

Otimização de Sistemas MIMO Massivo Auxiliado por RIS considerando Diferentes Faixas Espectrais

Luis Fernando Hiroyuki Moloni Kanda, Rafael Augusto Pedriali e Taufik Abrão

Resumo— Este trabalho investiga métodos de otimização para sistemas MIMO Massivos (M-MIMO) auxiliados por Superfícies Inteligentes Reconfiguráveis (RIS) considerando diferentes valores na frequência da portadora. Com a evolução das redes B5G, a integração da RIS com tecnologias existentes promete melhorias substanciais no desempenho da rede sem fio, particularmente em termos de confiabilidade do sinal, eficiência espectral e eficiência energética, nos mais variados e dinâmicos ambientes urbanos densos. Por meio de simulações e resultados analíticos, o presente estudo avalia os ganhos de eficiência espectral de sistemas M-MIMO auxiliados por RIS e agregação de *beamforming* em cenários de potencial aplicação prática, em condições de canal adversas, com e sem linha de visada. Dentre as técnicas de otimização utilizadas, destacam-se a busca local ingênua com a otimização da Max-Min SINR, e a otimização dos elementos da RIS via *beamforming* passivo. Ambos os métodos são aplicados para explorar as configurações de uso mais eficientes da RIS, com o objetivo de melhorar a qualidade de serviço para comunicações multiusuários.

Palavras-Chave— Superfícies Inteligentes Reconfiguráveis; MIMO Massivo; Eficiência Espectral; Otimização das fases RIS.

I. INTRODUÇÃO

À medida que as implementações de sistemas celulares 5G avançam globalmente, o tráfego de dados móveis observa crescimentos sem precedentes, impulsionado por aplicações que demandam critérios de desempenho cada vez mais rigorosos em termos de velocidade e conectividade [1]. Paralelamente, a pressão por um desenvolvimento sustentável e por um consumo energético mais eficiente se torna mais evidente. Diante desse contexto, surge a necessidade de contemplar as próximas gerações de telecomunicações móveis, conhecida como *beyond 5G* (B5G) e a sexta geração (6G). Estas gerações destacam-se pela busca da eficiência energética, visando atender a requisitos de taxas de dados de pico de até 1 Tbps e latências na ordem de microssegundos [2].

Prevê-se que as redes de comunicação sem fio 6G estejam estabelecidas entre 2027 e 2030 [3]. Os desafios chave para superar incluem aumento da capacidade do sistema (medida pela eficiência espectral - SE), taxas de dados mais altas, redução da latência, aprimoramento da segurança dos dados, conectividade massiva, e aprimoramento da qualidade de serviço (QoS - *quality of service*) em comparação com os sistemas 5G [4]. Para atingir esses objetivos, várias tecnologias emergentes são

consideradas potenciais candidatas para implementação em sistemas 6G. Entre elas estão redes ópticas sem fio, integração de transmissão de dados e energia sem fio, aplicação de técnicas de inteligência artificial (AI - *artificial intelligence*) e aprendizado de máquina (ML - *machine learning*), superfícies inteligentes reconfiguráveis (RIS - *reconfigurable intelligent surfaces*), e transceptores *massive multiple-input multiple-output* (M-MIMO) [4].

A implementação de tecnologia M-MIMO é fundamental nos sistemas 5G e se destaca pelo uso extensivo de múltiplas antenas. Esses sistemas empregam *arrays* de antenas com no mínimo 64 elementos, proporcionando um significativo ganho de *array*. A utilização de um grande número de antenas permite a aplicação de técnicas avançadas de multiplexação espacial, que além de aumentarem a resolução, também mitigam os efeitos de desvanecimento rápido do canal [5]. Diferentemente de uma antena individual com um padrão de radiação estático, um *array* de antenas pode reconfigurar seu padrão de radiação tanto temporal quanto frequencialmente, tanto na transmissão quanto na recepção. Esta flexibilidade para realizar filtragem espacial melhora significativamente a resolução e o desempenho à medida que se aumenta o número de antenas no transceptor M-MIMO [6]. Outra tecnologia emergente é a RIS, com um conceito novo que já ganhou muita atenção no meio científico, primeiramente por causa da sua capacidade de mudança de fase, permitindo a reflexão de forma construtiva do sinal para diferentes direções de acordo com a posição do usuário ou da BS. O mecanismo de reflexão é implementado por um controle inteligente ajustando a amplitude e fase de cada elemento refletor, conseqüentemente controlando o sinal de saída via *beamforming*. Essa tecnologia pode ser instalada em cenários de comunicação sem linha de visada (*non-line-of-sight* - NLoS) devido aos bloqueios existentes no espaço urbano. Adicionalmente, a RIS também pode operar com um modo bidirecional total (*full-duplex* - FD) sem interferência interna, *i.e.* a RIS pode customizar os ambientes de canal sem fio modificando a reflexão das ondas de rádio com um custo e um consumo de energia muito baixos, comparado a outras soluções, tais como a implantação de mais antenas na BS ou células pequenas.

Este trabalho está estruturado da seguinte forma. A Seção II apresenta a base conceitual do artigo abrangendo a literatura recente, o modelo do sistema e do canal para sistemas M-MIMO auxiliado por RIS, as técnicas de *beamforming* e de otimização dos elementos da RIS. Os resultados são discutidos na Seção III. Conclusões e perspectivas para continuidade são apresentados na Seção IV.

Luis F. H. M. Kanda, Rafael A. Pedriali e Taufik Abrão estão no Laboratório de Telecomunicações e Processamento Digital de Sinais do Departamento de Engenharia Elétrica (DEEL), Universidade Estadual de Londrina (UEL), Londrina-PR, Brasil, (e-mail: luis.kanda.lmk@gmail.com; rafaug.p@gmail.com; taufik@uel.br); Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação Araucária, CAPES código 88887.847039/2023-00 e CNPq código 310681/2019-7.

II. BASE CONCEITUAL

O cenário discutido neste trabalho considera valores convencionais e típicos de cidades de grande e médio porte, incorporando configurações ótimas para as futuras instalações de redes M-MIMO auxiliadas por RIS. Neste estudo, consideram-se dois edifícios, um deles com 11 andares, ≈ 40 m de altura, e em seu topo é alocada uma BS, e no outro prédio é posicionada a RIS. Ambos estão separados por uma avenida ampla de 30 metros de largura, conforme Figura 1. Além disso, foram selecionados os canais de comunicações Rayleigh para o canal H e Rice para o canal G, que se apresentam adequadamente convencionais para o cenário proposto. Este sistema é utilizado para avaliar as métricas de QoS com diferentes abordagens de otimização e considerando diferentes faixas espectrais.

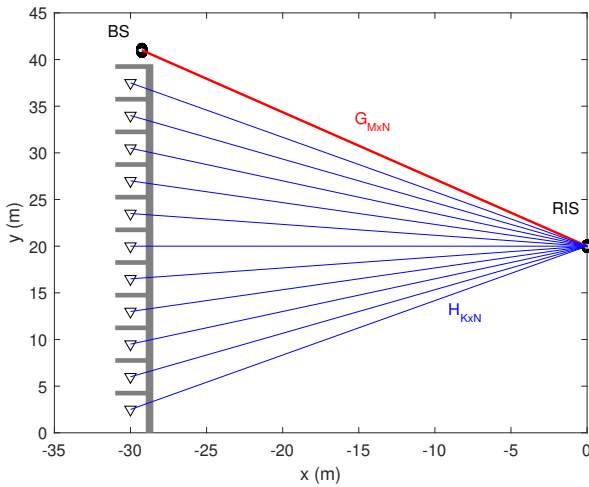


Fig. 1. Configuração 2D para BS e RIS, *uplink*; multiusuário (K usuários) auxiliado por RIS, $M = 11$ antenas na BS e N elementos na RIS

A. Modelo do Sistema

Em um típico sistema de comunicação *uplink* auxiliado por RIS, onde o sinal é transmitido pelo usuário, recebido e refletido pela RIS em direção à BS. Considera-se a existência de uma BS com M antenas, uma RIS com N elementos refletores e K equipamentos de usuários (*user equipment* - UE) de antena única. Assumindo que a RIS foi instalada em uma posição estratégica com linha de visada (*Line of Sight* - LoS) para a BS conforme demonstrado na Figura 1.

O canal RIS-BS, foi adotado estrategicamente como um modelo de desvanecimento Rice devido a alocação conhecida da BS e RIS e com LoS predominante. No canal UE-RIS, foi selecionado o modelo de desvanecimento Rayleigh devido ao espalhamento do sinal sem componente dominante, provocado por objetos, pessoas, árvores, paredes, entre outros, os quais dispersam a propagação do sinal. Dessa forma, o sinal recebido na BS é formulado como:

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}\Theta\mathbf{H}^H\mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (1)$$

sendo $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{M \times N}$, e $g_{m,n} \triangleq [\mathbf{G}]_{m,n}$ a matriz de canal para o enlace RIS-BS, $\Theta \in \mathbb{C}^{N \times N}$ é a matriz de atualização das fases dos elementos da RIS, e $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N \times K}$ é a matriz de canal para o enlace UE-RIS. Os sinais simultaneamente transmitidos pelos

K usuários são definidos em $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{K \times 1}$, sendo $\mathbf{n} \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ o vetor de amostras do ruído AWGN.

Cada elemento $g_{m,n}$ da matriz do sub-canal \mathbf{G} para o enlace RIS-BS é descrito por um modelo estocástico de desvanecimento multipercurso ($\underline{g}_{m,n}$) escalonado por um coeficiente de perda de percurso ($\beta_{m,n}$), definido por

$$g_{m,n} = \beta_{m,n} \underline{g}_{m,n}, \quad (2)$$

$$\text{com} \quad \beta_{m,n} = \sqrt{\frac{G\lambda^2}{(4\pi\alpha_{m,n})^2}}, \quad (3)$$

G é ganho da antena, λ é o comprimento de onda do sinal propagado e $\alpha_{m,n}$ sendo a distância entre o n -ésimo elemento da RIS e a m -ésima antena da BS.

O modelo de multipercurso foi definido pela distribuição de Rice, que possui componentes com LoS ($\underline{\mathbf{g}}_{n,k}$) e NLoS $\tilde{\mathbf{g}}_{n,k}$, sendo representado pela equação:

$$\underline{g}_{m,n} = \sqrt{\frac{\epsilon_{RB}}{\epsilon_{RB} + 1}} \bar{g}_{m,n} + \sqrt{\frac{1}{\epsilon_{RB} + 1}} \tilde{g}_{m,n}, \quad (4)$$

sendo os sublinks formados entre a m -ésima antena da BS e o n -ésimo elemento da RIS, então concatenados na matriz de canal RIS-BS \mathbf{G} , ϵ_{RB} é o fator de Rice adotado para o link RIS-BS. A componente de canal $\bar{g}_{m,n}$ corresponde ao modelo do canal direcional LoS. Cada elemento é calculado por:

$$\bar{g}_{m,n}(\mathbf{r}, \mathbf{s}_m, \mathbf{s}_n) = e^{-i\frac{2\pi}{\lambda}\|\mathbf{r}-\mathbf{s}_m-\mathbf{s}_n\|}, \quad (5)$$

com $\|\mathbf{r} - \mathbf{s}_m - \mathbf{s}_n\|$ representando a distância do n -ésimo elemento da RIS até a m -ésima antena da BS. Já na componente NLoS, a envoltória do sinal está sujeita à dispersão aleatória do canal devido à diversos fatores e objetos. Desta forma, cada amostra do modelo é gerado por:

$$\tilde{g}_{m,n} = x_{m,n} + jy_{m,n}, \quad (6)$$

sendo $x_{m,n}$ e $y_{m,n}$ amostras das variáveis aleatórias (VAs) X e Y respectivamente e representam as componentes em fase e em quadratura da envoltória do sinal. As VAs X e Y seguem uma distribuição Gaussiana com média zero e variância $\sigma_X^2 = \sigma_Y^2 = \sigma^2$. Além disso, um modelo da magnitude $|R|$, gerado pelas amostras da nova VA $R = X + jY$ corresponderá um canal Rayleigh, *i.e.*, gerado a partir da envoltória de R .

A matriz diagonal de transferência Θ para os N elementos da RIS é descrita por:

$$\Theta = \text{diag}([\alpha_1 e^{j\theta_1} \quad \dots \quad \alpha_N e^{j\theta_N}]), \quad (7)$$

onde α_n corresponde a magnitude controlável da RIS e θ_n a sua resposta em fase, ambos com $n = 1, \dots, N$ elementos da RIS. O sub-canal UE-RIS configurado em *uplink* é definido pela matriz \mathbf{H} , constituída pelos elementos $h_{n,k} \triangleq [\mathbf{H}]_{n,k}$. Da mesma forma, cada elemento $h_{n,k}$ é gerado pelos coeficientes de perda de percurso $\beta_{n,k}$ (equivalente aos elementos na Eq. (3)), associado ao vetor multipercurso do k -ésimo usuário, \mathbf{h}_k , cujo modelo de canal é representado pelo canal Rayleigh (equivalente a Eq. (6)):

$$h_{n,k} = \beta_{n,k} \underline{h}_{n,k}. \quad (8)$$

B. Técnicas de Beamforming

Nesta subseção, são apresentadas as técnicas utilizadas para otimizar a configuração das antenas na BS, processo conhecido como *beamforming* ativo, bem como a configuração dos elementos de fase na RIS, conhecida por *beamforming* passivo.

O *Beamforming* é uma técnica avançada que molda os padrões de radiação de um conjunto de antenas, consolidando efetivamente os sinais em direção a usuários específicos, simultaneamente a isso, permite anular os sinais de direções indesejadas. A técnica envolve a combinação inteligente de sinais de múltiplas antenas para formar um feixe focalizado na posição do usuário de interesse.

1) *Beamforming ativo*: A configuração padrão para sistemas M-MIMO envolve o uso de precodificadores em comunicações atuando no modo *downlink* e de combinadores no modo *uplink*. Embora as operações algébricas entre esses modos sejam similares, o objetivo principal é combinar os múltiplos sinais transmitidos de maneira coerente e eficiente, visando a otimização da SNR ou da SINR. A seguir, destacam-se as principais técnicas de combinadores existentes na literatura.

Combinador de taxa máxima (MRC - maximum ratio combiner): Este combinador realiza a soma ponderada e coerente dos múltiplos sinais recebidos nos diferentes ramos de diversidade, quer seja de antenas, quer seja de percurso, tempo ou frequência. Assim, com os pesos sendo proporcionais às SINRs de cada ramo, e as fases sendo canceladas, a versão combinada (soma) do sinal à saída melhora significativamente a qualidade do sinal recebido, sendo

$$\mathbf{W}_{\text{MRC}} = \mathbf{H}_C \quad (9)$$

com \mathbf{W}_{MRC} indicando a matriz do combinador MRC e $\mathbf{H}_C \in \mathbb{C}^{M \times K}$ é a matriz do canal composto, envolvendo os sub-canais UE-RIS e RIS-BS. Finalmente, o vetor de dados estimados ($\tilde{\mathbf{x}}$) é obtido simplesmente via multiplicação matricial:

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{W}_{\text{MRC}}^H \mathbf{H}_C \quad (10)$$

Combinador forçagem-zero (ZF - zero-forcing): O combinador ZF é utilizado juntamente com M-MIMO mitigando as interferências de outros usuários, forçando-os à zero, gerando resultados mais eficientes em condições de SNRs altas. Essa técnica utiliza a pseudo-inversa da matriz de canal conhecida, definida como

$$\mathbf{W}_{\text{ZF}} = \mathbf{H}_C (\mathbf{H}_C \mathbf{H}_C^H)^{-1}, \quad (11)$$

sendo $\mathbf{W}_{\text{ZF}} \in \mathbb{C}^{M \times K}$ a matriz do combinador ZR, o operador $(\cdot)^{-1}$ corresponde à operação matriz inversa. Finalmente, o vetor de dados estimados com este combinador é obtido via multiplicação matricial: $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{W}_{\text{ZF}} \mathbf{H}_C$.

Combinador mínimo erro quadrático médio (MMSE - minimum mean squared error): Neste combinador é realizada a minimização do erro quadrático médio entre o vetor transmitido e o vetor estimado, isto é feito utilizando a seguinte matriz de transformação. Desta forma é necessário conhecer a variância do ruído no canal (σ^2),

$$\mathbf{W}_{\text{MMSE}} = \mathbf{H}_C (\mathbf{H}_C \mathbf{H}_C^H + \sigma^2 \mathbf{I})^{-1}, \quad (12)$$

sendo $\mathbf{W}_{\text{MMSE}} \in \mathbb{C}^{M \times K}$ a matriz do combinador MMSE, e \mathbf{I} é a matriz identidade. Novamente, o vetor de dados estimados é obtido pela multiplicação matricial: $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{W}_{\text{MMSE}} \mathbf{H}$.

C. Métricas

Nesta subseção são detalhadas as métricas da SINR e a Probabilidade de Interrupção (OP - *Outage Probability*) essenciais para avaliar a QoS em sistemas de telecomunicações.

1) *Relação Sinal e Interferência mais Ruído*: A SINR é um conceito fundamental para sistemas de telecomunicações que quantifica a qualidade de um enlace de comunicação sem fio. É uma medida que compara o nível de um sinal desejado ao nível do ruído e incluindo a interferência no canal, representado por,

$$\text{SINR}_k = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{interf}} + \sigma_n^2}, \quad (13)$$

em que σ_n^2 é a potência de ruído, P_{signal} é a potência do sinal desejado para o usuário k e P_{interf} é a potência de interferência. Assim, essa expressão pode ser expandida por,

$$\text{SINR}_k = \frac{|(\mathbf{G}^H \Theta \mathbf{h}_k) \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K |(\mathbf{G}^H \Theta \mathbf{h}_i) \mathbf{w}_i|^2 + \sigma_n^2}, \quad (14)$$

em que $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{1 \times N}$ corresponde ao canal de comunicação entre o RIS e o k -ésimo usuário. $\mathbf{w}_k \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ é o vetor de *beamforming* para o usuário k [7].

A potência de ruído em sistemas de comunicação é calculada usando a fórmula fundamental para um canal de comunicação, sucintamente representada na Eq. (15):

$$\sigma_n^2 = 10^{\frac{N_0}{10} - 3} \text{BW}, \quad (15)$$

em que N_0 é a densidade espectral de potência de ruído, geralmente fixada em -204 dBm/Hz, refletindo o nível padrão de ruído térmico em uma temperatura ambiente ideal de aproximadamente 17°C . O parâmetro BW denota a largura de banda em Hertz (Hz). O termo 10^{-3} é usado para converter a potência de ruído de decibéis-miliwatts (dBm) para Watts, alinhando com a convenção na teoria de comunicação [8].

2) *Probabilidade de Interrupção*: A OP representa a probabilidade de interrupção do serviço devido à falha introduzida pelo canal desvanecido em manter uma SNR ou SINR acima do limiar mínimo, γ_{th} à entrada do receptor. Esta métrica serve como um índice para avaliar a robustez dos sistemas de telecomunicações móveis contra ruído e interferência. A OP pode ser expressa também pelo complemento da função densidade acumulativa (CDF - *cumulative density function*) e tem recebido considerável atenção em pesquisas acadêmicas, como em [9]. Esta métrica pode ser medida pela Eq. (16) e quantificada como a probabilidade de que a SINR permaneça abaixo de um limite especificado, expresso por:

$$P_{\text{out}} = \text{P}[\text{SINR}_{mc,k} \leq \gamma_{\text{th}}], \quad (16)$$

em que $\text{SINR}_{mc,k}$ denota uma realização das simulações Monte Carlo para extração do parâmetro médio SINR, com $mc \in [1, \text{MC}]$, sendo MC o número total de realizações Monte Carlo, para o usuário k e γ_{th} é o limite para o SINR que garante a manutenção da qualidade de serviço [10].

D. Otimização das fases dos elementos da RIS

Dois métodos foram explorados para otimizar os deslocamentos de fase nos N elementos da RIS. Ambas implementam a busca pela configuração ótima para as N defasagens contínuas capazes de simultaneamente maximizar a SINR (ou outra métrica de QoS) de todos os usuários. Além disso, as configurações consideram a região de campo próximo para todos os dispositivos (UE, RIS e BS). Ou seja, a distância entre os pontos Tx-Rx e por consequência as defasagens das réplicas do sinal que chegam até a antena do receptor é calculada considerando frente de onda esférica e sem aproximações trigonométricas, possibilitando uma maior acurácia no cálculo da defasagem do sinal incidente no n -ésimo elemento da RIS.

1) *Otimização via beamforming passivo (PBF)*: Este método utiliza uma abordagem analítica conforme documentada na literatura [11], [12] para configurar os N elementos da RIS. Baseando-se no conhecimento detalhado do canal, os ajustes são efetuados para alinhar as fases das componentes do sinal, de forma a maximizar a potência do sinal resultante na direção do local desejado, conforme apresentado na Eq. (17)

$$\Theta_k = \exp[-j \arg(\mathbf{w}_k^H \mathbf{G}^H \text{Diag}(\mathbf{H}_k))]. \quad (17)$$

Através desse processo, um deslocamento de fase coerente é aplicado, otimizando a potência recebida no k -ésimo terminal. Entretanto, é importante destacar que esta abordagem é adequada idealmente para cenários com único usuário (*single-user*). No entanto, identificar uma configuração ótima das defasagens para os N elementos da RIS que beneficie todos os usuários ativos no sistema continua sendo um desafio não resolvido na literatura.

2) *Busca singela local (naive local search - NLS)*: Neste método, o objetivo é encontrar uma solução próxima à ótima, mas que seja expedita e de baixa complexidade, visto que a solução ótima consumiria muito esforço computacional, tornando-se impraticável. Dessa forma, este método se faz eficaz na medida que encontra uma aproximação do resultado ótimo incrementando pequenos ajustes a uma solução inicial procurando por uma melhor resolução do problema com uma área local restrita de busca. Nesta estratégia, aplica-se o problema de otimização da maximização da mínima SINR [13], descrita por:

$$\begin{aligned} \max_{\Theta} \quad & \min_k \text{SINR}_k \\ \text{s.a.} \quad & |\exp(\theta_n)| = 1, \forall n \in \{1, \dots, N\}. \end{aligned} \quad (18)$$

Este é um problema recorrente ao se tratar da otimização em cenários M-MIMO auxiliado por RIS. De forma iterativa, o mecanismo de busca se aprimora com alterações a cada iteração na mudança dos ângulos das variáveis de decisão (Θ) e obedecendo a restrição para o ângulo de defasagem na RIS, alcançando uma resolução que seja satisfatoriamente ótima para o problema. A eficácia do método NLS em oferecer soluções quase-ótima é confirmada ao comparar a convergência de seus resultados com aqueles obtidos via busca exaustiva (ES). A busca ES, embora não seja factível em problemas de grande dimensão serve como *benchmark* ao estabelecer uma resolução refinada para confirmação de convergência de outros métodos. Essas comparações demonstraram que o

NLS alcançou melhorias significativas de desempenho com um número limitado de iterações no problema abordado [14].

III. RESULTADOS NUMÉRICOS E ANÁLISE

Utilizando os conceitos discutidos neste trabalho e aplicando os parâmetros detalhados na Tabela I, apresentam-se dois resultados gráficos. No primeiro, foi estabelecida a frequência da portadora em 12 GHz, situada no início da faixa de ondas milimétricas (*mmWave*), para avaliar o grau de confiabilidade média de todos os usuários envolvidos. No segundo, foram realizadas variações na frequência entre 1 GHz até 60 GHz, abrangendo as faixas de frequência sub-6GHz e *mmWave*. Para ambos os cenários, avaliam-se a SINR média dos 11 usuários que compartilham o canal simultaneamente, utilizando os métodos PBF (com diferentes combinadores na BS) e NLS (apenas com o combinador MMSE na BS).

TABELA I
PARÂMETROS DE CANAL E DE SISTEMA UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES

| Parâmetro | Valor(es) adotado(s) |
|--------------------------------------|---|
| Elementos RIS, N | 281 elementos |
| Antenas na BS, M | 421 antenas |
| Usuários móveis, K | 11 usuários |
| Simulações Monte-Carlo (MCS) | 500 realizações |
| Largura de Banda | 5% da frequência da portadora |
| Potência de transmissão | 100 mW |
| Posição fixa da RIS | centralizada em (0,20) com espaçamento de antenas de $\lambda/2$ |
| Posição fixa BS | centralizada em (-30, 42) com espaçamento de antenas de $\lambda/2$ |
| Posição Usuários | linearmente espaçados de 0 a 40 metros posicionados em -30 |
| Matriz do Canal RIS-UE, \mathbf{H} | Rayleigh |
| Matriz do Canal BS-RIS, \mathbf{G} | Rice, fator rice $\epsilon_{RB} = 3$ |

Na Figura 2, é observado que tanto o sistema M-MIMO sem auxílio da RIS quanto aquele com auxílio da RIS, configurada aleatoriamente, estão representadas pela linha azul e em ambos os modos a OP é sempre 100%, isto é, a interrupção de serviço sempre ocorre pois não conseguem atingir a SINR mínima aceitável em qualquer sistema de comunicação. O combinador MRC obteve um pequeno ganho de desempenho mostrado no gráfico de OP em sistemas com pouca exigência de SINR, próximo de 0.1 dB. No entanto, somente as técnicas NLS, e PBF (com combinadores MMSE e ZF) obtiveram ganhos expressivos de comunicação para garantir qualidade na comunicação em sistemas de comunicação mais exigentes, com SINR mínima de operação acima de 1.5 dB.

No gráfico da Figura 3 observa-se o comportamento da SINR da média dos usuários em função da frequência. Conforme a frequência aumenta, a SINR reduz proporcionalmente, visto que o fator de atenuação da potência do sinal desejado aumenta com a frequência (coerente com a formulação da perda de percurso e com a teoria de ondas eletromagnéticas). Embora a capacidade de transmissão seja mais elevada em altas frequências com largura de banda mais ampla, a distância que o sinal abrange é cada vez mais limitada em termos de QoS. Além disso, a comparação entre os métodos se mostra interessante à medida que três das sete curvas têm atuações similares, o que os torna eficientes, lembrando que o método

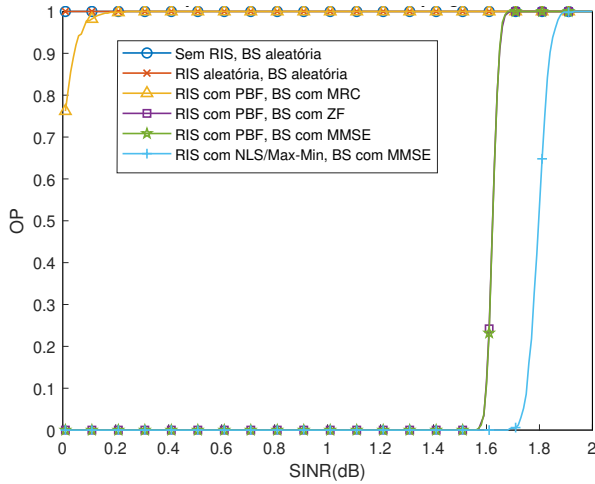


Fig. 2. Comparação da OP das diferentes técnicas utilizadas.

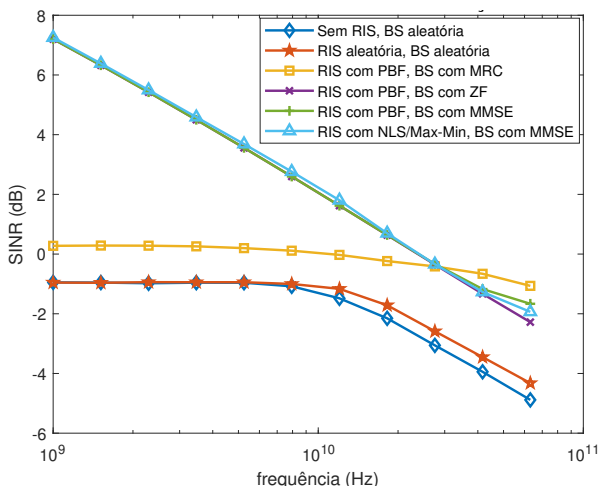


Fig. 3. SINR de diferentes métodos alterando a frequência da portadora.

NLS se aproxima de uma busca exaustiva, adotando intervalos onde é encontrada uma solução muito próxima da ótima.

Outro aspecto relevante é a necessidade de ajustar as dimensões da RIS e da BS para diferentes faixas espectrais, visto que o espaçamento ótimo entre os elementos da antena deve ter a metade do comprimento de onda da portadora. Com este resultado, obtém-se uma visão exploratória do comportamento do sistema operando em diferentes frequências da portadora. Desta forma, pretende-se expandir a análise para encontrar uma expressão que correlacione o cenário proposto com a frequência da portadora e com o número mínimo de elementos (dimensão) na RIS e na BS, proporcionando um projeto integrado de QoS e eficiência energética em função da frequência da portadora.

IV. CONCLUSÃO

Este estudo explora sistemas M-MIMO auxiliados por RIS, visando otimizar a SINR em ambientes urbanos densos. Por meio de simulações computacionais e formulações analíticas analisaram-se as configurações típicas de cidades de médio e grande porte, com dois edifícios separados por uma avenida. No topo de um dos edifícios foi alocada uma BS. Enquanto na lateral do outro edifício foi posicionada a RIS, e considerados

os canais de comunicação Rayleigh e Rice, que se adequam ao cenário proposto. Os resultados mostraram que a OP foi significativamente reduzida com a aplicação dos métodos NLS e PBF. Observou-se que, apesar da redução da SINR com o aumento da frequência, a eficácia da RIS se manteve em altas frequências, como 12 GHz, indicando robustez mesmo em condições de propagação quase *mmWave*. As simulações também confirmaram melhorias substanciais na QoS com a implementação de estratégias de otimização, reduzindo a interferência entre usuários e destacando o potencial da RIS para futuras redes B5G e 6G em cenários urbanos complexos. Como perspectivas futuras para este trabalho, planejam-se atualizações para expandir as simulações em superfícies planares na RIS e BS; introduzir aleatoriedade ao posicionamento dos usuários em cenários dinâmicos; explorar novos métodos para otimização das defasagens dos elementos da RIS; ajuste das dimensões físicas da RIS e BS para manter a QoS em níveis adequados para diferentes valores de frequência.

REFERÊNCIAS

- [1] Y. L. Lee, D. Qin, L.-C. Wang, and G. H. Sim, "6G Massive Radio Access Networks: Key Applications, Requirements and Challenges," *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, vol. 2, pp. 54–66, 2021.
- [2] T. Huang, W. Yang, J. Wu, J. Ma, X. Zhang, and D. Zhang, "A Survey on Green 6G Network: Architecture and Technologies," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 175 758–175 768, 2019.
- [3] B. Zong, C. Fan, X. Wang, X. Duan, B. Wang, and J. Wang, "6G Technologies: Key Drivers, Core Requirements, System Architectures, and Enabling Technologies," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 18–27, 2019.
- [4] M. Z. Chowdhury, M. Shahjalal, S. Ahmed, and Y. M. Jang, "6G Wireless Communication Systems: Applications, Requirements, Technologies, Challenges, and Research Directions," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 957–975, 2020.
- [5] G. Fodor, N. Rajatheva, W. Zirwas, L. Thiele, M. Kurras, K. Guo, A. Tolli, J. H. Sørensen, and E. d. Carvalho, "An Overview of Massive MIMO Technology Components in METIS," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 6, pp. 155–161, 2017.
- [6] E. Björnson, L. Sanguinetti, H. Wymeersch, J. Hoydis, and T. L. Marzetta, "Massive MIMO is a reality—What is next? Five promising research directions for antenna arrays," *Digital Signal Processing*, vol. 94, pp. 3 – 20, 2019, special Issue on Source Localization in Massive MIMO. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1051200419300776>
- [7] E. Björnson, J. Hoydis, and L. Sanguinetti, *Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency*, ser. Foundations and trends in signal processing. Now Publishers, 2018. [Online]. Available: <https://books.google.com.br/books?id=ekHYswEACAAJ>
- [8] S. Haykin, *Communication Systems, 3Rd Ed.* Wiley India Pvt. Limited, 2008.
- [9] M. Yacoub., *Foundations of Mobile Radio Engineering.* CRC-Press, 1993.
- [10] Q. Ding and Y. Jing, "Outage probability analysis and resolution profile design for massive mimo uplink with mixed-adc," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 9, pp. 6293–6306, 2018.
- [11] W. de Souza Junior and T. Abrao, "Ris-aided cooperative fd-swipt-noma outage performance in nakagami-*m* channels," *arXiv: 2204.01900*, 2022.
- [12] Q. Sun, H. Liu, S. Yan, T. A. Tsiftsis, and J. Yuan, "Joint receive and passive beamforming optimization for ris-assisted uplink rsma systems," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 12, no. 7, pp. 1204–1208, 2023.
- [13] A. Papazafeiropoulos, P. Kourtessis, and S. Chatzinotas, "Max-min sinr analysis of star-ris assisted massive mimo systems with hardware impairments," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, pp. 1–1, 2023.
- [14] J. Hromkovič, *Algorithmics for Hard Problems: Introduction to Combinatorial Optimization, Randomization, Approximation, and Heuristics*, ser. Texts in Theoretical Computer Science. An EATCS Series. Springer Berlin Heidelberg, 2013.