
aptel
snt
XXII 2026

DISCLAIMER

Inatel

Nota de Esclarecimento e Direitos Autorais

Todas as informações e dados referentes compartilhadas neste documento foram obtidos exclusivamente a partir de fontes e relatórios de acesso público, tendo caráter puramente informativo e analítico.

As ilustrações, diagramas e imagens que compõem esta apresentação foram inteiramente concebidos e elaborados pelo autor com o auxílio de recursos de Inteligência Artificial. Todo o conteúdo visual constitui criação intelectual original do autor e está estritamente protegido pela legislação de direitos autorais, sendo vedada a sua reprodução, distribuição ou uso comercial sem a prévia e expressa autorização.

Luis Gustavo da Silva
Inatel
luis.gustavo@inatel.br



A EVOLUÇÃO DAS REDES DE COMUNICAÇÕES MÓVEIS 1G-6G

Dr. Luis Gustavo da Silva

Inatel – Instituto Nacional de Telecomunicações



Agenda da apresentação

01	Evolução das comunicações móveis
02	5G: Promessas & Realidade
03	Transformações das redes móveis – Era 5G
04	6G & Beyond
05	Aplicações reais – Hoje x Futuro



Instituto Nacional de Telecomunicações

Em um slide

Inatel



Santa Rita do Sapucaí
Minas Gerais – Brasil

Fundado
1965



Instituição sem fins lucrativos

900
Funcionários

1500
Estudantes

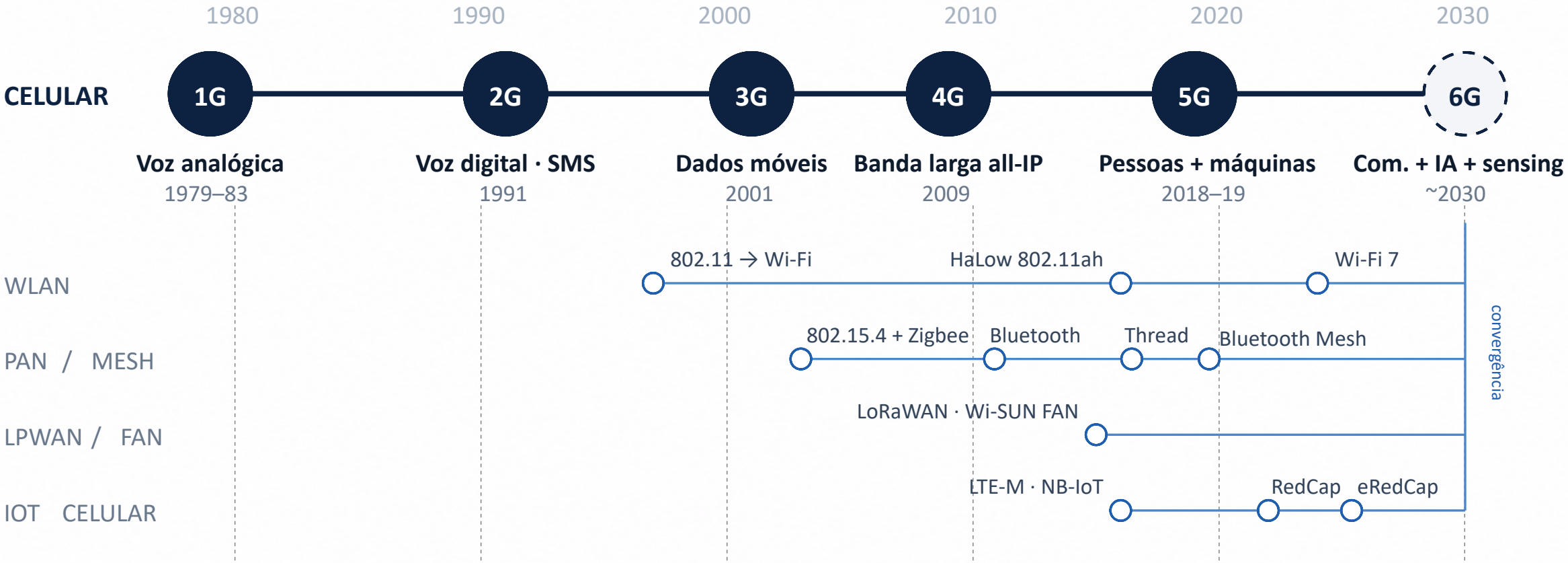
7 cursos de Engenharia

Mestrado e Doutorado em Telecomunicações

Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento

Inatel

A conectividade sem fio deixou de ser uma linha única



Cada ramo nasceu para um problema diferente: WAN com mobilidade, LAN de alta capacidade, PAN de baixo consumo e LPWAN de longo alcance. Com o 5G, essas fronteiras passam a coexistir de forma cada vez mais integrada

Fonte: Nokia (GSM, 1991) · NTT DOCOMO (FOMA, 2001) · Reuters (LTE, 2009) · 3GPP Rel-15 · Wi-Fi Alliance · LoRa Alliance · Wi-SUN · Thread Group · CSA (Matter)

Inatel

Não existe tecnologia “melhor”, só a mais adequada

A pergunta mudou

“Como conectar uma pessoa?”

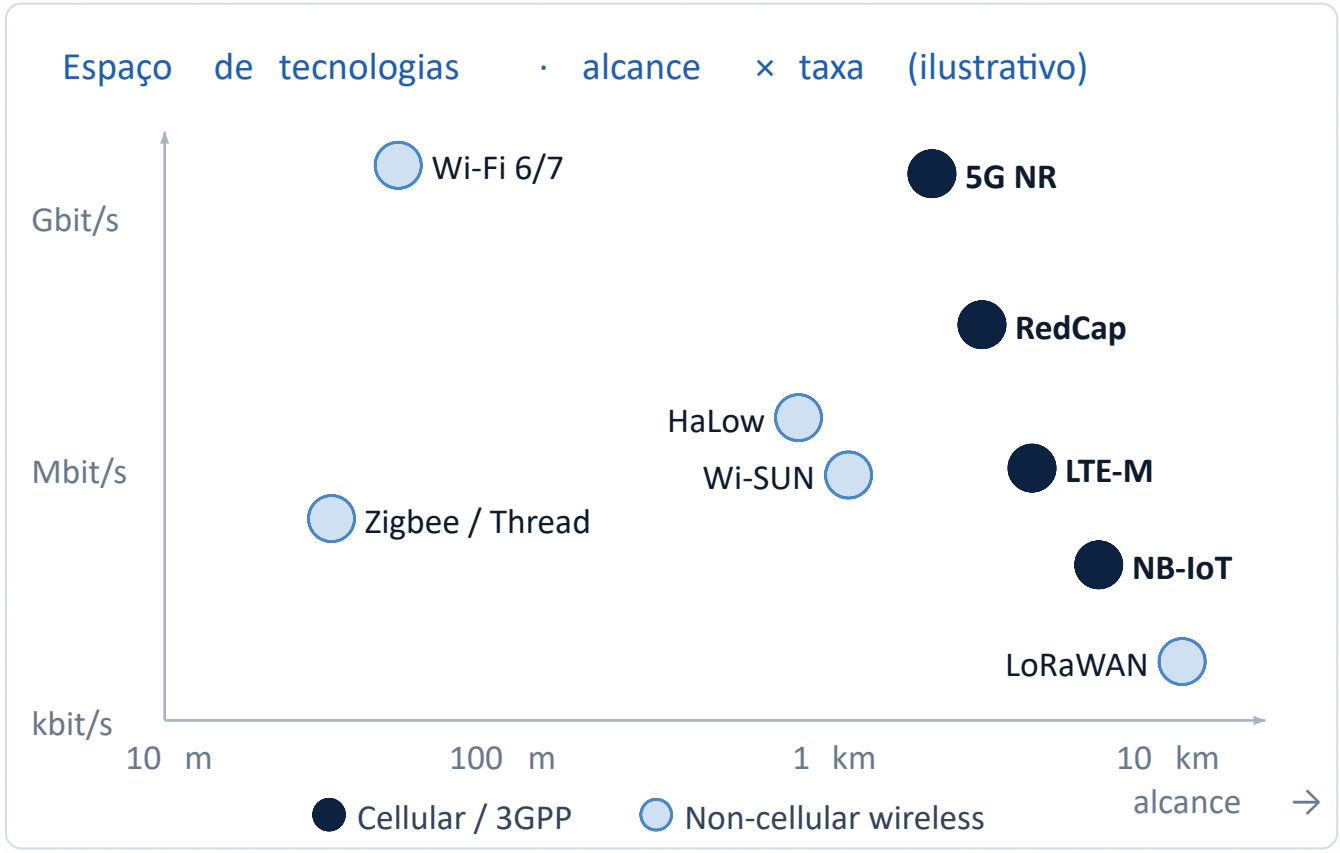
“Como conectar qualquer coisa?”

Medidor de energia
- Não precisa de 1 Gbit/s

Sensor agrícola
- Não precisa de 1 ms

Câmera industrial
- Não cabe em poucos bytes por hora

Smartwatch
- Não pode depender de bateria grande



Cada tecnologia → um compromisso: taxa × alcance × latência × energia × custo × densidade × mobilidade x confiabilidade.

Fonte: Wi-Fi Alliance (HaLow) · 3GPP Cellular IoT · Ericsson (RedCap) · Wi-SUN · LoRa Alliance

Inatel

5G: da banda larga móvel ao IoT e controle crítico

eMBB Enhanced Mobile Broadband

20 Gbit/s

pico no downlink

Expande a banda larga móvel: mais taxa, capacidade de área e eficiência espectral

URLLC Ultra-Reliable Low-Latency

1 ms

latência no plano de usuário

Leva o celular à automação industrial e ao controle

mMTC massive Machine-Type Comm.

$10^6/km^2$

densidade de conexões

Aborda no IMT-2020 o problema de conectividade massiva, explorado por LPWAN e celular IoT

A escada do IoT celular · da menor à maior capacidade

NB-IoT
Rel-13
medidores, sensores

LTE-M
Rel-13
rastreadores, voz

eRedCap
Rel-18
IoT industrial simples

RedCap
Rel-17 · ≤ 20 MHz FR1
wearables, câmeras

5G NR (full cap)
Rel-15
vídeo, XR, eMBB

Fonte: ITU-R M.2410 (requisitos IMT-2020) · 3GPP Cellular IoT (Rel-13) · 3GPP Release 17 · Ericsson (RedCap/eRedCap)



5G hoje: escala alcançada, arquitetura em transição

MUNDO

3,3 bi
assinaturas 5G
2T 2026

48%
do tráfego de dados móveis
fim de 2025

60%
da população coberta
fim de 2025

~390
operadoras com 5G; >90 com SA
jun 2026

BRASIL

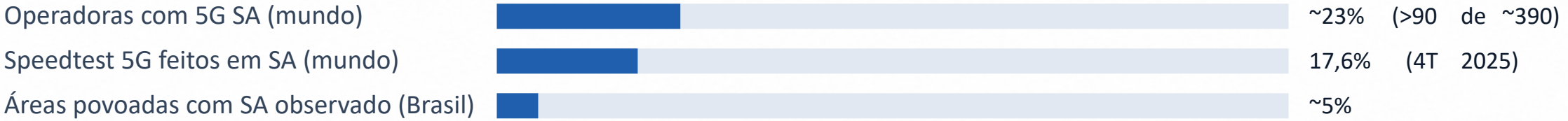
66,1 mi
acessos 5G · 23,9% da base
2T 2026

68,4%
da população coberta
fim de 2025

~57,3 mil
ERBs 5G licenciadas
jun 2026

~2 mil
municípios com 5G (36%)
mai 2026

O 5G Standalone, base para *slicing* e serviços diferenciados, ainda é minoria



Fonte: Ericsson Mobility Report jun/2026 · Ookla · Anatel 2T26 · Anatel 2025 · BNamericas · Valor · Exame

Inatel

Redes privativas: conectividade sob controle

Modelos 3GPP · Non-Public Networks (NPN)

SNPN Rede isolada

Rede independente da PLMN pública, com identidade, core e políticas próprias.

Aplicações: subestações, plantas e sites críticos

PNI-NPN Integrada à operadora

Usa espectro, núcleo ou slice da rede pública.

Aplicações: equipes de campo, cobertura ampla e ativos geograficamente dispersos

MUNDOE BRASIL · 2026

2.031	organizações em 88 países (GSA, 2T26) com redes privativas 4G/5G
99	empresas com autorizações no Brasil
58 de 615	ERBs privativas no Brasil são 5G ≈ 9%

Linha do tempo · das redes dedicadas ao futuro

- **1990–2000** — 2G/3G privado em minas e O&G
- **2010s** — LTE privado: vídeo, telemetria e automação
- **2018** — Rel-15: requisitos redes privativas
- **2020** — Rel-16: SNPN e PNI-NPN
- **2022** — Anatel: 3,7–3,8 GHz redes privativas
- **2024–26** — Escala e casos industriais
- **~2030** — 6G: IA nativa e sensoriamento integrado

QoS e cobertura próprias

Capacidade e QoS dimensionadas para SCADA, vídeo, automação e tráfego operacional.

Segurança IT/OT

SIM/eSIM, autenticação 3GPP e tráfego OT segmentado.

Edge local

Vídeo, IA e automação processados na planta ou subestação.

Evolução para 5G-A / 6G

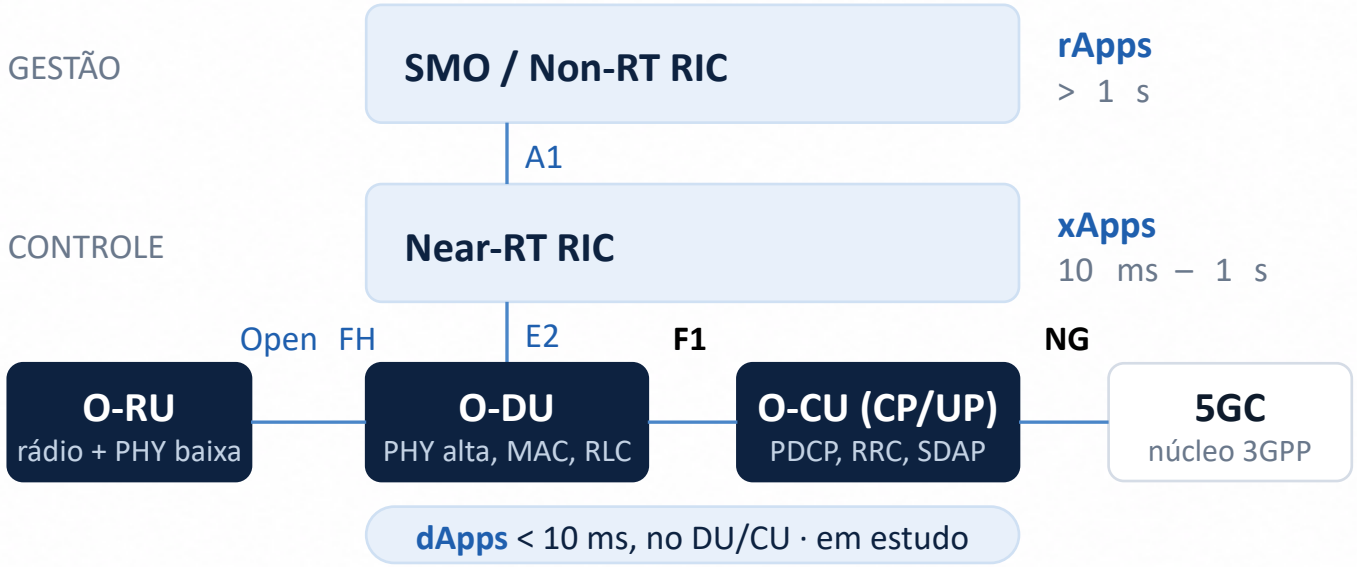
A plataforma pode incorporar AI, sensing, digital twins e novos modelos de automação.

Fonte: 3GPP (NPN) · GSA · Mobile Time (Anatel) · Anatel (redes privativas) · Anatel (3,7–3,8 GHz) · Tolaga



Open RAN: abrir, desagregar e programar a RAN

Arquitetura O-RAN simplificada · três escalas de controle



BRASIL · OPENRAN@BRASIL

2021 · GT OpenRAN/ Anatel + lançamento OpenRAN@Brasil.

Fase 1 · testbed com SMO e RIC em Campinas e no Rio.

Fase 2 · O-RU 5G nacional, xApps/rApps e cibersegurança.

Fase 3 · expansão regional do testbed e integração da O-RU.

> 1,5 Gbit/s

O-RU nacional, hardware com participação do Inatel · laboratório 2026

2018
O-RAN Alliance nasce da fusão xRAN Forum + C-RAN Alliance

–40%
receita Open RAN de 2022 a 2024; volta a crescer em 2025

> 50%
do tráfego da AT&T já passa por hardware open-capable

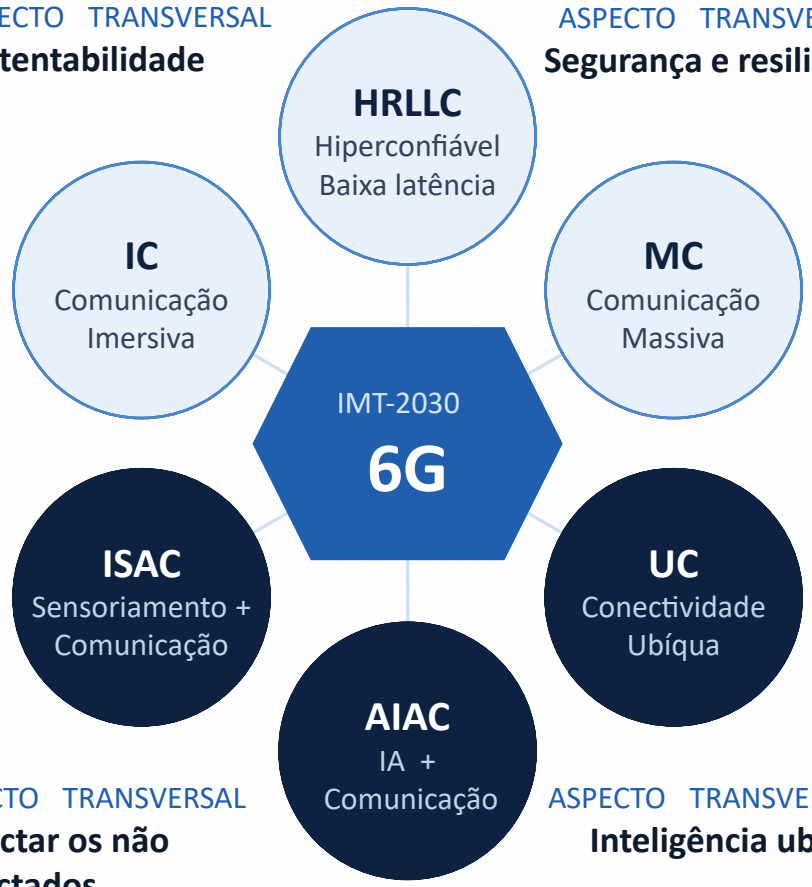
< 5%
das implantações RAN devem ser multi-vendor em 2030 (Dell'Oro)

Leitura: Open RAN complementa o 3GPP, não é nova interface aérea. Seu valor está em interfaces abertas, programabilidade e automação.

Fonte: O-RAN Alliance · O-RAN (dApps) · Dell'Oro · AT&T · Teletime (GT Anatel) · OpenRAN@Brasil · Inatel (O-RU)

Inatel

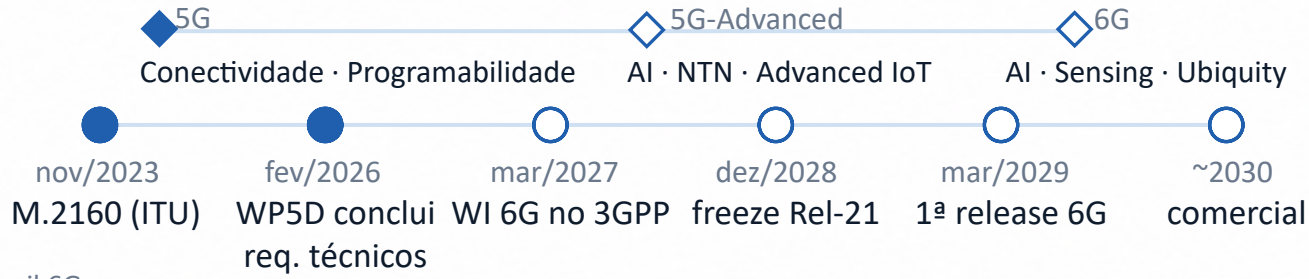
6G: seis cenários de uso e capacidades além do 5G



Do IMT-2020 ao IMT-2030 — ○ evolução do 5G ● novo no 6G

Capacidade	5G · IMT-2020	6G · metas M.2160
Taxa de pico	20 Gbit/s	**50–200 Gbit/s**
Taxa por usuário	100 Mbit/s	**300–500 Mbit/s**
Latência (rádio)	1 ms	**0,1–1 ms**
Densidade	10^6 /km²	**10^6–10^8 /km²**
Mobilidade	500 km/h	**500–1.000 km/h**
Confiabilidade	$1–10^{-5}$	**$1–10^{-5}$ a $1–10^{-7}$**
Posicionamento	sem KPI	**1–10 cm**

Capacidades novas: cobertura, sensoriamento, IA, sustentabilidade, interoperabilidade e posicionamento.



Fonte: ITU-R M.2160 · ITU-R IMT-2030 · ITU-R M.2410 · Qualcomm (Rel-21) · Inatel Brasil 6G



6G hoje: espectro, interface aérea e migração

Espectro candidato · fora de escala

em uso no 5G · identificada ao IMT · em estudo · WRC-27 · pesquisa

até 7,125 GHz
Bandas do 5G (FR1): compartilhadas com o 6G via MRSS

4,4–4,8 GHz
Item 1.7 da WRC-27

6,425–7,125 GHz
IMT na Região 1 (WRC-23). Brasil: licitação para SMP

7,125–8,4 GHz
Item 1.7 da WRC-27; o "7 GHz" do 3GPP, canais de 400 MHz DL

14,8–15,35 GHz
Item 1.7 da WRC-27

acima de 24 GHz
mmWave (FR2) para capacidade; sub-THz em pesquisa

cmWave · nova camada de capacidade do 6G

Interface aérea · direções acordadas no estudo Rel-20

Forma de onda	CP-OFDM no DL/UL + DFT-s-OFDM no UL (até 2 camadas)	acordado
Modulação	QAM uniforme; 1K-QAM no UL; 4K-QAM no DL sem consenso	em aberto
Codificação	LDPC do 5G + nova base BG3; Polar no controle	acordado
Banda	até 400 MHz no DL; UE: 200 MHz baseline, 400 MHz opcional	acordado
Quadro	próximo do 5G, com grade de RB alinhada para MRSS	acordado
MIMO/duplex	mais ports / layers em ~7 GHz; evolução de duplexing / SBFD	em estudo

Multi-RAT · como o 6G entra na rede

MRSS: 5G e 6G dividem a mesma portadora de forma dinâmica, sem trocar ou desligar o 5G.

Baixo overhead: grade de RBs alinhada; canais de controle compartilhado em estudo.

IoT legado: convivência com NB-IoT e LTE-M preservada.

Em aberto: opções adicionais de DC / dual registration decisão esperada no RAN#114 · dez/2026.

Fonte: Ericsson · Qualcomm · RAN1#126 · RAN#113 · 3GPP MRSS · WRC-27 AI 1.7 · Teletime (Anatel) · RSPG · ITU-R M.2541

Inatel

Aplicações: o 5G real ainda convive com o LTE privado

MUNDO · 5G

CHINA · SLICING — em operação

State Grid (Shandong)

Slices na rede China Unicom, incl. RedCap (> 100 mil terminais RedCap): FV distribuída, automação e medição.

CHINA · SLICING — piloto

China Southern Power Grid

Proteção diferencial em Shenzhen: menos de 10 ms entre DTUs e sincronismo de 300 ns.

EUA · 5G SA PRIVADO — em implantação

MLGW (Memphis)

5G SA Nokia para energia, gás e água; 420 mil clientes, medição e falhas.

BRASIL · LTE AINDA PREDOMINA NAS REDES PRIVATIVAS

PR · LTE 450 MHZ — em operação

Copel

5 torres LTE 450 MHz ; rede híbrida para automação e comunicações críticas.

DF · LTE 450 MHZ — em implantação

Neoenergia Brasília

3 → 13 ERBs; alterna LTE privado e público; NTN-IoT anunciado para o 2º sem./26.

PA · 5G PRIVADO — em operação

Vale (mineração)

50 sites LTE/5G privados; rede só 5G em Carajás para teleoperação.

58 de 615

ERBs de redes privativas no Brasil são 5G (439 são 4G) — Anatel, jun/2026

Inatel 5G-in-a-Box: rede privada 5G SA (gNB + 5GC) já transferida ao mercado, com concessionárias de energia entre os públicos-alvo.

Fonte: Tolaga · Telecom Science (CSG) · Nokia (MLGW) · Mobile Time (Copel) · Teletime (Neoenergia) · Valor (Vale) · Mobile Time (Anatel) · Inatel



6G: conectividade, percepção e inteligência para sistema críticas

HRLLC — estudo

Proteção e controle crítico

Proteção diferencial e self-healing na distribuição, com sincronismo em µs.

poucos ms E2E · confiabilidade extrema

ISAC — protótipo

A rede como sensor

A ERB detecta drones, invasões em subestações e obstáculos na faixa de servidão.

protótipos 5G-A rastreiam drones a >1 km

AIAC — estudo

Gêmeo digital da rede

Dados de sensores e IA na borda simulam manobras antes de executá-las.

IA distribuída · edge computing · dados em tempo real

UC · NTN — início no 5G

Ativos remotos

Linhas, pequenas centrais hidrelétricas e subestações fora da cobertura via satélite integrado.

já começa no 5G com NTN-IoT

MC — estudo

Sensoriamento massivo

Medidores, sensores de linha e geração distribuída em escala, inclusive dispositivos sem bateria.

até 10^8 dispositivos/km²

IC — visão

Operação e manutenção imersiva

XR, telepresença e assistência remota para manutenção.

imersão com baixa latência

Leitura: o 5G conecta e automatiza ativos; o 6G busca integrar comunicação, sensoriamento, posicionamento e IA à própria infraestrutura de conectividade.

Inatel Brasil 6G e xGMobile mapeiam casos de uso 6G, entre eles o monitoramento de redes de água e energia e a cobertura de áreas remotas.

Fonte: ITU-R M.2160 · arXiv (smart grid 5G/6G) · Hexa-X-II D1.2 · e& (ISAC) · arXiv (ISAC 5G-A) · Next G Alliance · Inatel xGMobile



Inatel

Da voz à rede que percebe, decide e se abre

01 · O que aconteceu?

A rede deixou de ser uma linha única de voz. Celular, Wi-Fi, LPWAN, malhas e satélite evoluíram em paralelo, e o 6G tende a integrá-los em um ecossistema cada vez mais coordenado.

02 · Por que isso aconteceu?

Cada nova aplicação trouxe um requisito (taxa, alcance, bateria, latência, custo) e as tecnologias passaram a se influenciar: o 5G herdou lições do LPWAN e do Wi-Fi.

03 · O que aprendemos?

Não existe tecnologia universal: conectividade é um trade-off. E a norma não é o campo: o 5G entregou escala, mas SA e capacidades diferenciadas como slicing e URLLC ainda têm adoção limitada em campo.

04 · Onde estamos agora?

Num ecossistema heterogêneo que exige programabilidade, orquestração e abertura: 5G SA, Open RAN e redes privativas, com o 6G avançando em padronização até 2029.

E PARA UTILITIES?

HOJE **Conectar ativos**

LTE privado em sub-1 GHz domina; só 58 de 615 ERBs privativas são 5G.

EM TRANSIÇÃO **Controlar a rede**

5G SA privativo e edge · controle local/QoS; Open RAN · programabilidade; NTN-IoT · cobertura

COM O 6G **Perceber e apoiar**

Sensoriamento, posicionamento em cm e IA nativa para proteção, gêmeos digitais e ativos remotos.

A pergunta mudou: não é mais “qual geração?”, e sim “qual combinação de redes, sob controle de quem, para qual requisito?”

Fonte: ITU-R M.2160 · Ericsson Mobility Report · Ookla · Mobile Time (Anatel) · Qualcomm (Rel-21) · Dell’Oro



Obrigado.

Dr. Luis Gustavo da Silva

luis.gustavo@inatel.br

Inatel – Instituto Nacional de Telecomunicações

