

NÍVEA DA CUNHA FUGOLIN

ANÁLISE DO *MASSIVE MIMO* E SEUS RECURSOS EM ESTAÇÕES DE REDES MÓVEIS 5G

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 402 - Projeto de Engenharia II e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 29 de 01 de 2025.

COMISSÃO EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **KETIA SOARES MOREIRA**
Data: 30/01/2025 09:31:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Kétia Soares Moreira - Orientador
Universidade Federal de Viçosa

Documento assinado digitalmente
 **MAURO DE OLIVEIRA PRATES**
Data: 30/01/2025 09:49:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Mauro de Oliveira Prates - Membro
Universidade Federal de Viçosa

Documento assinado digitalmente
 **AMANDA BOMFIM MOITINHO**
Data: 30/01/2025 09:41:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Mestranda Amanda Bomfim Moitinho – Membro
Universidade Federal de Viçosa

ANÁLISE DO MASSIVE MIMO E SEUS RECURSOS EM ESTAÇÕES DE REDES MÓVEIS 5G

NÍVEA C. FUGOLIN¹

¹ *Estudante de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Viçosa, Av. P. H. Rolfs, s/n, Campus UFV, CEP: 36570-000, Viçosa, MG*

² *Projeto de Engenharia I - Universidade Federal de Viçosa, Rua Purdue, 632, Santo Antônio, Campus
UFV, CEP: 36570-000, Viçosa, MG*

E-MAILS: nivea.fugolin@ufv.br

Abstract— The Information and Communication Technology (ICT) Industry faces several global challenges that increase the complexity of the evolution and operation of mobile networks. These challenges include the rapid growth of mobile data traffic, the growing demand for reliable, high-speed mobile connectivity, the cost of energy and the need to transform towards a more sustainable operation. Over the years, data traffic has increased by 50% to 70% per year for all mobile technologies, especially 5G. Therefore, to meet the demand for greater data capacity with less environmental impact, a combination of hardware modernization and software resource installations is necessary. In view of this, this work aims to study and analyze solutions that work favorably to this challenge, in particular, Massive MIMO and its Spatial Diversity, Spatial Multiplexing, Beamforming and Nullforming resources.

Keywords Information and Communication Technology (ICT) Industry, Mobile Networks, Data Traffic, Environmental Impact, 5G, Massive MIMO.

Resumo— A Indústria de Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC) enfrenta vários desafios globais que aumenta a complexidade da evolução e operação de redes móveis. Esses desafios incluem o rápido crescimento do tráfego de dados móveis, a crescente demanda por conectividade móvel confiável e de alta velocidade, o custo energético e a necessária transformação por uma operação mais sustentável. Com o passar dos anos, o tráfego de dados tem aumentado de 50% a 70% por ano para todas as tecnologias móveis, principalmente para o 5G. Sendo assim, para suprir a demanda por uma maior capacidade de dados com menor impacto ambiental, é necessário a combinação de modernização de hardware e instalações de recursos de softwares. À vista disso, este trabalho possui, como objetivo, o estudo e a análise de soluções que trabalham favoravelmente a esse desafio, em especial, o *Massive MIMO* e seus recursos de Diversidade Espacial, Multiplexação Espacial, *Beamforming* e *Nullforming*.

Palavras-chave— Indústria de Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC), Redes Móveis, Tráfego de Dados, Impacto Ambiental, 5G, *Massive MIMO*, Diversidade Espacial, Multiplexação Espacial, *Beamforming* e *Nullforming*.

1 Introdução

A crescente digitalização da sociedade tem impulsionado uma demanda exponencial por conectividade e transmissão de dados. Aplicações como streaming de vídeo em alta definição, realidade aumentada, inteligência artificial, Internet das Coisas (IoT) e comunicações industriais exigem redes móveis cada vez mais eficientes, capazes de oferecer alta capacidade, baixa latência e maior confiabilidade. Esse aumento no consumo de dados, aliado à necessidade de suportar um número crescente de dispositivos conectados, desafia as infraestruturas de telecomunicações a evoluírem constantemente para atender a esses requisitos [1].

Diante desse cenário, o advento das redes 5G representa um marco na evolução das telecomunicações, trazendo avanços significativos para suportar essa demanda crescente. Entre as principais tecnologias que

viabilizam o desempenho superior do 5G, destaca-se o *Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output)*, um recurso essencial para ampliar a eficiência espectral, aumentar a capacidade de usuários simultâneos e melhorar a cobertura da rede [1].

Sendo assim, será feita a análise do funcionamento do *Massive MIMO*, suas principais características e os benefícios que proporciona para as estações de redes móveis 5G. A partir dessa análise, busca-se compreender o impacto dessa tecnologia na evolução das telecomunicações e sua contribuição para atender à crescente demanda global por conectividade de alta velocidade, baixa latência, além de apoiar na busca por um menor impacto ambiental.

1.1 *Massive MIMO*

A tecnologia referente ao *Massive MIMO* trata-se de uma modernização da técnica *MIMO (Multiple Input Multiple Output)* - Figura 1 - utilizada em sistemas de comunicação sem fio para multiplicar a capacidade de transmissão

utilizando múltiplas antenas de transmissão e recepção, explorando a propagação multicaminho, garantindo melhor eficiência de espectro e melhor rendimento [2].



Figura 1. AIR 3284 - Banda-tripla *Massive MIMO* FDD com 32 transmissores e receptores (32T/32R). [17]

Massive MIMO, ou *M-MIMO*, é a extensão da tecnologia *MIMO* tradicional para uma quantidade maior de 8 antenas controláveis. Essa tecnologia explora o domínio espacial usando *beamforming*, multiplexação espacial e *nullforming* [3].

A combinação de hardware *M-MIMO* e algoritmos avançados de *software* permite um uso de energia muito eficiente e também proporciona uma eficiência de espectro ainda maior em comparação com os rádios remotos tradicionais, como demonstrado na Figura 2. Nessa imagem, as curvas pontilhadas referenciam os rádios remotos tradicionais para as redes móveis 4G e 5G, ambas por duplexação por divisão de frequência (FDD), onde ocorre a utilização do espectro de forma emparelhada. A curva contínua referencia o rádio *M-MIMO* para a tecnologia 5G TDD - duplexação por divisão de tempo [4].

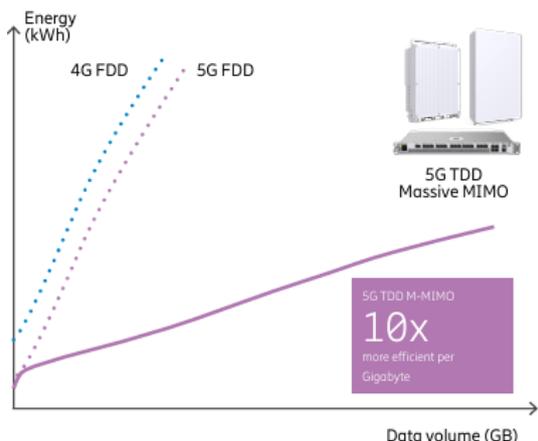


Figura 2. Eficiência energética do *Massive MIMO* 5G TDD em relação aos rádios remotos tradicionais 4G FDD e 5G FDD. [4]

1.2 Diversidade Espacial

O *MIMO* se fundamenta no princípio de que um sinal de rádio transmitido é modificado

pelo ambiente entre o transmissor e o receptor. Reflexões em edifícios e outros obstáculos criam diversos caminhos pelos quais o sinal pode chegar ao destino, conforme ilustrado na Figura 3 [6].

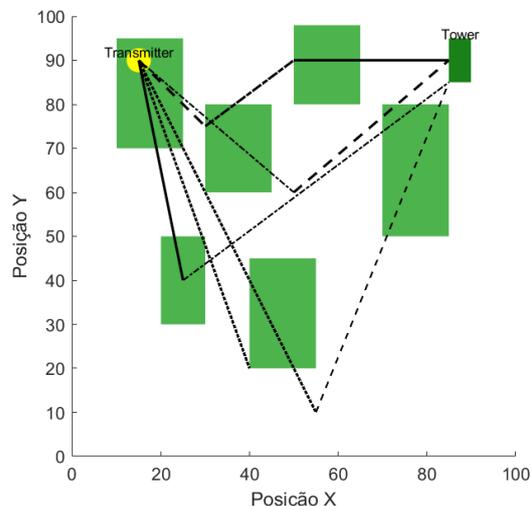


Figura 3. Reprodução da Rede de Sinais de Rádio em *MATLAB* com Múltiplos Caminhos de Sinal.

Na Figura 3, os edifícios correspondem aos retângulos verdes, o ponto de transmissão é representado por um círculo amarelo, a torre de antena, ponto de recepção, como um retângulo verde escuro e os diferentes estilos de linha caracterizam os caminhos múltiplos do sinal.

Posto isto, os sinais refletidos chegam à antena receptora com variações no tempo de atraso, níveis de atenuação e trajetórias de propagação. Ao se utilizar de múltiplas antenas receptoras, cada uma captura uma versão única do sinal, que pode ser processada em conjunto para otimizar a qualidade do sinal recebido. Uma vez que as antenas receptoras são espacialmente separadas umas das outras, essa técnica é conhecida como diversidade espacial. Esse fenômeno também corresponde à transmissão do sinal de rádio por múltiplas antenas, sendo possível que cada antena envie versões modificadas do mesmo sinal [11].

1.3 Multiplexação Espacial

Ao passo que a diversidade espacial melhora a confiabilidade do link de rádio, a multiplexação espacial, como demonstrado na Figura 4, amplia sua capacidade ao explorar múltiplos trajetos de propagação como canais extras para transmitir dados. Esse método possibilita o envio de diversos fluxos de dados independentes entre o transmissor e o receptor, o que possibilita o aumento considerável da taxa de

transferência, e também permite que um único transmissor suporte vários usuários na rede [3].

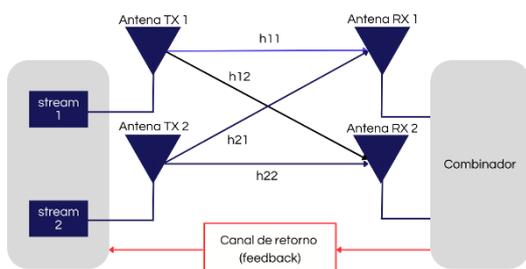


Figura 4. Multiplexação espacial.

Cada antena, posicionada ao lado do transmissor (TX), emite sinais que transportam informações distintas, conhecidos como fluxos de dados ou *streams*, por meio do canal sem fio. No receptor (RX), cada antena capta uma combinação dos sinais enviados. Com base nisso, o receptor consegue decodificar todos os sinais diferentes que foram transmitidos, o que permite aumentar a taxa de dados em comparação com sistemas que não utilizam multiplexação, ao mesmo tempo em que mantém a largura de banda. Esse potencial, denominado ganho de multiplexação, é proporcional ao número de antenas de transmissão ou recepção [13].

A técnica que torna a multiplexação espacial eficaz é baseada em um fenômeno do canal que é considerado prejudicial nas comunicações móveis, conhecido como dispersão temporal. Esse efeito ocorre quando o sinal transmitido é disperso (refletido, refratado, atenuado, difratado, etc.) pelo ambiente em que se propaga, resultando em réplicas do sinal chegando ao receptor em momentos distintos. Se os atrasos dessas réplicas forem superiores ao tempo necessário para que uma nova transmissão chegue, ocorre interferência, comprometendo seriamente a decodificação dos sinais. Para que a multiplexação espacial funcione adequadamente, três requisitos principais precisam ser atendidos:

1. Cada fluxo de dados transmitido (*streams*) deve ser afetado de maneira diferente pelo canal (efeitos descorrelacionados);
2. O transmissor e/ou receptor precisam ter conhecimento sobre como o canal impacta cada fluxo;
3. Os níveis dos sinais recebidos não devem ser excessivamente baixos.

1.4 Beamforming

Beamforming é outra técnica sem fio essencial que funciona em conjunto com o *Massive MIMO* para aumentar a produtividade e a capacidade da rede. Utiliza-se de tecnologias avançadas de antena para focar o sinal sem fio em uma direção específica, em vez de transmitir

para uma área ampla, como ilustrado na Figura 5. Essa técnica reduz a interferência entre feixes direcionados em direções diferentes, permitindo a implantação de conjuntos de antenas maiores [3].

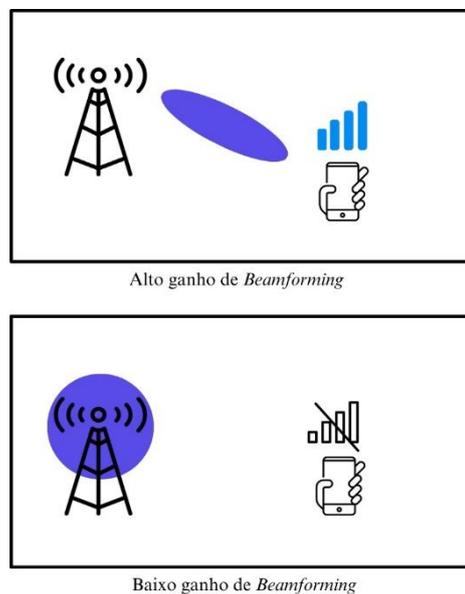


Figura 5. A formação de feixes concentra um sinal sem fio em uma direção específica.

Ao contrário de simplesmente transmitir energia/sinais em todas as direções, os conjuntos de antenas que usam formação de feixe (*beamforming*) determinam a direção de interesse e enviam/recebem um feixe de sinais mais forte nessa direção específica [14].

O grande número de antenas em um sistema *Massive MIMO* permite a formação de feixes 3D, que criam feixes horizontais e verticais em direção aos usuários, aumentando as taxas de dados (e capacidade) para todos os usuários, particularidade útil em áreas urbanas com edifícios altos [14].

Na Figura 6, é apresentada uma ilustração do fenômeno de *beamforming* em um sistema *Massive MIMO*. A imagem mostra como as ondas de rádio são concentradas em feixes direcionados a cada usuário, diferentemente da transmissão tradicional onde as ondas se espalham mais difusamente. Isso exemplifica a eficiência do *beamforming* em focar o sinal para usuários específicos.

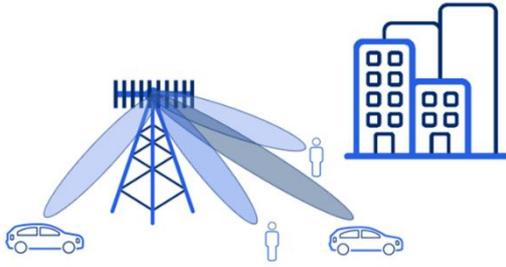


Figura 6. Ilustração Fenômeno *Beamforming*.

1.5 *Nullforming*

Finalmente, o fenômeno de *Nullforming* é uma técnica utilizada em sistemas de comunicação sem fio, particularmente em configurações de *Massive MIMO*, para minimizar ou eliminar interferências indesejadas entre sinais de diferentes estações bases [15].

Estações base de redes móveis geralmente emitem ondas de rádio em vastas áreas, cobrindo distâncias de até vários quilômetros. No entanto, a colisão de sinais de diferentes estações base pode causar interferência, prejudicando a qualidade da comunicação. O *Nullforming* é uma técnica que resolve esse problema ao suprimir sinais em direções específicas, veja Figura 7, para reduzir a interferência. Sinais sem fio se propagam em formas de onda e, ao utilizar múltiplos elementos de antena para cancelar os sinais em determinadas direções, cria-se um estado "nulo". Esse processo reduz drasticamente os sinais indesejados que se propagariam em direções interferentes. [15]

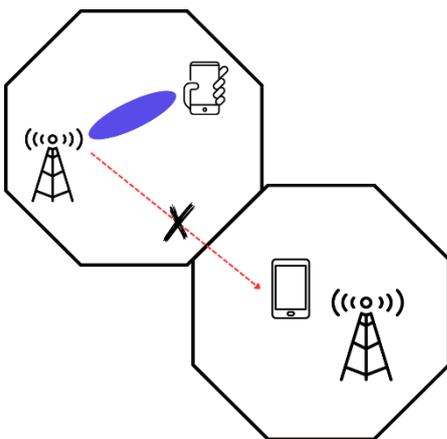


Figura 7. Ilustração do fenômeno *Nullforming*.

Ao suprimir a interferência em direções específicas, o *nullforming* melhora a qualidade do sinal nos receptores desejados, aumenta a

eficiência do espectro e o desempenho geral da rede.

Dessa forma, devido à flexibilidade oferecida por um grande número de antenas, a estação base, além de direcionar sinais para os usuários desejados (*beamforming*), também é capaz de suprimir sinais em direções onde interferências poderiam ocorrer (*nullforming*). Ambos estes fenômenos são complementares em sistemas *Massive MIMO*, ajudando a otimizar a transmissão de sinais ao aumentar a eficiência espectral e reduzir interferências em redes sem fio densas.

2 Desenvolvimento

Com o objetivo de estudar como esses fenômenos tratados ocorrem e suas implicações em um sistema *Massive MIMO*, o trabalho desenvolvido foi dividido em quatro etapas de simulação da diversidade espacial, da multiplexação espacial, do *Beamforming* e *Nullforming*, através de códigos *MatLab*.

2.1 Diversidade Espacial

A princípio, criou-se um código para simular a diversidade espacial em um sistema *Massive MIMO* 5G, como especificado nas etapas a seguir.

- Configuração do Sistema: Considerou-se 64 antenas transmissoras e 16 receptoras e 8 número de usuários;
- Geração do Canal *MIMO*: Simulou-se o canal de comunicação para cada usuário utilizando um modelo estocástico (Rayleigh);
- Geração do Sinal Transmitido: Gerou-se réplicas de sinais transmitidos pelas antenas da estação base;
- Cálculo do Sinal Recebido: Calculou-se o canal recebido a partir da interação dos canais com os sinais transmitidos;
- Cálculo da Potência Recebida: Calculou-se a potência recebida em cada antena;
- Cálculo do Ganho de Antena: Realizou-se a soma das potências recebidas de todas as antenas para cada usuário;
- Visualização da Diversidade Espacial: Gerou-se um gráfico que mostra a potência recebida por antena para cada usuário;
- Visualização do Ganho de Antena: Gerou-se um gráfico de barras mostrando o ganho de antena por usuário.

Esse código abrange as diversidades de transmissão e recepção, ou seja, o transmissor usa múltiplas antenas para transmitir sinais por diferentes caminhos espaciais e o receptor também utiliza múltiplas antenas para captar e combinar esses sinais. Essa configuração aproveita ao máximo a diversidade espacial proporcionada pelo *Massive MIMO* e permite visualizar como a potência do sinal varia entre as diferentes antenas receptoras, além de verificar o ganho de antena – cálculo da soma das potências recebidas por todas as antenas receptoras para cada usuário.

2.2 Multiplexação Espacial

Para visualizar a multiplexação espacial em um *Massive MIMO*, foram seguidas as seguintes etapas:

- a) Configurações do Sistema: Definiu-se 64 antenas na estação base, duas antenas nos equipamentos dos usuários (UEs), 4 usuários e adicionou-se a relação sinal-ruído (SNR);
- b) Geração do Canal *MIMO*: Criou-se um canal *MIMO* usando a distribuição de Rayleigh para modelar o canal entre as antenas da BS e as dos UEs;
- c) Sinal Transmitido: Foram gerados sinais complexos aleatórios que são transmitidos por cada antena da BS para cada usuário;
- d) Sinal Recebido: Calculou-se o sinal recebido em cada antena receptora a partir da interação dos canais com os sinais transmitidos;
- e) Adição de Ruído: Adicionou-se o Ruído Branco Gaussiano (AWGN) ao sinal recebido para simular condições reais;
- f) Análise e visualização dos resultados: Foram plotados os sinais recebidos por cada usuário, demonstrando interação entre os canais, sinais transmitidos e o ruído AWGN.

2.3 Beamforming

Foi descrito um código, em *MatLab*, que gerasse uma representação gráfica do fenômeno de *Beamforming* em um sistema *Massive MIMO*, mostrando como os sinais de rádio são direcionados para diferentes usuários em vez de se espalharem de forma uniforme. O procedimento foi seguido conforme descrito abaixo.

- a) Definição dos parâmetros do sistema: definiu-se 64 antenas no *Massive MIMO*, 4 usuários, ângulos de chegada dos usuários, espaçamento entre antenas e comprimento de onda;
- b) Alinhamento das antenas no plano linear;
- c) Cálculo e Plotagem 2D do Padrão de Radiação: para cada usuário, foi realizado o cálculo do vetor de direção, cálculo do padrão de radiação, conversão para coordenadas cartesianas e, por fim, plotagem em 2D;
- d) Plotagem 3D do Padrão de Radiação.

2.4 Nullforming

De forma complementar, foi desenvolvido outro código *MatLab* que simula um sistema de antenas em um ambiente *Massive MIMO* e demonstra o fenômeno de *Nullforming*. O processo de desenvolvimento do código foi descrito da seguinte forma.

- a) Configurações do Sistema: Definiu-se o 64 antenas na estação base, os ângulos de interesse, a distância entre as antenas, a frequência do sinal, e calculou-se o comprimento de onda;
- b) Direções dos Interferentes: Definiu-se os ângulos dos interferentes como sendo $[-30,20,50]$, em graus, onde se desejou criar nulos no padrão de radiação;
- c) Vetor de Peso Inicial: Acrescentou-se o vetor de pesos das antenas;
- d) Adição de Nulos: O vetor de pesos foi ajustado para criar nulos nas direções especificadas;
- e) Cálculo do Padrão de Radiação: Calculou-se o fator de *array* ajustado para *nullforming*;
- f) Normalização e Plotagem: Normalizou-se o fator de *array* e realizou-se a plotagem do padrão de radiação resultante.

Este código simula como o *nullforming* pode suprimir sinais indesejados de interferentes específicos, direcionando os nulos do padrão de radiação para esses ângulos. Isso reduz a interferência e melhora a qualidade do sinal recebido.

3 Resultados e Discussão

Uma vez realizados os cálculos e as simulações descritas para Diversidade Espacial, Multiplexação Espacial, *Beamforming* e *Nullforming*, as representações gráficas adquiridas serão explicitadas e discutidas.

A Figura 8 mostra a potência recebida por cada antena receptora para diferentes usuários. Inicialmente, interpreta-se, que a potência recebida pode variar de uma antena para outra devido à diversidade espacial, que ocorre porque os sinais que chegam em cada antena viajam por diferentes caminhos (efeito *multipath*) e podem sofrer atenuação, desvio, e interferências distintas. Com essas diferenças entre os sinais recebidos por cada antena, a técnica de diversidade irá combinar todos esses sinais para se reconstruir um sinal de melhor qualidade.

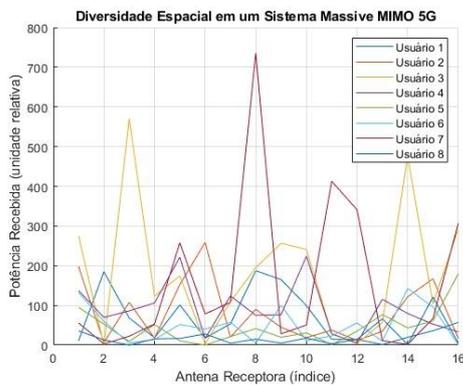


Figura 8. Diversidade Espacial em um Sistema *Massive MIMO* 5G obtida por *Software MatLab*

A partir disso, as técnicas de diversidade exploram as variações espaciais, temporais e em frequência do canal sem fio para obter ganhos, tratam-se de ganho de diversidade, pois múltiplas antenas captam sinais diferentes, aumentando a confiabilidade.

O gráfico do ganho de antena, demonstrado na Figura 9, consta a soma total das potências recebidas por todas as antenas para cada usuário. Isso reflete o ganho de antena, que resulta da coleta de mais energia por meio de várias antenas.

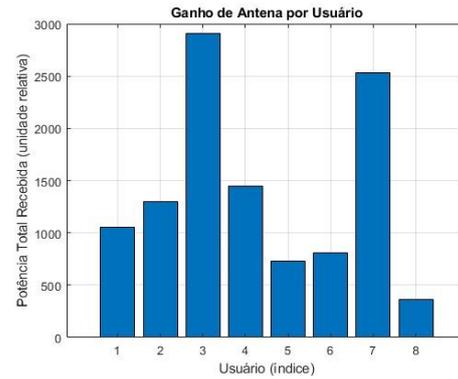


Figura 9. Ganho de Antena por Usuário obtida por *Software MatLab*

A razão pela qual observa-se diferentes valores de potência para os usuários é devido aos distintos caminhos percorridos pelos sinais de transmissão. Cada um deles chega à antena receptora com diferenças de atraso, probabilidade de desvanecimento, além de outros fatores, que irão contribuir para algumas perdas ao longo do caminho.

Em sistemas *Massive MIMO*, essa diversidade espacial é explorada para combinar sinais de forma eficiente, melhorando a qualidade da comunicação e aumentando a capacidade de dados.

Em seguida, obteve-se a simulação do fenômeno *Beamforming*, Figura 10. O gráfico resultante mostra como os feixes de sinal são direcionados para os diferentes usuários em suas respectivas direções. Este é um exemplo visual simples, em 2D, do conceito de *beamforming*, em que ocorre o foco da energia do sinal diretamente nos usuários.

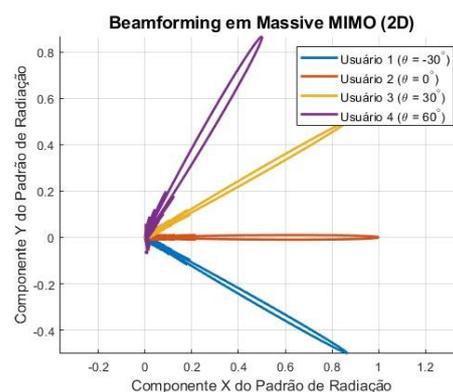


Figura 10. Fenômeno *Beamforming* em *Massive MIMO* obtida por *Software MatLAB*

Da mesma forma, uma vez simulada a Figura 11, observa-se uma representação visual em 3D do padrão de radiação gerado pelo *beamforming* em um sistema *Massive MIMO*.

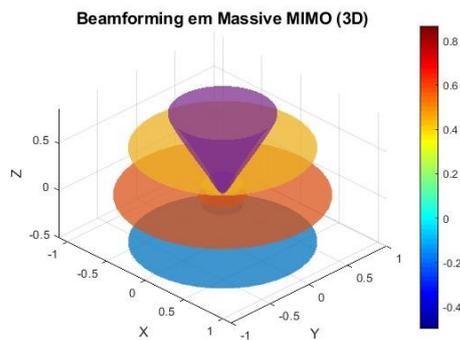


Figura 11 Fenômeno Beamforming 3D em *Massive MIMO* obtida por *Software MatLab*.

A visualização mostra como o *beamforming* concentra o sinal em direções específicas, o que pode contribuir para um aumento da eficiência da transmissão e redução de interferências. Esse foco direcionado permite uma melhor utilização dos recursos de rede e melhora a capacidade e a qualidade do serviço. Sendo assim, menos energia é dispersada em direções desnecessárias e, pelo fato de os usuários receberem sinais mais fortes, reduz-se a necessidade de retransmissões ou aumento de potência para superar interferências.

Posteriormente, para se ilustrar o efeito da Multiplexação Espacial, os gráficos resultantes da Figura 12 mostram o sinal recebido por cada usuário, com as partes real e imaginária exibidas separadamente. Estas representações permitem observar a amplitude e a fase dos sinais recebidos. A diversidade espacial é evidente na variação das amplitudes dos sinais entre diferentes usuários, resultado da combinação dos sinais recebidos de diferentes caminhos de propagação. A adição de ruído ao sinal recebido simula um ambiente realista, demonstrando como o *Massive MIMO* pode mitigar os efeitos desse ruído através de técnicas avançadas como *beamforming* e *nullforming*.

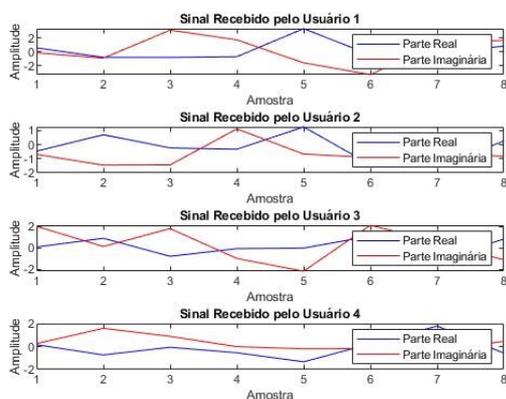


Figura 12. Resultados obtidos por Multiplexação Espacial obtida por *Software MatLab*

Por conseguinte, esse fenômeno melhora a eficiência espectral, permitindo a transmissão simultânea de múltiplos sinais para diferentes usuários, o que aumenta a capacidade do sistema.

Na multiplexação espacial, portanto, várias conexões independentes são estabelecidas simultaneamente no mesmo recurso de frequência e tempo, aproveitando a diversidade espacial oferecida por múltiplas antenas. Isso contribui para a eficiência energética, uma vez que mais usuários são atendidos a partir de menos recursos – a capacidade de transmissão aumenta sem precisar ampliar a banda de frequência ou potência total. Ademais, com fluxos separados e independentes, a interferência entre usuários é minimizada, o que reduz a necessidade de repetir transmissões.

O gráfico resultante da Figura 13 demonstra como o *Nullforming* é utilizado para suprimir interferências específicas em um sistema *Massive MIMO*.

Os nulos no padrão de radiação estão direcionados para -30 e 20 graus, correspondendo às direções dos interferentes especificados. Isso significa que a potência do sinal é significativamente reduzida nesses ângulos, minimizando a interferência.

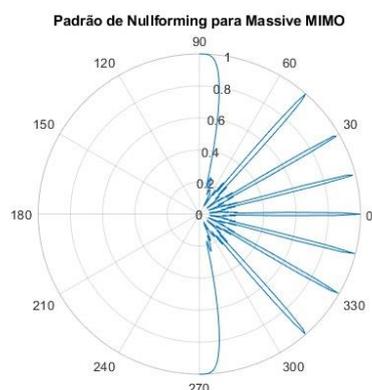


Figura 13. Padrão de Radiação Nullforming obtida por *Software MatLAB*

Os lobes principais do gráfico mostram as direções onde o sinal é forte, afastando-se das direções dos interferentes. Essa técnica de *nullforming* é eficiente na supressão de interferências, permitindo uma comunicação mais clara e eficaz. A visualização é crucial para entender como o *nullforming* pode melhorar a qualidade do sinal em ambientes com múltiplas fontes de interferência.

Ao ajustar dinamicamente o padrão de radiação, o sistema consegue focar a energia onde é necessário e minimizar as interferências, resultando em uma performance otimizada. Esses feixes direcionados garantem que a maior parte da potência de transmissão seja utilizada

para atender os usuários específicos, colaborando para a redução do desperdício de energia em outras direções. Essa característica é crucial em ambientes densos, onde múltiplos usuários competem pelos mesmos recursos espectrais. Assim, ao evitar que a energia seja irradiada em áreas desnecessárias, o *nullforming* otimiza o consumo energético da estação base.

4 Conclusão

O estudo apresentado reforça a importância do *Massive MIMO* como uma tecnologia indispensável para a evolução das redes móveis 5G. Suas capacidades de diversidade espacial, multiplexação espacial, *beamforming* e *nullforming* demonstram eficiência em maximizar a utilização do espectro e reduzir interferências, enquanto promovem melhorias significativas na eficiência energética.

A implementação das simulações realizadas neste trabalho permitiu validar como essas técnicas podem ser combinadas para oferecer maior desempenho e sustentabilidade, atendendo às crescentes demandas de tráfego de dados com menor impacto ambiental. Esses avanços tecnológicos representam uma resposta estratégica aos desafios enfrentados pela indústria de TIC, alinhando inovação e responsabilidade ambiental.

Por fim, espera-se que as análises realizadas neste estudo sirvam como base para futuras pesquisas e aprimoramentos no desenvolvimento de redes móveis, contribuindo para um setor mais eficiente, sustentável e preparado para os desafios do futuro.

Referências Bibliográficas

- [1] ERICSSON. (2023). Ericsson Mobility Report. Disponível em: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report>
- [2] ERICSSON. *Massive MIMO*. Ericsson, 2023. Disponível em: https://ericsson.com/en/ran/massive-mimo?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwkd00BhDxARIsANkNcreC2N3TPs3urd2hDXa62GEqzEv9FCu7rqv-XIQvEgkI8wEbydAV4aAmm8EALw_wcB. Acesso em: 11 ago. 2024;
- [3] ERICSSON. *Massive MIMO handbook*. 3. ed. Estocolmo: Ericsson, 2023. Disponível em: https://www.ericsson.com/assets/local/ran/doc/massive-mimo-handbook-3rd-edition.pdf?utm_campaign=2402-BNEW-WEC-
- GEN-CSPGC-Massive-MIMO-Extended-Version-Third-Edition&utm_source=Web%20Content&utm_medium=email>. Acesso em: 11 ago. 2024.
- [4] ERICSSON. *Sustainable networks: the RAN modernization guide*. [S.l.]: Ericsson, 2023. Disponível em: <https://www.ericsson.com/en/sustainability/report>. Acesso em: 08 out. 2024.
- [5] TELECO. NR: 5G New Radio – Massive MIMO. Teleco, 2023. Disponível em: https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorial5gn/pagina_7.asp. Acesso em: 11 ago. 2024.
- [6] AVNET. *Understanding massive MIMO technology*. Avnet, 2023. Disponível em: <https://my.avnet.com/abacus/solutions/markets/communications/5g-solutions/understanding-massive-mimo-technology/>. Acesso em: 11 ago. 2024.
- [7] TELETIME. Futuro das redes 5G está na tecnologia Massive MIMO. Teletime, 2022. Disponível em: <https://teletime.com.br/24/06/2022/futuro-das-redes-5g-esta-na-tecnologia-massive-mimo>. Acesso em: 11 ago. 2024;
- [8] MATHWORKS. *Massive MIMO*. MathWorks, 2023. Disponível em: <https://www.mathworks.com/discovery/massive-mimo.html>. Acesso em: 11 ago. 2024;
- [9] ERICSSON. *A holistic approach to address RAN energy efficiency*. Ericsson, 2021. Disponível em: <https://www.ericsson.com/en/blog/2021/12/a-holistic-approach-to-address-ran-energy-efficiency>. Acesso em: 11 ago. 2024;
- [10] ERICSSON. Ericsson *Massive MIMO showcase*. 2023. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=mEcCfHxtSyw>. Acesso em: 11 ago. 2024. Duração: 2 min. Vídeo (YouTube).
- [11] SAITO, Josemar. Mimando o 5G: Parte II – A diversidade espacial. 5G Descomplicado, 19 ago. 2020. Disponível em: <https://5gdescomplicado.com/2020/08/19/mimando-o-5g-parte-ii-a-diversidade-espacial/>. Acesso em: 17 out. 2024.
- [12] ANDRADE, Alex R. et al. MIMO aplicado ao 5G: Desafios e Oportunidades. In: Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e

Processamento de Sinais (SBrT 2016). Bento Gonçalves, RS: Unicamp, 2016. Disponível em: <https://lcv.fee.unicamp.br/images/BTSym-16/proceedings/pa56-16-edited.pdf>. Acesso em: 17 out. 2024.

[13] 5G DESCOMPLICADO. Mimando o 5G – Parte III: a multiplexação espacial. Disponível em: <https://5gdescomplicado.com/2020/09/11/mimando-o-5g-parte-iii-a-multiplexacao-espacial/>. Acesso em: 20 nov. 2024.

[14] *ANALOG DEVICES. Phased-array beamforming ICs simplify antenna design.* Disponível em: <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/phased-array-beamforming-ics-simplify-antenna-design.html>. Acesso em: 20 nov. 2024.

[15] *SOFTBANK. Nullforming: a key technology for 5G networks.* Disponível em: https://www.softbank.jp/en/sbnews/entry/20240826_01#:~:text=Nullforming%2C%20also%20known%20as%20nullsteering,signals%20from%20different%20base%20stations. Acesso em: 20 nov. 2024.

[16] AVNET. *5G beamforming solutions.* Disponível em: <https://my.avnet.com/abacus/solutions/markets/communications/5g-solutions/5g-beamforming/>. Acesso em: 20 nov. 2024.

[17] ERICSSON. *5G radio FDD.* Disponível em: <https://www.ericsson.com/en/ran/5g-radio-fdd>. Acesso em: 20 nov. 2024.

[18] ERICSSON. *Accelerate 5G everywhere.* Disponível em: <https://www.ericsson.com/en/ran/accelerate-5g-everywhere>. Acesso em: 20 nov. 2024.