraná, Brasil

²Programa de pós-graduação em Informática (PPGI), Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Cornélio Procopio, Paraná, Brasil

eamatos@inf.ufpr.br, ldsampaio@utfpr.edu.br, albinini@inf.ufpr.br

Abstract. *Visible light communication (VLC) is a key candidate for 6G heterogeneous networks, although its performance is often hindered by non-Line-of-Sight (NLoS) conditions. To mitigate it, this work introduces a novel multi-room VLC model utilizing Simultaneously Transmitting and Reflecting Reconfigurable Intelligent Surfaces (STAR-RIS). Results demonstrate that the proposed architecture enables inter-room connectivity via a single LED transmitter, significantly extending coverage beyond conventional line-of-sight (LoS) constraints.*

Resumo. *Comunicação através de Luz Visível (Visible light communication - VLC) é uma solução promissora para as futuras redes heterogêneas 6G, embora enfrente desafios em cenários sem linha de visão. Para mitigar essa limitação, RIS vem sendo proposto para auxiliar a comunicação VLC, este trabalho propõe a primeira arquitetura VLC multiambiente baseada em STAR-RIS. Os resultados demonstram que a abordagem viabiliza a conectividade entre ambientes vizinhos, ampliando a cobertura e do sistema.*

1. Introdução

A base global de usuários da Internet saltou de 3,9 bilhões em 2018 para 5,5 bilhões em 2024, atingindo 70% da população mundial [Cisco 2020, Union 2024, UN 2024]. Esse crescimento, impulsionado por dispositivos móveis (54% do tráfego em 2024), projeta uma demanda da rede 5G de 325 exabytes/mês em 2028, um aumento de 755% em relação a 2019 [Ericsson 2019, Ericsson 2022]. Tal volume impõe requisitos críticos às infraestruturas sem fio, como taxas de Tbps, latência ultrabaixa e alta eficiência energética. Estes desafios superam as capacidades das arquiteturas 5G convencionais, exigindo novos paradigmas tecnológicos para as futuras redes.

1.1. Comunicação por Luz Visível

Para suprir a demanda de dados dos sistemas 6G, a Comunicação por Luz Visível (*Visible light communication* - VLC) destaca-se como tecnologia complementar. Pesquisas pioneiras na Universidade Keio, nos anos 2000, demonstraram o uso de LEDs brancos para iluminação e transmissão de dados simultaneamente em redes domésticas [Tanaka et al. 2000, Komine and Nakagawa 2004]. Desde então, investigações exploram a comutação rápida dos LEDs para codificar informações em portadoras ópticas, viabilizando conectividade de alta velocidade via espectro visível [Khan 2017].

1.2. Superfícies Inteligentes Reconfiguráveis

Em paralelo, as Superfícies Inteligentes Reconfiguráveis (*Reconfigurable Intelligent Surfaces* - RIS) têm sido amplamente investigadas em comunicações por ondas milimétricas para mitigar limitações na propagação em cenários *non-line-of-sight* (NLoS). Compostas por matrizes de elementos passivos programáveis, as RIS ajustam as características das ondas incidentes (como fase, amplitude, etc.), moldando o canal e elevando a eficiência energética do sistema [Basharat et al. 2022].

Recentemente, o conceito de Transmissão e Reflexão Simultâneas (*Simultaneously Transmitting and Reflecting Reconfigurable Intelligent Surfaces* - STAR-RIS) introduziu a capacidade de cobertura espacial de 360° via transmissão e reflexão simultâneas [Liu et al. 2021]. Tal funcionalidade é um avanço considerável que vem sendo estudados em sistemas VLC, nos quais bloqueios e condições NLoS são severos, permitindo conexões mais robusta.

1.3. Trabalhos Relacionados

O conceito de STAR-RIS em VLC foi explorado em [Salehiyan and Emadi 2023] via *Non-Orthogonal Multiple Access* (NOMA), permitindo que um único *access point* (AP) atenda usuários em duas salas distintas. Alternativamente, [Ndjiongue et al. 2023b] introduziu a omni-DRIS, integrando características de Digital RIS (DRIS) para gerenciamento de feixe em dupla face. Com base no omni-DRIS, [Ndjiongue et al. 2024] otimizou o número de elementos maximizando a taxa de transmissão em cenários interambientes.

Diferente da configuração de LED único em [Salehiyan and Emadi 2023], o trabalho em [Liu et al. 2024] utiliza transmissores independentes em cada sala para mitigar condições NLoS, derivando o desempenho de *Bit Error Rate* (BER). Por fim, [Amirabadi and Nezamalhosseni 2024] investigou a maximização da *sum-rate* em sistemas *Massive MIMO-OFDM* multiusuário. O estudo empregou o protocolo *energy-splitting* para STAR-RIS e precodificação *Maximum Ratio Transmission* (MRT) para mitigar a interferência e reforçar o sinal sob condições NLoS.

1.4. Objetivos e contribuições

Diferentemente dos trabalhos anteriores, que limitam o uso de STAR-RIS a, no máximo, dois ambientes, este trabalho propõe uma arquitetura inédita de múltiplos STAR-RIS para estender a conectividade VLC a diversos ambientes utilizando um único transmissor LED. A solução viabiliza a comunicação entre ambientes por meio da operação simultânea de transmissão e reflexão, inclusive em cenários nos quais não haveria comunicação. As principais contribuições são:

- Proposição de arquitetura multiambiente baseada em múltiplas STAR-RIS;
- Estabelecimento de conectividade multi-sala com um único transmissor LED;
- Avaliação de desempenho e viabilidade em condições multi-salas de canal VLC;

1.5. Organização do Texto

O restante do artigo segue esta organização: a Seção 2 detalha o modelo de sistema e os modos de operação (refração e reflexão); a Seção 3 apresenta e discute os resultados numéricos; por fim, a Seção 4 discute as contribuições e conclusões sobre o trabalho.

2. Modelo do Sistema

O modelo consiste em salas adjacentes nas quais um único transmissor LED provê iluminação e transmissão de dados, auxiliado por múltiplas unidades STAR-RIS em cascata. As superfícies STAR-RIS operam via transmissão e/ou reflexão simultâneas [Salehiyan and Emadi 2023]. O cascadeamento para múltiplos ambientes sem transmissores adicionais ocorre através do repasse multi-salto do sinal: a primeira STAR-RIS transmite parte do feixe original para a sala adjacente, onde este atua como fonte para a segunda STAR-RIS, que por sua vez repassa o sinal ao próximo ambiente, e assim sucessivamente. Esse processo garante que usuários em diferentes salas recebam o sinal óptico de uma única origem. A Fig. 1 ilustra o cenário com três salas e dois módulos *liquid crystal - LC* STAR-RIS.

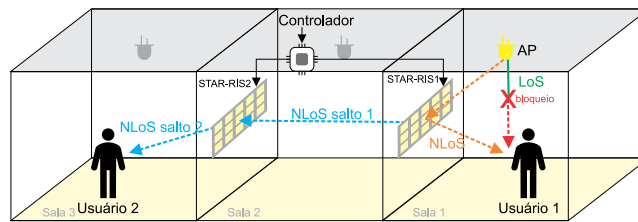


Figura 1. Sistema STAR-RIS múltiplo

2.1. Transmissão

A comunicação NLoS interambiente ocorre via modo de transmissão (t) do STAR-RIS, no qual os elementos LC realizam a refração da luz. A organização dessas unidades em cascata estabelece um enlace multi-hop até o usuário final, conforme ilustrado na Fig. 1 para um cenário de três salas e dois módulos STAR-RIS.

O ganho *Direct Current* (G_{DC}) NLoS é modelado pelo produto das contribuições Lambertianas de cada salto: LED $\rightarrow$ STAR-RIS 1 $\rightarrow$ STAR-RIS 2 $\rightarrow$ usuário. Como cada elemento da superfície atua como uma fonte secundária, o G_{DC} total na terceira sala é a soma de todos os caminhos ópticos válidos. Utilizando as formulações de [Komine and Nakagawa 2004] e [Salehiyan and Emadi 2023] combinadas com o modelo de elemento STAR-RIS de [Salehiyan and Emadi 2023], deriva-se a Eq. 1, que expressa o G_{DC} NLoS como o somatório dos produtos dos ganhos de cada etapa de propagação.

$$\begin{aligned}
H_{NLoS}^{(j,i)} = & \left(\frac{A_i(m+1)}{2\pi d_{AP,i}^2} \cos^m(\phi_{AP,i}) \cos(\varphi_{AP,i}) \right)_{\text{room 1}} \\
& \times \left(\frac{A_j(m+1)}{2\pi d_{i,j}^2} \cos^m(\phi_{i,j}) \cos(\varphi_{i,j}) \right)_{\text{room N}} \\
& \times \left(\frac{A_{PD}(m+1)}{2\pi d_{j,k}^2} \cos^m(\phi_{j,k}) \cos(\varphi_{j,k}) T(\phi) G(\phi) \right)_{\text{last room}}
\end{aligned} \tag{1}$$

na qual, A_i é o elemento de área STAR-RIS1; A_j é o elemento de área STAR-RIS2; m é a ordem Lambertiana; $d_{AP,i}^2$ é a distância do AP até o i -ésimo elemento STAR-RIS1; $d_{i,j}$ é a distância do i -ésimo elemento até o j -ésimo elemento STAR-RIS2; $d_{j,k}$ é

a distância do j -ésimo elemento até o usuário k ; ϕ o ângulo de irradiância; φ o ângulo de incidência em cada salto; $T(\phi)$ é o ganho do filtro óptico do receptor; $G(\phi)$ é o ganho do concentrador. Sendo que $G(\phi) = \frac{f^2}{\sin^2(\phi)}$, para $0 \leq \phi \leq \Phi_{FoV}$, em que f é o índice de refração interno [Aboagye et al. 2022]. O ângulo de meia intensidade m (*half-intensity angle*) em cada salto é definido como: $m = \frac{\ln(2)}{\ln(\cos(\Phi_{1/2}))}$, na qual, $\Phi_{1/2}$ [Salehiyan and Emadi 2023].

Para a propagação NLoS com múltiplos elementos STAR-RIS, [Ghassemloooy et al. 2013] modela o ganho total NLoS como uma soma sobre todos os caminhos ópticos possíveis, expresso como: $NLoS = \sum_{i=1}^{n1} \sum_{j=1}^{n2} h_{NLoS_{n1}^{n2}}$ na qual se realiza a soma dos sinais recebidos provenientes de múltiplos caminhos de propagação. De forma semelhante, um comportamento reflexivo com múltiplos elementos também é considerado em [Basar et al. 2019] e [Salehiyan and Emadi 2023].

Portanto, considerando o coeficiente de transição do LC (η_{LC}), o G_{DC} total NLoS para o sistema VLC multi-hop com STAR-RIS proposto é formulado como:

$$H_{NLoS}^{userR2} = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{i=1}^{N_2} \cdots \sum_{k=1}^{N_k} \left(\prod_{n=1}^K \eta_{LC,i_n}^t \right) \cdot H_{NLoS}^{(j,i)} \quad (2)$$

em que, $\prod_{n=1}^K \eta_{LC,i_n}^t$ representa o produto dos coeficientes de transição η_{LC,i_n}^t do módulo STAR-RIS na K -ésima sala.

2.2. Coeficiente de Transmissão η_{LC}

O impacto do STAR-RIS no ganho do canal é quantificado pelo coeficiente de transição η_{LC} , operando nos modos de transmissão (t) ou reflexão (r). De acordo com [Aboagye et al. 2022], esse coeficiente é obtido por meio da caracterização do comportamento da luz ao entrar na camada de LC, propagar-se em sua estrutura interna e saída do meio. Este trabalho segue as abordagens de modelagem apresentadas em [Maraqa and Ngatched 2023, Wu et al. 2023, Zhang et al. 2024, Maraqa et al. 2024], bem como, em [Wu et al. 2024]. A Fig. 2(a) ilustra a refração interna: a luz incidente L_1 propaga-se no ar com índice de refração n_a , φ denota o ângulo de incidência na superfície LC. Parte do sinal L_1 é refletida e o restante refratado formando o feixe interno L_2 , que se propaga no interior do LC com ângulo de inclinação θ . Por fim, L_3 representa a luz que emerge da camada LC após sofrer nova refração na interface de saída.

Assumindo luz não polarizada, a refletância angular específica a quantidade de luz incidente refletida pelo LC [Aboagye et al. 2022]. Essa grandeza pode ser obtida de acordo com a equação de Fresnel:

$$R_{ac}(\varphi, \theta) = \frac{1}{2} \left(\frac{\eta \cos \varphi - \cos \theta}{\eta \cos \varphi + \cos \theta} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\cos \varphi - \eta \cos \theta}{\cos \varphi + \eta \cos \theta} \right)^2 \quad (3)$$

na qual, $\eta = \eta_c / \eta_a$ é o índice de refração relativo; R_{ac} é a refletância angular na LC STAR-RIS. Aplicando a Lei de Snell, $\eta_a \sin \varphi = \eta_c \sin \theta$, a refletância angular pode ser obtida em função do ângulo de incidência φ , conforme [Aboagye et al. 2022]:

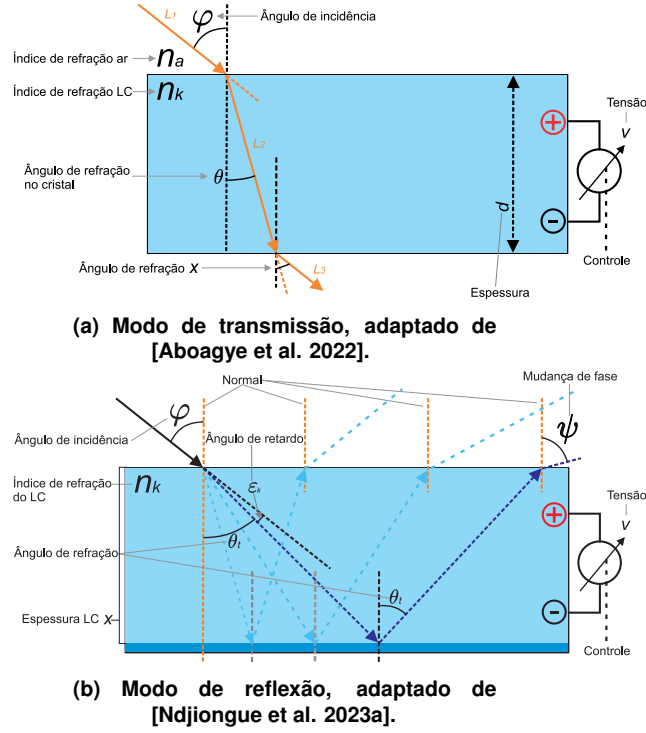


Figura 2. Propagação da luz dentro do LC: 2 (a) transmissão, adaptado de [Aboagye et al. 2022]; 2 (b) reflexão, adaptado de [Ndjiongue et al. 2023a]

$$R_{ac}(\varphi) = \frac{1}{2} \left(\frac{\eta^2 \cos \varphi - \sqrt{\eta^2 - \sin^2 \varphi}}{\eta^2 \cos \varphi + \sqrt{\eta^2 - \sin^2 \varphi}} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\cos \varphi - \sqrt{\eta^2 - \sin^2 \varphi}}{\cos \varphi + \sqrt{\eta^2 - \sin^2 \varphi}} \right)^2 \quad (4)$$

em que, $\eta_1 = \eta_a/\eta_c$ corresponde à transmitância angular T_{ac} , a qual pode ser obtida pela seguinte equação: $T_{ac}(\varphi) = 1 - R_{ac}(\varphi)$. Então, o coeficiente de transmissão é definido como:

$$\eta_{LC}^t = T_{ac}(\varphi) \times T_{ac}(\theta) \quad (5)$$

2.3. Ajuste do Índice de Refração η_c

O coeficiente de transição η_c pode ser otimizado ajustando o índice de refração efetivo η_c do LC [Aboagye et al. 2022]. Esse ajuste é realizado por meio da variação do ângulo de inclinação ξ , que especifica a orientação molecular da célula de LC. A relação entre ξ e η_c é dada por:

$$\frac{1}{\eta_c^2(\xi)} = \frac{\cos^2(\xi)}{\eta_e^2} + \frac{\sin^2(\xi)}{\eta_o^2} \quad (6)$$

onde: η_c é o índice de refração do LC; η_e é o índice de refração extraordinário; η_o é o índice de refração ordinário.

Para controlar o ângulo de inclinação ξ , uma tensão externa é aplicada à camada de LC. A relação entre a tensão aplicada e o ângulo de inclinação resultante é dada por [Aboagye et al. 2022]:

$$\xi = \begin{cases} 0, & v_e \leq v_{th} \\ \frac{\pi}{2} - 2 \tan^{-1} \left[\exp \left(-\frac{v_e - v_{th}}{v_0} \right) \right], & v_e > v_{th}, \end{cases} \quad (7)$$

no qual, v_e é a tensão externa aplicada; v_{th} é a tensão crítica a partir da qual se inicia a reorientação molecular; v_0 é uma constante. O controle da tensão externa é utilizado para manipular a propagação da luz, ajustando o índice de refração e o ângulo de refração, a fim de direcionar o feixe de luz incidente [Aboagye et al. 2022].

O ângulo interno de refração no LC é calculado de acordo com [Ndjiongue et al. 2023a] como: $\theta = \varphi - \xi$. Na qual, φ é o ângulo de incidência; ξ é o ângulo de inclinação definido na Eq. 7. Esse modelo representa o efeito de direcionamento geométrico nas moléculas de LC, atuando como um prisma ajustável.

Por fim, o ângulo de saída ao deixar o LC, denominado ângulo de refração e representado por ψ na Fig. 2(a), é determinado com base na Lei de Snell: $\sin(\psi) = \frac{\eta_c}{n_a} \sin(\theta)$. Em que, η_c é o índice de refração do LC; n_a é o índice de refração do ar; e θ é o ângulo de refração no LC [Ndjiongue et al. 2023a].

2.4. Ganho de amplificação

A intensidade luminosa refratada (L_3) pelo módulo LC pode superar a incidente (L_1) devido à emissão estimulada, onde moléculas excitadas por tensão externa emitem fótons coerentes adicionais [Aboagye et al. 2022]. Sob inversão de população em uma célula de espessura d , a amplificação é modelada pela Lei de Beer com coeficiente de absorção negativo Γ , resultando em $L_3 = L_1 \times \exp(\Gamma d)$ caracterizando o crescimento exponencial (*e-fold*) da intensidade. Nesse modelo, L_1 equivale ao G_{DC} inicial ($H_{NLoS,1}$), definido pelo enlace LoS entre LED e STAR-RIS. Por fim, o Coeficiente de Ganho de Amplificação Γ é dado por:

$$\Gamma = \frac{2\pi i \eta_c^3}{\lambda \cos(\varphi)} r_{eff} E \quad (8)$$

na qual, λ é o comprimento de onda da luz transmitida; r_{eff} é o coeficiente eletro-óptico efetivo; E [V/m] é o campo elétrico aplicado externamente.

2.5. Reflexão

O modo de reflexão redireciona o sinal para o ambiente de origem, utilizando o filme de LC como uma estrutura refletora controlável para maior controle espacial da propagação. Diferente do modo de transmissão, o sinal pode ser redirecionado dentro da mesma sala. Na literatura, [Maraqa et al. 2024] propõe um STAR-RIS com espelho integrado para reflexão simultânea enquanto a refração pelo LC. Já [Poole et al. 2016], explora filmes de LC como espelhos de plasma, cuja espessura é otimizada para minimizar a refletância em regime de campo fraco para λ específicos. Esse conceito foi aplicado em [Ndjiongue et al. 2023a] para substituir o espelho por LC, possibilitando que o filme de plasma atue como alternativa ao arranjo refletor proposto em [Maraqa et al. 2024].

O trabalho [Poole et al. 2016] apresenta a refletância em regime de campo fraco de um filme etalon dada pela seguinte equação: $\eta = 1 - \frac{1}{1 + F \sin^2\left(\frac{\Delta}{2}\right)}$, $\Delta = \frac{4\pi}{\lambda} n_k x \cos(\theta_t)$.

Em que F é o coeficiente de reflexão de Fresnel; Δ é o resultado do cálculo de 4π dividido pelo comprimento de onda (λ), multiplicado pelo índice de refração η_k , pela espessura x e pelo cosseno do ângulo da luz após a primeira transmissão na superfície θ_t .

Os autores [Poole et al. 2016] definem o parâmetro F como o coeficiente de reflexão de Fresnel na equação acima. Entretanto, ao considerar o livro [Bahaa and Teich 1991], que descreve dois espelhos formando um ressonador plano (*i.e.*, etalon de Fabry-Perót [Bahaa and Teich 1991, p. 312 (Resonator Modes)]), surge uma inconsistência. Ao denominar F como coeficiente de reflexão de Fresnel, [Poole et al. 2016] não está alinhado com a equação apresentada em [Bahaa and Teich 1991] e [Hecht 2017, p. 439], onde F é representado como $\mathcal{F}$ e descrito como o coeficiente de finesse. Portanto, a equação de [Poole et al. 2016] foi reescrita:

$$\eta^r = \frac{\mathcal{F} \sin^2(\Delta/2)}{1 + \mathcal{F} \sin^2(\Delta/2)} \quad (9)$$

em que $\mathcal{F}$ é o coeficiente de Finesse, dado por $\mathcal{F} = \frac{4R}{(1-R)^2}$; R é a refletância de uma única interface (por exemplo, ar-cristal líquido), sendo calculada a partir do coeficiente de Fresnel como $R = |r|^2$, em que r é o coeficiente de reflexão de Fresnel (r_s para polarização perpendicular ou r_p para polarização paralela). Por fim, Δ é a diferença de fase considerando o percurso do sinal de ida e volta na cavidade, dada por:

$$\Delta = \frac{4\pi}{\lambda_0} \eta_c x \cos(\theta) \quad (10)$$

onde λ_0 é o comprimento de onda no vácuo, η_c é o índice de refração do cristal, x é a espessura e θ é o ângulo interno efetivo com direcionamento de feixe.

A Fig. 2(b) ilustra o processo reflexão da luz em uma célula de LC, modelada pelo coeficiente de reflexão da Eq. 9. Para o cálculo de G_{DC} , a Eq. 1 é simplificada pela exclusão do termo recursivo da sala N:

$$\begin{aligned} H_{NLoS}^{(j,i)} &= \left(\frac{A_i(m+1)}{2\pi d_{AP,i}^2} \cos^m(\phi_{AP,i}) \cos(\varphi_{AP,i}) \right)_{\text{link 1}} \\ &\times (\eta)_{\text{reflection coefficient}} \\ &\times \left(\frac{A_{PD}(m+1)}{2\pi d_{j,k}^2} \cos^m(\phi_{j,k}) \cos(\varphi_{j,k}) T(\phi) G(\phi) \right)_{\text{link from RIS to user}} \end{aligned} \quad (11)$$

O método de ajuste do índice de refração descrito na Seção 2.3 é reutilizado. Para múltiplos elementos, a reflexão pode ser definida como:

$$H_{NLoS}^{userR1^r} = \sum_{i=1}^{N_1} \eta_{LC,i}^r \cdot H_{NLoS,i}^{(1)} \quad (12)$$

Parâmetros do Sistema							
Par.	Valor	Par.	Valor	Par.	Valor	Par.	Valor
B	200 MHz	ρ	0,53 A/W	n_e	1,7	P. RIS2	[6,2,2]
λ	510, 670 nm	N_0	10^{-21}	v_{th}	1,34 V	P. Usu.	[8,2,2]
A_u	10^{-2}	x	10^{-6}	$\phi_{1/2}$	70°	r_{eff}	12 pm/V
A_r	10^{-2}	n_a	1,00027	φ_{FoV}	85°		
P_t	10 W	n_o	1,5	P. LED	[2,2,4]		
v_o	1 V	V_{th_LC}	5 V	P. RIS1	[2,2,2]		

Tabela 1. Parametros do sistema

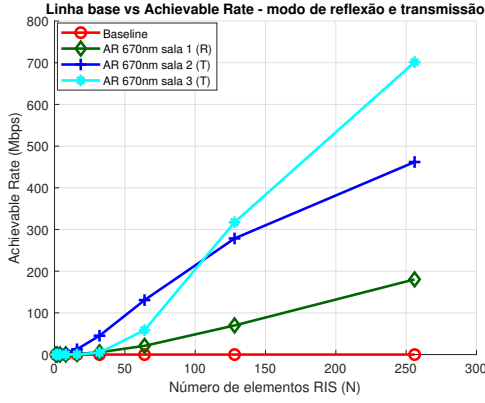


Figura 3. BL vs AR; $d=2m$, $\lambda=670nm$

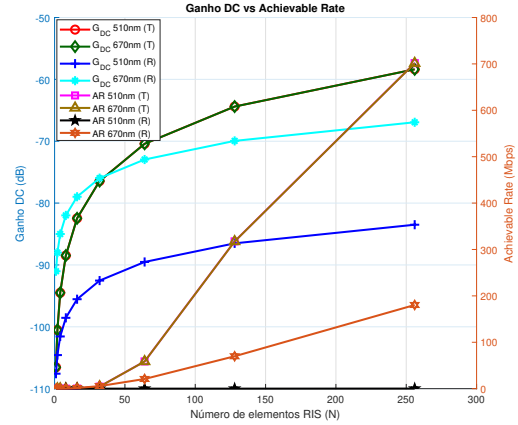


Figura 4. DC gain vs AR

3. Resultados e Discussões

Para avaliar o desempenho da STAR-RIS em cenários de sala única e multiambiente, simulou-se um ambiente indoor com três salas (4×4×4m). O LED na Sala 1 atende usuários NLoS no mesmo ambiente via reflexão ou, alternativamente, provê cobertura interambiente via refração para as salas adjacentes. Os parâmetros de simulação são apresentados na Tab. 1.

3.1. Linha Base

A fim de evidenciar o impacto do STAR-RIS proposto, considera-se um cenário de referência (*baseline* - BL) no qual o caminho LoS entre as salas está completamente bloqueado e nenhuma superfície reconfigurável é implantada (desligada). Nessa condição, o canal óptico NLoS entre as salas é nulo devido ao bloqueio causada pela parede opaca. Portanto, o G_{DC} do canal para a comunicação entre salas é dado por $H_{BL} = \text{SNR}_{BL} = AR_{BL} = 0$, em que, H é o G_{DC} do canal e AR é a taxa alcançável (*achievable rate*).

O STAR-RIS proposto não tem por objetivo melhorar o canal, mas criar conectividade em um cenário no qual a comunicação estaria bloqueada via VLC. A Fig. 3 compara a AR do cenário baseline NLoS com o sistema proposto, demonstrando por meio de simulações a viabilidade da comunicação assistida por STAR-RIS.

3.2. Ganho DC vs Achievable Rate

A Fig. 4 apresenta o resultado do G_{DC} no modo de reflexão, evidenciando alta sensibilidade a diferentes comprimentos de onda, sendo que o coeficiente η^r mostra variação

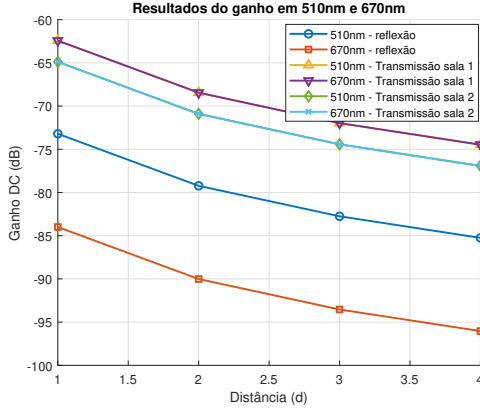


Figura 5. Análise ganho DC vs Distância.

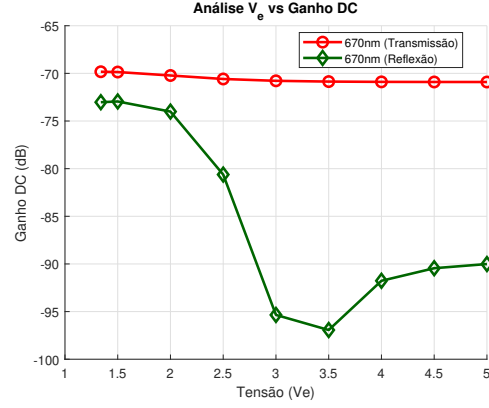


Figura 6. Análise ganho DC gain vs Tensão $N = 64$

mais significativa entre 510 nm e 670 nm. O modelo de STAR-RIS em modo de reflexão, ao empregar um coeficiente η^r baseado no efeito Fabry-Perot, apresenta comportamento altamente seletivo em relação ao comprimento de onda, com maior resposta em 510 nm.

3.3. Ganho vs Distância

A Fig. 5 demonstra o G_{DC} em função da distância para $\lambda=510$ nm e $\lambda=670$ nm nos modos r e t , considerando cenários de sala única, sala vizinha e terceira sala. O ganho decai com a distância em todos os casos devido às perdas de propagação. Os cenários em t apresentam ganhos superiores ao modo r , devido ao efeito acumulativo dos múltiplos elementos RIS ao longo do caminho multi-hop. Além disso, $\lambda=670$ nm resulta em maior G_{DC} que $\lambda=510$ nm, indicando dependência do λ nas propriedades ópticas do sistema.

3.4. Ganho vs a Tensão Aplicada no LC

A Fig. 6 apresenta o G_{DC} em função da tensão aplicada para $\lambda=670$ nm com $N = 64$ elementos RIS. No modo t , o ganho permanece praticamente constante, indicando baixa sensibilidade à variação de tensão. Já no modo r , observa-se forte dependência da tensão aplicada, com queda significativa do G_{DC} até aproximadamente 3–3,5 V, seguida de recuperação parcial. Esse comportamento está associado ao controle do ângulo de inclinação do LC, que altera o deslocamento de fase e o coeficiente de transição.

3.5. Trade-off entre os modos de transmissão e reflexão

Como a STAR-RIS opera em modo *time-switching* (TS), a superfície alterna entre transmissão e reflexão ao longo do tempo. Seja $\tau \in [0, 1]$ a fração de tempo dedicada ao modo de transmissão, enquanto $(1 - \tau)$ corresponde ao tempo de reflexão. De acordo com o protocolo TS [Mu et al. 2022], as AR efetivas são ponderadas pelo fator de alocação temporal $C_{\text{ref,eff}} = (1 - \tau)C_{\text{ref}}$, $C_{\text{tra,eff}} = \tau C_{\text{tra}}$, onde C_{ref} e C_{tra} representam as AR considerando operação contínua nos modos de reflexão e transmissão, respectivamente.

A Fig. 7 ilustra o *trade-off* entre reflexão e transmissão para $N = 64$ elementos RIS. Observa-se que $C_{\text{ref,eff}}$ decresce linearmente com τ , enquanto $C_{\text{tra,eff}}$ cresce linearmente, refletindo a redistribuição do tempo de operação entre os modos.

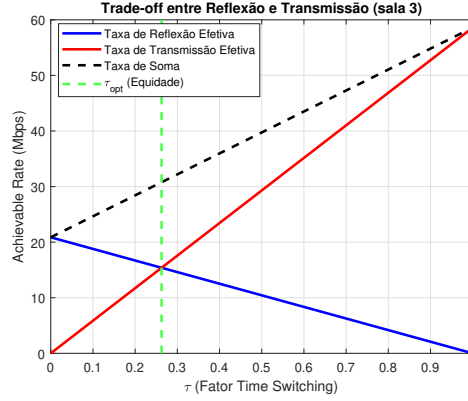


Figura 7. Análise τ at $N = 64$.

3.6. Otimização da Taxa de Soma e Equidade

Baseado na formulação de TS, a AR total do sistema pode se expressada como $C_{\text{sum}} = (1 - \tau)C_{\text{ref}} + \tau C_{\text{tra}}$.

Como C_{sum} é linear em τ , seu máximo ocorre nas extremidades do intervalo $\tau \in [0, 1]$. Assim, $\tau = 1$ maximiza a taxa quando $C_{\text{tra}} > C_{\text{ref}}$, enquanto $\tau = 0$ é ótimo quando $C_{\text{ref}} > C_{\text{tra}}$. Para garantir equidade, considera-se o critério max-min $\max_{\tau \in [0,1]} \min(C_{\text{ref,eff}}, C_{\text{tra,eff}})$.

A alocação ótima ocorre quando as taxas efetivas são iguais, isto é, $(1 - \tau^*)C_{\text{ref}} = \tau^*C_{\text{tra}}$. Observa-se que τ^* depende apenas da relação entre as forças dos canais de reflexão e transmissão. Quando o canal de transmissão é significativamente mais forte, uma fração menor de tempo já é suficiente para equalizar as taxas. Considerando $N = 64$ elementos RIS ($C_{\text{ref}} = 20,87$ Mbps e $C_{\text{tra}} = 58,59$ Mbps), sobre a equação $\tau^* = \frac{C_{\text{ref}}}{C_{\text{ref}} + C_{\text{tra}}}$, obtém-se $\tau^* \approx 0,262$, indicando que cerca de 26% do tempo deve ser alocado à transmissão para equalizar as taxas. A taxa mínima garantida para ambos os usuários é: $C_{\text{min}}^* = (1 - \tau^*)C_{\text{ref}} = \tau^*C_{\text{tra}} \approx 15,4$ Mbps. Apontando uma operação balanceada orientada à equidade: $C_{\text{min}}^* \approx 15,4$ Mbps.

4. Conclusão

O trabalho propôs um sistema VLC multiambiente assistido por STAR-RIS baseado em LC, operando no modos t e r . A solução permite conectividade interambiente mesmo em NLoS ampliando a cobertura do sinal VLC. Resultados indicam que o modo t é mais robusto devido ao efeito acumulativo dos elementos RIS em configuração multi-hop. No modo r , o desempenho é mais sensível à tensão aplicada e ao comprimento de onda, evidenciando a importância do controle do índice de refração, sendo superior em 670 nm.

A análise em modo *time-switching* demonstrou o compromisso entre maximização da taxa total e equidade entre usuários. Enquanto a taxa soma é maximizada nas extremidades do intervalo temporal, o critério max-min fornece solução fechada para o fator ótimo de alocação. Para $N = 64$ elementos, obteve-se $\tau^* \approx 0,262$, resultando em taxas balanceadas de aproximadamente 15,4 Mbps. Conclui-se que o STAR-RIS mostra-se promissor para cobertura dinâmica e alocação justa em redes VLC indoor.

Trabalhos futuros incluem a investigação do comportamento do sistema conside-

rando interferências múltiplas, efeitos de ruído e reflexões adicionais do ambiente. Além disso, uma validação experimental da arquitetura pode ser realizada para análise do impacto do posicionamento dos STAR-RIS no desempenho do sistema.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal do Paraná (UFPR) e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pelo suporte e infraestrutura necessária. Este estudo foi financiando em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Programa de Excelência Acadêmica (PROEX).

Referências

- Aboagye, S., Ndjiongue, A. R., Ngatched, T. M. N., and Dobre, O. A. (2022). Design and optimization of liquid crystal ris-based visible light communication receivers. *IEEE Photonics Journal*, 14(6):1–7.
- Amirabadi, M. and Nezamalhosseini, S. (2024). Sum rate optimization in star-ris assisted multiuser massive mimo-ofdm vlc systems. *Physical Communication*, 67:102524.
- Bahaa, E. A. S. and Teich, M. C. (1991). *Fundamentals of Photonics*. John Wiley & Sons Inc.
- Basar, E., Di Renzo, M., De Rosny, J., Debbah, M., Alouini, M.-S., and Zhang, R. (2019). Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces. *IEEE Access*, 7:116753–116773.
- Basharat, S., Khan, M., Iqbal, M., Hashmi, U., Zaidi, S. A. R., and Robertson, I. (2022). Exploring reconfigurable intelligent surfaces for 6g: State-of-the-art and the road ahead. *IET Communications*, 16.
- Cisco (2020). Cisco visual networking index: Forecast and trends, 2018–2023 white paper.
- Ericsson (2019). Ericsson mobility report.
- Ericsson (2022). Ericsson mobility report.
- Ghassemloooy, Z., Popoola, W., and Rajbhandari, S. (2013). *Optical Wireless Communications*. CRC Press.
- Hecht, E. (2017). *Optics*, chapter 4.6.2. Person Education Limited.
- Khan, L. U. (2017). Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges. *Digital Communications and Networks*, 3(2):78–88.
- Komine, T. and Nakagawa, M. (2004). Fundamental analysis for visible-light communication system using led lights. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 50(1):100–107.
- Liu, M., Shen, P., Xie, X., Wang, X., Liu, Q., Jia, Y., and Lu, L. (2024). Omni-digital reconfigurable intelligent surfaces enhanced visible light communications. *Seventh Global Intelligent Industry Conference*.
- Liu, Y., Mu, X., Xu, J., Schober, R., Hao, Y., Poor, H. V., and Hanzo, L. (2021). Star: Simultaneous transmission and reflection for 360° coverage by intelligent surfaces. *IEEE Wireless Communications*, 28(6):102–109.

- Maraqa, O., Aboagye, S., and Ngatched, T. M. N. (2024). Optical star-ris-aided vlc systems: Rsma versus noma. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 5:430–441.
- Maraqa, O. and Ngatched, T. M. N. (2023). Optimized design of joint mirror array and liquid crystal-based ris-aided vlc systems. *IEEE Photonics Journal*, 15(4):1–11.
- Mu, X., Liu, Y., Guo, L., Lin, J., and Schober, R. (2022). Simultaneously transmitting and reflecting (star) ris aided wireless communications. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 21(5):3083–3098.
- Ndjiongue, A. R., Dobre, O. A., and Shin, H. (2024). Maximal transmission rate in omni-drir-assisted indoor visible light communication systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 73(9):13956–13961.
- Ndjiongue, A. R., Ngatched, T. M. N., and Dobre, O. A. (2023a). Impact of the refractive index on the achievable rate of liquid crystal-based digital-ris indoor vlc systems. *IEEE Photonics Journal*, 15(1):1–6.
- Ndjiongue, A. R., Ngatched, T. M. N., Dobre, O. A., Haas, H., and Shin, H. (2023b). Double-sided beamforming in vlc systems using omni-digital reconfigurable intelligent surfaces. *IEEE Communications Magazine*, pages 1–7.
- Poole, P. L., Krygier, A., Cochran, G. E., Foster, P. S., Scott, G. G., Wilson, L. A., Bailey, J., Bourgeois, N., Hernandez-Gomez, C., Neely, D., Rajeev, P. P., Freeman, R. R., and Schumacher, D. W. (2016). Experiment and simulation of novel liquid crystal plasma mirrors for high contrast, intense laser pulses. *Scientific Reports*.
- Salehiyan, A. and Emadi, M. J. (2023). Performance analysis of uplink optical wireless communications in the presence of a simultaneously transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surface. *IET Optoelectronics*, 17(4):129–138.
- Tanaka, Y., Haruyama, S., and Nakagawa, M. (2000). Wireless optical transmissions with white colored led for wireless home links. In *11th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. PIMRC 2000. Proceedings (Cat. No.00TH8525)*, volume 2, pages 1325–1329 vol.2.
- UN, U. (2024). World population prospects 2024: Summary of results.
- Union, I. T. (2024). Individuals using the internet.
- Wu, Q., Zhang, J., Zhang, Y., Xin, G., and Guo, D. (2023). Asymptotic capacity maximization for miso visible light communication systems with a liquid crystal ris-based receiver. *Photonics*, 10(2).
- Wu, Q., Zhang, J., Zhang, Y.-Y., and Xin, G. (2024). Asymptotic capacity maximization for miso visible light communications with mirror array-based riss on walls and an lc ris-based receiver. *Optics Communications*, 561:130496.
- Zhang, X.-Y., Zhang, J., and Wu, Q. (2024). Fairness optimization for vlc systems with liquid crystal-based ris-enabled transmitters. *IEEE Photonics Journal*, 16(4):1–8.