



Comunicações Aprimoradas em Áreas Remotas (eRAC)

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

Inatel

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

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

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

Índice

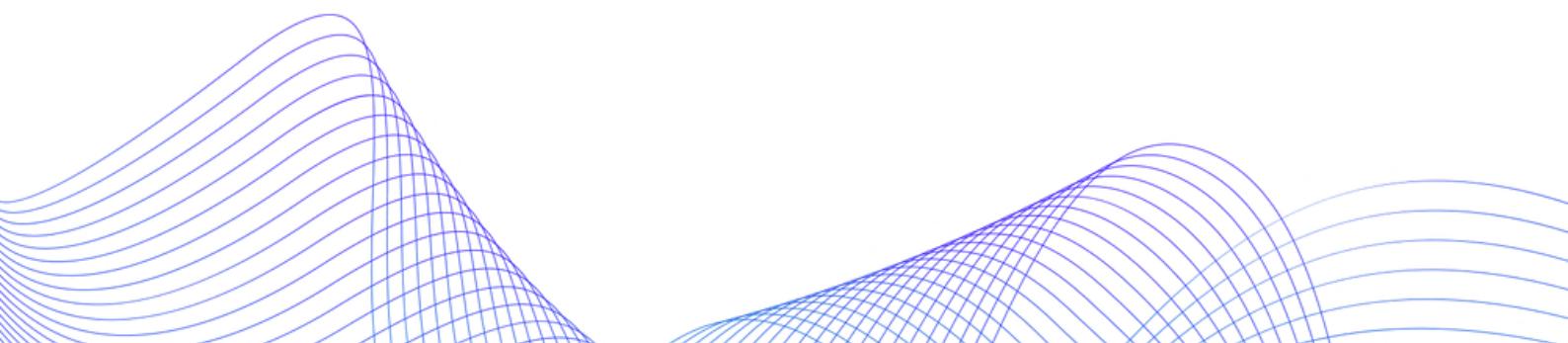
1. Introdução.....	1
2. Casos de Uso no Cenário eRAC.....	2
2.1 Agronegócio e Agricultura Inteligente para Áreas Remotas.....	3
2.2 Conectividade de Voz e Dados em Longas Distâncias para Áreas Remotas.....	5
2.3 <i>Backhaul</i> Sem Fio e Conexões Locais de Alta Qualidade.....	8
2.4 Atendimento de Saúde Remoto (e-Health).....	10
3. Estrutura de Quadros e Numerologia Escalável Aplicadas aos Casos de Uso do 5G-RANGE.....	13
4. Relação entre Casos de Uso e Numerologias do 5G-RANGE.....	18
5. Desafios e Perspectivas para as Redes 6G.....	19
5.1 Proposta de Implementação do Transceptor 6G.....	20
6. Conclusão.....	21

1. Introdução

As Comunicações Aprimoradas em Áreas Remotas (*Enhanced Remote Area Communications*, eRAC) configuram-se como um dos cenários mais relevantes para a evolução das redes de sexta geração (6G), ao buscar mitigar a lacuna digital presente em regiões afastadas dos grandes centros urbanos. Esse avanço tem como propósito fomentar o desenvolvimento econômico e a inclusão digital em setores estratégicos, como agronegócio, mineração, logística e saúde, que dependem cada vez mais de soluções de conectividade para viabilizar automação, monitoramento, rastreabilidade e o suporte à operação de dispositivos de Internet das Coisas (*Internet of Things*, IoT).

As redes móveis de quinta geração (5G) proporcionaram avanços em Banda Larga Móvel Aprimorada (*enhanced Mobile Broadband*, eMBB), Comunicações Ultraconfiáveis e de Baixa Latência (*Ultra-Reliable Low Latency Communications*, URLLC) e Comunicações Massivas do Tipo Máquina (*massive Machine-Type Communications*, mMTC). No entanto, esses avanços têm sido viabilizados predominantemente pelo uso de faixas de sub-6 GHz e de ondas milimétricas (*millimeter Wave*, mmWave), que oferecem alta capacidade, mas resultam em células de menor alcance. Essa característica atende de forma eficaz áreas densamente povoadas, mas ainda apresenta limitações de cobertura em regiões de baixa densidade populacional.

Nesse contexto, o projeto *Remote Area Access Network for 5th Generation* (5G-RANGE) foi concebido para enfrentar esses desafios, diferenciando-se das especificações tradicionais do *International Mobile Telecommunications-2020* (IMT-2020) para as redes 5G, baseadas no 5G New Radio (5G NR), que é o padrão de interface aérea definido pelo 3rd Generation Partnership Project (3GPP) para as redes móveis de quinta geração. O 5G-RANGE propõe uma rede celular de longo alcance, com células de raio superiores a 50 km, fundamentada no uso do espectro não licenciado, denominado *TV White Spaces* (TVWS), que corresponde a faixas ociosas originalmente destinadas à transmissão de TV analógica ou digital. Essas frequências, disponíveis principalmente nas faixas de *Very High Frequency* (VHF) e *Ultra High Frequency* (UHF), apresentam excelentes características de propagação em longas distâncias, o que as torna especialmente adequadas para ampliar a conectividade em áreas rurais e remotas.



Considerando a diversidade de cenários e requisitos operacionais envolvidos, que abrangem desde aplicações de baixa mobilidade e longo alcance até comunicações em alta velocidade, o sistema 5G-RANGE foi projetado para garantir flexibilidade por meio da adoção de múltiplas numerologias na camada física, de forma análoga ao que foi proposto no 5G NR.

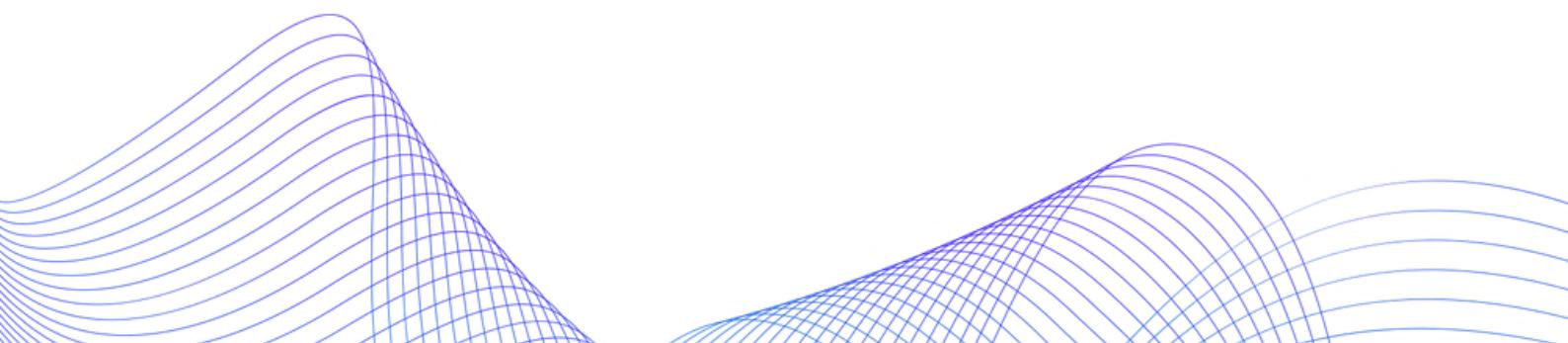
Para equilibrar essas demandas, foram definidas seis numerologias distintas (ID 0 a 5), que variam o espaçamento entre subportadoras (*Subcarrier Spacing, SCS*), permitindo ajustar o desempenho do sistema conforme as condições de propagação e o tipo de aplicação.

O escalonamento da numerologia é definido de forma inversa, de modo que tanto a duração do símbolo quanto a do prefixo cíclico (*Cyclic Prefix, CP*) sejam ajustadas proporcionalmente. Esse mecanismo assegura que um número inteiro de símbolos, independentemente da numerologia adotada, alinhe-se precisamente às fronteiras de duração do subquadro, viabilizando a coexistência eficiente de diferentes numerologias dentro da mesma estrutura de quadro.

Dessa forma, serão analisados os principais casos de uso associados ao eRAC no âmbito do 5G, considerando as diferentes numerologias, um conceito inerente ao padrão 5G e explorado no projeto 5G-RANGE. Adicionalmente, discute-se a perspectiva para as redes 6G, nas quais a flexibilidade da camada física e o uso de múltiplas numerologias também tornam-se essenciais para garantir conectividade ubíqua e eficiente em diferentes contextos, com atenção especial à aplicação de um transceptor 6G inovador em cenários de *backhaul* sem fio e conexões locais de alta qualidade.

2. Casos de Uso no Cenário eRAC

O projeto 5G-RANGE tem como objetivo adaptar as redes 5G ao cenário eRAC, promovendo serviços sustentáveis e implantações de rede economicamente viáveis em áreas rurais, remotas e de baixa densidade populacional. Para isso, foram definidos quatro casos de uso complementares aos cenários originais do IMT-2020 (eMBB, URLLC e mMTC). Ao contrário dos cenários que privilegiam alta densidade de usuários e células de pequena cobertura, esses casos priorizam o alcance de longas distâncias, a baixa densidade de dispositivos e o aproveitamento dos TVWSs.



A escolha dos casos de uso levou em conta, sobretudo, seu potencial de gerar impacto social e econômico em comunidades isoladas.

2.1 Agronegócio e Agricultura Inteligente para Áreas Remotas

Este caso de uso contempla o mercado vertical da agroindústria, com foco em prover conectividade confiável e infraestrutura de rede em áreas rurais e remotas, de forma sustentável e economicamente viável. O sistema deve oferecer suporte a serviços em tempo real, como coleta e análise de dados, monitoramento de culturas, rastreabilidade da produção, diagnóstico e manutenção remota, além de monitoramento pecuário, incluindo a contagem de rebanho. A Tabela 1 apresenta os principais requisitos quantitativos definidos para esse caso de uso.

Esses parâmetros refletem as demandas de conectividade em ambientes rurais, nos quais é essencial assegurar comunicação eficiente entre dispositivos IoT distribuídos em grandes áreas de cultivo e exploração agrícola.

Tabela 1. Requisitos quantitativos (Agronegócio e Agricultura Inteligente).

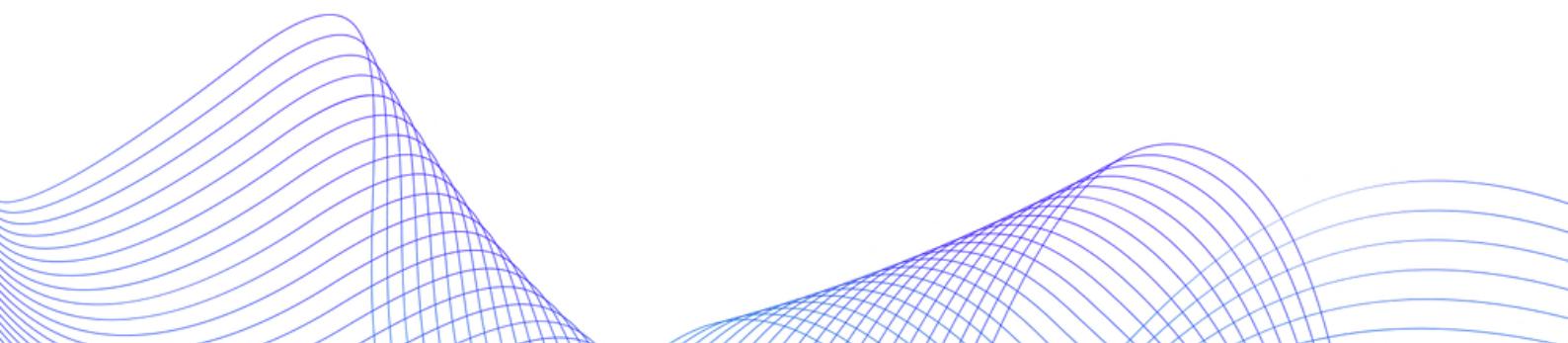
Requisitos	Especificação
Frequência de Portadora	< 3,5GHz Prioridade na faixa de 700 MHz.
Latência Fim a Fim	50 ms (do dispositivo IoT até a interface da rede de dados).
Confiabilidade	> 99,9% (com possibilidade de retransmissões de pacotes na camada de rede).
Taxa de Transmissão (Experiência do Usuário)	1 Mbps por dispositivo IoT.
Mobilidade	Média, até 60 km/h (velocidade típica de veículos agrícolas em campo).

Cobertura da Célula	Até 100 km.
Densidade de Usuários	Baixa densidade, ≤ 2 nós de acesso / km ² .

A arquitetura conceitual de conectividade para o caso de uso Agronegócio e Agricultura Inteligente é ilustrada na Figura 1, em que sensores e dispositivos embarcados, como sensores de campo, módulos de GPS, câmeras, computadores de bordo e sistemas de exibição veicular, são integrados por meio do barramento de Rede de Área do Controlador (*Controller Area Network*, CAN), padrão amplamente utilizado em máquinas agrícolas. Esses dispositivos possibilitam a coleta de informações em tempo real sobre o maquinário, sua localização, as operações e as condições do ambiente. O *Gateway* (GW) agrega e transmite os dados por Wi-Fi ou rede celular para a Estação Rádio Base (ERB).

A ERB opera em bandas licenciadas e em faixas de TVWS, como VHF e UHF, que proporcionam longo alcance em áreas rurais e remotas, conectando o GW ao núcleo da rede. O núcleo é responsável pelo gerenciamento, fatiamento de rede e garantia da qualidade de serviço (*Quality of Service*, QoS), enquanto os dados processados são disponibilizados a operadores externos do agronegócio para aplicações como monitoramento remoto, automação, rastreabilidade e suporte à decisão.

Vale destacar que, embora este caso de uso ofereça suporte à Comunicação do Tipo Máquina (*Machine-Type Communications*, MTC), o modelo de implantação massiva definido pelo IMT-2020 não se aplica, pois contraria a premissa de baixa densidade de usuários. Nesse contexto, a limitação é superada pelo uso de gateways (GWs) instalados nos veículos agrícolas. Esses GWs concentram a coleta e a transmissão de dados provenientes de sensores embarcados, câmeras, sistemas de posicionamento global (*Global Positioning System*, GPS), tecnologias de identificação por radiofrequência (*Radio Frequency Identification*, RFID) e computadores de bordo, entre outros, assegurando a conectividade necessária, já que a maioria desses dispositivos já se encontra integrada ao próprio maquinário.



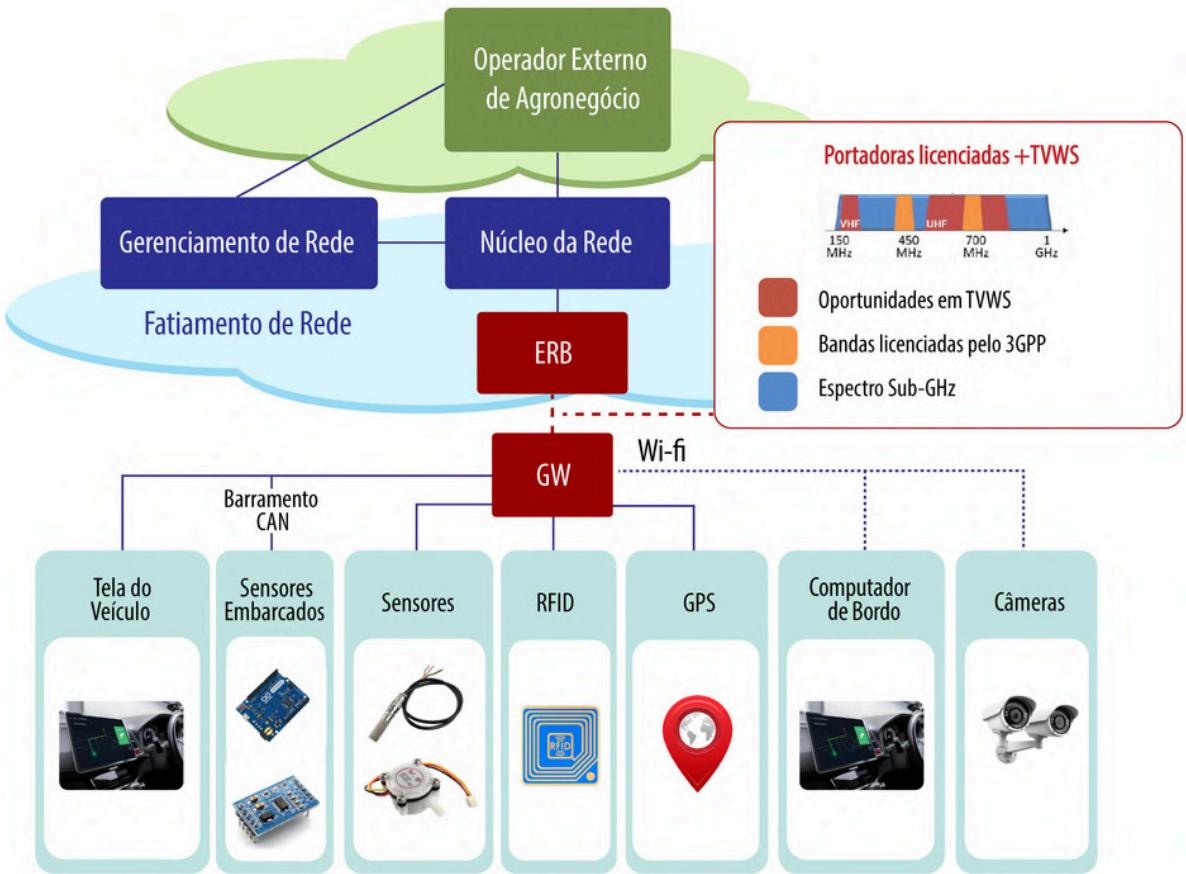


Figura 1. Arquitetura conceitual de conectividade para o caso de uso Agronegócio e Agricultura Inteligente.

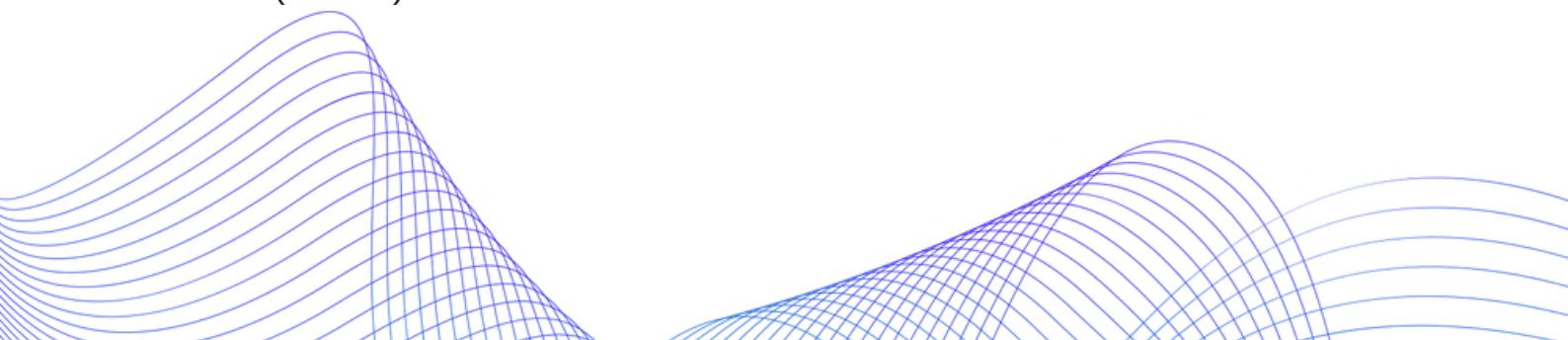
2.2 Conectividade de Voz e Dados em Longas Distâncias para Áreas Remotas

Este caso de uso tem como objetivo viabilizar o acesso a aplicações típicas da internet em regiões de grande extensão geográfica, abrangendo tanto áreas rurais quanto localidades remotas. O foco está em garantir conectividade sob requisitos de cobertura extrema, mesmo em cenários de baixa densidade de usuários. Embora seja voltado principalmente para o atendimento de demandas humanas, também pode contemplar dispositivos e aplicações máquina a máquina. A Tabela 2 apresenta os principais requisitos quantitativos definidos para este caso de uso, estabelecendo as condições mínimas de desempenho da rede necessárias para garantir serviços básicos de comunicação e aplicações digitais.

Tabela 2. Requisitos quantitativos (Conectividade de Voz e Dados).

Requisitos	Especificação
Frequência de Portadora	< 3,5GHz
Latência Fim a Fim	100 ms
Confiabilidade	> 90%
Taxa de Transmissão (Experiência do Usuário)	<ul style="list-style-type: none"> • 500 Kbps para serviços de voz sobre IP (VoIP); • 100 Mbps para aplicações web; • Observação: Na borda da célula (50 km), a taxa máxima de dados em downlink, considerando um único usuário em condição estacionária, é de 100 Mbps.
Mobilidade	Média, até 60 km/h (velocidade típica de veículos agrícolas em campo).
Cobertura da Célula	Até 100 km.
Densidade de Usuários	Baixa densidade, ≤ 2 usuários/km ² .

Entre os serviços previstos estão: navegação web avançada, correio eletrônico, VoIP, multimídia baseada na web, conferências audiográficas, compartilhamento de arquivos e vídeo interativo. A Figura 2 apresenta o caso de uso Conectividade de Voz e Dados em Áreas Remotas, no qual uma ERB instalada em uma torre central opera em frequências abaixo de 1 GHz (< 1 GHz).



Essas faixas são especialmente adequadas para ambientes rurais, pois apresentam excelente propagação de sinal em longas distâncias, permitindo coberturas superiores a 50 km de raio. O sistema viabiliza aplicações como serviços de voz, acesso à internet, monitoramento agrícola e coleta de dados, atendendo tanto usuários quanto dispositivos por meio de equipamentos nas instalações do cliente (*Customer Premises Equipment*, CPEs).

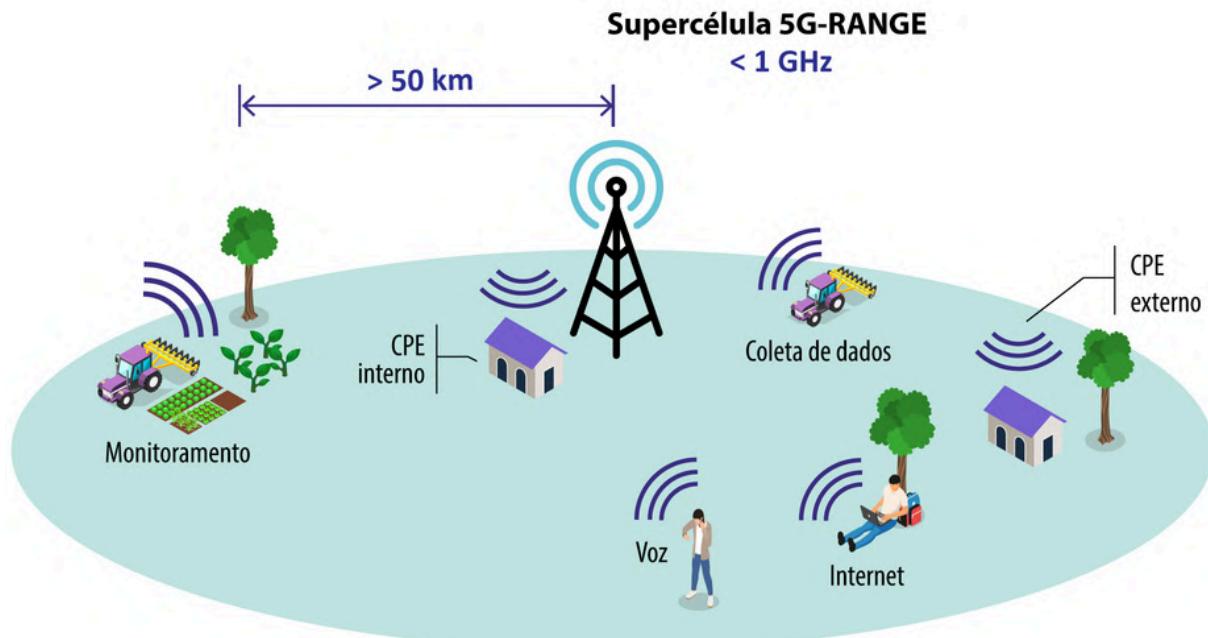


Figura 2. Cenário ilustrativo de Conectividade de Voz e Dados em áreas remotas por meio da supercélula 5G-RANGE (< 1 GHz), com cobertura superior a 50 km.

O conceito de supercélula (*super cell*) do 5G-RANGE, que consiste em uma célula de grande alcance projetada para atender regiões rurais e remotas, demonstra a capacidade da rede de oferecer múltiplos serviços simultaneamente em áreas de baixa densidade populacional. Essa arquitetura utiliza uma infraestrutura simplificada e aproveita o espectro não licenciado disponível em canais de TVWS, garantindo conectividade para comunidades, produtores rurais, serviços essenciais e aplicações de agricultura inteligente. Dessa forma, o modelo contribui para a inclusão digital e o aumento da eficiência operacional em ambientes tradicionalmente desassistidos.

Apesar das vantagens oferecidas pelo 5G NR em termos de desempenho e capacidade, sua arquitetura típica, baseada em alta densidade de ERB não se ajusta às necessidades de cobertura de áreas rurais e remotas, onde as longas distâncias e a baixa concentração de usuários exigem soluções específicas de conectividade.

2.3 Backhaul Sem Fio e Conexões Locais de Alta Qualidade

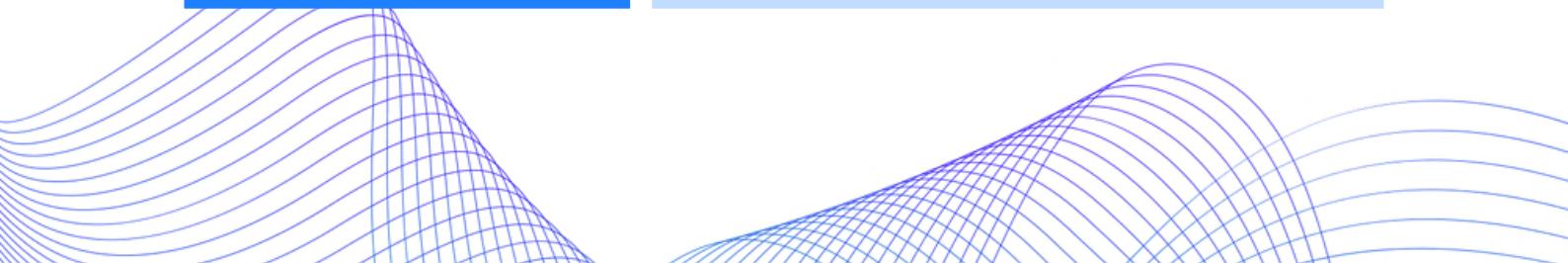
O foco deste caso de uso é prover *backhaul* sem fio para localidades rurais e remotas que não dispõem de acesso à internet ou rede celular, ou que contam apenas com taxas de dados bastante limitadas. Entre os cenários contemplados estão escolas, vilarejos, fazendas, áreas turísticas e instalações industriais isoladas, como as de mineração. A infraestrutura é composta por uma ERB 5G-RANGE instalada em torre de TV, capaz de estabelecer enlaces de linha de visada (*Line-of-Sight, LoS*) de até 50 km, utilizando canais de TVWS dentro das faixas de VHF e UHF, identificados por meio de sensoriamento espectral. Esses enlaces conectam-se às ERBs remotas, implementadas como pequenas células em áreas rurais, que operam de forma transparente em relação ao núcleo da rede.

Dessa maneira, o tráfego de dados e sinalização é encaminhado sem que os usuários percebam a existência do *backhaul* intermediário. As ERBs remotas funcionam como uma extensão natural da rede principal, mantendo os mesmos processos de autenticação, mobilidade e QoS providos pelo núcleo. Com isso, os usuários móveis acessam os serviços por meio das ERBs remotas instaladas nessas localidades rurais, usufruindo de conectividade contínua e de alto desempenho.

A Tabela 3 apresenta os principais requisitos quantitativos do caso de uso *Backhaul Sem Fio e Conexões Locais de Alta Qualidade*, voltado a prover conectividade em áreas rurais e remotas por meio da interligação entre ERBs. Esses parâmetros demonstram que o sistema é projetado para cenários de baixa densidade populacional, assegurando, contudo, alta confiabilidade, estabilidade e desempenho, de forma a oferecer conectividade contínua e transparente em localidades afastadas dos grandes centros.

Tabela 3. Requisitos quantitativos (*Backhaul Sem Fio*).

Requisitos	Especificação
Frequência de Portadora	< 3,5GHz Prioridade na faixa de 700 MHz.
Confiabilidade	99,5%



Taxa de Transmissão (Backhaul)	Na borda da célula, a 50 km da ERB, a taxa máxima de transmissão em downlink por enlace é de 100 Mbps.
Mobilidade	Estática. Neste caso, o UE corresponde a uma ERB remota implementada como pequena célula (<i>small cell</i>).
Cobertura da ERB Remota (<i>Small Cell</i>)	Raio de cobertura de 0,5 km.
Densidade de Usuários	Baixa densidade, $\leq 0,1$ usuário/km ² (cada usuário corresponde a uma ERB remota).

A Figura 3 ilustra um transceptor instalado em uma torre de TV, atuando como ponto de *backhaul* sem fio e estabelecendo a conexão com ERBs remotas distribuídas em vilarejos, fazendas, áreas industriais e ferroviárias. Essas ERBs funcionam como pequenas células responsáveis por prover cobertura local e conectividade direta aos usuários finais.

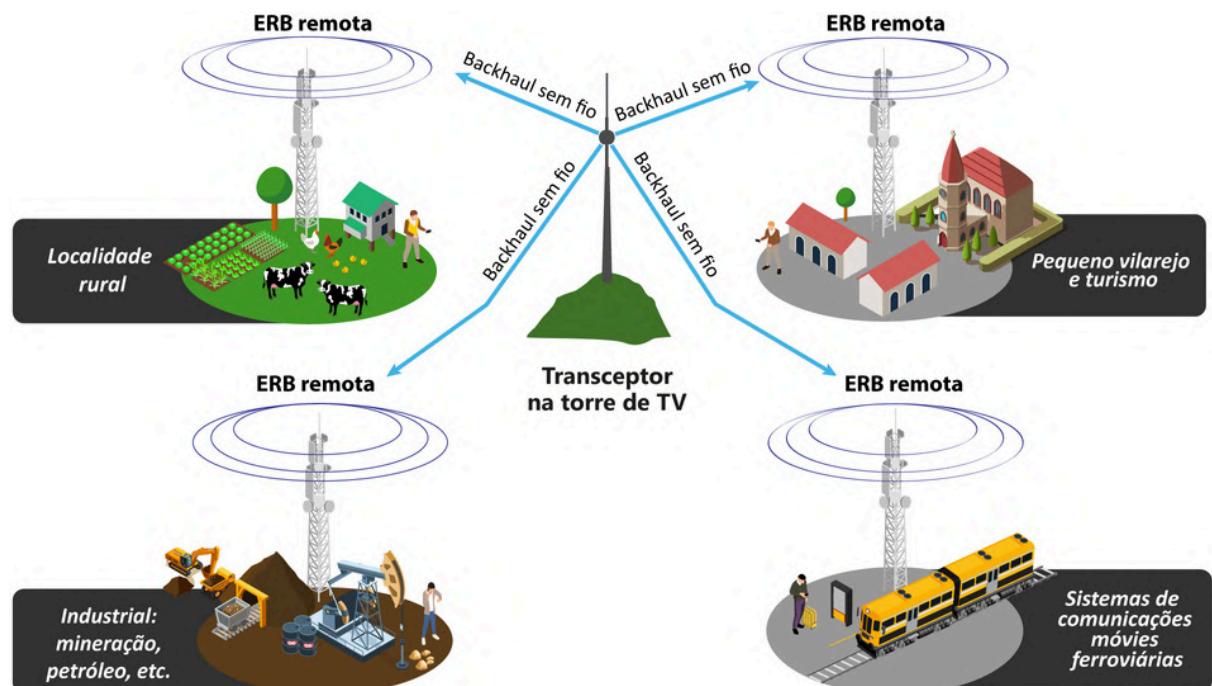


Figura 3. Exemplo de *backhaul* sem fio com transceptor em torre de TV conectando ERBs remotas em áreas rurais e locais de difícil acesso.

Neste caso de uso, o objetivo é garantir conectividade de alta capacidade e baixa latência em locais onde a implantação de infraestrutura cabeada ou óptica é inviável. Em regiões remotas, áreas industriais ou de topografia complexa, o 5G NR, em sua configuração tradicional de acesso, não é suficiente para atender à demanda de transporte de dados entre as ERBs e o núcleo da rede. Enquanto o 5G NR prioriza a conexão direta com usuários e dispositivos finais, o *backhaul* sem fio atua na interligação entre nós de rede, sendo essencial para a sustentação do tráfego de voz, vídeo e dados em áreas de difícil acesso.

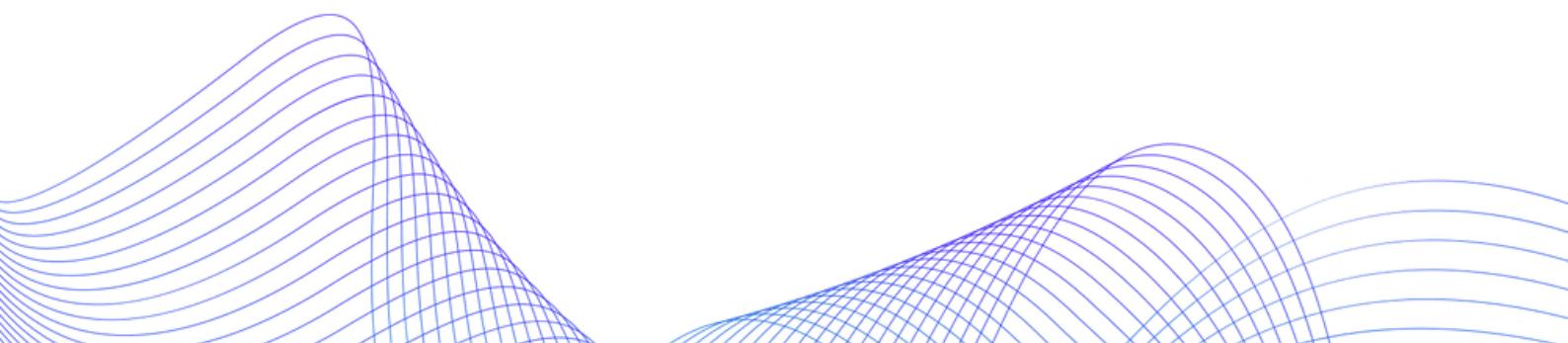
2.4 Atendimento de Saúde Remoto (e-Health)

O caso de uso Atendimento de Saúde Remoto (*e-Health*) tem como objetivo oferecer assistência médica em áreas rurais e remotas, garantindo conectividade confiável mesmo em regiões de difícil acesso. Considera-se a disponibilidade de comunicação em banda larga com latência reduzida, permitindo que o ecossistema de *e-Health* forneça suporte em tempo real.

Nesse contexto, uma das situações previstas envolve uma ambulância em deslocamento com alta velocidade dentro da área de cobertura de uma supercélula (*super cell*). Esse tipo de infraestrutura assegura a manutenção da conexão contínua com serviços de voz e vídeo, viabilizando altas taxas de dados e baixa latência, suficientes para suportar videoconferências em alta definição durante todo o trajeto. A Tabela 4 apresenta os principais serviços contemplados no caso de uso *e-Health*.

Tabela 4. Serviços que compõem o ecossistema de *e-Health*.

Serviços	Descrição
Primeiros Socorros	Durante a chamada aos serviços de emergência, uma videoconferência auxilia o centro de atendimento a fornecer instruções iniciais de primeiros socorros, garantindo a segurança do paciente enquanto aguarda a ambulância. Também permite transmitir informações adicionais à equipe de resgate, tornando-a mais eficiente.



Atendimento na Ambulância	Como o tempo até a chegada ao hospital pode ser longo, a equipe hospitalar deve ser constantemente atualizada com informações em tempo real e imagens de vídeo, preparando-se adequadamente para receber o paciente.
Atendimento Hospitalar	Refere-se ao tratamento final do paciente, que não depende diretamente das tecnologias inovadoras do 5G. Porém, durante o atendimento pré-hospitalar, o resgate ou mesmo em monitoramentos de rotina, os médicos podem acompanhar a situação, fornecer instruções e realizar intervenções.

Além desses, também podem ser incorporados serviços complementares, como consultas odontológicas e dermatológicas remotas, além de sessões de psicologia realizadas a distância. A Tabela 5 apresenta os principais requisitos quantitativos do caso de uso e-Health, destacando os parâmetros essenciais para assegurar conectividade estável e confiável em cenários críticos. Esses requisitos evidenciam a viabilidade do suporte ao e-Health em redes de longo alcance, garantindo eficiência, robustez e qualidade no fornecimento de serviços médicos à distância.

Tabela 5. Requisitos quantitativos (e-Health).

Requisitos	Especificação
Frequência de Portadora	< 3,5GHz Prioridade na faixa de 700 MHz.
Latência Fim a Fim	50 ms
Confiabilidade	> 99%
Taxa de Transmissão (Experiência do Usuário)	Na borda da célula, a 50 km da ERB, a taxa máxima de transmissão em <i>downlink</i> por enlace é de 100 Mbps.

Mobilidade	Até 120 km/h.
Cobertura da Célula	<ul style="list-style-type: none"> Monitoramento: até 100 km; Multimídia: estática.
Densidade de Usuários	Baixa densidade, ≤ 2 usuários/km ² .

A Figura 4 ilustra esse caso de uso no contexto de áreas rurais e remotas, evidenciando como a infraestrutura do 5G-RANGE, por meio de supercélulas, associada a altas taxas de dados e baixa latência, viabiliza a criação de um ecossistema de *e-Health* completo, abrangendo desde o atendimento inicial de primeiros socorros até o acompanhamento hospitalar.



Figura 4. Cenário ilustrativo de *e-Health*, contemplando serviços como consultas médicas online, videoconferências, monitoramento remoto de pacientes e rastreamento de ambulâncias.

Embora este caso de uso se beneficie das capacidades do 5G NR para aplicações críticas em saúde, o modelo tradicional de implantação, voltado a ambientes urbanos e de alta densidade de usuários, não é o mais adequado neste contexto, uma vez que os serviços de saúde remotos exigem ampla cobertura, estabilidade de conexão e latência extremamente baixa, inclusive em áreas rurais e isoladas.

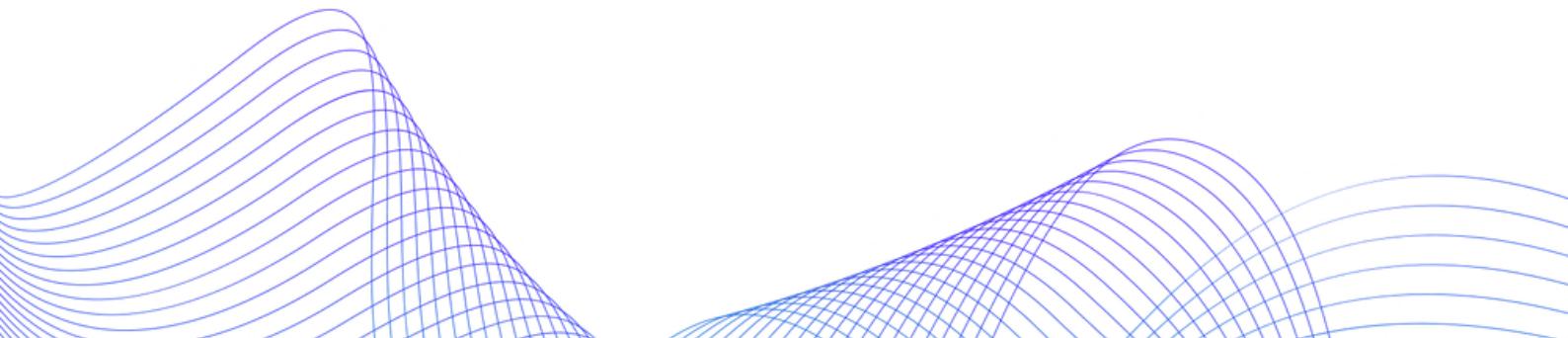
3. Estrutura de Quadros e Numerologia Escalável Aplicadas aos Casos de Uso do 5G-RANGE

O 5G-RANGE utiliza o mesmo princípio de numerologia escalável empregado no 5G NR, o que possibilita lidar de forma eficiente com diferentes casos de uso e requisitos operacionais, especialmente em cenários que exigem comunicações de longo alcance e suporte à mobilidade em áreas rurais e remotas. As transmissões são organizadas em quadros que definem a estrutura temporal dos dados transmitidos.

A Figura 5 apresenta a estrutura de quadro no domínio do tempo para o sistema 5G-RANGE. Cada quadro é composto por um conjunto de subquadros de mesma duração, dentro dos quais são distribuídos os símbolos, formados por um CP seguido pela parte útil do símbolo. A quantidade de símbolos em cada subquadro varia conforme a numerologia selecionada. Além disso, diferentes numerologias, identificadas por distintos valores de SCS, podem coexistir em um mesmo quadro, proporcionando flexibilidade e eficiência na adaptação às condições de propagação e aos diversos cenários de aplicação.

O sistema adota a forma de onda Multiplexação por Divisão de Frequência Generalizada (*Generalized Frequency Division Multiplexing*, GFDM), uma alternativa à Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, OFDM), que oferece não apenas maior flexibilidade espectral e melhor controle da interferência entre subportadoras como também emissões fora de faixa reduzidas.

Para atender regiões rurais e remotas e com baixa mobilidade, foi necessário ajustar a numerologia empregada em relação ao 5G NR, de modo a flexibilizar o SCS. Em particular, valores de m distintos, incluindo valores fracionários e negativos, foram considerados no parâmetro que define o SCS, permitindo adaptar continuamente o tempo de símbolo às condições do canal. Com essa parametrização, valores menores de Δf (obtidos para $m \leq 0$) aumentam o tempo útil de símbolo, tornando o sistema mais robusto a grandes dispersões temporais e baixa mobilidade, enquanto valores maiores de m favorecem cenários de alta mobilidade e menores atrasos de propagação. Essa flexibilidade é fundamental para a operação do transceptor proposto em regime TVWS, garantindo robustez e eficiência espectral em enlaces de longa distância.



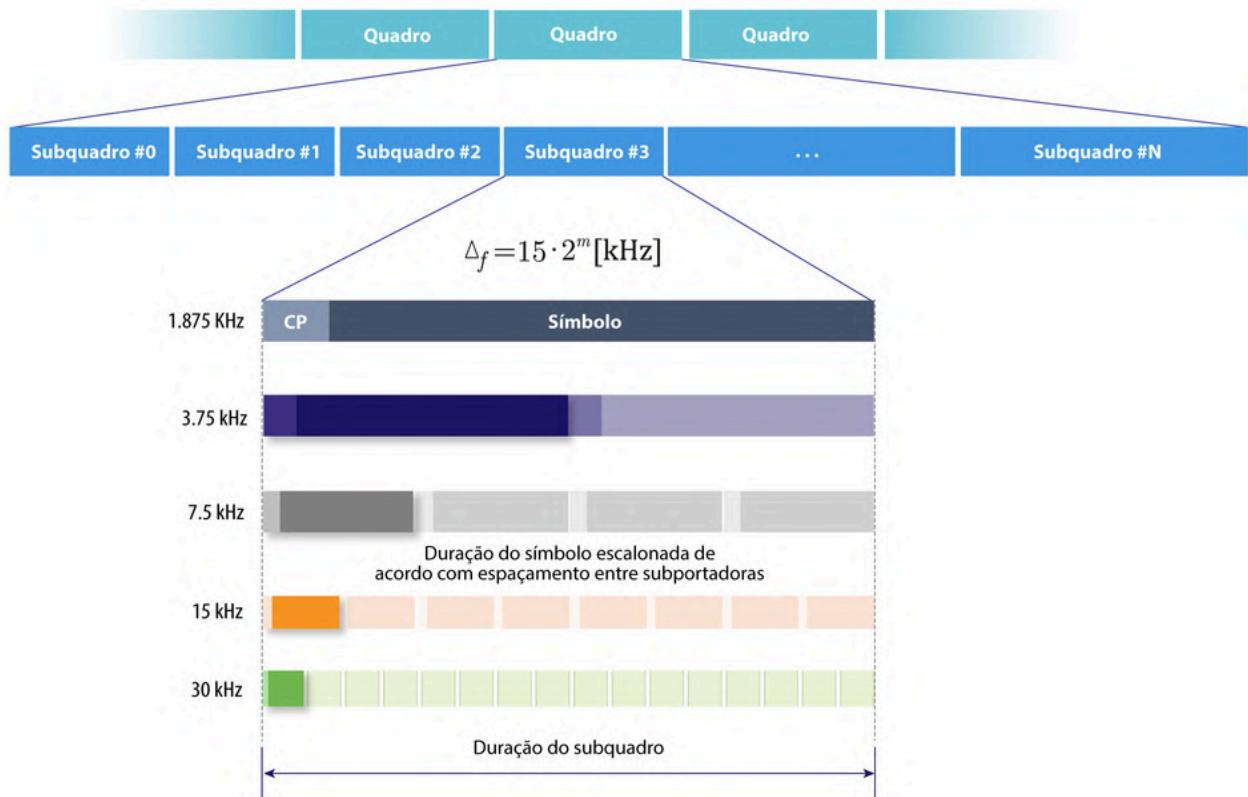


Figura 5. Estrutura de quadro no domínio do tempo mostrando o alinhamento de múltiplas numerologias.

É importante observar que, embora cada numerologia possua símbolos com durações distintas em razão da variação no espaçamento entre subportadoras, o sistema organiza o tempo de forma que todos os símbolos se alinhem exatamente nos limites dos subquadros. Assim, uma numerologia com subportadoras mais próximas, como 1,875 kHz, resulta em símbolos mais longos, apropriados para transmissões em longas distâncias e ambientes sujeitos a forte multipercorso. Por outro lado, uma numerologia com subportadoras mais espaçadas, como 30 kHz, gera símbolos mais curtos, apropriados para usuários com alta mobilidade e menores atrasos de propagação.

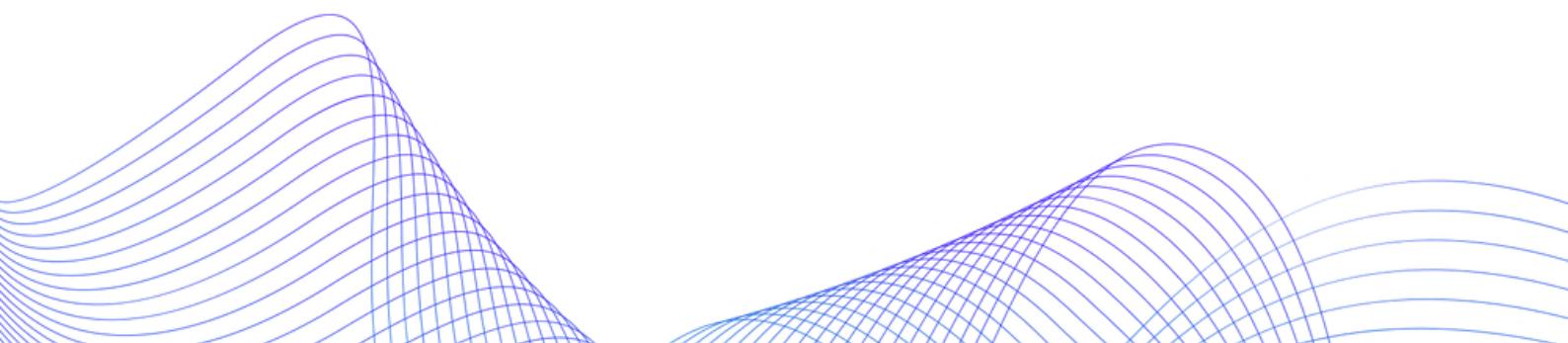
Mesmo com essas diferenças, o sistema define a duração dos subquadros de modo que todos os símbolos, independentemente de sua numerologia, terminem simultaneamente. Essa característica permite a coexistência de múltiplas numerologias dentro de um mesmo quadro de transmissão, evitando sobreposição e interferência. Dessa forma, usuários com diferentes requisitos de comunicação, como baixa latência, alta mobilidade ou longo alcance, podem ser atendidos ao mesmo tempo, mantendo a sincronização temporal e garantindo uma operação eficiente na interface aérea.

A Tabela 6 apresenta os parâmetros de duração de símbolo para diferentes numerologias no sistema 5G-RANGE. Cada numerologia (ID) é definida principalmente pelo SCS, parâmetro fundamental para a escalabilidade temporal e em frequência. Os valores apresentados refletem as premissas de projeto relacionadas ao alcance, mobilidade e faixa de operação de cada caso de uso, estabelecendo um equilíbrio entre eficiência espectral e complexidade computacional.

À medida que o SCS aumenta, os símbolos se tornam mais curtos, o que é vantajoso em cenários de alta mobilidade e com menores atrasos de propagação. Em contrapartida, valores menores de SCS produzem símbolos mais longos, ideais para alcances estendidos e canais com forte multipercorso, típicos de áreas rurais e remotas.

Tabela 6. Duração dos símbolos para diferentes numerologias no sistema 5G-RANGE, considerando a forma de onda GFDM.

Numerologia ID	SCS [kHz]	CP [μs]	CS [μs]	Símbolo [μs]	Subquadro [μs]	Símbolos por subquadro
0	1,875	141,7	25	2133,33	4600	2
1	3,75	70,8	12,5	1066,67	4600	4
2	7,5	35,4	6,25	533,33	4600	8
3	15	17,7	3,13	266,67	4600	16
4	30	8,9	1,57	133,33	4600	32
5	30	4,4	0,78	66,67	4600	64

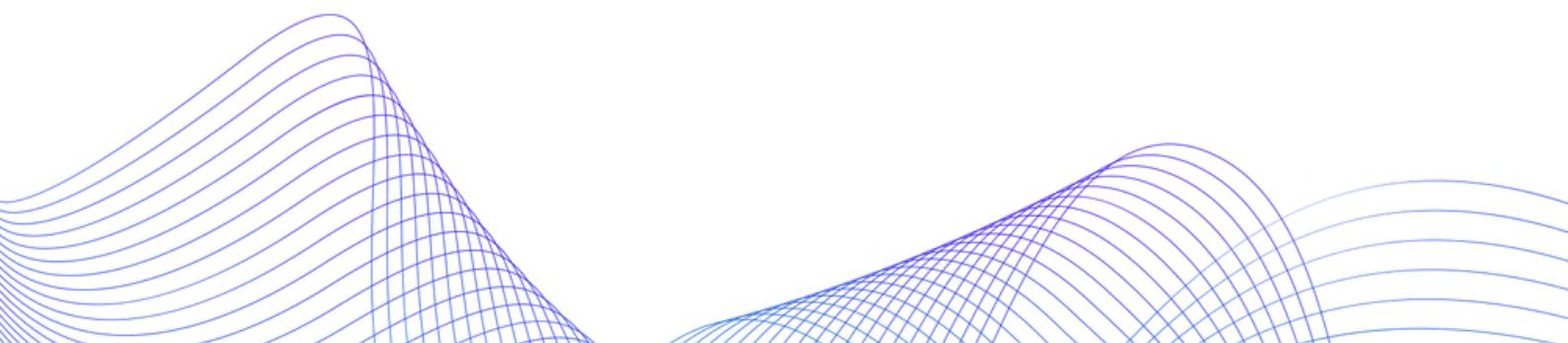


A tabela também apresenta os seguintes parâmetros técnicos:

- **Prefixo Cíclico (CP):** representa a duração do prefixo cíclico, inserido antes de cada símbolo para mitigar interferências causadas pelo multipercorso. Seu valor diminui conforme o aumento do espaçamento entre subportadoras;
- **Sufixo Cíclico (CS):** indica a duração do sufixo cíclico, utilizado em algumas variações de GFDM para suavizar transições entre símbolos;
- **Símbolo [μs]:** mostra a duração total de um símbolo, incluindo as partes úteis e de guarda, sendo inversamente proporcional ao SCS;
- **Subquadro [μs]:** apresenta a duração do subquadro, que permanece fixa em 4600 μs para todas as numerologias, garantindo alinhamento temporal entre diferentes configurações;
- **Símbolos por subquadro:** indica a quantidade de símbolos contidos em cada subquadro. Observa-se que, à medida que o SCS dobra, o número de símbolos também dobra, mantendo a estrutura temporal consistente e sincronizada entre numerologias.

Dessa forma, os dados apresentados mostram como as diferentes numerologias podem ser ajustadas para atender aos variados casos de uso do 5G-RANGE, equilibrando desempenho, alcance e mobilidade de acordo com as condições de propagação e os requisitos de aplicação.

Vale destacar que a duração do subquadro no sistema 5G-RANGE depende diretamente da forma de onda empregada na transmissão dos sinais. Quando se utiliza a forma de onda OFDM, cada símbolo transmitido possui seu próprio CP, que consiste em uma pequena repetição do início do símbolo adicionada ao final para evitar interferência entre símbolos adjacentes. Como resultado, o tempo total do subquadro inclui múltiplos CPs, um para cada símbolo, o que tende a aumentar sua duração total. Em contraste, na forma de onda GFDM, um único prefixo cíclico pode proteger vários símbolos ou subsímbolos, reduzindo significativamente o número total de CPs aplicados, diminuindo a sobrecarga temporal e possibilitando subquadros mais curtos. Em resumo, a forma de onda escolhida, seja OFDM ou GFDM, influencia diretamente a duração do subquadro, uma vez que cada técnica aplica o CP de maneira distinta ao longo da transmissão dos símbolos.



A Tabela 7 apresenta as numerologias da camada física do sistema 5G-RANGE, acompanhadas do alcance teórico máximo da célula e da velocidade máxima do usuário suportada em cada configuração. Observa-se que numerologias com menores SCSs, como 1,875 e 3,75 kHz, possibilitam maior alcance de cobertura, atingindo até 236 km para a numerologia 0.

Contudo, essas configurações apresentam maior sensibilidade à mobilidade, sendo adequadas apenas para velocidades mais baixas, entre 7 e 15 km/h. Por outro lado, numerologias com SCS mais elevados, entre 15 e 30 kHz, reduzem o alcance da célula, mas oferecem melhor desempenho em cenários de alta velocidade, suportando mobilidade de até 240 km/h. Esse comportamento está associado ao efeito Doppler, fenômeno em que o movimento relativo entre o transmissor e o receptor provoca variações na frequência aparente do sinal recebido. Quando o receptor se aproxima da fonte, a frequência percebida aumenta, e quando ocorre o afastamento, a frequência diminui. Em sistemas de comunicação sem fio, essas variações podem causar distorções no sinal e dificultar a demodulação correta, especialmente em altas velocidades. Por essa razão, numerologias com espaçamento maior entre SCS são mais adequadas para reduzir o impacto do efeito Doppler e garantir estabilidade em aplicações que envolvem veículos, trens e outros cenários de alta mobilidade.

Tabela 7. Numerologias da camada física (PHY) do 5G-RANGE e respectivos valores de alcance e velocidade.

Numerologia ID	SCS [kHz]	CP [μs]	Símbolo [μs]	Número de subsímbolo	Número de subportadoras	Alcance [Km]	Velocidade [Km/h]
0	1,875	141,7	2133,3	4	16384	236,11	7
1	3,75	70,8	1066,7	4	8192	118,06	15
2	7,5	35,4	533,3	4	4096	59,03	30
3	15	17,7	266,7	4	2048	29,51	60
4	30	8,9	133,7	4	1024	14,76	120
5	30	4,4	66,7	2	1024	7,38	240

O número de subsímbolos e o número de subportadoras são parâmetros fundamentais da camada física do sistema 5G-RANGE, especialmente no uso da forma de onda GFDM. O número de subsímbolos indica quantos símbolos de dados são transmitidos em cada subportadora durante um intervalo de tempo, proporcionando maior flexibilidade e eficiência espectral, uma vez que múltiplos subsímbolos podem ser alocados dentro da mesma subportadora. Já o número de subportadoras representa as divisões de frequência dentro da banda total de transmissão, possibilitando melhor aproveitamento do espectro e adaptação eficiente a diferentes condições de propagação.

4. Relação entre Casos de Uso e Numerologias do 5G-RANGE

1. Agronegócio e Agricultura Inteligente para Áreas Remotas

Numerologia recomendada:

- ID 3: Alcance 29 km, velocidade 60 km/h.

Justificativa:

- Oferece o melhor equilíbrio entre alcance, robustez ao efeito Doppler e eficiência espectral para cenários rurais, garantindo conectividade estável em operações agrícolas.

2. Conectividade de Voz e Dados em Longas Distâncias para Áreas Remotas

Numerologia recomendada:

- ID 3: Alcance 29 km, velocidade 60 km/h.

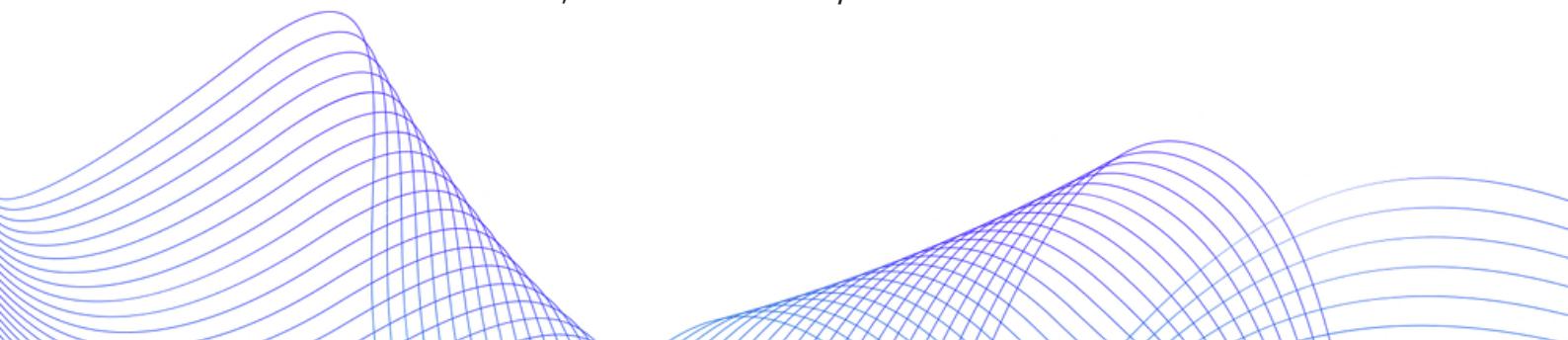
Justificativa:

- Indicada para cenários rurais que exigem mobilidade média, oferecendo equilíbrio entre cobertura, estabilidade do enlace e robustez frente ao efeito Doppler. Essa combinação garante qualidade nos serviços de voz e dados mesmo em longas distâncias e em ambientes com deslocamento moderado dos usuários.

3. Backhaul Sem Fio e Conexões Locais de Alta Qualidade

Numerologia recomendada:

- ID 0: Alcance 236 km, velocidade 7 km/h.



Justificativa:

- Adequada para enlaces fixos em regiões remotas, pois símbolos longos e subportadoras estreitas proporcionam maior alcance, robustez ao multipercorso e tolerância a atrasos de propagação. Essa configuração garante enlaces estáveis e eficientes em longas distâncias, atendendo de forma eficaz às demandas de *backhaul* rural e ampliando a conectividade local.

4. Atendimento de Saúde Remoto (e-Health):**Numerologias recomendadas:**

- ID 4: Alcance 14 km, velocidade 120 km/h;
- ID 5: Alcance 7 km, velocidade 240 km/h.

Justificativa:

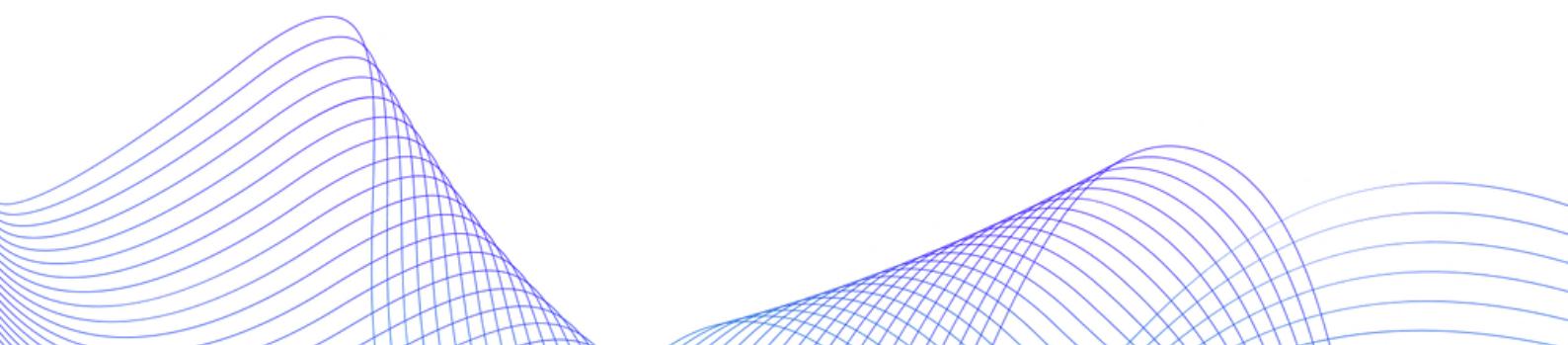
- Adequadas para aplicações de e-Health que exigem alta mobilidade e baixa latência, utilizando maior espaçamento entre subportadoras para aumentar a resiliência ao efeito Doppler e garantir operação estável em altas velocidades. Apesar do alcance reduzido, atendem com precisão às demandas de comunicação crítica e asseguram transmissão confiável de dados médicos em cenários dinâmicos.

5. Desafios e Perspectivas para as Redes 6G

As redes 6G representam a convergência entre comunicação massiva, inteligência artificial distribuída e conectividade ubíqua. Entretanto, as exigências dessas redes são heterogêneas e, em muitos casos, desafiadoras. Cenários que exigem baixíssima latência e comunicações críticas convivem com aplicações que priorizam alta cobertura e eficiência energética.

Assim, uma única numerologia não consegue atender eficientemente a todos os casos de uso. Tanto o 5G NR quanto o 5G-RANGE já introduziram estruturas de quadro com múltiplas numerologias, tendência que será fundamental nas redes 6G para permitir a coexistência de diferentes serviços e frequências.

O projeto 5G-RANGE, desenvolvido em cooperação Brasil-Europa, foi pioneiro ao explorar canais de TVWS para prover conectividade em cenários eRAC.



Contudo, o desempenho do sistema é limitado pela utilização de detectores lineares, como *Zero-Forcing* (ZF) e *Minimum Mean Squared Error* (MMSE), cuja eficiência depende da qualidade do canal e sofre degradação sob forte correlação entre múltiplos percursos.

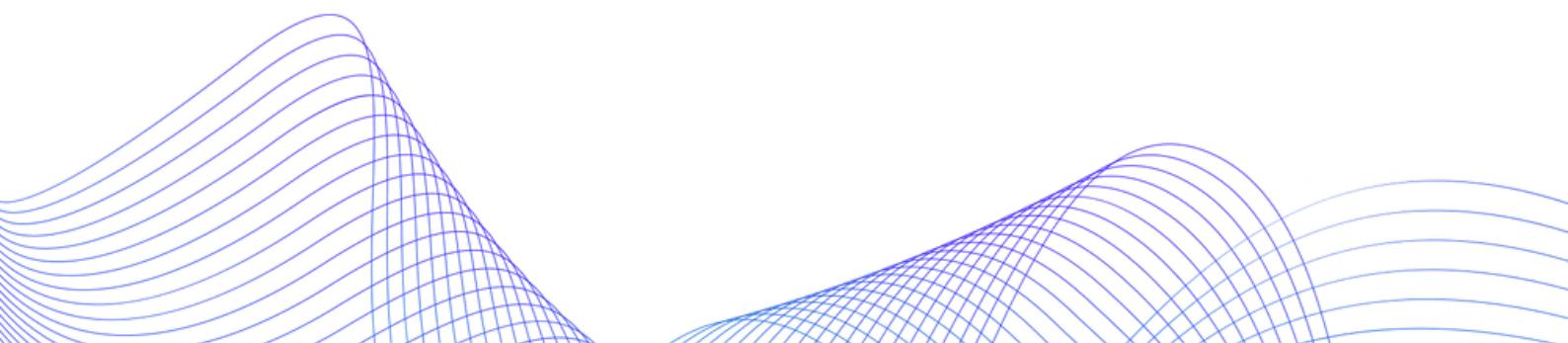
A numerologia 0, por exemplo, atende adequadamente o caso de uso *Backhaul Sem Fio e Conexões Locais de Alta Qualidade*, mas ainda enfrenta restrições associadas ao desempenho do detector linear ZF. Esses desafios evidenciam a necessidade de novas arquiteturas de transceptores capazes de operar em ambientes não ortogonais, mantendo robustez e eficiência computacional.

5.1 Proposta de Implementação do Transceptor 6G

Estudos apresentam uma proposta de implementação de um transceptor 6G de baixa complexidade, concebido a partir da integração de diferentes técnicas avançadas de comunicação sem fio. O sistema combina:

- Forma de Onda GFDM, que oferece maior flexibilidade espectral e reduz emissões fora da faixa de interesse;
- Multiplexação Espacial MIMO (*Spatial Multiplexing Multiple-Input Multiple-Output*, SM-MIMO), técnica responsável por explorar múltiplos caminhos espaciais independentes dentro de um mesmo canal, a fim de aumentar a taxa de transmissão e elevar a capacidade do sistema;
- Detector Iterativo MMSE-PIC (*Minimum Mean Squared Error - Parallel Interference Cancellation*), que realiza a detecção com fatoração no domínio da frequência, reduzindo a complexidade computacional e a latência;
- Inserção Ortogonal de Pilotos Livre de Interferência (*Interference-Free Pilot Insertion*, IFPI), utilizada para a estimação precisa do canal e mitigação de interferências.

Implementado sobre uma plataforma de Rádio Definido por Software (*Software Defined Radio*, SDR), o transceptor proposto visa explorar a flexibilidade do software para ajustar numerologias, modulações e esquemas de codificação conforme as condições de operação e os requisitos de cada cenário.



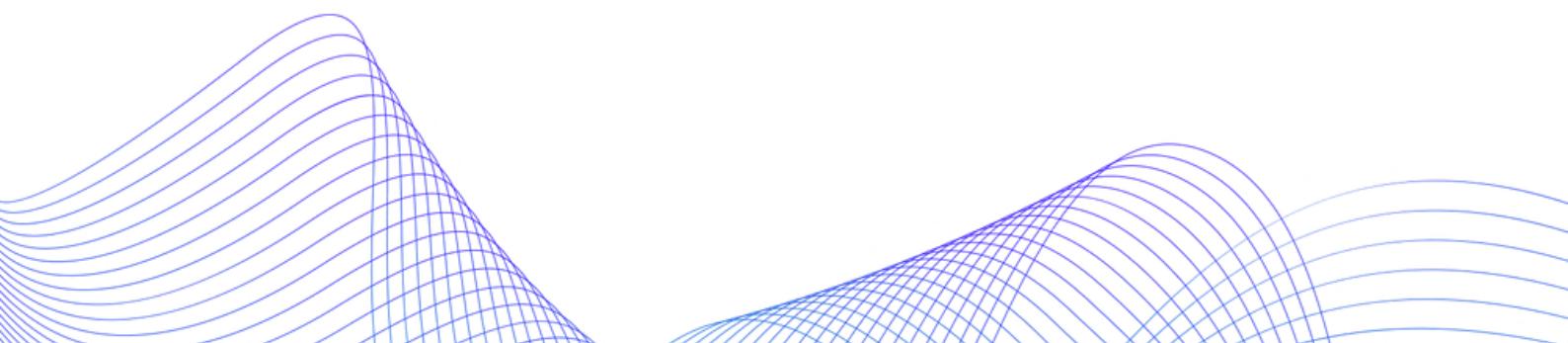
Essa abordagem reduz custos de implantação e amplia o alcance da conectividade. Portanto, o cenário de *backhaul* sem fio e conexões locais de alta qualidade é considerado referência para a implementação do transceptor 6G.

6. Conclusão

A análise dos casos de uso, de seus requisitos e das diferentes numerologias adotadas no 5G mostra que esses elementos constituem a base para operações eficientes em uma ampla variedade de cenários. A flexibilidade proporcionada por essa arquitetura, especialmente no que se refere à capacidade de adaptar alcance, mobilidade, latência e eficiência espectral conforme a demanda, já se apresenta como uma tendência natural para o 6G. As futuras redes deverão expandir ainda mais essa adaptabilidade, oferecendo maior eficiência no uso do espectro e suporte aprimorado a aplicações críticas e emergentes.

A implementação do transceptor 6G de baixa complexidade representa um avanço estratégico na consolidação do cenário eRAC. A proposta apresenta uma solução tecnológica capaz de equilibrar desempenho, eficiência espectral e viabilidade operacional, atendendo às demandas crescentes por conectividade em regiões de baixa infraestrutura. A combinação entre a forma de onda GFDM, as técnicas SM-MIMO, o detector iterativo MMSE-PIC e a inserção de pilotos IFPI resulta em uma arquitetura inovadora, com alto potencial para atender aos requisitos de conectividade das futuras redes 6G. Essa abordagem garante robustez frente a cenários de interferência, ao mesmo tempo em que reduz a complexidade computacional e o custo de implementação.

No contexto do caso de uso de *Backhaul* sem Fio e Conexões Locais de Alta Qualidade, o transceptor 6G surge como uma solução essencial para expandir a cobertura e levar conectividade a regiões rurais, isoladas e de difícil acesso, incluindo escolas, áreas agrícolas, polos turísticos, instalações industriais e operações de mineração. Ao eliminar a dependência de infraestrutura óptica e explorar canais de TVWS, a proposta contribui diretamente para a inclusão digital, a redução das desigualdades regionais e o fortalecimento do desenvolvimento socioeconômico sustentável.



No próximo white paper desta trilha, serão abordados em maior profundidade os sistemas MIMO integrados à forma de onda GFDM, destacando a importância dessa combinação e os benefícios proporcionados à melhoria do desempenho e à adaptabilidade do transceptor 6G.

