

Projeto Brasil 6G

Estado da Arte da Camada Física para Redes de Acesso 6G



31/08/2021



Histórico de Atualizações:

Versão	Data	Autor(es)	Notas
1	29/07/2021	Daniely Gomes Silva Felipe Augusto P. de Figueiredo Gustavo Rodrigues de Lima Tejerina Juliano Silveira Ferreira Luciano Leonel Mendes Michelle Soares Pereira Facina Paulo Cardieri Richard Demo Souza Victoria Souto	Elaboração de conteúdo
2	31/08/2021	Daniely Gomes Silva José Cândido Silveira Santos Filho Luciano Leonel Mendes Paulo Cardieri Richard Demo Souza	Revisão de texto



Lista de Figuras

1	Estrutura de um símbolo GFDM como uma grade tempo/frequência	11
2	Quadro da forma de onda baseada em <i>chirp</i>	13
3	Comparação entre um sistema MIMO tradicional e um sistema MIMO massivo.	18
4	Exemplos de aplicações de LIS	24
5	Rede Cell-Free.	27
6	Transmissão PD-NOMA	32
7	Diagrama simplificado do <i>framework</i> de decodificadores Polar	44



Lista de Tabelas

1	Principais referências relacionadas às possíveis formas de ondas para a rede 6G.	17
2	Principais referências apresentadas acerca das tecnologias MIMO	30
3	Principais referências relacionadas às técnicas de múltiplo acesso.	39
4		4 -

4 Principais referências apresentadas com relação a codificação de canal.... 47



Acrônimos

2G Segunda Geração **3GPP** 3rd Generation Partnership Project 4G Quarta Geração 5G Quinta Geração 5G-NR 5G New Radio 6G Sexta Geração AF Amplify-and-Forward **AI** Artificial Intelligence **ANR** Agence Nationale de la Recherche **AP** Access Point **ASIC** Application-Specific Integrated Circuit AWGN Additive White Gaussian Noise Adagrad Adaptive gradient Adam Adaptive moment Adadelta Adaptive learning rate **B5G** Beyond Fifth Generation of Mobile Network **BBPSO** Bare Bones Particle Swarm Optimization **BCI** Brain Computer Interface **BER** Bit Error Rate **BI-GDFE** Block-iterative Generalized Decision Feedback Equalization **BLER** Block Error Rate **BPSK** Binary Phase-Shift Keying **CDMA** Code Division Multiple Access **CF-mMIMO** Cell-Free Massive MIMO CGH Computer Generated Hologram **CP** Cyclic Prefix **CP-DSSS** Cyclic Prefix Direct Sequence Spread Spectrum **CPM** Continuous phase modulation **CPU** Central Process Unit **C-RAN** Cloud-Radio Access Network **CRC** Cyclical Redundant Check Code **CSI** Channel-State Information C-RAN Cloud-Radio Area Network **CRAS** Connected robotics and autonomous systems



CW Continuous Wave **DD** Device Discovery **DF** Decode-and-Forward **DFT** Discrete Fourier Transformer **DPC** Dirty Paper Coding **DPSK** Differential Phase-Shift Keying **DSSS** Direct Sequence Spread Spectrum **D2D** Device-to-Device **ECE** Edge-Classification-based Extension eMBB Enhanced Mobile Broadband EMUSA Extended MUSA **EPIC** Enabling Practical Wireless Tb/s Communications with Next Generation Channel Coding ERB Estação Radio Base **FCSD** Fixed Complexity Sphere Decoding **FDD** Frequency Division Duplexing **FDMA** Frequency Division Multiple Access **FD-SOI** Fully Depleted Silicon on Insulator FEC Forward Error Correction **FER** Frame Error Rate **FFT** Fast Fourier Transform F-OFDM Filtered OFDM FPGA Field-Programable Gate Array **FPMAP** Fully Parallel MAP **FSK** Frequency-Shift Keying FVLC Fiber-based Visible Light Communication **GD** Gradient Descent **GFDM** Generalized Frequency Division Multiplexing **GS** Geometric Shaping **HMD** Head Mounted Display HNOMA Hybrid NOMA **ICI** Inter Carrier Interference **IDFT** Inverse Discrete Fourier Transformer **IDMA** Interleaved-Division Multiple Access **IFFT** Inverse Fast Fourier Transformer **IMT** International Mobile Telecommunications



IoT Internet of Things **ISI** Inter Symbol Interference LAS Likelihood Ascent Search **LDPC** Low-Density Parity Check **LiDAR** Light detecting and ranging **LIS** Large Intelligent Surface LLR Log-Likelihood Ratio LoRA Long Range **LP** Linear Precoding LS-MIMO Large-Scale Multiple-Input Multiple-Output LTE Long Term Evolution LTE-A Long Term Evolution Advanced MAP Maximum A Posteriori **MDAS** Distributed Access System **MF** Matched Filter MIMO Multiple-Input Multiple-Output **MISO** Multiple-Input Single-Output **mMIMO** Massive MIMO MJL Majority Logic MLM Max-Log-MAP **MMSE** Minimum Mean Square Error **MMSE-SIC** Minimum Mean Square Error-Successive Interference Cancellation **mMTC** massive Machine Type Communications MPA Massage Passing Algorithm **M-PSK** *M-Phase Shift Keying* MRC Maximum Ratio Combining MRT Maximum Ratio Transmission MTC Machine Type Communication **MUD** Multi-user Detection **MUSA** Multi-User Shared Access MUST Multi-user Superposition Transmission **NB-LDPC** Non-Binary LDPC **NOMA** Non-Orthogonal Multiple Access **OAM** Orbital Angular Momentum **OFDM** Orthogonal Frequency Division Multiplexing



OFDMA Orthogonal Frequency-Division Multiple Access **OFDM-OAM** Orthogonal Frequency-Division Multiplexing-Orbital Angular Momentum **OMA** Orthogonal Multiple Access **OOBE** Out-of-Band Emission **PAPR** Peak-to-Average Power Ratio **PD-NOMA** Power Domain NOMA **PEG** Progressive Edge-Growth **PEXIT** Protograph Extrinsic Information Transfer Chart **PFT** Polar Factor Tree **PGM** Phase Gradient Method **PHY** Physical Layer **PIC** Parallel Interference Cancellation **PLS** Physical-Layer Security **PMAP** Parallel MAP **PN** Pseudo-random Noise **PPC** Parity Puncture Constrained **PS** Probabilistic Shaping **PSK** Phase-Shift Keying **PLL** Phase Locked-Loops **QAM** Quadrature Amplitude Modulation QC Quasi-Cyclic **QC-LDPC** Quasi-Cyclic Low Dense Parity Check **QCQP** Quadratically Constrained Quadratic Program **QPSK** Quadrature Phase Shift Keying **QoS** Quality of Service **RAN** Radio Access Network **RC-LDPC** *Rate-Compatible LDPC* **RC-NB-LDPC** Rate-Compatible, Non-Binary LDPC **RL-QC-LDPC** Rate-Compatible Raptor-Like Quasi-Cyclic LDPC **RF** Rádio Frequência **RIS** Reconfigurable Intelligent Surfaces **RS** Rate-Splitting **RSMA** Rate-Splitting Multiple Access SC Successive Cancellation **SC-FDE** Single Carrier Frequency Domain Equalization **SCL** Successive Cancellation List



SCMA Sparse Code Multiple Access **SD-SIC** Sphere Decoder with Successive Interference Cancellation **SDMA** Space Division Multiple Access **SIC** Successive Interference Cancellation SINR Signal-to-Interfance-and-Noise Ratio **SIR** Signal-to-Interference **SNR** Signal-to-Noise Ratio SOVA Soft-Output Viterbi Algorithm **SSB** Single Side Band Star-QAM Star Quadrature Amplitude Modulation **TDD** Time-Division Duplex TDMA Time Division Multiple Access **THP** Tomlinson-Harashima Precoding **TOO** Time-Switched OFDM-OAM **TS** Tabu Search **UAV** Unmanned Aerial Vehicle **UDN** Ultra-Dense Network **UE** User Equipment **UEP** Unequal Error Protection **URLLC** Ultra Reliable Low Latency Communications **UXMAP** Unrolled XMAP **VHDL** VHSIC Hardware Description Language **VLC** Visible Light Communication **VLSI** Very Large-Scale Integration **VP** Vector Pertubation **ZF** Zero Forcing



Sumário

1	Intr	rodução 1	
2	Cas	os de Uso para a Rede 6G	3
	2.1	Cobertura Mundial Extrema	4
	2.2	Gêmeos Digitais em Larga Escala	4
	2.3	Interações Remotas Avançadas	5
	2.4	Agropecuária do Futuro	3
	2.5	Colaboradores Cibernéticos	3
	2.6	Zonas Seguras Invisíveis	7
	2.7	Comunicação Espacial	3
3	Solu	ções para Camada Física	9
	3.1	Formas de Onda	9
		3.1.1 OFDM	9
		3.1.2 F-OFDM 10)
		3.1.3 GFDM)
		3.1.4 CP-DSSS	1
		3.1.5 Modulação baseada em Chirp \ldots	2
		3.1.6 Orbital Angular Momentum	4
		3.1.7 Portadora Única	5
		3.1.8 Conclusão	3
	3.2	Tecnologias MIMO 18	3
		3.2.1 MIMO Massivo	3
		3.2.2 MIMO em THz	2
		3.2.3 Superfícies Inteligentes	3
		3.2.4 Cell-Free Massive MIMO	3
		$3.2.5 \text{Conclusão} \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots $	3
	3.3	Múltiplo Acesso	1
		3.3.1 PD-NOMA 31	1
		3.3.2 SCMA	4
		3.3.3 MUSA	3
		3.3.4 RSMA	7
		3.3.5 Conclusão	3
	3.4	Codificação de Canal)
		3.4.1 Código LDPC para Acesso Aleatório não Ortogonal)
		3.4.2 Códigos LDPC não Binários	1
		3.4.3 Códigos LDPC para Aplicações MIMO de Larga Escala	2
		3.4.4 Implementação de Códigos Polares	3
		3.4.5 Implementação de Códigos Turbo para T bps	4
		3.4.6 Redução da Complexidade da Decodificação de Códigos Turbo 40	6
		3.4.7 Conclusão	3
4	Car	alução 49	5



1 Introdução

Daniely Gomes Silva, Gustavo Rodrigues de Lima Tejerina, Juliano Silveira Ferreira daniely@inatel.br, gustavo.rodrigues@inatel.br, silveira@inatel.br

A evolução da comunicação sem fio tem proporcionado um aumento exponencial do número de usuários e de novos dispositivos conectados. Até 2030, a expectativa é atingir um cenário com 17 bilhões de dispositivos móveis conectados, mobilizando um tráfego de dados mensal de aproximadamente 5016 exabytes [1]. Neste contexto, a Quinta Geração (5G) de Redes Celulares, em fase de implementação no mundo, não será capaz de oferecer recursos suficientes para suprir essa crescente demanda. Desta forma, a Sexta Geração (6G) de Redes Celulares virá para garantir aumento no desempenho e na qualidade de serviço para todos os usuários da rede, além de dar suporte a aplicações inovadoras. Inicialmente, a Rede 6G está sendo projetada para fornecer conectividade sem fio, onipresente, com taxa de dados de até 1 Tbps e com latência de 0,1 ms, para uma densidade de 100 dispositivos por m³. A complexidade desses cenários requer uma gestão apurada dos recursos disponíveis no sistema. Para tal, a Rede 6G deverá propor um novo paradigma para os sistemas de comunicação, introduzindo a Artificial Intelligence (AI) em diferentes níveis de processamento. A aplicação de AI garantirá conectividade inteligente entre os inúmeros usuários e dispositivos que estarão aptos a analisar e executar a alocação de recursos. A definição desses requisitos é considerada fundamental para viabilizar as novas aplicações que integrarão definitivamente o mundo digital ao plano físico.

Para alcançar essas metas, os sistemas de comunicação vigentes terão que passar por uma série de transformações que os habilitarão a operar nas condições impostas pela Rede 6G. Essas mudanças afetarão todos os níveis da comunicação, que se estendem desde a camada de aplicação até a camada física. Sendo assim, o objetivo deste documento é apresentar uma revisão bibliográfica detalhada sobre as tecnologias de camada física que estão sendo estudadas para aplicação na Rede 6G. Diante deste contexto, as tecnologias foram divididas em quatro áreas: (i) formas de onda; (ii) tecnologias MIMO; (iii) técnicas de múltiplo acesso; e (iv) codificação de canal.

A forma de onda do sinal transmitido é um aspecto essencial relacionado à arquitetura da camada física em sistemas de comunicações sem fio. Nesse sentido, diferentes formas de onda devem ser estudadas com relação à eficiência na transmissão de informação através do canal sem fio, buscando uma maior cobertura e altas confiabilidade e disponibilidade de serviço [2]. Este documento discute as vantagens e desvantagens de várias formas de onda candidatas para a Rede 6G, como Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), Filtered OFDM (F-OFDM), Generalized Frequency Division Multiplexing (GFDM), Cyclic Prefix Direct Sequence Spread Spectrum (CP-DSSS), modulação baseada em chirp, Orbital Angular Momentum (OAM) e modulações com portadora única.

A conectividade onipresente é uma das principais premissas estabelecidas para as redes da próxima geração. Para atingir esta meta, a implementação de novas tecnologias, como *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) massivo sem células, torna-se essencial [3]. Essa solução é caraterizada por sistemas com um grande número de antenas, controladas individualmente, e distribuídas de forma a contemplar simultaneamente diversos usuários [4]. Esse conceito está sendo ampliado e aplicado em tecnologias já existentes, como superfícies inteligentes. As pesquisas abordadas neste documento apresentam resultados de aplicação de múltiplas antenas em diversos cenários de comunicação da próxima geração.

As técnicas de múltiplo acesso ao canal são mecanismos de coordenação essenciais a um sistema de comunicação. Em termos gerais, essas técnicas permitem a provisão de serviço



de comunicação a um conjunto de usuários simultaneamente, empregando um mesmo canal. Este documento destacará o uso de *Non-Orthogonal Multiple Access* (NOMA) e *Rate-Splitting Multiple Access* (RSMA) em cenários relativos a Rede 6G. Os estudos indicam um ganho na eficiência espectral e energética em ambas as técnicas, atendendo, assim, parte dos requisitos previstos para a futura geração.

A codificação de canal é um procedimento fundamental na concepção da camada física, pois permite ao receptor detectar e corrigir erros causados por interferência, ruído e desvanecimento do sinal. O desempenho das técnicas de codificação de canal afeta diretamente a qualidade do enlace de comunicação, fazendo da codificação de canal um elemento essencial para o atendimento dos requisitos de vazão, latência, e eficiência energética e espectral esperados das redes de futura geração. Neste documento, serão apresentados alguns estudos que investigam o uso de códigos *Low-Density Parity Check* (LDPC), Turbo e Polar em cenários inerentes à Rede 6G.

Este relatório está organizado como segue. A Seção 2 discute casos de uso previstos para a Rede 6G. A Seção 3 apresenta a revisão bibliográfica do estado da arte das tecnologias de camada física discutidas acima. Por fim, a Seção 4 apresenta as principais conclusões desse estudo do estado da arte.



2 Casos de Uso para a Rede 6G

Luciano Leonel Mendes lucianol@inatel.br

O International Mobile Telecommunications (IMT) 2020 apresentou um conjunto de casos de uso e requisitos desafiadores para a rede 5G [5], baseados em demandas que iam além do aumento da vazão em redes de comunicação móvel. Os requisitos chaves definidos pelo IMT 2020 motivaram a definição de três cenários de casos de uso para as redes 5G. O Enhanced Mobile Broadband (eMBB) [6], endereçado pelo Release 15 do 3rd Generation Partnership Project (3GPP), focou na oferta de maiores taxas de dados para os usuários, visando atingir até 1 Gbps por usuário. Já o Ultra Reliable Low Latency Communications (URLLC) [7] teve como objetivo principal oferecer baixa latência e elevada robustez para viabilizar o uso de redes móveis em ambientes industriais, sendo especificado pelo Release 16 do 3GPP. Finalmente, o cenário denominado de massive Machine Type Communications (mMTC) [8], que será apresentado no Release 17, ainda em desenvolvimento pelo 3GPP, foi concebido para permitir a conexão de uma multitude de dispositivos, viabilizando a Internet of Things (IoT) massiva sobre a rede móvel.

Essa segmentação da rede 5G em três grandes grupos de casos de uso trouxe uma flexibilidade jamais vista em redes de comunicações, abrindo caminho para a oferta de uma ampla gama de novos serviços e a criação de aplicações que sequer foram concebidas até o momento. No entanto, essa divisão também trouxe limitações e diversas aplicações vislumbradas pelo IMT 2020 não poderão ser implementadas em sua plena magnitude empregando a rede 5G. Uma das principais limitações impostas pelos três modos de operação previstos na 5G é a incapacidade da rede em atender mais um requisito chave em cada cenário. É possível obter alta vazão com o eMBB ou baixa latência com o URLLC ou atender a uma elevada quantidade de dispositivos usando o mMTC. No entanto, diversas aplicações listadas pelo IMT 2020 demandam que requisitos chaves sejam atendidos simultaneamente. Um exemplo é a telemedicina, onde é preciso ter elevada vazão para a transmissão de dados e imagens, além de baixa latência para a transmissão de comandos e informações de realimentação de movimento. Outros exemplos que podem ser mencionados são os carros autônomos, comunicações hápticas e eventos virtuais imersivos.

O 3GPP também foi criticado por não considerar a participação ativa de outras verticais no processo de padronização do 5G New Radio (5G-NR), o que fez com que diversas demandas provenientes de setores automobilísticos, saúde, agronegócios, transporte, entre outros, não fossem plenamente suportadas pela nova interface aérea proposta pelo 3GPP. Ao desenvolver um padrão de rede de acesso sem fio baseando-se nas demandas das operadoras e fabricantes de equipamentos de telecomunicações, o 3GPP acabou por limitar o escopo de atuação da rede 5G. É fato que medidas corretivas foram tomadas durante o desenvolvimento do *Release* 16 para adequar o 5G-NR ao cenário industrial, permitindo o uso da rede móvel privada como solução de comunicação em processos industriais. Além disso, o *Release* 17, em desenvolvimento, irá prever um novo modo de operação do 5G-NR que seja adequado para a cobertura em áreas remotas e rurais. Apesar desses esforços, decisões tomadas para acomodar interesses de fabricantes de equipamentos de infraestrutura de telecomunicações (como o uso de dois códigos corretores de erro distintos e com desempenho similar) acabaram por limitar a flexibilidade da rede 5G em atender todas as visões apresentadas pelo IMT 2020.

Além dessas restrições, novas aplicações, ainda mais desafiadoras, estão sendo propostas para as futuras redes móveis. E para atender a essa futura demanda, as redes móveis devem



transcender as comunicações e englobar novas funções como o sensoriamento do ambiente, o posicionamento e mapeamento de objetos e pessoas no meio físico, a utilização de imagens como um serviço nativo da rede e a utilização de AI de forma transversal em toda a estrutura da rede, bem como a oferta de AI como um serviço da rede móvel. Os novos casos de uso também irão demandar uma interface mais intuitiva e amigável com a rede, que não pode ser limitada por gestos aplicados a uma tela sensível ao toque, mas que permita a transmissão de comandos complexos e a captura de informações como textura, temperatura, sinais biomédicos e até mesmo sensações e sentimentos. O desenvolvimento de uma interface entre o cérebro humano e unidades de processamento inteligentes, denominada de *Brain Computer Interface* (BCI) [9], é visto como fator fundamental para viabilizar diversos dos novos casos de uso previstos para as futuras redes móveis. Assim, pode-se dizer que a futura rede móvel, denominada de Rede 6G [10], será o vetor de integração dos mundos físico, virtual e biológico, rompendo com as barreiras de conectividade e com as limitações apresentadas pela rede 5G.

O novo escopo de aplicações para a rede 6G está sendo proposto por projetos de pesquisas [11] [12] e associações de empresas e entidades científicas [13]. Até o momento, essas aplicações estão sendo organizadas em 7 categorias de casos de uso [14], descritas a seguir.

2.1 Cobertura Mundial Extrema

Essa família de casos de uso abriga as aplicações voltadas para universalização da conectividade, permitindo que todas as pessoas tenham condições de acessar a Internet em qualquer local do globo. Além disso, esse caso de uso irá englobar o monitoramento e gerenciamento dos recursos naturais, através de uma rede de sensores global que permita avaliar as condições do meio ambiente e os impactos ambientais das ações humanas. Essa imensa capacidade de avaliar os impactos ambientais dos processos humanos vai permitir a utilização da rede 6G como ferramenta para reduzir as emissões de gases estufas. Esse conjunto de aplicações permitirá não só o fim da segregação digital de bilhões de pessoas e o monitoramento do meio ambiente, mas permitirá o acompanhamento do desenvolvimento humano em qualquer lugar do globo. Esse é um cenário bastante desafiador para a rede 6G, uma vez que a mesma deverá ser capaz de suportar, simultaneamente, alta vazão, conexão de um elevado número de dispositivos e elevada cobertura, através do uso de múltiplas *Radio Access Networks* (RANs).

Para atingir esse objetivo, a rede 6G deve possuir a capacidade de explorar diversas RANs, inclusive aquelas não padronizadas pelo 3GPP, visando atingir a flexibilidade necessária para suportar os requisitos impostos pelas aplicações. A integração da rede móvel com a rede via satélite, já iniciada pela rede 5G, terá que dar um passo além, permitindo que satélites operem como Estação Radio Bases (ERBs) totalmente funcionais na nova rede móvel. A capacidade de sensoriamento da rede 6G também será colocada a prova nessa categoria de casos de uso, uma vez que a detecção de eventos naturais e provocados pela ação humana deverão ser constantemente monitorados para permitir a tomada de decisões que levem ao desenvolvimento humano sustentável em todo o globo.

2.2 Gêmeos Digitais em Larga Escala

A família de casos de uso denominada de Gêmeos Digitais em Larga Escala corresponde ao conjunto de aplicações que demandam uma réplica digital de um sistema físico, onde o fluxo de dados entre o sistema real e virtual ocorre em tempo real. Com isso, será possível executar simulações precisas e avaliar o impacto das medidas no ambiente virtual, antes de aplicar tais



medidas nos sistemas reais.

Isso traz vantagens em diversos cenários distintos, como por exemplo, no caso de Cidades Dinamicamente Inteligentes. A presença ubíqua da rede 6G e a sua integração com sistemas de sensoriamento, imagem e mapeamento permitirão a criação de gêmeos digitais de cidades inteiras. Esses gêmeos digitais de cidades serão utilizados para auxiliar a tomada de decisão de diversos fatores que afetam o dia-a-dia da sociedade moderna, como gerenciamento da mobilidade urbana (gestão de trânsito, transporte público, semáforos e rotas), monitoramento do ar e das águas, segurança pública, iluminação, comunicação de massas, gestão de infraestrutura, manutenção, entre outros.

O setor industrial também irá se beneficiar dos gêmeos digitais, uma vez que os processos de fabricação poderão ser controlados e gerenciados no modelo digital antes das mudanças serem aplicadas na planta fabril real. Com isso, simulações visando a melhoria de produtividade ou para avaliar o desempenho de novas técnicas de fabricação podem ser testadas de forma fiel à realidade, permitindo validar a nova abordagem antes de causar impactos na linha de produção. A manutenção preventiva também se torna mais eficaz, viabilizando a detecção de problemas potenciais através da análise em tempo real de diversos parâmetros da fábrica, como por exemplo o surgimento de vibrações ou variações de parâmetros para além das tolerâncias especificadas.

Para atender aos requisitos desta família de casos de uso, a rede 6G precisa ser capaz de ter abrangência de cobertura e permitir a transferência de dados de diversos sensores de diferentes naturezas com diferentes requisitos que podem variar de baixa latência à elevada vazão. A rede 6G também deverá ser capaz de monitorar o posicionamento de objetos e pessoas no ambiente em tempo real, permitindo o mapeamento preciso do mundo físico no ambiente virtual. Esses casos de uso irão por a prova a capacidade de sensoriamento, posicionamento e de comunicações da rede 6G.

2.3 Interações Remotas Avançadas

Desde a adição de imagens bidimensionais na comunicação, resultando na transmissão de dados audiovisuais em teleconferências, não houve mudanças significativas do grau de imersão nas interações humanas realizadas de forma remota. A família de casos de uso denominada de Interações Remotas Avançada visa trazer uma nova dimensão nas telecomunicações, aumentando a imersão das pessoas através do uso da realidade estendida e das comunicações hápticas.

O primeiro cenário de uso de destaque é a comunicação tátil, cujo objetivo consiste em viabilizar a transmissão de informações táteis de forma complementar aos dados audiovisuais. Com isso, sensações de toque poderão ser enviadas ao mesmo tempo que informações de textura, temperatura e movimento são recebidas. Isso muda fundamentalmente o princípio das redes de telecomunicações projetadas para trafegar informação de voz, pois a comunicação háptica demanda a resposta praticamente instantânea para permitir que a pessoa que realiza o toque receba as informações de realimentação tátil (textura, temperatura, consistência, etc.) ao mesmo tempo em que as informações de pressão, temperatura e movimento são transmitidas. Baixa latência e alta vazão precisam ser atendidas simultaneamente neste cenário. A capacidade da rede 6G de transmitir as informações táteis também irá viabilizar aplicações mais precisas de manipulação de objetos reais e virtuais. O controle de maquinário em ambientes hostis aos seres humanos e também aplicações de entretenimento imersivas, como jogos eletrônicos, são alguns exemplos que podem se beneficiar desta nova capacidade das futuras redes móveis.



Já as aplicações voltadas para os eventos imersivos, o principal objetivo é permitir que as pessoas possam ter experiências semelhantes àquelas observadas num evento artístico ou esportivo, mas de forma remota. Imagens, sons, vibrações e outros dados sensoriais são capturados no local do evento e transmitidos através de uma rede móvel de alta capacidade para usuários providos de *Head Mounted Display* (HMD) e outros dispositivos denominados de *wearables*, capazes de reproduzir essas diversas informações. O uso de imagens holográficas também pode ser empregado, principalmente devido ao avanço dos *Computer Generated Holograms* (CGHs), que são exibidos por moduladores de luz específicos para aplicações desta natureza. Nesse caso, o principal requisito a ser atendido pela rede móvel é a elevada vazão dos diversos fluxos de dados gerados para criar o ambiente imersivo para os usuários.

2.4 Agropecuária do Futuro

As aplicações voltadas para os agronegócios são extremamente importantes para a sociedade brasileira, dada a importância deste setor para a economia nacional. Os resultados apresentados nas safras e áreas exploradas para diversas culturas mostram que o aumento de produtividade foi residual nas últimas décadas e que o aumento da produção é acompanhado pelo aumento da área explorada. O mesmo comportamento pode ser observado a partir dos dados sobre a produção pecuária.

O aumento da demanda por alimentos, a maior competitividade e a necessidade de preservação ambiental implicam que o Brasil deve aumentar sua produtividade no setor agropecuário para se manter como um ator de destaque neste mercado, e a informatização do campo é uma ferramenta importante para este objetivo. Drones para a captura de imagens multi-espectrais podem ser empregados para localizar a presença de pragas para as lavouras e acionar drones de pulverização para aplicação de agrotóxicos e fertilizantes apenas nas áreas afetadas, reduzindo o consumo desses insumos e diminuindo o impacto ambiental. Sensores biológicos ou substância ilícitas em um rebanho, ao mesmo tempo que detectam comportamentos atípicos, permitindo a identificação de focos de doenças. Esses sensores serão empregados para melhorar a rastreabilidade dos produtos pecuários, reduzindo o impacto de embargos e permitindo maior transparência entre o consumidor e o produtor. Por fim, o monitoramento do escoamento da produção agropecuária será fundamental para eliminar perdas proveniente do transporte, furtos e desperdícios em silos e outros centros de armazenagem.

Para isso, a rede 6G deve ter uma elevada capacidade de conexão, permitindo que dispositivos com diferentes demandas de comunicação, distribuídos por uma grande área, se conectem com a ERB de forma eficiente. Os principais desafios para viabilizar esse cenário consistem em elevada capacidade de conexão da rede, flexibilidade para atender demandas heterogêneas de vazão, grande alcance e economia de energia, principalmente para os sensores IoT.

2.5 Colaboradores Cibernéticos

Com os recentes avanços tecnológicos, a utilização de robôs como parceiros cooperativos têm se tornado cada vez mais comum em atividades do dia-a-dia. Estes parceiros cooperativos, que até bem pouco tempo tinham seu escopo de utilização voltado para as grandes indústrias, agora passam a fazer parte da vida das pessoas, como pequenos robôs auxiliares em atividades domésticas, ou como agentes inteligentes que auxiliam em atividades cotidianas.

O cenário projetado para os próximos anos, é o de crescimento considerável da presença



destes dispositivos, tanto na indústria quanto na vida das pessoas. Em um ambiente contendo múltiplos agentes, estas máquinas vão precisar identificar umas às outras, se conectar para realizar um intercâmbio de intenções e negociar ações por meio de um processo de comunicação automatizado e seguro.

Para viabilizar essa aplicação, a rede 6G deve fornecer a infraestrutura técnica para permitir ações que vão além do envio de comandos de controle de robôs individuais. Será necessário prover mecanismos através dos quais estes robôs possam formar relações simbióticas entre si com o objetivo de cumprir tarefas complexas com eficiência ou, ainda, atender melhor às necessidades e demandas dos seres humanos em atividades do dia-a-dia.

A realização deste cenário está diretamente ligada a aspectos associados a confiabilidade e a inclusão digital. Estes são valores fundamentais no processo de iteração homem-máquina e máquina-máquina. Quando estes elementos colaboram e formam relações simbióticas, atividades complexas podem ser executadas de uma maneira sustentável, ou seja, altera-se a necessidade de existência de máquinas cada vez mais sofisticadas, e consequentemente que venham a consumir mais recursos para a execução de uma atividade complexa, e passa-se a explorar a capacidade de utilização inteligente e flexível das capacidades de máquinas já disponíveis em benefício da sociedade.

O cenário apresentado estende as funcionalidades previstas no âmbito da rede 5G, considerando cenários mais desafiadores contendo múltiplos dispositivos, baixa latência e necessidade de comunicação local. Se considerar a flexibilidade dos drones e robôs autônomos, o cenário apresentado pode ser caracterizado como volátil e eventuais quebras de conexão (mesmo que de forma temporária) com as entidades em execução no núcleo da rede são passíveis de acontecer. A cobertura da rede e a qualidade de conexão são essenciais neste cenário de uso. Para tanto, um drone pode assumir o papel de estação base móvel provendo conexão aos demais drones ou, em situações mais extremas, um drone pode assumir o papel de núcleo da rede. Em outras palavras, tarefas antes executadas pelos elementos centrais podem eventualmente serem movidas em direção aos elementos de borda, ou seja, deve-se considerar que atividades de coordenação dos drones passam a ser executadas pelos próprios.

Essa autonomia na arquitetura requer uma distribuição de inteligência jamais vista em uma rede de comunicação, além de demandar uma capacidade de mapeamento espacial dos seus elementos, juntamente com o conhecimento da capacidade computacional de cada nó, e essas características só poderão ser encontradas na futura rede 6G.

2.6 Zonas Seguras Invisíveis

Segurança é outro fator crítico e que tem uma importância de destaque no cenário brasileiro. A capacidade da rede 6G de monitorar o mundo físico, realizando o sensoriamento e a captura de imagens em larga escala, pode ser explorada para prover segurança de espaços públicos e o controle de acesso de pessoas de forma totalmente transparente.

Sensores químicos, de imagem e de temperatura espalhados em uma área de segurança (como um aeroporto) e, em conjunto com câmeras multi-espectrais, podem ser empregados para alimentar algoritmos inteligentes responsáveis por detectar ameaças. A detecção de traços de elementos químicos usados na construção de explosivos e a análise comportamental das pessoas podem ser empregados para alertar as equipes de segurança para averiguar um dado suspeito. Essa mesma rede pode ser empregada para detectar ações de roubo em massa, também denominado de arrastões, prática que ficou mais conhecida em praias e avenidas de cidade do Rio de Janeiro, mas que afeta diversas cidades brasileiras. A detecção dos padrões desta prática



através de imagens e de outros sensores espalhados no ambiente, pode deflagrar a ação policial para inibir o ato criminoso.

Essa mesma rede pode ser empregada também para controle de acesso de pessoas em eventos, através do reconhecimento facial, uso de sensores de identificação pessoal implantados e até mesmo da BCI. Com isso o acesso de pessoas nos eventos de entretenimento (esportes, shows, etc.), assim como o embarque em ônibus, trens e aviões poderá ser realizado sem uma estrutura visível de segurança de identificação, ficando a cabo da rede 6G a certificação de que as pessoas presentes possuem autorização para estarem naquele local e que as mesmas não sejam ameaças ou transportem artigos que possam ser uma ameaça para os demais presentes. Precisão, sensoriamento diversificado, baixa latência e elevado volume de dados são alguns dos requisitos que tornam esse cenário de casos de uso desafiador para a rede 6G.

2.7 Comunicação Espacial

Hoje a humanidade está se preparando para uma nova corrida espacial. Novos atores, como Índia e China, e o ingresso de empresas privadas, como *SpaceX* e *Blue Origin*, está causando uma revolução na exploração espacial, com redução de custos e o surgimento de projetos de voos tripulados para a Lua e para a exploração de Marte.

Esse novo cenário de exploração espacial é o grande motivador para que a rede 6G tenha abrangência fora da superfície terrestre e, em especial, na Lua. Neste contexto, duas demandas são de especial interesse. A primeira consiste na comunicação de espaço profundo entre a Terra e a Lua. A exploração espacial realizada durante o período de exploração lunar, nas décadas de 1960 e 1970, trouxe um grande volume de informações sobre as características do enlace Terra-Lua. No entanto, o volume de tráfego de dados desta nova fase será muito maior, em função da maior densidade das mídias digitais. Além disso, será necessário mais do que um enlace ponto-a-ponto, dado que as expectativas atuais incluem a fixação de uma colônia para servir de apoio para as viagens à Marte. Essas novas demandas podem resultar, inclusive, na instalação de uma rede de satélites na Lua para prover conectividade e também servir para prover sinais de geoposicionamento, coleta de imagens e comunicação. A segunda demanda é viabilizar a comunicação na superfície da Lua, para tornar possível a comunicação entre os diversos dispositivos autônomos, robôs e pessoas com as instalações lunares. Neste caso, a alimentação dos equipamentos instalados no solo é um grande desafio. O uso de energia solar não é trivial, pois os períodos de noite na superfície da Lua correspondem a 28 dias terrestres. A falta de atmosfera impossibilita o uso de geradores eólicos e a inatividade tectônica e inexistência de fontes termais impede o uso de energia geotérmica. Baterias de alta eficiência e o uso de geradores capazes de explorar fontes de alta densidade energética, combinados com o estabelecimento de uma infraestrutura de distribuição de energia são algumas das abordagens traçadas hoje para superar esse desafio e o uso da rede 6G será crucial neste processo.



3 Soluções para Camada Física

A cada nova geração da rede de comunicações móveis há uma crescente melhoria de desempenho e aumento de flexibilidade das etapas que compõem as camadas física e de acesso da rede sem fio, como codificação de canal, formatação da onda e sistemas de antena. Essa crescente evolução visa atender os cada vez mais exigentes requisitos associados aos diferentes cenários e aplicações previstos para as novas gerações.

A seguir são apresentadas tecnologias e resultados de pesquisas relacionadas à formatação de ondas, MIMO, técnicas de múltiplo acesso, e códigos corretores de erros que visam atender às aplicações e cenários de uma Rede 6G.

3.1 Formas de Onda

Daniely Gomes Silva, Juliano Silveira Ferreira daniely@inatel.br, silveira@inatel.br

A futura Rede 6G tem como objetivo oferecer suporte a uma grande variedade de serviços que, em sua maioria, apresentam requisitos rigorosos como, por exemplo, elevada eficiência espectral e de energia, alta confiabilidade, baixa latência, alocação de recursos flexível, entre outros. Simultaneamente, a complexidade geral do sistema deve ser mantida acessível.

É importante ressaltar que um dos principais aspectos relacionados à camada física (*Physical Layer* (PHY)) desses sistemas é a definição da forma de onda a ser utilizada na transmissão dos dados. Alternativas de formas de onda devem ser analisadas e comparadas, visando escolher a que seja capaz de atender aos requisitos estabelecidos pela Rede 6G para uma determinada aplicação.

Formas de onda baseadas em OFDM têm se destacado nas discussões de padronização do 3GPP até o momento, principalmente ao se tratar de sistemas de banda larga, devido ao desempenho alcançado nas gerações anteriores (Quarta Geração (4G) de Redes Celulares e 5G), assim como a compatibilidade com as tecnologias já existentes. A forma de onda OFDM é bastante flexível, porém, não pode ser considerada como ótima para atender a todos os requisitos de usuários em todos os cenários.

Outras formas de onda podem oferecer vantagens e maior flexibilidade quando comparadas ao OFDM, dependendo dos requisitos e das condições do canal. Nesse sentido, formas de onda candidatas na concepção da Rede 5G, como F-OFDM e GFDM, têm sido investigadas para a Rede 6G. Abordagens alternativas, como CP-DSSS, modulação baseada em *Chirp*, OAM e aquelas baseadas em portadora única, também estão sendo alvo de pesquisas recentes visando o emprego nas Redes 6G.

3.1.1 OFDM

Conforme mencionado, a forma de onda OFDM é bastante flexível, robusta e foi adotada tanto por gerações anteriores de rede móvel quanto por outros padrões de comunicação sem fio, sendo uma forte candidata para o suporte às Redes 6G. Além da retrocompatibilidade, essa forma de onda tem baixa complexidade de implementação e também apresenta compatibilidade com técnicas MIMO.

Os dados a serem transmitidos pela forma de onda OFDM são separados em fluxos paralelos, empregando um conjunto de subportadoras ortogonais entre si. A geração dessas subportadoras



moduladas que formam um símbolo OFDM é baseada no uso de *Inverse Fast Fourier Trans*former (IFFT). Após a realização da IFFT, uma parte final do símbolo útil gerado no domínio do tempo é copiado e transmitido no início do símbolo útil, sendo chamado de *Cyclic Pre*fix (CP). O comprimento do CP é escolhido de forma a minimizar os efeitos da interferência inter-simbólica, causada pelo atraso temporal de propagação das versões recebidas do sinal na ocorrência de múltiplos percursos.

Como desvantagens da forma de onda OFDM, pode-se citar a alta *Peak-to-Average Power Ratio* (PAPR), causada pela adição no domínio do tempo das diversas subportadoras. O OFDM é também mais sensível a erros de sincronização quando comparada com as modulações de portadora única. Também pode-se citar a alta *Out-of-Band Emission* (OOBE), causada pelo filtro formatador retangular empregado no domínio do tempo para a geração da forma de onda. Considerando uma modulação *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM), os símbolos que modulam cada subportadora mudam abruptamente a cada símbolo OFDM, o que ocasiona uma descontinuidade no sinal gerado. Essa operação é equivalente a modular as subportadoras com um pulso retangular no domínio do tempo. No domínio da frequência, o pulso retangular tem um espectro mal localizado no formato de uma função *sinc*, o que leva a altas emissões fora da faixa de interesse.

3.1.2 F-OFDM

A forma de onda F-OFDM é derivada da forma de onda OFDM e mantém as suas vantagens. O F-OFDM se diferencia pela adoção de um processo adicional de filtragem que tem por objetivo reduzir a OOBE [15]. O processo de filtragem deve considerar um filtro protótipo apropriado como, por exemplo, um filtro com janelamento ou truncamento suave como o *sinc* janelado [15]. O janelamento permite limitar o comprimento da resposta do filtro. Desta forma, é possível alcançar um melhor confinamento do sinal no domínio do tempo e frequência e balancear a ocorrência de *Inter Carrier Interference* (ICI) e *Inter Symbol Interference* (ISI).

Para o caso de múltiplo acesso, é possível ter vários usuários compartilhando a mesma sub-banda do sinal a ser transmitido e também que cada usuário possa ser tratado como uma sub-banda, sendo filtrado separadamente. O processo de filtragem mantém a ortogonalidade das portadoras de uma mesma sub-banda. Entretanto, as sub-bandas empregadas não serão ortogonais entre si. Subportadoras de guarda podem ser adotadas para eliminar a interferência entre as sub-bandas mencionadas, impactando na redução da eficiência espectral. Por outro lado, o emprego das sub-bandas proporciona flexibilidade ao sinal gerado, uma vez que cada sub-banda pode empregar diferentes parametrizações, como taxa de transmissão, número de subportadoras e tempo de guarda.

3.1.3 GFDM

A forma de onda GFDM [16] é uma forma de onda com múltiplas portadoras cujo símbolo transmitido é formado por K subportadoras na frequência, cada uma transmitindo Msubsímbolos durante um certo período de tempo específico. Cada subsímbolo é modulado individualmente e cada símbolo GFDM transmite N = KM símbolos de dados complexos. A geração do símbolo GFDM emprega a filtragem de M subsímbolos em cada uma das K subportadoras, utilizando diferentes versões de um filtro protótipo. Essas versões são deslocadas circularmente, tanto no domínio do tempo quanto da frequência.

A possibilidade de definição do número de subportadoras e subsímbolos proporciona grande flexibilidade à forma de onda GFDM, permitindo que esta possa ser adequadamente configurada



para atender a diferentes cenários. A utilização da configuração M = 1 e M = N, associada à adoção de um pulso retangular permite a geração da forma de onda OFDM. A adoção da configuração K = 1, M = N, associada ao emprego de um pulso de *Dirichlet* permite a geração da forma de onda *Single Carrier Frequency Domain Equalization* (SC-FDE) [17].

Cada símbolo GFDM é acrescido de um CP que oferece proteção para KM subsímbolos. Essa é uma das vantagens do GFDM em relação ao OFDM, o que proporciona maior eficiência espectral. A Figura 1 mostra a grade de tempo/frequência do GFDM com K subportadoras e M subsímbolos.



Figura 1: Estrutura de um símbolo GFDM como uma grade tempo/frequência.

Como vantagens da forma de onda GFDM, destacam-se a maior eficiência espectral e a reduzida OOBE em relação ao OFDM. A forma de onda GFDM é também compatível com diferentes técnicas de MIMO [18] [19]. Como desvantagem do GFDM, pode-se citar a maior complexidade de implementação.

3.1.4 CP-DSSS

A forma de onda CP-DSSS é uma nova forma de onda versátil que pode ser empregada para aliviar o congestionamento espectral [20]. A forma de onda provê taxa de dados variável, proporciona uma baixa ISI, podendo ser empregada pelas redes *femtocell* para o suporte às aplicações futuras de *Machine Type Communication* (MTC) e URLLC. Possui capacidade similar ao Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA), quando se emprega métodos como equal power e water-filling [20]. A forma de onda CP-DSSS permite dividir os



recursos dos usuários ao longo do tempo e da frequência de maneira similar ao múltiplo acesso empregado no OFDM.

A sequência de espalhamento empregada pela forma de onda CP-DSSS é da família da Zadoff-Chu, selecionada em função de suas propriedades de ortogonalidade entre as versões geradas a partir de seu deslocamento cíclico. Uma sequência Zadoff-Chu de comprimento N tem potencial para modular N símbolos, cada um empregando uma versão deslocada ciclicamente da mesma sequência. A multiplicação da matriz circulante de espalhamento, assim como o processo reverso, pelo vetor de comprimento N, pode ser implementada empregando Fast Fourier Transform (FFT). A sequência de transmissão é obtida a partir da multiplicação da matriz de espalhamento por um vetor de N símbolos e tomando algumas das últimas amostras para compôr o CP. O comprimento do CP deve ser maior ou igual ao máximo delay spread do canal, para que, assim como no OFDM, sejam preservadas as propriedades de convolução circular do sinal com a resposta do canal.

A capacidade de transmissão da forma de onda CP-DSSS é maximizada quando se transmite N símbolos por quadro. A redução da taxa de símbolos da forma de onda, entretanto, permite que uma maior energia seja transmitida por símbolo, mantendo uma dada *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), e permite reduzir o impacto da ISI.

O múltiplo acesso empregando a forma de onda CP-DSSS, conforme proposto em [20], permite compartilhar o espectro de banda larga com múltiplos usuários que se comunicam com uma única ERB, que é o *femtocell gateway*. Através do emprego de técnicas de múltiplo acesso, subgrupos de usuários podem se comunicar com o *gateway*, a cada intervalo de tempo, através de multiplexação na frequência. O *gateway* é responsável por permitir o acesso dos usuários à rede primária. Ao se empregar *Frequency Division Multiple Access* (FDMA), se faz necessário utilizar um filtro para separar os recursos dos usuários no espectro. O emprego de filtragem estende o comprimento do canal e, como consequência, introduz ISI adicional no sistema. O trabalho [20] propõe a realização de truncamento do canal, realizado através de otimizações dos coeficientes de um equalizador linear, de modo que, quando aplicado a um sinal transmitido ou recebido, a resposta ao impulso efetiva do sistema tenha seu comprimento reduzido. Este truncamento permite reduzir a complexidade dos métodos de decodificação iterativa, que aumenta de forma exponencial com o aumento do comprimento do canal. O trabalho [20] propõe também um algoritmo de construção de uma matriz de pré-codificação e detecção que emprega como base a matriz de equalização e uma matriz de um filtro casado.

Os algoritmos e propostas citados para CP-DSSS foram avaliados em termos de capacidade de transmissão por meio de simulações [20]. Foram comparadas as capacidades de um sistema com um único usuário, que utiliza toda a banda de transmissão e emprega múltiplo acesso por divisão do tempo, e de um sistema que emprega o esquema proposto de FDMA, com quatro usuários transmitindo com 1/4 da potência. Como resultado, pode-se destacar que o esquema de pré-codificação proposto permitiu alcançar desempenho 15% maior em relação ao sistema com filtro convencional. O esquema FDMA proposto apresentou, para uma SNR de 0 dB, um desempenho três vezes melhor em relação ao sistema *Time Division Multiple Access* (TDMA) de referência.

3.1.5 Modulação baseada em Chirp

Aplicações previstas para Redes 6G envolvendo veículos e robôs autônomos, dentre outras, requerem uma junção de informações relacionadas ao posicionamento (radar) ou *Light detecting and ranging* (LiDAR) e sensoriamento/detecção. Nesses cenários se faz necessário a identifica-



ção de obstáculos para que acidentes possam ser evitados e para que a execução de movimentos e de tarefas possam ser adequadamente planejadas e realizadas. Além disso, o conhecimento das condições físicas do ambiente e a identificação de obstáculos podem ser utilizados para a otimização do enlace de comunicação. A modulação baseada em *chirp* [21] tem sido utilizada em aplicações de radares, sendo também usada na tecnologia *Long Range* (LoRA). Sistemas que empregam *chirp* podem fazer uso de espalhamento espectral, o que aumenta a robustez às interferências de faixa estreita não intencionais ou *jamming*.

A modulação proposta em [21] visa atender as aplicações de comunicação associadas ao sensoriamento/detecção que possam operar em cenários de mudanças rápidas e com pouca ou nenhuma coordenação. A Figura 2 ilustra, no domínio do tempo e da frequência, um quadro da modulação proposta. O preâmbulo, empregado para função de radar, é formado por M_P chirps não modulados, enquanto que a parte de dados é formada por M_C chirps modulados em QAM, que são espaçados no tempo por Δt .



Figura 2: Quadro da forma de onda baseada em chirp.

A partir da realização de simulações computacionais considerando a modulação baseada em chirp em cenários de aplicações robóticas e automotiva, pode-se verificar que a modulação proposta é robusta perante interferências e jamming. Isso ocorre especialmente na presença de um sinal interferente Continuous Wave (CW) ou perante uma interferência de um outro sinal de banda larga também modulado em chirp [21]. A simulação considerou os seguintes parâmetros da modulação chirp: duração do chirp $T_c = 1,024\mu$ s, largura de banda da varredura B = 1GHz para o cenário de aplicação automotiva e 80 MHz para o cenário de aplicação robótica; número de preâmbulos do quadro $M_P = 3$ e número de símbolos e dados igual à $M_c = 100$. Para os cenários de aplicação automotiva e robótica, tem-se $\Delta t = 32$ ns e $\Delta t = 113, 1$ ns, respectivamente.

Com relação a aspectos de detecção/radar, foi realizada uma simulação para estimar as probabilidades de detecção e de falso alarme, considerado um cenário com um único alvo estacionário posicionado em frente e a 15 m do terminal, com SNR igual a -24 dB e *Signal-to-Interference* (SIR) de -5 dB. Pode-se observar que, para uma dada probabilidade de falso alarme, a probabilidade de detecção na presença de uma interferência CW e interferência *chirp* são bem próximas da probabilidade sem interferência [21].

Para o caso da simulação em um cenário automotivo, considerando a portadora em 78 GHz e mobilidade de 35 m/s, a relação SNR requerida para uma *Bit Error Rate* (BER) de 10^{-3}



foi de aproximadamente 13 dB para o sistema sem interferência e de aproximadamente 14 dB na ocorrência de uma interferência CW e de interferência baseada em *chirp* (*downchirp*). Para o caso da simulação para o cenário de aplicações robóticas, com portadora em 3,7 GHz e mobilidade de 8 m/s, a relação SNR requerida para uma BER de 10^{-3} foi de aproximadamente 16 dB, para o sistema sem interferência, e de aproximadamente 18 dB na ocorrência de uma interferência CW e de interferência baseada em *chirp* (*downchirp*) [21].

De acordo com o conceito de *Physical-Layer Security* (PLS), quadros baseados em *chirp* trocados entre dois dispositivos podem ser reutilizados para gerar chaves de criptografia. O trabalho [21] propõe ainda um novo esquema de geração de chaves baseados em um banco de filtros que gera chaves a partir da decomposição do sinal recebido em sub-bandas paralelas, o que contribui para aumentar a taxa de geração de chaves. Neste contexto, pode-se verificar que a forma de onda proposta é adequada para gerar chaves de criptografia a partir do canal recéproco.

3.1.6 Orbital Angular Momentum

A forma de onda OAM, conhecida também como *vortex electromagnetic wave*, tem sido alvo de pesquisas como candidata para a Rede 6G, devido ao fato de possibilitar o aumento da capacidade de transmissão e eficiência espectral. Inicialmente, essa forma de onda foi considerada para as comunicações ópticas. Porém, tem sido considerada mais recentemente também para as comunicações sem fio nas faixas de micro-ondas, ondas milimétricas e THz. Na forma de onda OAM, as características das ondas eletromagnéticas associadas com a vorticidade do feixe e à singularidade da fase podem ter um grande número de estados ortogonais entre si, chamados de modos OAM, que permitem criar vários canais que, em princípio, permitem aumentar a capacidade e eficiência espectral de transmissão [22, 23].

Como principais vantagens da forma de onda OAM, pode-se destacar [22]: (i) alta eficiência espectral através da exploração do novo domínio dos modos OAM; (ii) suporte a um maior número de usuários, graças às novas técnicas de múltiplo acesso que podem ser viabilizadas e que não consumam mais recursos de tempo e frequência, como, por exemplo, múltiplo acesso por divisão de modo; (iii) alta confiabilidade na ocorrência de *jamming*.

A introdução de um novo domínio pela forma de onda OAM faz com que seja necessário rever conceitos tradicionais de comunicação sem fio e que sejam também adaptadas e desenvolvidas novos mecanismos e técnicas de processamento. Neste aspecto, estudos e pesquisas precisam ser aprofundados em diferentes áreas como, por exemplo [22]:

- Multiplexação e de-multiplexação da forma de onda OAM, que se apresenta como grande desafio a ser superado devido à dificuldade de manipulação dos feixes da onda OAM;
- Transmissão de sinal OAM envolvendo aspectos como o alinhamento do transmissor e receptor para permitir a separação dos sinais com diferentes modos OAM, já que no caso do não alinhamento se faz necessário a implementação de um algoritmo para a estimação adaptativa das variações de fase do sinal recebido, mitigação dos efeitos de distúrbios na fase do sinal devido a ocorrência de *fading*, convergência dos feixes OAM, uma vez que a divergência dos feixes OAM aumenta à medida que a ordem de modos OAM aumenta;
- Detecção e separação efetiva das informações moduladas. Vale ressaltar que alguns esquemas de recepção foram desenvolvidos como, por exemplo, o *Phase Gradient Method* (PGM) que permite identificar os modos OAM.



A multiplexação da tecnologia OAM com outras técnicas de modulação também tem sido alvo de pesquisas. O trabalho apresentado em [24], por exemplo, propõe a técnica Orthogonal Frequency-Division Multiplexing-Orbital Angular Momentum (OFDM-OAM) MIMO para multiplexação espacial. Nesta técnica, símbolos de dados são modulados em grupos de sinais OFDM empregando-se Inverse Discrete Fourier Transformer (IDFT) no domínio da frequência. Através da realização da IDFT no domínio espacial, cada grupo de símbolos OFDM pode ser modulado em sinais OAM com diferentes modos. Em um sistema OFDM-OAM MIMO, por sua vez, o transmissor pode gerar múltiplos sinais OFDM-OAM com diferentes subportadoras e diferentes modos OAM. Essa técnica proposta, baseada em Discrete Fourier Transformer (DFT), proporciona o aumento da eficiência espectral, porém proporciona um aumento de complexidade considerável para sua implementação em hardware e software. O número de modos OAM depende do número de antenas empregadas e a complexidade computacional da modulação e demodulação OFDM e OAM aumenta com o número de subportadoras OFDM e com o número de modos OAM empregados.

O mesmo trabalho [24] propõe um esquema alternativo, mas de menor complexidade, que considera um chaveamento temporal denominado de *Time-Switched* OFDM-OAM (TOO) MIMO. A técnica proposta emprega um vetor circular de chaveadores temporais para gerar múltiplos modos OAM com diferentes frequências de portadoras de maneira simultânea. Este esquema se mostrou mais adequado para comunicações de banda larga de menor custo, proporcionando aumento da eficiência espectral com menor complexidade em relação à técnica OFDM-OAM.

3.1.7 Portadora Única

Há a expectativa de que o número de parâmetros e configurações necessárias para suportar as aplicações previstas para as Redes 6G aumente de forma significativa. Novas configurações relacionadas ao domínio espacial, como parametrização da largura de feixes (*beam*), bem como parâmetros relacionados às novas técnicas a serem adotadas pelo sistema devem contribuir para o aumento dos parâmetros e das configurações previstas para a Rede 6G. Há possibilidade do sistema ainda empregar múltiplas formas de onda, como, por exemplo, empregando-se uma forma de onda diferente para as frequências acimas de 50 GHz, conforme destacado em [25]. Uma motivação para isso se deve ao fato que a medida que a frequência aumenta, a linearidade e eficiência dos amplificadores de potência diminui, o que pode tornar mais interessante o emprego de uma forma de onda com portadora única do que uma forma de onda com múltiplas portadoras em faixas de frequência elevada. Além disso, à medida que aumenta a frequência, aumenta-se também o ruído de fase de osciladores, demandando um maior espaçamento entre subportadoras, o que, por sua vez, torna o uso de formas de onda com portadora única vantajoso [25].

O projeto BRAVE [26], que é fomentado pela agência de pesquisa francesa Agence Nationale de la Recherche (ANR), tem por objetivo desenvolver tecnologias de rádio para operar em frequências na faixa de 90 a 200 GHz, visando alcançar taxas da ordem de Tbps e que tenha desempenho compatível com o Beyond Fifth Generation of Mobile Network (B5G). Devido às adversidades proporcionadas pelo canal de comunicação nas frequências acima de 90 GHz, o projeto definiu como foco os cenários em que os nós são conectados em linha de visada, associado ao emprego de grandes matrizes de antenas. O projeto considera o emprego de forma de onda de portadora única com intuito de reduzir o consumo de energia, já que este tipo de modulação proporciona baixa PAPR. O projeto considera também o fato de modulações não



coerentes apresentarem grande robustez com relação ao ruído de fase, o que torna este tipo de modulação interessante para a faixa de THz.

O projeto BRAVE contempla pesquisas relacionadas ao emprego de formas de onda de portadora única, que possam prover grande robustez com relação ao ruído de fase, efeito *Doppler* e offset de frequência. Nesse contexto, o projeto considera novas modulações de portadora única, como a modulação Frequency-Shift Keying (FSK)-Continuous phase modulation (CPM), que transmite informações através da variação da fase da portadora, proporcionando um sinal resultante com envoltória constante. A forma de onda FSK-CPM pode gerar um espectro compacto, Single Side Band (SSB), concentrando 99% da energia na banda de transmissão [26].

Visando aumentar a eficiência de transmissão, o projeto considera o emprego da modulação *M-Phase Shift Keying* (M-PSK) e também da modulação *Differential Phase-Shift Keying* (DPSK) por permitir a demodulação não-coerente. Esse recurso pode ser interessante em certos casos, já que essa modulação não é sujeita à natureza acumulativa do ruído de fase *Wiener*. Apesar desta robustez, este tipo de modulação sofre com a degradação da BER. A modulação DPSK, entretanto, pode apresentar robustez superior à modulação *Phase-Shift Keying* (PSK) na ocorrência de forte ação do ruído de fase *Wiener* [26].

A vazão da ordem de Tbps exige alta eficiência espectral da modulação digital, o que demanda o aumento da ordem de modulação que, por sua vez, degrada a PAPR e exige maior potência de transmissão. Nesse contexto, o projeto contempla estudos e adaptações de técnicas de redução de PAPR normalmente aplicadas às formas de onda com multiportadoras, como, por exemplo, a técnica denominada de *Modified Tone Reservation* [27]. A modulação de alta ordem *Partial Response Signaling* também é considerada nas investigações do projeto para o aumento da eficiência espectral.

3.1.8 Conclusão

Os sistemas celulares atuais foram otimizados para fornecer altas taxas de dados e cobertura confiável para usuários móveis. Os sistemas futuros, como os propostos para a Rede 6G, enfrentarão o desafio de atender requisitos de diversas aplicações, como a demanda por taxas de dados extremamente elevadas, dispositivos sensores alimentados por fontes de energia de baixíssima capacidade, e aplicações de controle que requerem tempos de resposta muito curtos. Diante de todas essas exigências, existe a necessidade de utilização de formas de onda que sejam capazes de atender a esses requisitos. Nessa seção, foram abordados diferentes tipos de formas de ondas, suas respectivas vantagens e desvantagens e o efeito da utilização nas redes futuras.

A Tabela 1 apresenta, de forma resumida, as principais conclusões das referências bibliográficas discutidas nessa seção.



Tabela 1: Principais referências relacionadas às possíveis formas de ondas para a rede 6G.

Ref	Principais contribuições
[15]	Ao permitir que o comprimento do filtro exceda o comprimento do CP de um
	sinal OFDM, a forma de onda F-OFDM proposta pode atingir uma localização de
	frequência desejável para larguras de banda tão estreitas quanto algumas dezenas de
	subportadoras, mantendo a interferência entre símbolos e entre portadoras dentro
	de um limite aceitável.
[16]	Foram analisadas as principais características da forma de onda de camada física
	conhecida como GFDM e sua capacidade de atender aos requisitos propostos pelas
	futuras redes de comunicação. Diversos aspectos foram analisados, desde o desem-
	penho até a implementação em <i>hardware</i> .
[20]	CP-DSSS é abordada como uma nova forma de onda para ser utilizada em rede
	secundária para aliviar o congestionado espectro sem fio. A estrutura do CP-DSSS
	permite múltiplo acesso eficiente por meio de divisão de frequência e tempo. A
	taxa de dados do sistema é maximizada quando o espectro é dividido e alocado
	para usuários com a melhor SNR para a fatia de canal fornecida.
[21]	É proposta uma forma de onda baseada em $chirp$ adequada para sensoriamento e
	comunicação conjuntas. Foi analisado o seu desempenho nos cenários automotivo e
	de robótica para a indústria 4.0. Também foi mostrado como aumentar a segurança
	do sistema, gerando chaves de criptografia por meio dessa forma de onda.
[22]	Apresenta a modulação OAM, que abre uma nova dimensão para a multiplexação,
	aumentando significativamente a eficiência espectral.
[25]	Apresentou a possibilidade de um sistema de comunicação empregar diferentes for-
	mas de onda para frequências acimas de 50 GHz. Foi discutido que à medida que
	a frequência de operação aumenta, a linearidade e a eficiência dos amplificadores
	de potência diminui, tornando assim mais interessante o emprego de uma forma de
	onda com portadora única ao invés de uma forma de onda com múltiplas portado-
	ras.



3.2 Tecnologias MIMO

Felipe Augusto Pereira de Figueiredo, Michelle Soares Pereira Facina, Victoria Souto felipe.figueiredo@inatel.br, mfacina@decom.fee.unicamp.br, victoria.souto@posgrad.ufsc.br

Apesar dos sistemas 5G terem adotado recursos inovadores, principalmente ligados à infraestrutura, tais sistemas possuem limitações e não serão capazes de satisfazer as condições para suportar todas as aplicações previstas pelas Redes 6G. Por isso, diversos avanços tecnológicos vêm sendo propostos, visando que a Rede 6G atinja todas as novas aplicações. Para isto, novas tecnologias como: (i) rede operando na banda THz com recursos de espectro muito mais amplo; (ii) ambientes de comunicação inteligentes; (iii) automação de rede em grande escala; e (iv) redes de comunicação MIMO massivas sem células [3] deverão ser utilizadas. Dessa forma, espera-se que a Rede 6G seja disruptiva, caracterizada pela confluência de tecnologias já existentes e outras habilitadoras, tais como MIMO massivo, MIMO em THz, Superfícies Inteligentes e Redes *Cell-Free*. É importante mencionar que a ideia chave de múltiplas antenas transmissoras e receptoras é comum a todas elas. No entanto, cada uma possui suas próprias particularidades, conforme detalhado a seguir.

3.2.1 MIMO Massivo

O uso de grandes arranjos de antenas tem sido uma das características definidoras da Rede 5G. Também conhecida como MIMO massivo, esta tecnologia foi introduzida em [28] e tende a continuar em direção à Rede 6G. Adicionando elementos nos arranjos de antenas em até uma ordem de magnitude em relação aos esquemas MIMO convencionais, o MIMO massivo é capaz de aumentar a eficiência espectral e energética de sistemas de comunicações de forma significativa [29].

Graças ao elevado número de antenas, é possível criar feixes altamente diretivos e servir vários usuários simultaneamente usando os mesmos recursos de tempo e frequência [30]. Além disso, estes feixes altamente diretivos fazem com que as ERBs consigam concentrar energia para os usuários desejados, reduzindo assim a potência de transmissão, minimizando a interferência entre usuários e aumentando a eficiência espectral [31]. Essas vantagens estão representadas na Figura 3, em que é feita uma comparação entre um sistema tradicional e outro utilizando a tecnologia MIMO massivo.



Figura 3: Comparação entre um sistema MIMO tradicional e um sistema MIMO massivo.



A seguir, apresenta-se uma visão abrangente do MIMO massivo, alguns desafios, soluções já disponíveis e novos problemas decorrentes de sua adoção.

Deficiências devido a hardware de baixo custo e desafios referentes à cadeia de Rádio Frequência (RF)

O MIMO massivo depende da lei dos grandes números para mitigar ruído, desvanecimento e, até certo ponto, interferência. Provavelmente, arranjos de antenas com grande número de elementos serão construídos usando componentes de baixo custo para facilitar sua introdução e alavancar a penetração da tecnologia MIMO massivo no mercado. Isso exigirá soluções capazes de contornar imperfeições de hardware que se manifestam, como, por exemplo, o desbalanceamento I/Q e o ruído de fase. Além disso, conversores A/D de baixo custo e com baixo consumo de energia geram níveis mais altos de ruído de quantização. Amplificadores de potência com requisitos de linearidade muito relaxados necessitarão de sinalização com reduzido PAPR por elemento do arranjo, o que, como já foi observado, é viável através do uso de grande número de antenas. Com *Phase Locked-Loopss* (PLLs) de baixo custo ou mesmo osciladores livres em cada antena, o ruído de fase irá flutuar entre o momento em que um símbolo piloto é recebido e o momento em que um símbolo de dados é recebido em cada antena [32].

A economia na energia irradiada resulta do uso de um número elevado de antenas para enviar simultaneamente dados, de forma independente, para diferentes usuários. Além disso, o consumo total de energia também deve ser levado em consideração. Nesse contexto, um caminho de pesquisa interessante são as arquiteturas de hardware para o processamento de sinal de banda base que apresentam baixo consumo de energia [32, 33].

A implantação de centenas de cadeias de RF, conversores A/D-D/A, conversores de frequência e outros exigirá uma enorme redução de escala na fabricação de circuitos, quando comparado ao que existe até agora para dispositivos móveis e IoT. Em [34], os autores argumentam que é bastante complicado implantar um grande número de cadeias de RF em um transceptor com espaço físico limitado devido ao grande consumo de energia e ao custo muito alto de tais cadeias [35]. Eles argumentam que, particularmente em bandas de ondas milimétricas (mmWave), é impossível ter uma única cadeia de RF por elemento do arranjo de antenas. Portanto, arquiteturas híbridas analógicas/digitais devem ser consideradas como soluções potenciais para esse problema. A implantação de sistemas MIMO massivo apresenta vários desafios importantes que precisam ser enfrentados. Um desafio importante é a implementação e implantação de cadeias de RF massivas e a degradação do desempenho devido a deficiências do hardware, uma vez que cadeias de RF de baixo custo serão adotadas a fim de diminuir o consumo de energia e os custos de implantação de um grande número de cadeias de RF [36].

Os autores de [37] estudam a seleção da cadeia de RF para os casos com e sem conhecimento de *Channel-State Information* (CSI). Em seu trabalho, eles avaliam como o CSI afeta a maximização da eficiência espectral para uma determinada restrição no consumo total de energia. Eles mostram que, para o caso sem CSI disponível, o número ideal de cadeias de RF é cerca de metade do número máximo das que seriam necessárias devido a restrição de energia fornecida. Em [38], os autores demonstram que se a potência do circuito pudesse ser ignorada em comparação com a potência total de transmissão, todas as antenas deveriam ser utilizadas para maximizar a eficiência energética. Por outro lado, eles também mostram que se a potência do circuito é comparável à potência total de transmissão, então, apenas um subconjunto de antenas deve ser usado [39]. Em [40], os autores demonstram que o processamento de cadeias de



RF híbridas pode atingir o mesmo desempenho de qualquer processamento daquelas totalmente digitais se o número de cadeias de RF implantadas for duas vezes maior que o número de fluxos de dados.

Outro caminho de interesse é a experimentação, já que as plataformas de testes (*testbeds*) atualmente disponíveis apenas oferecem recursos básicos e não levam em consideração as funcionalidades das ERBs [33, 36, 41]. A experimentação também pode ser recompensadora, pois as descobertas experimentais podem ser realimentadas na teoria, tornando o desenvolvimento de plataformas de testes, protótipos e experimentos de prova de conceito de extrema importância para um melhor entendimento sobre a tecnologia MIMO massivo [36].

Acoplamento mútuo e ambiguidade na relação frente-costas

Uma suposição frequentemente feita ao modelar arranjos de antenas é que a separação entre os elementos do arranjo é grande o suficiente para manter o acoplamento mútuo em níveis desprezíveis. Entretanto, isso não é totalmente realista, especialmente no caso de um grande número de elementos implantados como uma matriz de elementos de tamanho e abertura restritos. Sob tais condições práticas, o acoplamento mútuo é conhecido por impactar substancialmente a capacidade que o sistema pode alcançar [42, 43]. Circuitos de RF para casamento de impedância multiportadora podem cancelar tais efeitos de acoplamento [44], mas eles diminuem a largura de banda da porta [45] e aumentam as perdas ôhmicas [46, Capítulo 10].

Foi relatado que matrizes bidimensionais ou tridimensionais são capazes de evitar a ambiguidade frente-costas. Um efeito colateral das implementações densas é que quanto maior o número de elementos adjacentes, maior será o aumento dos efeitos de acoplamento [30]. Outra lacuna fundamental específica para configurações 3-D é a incapacidade de extrair informações adicionais dos elementos no centro da matriz, ou seja, apenas os elementos na superfície da matriz contribuem para a capacidade de informação [42, 47]. As densidades ideais acima das quais o desempenho se deteriora, não importando quão grande seja o número de elementos, são estudadas em [42, 48] para ERBs equipadas com sistemas MIMO massivo para ambientes internos.

Propagação e modelagem de canal

Avaliações realistas de desempenho exigem caracterização e modelagem de canal apropriadas. O comportamento do canal MIMO massivo, incluindo suas propriedades de correlação e a influência de diferentes tipos de arranjos de antenas, não pode ser capturado de outra forma. O interesse suscitado por este tema tem crescido em ritmo acelerado, e a comunidade científica já conseguiu contribuir para um melhor entendimento sobre o assunto. Em [49, 50, 51], medições de canal foram realizadas para identificar e modelar estatisticamente as características de propagação de interesse. Em seguida, as características são realimentadas em um modelo de canal existente, estendendo sua aplicabilidade a arranjos de antenas de grande escala.

As avaliações de desempenho devem ser conduzidas, idealmente, usando um modelo de canal padronizado ou amplamente aceito. Alguns modelos para MIMO massivo são apresentados e discutidos em [50, 52]. Em [49, 53], os autores apresentam uma discussão sobre métodos de modelagem, categorias de canal e suas propriedades fundamentais que podem ser de interesse dos leitores que queiram se aprofundar neste assunto.



Aquisição de informações sobre o estado do canal

Em sistemas convencionais de *Frequency Division Duplexing* (FDD), a ERB não pode aproveitar os ganhos proporcionados pelo *beamforming* até que tenha estabelecido um enlace de comunicação com os terminais. Em primeiro lugar, a ERB transmite pilotos com os quais os terminais estimam suas respostas de canal correspondentes. Essas estimativas feitas pelos terminais são então quantizadas e retornadas à ERB. Tal abordagem FDD encontra aplicação limitada em sistemas MIMO massivos, em que a quantidade de recursos de tempo-frequência necessários para a transmissão do piloto no *downlink* aumenta com o número de antenas, o mesmo acontecendo com o número de respostas de canal que devem ser estimadas pelos terminais. Em sistemas com grandes arranjos de antenas, o tempo de transmissão do piloto pode exceder o tempo de coerência do canal [28, 54, 55, 56, 57].

Uma alternativa para os sistemas MIMO massivo é permitir que os terminais enviem pilotos para a ERB adotando uma abordagem *Time-Division Duplex* (TDD). A abordagem TDD depende da reciprocidade de canal, onde os canais de *uplink* servem como estimativa dos canais *downlink*. Isso leva a requisitos de treinamento independentes do número de antenas [55, 58] e elimina a necessidade de *feedback* de CSI. As desvantagens do TDD são a calibração de reciprocidade e a contaminação por piloto: a primeira é uma necessidade levantada por diferentes características de transferência de cadeias de processamento *downlink/uplink* (por exemplo, amplificadores, filtros, osciladores locais, etc. apresentam características diferentes); o último surge em cenários de múltiplas células multiusuário, onde o uso de sequências piloto não ortogonais faz com que a estimativa de canal do usuário pretendido seja contaminada por uma combinação linear de canais de outros usuários que compartilham o mesmo piloto. A calibração de reciprocidade e a descontaminação piloto são estudadas em [56, 57, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67], mas as soluções ideais são desconhecidas até o momento.

Pre-codificação

A interferência de vários usuários pode ser mitigada no lado da transmissão, utilizando técnicas de *beamforming* para suportar múltiplos fluxos de dados. A pré-codificação baseada em Zero Forcing (ZF) ou Minimum Mean Square Error (MMSE) é simples para um número moderado de antenas. No entanto, a dependência de inversões de canal, ou seja, de matrizes, pode levar sua complexidade e consumo de energia a um ponto difícil de acomodar em arranjos muito grandes [30, 68, 69, 70, 71]. O Matched Filter (MF), que compreende a Maximum Ratio Transmission (MRT) no downlink e o Maximum Ratio Combining (MRC) no uplink, é conhecido por ser o método mais simples [28, 68].

Métodos de pré-codificação não lineares, como Dirty Paper Coding (DPC) [72], Tomlinson-Harashima Precoding (THP) [73, 69, 70] e Vector Pertubation (VP) [74], também têm características atraentes (DPC é teoricamente ideal), mas são muito complexos para implementação prática ou oferecem ganhos difíceis de justificar em vista de sua maior complexidade computacional. Lembrando que o tamanho do arranjo necessário para alcançar uma dada Signal-to-Interfance-and-Noise Ratio (SINR) com MF é pelo menos duas ordens de magnitude maior do que com ZF [30], trabalhos adicionais em soluções econômicas são necessários, como, por exemplo, ilustrado em [70, 75] para algoritmos de diagonalização de blocos.



Detecção

Quando se trata de separação de fluxo de dados em sistemas convencionais, a detecção por máxima verossimilhança é a solução ideal, mas sua complexidade aumenta exponencialmente com o número de fluxos (isso torna difícil a implementação em redes MTC onde centenas a milhares de dispositivos são previstos). Esta é a razão pela qual a estimação e detecção são problemas chaves em sistemas MIMO massivo. Detectores de filtragem linear subótimos com complexidade computacional reduzida, como MRC, ZF e MMSE [76], oferecem custos mais baixos (que não dependem do número de fluxos/usuários e ordem de modulação), mas não são capazes de atingir a ordem de diversidade de recepção do detector por máxima verossimilhança e, consequentemente, não maximizam a capacidade de canal para casos em que o número de fluxos ou de usuários é aproximadamente igual ou igual ao número de antenas do arranjo [71, 77, 78, 79]. Essa compensação entre desempenho e complexidade levou ao desenvolvimento de vários métodos de detecção alternativos, alguns deles discutidos a seguir.

A primeira classe de interesse é a filtragem linear iterativa, que engloba MMSE com Successive Interference Cancellation (SIC) e Block-iterative Generalized Decision Feedback Equalization (BI-GDFE) [77, 80]. Uma deficiência comum desses detectores iterativos é que sua dependência em repetidas inversões de matrizes pode torná-los computacionalmente pesados para grandes arranjos de antenas. Tabu Search (TS) [78, 79, 81] e Likelihood Ascent Search (LAS) [82] pertencem a uma classe de detectores livres de inversão de matriz conhecida como métodos de detecção de pesquisa por passos aleatórios. Lamentavelmente, a compensação de desempenho/complexidade também entra em jogo aqui, já que TS e LAS são conhecidos por serem superados por Minimum Mean Square Error-Successive Interference Cancellation (MMSE-SIC) [30]. Além disso, o MMSE-SIC é conhecido por atingir a capacidade total do canal de múltiplo acesso MIMO com desvanecimento rápido [83, 84]. A última classe relevante, conhecida como algoritmos de detecção baseados em árvore, tem no Fixed Complexity Sphere Decoding (FCSD) um de seus métodos mais proeminentes [79, 85, 86]. Apesar das melhorias do FCSD em relação à decodificação de esfera tradicional, o método ainda é 1000 vezes mais complexo do que o TS.

3.2.2 MIMO em THz

A banda compreendida entre 0.1 e 10 THz é apontada como sendo fundamental para as redes 6G. A banda THz tem o potencial de oferecer capacidade virtualmente ilimitada para suportar canais de altíssima largura de faixa e taxas de dados extremamente altas [87]. Além disso, estudos mostram que as comunicações na faixa de THz podem atingir altas taxas de dados através do Visible Light Communication (VLC) [88].

Sabe-se que a perda no espaço livre aumenta logaritmicamente com a frequência. Como tal, para um determinado fator de forma, antenas altamente direcionais podem fornecer baixa perda no espaço livre. Isso criou a necessidade por arranjos MIMO massivos em faixas de ondas milimétricas e arranjos MIMO ultra-massivos em faixas de THz. Desta forma, a comunicação sem fio na faixa de THz permite que pequenas estruturas alcancem ganho de diversidade e ganho de diretividade usando MIMO. Em [89], os autores introduziram um arranjo MIMO ultra massivo com 1024×1024 elementos como uma abordagem para aumentar a distância de comunicação em sistemas operando na faixa de THz. Os trabalhos [90, 91, 92] fornecem uma taxonomia de operação da tecnologia MIMO ultra-massiva em frequências da faixa de THz usando o conceito de matrizes de submatrizes.

Canais na banda de THz são considerados como sendo altamente seletivos em frequência [91]. Esses canais sofrem de alta atenuação atmosférica e perda no espaço livre. O combate a esses



efeitos requer o desenvolvimento de novos modelos de canal para emular o comportamento da propagação na faixa de de THz [93]. Em [94], os autores propõem o primeiro modelo estatístico para canais em THz. Este modelo é baseado em simulações extensas de traçado de raio para a obtenção de parâmetros estatísticos do canal. Estudos recentes apresentados em [95, 96, 97] fornecem modelos de canais mais precisos. Vários trabalhos de pesquisa também focaram em aplicações de comunicação na faixa de THz. Um sistema híbrido óptico-radiofrequência é apresentado em [98], onde um enlace THz/óptico é considerado alternativa adequada para futuras comunicações sem fio.

O aumento do número de fluxos de dados previsto para a Rede 6G exigirá o uso de arranjos MIMO ultra-massivos em ambas as extremidades. No entanto, os fluxos só podem ser explorados totalmente se os percursos entre as antenas transmissoras e receptoras apresentassem baixa correlação, algo que é ainda pouco explorado na literatura de comunicações na faixa de THz, exceto pelo estudo em [94]. Arranjos de grandes dimensões resultarão em diretividade extrema nos feixes transmitidos, o que reduzirá a interferência, mas o aumento da largura de banda irá aumentar o nível de ruído [29], o que significa que a SINR pode apresentar pouca variação.

Espera-se que o uso da faixa de THz possibilite o estabelecimento de enlaces com taxas de dados da ordem de Tbps, para atender às demandas de aplicações futuras e potencialmente fortalecer as redes de *backhaul*. No entanto, comunicações nesta faixa sofrem grandes perdas de propagação e exigem enlaces com visada direta para que comunicações sejam estabelecidas. Mais esforços são necessários para entender o comportamento dos sinais na faixa de THz e modelos de canais mais precisos e realistas são necessários.

3.2.3 Superfícies Inteligentes

Recentemente proposta, *Large Intelligent Surface* (LIS) é uma tecnologia de comunicação sem-fio considerada como uma extensão de sistemas MIMO massivos, mas com uma ideia que transcende o conceito tradicional de arranjos de antenas nos transceptores. Por ser uma matriz plana que compreende elementos reflexivos quase passivos e de baixo custo com parâmetros reconfiguráveis, ela auxilia a interconexão dos mundos físico e digital de maneira contínua e sustentável. Justamente por isso, é considerada a base das futuras redes móveis em que o próprio ambiente de propagação se transformará numa entidade reconfigurável por *software* [99, 100]. Dessa forma, ao contrário do que acontece em sistemas de comunicação sem-fio convencionais, em que apenas o transmissor e o receptor podem ser ajustados, LIS permite a otimização também do canal de propagação. A Figura 4 exemplifica algumas aplicações possíveis para tais superfícies. Seja em fachadas de prédios, veículos ou mesmo drones, a ideia principal é melhorar a cobertura e aumentar a intensidade de um sinal graças à reflexão.

Os primeiros estudos sobre esse assunto datam de 2014. A partir de uma série de implementações experimentais, Hum *et al.* [101] mostraram que arranjos refletivos reconfiguráveis de lentes podem controlar dinamicamente o feixe de uma antena. Mas o conceito semelhante ao que hoje chamamos de LIS só foi mencionado em 2015 no projeto da Universidade da Califórnia em Berkeley [102]. Também conhecidas como *Reconfigurable Intelligent Surfaces* (RIS), basicamente a ideia consistia em papéis de parede eletromagneticamente ativos com poder de processamento integrado. Uma cadeia de *Field-Programable Gate Array* (FPGA) é responsável por controlar automaticamente uma integração compacta de pequenas antenas. Graças ao ajuste de seus elementos, como capacitância, resistência e indutância, a LIS é capaz de alterar a impedância característica do meio, o coeficiente de reflexão e, consequentemente, a direção de *beamforming*. Sua grande vantagem é o foco energia no espaço tridimensional com extrema





Figura 4: Exemplos de aplicações de LIS.

precisão, principalmente em altas frequências, o que lhe confere capacidade de supressão de interferências. Isso melhora não só a cobertura de sinal mas também aumenta a capacidade do canal [103].

Hoje em dia já existem muitas pesquisas sobre esse tema. A maioria delas aborda os efeitos que o emprego de LIS causa em parâmetros previamente desenvolvidos para sistemas de comunicação convencionais. Por exemplo, assim como Björnson *et al.* [104] fizeram para sistemas MIMO massivos, os dois trabalhos de Huang *et al.* [105, 106] avaliam como maximizar a eficiência energética, definindo a potência de transmissão, além da quantidade de antenas em ERBs e de usuários ativos. A eficiência energética, definida como o número de bits transferidos por unidade de joule de energia, é afetada por muitos fatores, como arquitetura da rede, protocolo, potência de transmissão, e consumo de energia pelos circuitos. Ao resolverem tal otimização não convexa, os autores concluem que sistemas assistidos por LIS podem ser até 300% mais eficientes do que os assistidos por *relays* com protocolo *Amplify-and-Forward* (AF), já que usa o esquema de transmissão *full-duplex* e não há a amplificação de ruído. E, embora centenas de elementos na LIS sejam necessários para superar o desempenho de um *relay* com protocolo *Decode-and-Forward* (DF), vale a pena ressaltar que mesmo assim a LIS pode ser fisicamente muito pequena, uma vez que cada um de seus elementos tem tamanho da ordem de subcomprimento de onda [107].

Por outro lado, dentre as várias tecnologias inovadoras propostas para a Rede 6G, como o uso da banda THz, o espectro de luz visível e drones, o projeto *Millimeter-wave Networking* and Sensing for Beyond 5G (B5G MINTS) da União Europeia, está buscando aperfeiçoar as tecnologias de ondas milimétricas já existentes. A ideia é implementar as características de superfícies inteligentes em simuladores, de forma a criar um protótipo real capaz de maximizar a diretividade e reduzir a perda por penetração em altas frequências [108]. Dada a facilidade de implementação, seja pela geometria conformada e leve ou o fato de não modificar a padronização da camada física e ser transparente aos usuários, o projeto Reconfigurable Intelligent Surfaces for SmarT CiTIes (RISOTTI) da Universidade de Luxemburgo investiga substituir a retransmissão tradicional feita com relays por LIS em redes móveis com múltiplos saltos. Os possíveis cenários práticos considerados abrangem desde os estáticos, como fachadas de prédios, até os móveis,



como veículos aéreos não-tripulados revestidos por LIS [109]. Dentre eles, o transporte público figura como um dos principais graças à cooperação com o parceiro industrial Volvo [110].

Mas, apesar das similaridades existentes com outras tecnologias, a LIS possui algumas especificidades que a tornam única. Ao estudar sistemas com múltiplas antenas, é comum aproximar a onda eletromagnética recebida por uma onda plana. No entanto, em se tratando de LIS, essa aproximação geométrica de campo distante é válida apenas quando a distância entre os dispositivos transmissor e receptor é maior do que as dimensões da superfície inteligente [111]. Caso contrário, em regime de campo próximo, a LIS atua como um dispersor. As interferências não desaparecem, a perda de percurso passa a ser calculada de forma diferente, e as equações de Maxwell e a polarização das antenas precisam ser consideradas [112].

Algumas pesquisas já consideram diferentes meios de propagação em tais cenários reais, inclusive quando há erros de quantização e estimação de fase [113]. No entanto, esses não são os únicos inconvenientes que podem ocorrer. Por exemplo, ao dispor os elementos da LIS numa matriz, torna-se inviável considerar realizações descorrelacionadas entre si. Isso somente ocorreria caso as antenas de uma matriz fossem dispostas linearmente [114]. Além disso, é preciso investigar o desempenho quanto à capacidade de cobertura de sistemas auxiliados por LIS que sejam ainda mais práticos e integrados a ferramentas mais eficientes de comunicação de dados. O aprendizado de máquina, por exemplo, é capaz de fornecer maior flexibilidade e robustez contra informações incertas e modelagens imprecisas em ambientes dinâmicos, como o canal móvel, além de conseguir lidar com a grande quantidade de dados.

Ao lidar com controle de potência e estimação de canal em sistemas auxiliados por LIS, a maioria das pesquisas parte de um problema de otimização. Em [115], Han *et al.* alternam entre as técnicas de relaxação semi-definida e aproximação convexa sucessiva para minimizar a potência de transmissão na ERB sujeita às restrições de *Quality of Service* (QoS) caracterizadas pela SNR na recepção. A partir da derivação de dois limites inferiores, eles mostram que a potência de transmissão ótima em tais sistemas é significativamente inferior ao valor requerido em sistemas de comunicação sem LIS.

Zhao *et. al* propõem em [116] dois cenários possíveis para maximizar a potência coletada quando há a reciprocidade de canal em sistemas *duplex* de divisão no tempo. Com base nas sequências-piloto transmitidas pela ERB e pelos usuários móveis, o esquema ótimo emprega o filtro casado durante o *beamforming*. Já o esquema subótimo elimina a troca de informações entre os dispositivos e aplica ganho igual para todos os canais. A LIS, por sua vez, apenas ajusta as fases de reflexão. Em ambos os casos, assume-se a mesma potência para todos os usuários móveis.

Aproveitando das propriedades de posto deficiente que geralmente ocorre ao lidar com canais massivos em campo distante e com espalhamento limitado, He *et al.* [117] apresentam um algoritmo para estimação dos canais em cascata, ERB \rightarrow LIS e LIS \rightarrow User Equipment (UE). A primeira fase deste algoritmo consiste em fatorar a matriz esparsa do canal e, em seguida, recuperar algumas de suas informações que foram perdidas no processo. Já You *et al* analisam o erro de estimação de canal em sistemas cujas fases de reflexão da LIS são discretas [118]. Para reduzir a sobrecarga de treinamento, os elementos da superfície são agrupados em subsuperfícies. Existe também um controlador inteligente acoplado à LIS que é responsável pela troca de informações com a ERB por meio de um enlace sem-fio dedicado. Basicamente, a transmissão é dividida em duas etapas. A primeira consiste na estimação do canal e a segunda, na transmissão de dados. Símbolos de treinamento são usados para estimar tanto os canais do enlace direto como os em cascata.

Em contraste a muitos trabalhos, Zappone et al. [119] desenvolvem uma estrutura de



alocação de recursos que considera a realimentação necessária para estimação ótima do sistema auxiliado por LIS. Segundo eles, a realimentação para selecionar a fase otimizada de cada elemento de LIS antes da transmissão dos dados introduz uma sobrecarga considerável à fase de comunicação. Por isso, as expressões de otimização são deduzidas para reduzir a complexidade computacional. A eficácia de se usar LIS é comprovada, principalmente, quando há poucas antenas de transmissão na recepção.

Vale ressaltar que todos os trabalhos supracitados assumem o conhecimento perfeito dos canais entre LIS e transceptores para simplificar o modelo. No entanto, obter o conhecimento de canal é um dos desafios mais críticos para tais sistemas, devido ao grande número de elementos na LIS e às suas restrições de hardware. Como a enorme sobrecarga de treinamento é, possivelmente, proibitiva para o funcionamento de sistemas LIS, alguns trabalhos têm aplicado sensoriamento comprimido e soluções baseadas em aprendizagem profunda de máquina. Por exemplo, Taha et al. [120] comparam duas possíveis arquiteturas de hardware. Na primeira delas, todos os elementos da LIS são passivos, exceto alguns sensores de canal ativo, que são distribuídos aleatoriamente na superfície. Tais sensores ativos são diretamente conectados ao controlador e ditam o arranjo eficiente das matrizes de reflexão. Por outro lado, a aprendizagem profunda de máquina requer um número menor de elementos ativos. Não é preciso assumir canais esparsos e nem o conhecimento da geometria da LIS, graças à observação de eventos anteriores. Mas vale ressaltar que, nesse caso, é preciso lidar com grande quantidade de dados. Em [121], os autores aplicam a técnica de otimização de enxame de partículas para otimizar o *beamforming* quando a CSI não está disponível. O algoritmo proposto atinge desempenho próximo ao ideal, mostrando a viabilidade de usar LIS sem a necessidade de uma cadeia de RF para cada elemento refletor.

3.2.4 Cell-Free Massive MIMO

Uma abordagem promissora para a Rede 6G é a adoção do paradigma denominado *cell-free*, no qual a ausência de limites bem definidos de células reduz os problemas inerentes ao processo de *handover*, reduz as limitações dos usuários na borda da célula, e reduz a interferência inter-celular [122]. O termo *cell-free* para redes sem fio foi definido em [123] e significa que o sistema celular não está dividido em células, ou seja, não existem limites de células em uma perspectiva do usuário durante a transmissão de *uplink* e *downlink*, uma vez que todos os *Access Point* (AP) que afetam um usuário participarão da comunicação. Por exemplo, quando um usuário transmite um sinal de *uplink*, todos os APs que o recebem, com uma SNR acima de um limite, irão colaborar na decodificação do sinal [122, 4].

Um sistema *cell-free*, conforme apresentado na Figura 5, consiste em K APs geograficamente distribuídos, os quais atendem conjuntamente aos usuários que operam na área. Cada AP é conectado através de um enlace de *fronthaul* a uma *Central Process Unit* (CPU), que é responsável pela cooperação dos APs [122]. Uma rede *cell-free* pode ser dividida em uma borda e um núcleo, assim como as redes celulares. Os APs e CPUs estão na borda, as conexões entre eles são chamadas de enlaces de *fronthaul*, e as conexões entre a borda e o núcleo são chamadas de enlaces de *backhaul*. Os enlaces de *fronthaul* podem ser usados para: (i) compartilhamento de sinais da camada física que serão transmitidos no *downlink*; (ii) encaminhamento de sinais de *uplink* que ainda não foram decodificados; e (iii) compartilhamento de informações de estado do canal relacionadas aos canais físicos. O enlace de *fronthaul* também é utilizado para sincronização de fase entre os APs geograficamente distribuídos [122]. A diferença entre redes celulares e redes *cell-free* é dada em termos de infraestrutura e do processamento de sinal, o




Figura 5: Rede Cell-Free.

que é transparente para os UEs, ou seja, deve ser possível para o mesmo usuário conectar-se em ambos os tipos de redes sem realizar mudanças em seu software ou hardware [122].

Uma rede *Cell-Free Massive MIMO* (CF-mMIMO) consiste em um grande número de APs que, em conjunto e de forma coerente, servem a um número muito menor de UEs no mesmo recurso de frequência e tempo. A rede opera no modo TDD e explora a reciprocidade dos canais de *downlink* e *uplink*, de modo que a CSI entre cada AP e todos os UEs possa ser adquirida pelo AP. O conhecimento de CSI no AP possibilita a transmissão e recepção coerente, portanto, apenas os sinais de dados devem ser compartilhados entre os APs. Para permitir tais fluxos de informação, presume-se que os APs estejam conectados às CPUs através de enlaces de *fronthaul*. É importante observar que, em um sistema *cell-free*, uma CPU pode não ser uma unidade física separada, mas pode ser vista como uma entidade lógica. Por exemplo, as CPUs podem representar um conjunto de processadores locais que podem estar em um subconjunto dos APs ou em outros pontos físicos, e que são conectados por meio de enlaces de *fronthaul*. Alinhado com a contínua *cloudification* das redes sem fio [124], conhecida como *Cloud-Radio Area Network* (C-RAN), as tarefas de processamento relacionadas à CPU podem ser distribuídas entre os processadores locais de diferentes maneiras [125]. Assim, pode-se concluir que C-RAN representa um dos principais habilitadores das redes CF-mMIMO [126].

A eficiência espectral que os UEs podem alcançar em uma rede CF-mMIMO foi analisada em [127, 128, 129]. Em [127] considerou-se APs e UEs equipados com apenas uma antena, canais Rayleigh e enlaces de *fronthaul* livres de erros e capacidade infinita. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que CF-mMIMO pode alcançar uma melhoria de aproximadamente cinco vezes em termos de eficiência espectral por usuário quando comparado a uma rede celular com o mesmo conjunto de APs, mas onde cada UE é servido por apenas um AP. Em [128] os autores consideraram APs e UEs equipados com múltiplas antenas e concluiu-se que se APs e UEs estiverem equipados com várias antenas, o desempenho por usuário pode ser melhorado



em até 95%. Além disso, em [129] os autores mostraram que o CF-mMIMO pode melhorar a eficiência espectral por usuário em até 95% quando comparado a uma arquitetura *Massive MIMO* (mMIMO) celular convencional a qual consiste em um número relativamente pequeno de APs, cada um equipado com um grande número de antenas. Ademais, verificou-se que o mMIMO celular convencional é a escolha preferida para UEs no centro da célula. Isso demonstra que o paradigma *cell-free* não representa um desempenho de pico mais alto, mas um desempenho uniforme dentro da área de cobertura. Além disso, os seguintes ganhos de desempenho podem ser obtidos considerando o paradigma *cell-free*: (i) ganho de diversidade devido ao fato de a arquitetura CF-mMIMO apresentar múltiplas antenas distribuídas geograficamente; (ii) condições de propagação mais favoráveis devido à redução da distância média entre um UE e os APs mais próximos; (iii) maior eficiência energética do CF-mMIMO quando comparada ao mMIMO celular convencional [129]. Portanto, através dos resultados apresentados, pode-se concluir que o paradigma *cell-free* apresenta-se como uma arquitetura promissora para a Rede 6G devido à sua alta eficiência espectral e energética.

A partir dos ganhos obtidos pelo CF-mMIMO apresentados anteriormente, as principais vantagens do paradigma CF-mMIMO são: (i) no CF-mMIMO, os APs e as CPUs operam como uma única célula mMIMO. Consequentemente, o paradigma CF-mMIMO herda todas as características dos sistemas mMIMO [122]; (ii) como resultado da topologia distribuída e da ultra-densificação da rede, o CF-mMIMO pode oferecer níveis sem precedentes de ganho de macro-diversidade, resultando em um enlace de comunicação mais confiável, pois cada usuário é servido por muitos APs reduzindo a probabilidade de bloqueio. Além disso, devido ao fato de os APs estarem mais próximos aos usuários, a perda de percurso e os efeitos de sombreamento são reduzidos, o que resulta em um maior ganho de canal [130]; (iii) o paradigma CF-mMIMO faz uso de uma arquitetura centrada no usuário, a qual é crucial para mitigar a interferência *intercluster* e para preservar a escalabilidade do sistema [122]; e (iv) como resultado da diversidademacro e da abordagem centrada no usuário, o CF-mMIMO garante, por natureza, um QoS uniformemente excelente para todos os usuários [130].

Apesar das vantagens apresentadas, o paradigma CF-mMIMO apresenta algumas desvantagens/desafios: (i) um sistema CF-mMIMO requer sincronização e coordenação precisas entre os APs, o que pode representar um grande esforço computacional e, por sua vez, pode exigir sobrecarga de sinalização e trocas significativas de CSI instantânea/estatística [122]; e (ii) um sistema CF-mMIMO é modelado como uma única célula mMIMO infinitamente ampla. Logo, esta noção de que o mundo inteiro constitui uma rede é impraticável e não escalável. Uma implementação prática e escalonável deve levar em consideração que a CPU e o *fronthaul* constituem o gargalo da arquitetura. Portanto: (i) as tarefas de compartilhamento de dados e alocação de recursos devem ser realizadas dentro de alguns grupos de APs, a fim de limitar a complexidade computacional na CPU e a sobrecarga de sinalização; (ii) esquemas de pré-codificação e combinação totalmente centralizados devem ser evitados, a fim de superar a necessidade de CSI instantânea na CPU; (iii) a sincronização no nível de símbolo é crucial para permitir a transmissão coerente conjunta, e a clusterização é necessária para minimizar o atraso e os erros de sincronização; (iv) técnicas de quantização de sinal devem ser desenvolvidas para lidar com a capacidade limitada de *fronthaul* e *backhaul* [122].

3.2.5 Conclusão

Essa seção abordou algumas tecnologias para a Rede 6G que podem prover maior velocidade de transmissão de dados, menor latência e maior eficiência energética. De um lado, o



uso de grandes arranjos de antenas tem sido uma das características definidoras da Rede 5G. Prevê-se que essa tecnologia continuará em uso na Rede 6G, mas com aumento no número de elementos dos arranjos em uma ordem de magnitude, dando origem ao MIMO ultra-massivo. Outra tendência que se tem visto recentemente é o uso de MIMO massivo na faixa de THz para mitigar problemas causados por vários tipos de atenuação. O uso de tal tecnologia possibilitará o suporte a aplicações para redução da emissão de carbono, comunicação espacial, conectividade pervasiva, Indústria 5.0 e telepresença imersiva, que são alguns dos casos de uso esperados para a Rede 6G. No entanto, ao operar em faixas de frequências elevadas, o alcance torna-se extremamente reduzido. É aí que a LIS se mostra como uma tecnologia complementar. Ao focar energia no espaço tridimensional e refletir o sinal incidente, o uso de superfícies inteligentes possibilitará a supressão de interferência e o aumento na cobertura de serviço. Por outro lado, o paradigma CF-mMIMO apresenta-se como uma tecnologia habilitadora, já que foi projetado para alcançar desempenho quase uniforme e transferência perfeita entre os UEs, independentemente de sua posição. Além disso, a implantação de CF-mMIMO também pode fornecer suporte para a implementação de aplicativos de missão crítica de latência ultra-baixa.

A Tabela 2 apresenta as principais referências bibliográficas discutidas nessa seção, com um sumário dos principais pontos tratados em cada referência.



Ref	Principais contribuições
[32]	Considerando ruído de fase e consumo de energia, propõe algoritmos inteligentes para camada física e o processamento em banda base dedicado e paralelo para
	sistemas MIMO massivos.
[51, 52, 53,	Avaliam o comportamento do canal em sistemas MIMO massivos a partir de mo-
131]	delos empíricos, realistas e sofisticados.
[56, 59, 60,	Abordam técnicas de calibração de reciprocidade e descontaminação piloto essen-
61]	ciais para o funcionamento do protocolo TDD em sistemas MIMO massivos.
[94]	Propõe o primeiro modelo estatístico para canais em THz, incluindo absorção e
	atenuação atmosférica, além da perda de caminho no espaço livre.
[109]	O projeto da Universidade de Luxemburgo investiga substituir <i>relays</i> por LIS em
	redes móveis com múltiplos saltos. Os cenários práticos abrangem desde fachadas
	de prédios até veículos aéreos não-tripulados revestidos por LIS.
[115]	A partir das técnicas de relaxação semi-definida e aproximação convexa sucessiva,
	eles mostram que a potência de transmissão ótima em sistemas com LIS é significa-
	tivamente inferior do que a requerida em sistemas de comunicação convencionais.
[120]	Compara duas possíveis arquiteturas de hardware em sistemas auxiliados por LIS.
	Na primeira, alguns sensores de canal ativo são distribuídos aleatoriamente na
	superfície. Já a segunda aplica aprendizagem profunda, requer um número menor
	de elementos ativos, mas lida com grande quantidade de dados.
[127]	Analisa o desempenho de um sistema CF-mMIMO com múltiplos APs e UEs.
	Deriva os limites inferiores da capacidade de <i>downlink</i> e <i>uplink</i> em sistemas
	CF-mMIMO considerando: (<i>i</i>) efeitos da estimativa do canal; (<i>ii</i>) não ortogo-
	nalidade das sequências piloto; e (<i>iii</i>) controle de potência.
[128]	Investiga a implantação de múltiplas antenas em APs e UEs no CF-mMIMO.
	Deriva a eficiência espectral de <i>downlink</i> e mostra que a implantação de múltiplas
[i a a]	antenas acarreta em um aumento significativo do throughput por usuário.
[129]	Apresenta quatro implementações de sistemas CF-mMIMO, que são caracterizadas
	por graus de cooperação entre os APs. Fornece uma estrutura analítica comum
	para avaliar e entender como o CF-mMIMO deve ser operado e projetado para
	obter um desempenho muito maior do que sistemas mMIMO e <i>small-cell</i> .

Tabela 2: Principais referências apresentadas acerca das tecnologias MIMO.



3.3 Múltiplo Acesso

Gustavo Rodrigues de Lima Tejerina, Juliano Silveira Ferreira, Victoria Souto gustavo.rodrigues@inatel.br, silveira@inatel.br, victoria.souto@posgrad.ufsc.br

Como mencionado anteriormente, a Rede 6G deverá suportar diversas aplicações e usuários simultâneos, garantindo, entre os vários requisitos estabelecidos, baixa latência e alta vazão de dados. Diante destes novos cenários, as técnicas de múltiplo acesso ao canal tornam-se ferramentas de coordenação essenciais. Dentre as diversas técnicas desenvolvidas, dois esquemas se destacam como candidatos adequados para implementação na Rede 6G: NOMA e RSMA.

NOMA é um esquema de múltiplo acesso em que os recursos de tempo e frequência são compartilhados de forma não ortogonal, garantindo alta eficiência espectral. Devido ao seu desempenho, a técnica foi padronizada para a rede 4G ou *Long Term Evolution Advanced* (LTE-A) (3GPP versão 13), sob a denominação *Multi-user Superposition Transmission* (MUST) [132]. Para as redes LTE-A Pro (3GPP versão 14), o esquema NOMA foi cogitado para atuar apenas no *uplink* em sistemas mMTC [133]. Já na Rede 5G, o método foi considerado nas fases de implementação 1 e 2. No entanto, estudos indicaram que: (i) o NOMA não obteve um desempenho consideravelmente melhor em comparação ao demais esquemas; e (ii) não houve ganho significativo sobre os mecanismos *Orthogonal Multiple Access* (OMA) em todos os cenários analisados [134]. Além disso, foi observada uma considerável degradação de desempenho para os casos com estimativa de canal não ideal nos cenários URLLC, eMBB e mMTC avaliados para diferentes abordagens NOMA. Esses foram os principais fatores pelos quais o 3GPP não padronizou a técnica NOMA na Rede 5G, deixando-a como possível item de estudo para a Rede 6G diante dos novos casos de uso em redes ultra-densas [134].

RSMA, por sua vez, é uma técnica apresentada recentemente para a comunicação downlink em sistemas Multiple-Input Single-Output (MISO) [135]. O esquema é baseado na união entre decodificação completa da interferência e tratamento da interferência como ruído. Esse procedimento é realizado por meio da divisão das mensagens enviadas em partes comuns e privadas. A junção desses dois paradigmas resultou em um sistema mais generalizado que abriga, como casos particulares, as técnicas NOMA e Space Division Multiple Access (SDMA). Os estudos indicam que o RSMA é um esquema promissor capaz de atingir um desempenho melhor que os métodos supramencionados, principalmente, em cenários cuja informação do estado do canal é imperfeita.

O desempenho tanto do NOMA quanto do RSMA vem sendo amplamente investigado, assim como as respectivas técnicas integradas em diversas tecnologias e arquiteturas, visando sua elegibilidade para a Rede 6G. Assim, considerando a importância de ambas no cenário tecnológico, serão apresentados nesta seção os fundamentos e as aplicações de algumas das principais técnicas NOMA e RSMA.

3.3.1 PD-NOMA

No *Power Domain NOMA* (PD-NOMA), os sinais de diferentes usuários são enviados ao mesmo tempo e na mesma frequência, mas com diferentes potências alocadas para cada usuário. No lado do receptor, SIC é aplicado para decodificar os sinais um por um até que o sinal do usuário desejado seja obtido, proporcionando uma relação de compromisso entre a taxa do sistema e a justiça entre os usuários [136, 137]. O princípio de funcionamento do PD-NOMA é ilustrado na Figura 6 para o *downlink* e *uplink*.





Figura 6: Transmissão PD-NOMA: (a) Transmissão PD-NOMA *downlink*; (b) Transmissão PD-NOMA *uplink*.

No downlink (Figura 6a), a ERB transmite para todos usuários simultaneamente através da superposição dos sinais dos múltiplos usuários com diferentes potências. É importante ressaltar que, no downlink, a potência alocada para um usuário é dependente da potência alocada aos demais usuários, pois a transmissão de downlink é sujeita a uma restrição de potência total. Além disso, o downlink NOMA utiliza um mecanismo de alocação de potência que procura compensar más condições de canal [136]. Para finalizar, no receptor, o SIC é executado sucessivamente até que os sinais sejam recuperados. A ordem ideal da detecção SIC depende da detecção do sinal mais forte (sob algum critério) para o sinal mais fraco. Mais especificamente, no downlink, o usuário mais forte considera os sinais dos demais usuários como ruído e recupera seu sinal imediatamente, sem a necessidade de realizar o SIC. No entanto, os demais usuários executam o SIC, onde primeiro detectam os sinais que são mais fortes do que o seu e, em seguida, esses sinais são reconstruídos e subtraídos do sinal recebido [137].

Na transmissão PD-NOMA *uplink* (Figura 6b), múltiplos usuários transmitem seus sinais ao mesmo tempo e na mesma frequência. A ERB detecta os sinais dos usuários através do auxílio do SIC [137]. Por exemplo, primeiro a ERB decodifica o sinal do usuário mais forte sob o efeito da interferência dos outros usuários. Em seguida, o sinal do usuário mais forte é reconstruído e subtraído do sinal recebido. Assumindo condições perfeitas, o sinal do usuário mais fraco será corrompido apenas pelo ruído, visto que os sinais dos outros usuários foram sucessivamente decodificados e cancelados. Ou seja, a transmissão do usuário mais forte irá experimentar interferência de todos os demais usuários, enquanto o usuário mais fraco não sofrerá com qualquer interferência dos demais usuários [137, 136, 138].

Recentemente, diversos trabalhos vêm estudando a integração de PD-NOMA com as principais tecnologias habilitadoras da Rede 6G, tais como, LIS [139], VLC [140], Comunicações Cooperativas [141] e Comunicações em THz [142]. A integração de PD-NOMA com LIS foi



estudada em [139]. Os resultados obtidos mostram que que tal integração oferece ganhos de eficiência espectral devido à possibilidade de otimizar a formação dos *clusters* de usuários a partir do uso de *beamforming*, tanto na ERB/UE quanto na LIS. A integração de PD-NOMA com VLC foi considerada em [140], onde foi possível observar que o PD-NOMA se beneficia da alta SNR oferecida pela VLC e é capaz de fornecer uma alta eficiência espectral. Ademais, a integração de PD-NOMA com comunicações cooperativas foi abordada em [141] e verificou-se que a partir da implantação do PD-NOMA é possível otimizar a eficiência espectral da rede sem a necessidade de largura de banda adicional. Para finalizar, recentemente a integração de PD-NOMA com comunicações em THz começou a ser estudada [142] e verificou-se que, a partir da otimização conjunta do feixe, da largura de banda e da alocação de potência, um sistema THz-NOMA permite atender aos requisitos de conectividade massiva e taxas de dados extremamente altas esperadas na Rede 6G.

Além da integração de PD-NOMA com diversas tecnologias emergentes, o uso do PD-NOMA tem sido considerado em diferentes cenários potenciais da Rede 6G, tais como, Comunicações por Unmanned Aerial Vehicle (UAV) [143], Redes Autônomas e Sistemas E-Health [144]. Mais especificamente, a integração de NOMA com UAV foi considerada em [143] e verificou-se que o uso de PD-NOMA permite que a altitude e o posicionamento dos UAVs sejam otimizados em conjunto com os coeficientes de alocação de potência e agrupamento de usuários para maximizar a taxa de soma, melhorando, assim, o desempenho do sistema. Recentemente, a aplicação de PD-NOMA em Redes Autônomas e Sistemas E-Health começou a ser abordada em [144]. Tais sistemas possuem restrições rígidas de confiabilidade, latência e conectividade. Portanto, tendo em vista as características do PD-NOMA, sua aplicação em tais cenários mostra-se útil para garantir uma maior eficiência espectral, confiabilidade e conectividade massiva para tais sistemas.

PD-NOMA é considerada uma tecnologia promissora para a Rede 6G para atender as demandas de baixa latência, alta confiabilidade, conectividade massiva, justiça aprimorada e alta eficiência [138, 137]. Diferentemente das técnicas convencionais OMA, PD-NOMA explora o domínio de potência para atender vários usuários no mesmo bloco de recursos. PD-NOMA apresenta inúmeras vantagens quando comparado às técnicas OMA. Dentre as principais podese citar: (i) PD-NOMA permite o compartilhamento de blocos de recursos de maneira não ortogonal com múltiplos usuários, atingindo maior eficiência espectral quando comparado a técnicas OMA [145, 146]; (ii) uma das características fundamentais do PD-NOMA é que esta técnica aloca mais potência para usuários com baixos ganhos de canal, garantindo que usuários com altos e baixos ganhos de canal sejam atendidos. Com essa característica, obtém-se uma relação de compromisso entre a taxa total do sistema e a justiça entre os usuários [145, 146]; (iii) a Rede 6G deverá suportar a conexão de bilhões de dispositivos simultaneamente. PD-NOMA apresenta-se como uma das tecnologias promissoras para resolver com eficiência essa tarefa, explorando suas características não ortogonais [147, 148]. Mais especificamente, em contraste com o OMA convencional, que requer o mesmo número de blocos de recursos e de dispositivos, PD-NOMA reduz o número de blocos de recursos necessários para atender o mesmo número de dispositivos [146]; e (iv) o fato de o PD-NOMA explorar o domínio da potência faz com que o mesmo possa ser aplicado sobre diferentes técnicas já existentes. Além disso, PD-NOMA é compatível com os sistemas de comunicação atuais e futuros, uma vez que não requer modificações significativas na arquitetura existente [146, 149].

Embora PD-NOMA apresente-se como uma tecnologia promissora para implantação em redes 6G, ainda existem inúmeros desafios a serem enfrentados, como: (i) a decodificação do sinal utilizando SIC requer uma maior complexidade de implementação quando comparado a esque-



mas OMA clássicos, pois o receptor tem que primeiro decodificar as informações dos demais usuários antes de decodificar suas próprias informações [150]. Além disso, a complexidade de decodificação aumenta com o número de usuários. Uma possível solução para este problema é realizar clusterização dos usuários [136, 137]; (*ii*) PD-NOMA exige a implementação de diversas fontes adicionais de sinalização e *overhead* de processamento em comparação com técnicas OMA tradicionais. Por exemplo, a alocação de potência e a codificação e decodificação no SIC exigem uma sobrecarga de processamento do sinal e consequentemente um custo maior em termos de consumo de energia [136]; (*iii*) uma das principais desvantagens da implementação de SIC no lado do receptor no PD-NOMA é a propagação de erros entre os usuários, resultando em interferência residual [151]. Algumas pesquisas recentes identificaram técnicas para resolver os problemas de propagação de erros [152, 153], porém, essa continua sendo uma questão que requer mais investigação para a implantação de PD-NOMA na Rede 6G [136]; e (iv) PD-NOMA é mais suscetível a erros de estimação de canal, pois estes vão resultar em controle de potência impreciso e propagação de erros no SIC. O uso de técnicas de estimação de canal mais robustas em aplicações de PD-NOMA impõe sobrecarga e complexidade computacional adicionais [137, 154].

3.3.2 SCMA

Uma técnica de múltiplo acesso candidata para a Rede 6G, visando atender a demanda de acesso massivo à rede é o Sparse Code Multiple Access (SCMA). O SCMA é considerado um importante esquema para a implementação de NOMA no domínio do código [155]. O SCMA codifica os bits do usuário em codewords multidimensionais usando codewords esparsas e com baixa correlação, que permitem reduzir a complexidade de detecção de símbolos [156, 157]. Um codebook diferente é associado a cada usuário do sistema SCMA, e este é empregado para mapear os dados do usuário em um vetor de baixa densidade denominado de codeword [156]. Em outras palavras, pode-se dizer que o SCMA codifica os bits diretamente em uma codeword complexa e multi-dimensional, obtida a partir de um codebook pré-definido. O codebook pode ser considerado, desta forma, uma constelação multi-dimensional [158]. Na recepção, o sinal SCMA é processado por algoritmos de detecção de múltiplos usuários, também chamado de Multi-user Detection (MUD). Existem diversas metodologias de MUD propostas na literatura, dentre as quais pode-se destacar o Massage Passing Algorithm (MPA). O detector MPA explora o fato de os codebooks serem esparsos para reduzir a interferência entre usuários e reduzir a complexidade quando comparada a um detector de máxima verossimilhança [155, 159].

É importante destacar que o desenvolvimento de um *codebook* SCMA ótimo não foi ainda alcançado, sendo, portanto, alvo de pesquisas [158]. Recentemente, diversos trabalhos tem sido realizados na área de algoritmos de criação de *codewords* e dos *codebooks*, uma vez que o desempenho de sistemas SCMA são diretamente relacionados aos mesmos. Neste contexto, pode-se destacar que *codebooks* multidimensionais tem sido propostos, baseados, por exemplo, em constelações *Star Quadrature Amplitude Modulation* (Star-QAM) e constelações rotacionadas [159].

Investigações também têm sido realizadas sobre a criação de *codebooks* para enlace de *uplink* em canais correlacionados com desvanecimento conforme [160], onde os autores propõem uma metodologia para otimização conjunta de *codebooks* que leva em consideração uma modelagem baseada em *Quadratically Constrained Quadratic Program* (QCQP).

Em [158] é mencionado que a maioria dos projetos de *codebooks* SCMA é baseada em formatos geométricos, ou *Geometric Shaping* (GS), porém, destaca que *Probabilistic Shaping*



(PS), pode proporcionar melhorias com relação ao aumento da capacidade do canal e redução da taxa de erro de bits. O trabalho em questão propõe um algoritmo para a criação de *codebooks*, aplicáveis em *uplink* em canais com desvanecimento, que combina os dois formatos mencionados. O algoritmo proposto se baseia na maximização da informação mútua média empregando a técnica denominada *Bare Bones Particle Swarm Optimization* (BBPSO) [161]. A partir de simulações, os autores de [158] puderam verificar que os *codebooks* gerados proporcionaram um ganho da ordem de 2,1 dB em termos de *Block Error Rate* (BLER), quando comparado com o desempenho de *codebooks* já conhecidos.

O trabalho [156] propõe um receptor que emprega redes neurais para a detecção e decodificação de *codewords* SCMA. Neste caso, foi considerada a codificação utilizando o método de rotação de fase, tendo sido empregado *Gradient Descent* (GD) na otimização do algoritmo de aprendizagem (*deep learning*) da rede neural proposta, que realiza predições sobre a fase e sobre os novos dados a serem decodificados. A pesquisa em questão definiu alguns parâmetros para a construção dos *codebooks* e *codewords* SCMA considerados em suas simulações (por exemplo, seis usuários, número de recursos igual à quatro, dimensão de código igual à dois). Os autores destacam que os métodos de GD para otimização de algoritmos que atingiram o melhor desempenho foram o *Adaptive moment* (Adam), *Adaptive gradient* (Adagrad) e o *Adaptive learning rate* (Adadelta). É destacado também que o detector/decodificador proposto alcançou 98% de precisão na predição de sinais SCMA para uma data SNR de -11 dB, e de cerca de 100% para valores maiores de SNR [156].

Em [155], é proposto o uso de SCMA como candidato à Rede 6G para dar suporte ao acesso massivo de forma mais rápida, eficiente, e escalável *Distributed Access System* (MDAS). Os autores propõem uma arquitetura com antenas e pontos de acesso distribuídos baseada em diferentes tecnologias, como *Fiber-based Visible Light Communication* (FVLC) (combinação de *links* de acesso via VLC e *front-haul* óptico), *Ultra-Dense Network* (UDN) (pontos de acesso via rádio instalados com grande densidade) e NOMA.

Um esquema de múltiplo acesso *Hybrid NOMA* (HNOMA) que explora o domínio da potência e do código é proposto em [162]. Neste trabalho em questão, propõe-se o emprego de SCMA para codificação dos dados dos usuários associado ao emprego de diferentes níveis de potência para cada um, sendo este nível definido de acordo com as condições de canal. Um receptor do tipo SIC baseado em MPA também é proposto. Os autores analisam, a partir de simulações, o desempenho do sistema híbrido proposto em relação ao emprego do sistema NOMA e SCMA convencional, para o enlace de *downlink*, considerando canal *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) e Rayleigh. Os autores puderem verificar que, mesmo operando em condições de sobrecarga maior, o esquema proposto alcançou desempenho satisfatório em termos de taxa de erro de bits. Com base na análise feita, os autores de [162] afirmam que o esquema híbrido provê maior eficiência espectral quando comparado com técnicas NOMA convencionais.

Em [163] é proposto o uso de HNOMA, baseado no domínio da potência, PD-NOMA, e do código, baseado em SCMA, para o *uplink* de cenários de múltiplo acesso massivo visando atender, por exemplo, aplicações emergentes de IoT que podem integrar dispositivos de baixo consumo de energia. Os autores analisam o impacto de erros de estimação de canal e também do fator de sobrecarga no sistema proposto, e indicam que o uso associado do código Polar deve permitir que o sistema alcance a confiabilidade demandada pelas aplicações de IoT. Os autores sugerem ainda que técnicas de inteligência artificial devem ser exploradas em trabalhos futuros para melhorar o desempenho do sistema HNOMA.

Alguns dos principais desafios para a evolução da técnica SCMA, e consequente adoção pela Rede 6G, incluem [155]: (i) Até o momento não foram desenvolvidos *codebooks* SCMA



ideais e não se sabe ao certo o quão distante estão os *codebooks* desenvolvidos até o momento em relação ao ideal; (ii) A maioria dos trabalhos de pesquisa considera o emprego do SCMA em pequena escala devido a limitações na escalabilidade de *codebooks* desenvolvidos. Desta forma, não foi ainda especificado um sistema SCMA com suporte a conectividade massiva e com altas taxas de dados; (iii) A maioria dos estudos tem como foco aplicações com baixa mobilidade, e a adequada implementação de SCMA para o suporte para aplicações veiculares, que prevê alta mobilidade (> 500 km/h), deve ser amadurecida a partir da realização de novas pesquisas; (iv) A maioria dos estudos considera o sistema SCMA sincronizado, sendo necessário o desenvolvimento de técnicas de detecção SCMA com a presença de erros de sincronização. Isto se deve ao fato de que o processo de sincronização em um cenário com um número massivo de dispositivos ser mais desafiador. No caso do OFDM, por exemplo, o CP pode ser insuficiente para eliminar os erros de sincronização.

3.3.3 MUSA

Multi-User Shared Access (MUSA) é um esquema de múltiplo acesso proposto em [164], cujo objetivo é aumentar a capacidade em termos de número de dispositivos ou usuários conectados na rede. Este esquema fora inicialmente proposto visando atender à demanda de suporte a um crescente número de usuários gerado pelas aplicações emergentes de IoT. O conceito da utilização desta técnica é semelhante às demais técnicas NOMA, onde se busca compartilhar os recursos de transmissão com diversos usuários. Diferentemente da técnica SCMA, o MUSA utiliza a técnica de espalhamento da informação a partir de sequências complexas não-ortogonais. Nesta técnica de múltiplo acesso não ortogonal, conforme proposto em [164], as informações dos usuários são espalhadas utilizando sequências complexas de tamanho reduzido, possibilitando que os usuários consigam compartilhar os mesmos recursos de transmissão. Esta solução é semelhante ao múltiplo acesso utilizado em comunicações móveis, como o Code Division Multiple Access (CDMA), onde os dados do usuário são espalhados empregando sequências diretas, também conhecidas como Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS). Ao contrário do MUSA, o CDMA utiliza sequências quasi-ortogonais, reduzindo a interferência entre um usuário e outro. No MUSA, como as sequências não são ortogonais, há interferência mútua controlável entre os dados dos usuários. Os sinais dos múltiplos usuários MUSA são superpostos e um receptor baseado em SIC deve ser considerado para cancelar a interferência entre os usuários. As sequências de espalhamento MUSA devem ser especificadas prevendo a operação do sistema em condições de grande sobrecarga, e devem também considerar o posterior processamento por receptores SIC. A proposta inicial apresentada em [164] é de que cada usuário selecione de forma autônoma sua sequência de espalhamento, reduzindo a necessidade de sinalizações e de coordenações por parte da estação rádio base, impactando na redução de overhead nas comunicações e também na redução de consumo energético.

A integração de MUSA em sistemas MIMO tem sido alvo de pesquisas recentes. Em [157], por exemplo, é avaliado o desempenho da técnica MUSA integrada com MIMO para aplicações em *uplink*. Os autores consideram um cenário para tal avaliação, através de simulações computacionais, baseado em uma estação transmissora, um repetidor, com uma antena de transmissão e com 26 ou 30 antenas de recepção, e até 16 usuários ativos. As simulações consideraram o emprego de LDPC, mapeamento *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK) associado com OFDM e as análises são realizadas para o canal Rayleigh. Foram realizadas simulações comparativas entre sistema de múltiplo acesso baseado em códigos de espalhamentos clássicos, como Walsh e *Pseudo-random Noise* (PN), com MUSA e *Extended* MUSA (EMUSA) empregando códigos



complexos e algoritmo de alocação de recursos proposto pelos autores. As simulações permitiram verificar que os códigos e algoritmos propostos permitiram superar o desempenho dos códigos clássicos em termos de BER. Os autores também realizaram testes baseados em códigos complexos gerados a partir de sequências PN, e encontraram resultados promissores em termos de BER, sugerindo esta como sendo uma alternativa potencial para a redução do número de antenas no sistema MIMO.

Em [165, 166] é proposto um esquema para combinação de MIMO massivo em ondas milimétricas e NOMA no domínio do código, para situações onde o número de canais de RF é limitado, ou seja, muito menor que o número de usuários ativos. Neste caso tem-se uma combinação do agrupamento de usuários para a formação de *beamforming* com esquemas NOMA, onde este é considerado no processo de separação de usuários que estão próximos uns dos outros e que pertencem a uma mesmo grupo (intragrupo). Os autores propõem também uma arquitetura de receptor MUSA para emprego em enlaces de *uplink single-carrier* que é baseado em SIC e *Parallel Interference Cancellation* (PIC). Em [166] é destacado que, considerando o enlace de *uplink single-carrier* e quando o número de canais de RF é menor que o número de usuários ativos, o receptor MUSA proposto proporciona melhora do desempenho em termos de taxa de erros de bits, e, quando comparado ao receptor SCMA, possui menor complexidade e é mais flexível.

A técnica MUSA tem sido considerada também por aplicações de comunicação Deviceto-Device (D2D) em redes de comunicações móveis, conforme pesquisa apresentada em [167]. Os autores propõe um procedimento de descoberta de dispositivos próximos, Device Discovery (DD), baseada em MUSA. Neste caso, os múltiplos dispositivos que compõem uma rede de comunicação D2D podem transmitir, fazendo uso dos mesmos recursos de transmissão, seu sinal de referência, denominado de discovery signal, que permite sua descoberta por outro dispositivo da rede. O procedimento proposto melhora o processo de descoberta e permite este seja realizado com menor dependência de procedimentos de detecção de colisão severa e de técnicas de evasão, e considera o uso de receptores do tipo Sphere Decoder with Successive Interference Cancellation (SD-SIC) para separar os sinais superpostos. O emprego do procedimento proposto permite reduzir o consumo de energia, bem como reduzir a taxa de erro de descoberta. Os autores puderam observar, a partir de simulações, uma melhora da ordem de 12% com relação à eficiência energética e 98% de precisão em relação a métodos convencionais baseados em OFDMA aplicados em DD.

3.3.4 RSMA

RSMA é uma tecnologia recente de acesso ao meio baseada no conceito de *Rate-Splitting* (RS) e pré-codificação, idealizada a princípio para sistemas com múltiplas antenas e múltiplos usuários [135]. O esquema de RS consiste em dividir na transmissão as mensagens dos usuários em partes comuns e privadas. A parte comum é codificada em um único fluxo de dados, enquanto as partes privadas são codificadas em fluxos de dados separados. Desta forma, os diversos fluxos são processados em conjunto no pré-codificador linear e transmitidos por canais MIMO ou MISO. Aqui, a pré-codificação é realizada independente da qualidade da informação do estado do canal no transmissor. Na recepção, cada dispositivo realiza, primeiramente, a decodificação do fluxo de dados comum, utilizando SIC, para em seguida decodificar os respectivos fluxos de dados privados. Por fim, a mensagem para cada usuário é reconstruída após a junção entre as partes comum e privada. O processamento na recepção é realizado de forma a considerar que parte da interferência é decodificada e parte é tratada como ruído. Essa



funcionalidade é o principal diferencial do RSMA, pois flexibiliza a abordagem de esquemas de múltiplo acesso já existentes, unindo estratégias opostas de tratamento da interferência. Em outras palavras, o RSMA é um esquema universal que engloba como subesquemas as técnicas SDMA e NOMA.

Diante deste contexto, pesquisas foram realizadas para averiguar o desempenho do RSMA, principalmente, em relação às técnicas já existentes. Nestes estudos, observou-se que o RSMA apresenta diversas vantagens e supera em quesitos importantes os métodos SDMA e NOMA [168]. Além da flexibilidade e da universalidade, o RSMA é um esquema robusto por ser menos sensível às imprecisões do canal, oriundas da interferência entre múltiplos usuários [135]. Em termos da eficiência energética e espectral, o esquema RSMA é igualmente ou mais eficiente quando comparado ao SDMA e NOMA [135]. Em [169], por exemplo, o compromisso entre eficiência energética e espectral é estudado em ambientes multicelulares. Neste caso, o RSMA provou ser mais eficiente e garantiu o melhor compromisso quando comparado a sistemas usando NOMA e *Linear Precoding* (LP). Resultados semelhantes também foram observados em [170]. Nos cenários simulados, houve um aumento de 50% da soma da eficiência energética em redes celulares operadas por UAVs com ondas milimétricas. O ganho de desempenho no RSMA é acompanhado de uma redução na complexidade do transmissor e do receptor [135]. Na transmissão, a complexidade do RSMA é reduzida devido à ausência de operações como agrupamento, ordenação e pareamento de usuário como ocorre no NOMA e no SDMA. Já na recepção, o RSMA pode operar com apenas uma camada SIC, enquanto em sistemas NOMA a complexidade aumenta sendo necessárias k-1 camadas SIC, em que k indica o número de usuários.

Como observado, as vantagens do tratamento parcial da interferência são inúmeras para os sistemas de comunicação. Por isso, o RSMA tem se tornado um excelente candidato a ser implementado na Rede 6G. De acordo com [168], os desafios desta futura geração, tais como taxas de dados, baixa latência e mobilidade, podem ser superados com o uso do RSMA. Nesta perspectiva, o RSMA vem sendo amplamente investigado em aplicações inerentes à Rede 6G, entre elas: IoT [171, 172], UAV [170, 173, 174], RIS [175, 176], VLC [177, 178, 179] e C-RAN [180, 181].

3.3.5 Conclusão

NOMA e RSMA são tecnologias com potencial de atender às demandas desafiadoras impostas à Rede 6G. NOMA tem se mostrado um esquema eficaz no partilhamento do espectro, atendendo vários usuários sob o mesmo bloco de recursos. Desta forma, a técnica garante uma maior eficiência espectral e maior justiça entre os usuários. RSMA, por outro lado, trata a interferência de forma híbrida, por meio da divisão das mensagens em parte comum e parte privada. Neste contexto, o esquema permite reduzir a complexidade na transmissão e recepção, além de garantir melhor eficiência espectral em relação ao NOMA e ao SDMA. Ainda, o RSMA tem se mostrado robusto perante incertezas do estado do canal no transmissor. Por fim, o desempenho do NOMA e RSMA tem motivado a implementação de ambas técnicas em aplicações e cenários próprios da Rede 6G.

A Tabela 3 resume os principais trabalhos discutidos nesta seção.



Ref	Principais contribuições
[139]	Apresenta a integração de duas tecnologias habilitadoras da Rede 6G, IRS e PD- NOMA. Analisa e discute diferentes cenários em termos de probabilidade de <i>outage</i>
	e taxa quando comparado a sistemas com <i>relays</i> .
[140]	Apresenta dois esquemas de transmissão híbridos baseados em NOMA e pré- codificação visando gerenciar múltiplos UEs em redes VLC. Mostra que a aborda- gem proposta permite uma redução da interferência via pré-codificação, enquanto
	lida com a interferência entre UEs via sinalização NOMA.
	Considera uma comunicação D2D de retransmissão assistida por sistemas de re- transmissão cooperativos usando NOMA. Propõe uma nova estratégia para otimi- zação do sistema através da alocação de potência.
[142]	Apresenta a união de NOMA e sistemas <i>small-cell</i> em bandas de THz visando oti- mizar a eficiência energética e a alocação de recursos. Compara e discute os pontos fortes do desempenho do THz-NOMA mostrando que o mesmo apresenta uma efi- ciência espectral substancialmente mais alta que sistemas THz convencionais.
[158]	Propõe um algoritmo para a criação de <i>codebooks</i> SCMA baseado na combinação de formatos geométricos e probabilísticos (GS e PS). Os autores verificaram um ganho da ordem de 2.1 db em termos de BLER, quando comparado a <i>codebooks</i> já conhecidos.
[156]	Propõe um receptor que emprega redes neurais para a detecção e decodificação de <i>codewords</i> SCMA. Os autores destacam que o detector/decodificador proposto alcançou 98% de precisão na predição de sinais SCMA para uma SNR de -11 dB.
[162, 163]	Propõe um esquema de múltiplo acesso NOMA híbrido, ou HNOMA, que explora o domínio da potência e do código, baseado em SCMA [162]. Em [163], os autores propõem o uso de HNOMA para o <i>uplink</i> de cenários de múltiplo acesso massivo.
[167]	Propõe um procedimento de descoberta de dispositivos próximos em redes D2D baseado em MUSA. A partir de resultados de simulação do procedimento proposto, pode-se observar uma melhora da ordem de 12% com relação à eficiência energética e 98% de precisão em relação a métodos convencionais.
[135]	Introduz formalmente o esquema RSMA generalizado e os esquemas otimizados RS 1 camada e 2 camadas hierárquicas. As simulações para diversos cenários de rede indicaram que os esquemas propostos proveem uma melhora na taxa e no QoS em relação às técnicas NOMA e SDMA. O aumento do desempenho é acompanhado de redução na complexidade no transmissor e receptor, considerando o esquema RS 1 camada.

Tabela 3: Principais referências relacionadas às técnicas de múltiplo acesso.



3.4 Codificação de Canal

Juliano Silveira Ferreira silveira@inatel.br

A Rede 6G considera o suporte a diferentes aplicações e áreas emergentes que demandam, dentre outros requisitos, o estabelecimento de comunicação de forma robusta mesmo em condições de recepção adversa, bem como a comunicação com alta vazão de dados e baixa latência. A etapa de codificação de canal, ou *Forward Error Correction* (FEC), tem suma importância na composição da PHY deste sistema ao permitir a identificação e correção de erros, aumento da eficiência e da capacidade do enlace de comunicação, assim como a cobertura da rede, gerando impacto na experiência do usuário.

A Rede 5G emprega em sua etapa de codificação de canal os códigos LDPC e Polar [22], que apresentam desempenho próximo ao limite teórico de *Shannon*, ao considerar um canal AWGN [182]. Embora esse alto desempenho tenha sido alcançado, há diversos trabalhos de pesquisa em andamento relacionados a diferentes casos, como aplicações sensíveis ao atraso e que utilizam comprimentos curtos de códigos, aplicações relacionadas a carros e robôs autônomos (*Connected robotics and autonomous systems* (CRAS)), consideradas como direcionadoras para a Rede 6G. Também verificam-se diversas aplicações industriais, de IoT ou MTC, dentre outras. Além disso, têm sido realizadas pesquisas visando alcançar melhorias de algoritmos e técnicas de implementação de FEC, com o objetivo de aumentar a capacidade de processamento e a vazão de dados. Esse aumento de capacidade é demandado por aplicações potenciais da Rede 6G, como aquelas oriundas da evolução das aplicações de eMBB, além de aplicações que demandam transferência de mapas em alta definição, para sensoriamento e mapeamento de ambientes, comunicações holográficas e outras.

No âmbito de pesquisas recentes relacionadas à FEC, destaca-se a atuação do projeto *Enabling Practical Wireless Tb/s Communications with Next Generation Channel Coding* (EPIC), fomentado pela comissão Europeia no âmbito do H2020 e finalizado no segundo semestre de 2020. O projeto EPIC teve por objetivo desenvolver e implementar FEC visando sua operação em semicondutores, para comunicação sem fio e sistemas B5G com taxa na ordem de Tbps [183]. O projeto EPIC contemplou pesquisas relacionadas a implementação de FEC, considerando principalmente códigos Polares, Turbo e LDPC.

As subseções seguintes apresentam detalhes sobre as pesquisas do projeto EPIC, bem como pesquisas complementares e recentes na área de FEC que visam o suporte à Rede 6G.

3.4.1 Código LDPC para Acesso Aleatório não Ortogonal

A concepção da rede 6G deve levar em consideração o suporte a um número massivo de conexões para atender de maneira adequada as demandas de aplicações e dispositivos associados a IoT e MTC, bem como aplicações emergentes na área de CRAS, dentre outras. As técnicas de múltiplo acesso viabilizam o aumento de número de usuários suportados pela rede. Desde a Segunda Geração (2G) de Redes Celulares, os esquemas primários de múltiplo acesso são ortogonais e, desta forma, diferentes usuários ocupam recursos do tempo/frequência também diferentes ou não sobrepostos no domínio espacial. As técnicas de múltiplo acesso não ortogonais, entretanto, podem ser consideradas para complementar as técnicas ortogonais, visando aumentar a capacidade do sistema. A codificação de canal orientada à múltiplos usuários pode ser considerada uma área com grande potencial de desenvolvimento e que pode proporcionar



melhorias significativas à técnica de múltiplo acesso convencional que emprega entrelaçadores (*interleaving*) para separação de usuários em sistemas codificados, que é denominada de *Interleaved-Division Multiple Access* (IDMA)[22].

A classe de códigos LDPC denominada *Rate-Compatible Raptor-Like Quasi-Cyclic LDPC* (RL-QC-LDPC) foi recomendada pelo 5G-NR para a codificação de dados de canal do cenário eMBB. A estrutura *quasi-cyclic* do LDPC favorece aplicações de alta vazão e permite o suporte a comprimentos de código escalonável. A estrutura denominada de *raptor-like*, por sua vez, permite melhorar o desempenho em baixas taxas de codificação.

O trabalho apresentado em [184] explora características novas da estrutura do código RL-QC-LDPC considerado pela Rede 5G, para obter códigos que possam ser utilizados para melhorar a técnica de acesso aleatório IDMA, flexibilizando o suporte à diversas eficiências espectrais e provendo robustez contra a variação do número de usuários. O trabalho emprega o método "extensão linha por linha" para construir matrizes base que suportem uma ampla variação de taxas de código e de comprimentos de blocos de paridade. Visando melhorar a carga de usuários suportados, bem como a vazão do sistema. O trabalho propõe algoritmos de classificação de borda ou *Edge-Classification-based Extension* (ECE). Os algoritmos propostos permitem reduzir o espaço de busca de matrizes base para cada passo da extensão. Os códigos obtidos pelo trabalho em questão melhoraram significativamente a capacidade de carga de usuários e a vazão do sistema de acesso aleatório baseado em NOMA [184].

3.4.2 Códigos LDPC não Binários

O uso de códigos binários foi predominante em gerações anteriores da rede móvel. Por outro lado, considerando o cenário atual, estudos indicam que códigos não binários são uma alternativa importante para aumentar a robustez da codificação de canal em ambientes com desvanecimento e com alta SNR [22]. Desta forma, os códigos não binários estão em uma posição de destaque dentre as novas técnicas a serem incorporadas em sistemas de comunicação B5G.

O trabalho apresentado em [185], por exemplo, avalia um esquema de codificação não binário e adaptativo para aplicações B5G, e propõe o emprego de uma classe de códigos denominada de *Rate-Compatible, Non-Binary LDPC* (RC-NB-LDPC). A construção do código proposto utiliza como base técnicas de mascaramento e puncionamento. As técnicas de mascaramento são utilizadas para converter a matriz de verificação de um código *Non-Binary LDPC* (NB-LDPC) em um código NB-LDPC irregular. As técnicas de puncionamento, por sua vez, permitem completar a construção do código RC-NB-LDPC. O trabalho em questão propõe ainda um esquema de alocação de taxa baseada em um algoritmo de agrupamento em partição, denominado de *K-Means++*, que considera diversas características e fatores do canal de comunicação. Este método depende de uma modelagem precisa do canal que pode ser construído de maneira iterativa. A definição da taxa de codificação e a modulação empregada são então definidas de acordo com a taxa de erro do sistema e as condições do canal.

A maioria dos métodos de construção de códigos LDPC podem ser agrupados em duas categorias gerais: baseados em construções algébricas e baseados em gráficos teóricos. O trabalho [185] considera uma combinação destes dois métodos para construir um código *Rate-Compatible LDPC* (RC-LDPC). Lembrando que um código RC-LDPC é um código LDPC que suporta com bom desempenho diferentes taxas de código, fazendo uso de um mesmo conjunto de *codecs*. A combinação dos métodos de construção do código mencionadas emprega como base ferramentas matemáticas relacionadas a geometrias finitas, campos finitos e construção combinatorial,



bem como a técnica de construção gráfica *Progressive Edge-Growth* (PEG), que é empregada para construir uma matriz base a ser utilizada em pesquisas por etapas complementares. A construção do código RC-NB-LDPC, conforme comentado, contempla também a operação de mascaramento que aumenta o desempenho do código e permite obter variações da taxa de codificação graças à redução da densidade de elementos não zeros na matriz de verificação do código. A operação de puncionamento, por sua vez, permite alterar o grau de distribuição da matriz de mascaramento e obter um código LDPC com taxa adaptativa. Por fim, as vantagens da codificação adaptativa no processo de codificação de imagens comprimidas foram avaliadas e concluiu-se que o código RC-NB-LDPC desenvolvido apresenta bom desempenho em termos de BER para diferentes taxas de codificação e permite obter uma qualidade de imagem superior quando comparada com a codificação fixa, considerando *Unequal Error Protection* (UEP).

3.4.3 Códigos LDPC para Aplicações MIMO de Larga Escala

Algumas pesquisas na área de codificação de canal têm avaliado o emprego de códigos protograph LDPC associados a sistemas MIMO. A junção destes dois temas reflete diretamente na superação de alguns desafios associados ao alto número de antenas, à baixa latência do sistema e à ausência de uma ferramenta iterativa de avaliação e otimização do desempenho dos códigos empregados em canais Large-Scale Multiple-Input Multiple-Output (LS-MIMO) [186]. Vale destacar que os códigos LDPC empregados na maioria das aplicações práticas são códigos baseados em estruturas denominadas de Quasi-Cyclic (QC), cujas matrizes de verificação de paridade são construídas utilizando estruturas circulantes, sendo amplamente adotados devido a sua complexidade linear de codificação e decodificação. Um tipo de código Quasi-Cyclic Low Dense Parity Check (QC-LDPC) são os códigos protograph LDPC, cuja matriz de paridade é construída a partir de um pequeno grafo, denominado de protógrafo ou protograph [187]. Em [187], os autores demonstraram que os códigos protograph LDPC apresentam uma poderosa capacidade de correção de erros e uma reduzida complexidade de decodificação, quando não há limite de iterações no processamento. O desempenho deste código submetido à restrições no número de iterações tem se tornado objeto de estudo no desenvolvimento de códigos protograph LDPC menos complexos, como visto em [188] e [189].

Neste contexto, os autores em [186] propuseram um *framework* capaz de projetar novos códigos protográficos LDPC para sistemas LS-MIMO. Esta estrutura tem como alvo aplicações emergentes de baixa latência em sistemas B5G, e estas devem servir de referência para a concepção da Rede 6G. O framework utilizará em conjunto o fator de detecção baseado em grafos e o algoritmo Protograph Extrinsic Information Transfer Chart (PEXIT). Em outras palavras, os processos de detecção e decodificação serão realizados por meio de grafos de Tanner [190, 191], sendo este necessário para obter o novo algoritmo PEXIT apropriado para sistemas LS-MIMO. O código proposto pelo framework leva em consideração três fatores: (i) as características do canal de propagação LS-MIMO; (ii) a estrutura da matriz do código protograph (protomatrix); e (iii) o número máximo de iterações necessárias para otimizar os códigos obtidos em regime de baixa iteração. Entre as principais contribuições do trabalho citado destaca-se o desenvolvimento de um novo algoritmo de PEXIT que, por sua vez, facilita a criação de novos códigos LDPC do tipo *protograph* para atender a um determinado número de iterações de decodificação em sistemas que empregam LS-MIMO. O trabalho apresenta também alguns exemplos de códigos construídos, otimizados para um sistema MIMO 10 x 10, que permitem superar o desempenho de códigos de última geração, como o código LDPC empregado pelo 5G-NR, na ordem de 0, 2 a 0, 4 dB para uma Frame Error Rate (FER) de 10^{-4} .



3.4.4 Implementação de Códigos Polares

A Rede 6G deve prover suporte à crescente demanda por taxa de dados, alavancada por aplicações emergentes, conforme mencionado no Capítulo 2. O suporte a maiores taxas de dados pela rede demanda, dentre outros quesitos, a implementação de códigos corretores de erros de alta vazão. O projeto EPIC contemplou dentre suas pesquisas questões relacionadas à implementação de códigos com suporte a taxas da ordem de Tbps, dentre as quais pode-se destacar aquelas relacionadas aos códigos Polares [183].

A implementação do código Polar com taxas da ordem de Tbps envolve diversos desafios, sendo que parte destes se refere a quesitos genéricos de implementação de códigos e a limitações do *hardware*. Outra parte dos desafios se refere a aspectos inerentes aos códigos Polares, como processos de decodificação [192]. A implementação de códigos para altas taxas de dados em *Very Large-Scale Integration* (VLSI) demanda uma arquitetura amplamente paralela e que considera processamentos de modo paralelo ou em *pipeline*. Estas características afetam criticamente questões de implementação, como área do chip e consumo energético, tornando-as tão essenciais quanto o ganho de codificação. Por fim, as restrições associadas às interfaces de entrada e saída do chip, bem como acessos excessivos a memórias, são também parte dos problemas de ordem genérica a serem observados para a implementação de códigos com suporte a Tbps.

Neste contexto, observando as restrições de implementação mencionadas e visando reduzir a latência do decodificador Polar, os autores em [192] propuseram um algoritmo híbrido de decodificação do tipo estendido (unrolled) que combina decodificação Successive Cancellation (SC) com Majority Logic (MJL) e que permite obter uma latência de decodificação inferior ao método SC. A decodificação MJL é paralela por natureza, enquanto que a decodificação SC apresenta natureza serial, requerendo maior latência de processamento, apesar do maior ganho de codificação. Assim, a proposta de algoritmo híbrido visa combinar as melhores características de ambos. O algoritmo também considera um esquema de quantização de tamanho variável, que visa minimizar o número médio de bits dentro do decodificador para cada valor de Log-Likelihood Ratio (LLR) para um dado desempenho, proporcionando uma redução dos requisitos de memória na implementação do algoritmo. O algoritmo híbrido foi avaliado para um código Polar (1024, 854) em um canal AWGN e modulação Binary Phase-Shift Keying (BPSK). Nas simulações de FER consideradas, foi observada uma perda de desempenho de até 0,3 dB do decodificador proposto em relação ao decodificador SC. Em relação à implementação do circuito Application-Specific Integrated Circuit (ASIC), as estimativas realizadas considerando os resultados de pós síntese de hardware indicam uma redução de cerca de 1,5 vezes do consumo de energia, graças ao emprego do algoritmo hibrido proposto, em relação ao decodificador SC. A redução de energia alcançada foi de 1,4 a 2,3 vezes do consumo de energia em relação ao decodificador SC quando considerado o emprego da quantização adaptativa proposta e do balanceamento de registros, respectivamente. O decodificador proposto apresentou vazão de 427 Gbps quando considerada uma tecnologia de 45 nm. Escalonando este resultado para uma tecnologia de 7 nm, a taxa alcançada é na ordem de Tbps.

Em [193] é proposto um framework capaz de gerar arquiteturas otimizadas e sintetizáveis de decodificadores Polar. O framework foi desenvolvido em linguagem C++ e tem como parâmetros de entrada o algoritmo de decodificação e a taxa de vazão desejada. Após a compilação dos dados, o framework retorna uma arquitetura de decodificador sintetizável em linguagem de descrição de hardware VHSIC Hardware Description Language (VHDL), capaz de atender os parâmetros de entrada configurados. O framework tem como estrutura base a Polar Factor Tree (PFT), sendo esta otimizada e simplificada durante a computação dos dados. O famework



conta também com modelos de simulação que permitem avaliar o desempenho do decodificador em questão. A Figura 7 mostra um diagrama simplificado do framework acima descrito.



Figura 7: Diagrama simplificado do *framework* de decodificadores Polar (baseado em [194]).

O trabalho apresentado em [193] mostra algumas comparações entre códigos gerados pelo referido framework. São comparadas implementações baseadas em SC e Successive Cancellation List (SCL), este último com e sem Cyclical Redundant Check Code (CRC) concatenado, considerando canal AWGN e implementação em tecnologia Fully Depleted Silicon on Insulator (FD-SOI) de 28 nm. Em relação à vazão e ao impacto do uso de listas, os decodificadores SC e SCL sem e com CRC alcançaram, respectivamente, uma taxa de 517, 516 e 506 Gbps, considerando que o tamanho do bloco de código é 1024, a taxa de código é 1/2 e o número de listas é 2. Nestas mesmas condições, o desempenho de correção de erros também foi afetada. O decodificador SCL sem CRC obteve um ganho de aproximadamente 0,3 dB em relação ao decodificador SC para uma FER de 10⁻⁵ e SNR de 4 dB. Já para o decodificador SCL com CRC, o ganho registrado é de aproximadamente 0,7 dB em relação ao SC. Como esperado, o impacto desses ganhos repercute diretamente na área de processamento e no consumo energético do componente. No caso do decodificador SCL sem CRC, houve um aumento de 3,7 vezes na área e 2,7 vezes no consumo energético, enquanto que no decodificador SCL com CRC os aumentos foram de 3,8 vezes na área e 2,9 vezes no consumo energético em relação ao SC. Ainda assim, os autores ressaltam que o decodificador com listas apresentado é a implementação mais rápida encontrada na literatura.

A redução de latência da decodificação Polar para blocos de comprimento curto, 128 e 512, visando atender aplicações emergentes de URLLC é abordada em [195]. Os autores propõem um novo algoritmo de decodificação rápida que explora os padrões de nós mais proeminentes em diferentes níveis da árvore de decodificação binária do decodificador SC. Isto viabiliza o processamento paralelo de certos nós e, consequente, a redução da latência, já que a implementação deste tipo de decodificador está comumente relacionada a processamentos seriais. Através de simulações computacionais os autores puderam verificar que o algoritmo proposto proporcionou uma redução da ordem de 13% na latência, sem redução de desempenho, quando comparado com a latência obtida com o algoritmo SC simplificado (*fast-simplified* SC). Quando reduções de desempenho são toleradas, por outro lado, a redução de latência alcançada é da ordem de 27%.

3.4.5 Implementação de Códigos Turbo para Tbps

A partir da compreensão das limitações das arquiteturas normalmente empregadas para a decodificação Turbo, como *Parallel MAP* (PMAP) e *Fully Parallel MAP* (FPMAP), e visando desenvolver um decodificador de alta vazão que pudesse atender a demandas de taxas superiores a 100 Gbps, o projeto EPIC propôs uma nova arquitetura de implementação da decodificação Turbo denominada de *Unrolled XMAP* (UXMAP) [196][197]. Esta arquitetura é totalmente



paralela com iteração estendida e com taxas compatíveis. A arquitetura proposta considera estágios, denominados de estágios X, que realizam o processamento paralelo da decodificação Maximum A Posteriori (MAP) de quadros completos. Para um bloco de tamanho K, sendo este radix 2, cada estágio X é formado por 2K ramos de unidades de métricas, K unidades de LLR que calculam informações extrínsecas e unidades de métricas de estados. Os estágios X são interligados entre si através de canais de comunicação que permitem a troca de informações entre estágios e a integração destes com o entrelaçador/desentrelaçador. As métricas dos estados de paralelização passam por um processo de normalização visando reduzir a área requerida para a implementação da arquitetura. A arquitetura UXMAP permite obter um quadro decodificado na saída a cada ciclo de *clock*, assumindo que as estruturas de processamento estejam completamente cheias. Isto proporciona uma taxa de transferência bastante elevada, dependente da frequência de *clock* de operação e do tamanho do quadro de dados. Os autores em [196] observaram que, ao aumentar o número de passos da treliça processados em paralelo em cada ramo e ao empregar unidades de métricas de estados e de cálculo de LLR com K radix 4, a área requerida para implementação foi reduzida em cerca de 50% e a latência geral do *pipeline* baixou pela metade.

O desempenho da arquitetura UXMAP foi avaliado por meio de comparações com outras arquiteturas, como FPMAP. Entre as diversas métricas analisadas, destacam-se a vazão, eficiência da vazão por área, e a FER para o código Turbo empregado no sistema Long Term Evolution (LTE) com tamanho de quadro K = 128, número de iterações igual a 4 e tecnologia de 28 nm. Neste cenário, foi possível atingir uma vazão de 102 Gbps com 4 iterações na arquitetura UXMAP, sendo 64 vezes superior à vazão na arquitetura FPMAP com 40 iterações. Com relação à eficiência em termos da vazão por área (Gbps/mm²), a arquitetura UXMAP obteve um desempenho 2,8 vezes superior quando comparado à arquitetura FPMAP. Para analisar o desempenho da FER, os autores variaram a taxa de código entre 1/3 e 18/19 em ambas as arquiteturas. Para taxas de código baixas, tanto a arquitetura UXMAP quanto FPMAP apresentaram desempenho semelhante. Por outro lado, para taxas altas (por exemplo, 8/9, 18/19), a arquitetura FPMAP sofre degradação e necessita aumentar drasticamente o número de iterações (até 80) para manter o desempenho semelhante à arquitetura UXMAP. Ainda, a FER da UXMAP pode melhorar com o emprego de entrelaçadores do tipo Parity Puncture Constrained (PPC). A arquitetura UXMAP e FPMAP mencionadas possuem desempenho similar em termos de FER para baixas taxas de código. Para altas taxas de código (ex. 8/9, 18/19), o desempenho do decodificador com arquitetura FPMAP sofre degradação, e há necessidade de um número maior de iterações (até 80) para que este decodificador tenha o mesmo desempenho da arquitetura UXMAP. Ainda, os autores verificaram que a FER de ambas arquiteturas apresenta ganhos de 1,5 dB quando submetidas a entrelaçadores do tipo PPC.

Outros estudos do projeto EPIC estenderam o uso da arquitetura UXMAP para flexibilizar sua estrutura. Em [198], um método de paralelização foi proposto para a arquitetura UXMAP, permitindo reduzir o tamanho do quadro do decodificador para 32 e 64, além do 128 já implementado em [196]. Em outro trabalho semelhante [197], os autores analisaram o impacto da paralelização espacial no estágio de meia iteração da arquitetura UXMAP. Neste, a paralelização espacial permitiu dividir os estágios de meia iteração em estágios X de tamanhos menores, partindo de 128 e reduzindo para o tamanho 32. Assim, foi possível reduzir a área de chip requerida em 40%, considerando uma tecnologia de 28 nm e um tamanho de quadro K = 128. Além disso, foi verificado que a redução do tamanho do estágio impacta minimamente na redução de área e implica em redução de desempenho de decodificação em termos de BER. Os autores analisam também o desempenho da adoção do estágio X de tamanho 32 para



quadros maiores que 128 e demonstram ser viável alcançar taxas na ordem de 409 Gbps para um tamanho de quadro de 512 bits, com 3 iterações, considerando uma frequência de operação de 800 MHz.

3.4.6 Redução da Complexidade da Decodificação de Códigos Turbo

O projeto EPIC propôs um novo algoritmo de decodificação, denominado de local Soft-Output Viterbi Algorithm (SOVA), que proporciona baixa complexidade para a decodificação de códigos Turbo [199].O algoritmo local SOVA combina operações base do decodificador Max-Log-MAP (MLM) [200] e do decodificador modified SOVA [201]. O algoritmo local SOVA realiza as métricas de estados posteriores e anteriores de forma semelhante ao decodificador MLM. No processo de decodificação em treliça, entretanto, o algoritmo local SOVA emprega o processamento base do decodificador modified SOVA para obter o resultado de saída com transição suave.

Comparado aos algoritmos MLM, o local SOVA é menos complexo computacionalmente, principalmente quando aplicado em decodificadores *radix* com valores altos [199]. Esta característica permite que a decodificação seja realizada em cenários com alta vazão de dados. Além disso, é importante ressaltar que a redução da complexidade não afeta o desempenho do algoritmo com relação a correção de erros. O emprego do algoritmo local SOVA para a decodificação de códigos Turbo com *radix* 8, por exemplo, proporciona uma redução de complexidade na ordem de 33% sem redução de desempenho em relação à correção de erros [199]. O algoritmo proposto pode, portanto, ser utilizado na implementação prática de decodificadores convolucionais e Turbo com *radix* 16 ou superior.

Por fim, em [202], os autores propuseram algumas simplificações no algoritmo original do local SOVA, visando reduzir sua complexidade de implementação. As simplificações propostas, principalmente relacionadas à métricas empregadas no processamento de caminhos da treliça de decodificação, impactaram em uma redução marginal de BER da ordem de 0,05 dB em relação ao algoritmo MLM. Além disso, as primeiras implementações do algoritmo em hardware também foram apresentadas. A partir dos resultados de síntese utilizando a arquitetura proposta, pode-se observar uma redução de 27% à 46% de área consumida do algoritmo local SOVA em relação ao algoritmo MLM, para valores de *radix* maior ou igual a 4, considerando uma tecnologia de 28 nm.

3.4.7 Conclusão

A Rede 6G deve prover suporte a diversas aplicações emergentes que demandam diferentes requisitos relacionados a alta vazão de dados, na ordem de Tbps, baixa latência, maior cobertura e disponibilidade da rede. A etapa de codificação de canal tem um importante papel no sistema de comunicação móvel, uma vez que influencia diretamente no atendimento dos aspectos citados, principalmente com relação ao desempenho do sistema em temos de taxa de erros, impactando na experiência do usuário e permitindo aumentar a eficiência e capacidade do enlace de comunicação. A presente seção apresentou algumas pesquisas relacionadas com a área de codificação de canal contemplando os códigos mais proeminentes atualmente, que são Polar, LDPC e Turbo. Vale destacar que a maioria das pesquisas citadas tem como foco a otimização de implementação, visando alcançar uma maior taxa de dados, bem como redução da área de silício que, por sua vez, impacta na redução do consumo de energia e na otimização de custos. Também foram citadas pesquisas que buscam prover um melhor suporte e integração com outras técnicas potenciais da Rede 6G, como MIMO e NOMA.



A Tabela 4 resume as características das principais referências bibliográficas discutidas nesta seção.

Ref	Principais contribuições
[184]	Explora características da estrutura do código RL-QC-LDPC, empregado pela Rede
	5G, para obter códigos que possam melhorar a técnica de acesso aleatório NOMA,
	flexibilizando o suporte a diversas eficiências espectrais, provendo robustez contra
	a variação do número de usuários.
[192]	Propõe um algoritmo híbrido de decodificação Polar do tipo estendido que combina
	decodificação SC com MJL e que permite obter uma latência de decodificação infe-
	rior ao método SC. O decodificador proposto, considerando resultados de pós síntese
	de hardware, apresentou vazão de 427 Gbps para uma tecnologia de implementação
	de 45 nm.
[193]	Apresenta um <i>framework</i> capaz de gerar arquiteturas otimizadas para decodificado-
	res Polar. Apresenta também um estudo comparativo do desempenho de correção
	de erros e parâmetros de implementação de códigos gerados pelo referido <i>framework</i> .
	Em relação à vazão, os decodificadores SC e SCL sem e com CRC alcançaram, res-
	pectivamente, taxas de 517, 516 e 506 Gbps, para uma tecnologia de 28 nm.
[195]	Propõe um algoritmo para redução da latência de decodificação Polar para blocos de
	comprimento curto. O algoritmo proposto permitiu reduzir 13% e 27% da latência,
	não admitindo e admitindo redução de desempenho, respectivamente, em relação
	ao algoritmo SC simplificado (fast-simplified SC).
[198, 197]	Os autores consideram uma nova arquitetura de implementação de decodificação
	Turbo denominada de UXMAP. Demonstram ser viável alcançar taxas na ordem de
	409 Gbps para um tamanho de quadros de 512 bits, com 3 iterações, considerando
	uma frequência de operação de 800 MHz.
[199, 202]	Propõe um novo algoritmo de decodificação de códigos Turbo que proporciona baixa
	complexidade de decodificação com <i>radix</i> maior que 16, viabilizando a implementa-
	ção de decodificadores de alta vazão [199]. Em [202] são apresentados otimizações
	do algoritmo e resultados de implementações em <i>hardware</i> . Os resultados apontam
	uma redução de 27% à 46% de área consumida do algoritmo em relação ao MLM,
	para valores de $radix$ maior ou igual a 4 (tecnologia de 28 nm).

Tabela 4: Principais referências apresentadas com relação a codificação de canal.



4 Conclusão

Daniely Gomes Silva, Michelle Soares Pereira Facina, Paulo Cardieri, Richard Demo Souza, Victoria Souto daniely@inatel.br, mfacina@decom.fee.unicamp.br, cardieri@unicamp.br, richard.demo@ufsc.br, victoria.souto@posgrad.ufsc.br

A rede 5G foi desenvolvida com o objetivo de atender a um conjunto de casos de uso bastante desafiadores: eMBB, URLLC e mMTC. No entanto, uma das principais limitações impostas pelos três modos de operação previstos é a incapacidade de se atender simultaneamente os dois requisitos-chave em cada cenário: ou se tem alta vazão ou baixa latência. Logo, cabe à Rede 6G preencher essa lacuna. Ela deverá prover suporte a diversas aplicações que demandam atendimento simultâneo de diferentes requisitos, tais como, vazão de dados da ordem de Tbps, baixa latência, maior cobertura e disponibilidade da rede. Para isso, inúmeras tecnologias emergentes têm sido estudadas e desenvolvidas pela comunidade científica.

Na Seção 2 foram identificados os sete principais casos de uso que devem ser atendidos pela Rede 6G com seus respectivos escopos de aplicação. A partir da análise desses cenários, pôde-se verificar que as novas aplicações propostas são ainda mais desafiadoras, já que as redes móveis deverão englobar funções de sensoriamento do ambiente, posicionamento e mapeamento de objetos e pessoas no meio físico, utilização de imagens como um serviço nativo da rede e de AI de forma transversal em toda sua estrutura. No entanto, para que isso seja possível, os primeiros entraves a serem enfrentados perpassam pela camada física das tecnologias propostas.

A Seção 3.4 apresentou o estado da arte da codificação de canal, evidenciando as diversas pesquisas que têm sido realizadas em torno do aumento da taxa de dados suportada, redução da latência de processamento e aumento da eficiência energética. Visando prover melhor suporte aos requisitos inicialmente previstos para a Rede 6G, bem como a melhor integração com outras tecnologias candidatas, as pesquisas abordadas contemplam códigos corretores de erro já consolidados, como LDPC, Polares e Turbo, mas com melhorias significativas de implementação. Sem a intenção de fazer uma classificação exaustiva, mas apenas uma análise especulativa, os avanços no projeto de códigos corretores de erros que atingem alta confiabilidade, alta vazão e baixa latência descritos na Seção 3.4 tendem a ser ferramentas habilitadoras fundamentais de vários dos casos de uso descritos na Seção 2, como por exemplo Gêmeos Digitais em Larga Escala, Interações Remotas Avançadas, Colaboradores Cibernéticos e Zonas Seguras Invisíveis.

A Seção 3.1 se atém às diferentes formas de onda que podem ser utilizadas na transmissão de dados. Apesar de OFDM ter se destacado nas últimas padronizações dada sua baixa complexidade, outras formas de onda podem ser mais vantajosas e menos sensíveis à sincronização. A F-OFDM adota um processo adicional de filtragem, o que reduz as interferências. A GFDM é mais flexível já que é possível configurar o número de subportadoras e subsímbolos mais adequados à aplicação considerada. Por sua vez, CP-DSSS é mais versátil, podendo ser usada como alternativa para aliviar o congestionamento espectral ou até mesmo em redes *femtocell*. A forma de onda *chirp* tem-se mostrado adequada a aplicações de sensoriamento e detecção em que as condições monitoradas mudam muito rápido. Já a OAM permite criar vários estados ortogonais entre si no nível eletromagnético, o que aumenta não só a capacidade mas também a eficiência espectral da transmissão. Por fim, a modulação com portadora única torna-se vantajosa em faixas de frequência elevada, uma vez que a linearidade e a eficiência dos amplificadores de potência diminuem e também o ruído de fase de osciladores torna-se mais expressivo. Portanto, verifica-se a necessidade da escolha de formas de onda que sejam capazes de transpor os requisitos impostos pela futura rede de comunicação, como a necessidade de alta



eficiência espectral e energética, alocação flexível de recursos nos domínios do tempo e frequência, baixa latência, alta mobilidade, complexidade alcançável na implementação do transceptor e outros [203]. A escolha da forma de onda adequada para a futura rede de comunicação possibilitará a superação desses requisitos, contribuindo para a implementação de diversos casos de uso apresentados na Seção 2, como Cobertura Mundial Extrema, Gêmeos Digitais em Larga Escala, Interações Remotas Avançadas, Agropecuária do Futuro e Colaboradores Cibernéticos.

Na Seção 3.2 foi apresentada uma revisão sobre as principais tecnologias MIMO que deverão compor a arquitetura da Rede 6G. MIMO massivo é uma das candidatas para aumentar a eficiência espectral e energética da Rede 6G, visto que já se encontra como uma das tecnologias consideradas na rede 5G. Ademais, seu uso na faixa de THz, como discutido na Seção 3.2, é inovador e permitirá o emprego de canais de altíssima largura de banda, dando suporte a casos de usos discutidos na Seção 2 que requerem altas taxas de dados, como Gêmeos Digitais em Larga Escala, Interações Remotas Avançadas, e Colaboradores Cibernéticos. No entanto, a implantação de MIMO em THz na Rede 6G dependerá de um estudo avançado para que suas limitações em termos de alcance sejam mitigadas. Duas outras tecnologias complementares foram também descritas, a saber LIS e CF-mMIMO. A primeira delas, considerada pela comunidade científica como a base da arquitetura de Redes 6G, permite a otimização dos canais de propagação e a supressão de interferência, levando ao aumento da capacidade do canal e da cobertura de serviço. Essas características da tecnologia LIS a coloca com uma tecnologia habilitadora de casos de usos que requerem altas taxas de dados e grande cobertura. Por outro lado, CF-mMIMO apresenta-se como uma tecnologia promissora para a Rede 6G por possibilitar o estabelecimento de conexões com ultra-baixa latência, como aquelas exigidas nos casos de uso Interações Remotas Avançadas, Zonas Seguras Invisíveis, Colaboradores Cibernéticos, e Gêmeos Digitais em Larga Escala. Assim, podemos afirmar que as tecnologias baseadas em MIMO discutidas na Seção 3.2 serão fundamentais para atender os requisitos impostos à Rede 6G de alta taxa de dados, baixa latência e grande cobertura, viabilizando assim os casos de usos descritos na Seção 2. É importante destacar que a arquitetura da Rede 6G deverá fazer uso de uma combinação dessas tecnologias para que diferentes requisitos sejam atendidos simultaneamente.

Técnicas de múltiplo acesso são fundamentais em qualquer sistema de comunicação com múltiplos usuários. Nesta linha, a Seção 3.3 apresentou uma revisão das principais técnicas de múltiplo acesso candidatas para implementação na Rede 6G. NOMA e RSMA são tecnologias com potencial de atender às demandas desafiadoras impostas à futura rede. NOMA apresentase como um esquema eficaz no partilhamento do espectro, atendendo os vários usuários sob o mesmo bloco de recursos e garantindo um maior ganho em termos de eficiência espectral e justiça entre os usuários. Por outro lado, RSMA permite reduzir a complexidade tanto da transmissão como da recepção, além de garantir melhor eficiência espectral em relação ao NOMA e ao SDMA. Logo, verifica-se que o desempenho do NOMA e RSMA tem motivado a implementação de ambas técnicas em aplicações e cenários próprios da Rede 6G. Desenvolvimentos recentes em técnicas de múltiplo acesso não ortogonal ou apropriadas para tráfegos heterogêneos, como por exemplo RSMA e NOMA, provavelmente terão papel fundamental em permitir que requisitos importantes relacionados com conectividade massiva demandados por algumas das aplicações inovadoras mencionadas na Seção 2, como Cobertura Mundial Extrema, Gêmeos Digitais em Larga Escala, Agropecuária do Futuro e Comunicação Espacial, sejam atendidos.

Para finalizar, a Rede 6G deve servir como uma espécie de rede neural distribuída, que fornece enlaces de comunicação para fundir os mundos físico, biológico e digital, inaugurando a era da *Intelligence-of-Everything*. Com tal visão, além de impulsionar ainda mais a experiência



de comunicação de altas taxas de dados, baixas latências e ultra-confiabilidade, as Redes 6G também deverão considerar de forma eficiente, em termos de custos e energia, os novos cenários de serviços, novos clientes potenciais e novos ecossistemas, bem como o tipo e número de dispositivos conectados. Ademais, o desenvolvimento verde e sustentável não é apenas um recurso interessante, mas sim um dos principais requisitos para a Rede 6G. Para que tamanha evolução seja possível, inúmeras questões ainda precisam ser discutidas/respondidas e novas pesquisas devem ser desenvolvidas.



Referências

- M. Z. Chowdhury, M. Shahjalal, S. Ahmed, e Y. M. Jang, "6G wireless communication systems: Applications, requirements, technologies, challenges, and research directions," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, v. 1, p. 957–975, 2020.
- [2] J. Pérez Santacruz, S. Rommel, U. Johannsen, A. Jurado-Navas, e I. Tafur Monroy, "Candidate waveforms for arof in beyond 5g," *Applied Sciences*, v. 10, n. 11, p. 3891, 2020.
- [3] I. F. Akyildiz, A. Kak, e S. Nie, "6G and beyond: The future of wireless communications systems," *IEEE Access*, v. 8, p. 133 995–134 030, 2020.
- [4] J. Zhang, S. Chen, Y. Lin, J. Zheng, B. Ai, e L. Hanzo, "Cell-free massive MIMO: A new next-generation paradigm," *IEEE Access*, v. 7, p. 99878–99888, 2019.
- [5] ITU-R, "Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s)," International Telecommunication Union (ITU), Report ITU-R M.2410-0, Nov. 2017.
- [6] H. Kim, Enhanced Mobile Broadband Communication Systems. IEEE, 2020, p. 239–302.
- [7] M. A. Imran, S. Hussain, e Q. H. Abbasi, Ultra Reliable Low Latency Communications as an Enabler For Industry Automation. IEEE, 2020, p. 89–107.
- [8] D. Chandramouli, R. Liebhart, e J. Pirskanen, Massive Machine Type Communication and the Internet of Things. IEEE, 2019, p. 377–439.
- [9] R. R. Shrivastwa, V. Pudi, C. Duo, R. So, A. Chattopadhyay, e G. Cuntai, "A brain-computer interface framework based on compressive sensing and deep learning," *IEEE Consumer Electronics Magazine*, v. 9, n. 3, p. 90–96, 2020.
- [10] W. Saad, M. Bennis, e M. Chen, "A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems," *IEEE Network*, v. 34, n. 3, p. 134–142, 2020.
- [11] Flagship 6G. (2021) Discover how 6G will change our lives. [Online]. Disponível em: https://www.oulu.fi/6gflagship/.
- [12] Hexa-X Project. (2021) A flagship for 6G vision and intelligent fabric of technology enablers connecting human, physical, and digital worlds . [Online]. Disponível em: https://hexa-x.eu/.
- [13] One 6G. (2021) Taking communications to the next level. [Online]. Disponível em: https://one6g.org/.
- [14] L. Mendes et al., "Casos de Uso e Requisitos para as Redes 6G," Projeto Brasil 6G, Report, 2021.
- [15] J. Abdoli, M. Jia, e J. Ma, "Filtered OFDM: A new waveform for future wireless systems," in *IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*, Jun. 2015, p. 66–70.



- [16] N. Michailow, M. Matthé, I. S. Gaspar, A. N. Caldevilla, L. L. Mendes, A. Festag, e G. Fettweis, "Generalized frequency division multiplexing for 5th generation cellular networks," *IEEE Transactions on Communications*, v. 62, n. 9, p. 3045–3061, Set. 2014.
- [17] F. Pancaldi, G. M. Vitetta, R. Kalbasi, N. Al-Dhahir, M. Uysal, e H. Mheidat, "Singlecarrier frequency domain equalization," *IEEE Signal Processing Magazine*, v. 25, n. 5, p. 37–56, 2008.
- [18] M. Matthe, L. Mendes, N. Michailow, e G. Fettweis, "Widely Linear Estimation for Space-Time-Coded GFDM in Low-Latency Applications," *IEEE Transactions on Communications*, v. 62, n. 9, p. 3045–3061, Set. 2015, under review.
- [19] M. Matthe, L. L. Mendes, e G. Fettweis, "Space-time coding for generalized frequency division multiplexing," *European Wireless 2014*, Mai. 2014.
- [20] S. N. Jenkins, B. A. Kenney, A. J. Majid, H. Moradi, e B. Farhang-Boroujeny, "CP-DSSS: A novel waveform for multiple access in IoT," in 6G Wireless Summit (6G SUMMIT), 2020, p. 1–5.
- [21] S. Dwivedi, M. Zoli, A. N. Barreto, P. Sen, e G. Fettweis, "Secure joint communications and sensing using chirp modulation," in 6G Wireless Summit (6G SUMMIT), 2020, p. 1–5.
- [22] Y. Yuan, Y. Zhao, B. Zong, e S. Parolari, "Potential key technologies for 6G mobile communications," *Science China Information Sciences*, v. 63, 2020.
- [23] S. Zheng, Z. Zhang, Y. Pan, X. Jin, H. Chi, e X. Zhang, "Plane spiral orbital angular momentum electromagnetic wave," Asia-Pacific Microwave Conference, v. 3, p. 1–3, 2015.
- [24] T. Hu, Y. Wang, X. Liao, J. Zhang, e Q. Song, "OFDM-OAM modulation for future wireless communications," *IEEE Access*, v. 7, p. 59114–59125, 2019.
- [25] A. Ghosh, A. Mäder, M. Baker, e D. Chandramouli, "5G evolution: A view on 5G cellular technology beyond 3GPP release 15," *IEEE Access*, v. PP, p. 1–1, Set. 2019.
- [26] J.-B. Doré, Y. Corre, S. Bicais, J. Palicot, E. Faussurier, D. Ktenas, e F. Bader, "Above-90GHz Spectrum and Single-Carrier Waveform as Enablers for Efficient Tbit/s Wireless Communications," in *International Conference on Telecommunications*, Jun. 2018, p. 274–278.
- [27] M. L. Diallo, M. Chafii, J. Palicot, e F. Bader, "Modified tone reservation for PAPR reduction in OFDM systems," in *European Signal Processing Conference*, 2016, p. 697– 701.
- [28] T. L. Marzetta, "Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 9, n. 11, p. 3590–3600, 2010.
- [29] H. Tataria, M. Shafi, A. F. Molisch, M. Dohler, H. Sjöland, e F. Tufvesson, "6g wireless systems: Vision, requirements, challenges, insights, and opportunities," *Proceedings of* the IEEE, v. 109, n. 7, p. 1166–1199, 2021.



- [30] F. Rusek, D. Persson, B. K. Lau, E. G. Larsson, T. L. Marzetta, O. Edfors, e F. Tufvesson, "Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays," *IEEE Signal Processing Magazine*, v. 30, n. 1, p. 40–60, 2013.
- [31] F. A. P. De Figueiredo, F. A. C. M. Cardoso, I. Moerman, e G. Fraidenraich, "On the application of massive MIMO systems to machine type communications," *IEEE Access*, v. 7, p. 2589–2611, 2019.
- [32] E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, e T. L. Marzetta, "Massive MIMO for next generation wireless systems," *IEEE Communications Magazine*, v. 52, n. 2, p. 186–195, 2014.
- [33] J. Feng, S. Ma, S. Aïssa, e M. Xia, "Two-way massive MIMO relaying systems with non-ideal transceivers: Joint power and hardware scaling," *IEEE Transactions on Communications*, v. 67, n. 12, p. 8273–8289, 2019.
- [34] Y. Xie, B. Li, Z. Yan, J. Fan, e M. Yang, "A general hybrid precoding method for mmwave massive MIMO systems," *Radio Eng*, v. 28, p. 439–446, 2019.
- [35] J. A. Zhang, X. Huang, V. Dyadyuk, e Y. J. Guo, "Massive hybrid antenna array for millimeter-wave cellular communications," *IEEE Wireless Communications*, v. 22, n. 1, p. 79–87, 2015.
- [36] Z. Mokhtari, M. Sabbaghian, e R. Dinis, "A survey on massive MIMO systems in presence of channel and hardware impairments," *Sensors*, v. 19, n. 1, p. 164, 2019.
- [37] Y. Pei, T.-H. Pham, e Y.-C. Liang, "How many RF chains are optimal for large-scale MIMO systems when circuit power is considered?" in *IEEE Global Communications Conference*, 2012, p. 3868–3873.
- [38] H. Li, L. Song, D. Zhu, e M. Lei, "Energy efficiency of large scale MIMO systems with transmit antenna selection," in *IEEE International Conference on Communications*, 2013, p. 4641–4645.
- [39] L. Lu, G. Y. Li, A. L. Swindlehurst, A. Ashikhmin, e R. Zhang, "An overview of massive MIMO: Benefits and challenges," *IEEE journal of selected topics in signal processing*, v. 8, n. 5, p. 742–758, 2014.
- [40] F. Sohrabi e W. Yu, "Hybrid digital and analog beamforming design for large-scale antenna arrays," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, v. 10, n. 3, p. 501–513, 2016.
- [41] C. Shepard, H. Yu, N. Anand, E. Li, T. Marzetta, R. Yang, e L. Zhong, "Argos: Practical many-antenna base stations," in *Proceedings of the 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, ser. Mobicom '12. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2012, p. 53–64.
- [42] B. Adela, "Antennas for silicon-based mm-wave FMCW radars: antenna integration and MIMO system design," Ph.D. dissertation, Electrical Engineering, Nov. 2019, Proefschrift.
- [43] R. Janaswamy, "Effect of element mutual coupling on the capacity of fixed length linear arrays," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, v. 1, p. 157–160, 2002.



- [44] J. W. Wallace e M. A. Jensen, "Mutual coupling in MIMO wireless systems: a rigorous network theory analysis," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 3, n. 4, p. 1317–1325, 2004.
- [45] B. K. Lau, J. B. Andersen, G. Kristensson, e A. F. Molisch, "Impact of matching network on bandwidth of compact antenna arrays," *IEEE Transactions on Antennas and Propa*gation, v. 54, n. 11, p. 3225–3238, 2006.
- [46] B. K. Lau, "Chapter 10 multiple antenna terminals," in *MIMO*, A. Sibille, C. Oestges, e A. Zanella, Eds. Oxford: Academic Press, 2011, p. 267–297.
- [47] A. L. Moustakas, H. U. Baranger, L. Balents, A. M. Sengupta, e S. H. Simon, "Communication through a diffusive medium: Coherence and capacity," *Science*, v. 287, n. 5451, p. 287–290, 2000.
- [48] X. Artiga, B. Devillers, e J. Perruisseau-Carrier, "On the selection of radiating elements for compact indoor massive-multiple input multiple output base stations," *IET Microwa*ves, Antennas & Propagation, v. 8, p. 1–9(8), Jan. 2014.
- [49] M. Z. Aslam, Y. Corre, E. Björnson, e E. G. Larsson, "Performance of a dense urban massive MIMO network from a simulated ray-based channel," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, v. 2019, n. 1, p. 1–13, 2019.
- [50] F. Sheikh, Y. Gao, e T. Kaiser, "A study of diffuse scattering in massive MIMO channels at terahertz frequencies," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 68, n. 2, p. 997–1008, 2019.
- [51] X. Gao, F. Tufvesson, e O. Edfors, "Massive MIMO channels measurements and models," in Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2013, p. 280–284.
- [52] S. Wu, C. Wang, Y. Yang, W. Wang, e X. Gao, "Performance comparison of massive MIMO channel models," in *IEEE/CIC International Conference on Communications in China*, 2016, p. 1–6.
- [53] K. Zheng, S. Ou, e X. Yin, "Massive MIMO channel models: A survey," International Journal of Antennas and Propagation, v. 2014, 2014.
- [54] Z. Jiang, A. F. Molisch, G. Caire, e Z. Niu, "Achievable rates of fdd massive MIMO systems with spatial channel correlation," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 14, n. 5, p. 2868–2882, 2015.
- [55] I. Khan, J. J. Rodrigues, J. Al-Muhtadi, M. I. Khattak, Y. Khan, F. Altaf, S. S. Mirjavadi, e B. J. Choi, "A robust channel estimation scheme for 5G massive MIMO systems," *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2019.
- [56] M. Azizipour e K. Mohamed-Pour, "Compressed downlink channel acquisition based on burst support information in large-scale MIMO systems," *Electronics Letters*, v. 55, n. 8, p. 489–491, 2019.
- [57] N. Tadayon, M. T. Rahman, S. Han, S. Valaee, e W. Yu, "Decimeter ranging with channel state information," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 18, n. 7, p. 3453– 3468, 2019.



- [58] J. Jose, A. Ashikhmin, T. L. Marzetta, e S. Vishwanath, "Pilot contamination and precoding in multi-cell TDD systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 10, n. 8, p. 2640–2651, 2011.
- [59] F. Kaltenberger, H. Jiang, M. Guillaud, e R. Knopp, "Relative channel reciprocity calibration in MIMO/TDD systems," in *Future Network Mobile Summit*, 2010, p. 1–10.
- [60] R. Rogalin, O. Y. Bursalioglu, H. C. Papadopoulos, G. Caire, e A. F. Molisch, "Hardwareimpairment compensation for enabling distributed large-scale MIMO," in *Information Theory and Applications Workshop*, 2013, p. 1–10.
- [61] R. Rogalin, O. Y. Bursalioglu, H. Papadopoulos, G. Caire, A. F. Molisch, A. Michaloliakos, V. Balan, e K. Psounis, "Scalable synchronization and reciprocity calibration for distributed multiuser MIMO," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 13, n. 4, p. 1815–1831, 2014.
- [62] H. Q. Ngo e E. G. Larsson, "EVD-based channel estimation in multicell multiuser MIMO systems with very large antenna arrays," in *IEEE International Conference on Acoustics*, Speech and Signal Processing, 2012, p. 3249–3252.
- [63] A. Ashikhmin e T. Marzetta, "Pilot contamination precoding in multi-cell large scale antenna systems," in *IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings*, 2012, p. 1137–1141.
- [64] H. Yin, D. Gesbert, M. Filippou, e Y. Liu, "A coordinated approach to channel estimation in large-scale multiple-antenna systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 31, n. 2, p. 264–273, 2013.
- [65] R. R. Müller, L. Cottatellucci, e M. Vehkaperä, "Blind pilot decontamination," IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, v. 8, n. 5, p. 773–786, 2014.
- [66] O. Elijah, C. Y. Leow, T. A. Rahman, S. Nunoo, e S. Z. Iliya, "A comprehensive survey of pilot contamination in massive MIMO-5G system," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 18, n. 2, p. 905–923, 2016.
- [67] F. A. de Figueiredo, F. A. Cardoso, I. Moerman, e G. Fraidenraich, "Channel estimation for massive MIMO TDD systems assuming pilot contamination and flat fading," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, v. 2018, n. 1, p. 1–10, 2018.
- [68] M. Sarajlić, F. Rusek, J. R. Sánchez, L. Liu, e O. Edfors, "Fully decentralized approximate zero-forcing precoding for massive MIMO systems," *IEEE Wireless Communications Letters*, v. 8, n. 3, p. 773–776, 2019.
- [69] H. Huang, Y. Song, J. Yang, G. Gui, e F. Adachi, "Deep-learning-based millimeter-wave massive MIMO for hybrid precoding," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 68, n. 3, p. 3027–3032, 2019.
- [70] D. Su, Y. Jiang, X. Wang, e X. Gao, "Omnidirectional precoding for massive MIMO with uniform rectangular array—Part I: Complementary codes-based schemes," *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 67, n. 18, p. 4761–4771, 2019.



- [71] R. C. de Lamare, "Massive MIMO systems: Signal processing challenges and future trends," URSI Radio Science Bulletin, v. 2013, n. 347, p. 8–20, 2013.
- [72] G. Caire e S. Shamai, "On the achievable throughput of a multiantenna gaussian broadcast channel," *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 49, n. 7, p. 1691–1706, 2003.
- [73] C. Windpassinger, L. Lampe, R. F. H. Fischer, e T. Hehn, "A performance study of MIMO detectors," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 5, n. 8, p. 2004– 2008, 2006.
- [74] C. B. Peel, B. M. Hochwald, e A. L. Swindlehurst, "A vector-perturbation technique for near-capacity multiantenna multiuser communication-part I: channel inversion and regularization," *IEEE Transactions on Communications*, v. 53, n. 1, p. 195–202, 2005.
- [75] K. Zu, R. C. de Lamare, e M. Haardt, "Generalized design of low-complexity block diagonalization type precoding algorithms for multiuser MIMO systems," *IEEE Transactions* on Communications, v. 61, n. 10, p. 4232–4242, 2013.
- [76] J. R. Barry, E. A. Lee, e D. G. Messerschmitt, *Digital communication*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [77] I. A. Khoso, X. Dai, M. N. Irshad, A. Khan, e X. Wang, "A low-complexity data detection algorithm for massive MIMO systems," *IEEE Access*, v. 7, p. 39341–39351, 2019.
- [78] M. A. Albreem, M. Juntti, e S. Shahabuddin, "Massive MIMO detection techniques: A survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 21, n. 4, p. 3109–3132, 2019.
- [79] X. Tan, Y.-L. Ueng, Z. Zhang, X. You, e C. Zhang, "A low-complexity massive MIMO detection based on approximate expectation propagation," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 68, n. 8, p. 7260–7272, 2019.
- [80] Y. Liang, E. Y. Cheu, L. Bai, e G. Pan, "On the relationship between MMSE-SIC and BI-GDFE receivers for large multiple-input multiple-output channels," *IEEE Transactions* on Signal Processing, v. 56, n. 8, p. 3627–3637, 2008.
- [81] H. Zhao, H. Long, e W. Wang, "Tabu search detection for MIMO systems," in 2007 IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2007, p. 1–5.
- [82] Y. Sun, "A family of likelihood ascent search multiuser detectors: An upper bound of bit error rate and a lower bound of asymptotic multiuser efficiency," *Trans. Comm.*, v. 57, n. 6, p. 1743–1752, Jun. 2009.
- [83] A. Paulraj, A. P. Rohit, R. Nabar, e D. Gore, Introduction to space-time wireless communications. Cambridge university press, 2003.
- [84] D. Tse e P. Viswanath, Fundamentals of wireless communication. Cambridge university press, 2005.
- [85] J. Jalden e B. Ottersten, "On the complexity of sphere decoding in digital communications," *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 53, n. 4, p. 1474–1484, 2005.



- [86] L. G. Barbero e J. S. Thompson, "Fixing the complexity of the sphere decoder for MIMO detection," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 7, n. 6, p. 2131–2142, 2008.
- [87] Y. Xing e T. S. Rappaport, "Propagation measurement system and approach at 140 GHzmoving to 6G and above 100 GHz," in *IEEE Global Communications Conference*. IEEE, 2018, p. 1–6.
- [88] H. Sarieddeen, N. Saeed, T. Y. Al-Naffouri, e M.-S. Alouini, "Next generation terahertz communications: A rendezvous of sensing, imaging, and localization," *IEEE Communications Magazine*, v. 58, n. 5, p. 69–75, 2020.
- [89] I. F. Akyildiz e J. M. Jornet, "Realizing ultra-massive MIMO (1024 × 1024) communication in the (0.06–10) terahertz band," *Nano Communication Networks*, v. 8, p. 46–54, 2016.
- [90] I. F. Akyildiz, C. Han, e S. Nie, "Combating the distance problem in the millimeter wave and terahertz frequency bands," *IEEE Communications Magazine*, v. 56, n. 6, p. 102–108, 2018.
- [91] J. M. Jornet e I. F. Akyildiz, "Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the terahertz band," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 10, n. 10, p. 3211–3221, 2011.
- [92] I. F. Akyildiz, J. M. Jornet, e C. Han, "Terahertz band: Next frontier for wireless communications," *Physical Communication*, v. 12, p. 16–32, 2014.
- [93] H. Elayan, O. Amin, R. M. Shubair, e M.-S. Alouini, "Terahertz communication: The opportunities of wireless technology beyond 5G," in *IEEE International Conference on* Advanced Communication Technologies and Networking, 2018, p. 1–5.
- [94] S. Priebe e T. Kurner, "Stochastic modeling of THz indoor radio channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 12, n. 9, p. 4445–4455, 2013.
- [95] S. Kim e A. Zajić, "Statistical modeling of THz scatter channels," in European Conference on Antennas and Propagation. IEEE, 2015, p. 1–5.
- [96] D. He, K. Guan, A. Fricke, B. Ai, R. He, Z. Zhong, A. Kasamatsu, I. Hosako, e T. Kürner, "Stochastic channel modeling for kiosk applications in the terahertz band," *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, v. 7, n. 5, p. 502–513, 2017.
- [97] A. R. Ekti, A. Boyaci, A. Alparslan, İ. Ünal, S. Yarkan, A. Görçin, H. Arslan, e M. Uysal, "Statistical modeling of propagation channels for terahertz band," in *IEEE Conference* on Standards for Communications and Networking, 2017, p. 275–280.
- [98] M. A. Khalighi e M. Uysal, "Survey on free space optical communication: A communication theory perspective," *IEEE communications surveys & tutorials*, v. 16, n. 4, p. 2231–2258, 2014.



- [99] M. D. Renzo, M. Debbah, D. T. P. Huy, A. Zappone, M. Alouini, C. Yuen, V. Sciancalepore, G. C. Alexandropoulos, J. Hoydis, H. Gacanin, J. de Rosny, A. Bounceu, G. Lerosey, e M. Fink, "Smart radio environments empowered by AI reconfigurable meta-surfaces: An idea whose time has come," J Wireless Com Network, 2019.
- [100] E. Basar, M. Di Renzo, J. De Rosny, M. Debbah, M.-S. Alouini, e R. Zhang, "Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces," *IEEE Access*, v. 7, p. 116753–116773, 2019.
- [101] S. V. Hum e J. Perruisseau-Carrier, "Reconfigurable reflectarrays and array lenses for dynamic antenna beam control: A review," *IEEE Transactions on Antennas and Propa*gation, v. 62, n. 1, p. 183–198, Jan. 2014.
- [102] A. Puglielli, N. Narevsky, P. Lu, T. Courtade, G. Wright, B. Nikolic, e E. Alon, "A scalable massive MIMO array architecture based on common modules," in *International Conference on Communication Workshop*, Jun. 2015.
- [103] J. Yuan, H. Q. Ngo, e M. Matthaiou, "Towards large intelligent surface (LIS)-Based communications," *IEEE Transactions on Communications*, v. 68, n. 10, p. 6568–6582, 2020.
- [104] E. Björnson, L. Sanguinetti, J. Hoydis, e M. Debbah, "Optimal design of energy-efficient multi-user MIMO systems: Is massive MIMO the answer?" *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 14, n. 6, p. 3059–3075, Jun. 2015.
- [105] C. Huang, G. C. Alexandropoulos, A. Zappone, M. Debbah, e C. Yuen, "Energy efficient multi-user miso communication using low resolution large intelligent surfaces," in 2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), 2018, p. 1–6.
- [106] C. Huang, A. Zappone, G. C. Alexandropoulos, M. Debbah, e C. Yuen, "Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication," *IEEE Transactions* on Wireless Communications, v. 18, n. 8, p. 4157–4170, 2019.
- [107] E. Björnson, O. Özdogan, e E. G. Larsson, "Intelligent reflecting surface versus decodeand-forward: How large surfaces are needed to beat relaying?" *IEEE Wireless Communications Letters*, v. 9, n. 2, p. 244–248, 2020.
- [108] S. Pollin e et al., "MINTS-millimeter-wave networking and sensing for beyond 5G," 2021.
 [Online]. Disponível em: https://b5g-mints.eu/, 2021.
- [109] S. Kisseleff, W. A. Martins, H. Al-Hraishawi, S. Chatzinotas, e B. Ottersten, "Reconfigurable intelligent surfaces for smart cities: Research challenges and opportunities," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, v. 1, p. 1781–1797, 2020.
- [110] B. Ottersten e et al., "RISOTTI-reconfigurable intelligent surfaces for smart cities," 2021. [Online]. Disponível em: https://wwwfr.uni.lu/snt/research/sigcom/projects/risotti_ reconfigurable intelligent surfaces for smart cities, 2021.
- [111] J. C. B. Garcia, A. Sibille, e M. Kamoun, "Reconfigurable intelligent surfaces: Bridging the gap between scattering and reflection," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 38, n. 11, p. 2538–2547, 2020.



- [112] E. Björnson e L. Sanguinetti, "Power scaling laws and near-field behaviors of massive MIMO and intelligent reflecting surfaces," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, v. 1, p. 1306–1324, 2020.
- [113] F. A. P. de Figueiredo, M. S. P. Facina, R. C. Ferreira, Y. Ai, R. Ruby, Q.-V. Pham, e G. Fraidenraich, "Large intelligent surfaces with discrete set of phase-shifts communicating through double-rayleigh fading channels," *IEEE Access*, v. 9, p. 20768–20787, 2021.
- [114] Emil Björnson, "The end of independent Rayleigh fading," 2020, [Online]. Disponível em: http://ma-mimo.ellintech.se/2020/10/15/the-end-of-independent-rayleigh-fading/. Acessado em: 01 de Abril de 2021.
- [115] H. Han, J. Zhao, D. Niyato, M. D. Renzo, e Q.-V. Pham, "Intelligent reflecting surface aided network: Power control for physical-layer broadcasting," in *IEEE International Conference on Communications*, 2020, p. 1–7.
- [116] L. Zhao, Z. Wang, e X. Wang, "Wireless power transfer empowered by reconfigurable intelligent surfaces," *IEEE Systems Journal*, p. 1–4, 2020.
- [117] Z.-Q. He e X. Yuan, "Cascaded channel estimation for large intelligent metasurface assisted massive MIMO," *IEEE Wireless Communications Letters*, v. 9, n. 2, p. 210–214, 2020.
- [118] C. You, B. Zheng, e R. Zhang, "Channel estimation and passive beamforming for intelligent reflecting surface: Discrete phase shift and progressive refinement," *IEEE Journal* on Selected Areas in Communications, v. 38, n. 11, p. 2604–2620, 2020.
- [119] A. Zappone, M. Di Renzo, F. Shams, X. Qian, e M. Debbah, "Overhead-aware design of reconfigurable intelligent surfaces in smart radio environments," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 20, n. 1, p. 126–141, 2021.
- [120] A. Taha, M. Alrabeiah, e A. Alkhateeb, "Enabling large intelligent surfaces with compressive sensing and deep learning," *IEEE Access*, v. 9, p. 44304–44321, 2021.
- [121] V. D. Pegorara Souto, R. D. Souza, B. F. Uchôa-Filho, A. Li, e Y. Li, "Beamforming optimization for intelligent reflecting surfaces without CSI," *IEEE Wireless Communications Letters*, v. 9, n. 9, p. 1476–1480, 2020.
- [122] Özlem Tugfe Demir, E. Björnson, e L. Sanguinetti, "Foundations of user-centric cell-free massive MIMO," Foundations and Trends[®] in Signal Processing, v. 14, n. 3-4, p. 162–472, 2021.
- [123] Shidong Zhou, Ming Zhao, Xibin Xu, Jing Wang, e Yan Yao, "Distributed wireless communication system: a new architecture for future public wireless access," *IEEE Communications Magazine*, v. 41, n. 3, p. 108–113, 2003.
- [124] C.-L. I, J. Huang, R. Duan, C. Cui, J. Jiang, e L. Li, "Recent progress on C-RAN centralization and cloudification," *IEEE Access*, v. 2, p. 1030–1039, 2014.
- [125] E. Björnson e E. Jorswieck, Optimal Resource Allocation in Coordinated Multi-Cell Systems. Now Foundations and Trends, 2013.



- [126] J. Zhang, E. Björnson, M. Matthaiou, D. W. K. Ng, H. Yang, e D. J. Love, "Prospective multiple antenna technologies for beyond 5G," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 38, n. 8, p. 1637–1660, 2020.
- [127] H. Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E. G. Larsson, e T. L. Marzetta, "Cell-free massive MIMO versus small cells," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 16, n. 3, p. 1834–1850, 2017.
- [128] T. C. Mai, H. Quoc Ngo, e T. Q. Duong, "Cell-free massive MIMO systems with multiantenna users," in *IEEE Global Conference on Signal and Information Processing*, 2018, p. 828–832.
- [129] E. Björnson e L. Sanguinetti, "Making cell-free massive MIMO competitive with MMSE processing and centralized implementation," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 19, n. 1, p. 77–90, 2020.
- [130] H. Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E. G. Larsson, e T. L. Marzetta, "Cell-free massive MIMO: Uniformly great service for everyone," in *IEEE 16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*, 2015, p. 201–205.
- [131] S. Jaeckel, L. Raschkowski, K. Börner, e L. Thiele, "QuaDRiGa: A 3-D multi-cell channel model with time evolution for enabling virtual field trials," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 62, n. 6, p. 3242–3256, 2014.
- [132] 3GPP, "Study on downlink multiuser superposition transmission (MUST) for LTE (release 13)," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Report (TR) 36.859, Dez. 2015. [Online]. Disponível em: https://portal.3gpp.org/desktopmodules/ Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2912
- [133] —, "New study item proposal: Study on non-orthogonal multiple access for NR," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Report RP-170829, Mar. 2017.
 [Online]. Disponível em: https://portal.3gpp.org/ngppapp/CreateTDoc.aspx?mode= view&contributionUid=RP-170829
- [134] —, "Study on non-orthogonal multiple access (NOMA) for NR (release 16)," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Report (TR) 38.812, Dez. 2018. [Online]. Disponível em: https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/ SpecificationDetails.aspx?specificationId=3236
- [135] Y. Mao, B. Clerckx, e V. O. K. Li, "Rate-splitting multiple access for downlink communication systems: bridging, generalizing, and outperforming SDMA and NOMA," *EURA-SIP Journal on Wireless Communications and Networking*, v. 2018, n. 1, p. 133, 2018.
- [136] S. M. R. Islam, N. Avazov, O. A. Dobre, e K. Kwak, "Power-domain non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems: Potentials and challenges," *IEEE Communications* Surveys Tutorials, v. 19, n. 2, p. 721–742, 2017.
- [137] Y. Liu, Z. Qin, M. Elkashlan, Z. Ding, A. Nallanathan, e L. Hanzo, "Nonorthogonal multiple access for 5G and beyond," *Proceedings of the IEEE*, v. 105, n. 12, p. 2347–2381, 2017.



- [138] M. Aldababsa, M. Toka, S. Gökçeli, G. K. Kurt, e O. Kucur, "A tutorial on nonorthogonal multiple access for 5G and beyond," Wireless Communications and Mobile Computing, 2018.
- [139] Y. Cheng, K. H. Li, Y. Liu, K. C. Teh, e H. Vincent Poor, "Downlink and uplink intelligent reflecting surface aided networks: NOMA and OMA," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, p. 1–1, 2021.
- [140] M. W. Eltokhey, M. A. Khalighi, A. S. Ghazy, e S. Hranilovic, "Hybrid NOMA and ZF pre-coding transmission for multi-cell VLC networks," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, v. 1, p. 513–526, 2020.
- [141] Y. Cai, C. Ke, Y. Ni, J. Zhang, e H. Zhu, "Power allocation for NOMA in D2D relay communications," *China Communications*, v. 18, n. 1, p. 61–69, 2021.
- [142] H. Zhang, Y. Duan, K. Long, e V. C. M. Leung, "Energy efficient resource allocation in terahertz downlink NOMA systems," *IEEE Transactions on Communications*, v. 69, n. 2, p. 1375–1384, 2021.
- [143] A. A. Nasir, H. D. Tuan, T. Q. Duong, e H. V. Poor, "UAV-enabled communication using NOMA," *IEEE Transactions on Communications*, v. 67, n. 7, p. 5126–5138, 2019.
- [144] Y. Liu, W. Yi, Z. Ding, X. Liu, O. A. Dobre, e N. Al-Dhahir, "Application of NOMA in 6G networks: Future vision and research opportunities for next generation multiple access," 2021, Disponível em: https://arxiv.org/abs/2103.02334.
- [145] Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li, e K. Higuchi, "Nonorthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access," in *IEEE 77th Vehi*cular Technology Conference, 2013, p. 1–5.
- [146] O. Maraqa, A. S. Rajasekaran, S. Al-Ahmadi, H. Yanikomeroglu, e S. M. Sait, "A survey of rate-optimal power domain NOMA with enabling technologies of future wireless networks," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 22, n. 4, p. 2192–2235, 2020.
- [147] G. Gui, M. Liu, F. Tang, N. Kato, e F. Adachi, "6G: Opening new horizons for integration of comfort, security, and intelligence," *IEEE Wireless Communications*, v. 27, n. 5, p. 126–132, 2020.
- [148] Y. Zhao, W. Zhai, J. Zhao, T. Zhang, S. Sun, D. Niyato, e K.-Y. Lam, "A comprehensive survey of 6G wireless communications," 2021, Disponível em: https://arxiv.org/abs/2101.03889.
- [149] Z. Ding, P. Fan, e H. V. Poor, "Impact of user pairing on 5G nonorthogonal multipleaccess downlink transmissions," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 65, n. 8, p. 6010–6023, 2016.
- [150] V. Wong, R. Schober, D. Ng, e L. E. Wang, Key Technologies for 5G Wireless Systems. Cambridge University Press, 2017.
- [151] A. Duel-Hallen, J. Holtzman, e Z. Zvonar, "Multiuser detection for CDMA systems," *IEEE Personal Communications*, v. 2, n. 2, p. 46–58, 1995.



- [152] R. M. Buehrer, "Equal BER performance in linear successive interference cancellation for CDMA systems," *IEEE Transactions on Communications*, v. 49, n. 7, p. 1250–1258, 2001.
- [153] M. Kobayashi, J. Boutros, e G. Caire, "Successive interference cancellation with SISO decoding and EM channel estimation," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 19, n. 8, p. 1450–1460, 2001.
- [154] L. Dai, B. Wang, Z. Ding, Z. Wang, S. Chen, e L. Hanzo, "A survey of non-orthogonal multiple access for 5G," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 20, n. 3, p. 2294– 2323, 2018.
- [155] L. Yu, Z. Liu, M. Wen, D. Cai, S. Dang, Y. Wang, e P. Xiao, "Sparse code multiple access for 6G wireless communication networks: Recent advances and future directions," *IEEE Communications Standards Magazine*, p. 1–13, 2021.
- [156] S. Vidal-Beltrán, J. L. L. Bonilla, F. M. Piñón, e J. Yalja-Montiel, "Full access gradient descent optimization algorithms for decoding SCMA signals," *International Journal of Computational Intelligence and Applications*, v. 20, n. 01, 2021.
- [157] M.-G. Berceanu, C. Florea, e S. Halunga, "Performance comparison of massive MIMO system with orthogonal and nonorthogonal multiple access for uplink in 5G systems," *Applied Sciences*, v. 10, n. 20, 2020.
- [158] C. Jiang e Y. Wang, "An uplink SCMA codebook design combining probabilistic shaping and geometric shaping," *IEEE Access*, v. 8, p. 76726–76736, 2020.
- [159] L. Yu, P. Fan, D. Cai, e Z. Ma, "Design and analysis of SCMA codebook based on star-QAM signaling constellations," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 67, n. 11, p. 10543–10553, 2018.
- [160] S. M. Hasan, K. Mahata, e M. M. Hyder, "Joint uplink SCMA codebook design for correlated fading channels," *Physical Communication*, v. 39, p. 101041, 2020.
- [161] J. Kennedy, "Bare bones particle swarms," in Proceedings of the 2003 IEEE Swarm Intelligence Symposium. SIS 03, 2003, p. 80–87.
- [162] S. Sharma, K. Deka, V. Bhatia, e A. Gupta, "Joint power-domain and SCMA-based NOMA system for downlink in 5G and beyond," *IEEE Communications Letters*, v. 23, n. 6, p. 971–974, 2019.
- [163] K. Deka e S. Sharma, "Hybrid NOMA for future radio access: Design, potentials and limitations," 2020, Disponível em: https://arxiv.org/abs/2012.08106.
- [164] Z. Yuan, G. Yu, W. Li, Y. Yuan, X. Wang, e J. Xu, "Multi-user shared access for Internet of Things," in *Proc. of the IEEE Vehicular Technology Conference*, Nanjing, China, Mai. 2016, p. 1–5.
- [165] M. Bayraktar e G. M. Guvensen, "A general framework and novel transceiver architecture based on hybrid beamforming for NOMA in massive MIMO channels," in *IEEE International Conference on Communications Workshops*, 2020, p. 1–7.


- [166] M. Bayraktar e G. M. Güvensen, "General framework and novel transceiver architecture based on hybrid beamforming for NOMA in massive MIMO channels," 2020, Disponível em: https://arxiv.org/abs/2007.04056.
- [167] O. Hayat, R. Ngah, e S. Z. M. Hashim, "Multi-user shared access (MUSA) procedure for device discovery in D2D communication," *Telecommunication Systems*, v. 76, p. 291–297, 2021.
- [168] O. Dizdar, Y. Mao, W. Han, e B. Clerckx, "Rate-splitting multiple access: A new frontier for the PHY layer of 6G," in *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2020, p. 1–7.
- [169] J. Zhang, J. Zhang, Y. Zhou, H. Ji, J. Sun, e N. Al-Dhahir, "Energy and spectral efficiency tradeoff via rate splitting and common beamforming coordination in multicell networks," *IEEE Transactions on Communications*, v. 68, n. 12, p. 7719–7731, 2020.
- [170] A. Rahmati, Y. Yapici, N. Rupasinghe, I. Guvenc, H. Dai, e A. Bhuyan, "Energy efficiency of RSMA and NOMA in cellular-connected mmwave UAV networks," in *IEEE International Conference on Communications Workshops*, 2019, p. 1–6.
- [171] Z. Lin, M. Lin, T. de Cola, J.-B. Wang, W.-P. Zhu, e J. Cheng, "Supporting IoT with rate-splitting multiple access in satellite and aerial integrated networks," *IEEE Internet* of Things Journal, p. 1–1, 2021.
- [172] Y. Mao, E. Piovano, e B. Clerckx, "Rate-splitting multiple access for overloaded cellular Internet of Things," *IEEE Transactions on Communications*, p. 1–1, 2021.
- [173] L. Lu, Y. Hu, Y. Zhang, G. Jia, J. Nie, e M. Shikh-Bahaei, "Machine learning for predictive deployment of UAVs with rate splitting multiple access," in *IEEE Globecom Workshops*, 2020, p. 1–6.
- [174] W. Jaafar, S. Naser, S. Muhaidat, P. C. Sofotasios, e H. Yanikomeroglu, "On the downlink performance of RSMA-based UAV communications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 69, n. 12, p. 16258–16263, 2020.
- [175] Z. Yang, J. Shi, Z. Li, M. Chen, W. Xu, e M. Shikh-Bahaei, "Energy efficient rate splitting multiple access (RSMA) with reconfigurable intelligent surface," in *IEEE International Conference on Communications Workshops*, 2020, p. 1–6.
- [176] A. Bansal, K. Singh, e C.-P. Li, "Analysis of hierarchical rate splitting for intelligent reflecting surfaces-aided downlink multiuser MISO communications," *IEEE Open Journal* of the Communications Society, v. 2, p. 785–798, 2021.
- [177] S. Tao, H. Yu, Q. Li, Y. Tang, e D. Zhang, "One-layer rate-splitting multiple access with benefits over power-domain NOMA in indoor multi-cell visible light communication networks," in *IEEE International Conference on Communications Workshops*, 2020, p. 1–7.
- [178] S. Naser, P. C. Sofotasios, L. Bariah, W. Jaafar, S. Muhaidat, M. Al-Qutayri, e O. A. Dobre, "Rate-splitting multiple access: Unifying NOMA and SDMA in MISO VLC channels," *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, v. 1, p. 393–413, 2020.



- [179] S. A. Naser, P. C. Sofotasios, S. Muhaidat, e M. Al-Qutayri, "Rate-splitting multiple access for indoor visible light communication networks," in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops*, 2021, p. 1–7.
- [180] D. Yu, J. Kim, e S.-H. Park, "An efficient rate-splitting multiple access scheme for the downlink of C-RAN systems," *IEEE Wireless Communications Letters*, v. 8, n. 6, p. 1555–1558, 2019.
- [181] A. A. Ahmad, Y. Mao, A. Sezgin, e B. Clerckx, "Rate splitting multiple access in C-RAN: A scalable and robust design," *IEEE Transactions on Communications*, p. 1–1, 2021.
- [182] Q. Bi, "Ten trends in the cellular industry and an outlook on 6G," *IEEE Communications Magazine*, v. 57, n. 12, p. 31–36, 2019.
- [183] EPIC Project, "EPIC project web site," [Online]. Disponível em: https://epic-h2020.eu/. Acessado em: 06 de abril de 2021.
- [184] Y. Zhang, K. Peng, Z. Chen, e J. Song, "Construction of rate-compatible raptor-like quasi-cyclic LDPC code with edge classification for IDMA based random access," *IEEE Access*, v. 7, p. 30818–30830, 2019.
- [185] D.-f. Zhao, H. Tian, e R. Xue, "Adaptive rate-compatible non-binary LDPC coding scheme for the B5G mobile system," *Sensors*, v. 19, p. 1067, Mar. 2019.
- [186] H. D. Vu, T. V. Nguyen, D. N. Nguyen, e H. T. Nguyen, "On design of protograph LDPC codes for large-scale MIMO systems," *IEEE Access*, v. 8, p. 46017–46029, 2020.
- [187] D. Divsalar, S. Dolinar, C. R. Jones, e K. Andrews, "Capacity-approaching protograph codes," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 27, n. 6, p. 876–888, 2009.
- [188] C. Tang, M. Jiang, C. Zhao, e H. Shen, "Design of protograph-based LDPC codes with limited decoding complexity," *IEEE Communications Letters*, v. PP, p. 1–1, Set. 2017.
- [189] X. Wu, M. Jiang, C. Zhao, L. Ma, e Y. Wei, "Low-rate PBRL-LDPC codes for URLLC in 5G," *IEEE Wireless Communications Letters*, v. 7, n. 5, p. 800–803, 2018.
- [190] R. Tanner, "A recursive approach to low complexity codes," *IEEE Transactions on In*formation Theory, v. 27, n. 5, p. 533–547, 1981.
- [191] W. E. Ryan, "An introduction to LDPC codes," in CRC Handbook for Coding and Signal Processing for Recording Systems. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2004.
- [192] A. Süral, E. G. Sezer, Y. Ertuğrul, O. Arikan, e E. Arikan, "Terabits-per-second throughput for polar codes," in *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 2019, p. 1–7.
- [193] C. Kestel, L. Johannsen, O. Griebel, J. Jimenez, T. Vogt, T. Lehnigk-Emden, e N. Wehn, "A 506 Gbit/s polar successive cancellation list decoder with CRC," Set. 2020, Disponível em: https://doi.org/10.5281/zenodo.4032422.
- [194] N. Wehn, "Channel coding for Tb/s communications," Ago. 2019, Disponível em: https://doi.org/10.5281/zenodo.3360520.



- [195] H. Gamage, V. Ranasinghe, N. Rajatheva, e M. Latva-aho, "Low latency decoder for short blocklength polar codes," in *European Conference on Networks and Communications*, 2020, p. 305–310.
- [196] S. Weithoffer, C. A. Nour, N. Wehn, C. Douillard, e C. Berrou, "25 years of turbo codes: From mb/s to beyond 100 gb/s," in *IEEE International Symposium on Turbo Codes Iterative Information Processing*, 2018, p. 1–6.
- [197] S. Weithoffer, R. Klaimi, C. Nour, N. Wehn, e C. Douillard, "Fully pipelined iteration unrolled decoders - The road to Tb/s Turbo decoding," *International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Ago. 2020.
- [198] S. Weithoffer, O. Griebel, R. Klaimi, C. A. Nour, e N. Wehn, "Advanced hardware architectures for turbo code decoding beyond 100 Gb/s," in *IEEE Wireless Communications* and Networking Conference (WCNC), 2020, p. 1–6.
- [199] V. H. S. Le, C. Abdel Nour, E. Boutillon, e C. Douillard, "Revisiting the Max-Log-Map algorithm with SOVA updates rules: new simplifications for high-radix SISO decoders," *IEEE Transactions on Communications*, Dez. 2019.
- [200] P. Robertson, E. Villebrun, e P. Hoeher, "A comparison of optimal and sub-optimal map decoding algorithms operating in the log domain," in *Proceedings IEEE International Conference on Communications ICC '95*, v. 2, 1995, p. 1009–1013 vol.2.
- [201] M. Fossorier, F. Burkert, S. Lin, e J. Hagenauer, "On the equivalence between SOVA and max-log-MAP decodings," *IEEE Commun. Lett.*, v. 2, n. 5, p. 137–139, 1998.
- [202] S. Weithoffer, R. Klaimi, C. A. Nour, N. Wehn, e C. Douillard, "Low-complexity computational units for the local-sova decoding algorithm," in *IEEE Annual International* Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2020, p. 1–6.
- [203] A. F. Demir, M. Elkourdi, M. Ibrahim, e H. Arslan, "Waveform design for 5g and beyond," arXiv preprint arXiv:1902.05999, 2019.