

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/361886514>

# Superfícies Inteligentes Reconfiguráveis: Princípios de Funcionamento, Modelos de Propagação e Cenários de Aplicação

Preprint · July 2022

DOI: 10.13140/RG.2.2.33955.53283

CITATIONS

0

READS

451

7 authors, including:



**Evandro Cesar Vilas Boas**

Instituto Nacional de Telecomunicações

45 PUBLICATIONS 104 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Felipe Augusto Pereira de Figueiredo**

Instituto Nacional de Telecomunicações - INATEL

204 PUBLICATIONS 1,006 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

# Superfícies Inteligentes Reconfiguráveis: Princípios de Funcionamento, Modelos de Propagação e Cenários de Aplicação

André Luís Oppenheimer Marques, Gabriel Carvalho Mendes, Gabriela Costa Fernandes, Rebeca Silva Gonçalves,  
Evandro C. Vilas Boas e Felipe A. P. de Figueiredo

**Abstract** New technologies, applications, and services demand high throughput, robustness, reliability, massive connections support, and low latency. This quality of service (QoS) requirements imply the redefinition of networks and wireless communication systems. However, the mobile network does not exploit the maximum channel capacity due to the effects of signal propagation in free space. Therefore, it is necessary to improve wireless communication through the evolution of the current systems by adding new technologies such as reconfigurable intelligent surfaces (RIS). RIS comprises surface arranged elements used to control impinging signal's phase and amplitude towards a pre-defined direction, allowing mitigating propagation effects such as attenuation and multipath propagation phenomena. This article presents a study about RIS-related aspects such as operation principles, propagation models, and potential applications scenarios. First, it highlights the metasurface basic concepts and their limitations related to implementation. Second, the propagation models are discussed and compared concerning their parameters. Finally, some RIS application scenarios are described.

**Keywords**—6G, wireless communication, propagation, Reconfigurable Intelligent Surfaces, RIS.

**Resumo** Os avanços tecnológicos, novas aplicações e serviços esperados para as redes de próxima geração demandam por maior vazão, robustez, confiabilidade, suporte a um maior número de conexões e baixa latência. Esses requisitos implicam em uma redefinição das redes cabeadas e sistemas de comunicação sem fio. Os sistemas de comunicação móveis existentes, geralmente, não aproveitam a máxima capacidade do canal devido aos efeitos oriundos da propagação do sinal no espaço livre. Dessa forma, é necessário aperfeiçoar a comunicação sem fio agregando novas tecnologias. Dentre elas, citam-se as superfícies inteligentes reconfiguráveis (*reconfigurable intelligent surfaces*, RIS). As RIS são superfícies compostas por dispersores que permitem alterar a fase e a amplitude do sinal incidente para controlar a sua direção de propagação, mitigando efeitos como atenuação e múltiplos percursos. Neste artigo, abordam-se aspectos relacionados aos princípios de funcionamento, modelos de propagação e potenciais aplicações para as RIS. Destacam-se as características de construção e limitações relacionadas à implementação. Discutem-

se e comparam-se os modelos de propagação em relação aos seus parâmetros. Descrevem-se cenários de aplicações das RIS, evidenciando suas vantagens para sistemas de sexta geração (*6th Generation*, 6G).

**Palavras-Chave**—6G, comunicação sem fio, propagação, Superfícies Inteligentes Reconfiguráveis, RIS.

## I. INTRODUÇÃO

Sistemas de comunicação sem fio são indispensáveis para a sociedade atual. Entre 2020 e 2030, estima-se que o tráfego de dados IP (*Internet Protocol*) aumentará em 55% ao ano, alcançando 5.086 exabytes e taxas de transmissão de dados próximas de 1 Tbps [1]. Por outro lado, as tecnologias atuais deverão atender a uma maior demanda por segurança, baixa latência e alta confiabilidade [1], [2]. O desenvolvimento dos sistemas de quinta geração (5G, *5th Generation*) e das futuras redes de sexta geração (6G, *6th Generation*) proporcionará melhor suporte às aplicações como realidade virtual, gêmeos digitais, projeções holográficas, sistemas autônomos, entre outras tecnologias [3], [4].

Para isso, visa-se a exploração de faixas de alta frequência com maior disponibilidade de banda para ofertar maior vazão e atender aos requisitos de qualidade de serviço (QoS, *Quality of Service*) dessas aplicações como, por exemplo, a faixa de 28GHz que oferece uma banda disponível de 850Mhz, a faixa de 39GHz que oferece 1.6GHz e 1.4GHz de banda e a faixa de 73GHz que oferece uma largura de banda de 2GHz. Contudo, em frequências altas, tem-se maior atenuação e intensificação de outros mecanismos de propagação, entre outros problemas enfrentados ao explorar frequência altas [5].

Em um meio de comunicação sem fio, observa-se a presença de um conjunto de objetos físicos que afetam a propagação das ondas eletromagnéticas entre transmissor e receptor [6]. A distribuição desses objetos introduz mecanismos de dispersão (reflexão, refração, difração e espalhamento) que modificam a propagação da onda eletromagnética, resultando em um aumento do número de percursos entre os dispositivos de origem e destino [7]. A geometria, o posicionamento, e a composição dos objetos definem as características de propagação, cujo comportamento é aleatório [7]. Além disso, a onda eletromagnética sofre atenuações caracterizadas pelo espalhamento

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL), como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia de Telecomunicações. Aprovado em 13/12/2021 pela comissão julgadora: Prof. Dr. Felipe Augusto Pereira de Figueiredo (INATEL) – Orientador e Presidente da Comissão Julgadora, Eng. MSc. Evandro César Vilas Boas (INATEL) – Co-orientador e Membro da Comissão Julgadora, Prof. Dr. Rausley Adriano Amaral de Souza (INATEL) – Membro da Comissão Julgadora e Prof. Dr. Jorge Ricardo Mejia Salazar (INATEL) – Membro da Comissão Julgadora. Coordenador do Curso de Engenharia de Telecomunicações: Prof. MSc. Marcelo de Oliveira Marques.

da potência no espaço livre e absorção por gases atmosféricos [7]. A atenuação limita o alcance do enlace entre transmissor e receptor(es) [7]. A dispersão de ondas eletromagnéticas resulta em flutuações aleatórias na potência do sinal recebido, cujo fenômeno é conhecido como desvanecimento. [6]

As superfícies inteligentes reconfiguráveis (RIS, *reconfigurable intelligent surfaces*) foram propostas com o objetivo de reduzir o consumo de energia e melhorar a eficiência espectral dos sistemas de comunicação sem fio [4]. A RIS permite a reconfiguração da direção de propagação da onda eletromagnética por meio do controle da amplitude e fase dos sinais incidentes em sua superfície, redirecionando-os para uma posição previamente determinada do espaço (uma segunda RIS ou um receptor). Dessa forma, reduzem-se os efeitos de dispersão do ponto de vista do receptor.

Este artigo tem como objetivo realizar um estudo sobre as RIS em relação aos seus princípios de funcionamento, modelos de propagação e potenciais cenários de aplicação. Estruturou-se o trabalho em cinco seções. Na seção II, abordam-se os princípios de funcionamento de uma RIS. Apresentam-se aspectos relacionados às características dos metamateriais, sua relação na formação de metassuperfícies e aplicações na construção de RIS [8]. Citam-se as leis generalizadas de reflexão e refração como meios para a compreensão do princípio de funcionamento das RIS [9]. Discutem-se algumas limitações teóricas e construtivas para a análise das RIS. Na seção III, apresentam-se e comparam-se diferentes modelos de propagação propostos para as RIS [2], [10]–[13]. Os conjuntos de parâmetros incluídos em cada modelo determinam abordagens simplificadas e complexas.

Na seção IV, abordam-se potenciais cenários de aplicações para as RIS [4], [14], [15]. Considera-se o uso das RIS em cenários de obstrução para prover enlaces de propagação alternativos e não obstruídos entre o transmissor e o receptor. Aplicações para cenários em que o canal sem fio é utilizado para transmissão de informações sigilosas, permitindo estabelecer um perímetro de propagação e evitando a interceptação por terceiros. Expande-se esse cenário, em específico, para casos em penitenciárias, evitando a comunicação de aparelhos móveis com as estações rádio base. Dessa forma, inviabiliza o contato dos detentos com civis exteriores, independentemente do objetivo da comunicação. Demonstra-se como as RIS podem ser aplicadas em cenários de interferências em região de sobreposição de cobertura de estações rádio base distintas para telefonia móvel. Assim como, seu uso na implementação de comunicações diretas entre dispositivos (D2D, *device to device*). Esse tipo de comunicação é útil quando os canais de transmissão estão sobrecarregados, gerando uma nova via para a comunicação direta entre usuários. Em Internet das Coisas (IoT, *Internet of Things*), as RIS permitem melhorar os níveis de potência do sinal de recepção em cenários específicos. Por fim, aborda-se o uso de RIS na implementação de sistemas empregando o múltiplo acesso não-ortogonal (NOMA, *Non-Orthogonal Multiple Access*). Nesse cenário, a RIS manipula o sinal incidente, que chega da estação base, e divide esse sinal em vários outros, onde cada sinal se refere à mensagem destinada a cada usuário. Isso é feito através dos elementos passivos da RIS, que manipulam a matriz de coeficientes de

reflexão, indicando para qual usuário a mensagem deve ser enviada [16]. Para facilitar a alta complexidade computacional que a RIS necessita, sugere-se a Inteligência Artificial para potencializar o desempenho do sistema em tempo real, com um sistema de aprendizado automático. Na seção V, apresentam-se os comentários e conclusões finais.

## II. PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

Nesta seção, abordam-se os princípios de funcionamento de uma RIS. Definem-se os metamateriais e suas principais características, apresentam-se as metassuperfícies como uma derivação bidimensional (2D) dos metamateriais, discute-se o princípio de operação por meio das leis generalizadas de reflexão e refração e particularizam-se os modos de operação em campo próximo e campo distante. Por fim, citam-se limitações teóricas e de implementação.

### A. Metamateriais e metassuperfícies

Metamateriais são materiais sintéticos que apresentam propriedades únicas como valores negativos para índice de refração, permissividade elétrica e permeabilidade magnética em determinadas bandas de frequência [8], [17]–[19]. Estruturas compostas por metamateriais formados por pequenos dispersores com tamanho físico médio ( $p$ ) menor que  $1/10$  do comprimento de onda relacionado à onda incidente no material ( $\lambda_i$ ), podem ser caracterizadas como um meio efetivamente homogêneo. [20], [21]. Esses materiais são utilizados em inúmeras aplicações como, por exemplo, na construção de ressonadores e antenas [18], [19], [22]–[24].

A implementação de dispositivos baseados em metamateriais demonstra-se volumosa e de baixa eficiência [21]. Portanto, compactam-se os elementos de um metamaterial, resultando em estruturas bidimensionais formadas por elementos criteriosamente posicionados em um padrão matricial (Figura 1). Denominam-se essas estruturas de metassuperfícies, metafilmes ou metamateriais de camada única [25]. Como pode-se observar na Figura 2, quanto maior o número de níveis de quantização, menor a diferença entre a fase exata e a fase quantizada. A quantidade de níveis de quantização de fase de uma RIS é definida pela quantidade de elementos ( $N$ ) de uma metassuperfície. Essa relação advém do fato de que um único elemento apresenta fase constante. Portanto, uma RIS com um maior número de elementos proporciona melhor resolução no controle de fase da onda eletromagnética incidente em relação a um segundo modelo com menor quantidade de elementos [11], [20], [21].

As metassuperfícies constituem a base para o projeto de uma RIS e seu comportamento pode ser caracterizado pela polarização elétrica e magnética de seus dispersores [26].

### B. Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento das RIS pode ser descrito por meio das leis generalizadas de Snell para reflexão e refração que derivam do Princípio de Fermat [9], [12], [27]. A Lei da reflexão estabelece que o raio de luz incidente e o raio de luz refletido pertencem a um mesmo plano e têm o mesmo

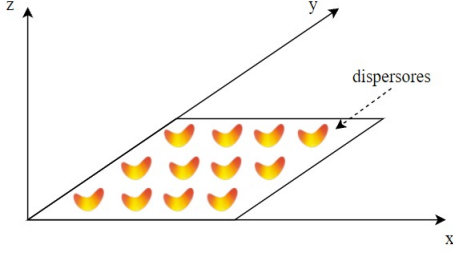


Figura 1: Disposição de dispersores bidimensionais em uma superfície para a formação de uma metassuperfície.

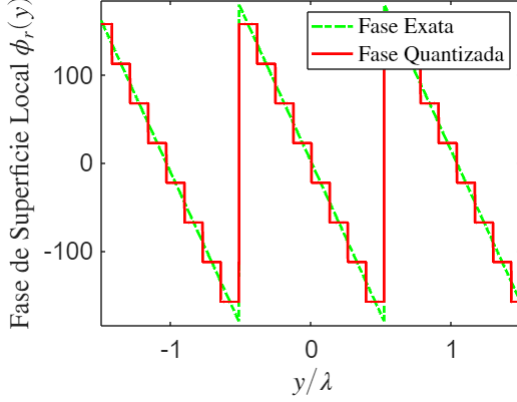


Figura 2: Quantização de fase para uma RIS. Parâmetros:  $\theta_i = 0^\circ$ ,  $\theta_r = 75^\circ$ .

ângulo em relação à normal ( $\theta_i = \theta_r$ , sendo  $\theta_i$  o ângulo do raio incidente e  $\theta_r$  o ângulo do raio refletido em relação à normal do plano) [9]. A Lei de Snell para refração considera que o raio de luz incidente e o raio de luz refratado pertencem ao mesmo plano, cuja relação entre os ângulos de incidência e refração  $\theta_{\text{rfr}}$  é dada por [9]:

$$n_i \times \sin(\theta_i) = n_r \times \sin(\theta_{\text{rfr}}) \quad (1)$$

onde  $n_i$  é o índice de refração do meio incidente e  $n_r$  é o índice de refração do meio refratado.

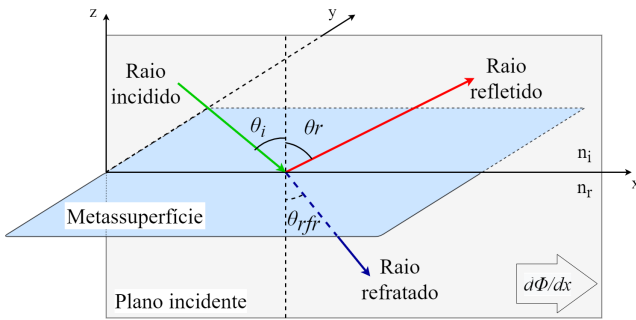


Figura 3: Reflexão e refração em uma metassuperfície.

Diferente dos materiais disponíveis na natureza, que tem seus fenômenos de reflexão e refração descritos pelas leis citadas acima, pode-se descrever os fenômenos de reflexão e refração nas metassuperfícies por meio da lei de Snell generalizada,

derivada da relação entre o Princípio de Fermat e equações de Maxwell [9], [12], [27]. Define-se a lei de Snell generalizada como um estudo da trajetória seguida por um raio de luz monocromático que se propaga em um meio com índice de refração variável. Logo, obtêm-se as seguintes relações [12]:

$$\theta_i = \arcsin \left[ \sin \theta_i + \frac{\lambda}{(2\pi n_i)} \times \frac{d\phi}{dx} \right] \quad (2)$$

$$\theta_r = \arcsin \left[ \frac{n_i}{n_r} \sin \theta_i + \frac{\lambda}{2\pi n_i} \frac{d\phi}{dx} \right] \quad (3)$$

Em (2) e (3), observa-se a dependência de  $\theta_i$  e  $\theta_r$  em relação ao comprimento de onda ( $\lambda$ ), os índices de refração dos meios e do gradiente de descontinuidade de fase ( $\frac{d\phi}{dx}$ ). O gradiente de descontinuidade de fase possibilita o controle da refração e reflexão das ondas eletromagnéticas que incidem na metassuperfície, com isto à refração e a reflexão podem ser consideradas anômalas como na (Figura 3) [12], [28], [29].

### C. Operação em campo próximo e distante

As RIS podem operar em regime de campo próximo e distante. A fronteira entre essas regiões é definida por [30]:

$$r = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (4)$$

sendo  $D$  a maior dimensão do elemento irradiador. Definem-se a região de campo próximo para distâncias entre transmissor e receptor inferiores a  $r$  e campo distante para distâncias superiores a esse valor.

Em geral, a diferença essencial entre a região de campo próximo e a região de campo distante é como a densidade de potência muda com a distância [12]. Com o auxílio de uma RIS, o sinal pode ser aprimorado tanto no regime de campo próximo quanto no regime de campo distante. Para aplicações de campo próximo, espera-se que a RIS combine construtivamente o sinal recebido, de modo a aumentar a intensidade do sinal que será transmitido para usuários localizados em locais alvo em relação à RIS. Para aplicações de campo distante, espera-se que a RIS aumente a intensidade do sinal para usuários localizados em ângulos específicos com respeito à RIS. [12], [31], [32].

### D. Limitações das RIS

No projeto e configuração de uma RIS, verificam-se limitações teóricas e de implementação que afetam o desempenho geral do sistema resultante. As limitações teóricas resultam de suposições simplificadas, como a análise da interação da RIS com a onda eletromagnética pela perspectiva da óptica geométrica. Mesmo que essa perspectiva resulte em projetos eficazes, ainda é preferível analisar esta interação pela perspectiva da óptica física [33], [34]. As limitações de implementação resultam principalmente das características da *hardware*, como o número de elementos que é possível integrar no substrato e consequentemente a quantidade de níveis de quantização das mudanças de fase da RIS [35]–[38]. Avaliam-se essas limitações durante o projeto para que não afetem significativamente a configuração final da RIS.

### III. MODELOS DE PROPAGAÇÃO

Nesta seção, abordam-se e comparam-se diferentes modelos de propagação relacionados ao uso de RIS e discutem-se suas limitações. Inicialmente, considera-se um modelo de propagação de dois raios (um em visada direta e outro em visada não direta, oriundo de reflexão) sem o uso de RIS para evidenciar a redução significativa da potência do sinal recebido [3]. Acrescenta-se um único elemento para controlar a fase do raio refletido e garantir a sua soma construtiva no receptor para prover níveis de potência de recepção idênticos a um único raio de visada direta [3], [12]. Dessa forma, evidencia-se a vantagem do uso de RIS em um sistema de comunicação. Posteriormente, generaliza-se o modelo para  $N$  elementos [3]. Além disso, estudam-se outros dois modelos de propagação em enlaces de visada não direta em cenários complexos em relação ao primeiro, considerando parâmetros como as características das antenas de transmissão e recepção [2], [10]–[13].

#### A. Modelo de propagação de dois raios

Na Figura 4, considera-se um modelo de propagação de dois raios, que representam a propagação em visada direta e não direta por reflexão no solo no ponto  $G$  [3]. O sinal em visada direta percorre uma distância  $l$  entre transmissor e receptor posicionados respectivamente a uma altura  $h_t$  e  $h_r$  do solo. O sinal refletido percorre uma distância maior, resultante da soma das distâncias  $r_1$  e  $r_2$  do transmissor e receptor em relação ao ponto  $G$ , nessa ordem. Portanto, tem-se uma diferença de propagação entre os dois sinais.

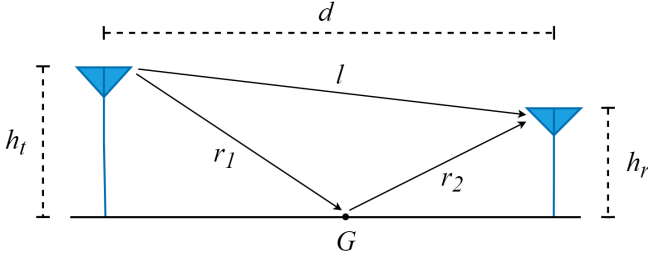


Figura 4: Modelo de propagação de dois raios.

Sendo  $x(t)$  o sinal complexo transmitido e  $\tau$  o atraso entre o raio refletido e o raio da visada direta, assume-se que  $x(t) \approx x(t - \tau)$  pois este modelo considera sinais transmitidos em banda estreita [3]. Em um cenário que considera o raio refletido e o raio por visada direta, desconsiderando ruído e admitindo que  $R$  é o coeficiente de reflexão, cujo valor depende das propriedades do material e da polarização da onda, o sinal recebido é dado por:

$$r(t) = \frac{\lambda}{4\pi} \left( \frac{e^{-j\frac{2\pi l}{\lambda}}}{l} + \frac{R \times e^{-j\frac{2\pi(r_1+r_2)}{\lambda}}}{r_1 + r_2} \right) x(t). \quad (5)$$

Nota-se que o sinal recebido é igual ao sinal transmitido pelo enlace de visada direta com um atraso de fase de  $(2\pi l)/\lambda$  somado ao sinal refletido pelo solo, cujo atraso é de  $2\pi(r_1 +$

$r_2)/\lambda$  [3]. Logo, a diferença de fase entre as componentes recebidas é dada por:

$$\Delta\phi = 2\pi(r_1 + r_2 - l)/\lambda. \quad (6)$$

Aplicando (6) em (5) e considerando o cálculo da potência do sinal recebido, tem-se:

$$P_r = P_t \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \frac{1}{l} + \frac{R \times e^{-j\Delta\phi}}{r_1 + r_2} \right|^2, \quad (7)$$

sendo  $P_t$  a potência de transmissão [3]. Considerando que transmissor e receptor estejam a uma distância demasiadamente grande, ou seja,  $(d \gg h_t + h_r)$ , admite-se  $R \approx -1$  e  $d \approx l \approx r_1 + r_2$  [3]. Logo, a potência recebida é inversamente proporcional à quarta potência de  $d$ :

$$P_r \propto P_t \left( \frac{1}{d^2} \right)^2. \quad (8)$$

Em um cenário em que há apenas a propagação por linha de visada direta, a potência recebida decai com o quadrado de  $d$ :

$$P_r = P_t \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2. \quad (9)$$

Ao comparar (8) e (9) em um cenário sem ruído e mobilidade do usuário, verificam-se menores níveis de potência recebida para o caso com a reflexão do solo devido à ausência de mecanismos para controle de fases da onda refletida.

Considerando o posicionamento de uma RIS com um único elemento no ponto  $G$  do cenário indicado na Figura 4, pode-se implementar o controle de fase do sinal refletido e garantir a soma construtiva dos sinais no receptor [3]. Nesse caso, considera-se que a RIS possua dimensões superiores ao comprimento de onda do sinal transmitido. Logo, ao adotar  $R = e^{j\Delta\phi}$  e  $d \approx l \approx r_1 + r_2$ , a potência dos sinais recebidos é calculada por:

$$P_r = P_t \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \frac{1}{l} + \frac{1}{r_1 + r_2} \right|^2 \approx 4P_t \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2. \quad (10)$$

Por meio de (10), conclui-se que a potência dos sinais recebidos é inversamente proporcional ao quadrado de  $d$  devido ao controle de fase do sinal refletido obtido por meio do elemento da RIS. Essa relação é a mesma obtida para um enlace de visada direta. Dessa forma, demonstra-se que a reflexão da onda eletromagnética pode ser controlada com o intuito de prover um melhor nível de potência recebida no receptor.

Para o mesmo sistema apresentado na Figura 4, posiciona-se uma RIS composta por  $N$  elementos discretos no ponto  $G$ . Cada elemento é capaz de controlar a fase do sinal refletido em sua superfície de modo que os sinais sejam combinados construtivamente no receptor. Logo, a potência recebida é dada por:

$$P_r = P_t \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \frac{1}{l} + \sum_{i=1}^N \frac{R_i \times e^{-j\Delta\phi_i}}{r_{1,i} + r_{2,i}} \right|^2, \quad (11)$$

sendo  $i$  é o índice do  $n$ -ésimo elemento da RIS. Novamente, adotam-se as condições  $R = e^{j\Delta\phi}$  e  $d \approx l \approx r_{1,i} + r_{2,i}$  e a potência recebida é dada por:

$$P_r \approx (N+1)^2 P_t \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2. \quad (12)$$

Conclui-se que o ganho da potência recebida em um enlace auxiliado por uma RIS com  $N$  elementos é proporcional ao quadrado de seu número de elementos, enquanto a relação entre  $P_r$  e  $d$  é preservada [3]. Na Figura 5, compara-se a potência recebida em função da distância entre transmissor e receptor para um cenário sem uso de RIS, uma RIS com 1, 10 e 50 elementos. Para um enlace sem o uso de RIS, tem-se um nível de potência de recepção inferior aos demais cenários, evidenciando o uso das RIS para melhorias nas condições de recepção de um sinal.

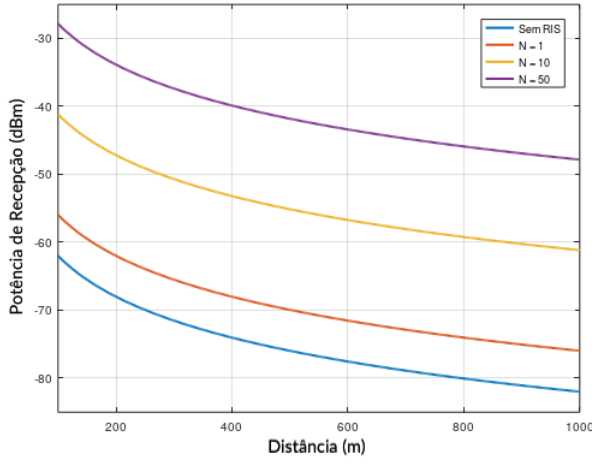


Figura 5: Potência de recepção em função da distância para um cenário sem uso de RIS, um RIS com 01, 10 e 50 elementos. Parâmetros:  $c = 3.10^8$  m/s,  $f = 30$  GHz,  $\lambda = c/f$ ,  $P_t = 10$  W.

Ressalta-se que o modelo de propagação de dois raios não considera a otimização das fases, o conhecimento exato das fases na RIS, o tamanho e a dimensão dos elementos reflexivos, os ângulos de incidência e reflexão e o diagrama de radiação anisotrópico de antenas transceptoras [10].

#### B. Modelo de propagação em enlaces de visada não direta

Em [39], propõe-se um modelo de propagação sem enlace de visada direta entre transmissor e receptor, como mostrado na Figura 6.  $r_1$  representa a distância entre o transmissor e a RIS e  $r_2$  denota a distância entre a RIS e o receptor. Nesse modelo, considera-se  $\rho$  como o coeficiente de reflexão de todos elementos reflexivos de uma RIS, o ganho da antena no transceptor ( $G_c$ ) e os diagramas de radiação das antenas de transmissão ( $F(\theta_t, \phi_t)$ ) e recepção ( $F(\theta_r, \phi_r)$ ) em campo distante [10]:

$$P_r \propto G_c N^2 P_t \left( \frac{\lambda}{4\pi r_1 r_2} \right)^2 \left( \frac{\rho^2 F(\theta_t, \phi_t) F(\theta_r, \phi_r)}{4\pi} \right). \quad (13)$$

onde  $\theta_t$  e  $\theta_r$  denotam ângulos de elevação e  $\phi_t$  e  $\phi_r$  representam ângulos de azimute. Em (13), ratifica-se que as antenas de

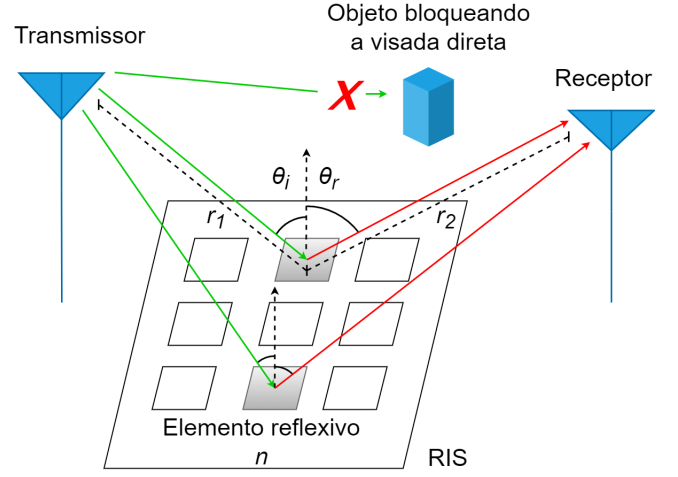


Figura 6: RIS com  $N$  metassuperfícies e sem visada direta.

transmissão e recepção podem ser distintas. Esse modelo também não inclui a otimização das fases, o conhecimento exato das fases na RIS, o tamanho e a dimensão dos elementos reflexivos.

Nota-se que a potência recebida em (11) e (13) é proporcional ao quadrado do número de elementos. Em (13), verifica-se o uso do produto das distâncias:

$$P_{r,i} \propto \frac{1}{r_1 r_2}, \quad (14)$$

Enquanto, em (11) há o uso da soma das distâncias. A soma das distâncias é utilizada para modelos em campo próximo. Já em um campo distante, utiliza-se o produto das distâncias. Portanto, nota-se que o modelo de dois raios é válido para operação em regime de campo próximo, enquanto o modelo de propagação descrito nessa seção se adequa à operação em campo distante [10].

A potência recebida em cada elemento reflexivo sofre duas atenuações que são multiplicadas [2], gerando uma perda maior do que o modelo que utiliza a soma das distâncias. Portanto, na prática deve ser utilizado um grande número de elementos para compensar as perdas de potência oriundas de cada elemento ao projetar o sinal recebido para alcançar ganhos altos de formação de feixes passivos.

#### C. Modelo de propagação em enlaces de visada não direta considerando o ângulo de observação

Na Figura 7, apresenta-se o modelo de propagação em enlace de visada não direta similar ao discutido na Figura 6. Contudo, esse modelo introduz um ângulo de observação ( $\theta_s$ ), que permite definir a potência de recepção em diferentes perspectivas. Admite-se uma placa condutora retangular com tamanho  $a \times b$  e espessura desprezível. Não consideram-se erros de quantização, efeitos de acoplamento nas perdas da superfície e a visada direta em seus cálculos. Para este modelo, admite-se que  $\theta_s = \theta_r$  para uma magnitude máxima [11] e considera-se a densidade de potência que irradia em uma direção de observação  $\theta_s$ , dada por:



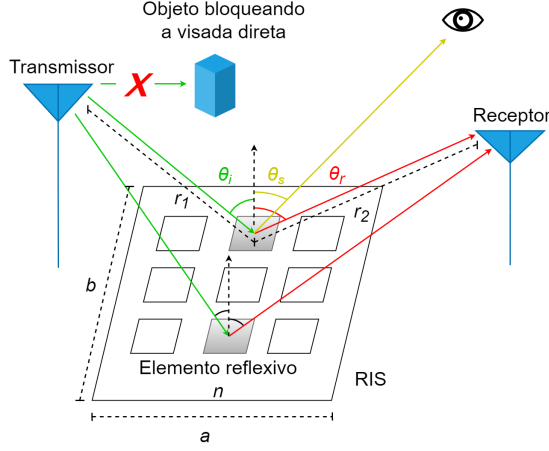


Figura 7: RIS com  $N$  metassuperfícies, sem visada direta e com ângulo de observação.

$$S_{\text{RIS}}(r_2, \theta_s, E_i^2) = \frac{E_i^2 \cos^2(\theta_i)}{r_2^2} \left( \frac{\sin(\frac{\pi b}{\lambda} \sin(\theta_s) - \sin(\theta_r))}{\frac{\pi b}{\lambda} \sin(\theta_s) - \sin(\theta_r)} \right)^2. \quad (15)$$

Em uma região de campo distante  $r_2 \geq \frac{2\max(a^2, b^2)}{\lambda}$  será considerada a relação:  $\frac{E_i^2}{2\eta} = \frac{P_t G_t}{4\pi r_1^2}$  sendo  $G_t$  o ganho da antena do transmissor,  $\eta$  a impedância característica do ar (377 Ohms) e  $G_r$  o ganho da antena de recepção [11]. Logo, pode-se calcular a potência de recepção  $P_r$ , no qual leva em conta a área efetiva da antena receptora  $\frac{G_r \lambda^2}{4\pi}$  e a densidade de potência irradiada:

$$P_r(P_t, r_1, r_2, \theta_s) = \frac{G_r \lambda^2}{2\eta 4\pi} S_{\text{RIS}} \left( r_2, \theta_s, \frac{P_t G_t \eta}{2\pi r_1^2} \right). \quad (16)$$

Por meio de (16), define-se a atenuação no enlace [11]:

$$\begin{aligned} \beta_{\text{RIS}}(r_2, r_1, \theta_s) &= \frac{P_r(P_t, r_1, r_2, \theta_s)}{P_t} \\ &= G_t G_r \left( \frac{ab}{r_1 r_2 4\pi} \right)^2 \cos^2(\theta_i) \left( \frac{\sin(\frac{\pi b}{\lambda} \sin(\theta_s) - \sin(\theta_r))}{\frac{\pi b}{\lambda} \sin(\theta_s) - \sin(\theta_r)} \right)^2. \end{aligned} \quad (17)$$

Na Figura 8, tem-se a atenuação  $\beta_{\text{RIS}}$  em função do ângulo de observação  $\theta_s$  para uma RIS com diferentes dimensões. Nota-se que a largura do feixe principal reduz à medida que a área  $a \times b$  aumenta. Para  $\theta_s = \theta_r$ , obtêm-se a magnitude máxima para  $a = b = 50\lambda$ . Porém, a RIS apresenta um comportamento semelhante a um espalhamento difuso para  $a = b = \lambda/2$  [11].

Sendo  $N_a$  a quantidade de elementos em  $a$  e  $N_b$  em  $b$ , considera-se que o tamanho de um elemento reflexivo de uma RIS tem o tamanho  $(a/N_a) \times (b/N_b)$ , e que cada dimensão tem um valor menor ou igual ao comprimento de onda [11]. Logo, a atenuação entre o transmissor e o receptor em um elemento  $n$ , é dada por:

$$\beta_{\text{RIS}}^s(r_2, r_1, \theta_r) = G_t G_r \left( \frac{ab}{r_1 r_2 N_a N_b 4\pi} \right)^2 \cos^2(\theta_i). \quad (18)$$

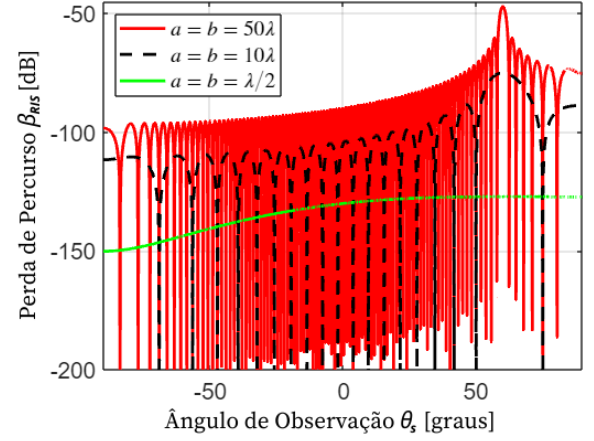


Figura 8: A perda de percurso de um sinal refletido pela RIS. Parâmetros:  $\theta_i = 30^\circ$ ,  $\theta_r = 60^\circ$ ,  $G_t = G_r = 5\text{dB}$ ,  $r_1 = 50\text{m}$ ,  $r_2 = 25\text{m}$ .

Considerando que a fase de superfície local dos  $N$  elementos é estabelecida para obter uma soma construtiva dos sinais no receptor, a perda de percurso entre o transmissor e o receptor pela RIS com todas suas metassuperfícies é calculada por:

$$\left( N \sqrt{\beta_{\text{RIS}}^s(r_2, r_1, \theta_r)} \right)^2 = \beta_{\text{RIS}}(r_2, r_1, \theta_s). \quad (19)$$

Logo, pode-se dizer que uma RIS age como um arranjo de dispersores difusos (cada um com dimensão menor do que um comprimento de onda) que alinham, no receptor, as fases dos sinais refletidos por eles e, assim, realizando reflexão "anômala" [11].

#### D. Discussão sobre os modelos de propagação

A utilização de uma RIS em um sistema de comunicação permite o controle de fase da onda eletromagnética refletida em sua superfície, resultando em melhores níveis de potência de recepção. Nota-se que o aumento da potência de recepção tem uma relação diretamente proporcional com  $N^2$  no modelo de propagação de dois raios e no modelo de propagação em enlaces de visada não direta. Portanto, o uso de uma grande quantidade de elementos resulta em um aumento significativo da potência de recepção.

Pela Figura 5 percebe-se que o modelo de dois raios tem um aumento da potência de recepção de acordo com o aumento da quantidade de elementos. Observa-se um comportamento análogo para o modelo de propagação em enlaces de visada não direta. Contudo, a potência recebida não é infinita para um número infinito de elementos reflexivos, pois a máxima potência transmitida é o valor máximo que a potência recebida pode assumir, segundo a lei de conservação de energia [13].

O modelo de propagação de dois raios apresenta a potência de recepção em função do comprimento de onda, de  $r_1$  e  $r_2$ , da potência de transmissão e da quantidade de metassuperfícies. O modelo em enlaces de visada não direta também considera os parâmetros citados, porém leva em conta a magnitude dos

coeficientes de reflexão, o diagrama de radiação e os ganhos das antenas nos transeptores.

O modelo de propagação para cenários mais complexos de visada não direta é o que mais relaciona-se com um cenário real dentre os apresentados, pois ele assemelha-se ao modelo de propagação em enlaces de visada não direta apresentado, acrescentando a área da antena receptora e a densidade de potência que irradia para um ângulo de observação para o cálculo da potência de recepção.

#### IV. CENÁRIOS DE APLICAÇÕES

Nesta seção exploram-se diferentes cenários potenciais para a aplicação da RIS. Por meio do controle da direção de propagação da onda eletromagnética que incide na superfície da RIS, pode-se obter maior nível de potência no receptor, extensão do enlace de comunicação, limitação da área de propagação de um sinal transmitido, redução de interferência em sistemas de comunicação móvel ou suporte às comunicações D2D e sistemas NOMA. Dentre os cenários avaliados, consideram-se ambientes comuns às redes de telefonia móvel legadas (2G ao 5G) que se estenderão às comunicações móveis 6G. Nesses cenários, as RIS são introduzidas para otimizar a propagação do sinal [4], auxiliar no sigilo das informações e também no uso das RIS em sistemas NOMA [4], [15].

##### A. Enlaces de comunicação obstruídos

A obstrução de enlaces de visada direta é comum em sistemas de comunicação móveis, devido à mobilidade dos usuários. Nesse cenário, obstruções momentâneas podem ocorrer, resultando em sombreamento, como ocorre na comunicação entre um usuário e uma estação rádio base, Figura 9(a). Dessa forma, as RIS podem ser estrategicamente posicionadas em paredes de prédios para prover enlaces de visada não direta entre o transmissor e receptor, mitigando os efeitos de sombreamento. Em regiões que sofreram modificações em seu relevo, as RIS podem auxiliar os sistemas de comunicação sem fio existentes em contornar possíveis novos obstáculos, reduzindo custos na implementação de novos rádio-enlaces [14].

Por exemplo, quando as ondas eletromagnéticas se propagam em um ambiente sem fio *indoor*, elas passam por algumas distorções, ruídos, e atenuações. A perda pelo caminho neste ambiente fechado, a absorção de sinal, a reflexão, a refração, e a difração causada por objetos físicos neste ambiente interno, afetam o desempenho da comunicação *wireless*. E atualmente, esses efeitos são difíceis de explicar e são considerados fatores probabilísticos [40]. Com a implementação das RIS para enlaces de visada não direta, pode-se utilizar a transferência de energia (que consiste em um aparelho que transmite energia para outro aparelho) e também existe a possibilidade da otimização da comunicação (que é a reflexão do sinal *Wi-fi*, por exemplo). As RIS podem desviar as ondas eletromagnéticas das paredes, que obstruem a visada direta do sinal de um ambiente para outro [40].

##### B. Limitação da propagação do sinal

Algumas práticas *hackers* consideram o uso de equipamentos de retransmissão inseridos em ambientes restritos para captura de informações sigilosas, mesmo que criptografadas [41]. Dentre essas técnicas, cita-se o *eavesdropper* que emprega um dispositivo de rede para captura de um sinal e sua decodificação ou retransmissão para um segundo dispositivo que consiga decifrá-lo [41]. Nesse cenário, as RIS podem ser instaladas nas limitações do ambiente criando uma proteção física que inibe a propagação do sinal para fora dos limites do ambiente, como visto na Figura 9(b) [14]. A implementação das RIS visando a limitação da propagação do sinal permite aumentar a área de cobertura do sinal em uma empresa e ao mesmo tempo diminuir interferências de equipamentos indesejados [41].

Essa abordagem pode ser estendida aos presídios para impedir a comunicação de detentos com civis exteriores por meio de aparelhos celulares clandestinos, independentemente do objetivo da comunicação. Mesmo sendo proibido a existência de celulares nas cadeias, a utilização de tais dispositivos móveis por organizações criminosas nas penitenciárias brasileiras é recorrente, propiciando que os presos continuem na criminalidade [42]. Dessa forma, pode-se posicionar RIS nos arredores do presídio para novamente refletir qualquer onda eletromagnética para o interior do ambiente mostrado na Figura 9(c), colaborando para a redução dessa comunicação ilegal.

##### C. Redução de interferências em sistemas de telefonia móvel

Em sistemas de telefonia móvel, a cobertura celular de uma determinada região geográfica ocorre pelo posicionamento de estações rádio base próximas, cujas áreas de borda de célula se sobrepõem. Apesar do projeto de cobertura considerar a otimização do reuso de frequência, os sinais transmitidos por diferentes estações rádio base podem ocupar bandas de frequências relativamente próximas [14]. Portanto, verifica-se a possibilidade de interferência entre esses sinais no aparelho móvel de um usuário localizado em região de sobreposição.

As RIS inseridas estrategicamente nos limites das células podem melhorar a área de cobertura de uma rádio base, como visto na Figura 9(d). Onde a potência do sinal é bem inferior, se comparado ao usuário estar mais próximo da torre de transmissão. E também pode amenizar a interferência intercelular no aparelho móvel de um usuário localizado nessa região de sobreposição, com a implementação das RIS. Para ser mais específico, ajustando cuidadosamente a mudança de fase do elemento de reflexão RIS, se diminui a potência do sinal sobreposto, de interferência intercelular, no usuário localizado na extremidade da célula. Portanto, para que isto aconteça, a formação de feixe e a matriz de fase RIS aplicadas em cada borda de célula devem ser otimizadas juntas [43].

##### D. Suporte à comunicação D2D

Em cenários onde os canais de transmissão estão sobrecarregados, observa-se a possibilidade de indisponibilidade da rede. A comunicação D2D é uma abordagem que visa reduzir



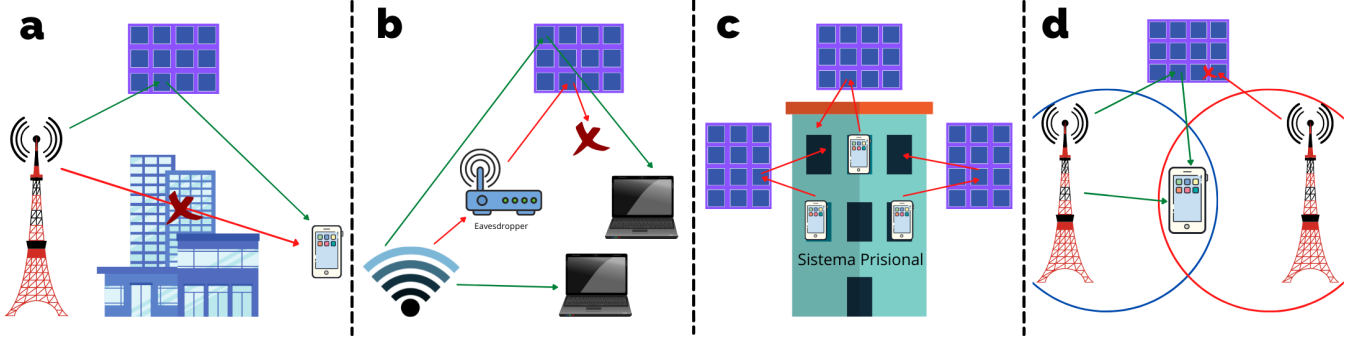


Figura 9: Representação dos Cenários a, b, c, d.

o acesso de dispositivos na rede através da comunicação direta entre dispositivos próximos. Ela pode ser viabilizada por meio da utilização de RIS, assim como mostra a Figura 10(e). Dessa forma, os dispositivos se comunicam diretamente sem a necessidade de alocar recursos da rede em que estão inicialmente ancorados. As RIS integradas às redes D2D, podem aumentar a eficiência de um sistema através do controle de potência com algoritmos de otimização de rede [44]. Essa abordagem reduz a sobrecarga da fonte e mitiga a possibilidade de indisponibilidade da rede [14].

#### E. Suporte à comunicação IoT

Com a implementação dos sistemas 5G e 6G, espera-se uma comunicação massiva de dispositivos. Portanto é necessário uma grande energia para transmitir os dados detectados para os centros de fusão, que realizam o processamento e a análise dos dados [3]. Mesmo que grande parte das aplicações IoT operem com baixa potência de transmissão para preservar suas baterias, as RIS podem prover aumento dos níveis de potência dos sinais recebidos em ambiente específico como visto na Figura 10(f). Para que os dispositivos permaneçam conectados a uma rede e que os aparelhos IoT funcionem em uma distribuição geográfica maior, pode-se utilizar RIS para o aumento a área geográfica de cobertura do sinal. Logo, obtêm-se uma comunicação mais dinâmico entre os equipamentos implantados [14].

#### F. Suporte à comunicação em sistemas NOMA

Em sistemas que implementam a tecnologia NOMA, usuários compartilham simultaneamente uma mesma faixa de frequência para fins de comunicação empregando níveis de potências distintos [15]. Essa técnica de múltiplo acesso melhora significativamente a eficiência espectral em relação à abordagem tradicional por meio do acesso múltiplo ortogonal. Em um cenário de implementação de um sistema NOMA, os vetores dos usuários no canal, devem apresentar a mesma direção angular para que haja a soma construtiva de sinais no receptor. Logo, uma RIS pode ser introduzida no sistema para manipular esses vetores alinhando-os, como ilustrado na Figura 10(g).

#### G. Discussões

As vantagens das RIS aplicadas aos cenários citados anteriormente são obtidas ao custo de alta complexidade na

implementação do sistema [4]. A matriz de fase das RIS deve ser otimizada em tempo real para potencializar o desempenho do sistema. Os métodos existentes exigem alta complexidade computacional devido à quantidade de elementos reconfiguráveis em uma RIS, tornando complicado o projeto físico para a sua implementação. Para abordar de uma maneira facilitada a reconfiguração da matriz de fase das RIS, podem ser aplicados os conceitos de inteligência artificial [4]. Com a finalidade de melhorar o projeto por meio de um sistema de aprendizado automático da IA.

#### V. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo sobre superfícies inteligentes reconfiguráveis em relação ao seus princípios de funcionamento, modelos de propagação e potenciais cenários de aplicações. Ao explorar os princípios de funcionamento das RIS, verificaram-se algumas limitações de pesquisa, que geralmente utilizam a óptica geométrica ao invés da óptica física. Outras limitações relativas ao projeto das RIS surgem da dificuldade de projeto de *hardwares* eficientes e que se aproximem cada vez mais dos modelos estudados.

O modelo de dois raios pode ser utilizado em um campo próximo e não leva em conta alguns parâmetros utilizados pelos demais. O modelo de enlaces de visada não direta é mais robusto por usar o produto das distâncias, porém o modelo de propagação para cenários mais complexos de visada não direta permite uma melhor análise de um cenário real, já que ele contém um ângulo de observação para o cálculo da potência de recepção e a partir dela é possível redirecionar os lóbulos secundários para um ângulo desejado.

Em relação às potenciais aplicações, destacou-se a contribuição das RIS para as comunicações móveis em relação à redução de interferências em regiões de borda de células sobrepostas. Outro cenário de aplicação relaciona-se a enlaces de comunicação obstruídos, para a redução dos efeitos de sombreamento. Também nota-se sua utilidade para a limitação da propagação do sinal para o exterior de certos ambientes como, por exemplo, em presídios ou como contramedida para a técnica *eavesdropper*. Já na comunicação D2D, a RIS permite uma comunicação direta entre os dispositivos quando o canal está indisponível para uso.

A utilização de RIS no IoT permite que os dispositivos mantenham-se conectados à rede mesmo com distâncias maiores devido ao aumento da distribuição geográfica da cobertura

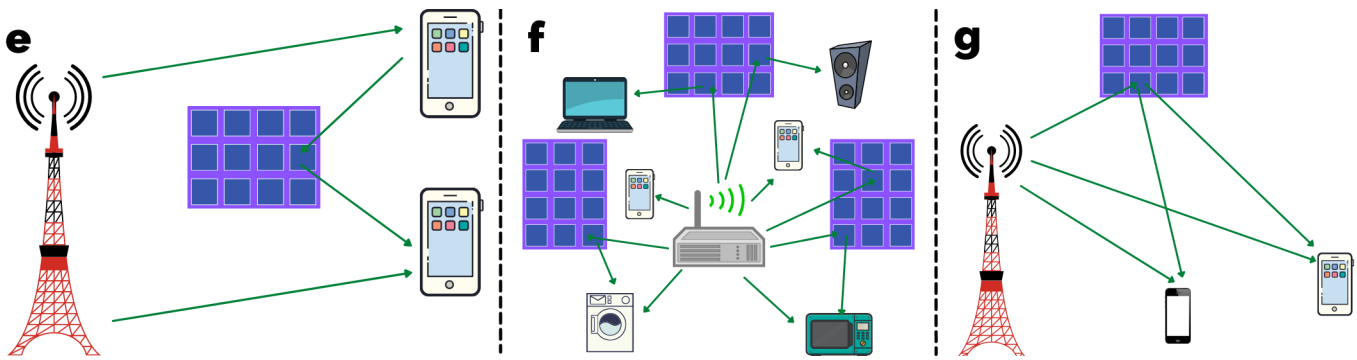


Figura 10: Representação dos Cenários e, f e g.

do sinal, por meio do aumento da potência recebida pelos dispositivos. Em sistemas NOMA, melhora-se a eficiência espectral através do alinhamento dos vetores do canal por meio da utilização simultânea de uma faixa de frequência para vários usuários.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Prof. Dr. Felipe Augusto Pereira Figueiredo e ao Eng. MSc. Evandro César Vilas Boas pela orientação concebida e pelo conhecimento compartilhado. Ao Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL) por conceder os meios para a realização deste trabalho.

#### REFERÊNCIAS

- [1] M. D. Renzo, A. Zappone, M. Debbah, M.-S. Alouini, C. Yuen, J. de Rosny, and S. Tretjakov, "Smart Radio Environments Empowered by Reconfigurable Intelligent Surfaces: How it Works, State of Research, and Road Ahead," *arXiv*, vol. 2004.09352v1, 2020.
- [2] Q. Wu, S. Zhang, B. Zheng, C. You, and R. Zhang, "Intelligent Reflecting Surface-Aided Wireless Communications: A Tutorial," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 5, pp. 3313–3351, 2021.
- [3] E. Basar, M. D. Renzo, J. D. Rosny, M. Debbah, M. S. Alouini, and R. Zhang, "Wireless Communications Through Reconfigurable Intelligent Surfaces," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 116 753–116 773, 2020.
- [4] Pan, Cunhua, Ren, Hong, Wang, Kezhi, Kolb, J. Florentin, El Kashlan, Maged, Chen, Ming, D. Renzo, Marco, Hao, Yang, Wang, Jiangzhou, Swindlehurst, A. Lee, You, Xiaohu, Hanzo, and Lajos, "Reconfigurable Intelligent Surfaces for 6G Systems: Principles, Applications, and Research Directions," *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 6, pp. 14–20, 2021.
- [5] F. Qamar, M. U. A. Siddiqui, M. N. Hindia, R. Hassan, and Q. N. Nguyen, "[i]ssues, [c]hallenges, and [r]esearch [t]rends in [s]pectrum [m]anagement: [a] [c]omprehensive [o]verview and [n]ew [v]ision for [d]esigning 6g [n]etworks," *Electronics*, 2020.
- [6] E. Björnson, O. Özdogan, and E. G. Larsson, "Reconfigurable Intelligent Surfaces: Three Myths and Two Critical Questions," *arXiv*, vol. 2006.03377v2, 2020.
- [7] C. Liaskos, S. Nie, A. Tsioliaridou, A. Pitsillides, S. Ioannidis, and I. Akyildiz, "A New Wireless Communication Paradigm Through Software-Controlled Metasurfaces," *arXiv*, vol. 1806.01792v1, 2020.
- [8] Smith, D. Padilla, W. Vier, D. Nemat-Nasser, S. Schultz, and S., "Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity," *Physical review letters*, vol. 84, no. 18, pp. 4184–4187, 2000.
- [9] L. Fassarella, "Lei de Snell Generalizada," *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 29, no. 2, pp. 215–2245, 2007.
- [10] S. Gong, X. Lu, D. T. Hoang, D. Niyato, L. Shu, D. I. Kim, and Y. C. Liang, "Towards Smart Wireless Communications via Intelligent Reflecting Surfaces: A Contemporary Survey," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 22, no. 4, pp. 2283–2314, 2020.
- [11] Özgecan Özdogan, E. Björnson, and E. G. Larsson, "Intelligent Reflecting Surfaces: Physics, Propagation, and Pathloss Modeling," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 5, pp. 581–585, 2020.
- [12] Y. Liu, X. Liu, X. Mu, T. Hou, J. Xu, M. D. Renzo, and N. Al-Dhahir, "Reconfigurable Intelligent Surfaces: Principles and Opportunities," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 23, no. 3, pp. 1546–1577, 2021.
- [13] E. Björnson and L. Sanguinetti, "Power Scaling Laws and Near-Field Behaviors of Massive MIMO and Intelligent Reflecting Surfaces," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 1306 – 1324, 2020.
- [14] Q. Wu and R. Zhang, "Towards Smart and Reconfigurable Environment: Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Network," *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 1, pp. 106–112, 2020.
- [15] D. A. Tizzo, "Estudo Comparativo das Técnicas de Acesso Múltiplo de Quarta e Quinta Geração de Comunicações Móveis," . [Online]. Disponível em: <http://www.antigo.feelt.ufu.br/Patos-de-Minas/Engenharia-Eletronica-e-de-Telecomunicacoes/Trabalhos-defendidos>, 2017, Acesso: 2021-10-21.
- [16] A. Khaleel and E. Basar, "[a] [n]ovel [noma] [s]olution with [ris] [p]artitioning," *arXiv*, 2021.
- [17] C. M. Soukoulis, M. Kafesaki, and E. N. Economou, "Negative-Index Materials: New Frontiers in Optics," *arXiv*, vol. 18, no. 15, pp. 1941–1952, 2006.
- [18] W. J. Padilla, D. N. Basov, and D. R. Smith, "Negative Refractive Index Metamaterials," *Materials Today*, vol. 9, no. 7, pp. 28–35, 2006.
- [19] F. da Costa Silva, "Fenômenos Eletromagnéticos em Meios com Índice de Refração Negativo," . [Online]. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/14077>, 2014, Acesso: 2021-10-23.
- [20] P. L. L. B. Felipe Augusto De Oliveira, "Caracterização de metamateriais na faixa de micro-ondas," *FEELT*, 2016.
- [21] D. Felbacq and G. Bouchitté, *Metamaterials Modeling and Design*. Pan Stanford Publishing, 2017, vol. 1.
- [22] C. L. Holloway, M. A. Mohamed, E. F. Kuester, and A. Dienstfrey, "Reflection and Transmission Properties of a Metafilm: With an Application to a Controllable Surface Composed of Resonant Particles," *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. 47, no. 4, pp. 853–865, 2005.
- [23] C. L. Holloway, P. Kabos, M. A. Mohamed, E. F. Kuester, J. Gordon, M. D. Janezic, and J. Baker-Jarvis, "Realization of a Controllable Metafilm/Metasurface Composed of Resonant Magnetodielectric Particles: Measurements and Theory," *IET Microwaves, Antennas, and Propagation*, vol. 4, no. 8, pp. 1111–1122, 2010.
- [24] C. Highstrete, M. Lee, and W. Padilla, "Complementary Planar Terahertz Metamaterials," *Optics Express*, vol. 15, no. 3, pp. 1084–1095, 2007.
- [25] C. L. Holloway, A. Dienstfrey, E. F. Kuester, J. F. O'Hara, A. K. Azad, and A. J. Taylor, "A Discussion on the Interpretation and Characterization of Metafilms/Metasurfaces: The Two-Dimensional Equivalent of Metamaterials," *Metamaterials*, vol. 3, no. 2, pp. 100–112, 2009.
- [26] C. L. Holloway, E. F. Kuester, J. A. Gordon, J. O'Hara, J. Booth, and D. R. Smith, "An Overview of the Theory and Applications of Metasurfaces: The Two-Dimensional Equivalents of Metamaterials," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 2, pp. 10–14, 2012.
- [27] O. Paleiov, O. Pukko, and S. G. Lipson, "Demonstrating Fermat's Principle in Optics," *Physics Education*, vol. 46, no. 10.1088/0031-9120/46/6/007, pp. 702–704, 2011.

- [28] D. Sell, J. Yang, E. W. Wang, T. Phan, S. Doshay, and J. A. Fan, "Ultra-high-efficiency anomalous refraction with dielectric metasurfaces," *ACS Photonics*, vol. 5, pp. 2402–2407, 2018.
- [29] J. G. G. Lenharo and E. R. Martins, "Ultra-high-efficiency anomalous refraction with dielectric metasurfaces," *EESC/USP*, 2019.
- [30] R. C. Johnson, H. A. Ecker, and J. S. Hollis, "Determination of Far-Field Antenna Patterns from Near-Field Measurements," *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, vol. 61, no. 12, p. 1668, 1973.
- [31] S. A. H. Gangaraj and F. Monticone, "Molding light with metasurfaces: from far-field to near-field interactions," *Nanophotonics*, vol. 7, no. 6, pp. 1025–1040, 2018.
- [32] A. Elzanaty, A. Guerra, F. Guidi, and M.-S. Alouini, "Reconfigurable intelligent surfaces for localization: Position and orientation error bounds," 2020.
- [33] G. Gradoni and M. D. Renzo, "End-to-End Mutual Coupling Aware Communication Model for Reconfigurable Intelligent Surfaces: An Electromagnetic-Compliant Approach Based on Mutual Impedances," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 10.1109/LWC.2021.3050826, 2021.
- [34] F. H. Danufane, M. D. Renzo, J. de Rosny, and S. Tretyakov, "On the Path-Loss of Reconfigurable Intelligent Surfaces: An Approach Based on Green's Theorem Applied to Vector Fields," *arXiv*, vol. 2007.13158, 2020.
- [35] J. Xu and Y. Liu, "A Novel Physics-Based Channel Model for Reconfigurable Intelligent Surface-Assisted Multi-User Communication Systems," *arXiv*, vol. 2008.00619, 2020.
- [36] X. Qian, M. D. Renzo, J. Liu, A. Kammoun, and M. S. Alouini, "Beamforming Through Reconfigurable Intelligent Surfaces in Single-User MIMO Systems: SNR Distribution and Scaling Laws in the Presence of Channel Fading and Phase Noise," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 10, no. 1, pp. 77–81, 2021.
- [37] Z. Zhang, Y. Cui, F. Yang, and L. Ding, "Analysis and Optimization of Outage Probability in Multi-Intelligent Reflecting Surface-Assisted Systems," *arXiv*, vol. 1909.02193, 2019.
- [38] A. A. Boulogeorgos and A. Alexiou, "Ergodic Capacity Analysis of Reconfigurable Intelligent Surface Assisted Wireless Systems," in *2020 IEEE 3rd 5G World Forum (5GWF)*, pp. 395–400, 2020.
- [39] W. Tang, M. Z. Chen, X. Chen, J. Y. Dai, Y. Han, M. D. Renzo, Y. Zeng, S. Jin, Q. Cheng, and T. J. Cui, "Wireless Communications with Reconfigurable Intelligent Surface: Path Loss Modeling and Experimental Measurement," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 20, no. 1, pp. 421–439, 2021.
- [40] C. Liaskos, S. Nie, A. Tsioliaridou, A. Pitsillides, S. Ioannidis, and I. Akyildiz, "A New Wireless Communication Paradigm Through Software-Controlled Metasurfaces," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 56, no. 9, pp. 162–169, 2018.
- [41] M. Cui, G. Zhang, and R. Zhang, "Secure Wireless Communication via Intelligent Reflecting Surface," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 5, pp. 1410–1414, 2019.
- [42] P. A. Schwalbert, "A Problemática do Uso de Aparelhos Telefônicos pelos Presos nos Presídios Brasileiros," . [Online]. Disponível em: <http://repositorio.upf.br/handle/riupf/1384>, 2017, Acesso: 2021-11-07.
- [43] C. Pan, H. Ren, K. Wang, W. Xu, M. ElKashlan, A. Nallanathan, and L. Hanzo, "Multicell MIMO Communications Relying on Intelligent Reflecting Surfaces," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 19, no. 5, pp. 5218–5233, 2020.
- [44] S. Jia, X. Yuan, S. Member, and Y.-C. Liang, "Reconfigurable Intelligent Surfaces for Energyefficiency in d2d Communication Network," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, no. 3, pp. 683–687, 2020.