



Antenas Adaptativas

xGMobile
Centro de Competência EMBRAPII
Inatel em Redes 5G e 6G

Inatel

xGMobile – Centro de Competência EMBRAPII Inatel em Redes 5G e 6G

O Centro de Competência, localizado no Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL), é um modelo inédito no Brasil, destinado a impulsionar o desenvolvimento de tecnologias avançadas com elevado potencial para o mercado. A iniciativa posicionará o Brasil entre as principais nações inovadoras do mundo.

Formado por um grupo de pesquisa credenciado em uma área temática específica, o Centro foi desenvolvido para enfrentar desafios e questões de elevada complexidade que tenham impacto social e econômico. Além disso, conta com infraestrutura moderna e uma equipe com competência e experiência comprovadas na área de atuação.

Índice

1. Introdução.....	1
2. MIMO.....	1
2.1 Desafios Associados ao MIMO Massivo.....	5
2.2. XL-MIMO.....	6
2.3. CF-mMIMO.....	8
3.IRS.....	10
4. Antena Fluída.....	12
4.1 Exemplo de Implementação.....	13
4.2 Benefícios e Aplicações Práticas.....	14
5. Antena de Pinçamento	17
5.1 Princípio de Funcionamento.....	17
5.2 Vantagens das Antenas de Pinçamento.....	19
6. Conclusão	21

1. Introdução

Antenas adaptativas são sistemas projetados para ajustar dinamicamente suas características operacionais, como direção de radiação, ganho e padrões de transmissão e recepção, com o objetivo de se adaptarem continuamente às variações do ambiente de propagação. Seu principal propósito é otimizar o desempenho das comunicações sem fio, assegurando melhor qualidade de recepção e maior eficiência na transmissão, mesmo em cenários adversos, como ambientes com interferências, obstáculos físicos ou mudanças rápidas nas condições do canal, que impactam a propagação do sinal.

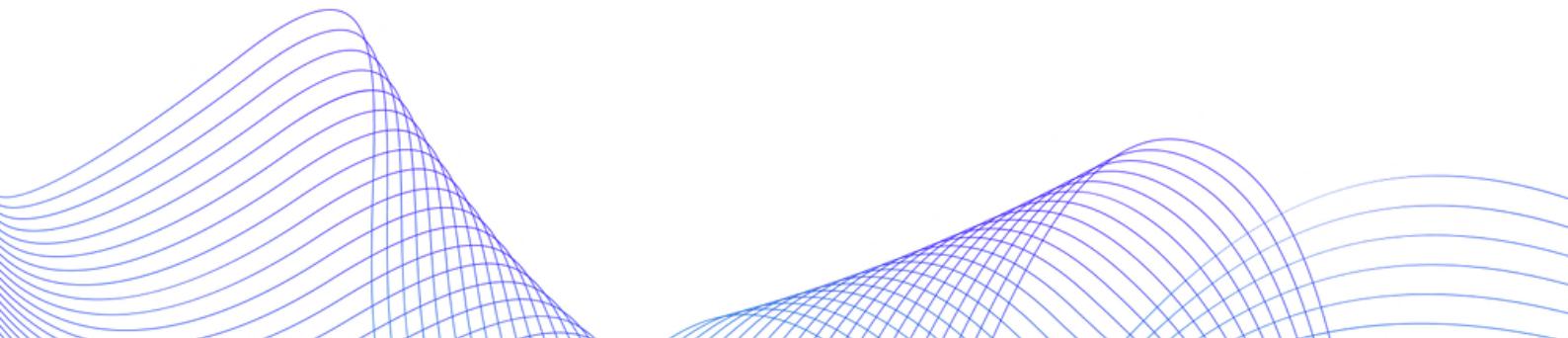
Esses sistemas podem ser classificados com base nas técnicas e princípios empregados para reconfigurar seu comportamento eletromagnético em resposta às condições do meio. Entre as abordagens mais consolidadas, destacam-se os sistemas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), que aumentam a capacidade de transmissão e a eficiência espectral ao explorar múltiplas antenas na transmissão e recepção simultâneas. Outra solução de destaque são as superfícies refletoras inteligentes (IRS, *Intelligent Reflecting Surfaces*), que permitem o controle dinâmico da propagação do sinal por meio de elementos refletivos programáveis.

Complementando essas tecnologias, surgem as antenas fluídas (FA, *Fluid Antenna*), que utilizam materiais reconfiguráveis, como metais líquidos ou soluções ionizadas, possibilitando alterações estruturais em tempo real e oferecendo maior flexibilidade para dispositivos sujeitos a restrições físicas de espaço.

Mais recentemente, foram introduzidas as antenas de pinçamento, que operam por meio do pinçamento de guias de onda dielétricos com materiais dielétricos distintos, ativando pontos específicos de radiação ao longo do guia. Essa abordagem inovadora combina baixo custo de implementação com elevada adaptabilidade, sendo particularmente eficaz na criação de enlaces com linha de visada (LoS, *Line-of-Sight*) em ambientes dinâmicos ou obstruídos.

2. MIMO

A tecnologia MIMO foi amplamente adotada e implementada na quarta geração (4G) de redes de comunicações móveis.



As redes 4G foram projetadas para oferecer taxas de dados significativamente mais altas, maior eficiência espectral e uma experiência aprimorada para o usuário, em comparação com as gerações anteriores da tecnologia móvel, em parte devido à utilização do MIMO. O MIMO é fundamental para alcançar esses objetivos, pois permite que o sistema utilize múltiplas antenas tanto na transmissão quanto na recepção, estabelecendo diversos caminhos de comunicação simultâneos. Essa abordagem aumenta expressivamente a capacidade de transmissão de dados e a eficiência espectral, sem a necessidade de ampliar a largura de banda disponível, respondendo de forma eficiente à crescente demanda por comunicações sem fio.

O MIMO tradicional emprega um número relativamente reduzido de antenas tanto no transmissor quanto no receptor, geralmente entre duas e oito, como ilustrado na Figura 1. Essa abordagem pode ser implementada em duas variações: MIMO para usuário único (SU-MIMO, *Single User MIMO*) e MIMO para múltiplos usuários (MU-MIMO, *Multi-User MIMO*), que se diferenciam quanto à forma de transmissão dos dados e ao número de usuários atendidos simultaneamente.

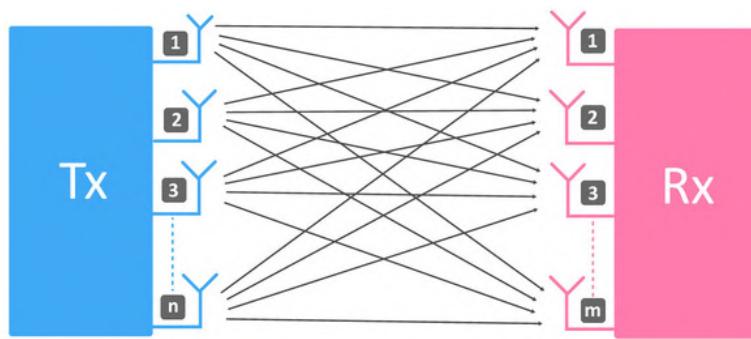


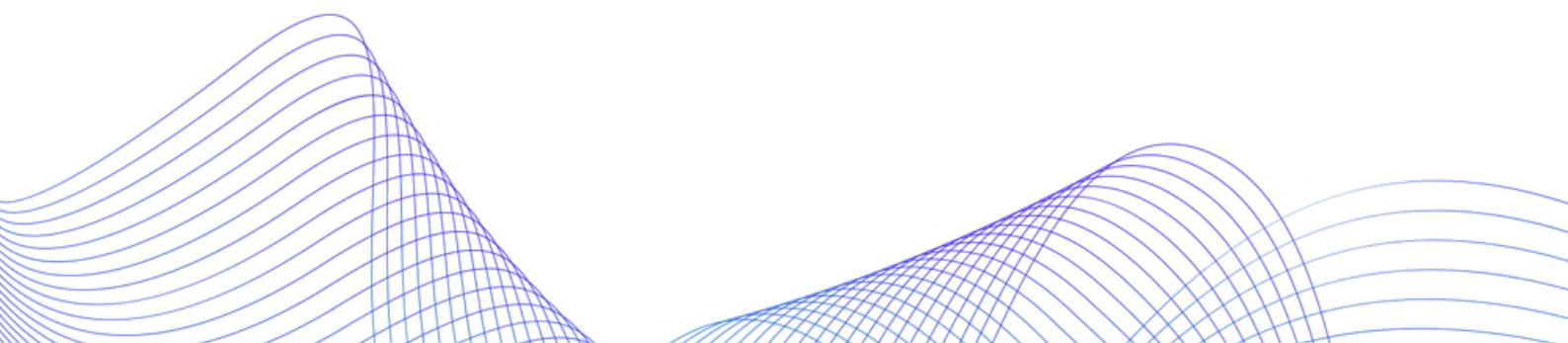
Figura 1. Tecnologia MIMO, onde emprega-se múltiplas antenas tanto na transmissão quanto na recepção.

- **SU-MIMO**

Trata-se de uma implementação de MIMO que permite a transmissão de múltiplos fluxos de dados entre um único transmissor e um único receptor ao mesmo tempo. É uma prática comum em ambientes onde a prioridade é maximizar a velocidade de conexão para um dispositivo específico, como um *laptop* ou um *smartphone*, dentro de uma rede Wi-Fi ou celular.

- **MU-MIMO**

Ampliando o conceito de MIMO, o MU-MIMO permite que um transmissor se comunique com vários receptores, enviando diferentes fluxos de dados para diferentes usuários simultaneamente.



Essa técnica é aplicada em ambientes de rede densos, como espaços públicos, escritórios, ou residências com vários dispositivos conectados, onde pode melhorar significativamente a capacidade da rede e a experiência do usuário ao distribuir os recursos de forma mais eficiente. A Figura 2 ilustra as tecnologias SU-MIMO e MU-MIMO, cada uma projetada para atender a diferentes demandas de comunicação e cenários de aplicação.

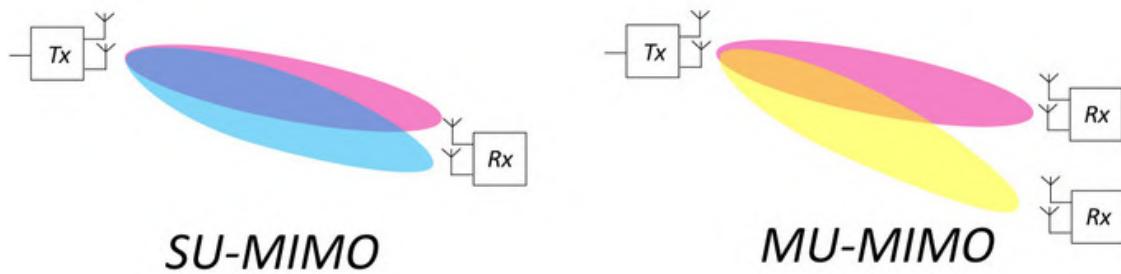
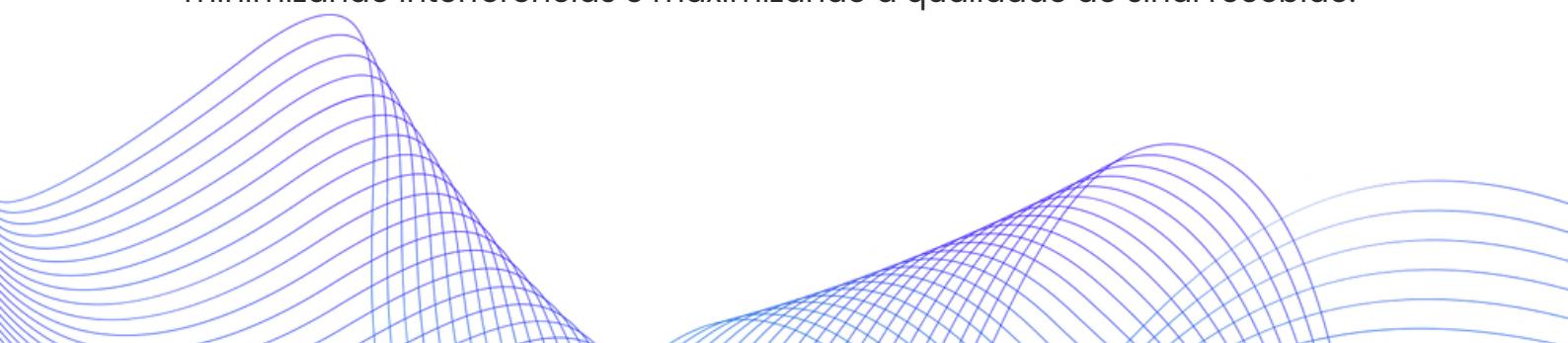


Figura 2. Representação do conceito de SU-MIMO e MU-MIMO

Com a introdução da tecnologia de quinta geração (5G), o MIMO foi expandido para formas ainda mais avançadas, como o MIMO massivo, que emprega um número consideravelmente maior de antenas para proporcionar capacidades de rede ampliadas e atender à crescente demanda por conexões simultâneas entre usuários e dispositivos.

O MIMO massivo utiliza dezenas ou até centenas de antenas, representando um aumento de até uma ordem de magnitude em relação aos esquemas de MIMO convencionais. Essas antenas estão concentradas, em sua maioria, no lado da estação base (transmissor), enquanto os dispositivos receptores, como *smartphones* e sensores, geralmente operam com apenas uma ou poucas antenas, devido a limitações de espaço, consumo de energia e custo. Essa ampliação no número de elementos radiantes, combinada com técnicas de multiplexação espacial, resulta em ganhos expressivos na capacidade da rede e na eficiência espectral, permitindo a transmissão simultânea de múltiplos fluxos de dados para diferentes usuários dentro da mesma faixa de frequência. Isso se deve à capacidade do sistema de diferenciar os sinais de usuários distintos, mesmo quando compartilham o mesmo canal, o que reduz interferências e aumenta significativamente a densidade de dados transmitidos.

Uma das principais vantagens do MIMO massivo é sua capacidade de realizar *beamforming* com alta precisão. O *beamforming* é uma técnica de direcionamento de sinais que permite à estação base formar feixes concentrados de energia em direção a receptores específicos, minimizando interferências e maximizando a qualidade do sinal recebido.



Com o grande número de antenas disponíveis, o MIMO massivo pode se adaptar dinamicamente às condições do canal de propagação, garantindo conexões mais estáveis, eficientes e confiáveis, mesmo em ambientes complexos.

A Figura 3 ilustra a comparação entre um sistema de comunicação sem fio tradicional e um sistema baseado na tecnologia MIMO massivo. No sistema tradicional, uma única antena ou um conjunto limitado de antenas, realiza a cobertura de toda a área atendida, radiando sinais de forma ampla e pouco direcionada para todos os dispositivos. Por outro lado, no sistema com MIMO massivo, uma estação base equipada com dezenas ou centenas de antenas é capaz de transmitir e receber sinais de forma simultânea e direcionada, por meio de feixes independentes (*beamforming*) voltados a diferentes dispositivos. Essa abordagem permite comunicação paralela com múltiplos usuários, aumentando expressivamente a eficiência espectral, a capacidade da rede e a qualidade dos enlaces, mesmo em cenários densos e dinâmicos.

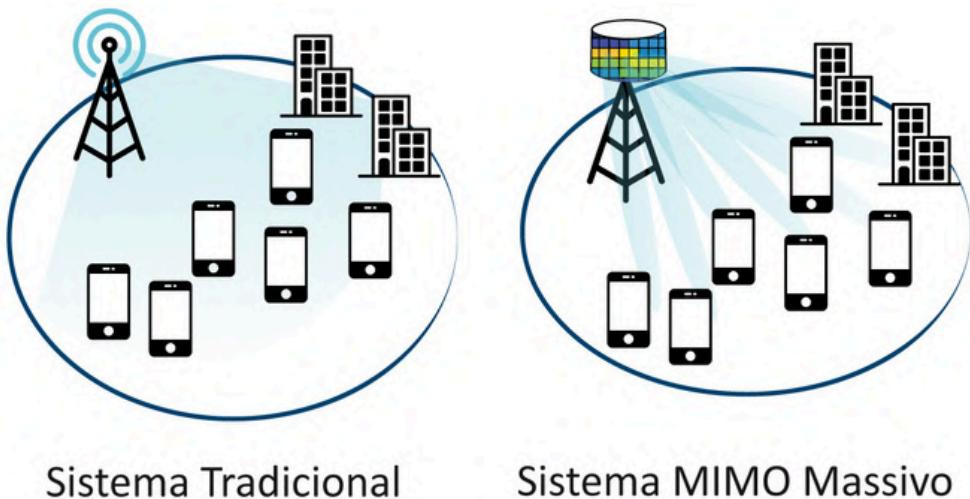
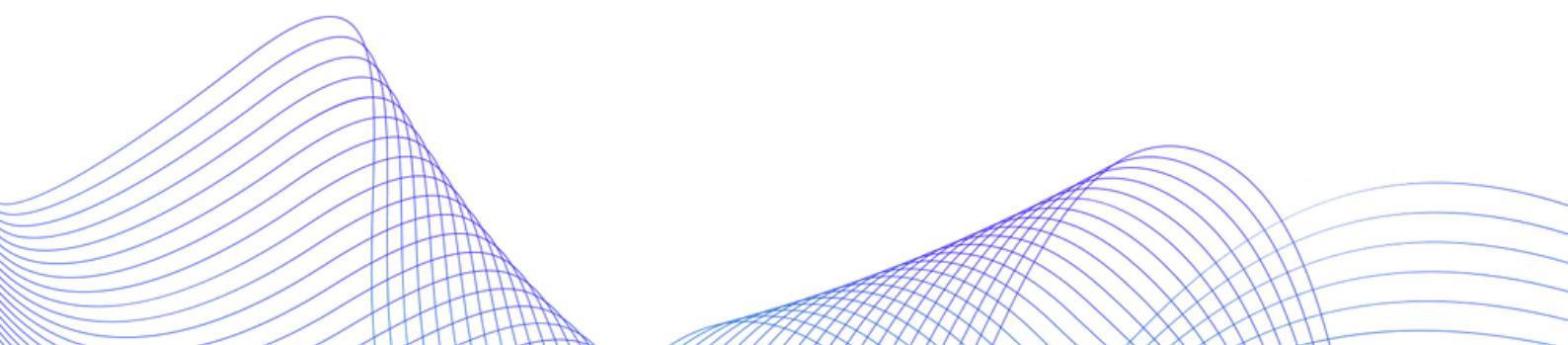


Figura 3. Comparação entre um sistema de comunicação sem fio convencional e outro baseado na tecnologia MIMO massivo.

Outra vantagem da implantação de um grande número de antenas na estação base é a capacidade de concentrar a energia de transmissão em áreas específicas, o que resulta em um aumento expressivo da eficiência energética do sistema. No entanto, apesar dos inúmeros benefícios proporcionados pela adoção do MIMO massivo em redes de comunicação de próxima geração, ainda existem desafios técnicos e operacionais relevantes a serem superados para viabilizar sua implementação em larga escala.

2.1 Desafios Associados ao MIMO Massivo

- **Problemas de hardware:** a adoção de um grande número de cadeias de RF de baixo custo e com consumo energético reduzido pode comprometer o desempenho global do sistema, devido a imperfeições inerentes ao hardware, como o desequilíbrio I/Q. Esse desequilíbrio é caracterizado por inconsistências na amplitude e/ou fase entre os componentes em fase (I) e em quadratura (Q) de um sinal modulado, podendo degradar a qualidade da transmissão. Além disso, o ruído de fase, responsável por variações não intencionais na fase do sinal, constitui outro fator crítico, pois pode introduzir erros na informação transmitida e comprometer a precisão e a confiabilidade dos dados.
- **Acoplamento mútuo e ambiguidade frente-costas:** o acoplamento mútuo refere-se à interação eletromagnética entre os elementos de uma matriz de antenas devido à sua proximidade física. Isso significa que parte da energia transmitida por uma antena pode ser captada por outra, resultando em interferência nos sinais transmitidos ou recebidos. Já a ambiguidade frente-costas é uma limitação presente em determinadas configurações de arranjos de antenas, nas quais o sistema não consegue distinguir de forma adequada os sinais recebidos pela frente e pela parte de trás da antena. Ambos os fenômenos podem degradar o desempenho de radiação do sistema, afetando a qualidade do *beamforming* e a eficiência global da comunicação.
- **Precodificação:** refere-se ao processamento aplicado aos sinais na estação base antes da transmissão pelas antenas, com o objetivo de minimizar interferências entre usuários e melhorar a qualidade do sinal recebido. Técnicas como *Zero Forcing* (ZF) e *Minimum Mean Square Error* (MMSE) são amplamente empregadas em sistemas MIMO para esse fim. Contudo, em configurações com um grande número de antenas, como no MIMO massivo, a precodificação se torna mais complexa devido à alta dimensionalidade dos dados, isto é, ao aumento no número de variáveis a serem processadas. Além disso, o processo de inversão da matriz de canal, necessário para adaptar os sinais às condições do ambiente de propagação, impõe um desafio adicional: alto esforço computacional, com consequente aumento no consumo de energia, especialmente em cenários com dezenas ou centenas de antenas.

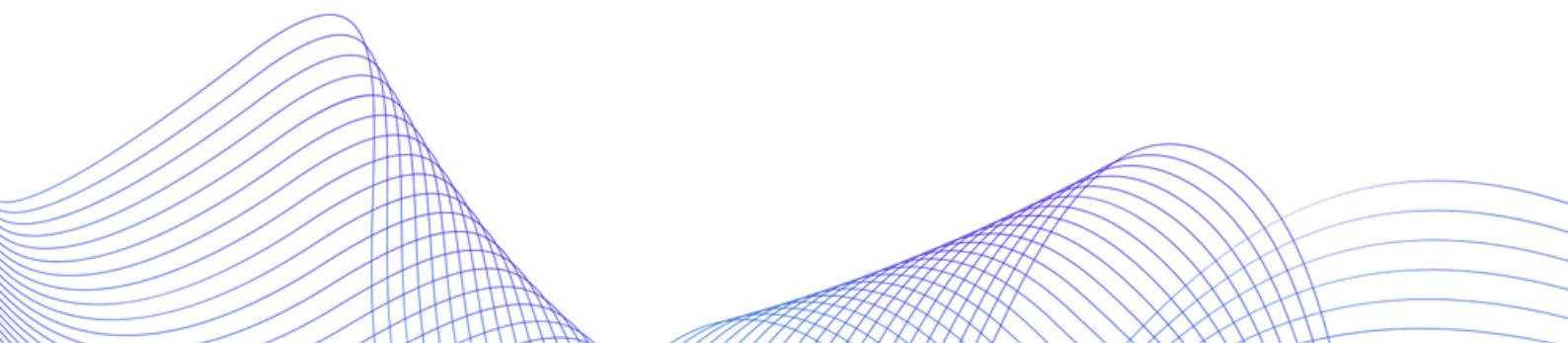


- **Detecção:** é uma etapa fundamental em sistemas MIMO, responsável por separar e identificar os diferentes fluxos de dados recebidos por meio das múltiplas antenas. Em sistemas convencionais, uma das abordagens mais utilizadas é a detecção por máxima verossimilhança (ML – *Maximum Likelihood*), que visa decodificar os sinais com base na probabilidade de ocorrência das combinações de símbolos transmitidos. Nesse método, todas as possíveis combinações são avaliadas, e a que maximiza a probabilidade de ter gerado o sinal recebido é selecionada. Embora a detecção ML ofereça desempenho ótimo, sua complexidade computacional cresce exponencialmente com o número de antenas ou fluxos de dados, tornando-a inviável para aplicações em larga escala. Em sistemas MIMO massivo, com dezenas ou centenas de antenas, a implementação prática da ML é desafiadora, devido à alta demanda por recursos computacionais e consequente impacto no consumo de energia.

Apesar do MIMO massivo proporcionar ganhos em termos de eficiência espectral e energética, tanto a indústria quanto as instituições de pesquisa têm investido em estratégias para expandir ainda mais o número de antenas nas estações base, superando as configurações convencionais do MIMO massivo. Essa tendência indica que a evolução das redes caminha em direção à sexta geração (6G), com a previsão de um aumento ainda mais expressivo no número de elementos nos arranjos de antenas. Nesse contexto, novas abordagens têm sido exploradas para a evolução do conceito de MIMO, entre as quais se destaca o MIMO extremamente grande (XL-MIMO, *Extremely Large MIMO*), que propõe a utilização de matrizes de antenas em escalas ainda mais amplas, distribuídas espacialmente ou integradas a estruturas do ambiente físico.

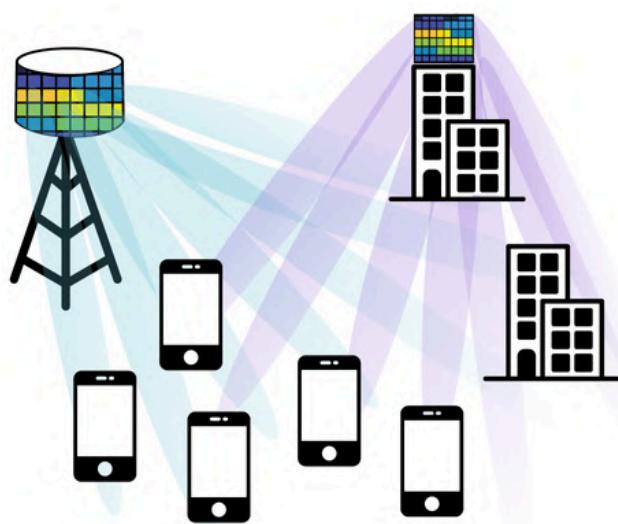
2.2 XL-MIMO

O extenso arranjo de antenas característico dos sistemas XL-MIMO, conforme ilustrado na Figura 4, possibilita sua aplicação em grandes superfícies, como fachadas de edifícios, centros comerciais, aeroportos e vias urbanas, aproveitando a infraestrutura física existente para aprimorar a conectividade sem fio. Esses sistemas podem ser implantados de forma centralizada ou distribuída, a depender das características do ambiente e dos requisitos de cobertura. Na implantação centralizada, todas as antenas do sistema XL-MIMO estão concentradas em uma única localização, geralmente em uma estação base principal.



Essa abordagem favorece o controle coordenado dos sinais, simplifica a gestão do sistema e permite maior eficiência na transmissão de dados, melhor qualidade de sinal e alocação otimizada de recursos.

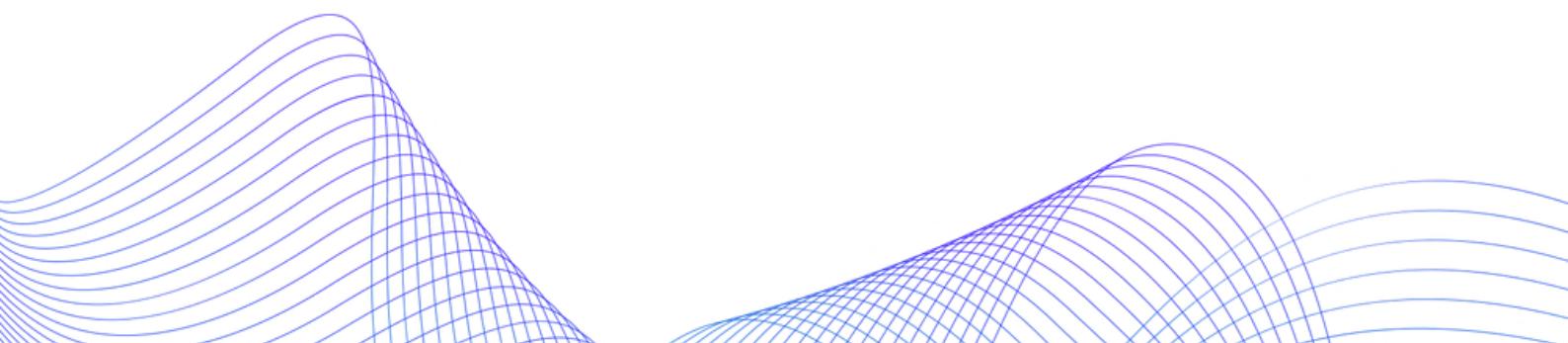
Por outro lado, na configuração distribuída, as antenas são alocadas ao longo da área de cobertura, podendo ser instaladas em locais estratégicos, como postes ao longo de avenidas ou em diferentes pontos da infraestrutura urbana. Esse modelo proporciona maior flexibilidade e cobertura mais uniforme, embora exija técnicas avançadas de coordenação, sincronização e processamento distribuído para garantir o desempenho ideal do sistema.



Sistema XL-MIMO

Figura 4. Representação do sistema XL-MIMO, destacando sua aplicação em fachadas de edifícios.

Essa tecnologia, ao criar condições de propagação mais flexíveis e responsivas às variações espaciais do ambiente, como a movimentação de objetos ou pessoas, permite que o sistema ajuste dinamicamente sua operação. Ao adaptar-se às características específicas do ambiente em tempo real, o XL-MIMO demonstra potencial para aumentar significativamente as taxas de transferência de dados e a eficiência espectral, superando os resultados obtidos com os sistemas tradicionais de MIMO massivo.



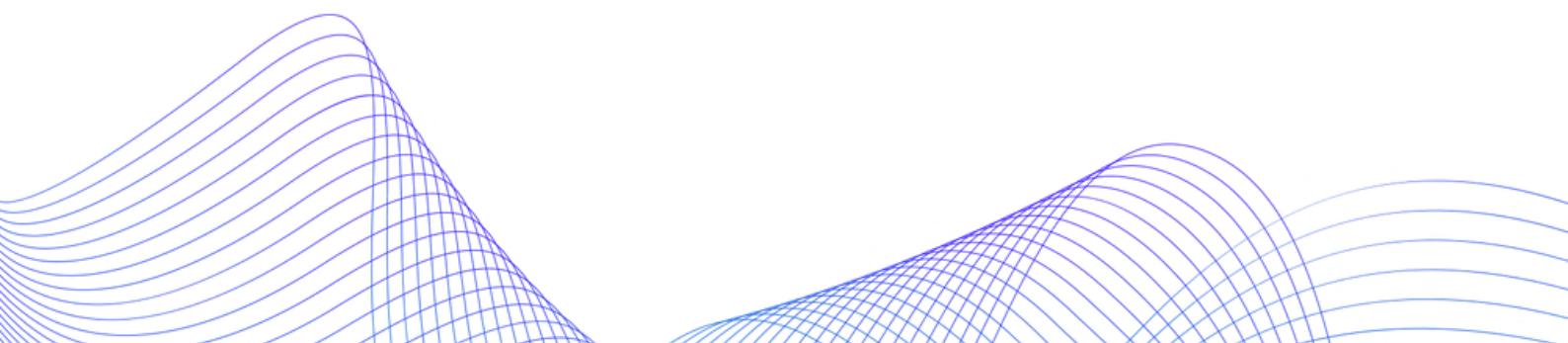
Além disso, o aumento expressivo no número de antenas na estação base possibilita ampliar a área de cobertura, beneficiando um número maior de usuários simultâneos.

Apesar das perspectivas promissoras em relação à melhoria da capacidade do sistema e da qualidade do sinal, os sistemas XL-MIMO ainda enfrentam desafios técnicos relevantes, muitos dos quais são semelhantes aos encontrados no MIMO massivo. No entanto, essas dificuldades são acentuadas não apenas pelo maior número de elementos de antena, mas também pela necessidade de gerenciar uma infraestrutura mais densa, distribuída e complexa. Como resposta a essas limitações, diversas pesquisas vêm sendo conduzidas com foco em novos algoritmos, arquiteturas inovadoras e estratégias avançadas de sincronização e controle, com o objetivo de viabilizar a implementação prática e eficiente dessa tecnologia em larga escala.

2.3 CF-mMIMO

Apesar do MIMO massivo aumentar a capacidade de transmissão de dados, usuários localizados nas bordas da célula, ou seja, em regiões mais distantes da estação base, podem sofrer reduções nas taxas de transmissão. Em um cenário onde o volume de tráfego de dados ultrapassa amplamente as comunicações de voz, torna-se essencial mitigar as variações de desempenho ao longo de toda a área de cobertura, garantindo uma experiência de usuário consistente e de alta qualidade, independentemente da localização. Com o objetivo de superar as limitações enfrentadas pelos usuários nas extremidades da célula, pesquisadores propuseram o conceito de MIMO massivo Cell-Free (CF-mMIMO, *Cell-Free massive MIMO*). Essa abordagem elimina as fronteiras entre células do ponto de vista do usuário, permitindo que múltiplos pontos de acesso (APs) de baixo custo sejam distribuídos de forma mais homogênea pela área de cobertura, promovendo uma experiência mais equilibrada, especialmente em regiões com sinal fraco.

A arquitetura do CF-mMIMO, ilustrada na Figura 5, é composta por APs distribuídos geograficamente, cada um atendendo múltiplos usuários (UEs) simultaneamente, utilizando os mesmos recursos de tempo e frequência.



Cada AP é conectado a uma unidade central de processamento (CPU) por meio de um enlace fronthaul, que atua como o canal de comunicação responsável por transmitir dados de usuário e informações de controle entre os pontos de acesso distribuídos e a CPU central. Essa CPU é encarregada da gestão centralizada da comunicação, do tráfego de dados e das demais operações da rede.

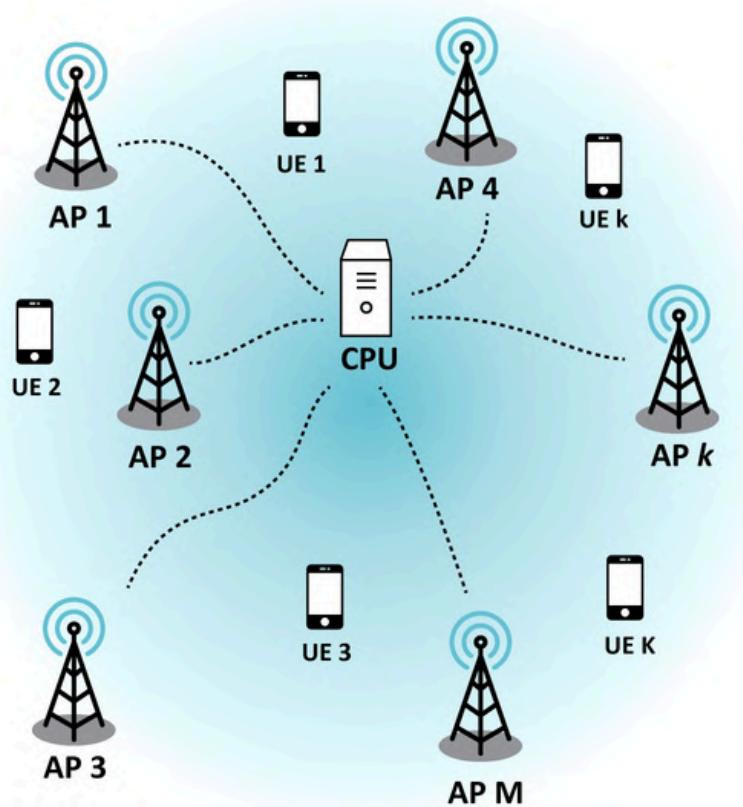


Figura 5. Rede MIMO massivo Cell-Free.

O CF-mMIMO é apontado como uma tecnologia promissora para as redes móveis de 6G. No entanto, sua implementação traz diversos desafios técnicos. Destacam-se a necessidade de sincronização precisa entre os APs, o que exige elevado esforço computacional e intensa troca de informações sobre o estado do canal. Além disso, as limitações de hardware devem ser cuidadosamente consideradas, uma vez que o elevado número de antenas nos APs pode resultar em maior consumo energético e aumento nos custos de implementação.

Assim como nos sistemas MIMO massivo, há o risco de degradação no desempenho devido a imperfeições nos componentes de hardware. Elementos que não operam conforme os padrões ideais podem introduzir interferências e ruídos, comprometendo a qualidade do sinal transmitido e recebido, e, consequentemente, a eficiência global do sistema.

3. IRS

As IRS são compostas por arranjos de elementos refletores passivos, capazes de ajustar, de forma controlada e independente, a amplitude e a fase dos sinais incidentes, sem necessidade de alimentação elétrica ou fonte de energia externa. Esses elementos geralmente consistem em estruturas simples, como superfícies metálicas projetadas para refletir ondas eletromagnéticas ao ambiente em que estão inseridas.

Diferentemente dos sistemas de comunicação sem fio convencionais, nos quais apenas o transmissor e o receptor podem ser ajustados, as IRS possibilitam o controle intencional e determinístico do canal sem fio, permitindo ajustar a propagação do sinal conforme os requisitos específicos de uma aplicação ou cenário. Essa capacidade viabiliza uma adaptação mais precisa e eficiente às condições do ambiente.

Além disso, as IRS introduzem novas estratégias para mitigar os efeitos do desvanecimento, fenômeno que degrada a intensidade do sinal durante a propagação entre transmissor e receptor. Com isso, essas superfícies apresentam grande potencial para melhorar tanto a qualidade do sinal recebido quanto a capacidade global da rede. Conforme ilustrado na Figura 6, as IRS podem ser instaladas em fachadas de edifícios, veículos ou mesmo em drones, ampliando a cobertura e reforçando o sinal por meio de reflexões direcionadas.

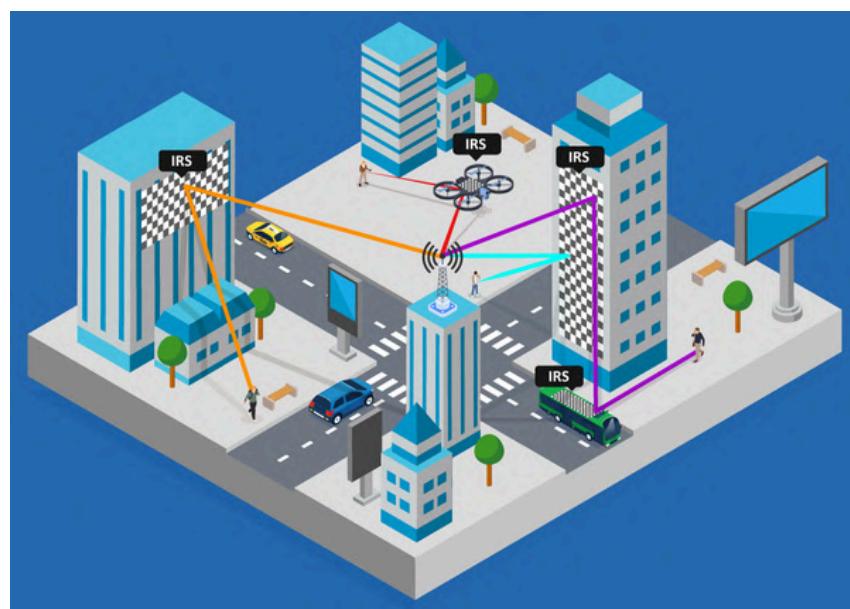


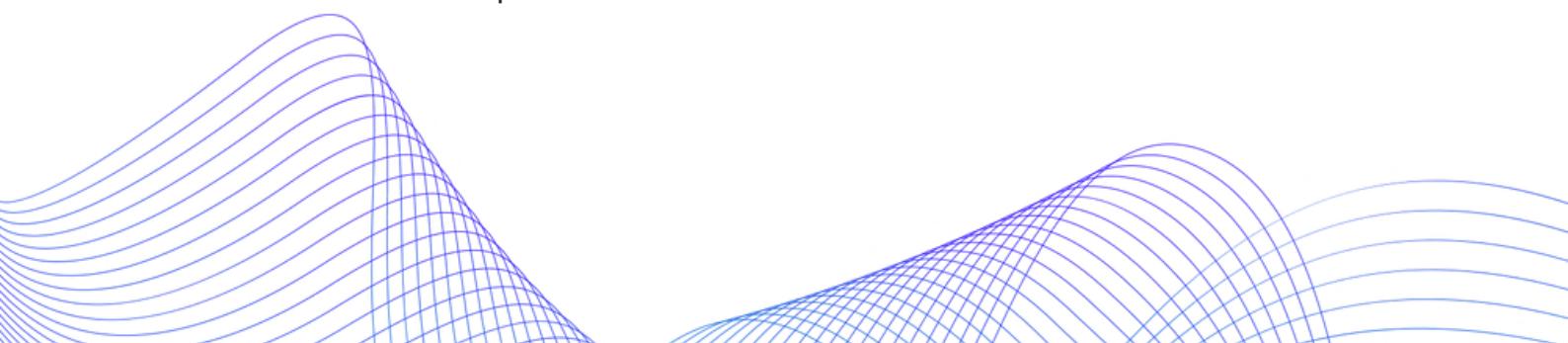
Figura 6. Exemplo de aplicações da IRS.

Um dos principais diferenciais das IRS é o seu baixo custo de hardware em comparação aos arranjos de antenas ativas empregados em sistemas convencionais, como os esquemas MIMO. Por serem compostas majoritariamente por elementos passivos, as IRS dispensam circuitos de radiofrequência, amplificadores e fontes de alimentação, o que resulta em menor complexidade de fabricação, redução no consumo de energia e custos operacionais significativamente mais baixos. Essa simplicidade estrutural torna as IRS uma solução altamente eficiente do ponto de vista energético e sustentável, especialmente adequada para implantações em larga escala e ambientes densamente conectados.

Do ponto de vista funcional, as IRS operam por meio do controle da reflexão das ondas eletromagnéticas incidentes. Isso é viabilizado pelo ajuste dinâmico de parâmetros elétricos de seus elementos passivos, como capacidade, resistência e indutância, os quais influenciam diretamente a impedância eletromagnética local. Ao ajustar esses parâmetros, torna-se possível alterar o coeficiente de reflexão de cada elemento da superfície, ou seja, das células unitárias que compõem a estrutura da IRS, permitindo o redirecionamento preciso dos feixes incidentes, com controle sobre direção e intensidade. Dessa forma, as IRS atuam como uma estrutura passiva reconfigurável, capaz de manipularativamente a propagação do sinal, mesmo sem o uso de componentes ativos. Sua principal vantagem reside na capacidade de concentrar energia com alta precisão no espaço tridimensional, especialmente em frequências elevadas, reduzindo interferências e aumentando a confiabilidade dos enlaces.

Apesar dessas vantagens, a implementação prática das IRS ainda enfrenta desafios relevantes. Um dos principais é o acoplamento mútuo entre elementos adjacentes, que compromete o controle individual de cada refletor. Outras limitações incluem complexidades no processo de fabricação, restrições físicas e dificuldades de integração com sistemas de comunicação existentes. Para que essa tecnologia seja amplamente adotada, é fundamental garantir sua viabilidade econômica e compatibilidade com a infraestrutura atual.

Ao se avaliar as características fundamentais dos sistemas MIMO e IRS, torna-se evidente sua importância estratégica para o avanço das redes 6G. Essas soluções despontam como candidatas promissoras para superar as limitações dos sistemas atuais e explorar novas fronteiras de capacidade, eficiência e cobertura, abrindo caminho para uma era de conectividade sem precedentes.



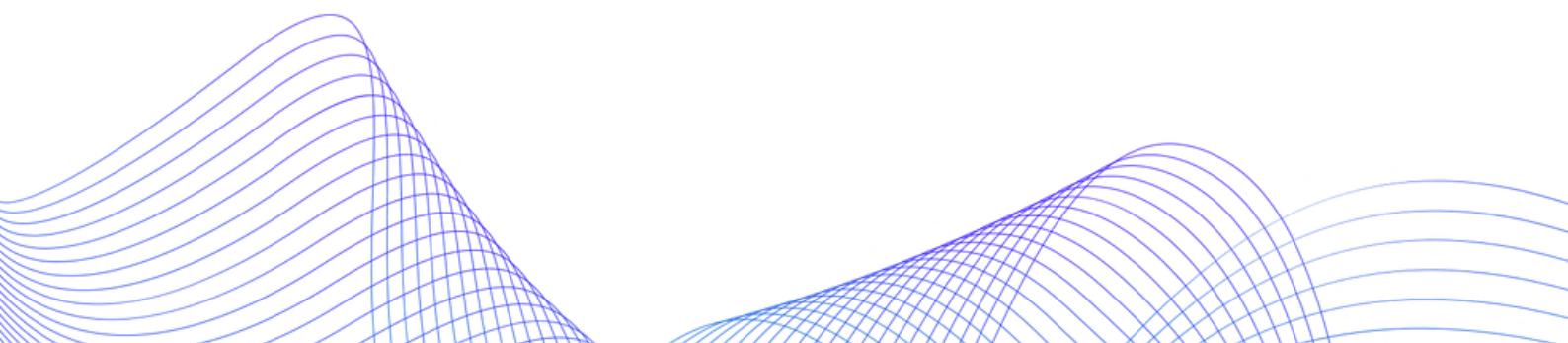
4. Antena Fluída

Os sistemas MIMO e as IRS, conforme já mencionado, representam soluções bem estabelecidas para a melhoria da eficiência espectral, da confiabilidade do enlace e da capacidade de transmissão das redes móveis, especialmente em ambientes densamente urbanizados e operando em faixas de alta frequência, característicos dos cenários 5G e das futuras redes 6G. No entanto, ambas as tecnologias ainda enfrentam limitações práticas, incluindo desafios relacionados à modelagem precisa dos canais em ambientes dinâmicos, à complexidade da implementação em larga escala e à integração eficiente com arquiteturas de rede heterogêneas e massivamente conectadas.

Nesse contexto, os sistemas de FA surgem como uma alternativa inovadora e promissora às soluções tradicionais, como MIMO e IRS, especialmente em cenários que exigem alta eficiência, menor complexidade e dimensões físicas reduzidas. A principal característica desses sistemas é o uso de uma única antena com capacidade de movimentação física controlada dentro de um espaço limitado, geralmente estruturado de forma linear ou plana, permitindo a exploração da diversidade espacial de forma eficiente.

Essa antena é composta por materiais com propriedades condutivas, ou seja, capazes de transmitir sinais elétricos, e que também apresentam flexibilidade ou fluidez. Entre os materiais utilizados, destacam-se os metais líquidos, como o Galinstan e o EGaIn, uma liga eutética de gálio e índio, que permanecem em estado líquido à temperatura ambiente, permitindo alterações físicas na forma ou na posição da antena. Outra opção são as soluções ionizadas, como o cloreto de sódio (NaCl) e o cloreto de potássio (KCl), que também apresentam boa condutividade elétrica e podem ser deslocadas com facilidade. Com base nessas características, uma FA pode ser definida como qualquer antena equipada com uma estrutura fluida controlável por software, capaz de alterar sua forma e posição para reconfigurar parâmetros como polarização, frequência de operação, diagrama de radiação e outros indicadores de desempenho.

Essas propriedades permitem que a antena se desloque fisicamente ou reconfigure sua estrutura interna para ocupar diferentes posições previamente definidas dentro de um espaço delimitado, denominadas portas.



Cada porta corresponde a um ponto específico onde a antena pode ser temporariamente posicionada para transmitir ou receber sinais. Esse reposicionamento pode ser viabilizado por mecanismos eletromecânicos, como motores ou trilhos miniaturizados, que movem fisicamente a antena entre as diferentes posições disponíveis. Alternativamente, o reposicionamento pode ocorrer por meio da aplicação de campos elétricos ou magnéticos sobre as soluções condutivas, que alteram sua forma ou posição funcional em resposta ao estímulo aplicado. Tais abordagens possibilitam rápidas adaptações às variações nas condições do canal de comunicação.

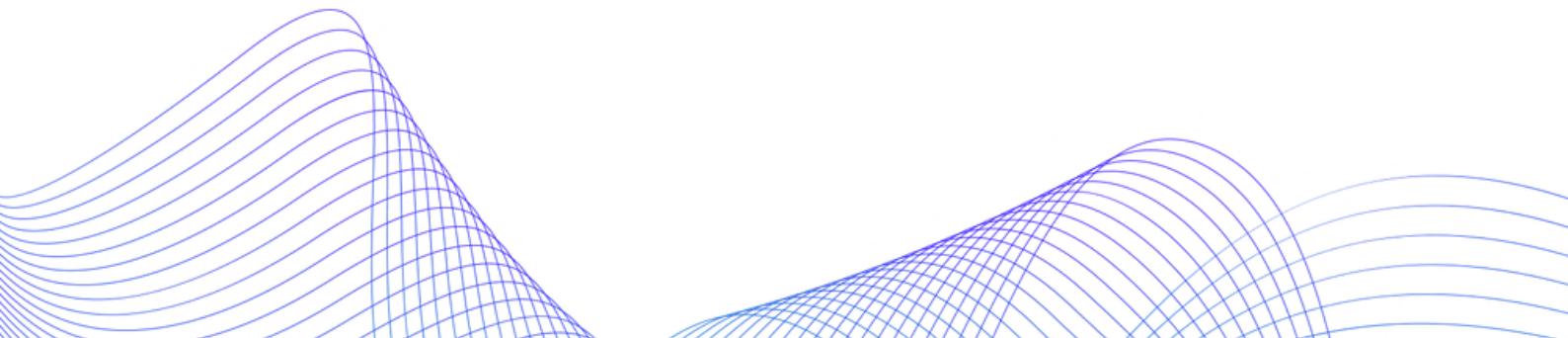
O sistema realiza um monitoramento contínuo do ambiente de propagação e seleciona, em tempo real, a porta que apresenta melhor qualidade de canal, ou seja, o ponto onde o sinal recebido é mais intenso ou menos suscetível a interferências e ao desvanecimento. Esse processo pode ser interpretado como uma forma de diversidade espacial adaptativa, implementada com o uso de uma única antena, em contraste com as abordagens tradicionais baseadas em múltiplas antenas, como nos sistemas MIMO.

Ao explorar a variabilidade espacial do canal e ajustar dinamicamente a posição da antena, os sistemas de FA são capazes de maximizar o ganho de sinal, mitigar os efeitos da interferência e do desvanecimento, e aumentar a confiabilidade da comunicação.

4.1 Exemplo de Implementação

A Figura 7 ilustra o conceito de uma possível implementação de uma FA em um dispositivo móvel, destacando tanto sua aplicação prática quanto a estrutura interna responsável pelo funcionamento dinâmico da antena. A parte superior da imagem mostra a integração da FA no corpo do dispositivo, evidenciando sua aplicabilidade em equipamentos compactos, como smartphones.

Na parte inferior, observa-se a estrutura detalhada da FA. O fluido condutivo, que atua como elemento radiante, é inserido em um reservatório tubular, permitindo seu deslocamento ao longo de um eixo linear, representado pela direção de movimento da FA. Esse deslocamento é viabilizado por um sistema de entrada e saída de ar, que pressuriza ou despressuriza a câmara de ar, forçando o movimento do fluido no interior do canal.



A estrutura é composta por um plano de terra e um substrato dielétrico, sobre o qual se encontra a linha de alimentação do tipo microfita, responsável por conduzir o sinal de radiofrequência (RF) até o fluido condutivo. Embora a forma física da antena permaneça fixa, sua posição pode ser ajustada dinamicamente dentro do dispositivo, permitindo a seleção do ponto com melhor desempenho de sinal.

A identificação da posição ideal do fluido para se obter maiores ganhos de diversidade envolve uma combinação de monitoramento do canal de comunicação, algoritmos de otimização e controle preciso do movimento do fluido. Esse reposicionamento adaptativo permite explorar a variabilidade espacial do canal de propagação, resultando em ganhos de diversidade e capacidade, além de oferecer vantagens adicionais, como menor consumo de energia e estrutura compacta.

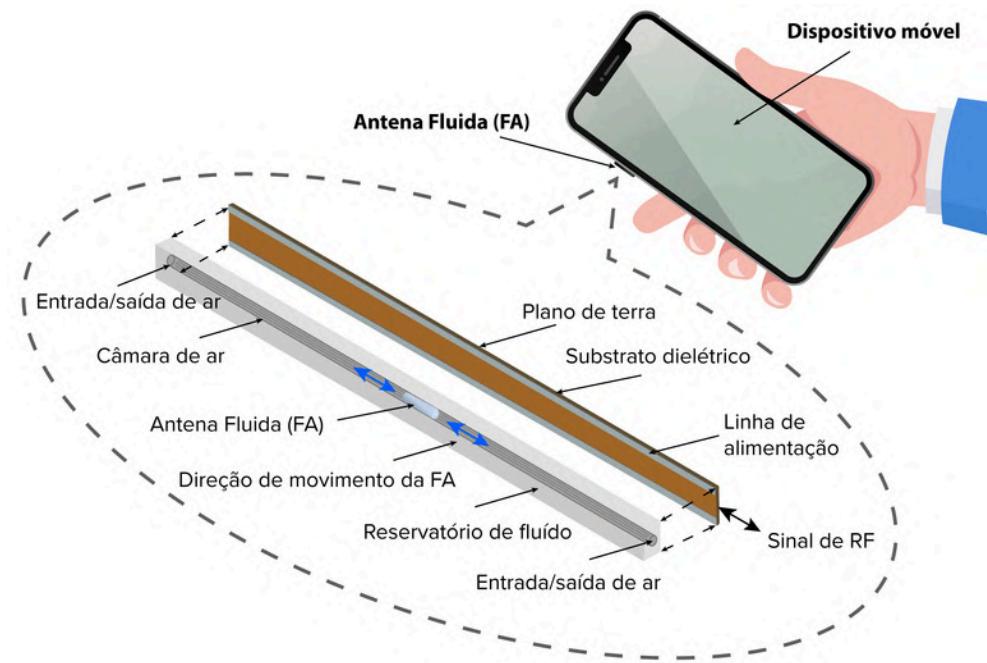
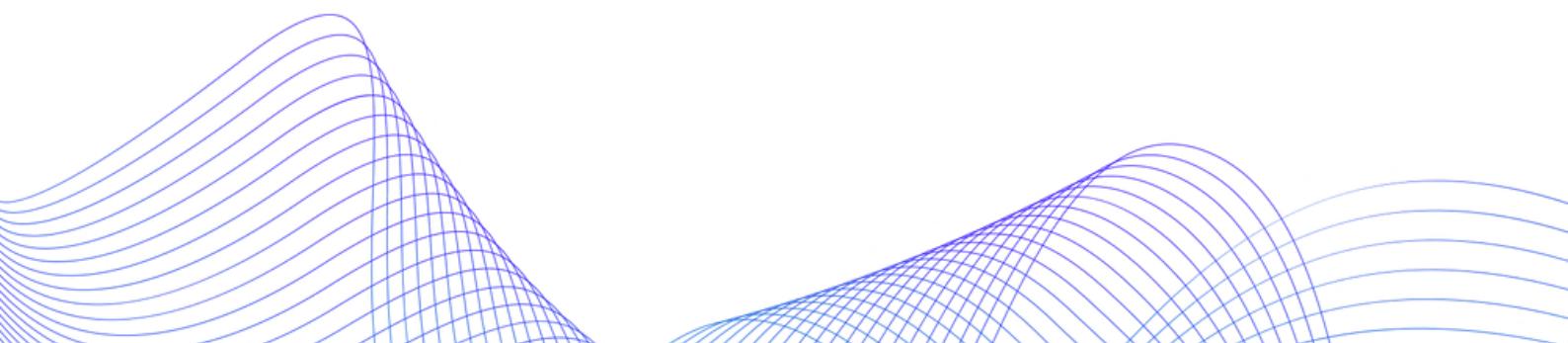


Figura 7. Exemplo de implementação da FA em um smartphone.

4.2 Benefícios e Aplicações Práticas

As FA representam uma inovação promissora para sistemas de comunicação sem fio, especialmente em aplicações móveis e vestíveis. A seguir, são destacadas suas principais vantagens e aplicações práticas.



- **Redução da Exposição ao Campo Eletromagnético**

Uma das vantagens mais relevantes das antenas fluidas é a capacidade de reduzir a exposição do usuário à radiação eletromagnética, especialmente em regiões de campo próximo, como a cabeça e as mãos. Essa característica é especialmente útil em dispositivos móveis, como smartphones.

Durante uma chamada, por exemplo, a FA pode ser reposicionada de modo que a maior parte da radiação não seja direcionada à cabeça do usuário, contribuindo para maior segurança e menor absorção de energia pelo corpo. Além disso, como o corpo humano pode bloquear ou distorcer o sinal, principalmente quando as mãos seguram o dispositivo, a mobilidade da FA permite ajustar sua posição dentro do dispositivo, evitando interferências e otimizando a recepção.

Como ilustrado na Figura 8, a possibilidade de reposicionar dinamicamente a antena para longe da mão do usuário permite um aproveitamento mais eficiente da energia radiada, com menor perda e melhor direcionamento do sinal. Isso reduz a necessidade de potência de transmissão, contribuindo para a economia de energia da bateria.

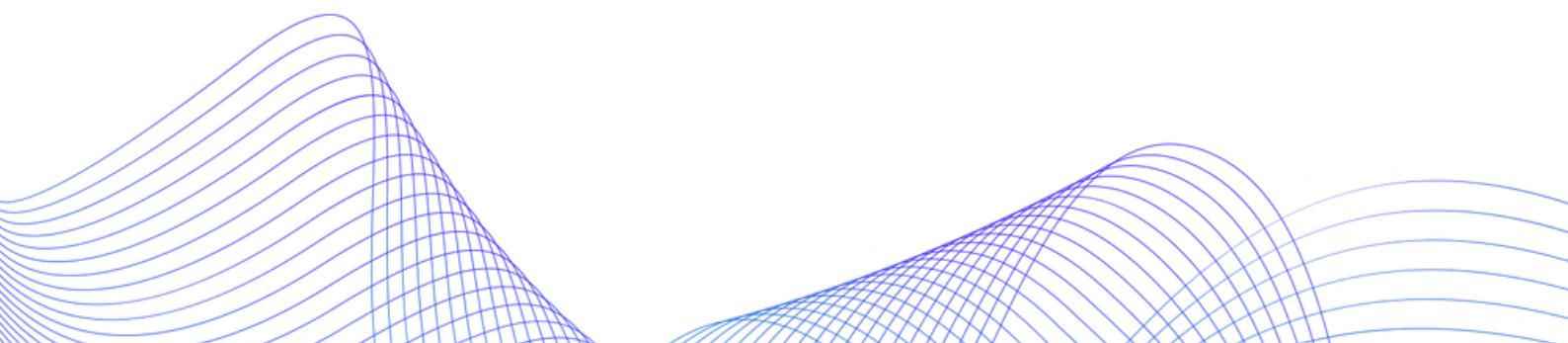


Figura 8. A FA é posicionada de modo a evitar a proximidade com os dedos do usuário.

- **Flexibilidade Mecânica e Integração em Dispositivos Vestíveis**

Outro diferencial das antenas fluidas é sua alta flexibilidade mecânica, que permite o desenvolvimento de estruturas dobráveis, deformáveis e adaptáveis a diferentes superfícies. Utilizando materiais condutivos fluidos em suportes flexíveis, essas antenas podem ser moldadas sem comprometer sua funcionalidade eletromagnética.

Como mostrado na Figura 9, essa característica torna a FA ideal para dispositivos vestíveis (wearables), podendo ser integrada diretamente a roupas, como camisas, casacos ou acessórios.



A capacidade de acompanhar os movimentos naturais do corpo humano sem causar desconforto nem perda de desempenho é essencial em aplicações como:

- Monitoramento de parâmetros de saúde;
- Rastreamento esportivo;
- Realidade aumentada;
- Comunicação corpo-a-corpo.

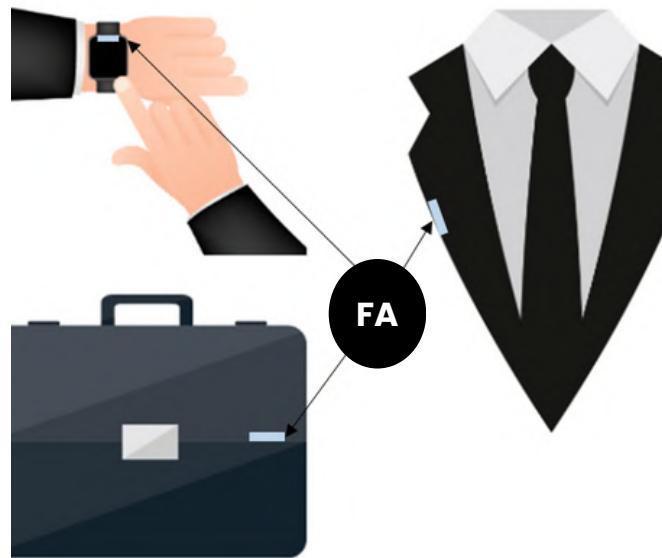
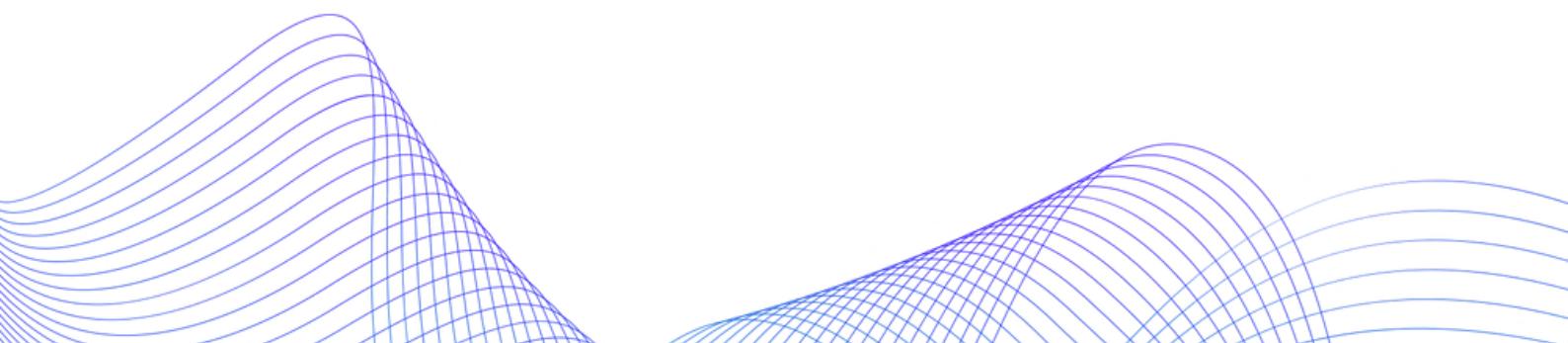


Figura 9. Exemplo de aplicação da FA em roupas e acessórios.

A integração da FA em wearables oferece uma solução leve, compacta e adaptativa, adequada para ambientes dinâmicos e para a conectividade contínua exigida em redes 5G e futuras 6G.

Apesar de suas vantagens, uma limitação intrínseca das antenas fluidas está associada à restrição do deslocamento espacial efetivo do elemento radiador, que normalmente é limitado a apenas alguns comprimentos de onda do sinal de operação, tipicamente entre milímetros e poucos centímetros, dependendo da frequência empregada. Essa limitação torna-se particularmente crítica em bandas de frequência elevadas, como as faixas de ondas milimétricas (mmWave) e terahertz (THz), consideradas promissoras para aplicações em redes 6G. Nessas faixas, os comprimentos de onda são extremamente curtos. Por exemplo, em 30 GHz, o comprimento de onda é de aproximadamente 10 mm, de modo que deslocamentos de 2 a 3 comprimentos de onda correspondem a apenas 2–3 cm.



Esse deslocamento é insuficiente para compensar obstruções físicas de maior escala ou para se adaptar a alterações significativas nas condições do ambiente de propagação, como o bloqueio repentino da linha de visada (LoS) ou mudanças relevantes na geometria do canal, isto é, modificações físicas ou estruturais no ambiente que impactam diretamente os caminhos de propagação do sinal entre transmissor e receptor. Como consequência, a capacidade da FA de manter enlaces de alta qualidade em cenários dinâmicos ou fortemente obstruídos é consideravelmente limitada.

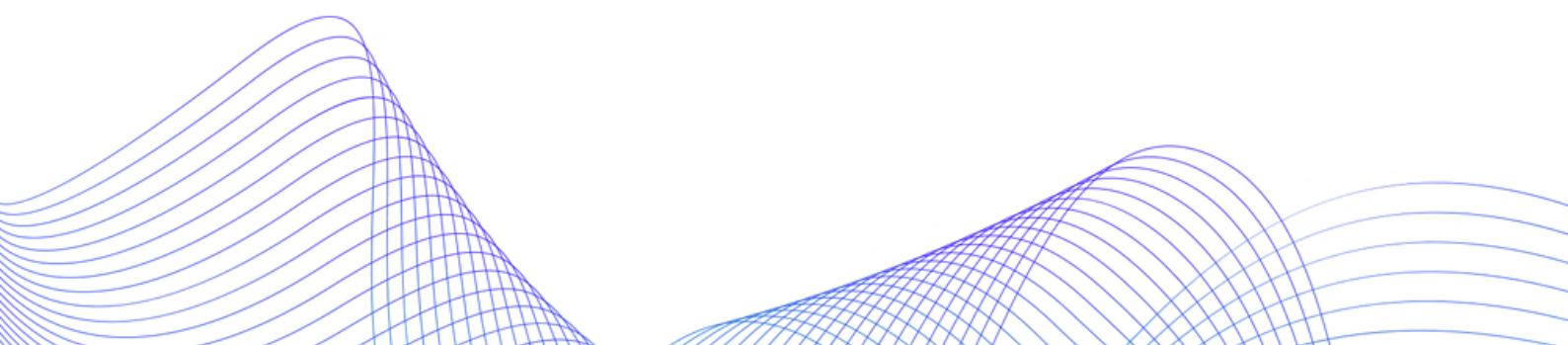
5. Antena de Pinçamento

As antenas de pinçamento desempenham como uma solução inovadora ao combinar elevada adaptabilidade com baixo custo de implantação. Em contraste com outras abordagens de antenas adaptativas como as antenas fluidas, que apresentam restrições quanto à reconfiguração estrutural e cujos deslocamentos do elemento radiador são tipicamente limitados a apenas alguns comprimentos de onda, e também com soluções mais consolidadas, como os sistemas MIMO, que dependem de múltiplas antenasativamente controladas, e as IRS, que manipulam passivamente o ambiente de propagação por meio de elementos reconfiguráveis, as antenas de pinçamento oferecem a possibilidade de ativar ou desativar elementos radiantes em pontos específicos ao longo de um guia de onda, de maneira simples, eficiente e com alta flexibilidade espacial.

Essa capacidade elimina a necessidade de modificações físicas complexas, viabilizando uma reconfiguração estrutural dinâmica, escalável e de baixo custo, adequada a cenários altamente dinâmicos e ambientes de propagação desafiadores, como aqueles com bloqueios imprevisíveis ou variações na configuração física do ambiente de propagação.

5.1 Princípio de Funcionamento

A antena de pinçamento baseia-se na utilização de um guia de onda dielétrico, tipicamente construído com PTFE (Politetrafluoretileno), material amplamente empregado devido às suas excelentes propriedades eletromagnéticas, como baixa permissividade relativa (~2,1), baixa perda dielétrica em altas frequências e alta estabilidade térmica e química.



Esse guia de onda atua como um meio de propagação confinado para ondas eletromagnéticas, conduzindo o sinal internamente sem radiação para o espaço livre, desde que não haja perturbações estruturais. Quando um material dielétrico distinto, com propriedades diferentes das do guia principal, é pinçado ou pressionado contra o guia de onda (por exemplo, com o uso de um prendedor de roupa contendo esse segundo dielétrico), ocorre um acoplamento eletromagnético local.

Esse acoplamento altera as condições de confinamento do campo eletromagnético no ponto de contato, resultando na emissão parcial do sinal em forma de ondas de rádio para o espaço livre. Em outras palavras, o guia de onda passa a funcionar como uma antena radiadora naquele ponto pinçado, estabelecendo assim uma zona de cobertura ativa e localizada.

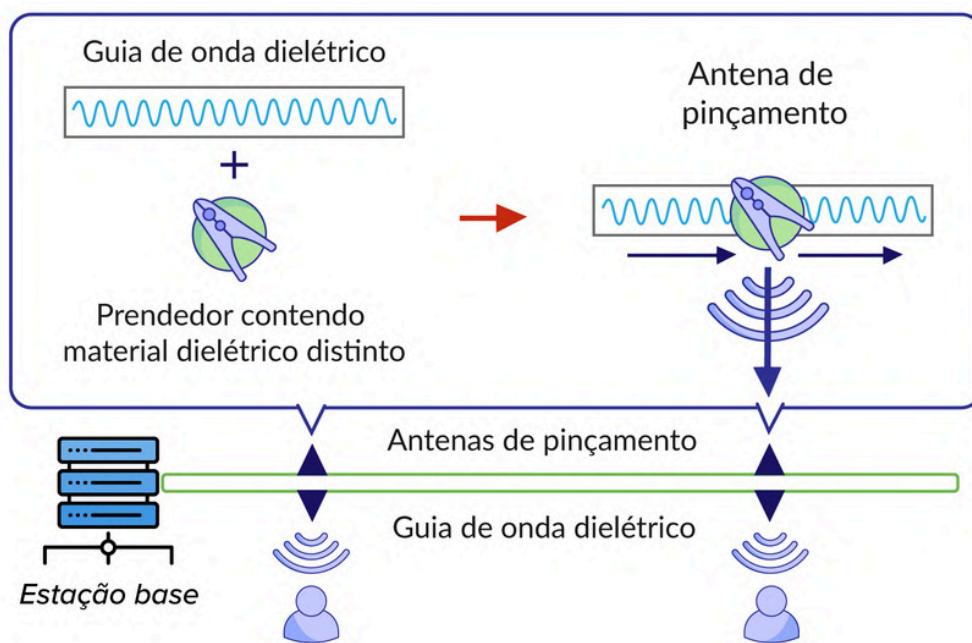


Figura 10. Exemplo do princípio de funcionamento da antena de pinçamento.

A Figura 10 ilustra o princípio de funcionamento da antena de pinçamento, cuja estrutura é composta por dois elementos principais:

- Um guia de onda dielétrico, responsável por conduzir o sinal eletromagnético de forma confinada ao longo de sua extensão;
- Um prendedor contendo material dielétrico distinto do guia de onda, que atua como elemento de ativação ao ser fixado sobre o guia, promovendo o acoplamento e consequente radiação do sinal.



Na parte inferior da figura, observa-se uma estação base que alimenta o guia de onda dielétrico ao longo do ambiente. Em pontos específicos desse guia, são formadas antenas de pinçamento ativas, que radiam sinais diretamente para os usuários posicionados nas respectivas zonas de cobertura. O exemplo mostra dois usuários, cada um atendido por uma antena ativada localmente, de acordo com a demanda de comunicação.

5.2 Vantagens das Antenas de Pinçamento

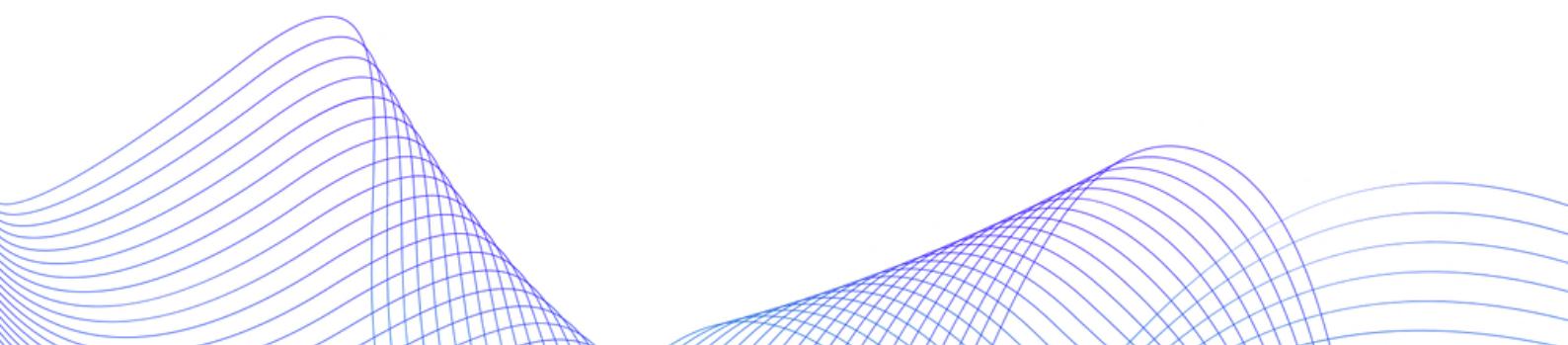
Algumas das vantagens das antenas de pinçamento incluem:

- **Maior Estabilidade de Linha de Visada**

Em sistemas de comunicações sem fio, a presença de um enlace LoS isto é, um caminho direto e desobstruído entre o transmissor e o receptor, é essencial para garantir alta qualidade de sinal, elevadas taxas de transmissão de dados e baixa latência. Quando o LoS é obstruído por prédios, paredes ou outros objetos, a comunicação passa a depender de trajetórias refletidas ou difratadas (caminhos NLoS, *Non-Line-of-Sight*), que, em geral, apresentam maior atenuação e desempenho inferior.

As antenas de pinçamento superam essas limitações ao utilizar um guia de onda dielétrico que pode ser fisicamente estendido ao longo do ambiente. Ao longo desse guia, é possível ativar antenas de pinçamento em pontos específicos, conforme a necessidade de criação ou restauração de enlaces LoS. Assim, se um usuário se encontra em uma posição onde o enlace direto com a estação base é fraco ou inexistente, uma antena de pinçamento pode ser ativada exatamente naquele ponto do guia de onda, estabelecendo um novo enlace LoS direto com o usuário.

Essa capacidade de aproximar a fonte do sinal do usuário, de forma controlada e com baixo custo, não é viabilizada por outras tecnologias adaptativas, como antenas fluidas, IRS ou sistemas MIMO, que apresentam restrições espaciais mais rígidas e menor flexibilidade de reposicionamento físico. Com a evolução rumo às redes 6G e o avanço de aplicações sensíveis à latência, como IoT, robótica, realidade aumentada, entre outras, torna-se ainda mais crítica a necessidade de estabelecer conexões extremamente próximas do usuário, no chamado "último metro" da comunicação, onde a qualidade do enlace impacta diretamente o desempenho e a experiência do serviço.



- **Formação de Feixe por Pinçamento Flexível**

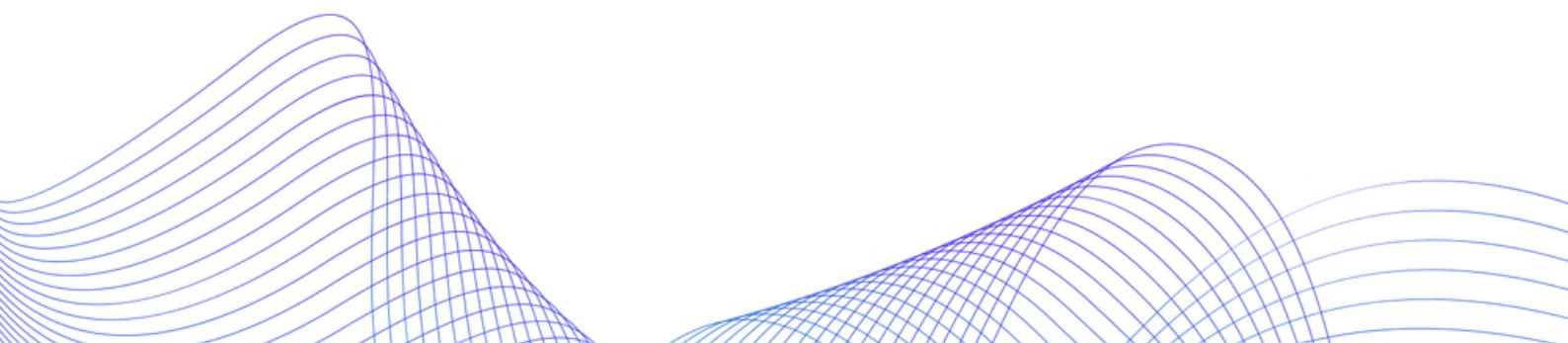
O sistema de antena de pinçamento permite a implementação de estratégias avançadas de formação de feixe (*beamforming*) com elevada adaptabilidade espacial. Essa abordagem refere-se à capacidade do sistema de controlar dinamicamente a direção e a intensidade do sinal radiado, por meio do ajuste do número e da posição das antenas de pinçamento ao longo do guia de onda dielétrico, de forma altamente flexível e escalável.

Essa característica possibilita a focalização precisa do feixe em regiões de interesse, além da mitigação de interferências indesejadas, otimizando a distribuição de energia no espaço. Como resultado, o sistema de antena de pinçamento se mostra eficaz no atendimento a requisitos rigorosos de desempenho, especialmente em cenários com alta densidade de dispositivos ou aplicações críticas em redes 5G e 6G.

- **Implementação Econômica e Escalável**

O sistema de antena de pinçamento apresenta grande simplicidade de implementação e baixo custo de implantação, não apenas em razão do custo reduzido dos guias de onda dielétricos, mas também por demandar apenas a adição ou remoção de materiais dielétricos em pontos específicos ao longo do guia. Essa característica elimina a necessidade de circuitos eletrônicos complexos ou infraestruturas sofisticadas, tornando o sistema de antena de pinçamento uma solução altamente escalável, de arquitetura modular e viável para projetos práticos de redes, especialmente em aplicações que exigem flexibilidade, reconfigurabilidade e eficiência de custo.

Dante das vantagens apresentadas, as antenas de pinçamento consolidam-se como uma abordagem promissora para redes de comunicações sem fio de próxima geração. Esses benefícios têm impulsionado um crescente interesse da comunidade científica em investigar e aprimorar o desempenho desses sistemas. Embora avanços iniciais já tenham sido alcançados, o desenvolvimento de soluções completas e otimizadas para essas antenas ainda se encontra em estágio inicial, evidenciando um amplo espaço para inovações futuras. Nesse contexto, as antenas de pinçamento surgem como uma tecnologia com elevado potencial para transformar o projeto de redes flexíveis, eficientes e adaptativas, inspirando novos estudos e aplicações em comunicações 5G, 6G e além.



6. Conclusão

As tecnologias de antenas adaptativas vêm desempenhando um papel estratégico na evolução das comunicações sem fio, especialmente diante das exigências impostas pelas redes 5G e 6G. Abordagens como sistemas MIMO, IRS, antenas fluídas e antenas de pinçamento oferecem soluções complementares para superar limitações de cobertura, eficiência espectral, latência e confiabilidade.

Cada tecnologia apresenta vantagens específicas e desafios inerentes: os sistemas MIMO promovem ganhos significativos de capacidade, mas requerem estruturas complexas e alto custo computacional, as IRS oferecem reconfiguração passiva e economia energética, embora ainda enfrentem limitações de integração prática, as antenas fluídas introduzem mobilidade do elemento radiador com grande versatilidade, mas com atuação espacial restrita, e as antenas de pinçamento, mais recentemente propostas, se destacam pela alta flexibilidade de implantação, simplicidade estrutural, custo reduzido e capacidade de criação dinâmica de enlaces LoS no "último metro".

Diante disso, fica evidente que não existe uma solução única e definitiva, mas sim um ecossistema tecnológico em expansão, no qual diferentes tipos de antenas adaptativas podem ser combinados para atender aos diversos cenários e aplicações emergentes, como IoT massiva, comunicações ultraconfiáveis e de baixa latência, realidade aumentada, cidades inteligentes, redes não terrestres, entre outras.

O avanço contínuo dessas tecnologias depende da superação de desafios técnicos, como miniaturização, controle em tempo real, eficiência energética e integração com arquiteturas de rede.

