



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DA PARAÍBA
DIRETORIA DE DESENVOLVIMENTO DE ENSINO
COORDENAÇÃO DO CURSO SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES

TELEMEDICINA 5G: AVANÇOS E DESAFIOS

BRUNO BARBOSA DA SILVA

JOÃO PESSOA-PB

2026

BRUNO BARBOSA DA SILVA

TELEMEDICINA 5G: AVANÇOS E DESAFIOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Sistemas de Telecomunicações, do Instituto Federal da Paraíba – Campus João Pessoa, em cumprimento às exigências para a obtenção do título Tecnólogo.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Araujo Cavalcante

JOÃO PESSOA-PB

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP
Biblioteca Nilo Peçanha – IFPB, *Campus* João Pessoa

S586t Silva, Bruno Barbosa da.
 Telemedicina 5G : avanços e desafios / Bruno Barbosa da Silva.
 – 2026.
 36 f. : il.

 TCC (Graduação – Tecnologia em Sistemas de
 Telecomunicações) - Instituto Federal da Paraíba – IFPB /
 Coordenação do Curso Superior de Tecnologia em Sistemas de
 Telecomunicações.
 Orientador: Prof. Dr. Gustavo Araujo Cavalcante.

 1. Telemedicina. 2. 5G. 3. Latência ultrabaixa. 4.
 Procedimentos remotos. 5. Saúde digital. I. Título.

CDU 61:621.391.6

Bibliotecário responsável Marx da Silva Medeiros – CRB15/470

BRUNO BARBOSA DA SILVA

TELEMEDICINA 5G: AVANÇOS E DESAFIOS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO submetido ao Curso Superior de Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações, do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), em cumprimento aos requisitos institucionais para a obtenção do Grau de Tecnólogo em **SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES**.

Aprovado em 10/03/2026 .

Membros da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Gustavo Araujo Cavalcante

Instituto Federal da Paraíba (IFPB)

Orientador

Prof. Dr. Adaildo Gomes D'Assunção Junior

Instituto Federal da Paraíba (IFPB)

Examinador interno

Prof. Dr. Patric Lacouth da Silva

Instituto Federal da Paraíba (IFPB)

Examinador Externo

Documento assinado eletronicamente por:

- **Gustavo Araujo Cavalcante**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 19/03/2026 14:48:59.
- **Patric Lacouth da Silva**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 20/03/2026 10:57:50.
- **Adaildo Gomes D Assuncao Junior**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 20/03/2026 11:10:41.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 19/03/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código 853528
Verificador: cdaf9f001d
Código de Autenticação:



RESUMO

A evolução das redes móveis culminou no 5G, tecnologia caracterizada por alta largura de banda, capacidade de conexão massiva e, sobretudo, pela latência ultrabaixa (URLLC), elemento essencial para aplicações críticas em saúde. Nesse contexto, a telemedicina desponta como um dos campos mais beneficiados, ao viabilizar cirurgias robóticas a distância, diagnósticos de imagem em tempo real e monitoramento contínuo de pacientes críticos. Experimentos relatados na literatura recente confirmam esse potencial como as ultrassonografias móveis transmitidos via 5G em ambulâncias permitiram diagnósticos mais ágeis em situações emergenciais (BERLET et al., 2022), enquanto iniciativas de consultas e teleorientações remotas ampliaram a colaboração clínica de especialidades escassa (KARAKO et al., 2020).

Apesar dos avanços, a implementação enfrenta desafios estruturais, regulatórios e éticos, que incluem a baixa capilaridade da fibra óptica, a necessidade de densificação de antenas, riscos de segurança cibernética e desigualdade de acesso entre regiões urbanas e rurais (DE LUCCA; MAURO, 2020; LIMA, 2024; SANTANA et al., 2024). Para analisar criticamente esse cenário, este estudo adota uma revisão literária (2018–2024), reunindo artigos acadêmicos, dissertações, estudos de caso e relatórios técnicos. O objetivo é mapear os principais avanços da telemedicina 5G, identificar os obstáculos que limitam sua consolidação e indicar caminhos discutidos na literatura para sua integração efetiva nos sistemas de saúde. Conclui-se que, embora ainda existem barreiras significativas, a telemedicina baseada em 5G representa um grande potencial transformador, capaz de democratizar o acesso à saúde de alta complexidade, reduzir desigualdades regionais e otimizar a eficiência clínica.

Palavras-chave: Telemedicina. 5G. Latência ultrabaixa. Procedimentos remotos. Saúde digital.

ABSTRACT

The evolution of mobile networks has culminated in 5G, a technology characterized by high bandwidth, massive connection capacity, and, above all, ultra-low latency (URLLC), an essential element for critical healthcare applications. In this context, telemedicine is emerging as one of the most benefited fields, enabling remote robotic surgeries, real-time imaging diagnostics, and continuous monitoring of critically ill patients. Experiments reported in recent literature confirm this potential, as mobile ultrasounds transmitted via 5G in ambulances have enabled faster diagnoses in emergency situations (BERLET et al., 2022), while remote consultation and tele-guidance initiatives have expanded the scarce clinical collaboration between specialties (KARAKO et al., 2020).

Despite advances, implementation faces structural, regulatory, and ethical challenges, including low fiber optic capillarity, the need for antenna densification, cybersecurity risks, and unequal access between urban and rural regions (DE LUCCA; MAURO, 2020; LIMA, 2024; SANTANA et al., 2024). To critically analyze this scenario, this study adopts a literature review (2018–2024), bringing together academic articles, dissertations, case studies, and technical reports. The objective is to map the main advances in 5G telemedicine, identify the obstacles limiting its consolidation, and indicate paths discussed in the literature for its effective integration into health systems. The conclusion is that, although significant barriers still exist, 5G-based telemedicine represents a unique transformative potential, capable of democratizing access to highly complex healthcare, reducing regional inequalities, and optimizing clinical efficiency.

Keywords: Telemedicine. 5G. Ultra-low Latency. Remote procedures. Digital health.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparativo das gerações móveis e aplicações em saúde	18
Quadro 2 - Avanços vs. Desafios	28

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Esquemas de transmissão em redes 4G e 5G com e sem formação de feixe	21
Figura 2- fatiamento de rede para diferentes tipos de serviços.	21
Figura 3 - Localização geográfica da demonstração de telecirurgia e diagrama abstrato dos componentes nos dois locais	23
Figura 4 - central de monitorização	24
Figura 5 - Estrutura para o teste de campo 5G.	25

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3G – Terceira Geração de Redes Móveis (Third Generation)

3GPP – Projeto de Parceria de 3ª Geração (3rd Generation Partnership Project)

4G – Quarta Geração de Redes Móveis (Fourth Generation)

5G – Quinta Geração de Redes Móveis (Fifth Generation)

AI – Inteligência Artificial (Artificial Intelligence)

eMBB – Banda Larga Móvel Aprimorada (Enhanced Mobile Broadband)

GEO – Órbita Geoestacionária (Geostationary Orbit)

ICT – Tecnologias da Informação e Comunicação (Information and Communication Technologies)

IoMT – Internet das Coisas Médica (Internet of Medical Things)

IoT – Internet das Coisas (Internet of Things)

ITU – União Internacional de Telecomunicações (International Telecommunication Union)

LDPC – Códigos de Baixa Densidade de Paridade (Low-Density Parity-Check Codes)

LEO – Órbita Terrestre Baixa (Low Earth Orbit)

LSA – Acesso Compartilhado Licenciado (Licensed Shared Access)

LTE – Evolução de Longo Prazo (Long Term Evolution)

MEC – Computação de Borda Móvel (Mobile Edge Computing)

mMTC – Comunicações Massivas do Tipo Máquina (Massive Machine Type Communications)

MU-MIMO – Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas Multiusuário (Multi-User Multiple Input Multiple Output)

QoE – Qualidade de Experiência (Quality of Experience)

QoS – Qualidade de Serviço (Quality of Service)

REM – Mapas de Ambiente de Rádio (Radio Environment Maps)

URLLC – Comunicações Ultra Confiáveis e de Baixa Latência (Ultra-Reliable Low Latency Communications)

UTI – Unidade de Terapia Intensiva

WAN – Rede de Longa Distância (Wide Area Network)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO GERAL	14
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.3	JUSTIFICATIVA	14
2	METODOLOGIA.....	16
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
3.1	TELEMEDICINA E SAÚDE DIGITAL	17
3.2	TECNOLOGIA 5G E SUA APLICAÇÃO NA SAÚDE	17
3.3	AVANÇOS VIABILIZADOS PELO 5G NA TELEMEDICINA	23
3.4	DESAFIOS DA TELEMEDICINA 5G.....	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5	CONCLUSÃO.....	31
6	REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

A evolução das redes móveis, desde o 1G até o atual 5G, representa um marco disruptivo no campo das telecomunicações, com impacto direto em diversos setores estratégicos, entre eles a saúde. A quinta geração de redes móveis (5G) é caracterizada por três pilares tecnológicos fundamentais: eMBB (Enhanced Mobile Broadband), que amplia a largura de banda; mMTC (Massive Machine Type Communications), que permite a conexão massiva de dispositivos; e URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communications), que garante comunicação ultra confiável com latência extremamente reduzida (POPÓVSKI et al., 2019; SIDDIQI; YU; JOUNG, 2019). Essa última característica, com tempos de resposta entre 1 e 10 ms, contrasta significativamente com os 30–50 ms do 4G, viabilizando aplicações críticas em saúde, como cirurgias robóticas remotas, diagnósticos em tempo real e monitoramento contínuo de pacientes críticos (JAIN; JAIN, 2022).

No contexto da saúde digital, a telemedicina já se consolidava como uma ferramenta essencial para ampliar o acesso a serviços médicos e otimizar recursos hospitalares. Entretanto, a incorporação do 5G inaugura uma nova etapa, marcada pela possibilidade de intervenções em tempo real com maior confiabilidade e precisão (DEVI et al., 2023; CERRI, 2023). Experimentos recentes evidenciam essa transformação (BERLET et al., 2022) onde demonstraram a viabilidade da transmissão de ultrassonografias móveis via 5G em ambulâncias, com envio imediato de imagens para hospitais de referência, otimizando o atendimento emergencial. Do mesmo modo, KARAKO et al., 2020) destacam que a combinação de 5G e inteligência artificial permite consultas médicas remotas entre especialistas em diferentes países, ampliando a colaboração clínica global.

Apesar desses avanços, a implementação da telemedicina 5G ainda enfrenta barreiras significativas. Entre elas, a infraestrutura de telecomunicações insuficiente, que exige a expansão da fibra óptica, a densificação de antenas (small cells) e o uso de técnicas avançadas de beamforming (DE LUCCA; MAURO, 2020). Soma-se a isso a necessidade de interoperabilidade entre sistemas hospitalares, bem como a preocupação crescente com a segurança cibernética e a privacidade de dados médicos (LIMA, 2024). Além dos desafios técnicos, permanecem questões regulatórias e éticas, como a responsabilidade profissional em procedimentos remotos e a desigualdade no acesso entre regiões urbanas e rurais (CERRI, 2023); SANTANA et al., 2024).

1.1 OBJETIVO GERAL

Compreender, por meio de uma revisão sistemática da literatura científica recente (2018–2024), os avanços e desafios relacionados à aplicação da tecnologia 5G na telemedicina, com ênfase na latência ultrabaixa (URLLC) e no seu potencial transformador para procedimentos médicos remotos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são mapear os principais avanços tecnológicos vinculados ao uso do 5G em saúde digital, com destaque para aplicações que dependem da latência ultrabaixa, como telecirurgias, monitoramento contínuo de pacientes críticos e diagnósticos de imagem em tempo real; comparar a evolução das redes móveis (3G, 4G e 5G) no contexto da telemedicina, evidenciando como os ganhos em velocidade, confiabilidade e redução da latência ampliam as possibilidades de atendimento médico remoto; analisar casos de sucesso reportados na literatura, como as ultrassonografias móveis via 5G em ambulâncias (BERLET et al., 2022), experiências de telecirurgia assistida (SOUSA; SANTOS, 2023); SOUZA et al., 2024) e iniciativas de diagnóstico remoto mediado por inteligência artificial (KARAKO et al., 2020); identificar os principais desafios técnicos, operacionais e de infraestrutura, como a necessidade de densificação de antenas, integração de edge computing, expansão de fibra óptica e interoperabilidade hospitalar (PASSOS, 2019; SILVA, M.A., 2022); além de examinar as barreiras regulatórias, éticas e de segurança cibernética que ainda limitam a implementação plena da telemedicina baseada em 5G (LIMA, 2024; SILVA; SOUZA; ALVEZ, 2023).

1.3 JUSTIFICATIVA

O avanço das tecnologias digitais aplicadas à saúde tem se mostrado central na busca por soluções aos desafios contemporâneos dos sistemas de saúde, como a sobrecarga hospitalar, a escassez de especialistas em determinadas regiões e a necessidade de intervenções rápidas em situações críticas. Nesse cenário, a telemedicina consolidou-se como ferramenta estratégica para ampliar o acesso e a eficiência dos cuidados médicos. A introdução da tecnologia 5G, em especial pelas comunicações ultra confiáveis e de baixa latência (URLLC), inaugura um novo paradigma para a prática médica remota (POPOVSKI et al., 2019; JAIN; JAIN, 2022).

A literatura recente mostra que a combinação entre 5G e telemedicina possibilita aplicações críticas antes inviáveis, como cirurgias robóticas a distância, diagnósticos de imagem em tempo real e monitoramento contínuo de pacientes críticos (BERLET et al., 2022; KARAKO et al. 2020). Esses avanços não apenas demonstram a capacidade técnica da tecnologia, mas também seu potencial de democratizar o acesso a cuidados de alta complexidade em regiões remotas, reduzindo desigualdades regionais de acesso à saúde (CERRI, 2023).

Entretanto, persistem desafios significativos. No Brasil, ainda existem barreiras de infraestrutura, como a baixa capilaridade da fibra óptica, a necessidade de densificação de antenas e a integração de edge computing (PASSOS, 2019; SILVA, M. A., 2022). Também se destacam as questões de interoperabilidade hospitalar, regulamentação e segurança cibernética, fundamentais para assegurar o uso ético e seguro da tecnologia (LIMA, 2024; SILVA; SOUZA; ALVEZ, 2023) e (SANTANA et al., 2024).

A relevância deste trabalho reside em oferecer uma análise dos avanços e obstáculos da telemedicina 5G, reunindo evidências de artigos acadêmicos, estudos de caso e posicionamentos especializados. Dessa forma, busca-se mapear o estado da arte e fornecer subsídios para a formulação de estratégias de implementação seguras, eficazes e justas no contexto brasileiro. Assim, este estudo se justifica pela necessidade de compreender o papel do 5G na transformação dos sistemas de saúde, destacando suas potencialidades e os desafios que ainda precisam ser superados para sua consolidação em escala global e nacional.

2 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho é qualitativa, de caráter exploratório e descritivo, fundamentada em revisão de literatura recente sobre a aplicação do 5G na telemedicina, com ênfase na latência ultrabaixa (URLLC) e suas implicações para procedimentos remotos. Tal abordagem busca reunir, analisar e interpretar criticamente a produção científica, permitindo uma visão ampla e consistente do tema, como destaca Gil (2019), ao ressaltar a importância de métodos exploratórios e descritivos para tópicos em consolidação.

A pesquisa bibliográfica foi conduzida em bases nacionais e internacionais como IEEE Xplore, ScienceDirect, PubMed, Scopus, Google Scholar e SciELO Brasil, considerando o período de 2018 a 2024. Foram incluídos artigos, dissertações e relatórios técnicos diretamente relacionados ao uso do 5G em telemedicina, enquanto publicações sem revisão por pares, sem acesso integral ou focadas apenas em tecnologias anteriores foram excluídas.

O processo de seleção envolveu três etapas: leitura exploratória, seletiva e analítica com organização dos dados, categorizando avanços, desafios e aspectos regulatórios. Os resultados foram sistematizados em três eixos: avanços tecnológicos (telecirurgias, diagnósticos e monitoramento em tempo real), desafios estruturais (infraestrutura, interoperabilidade e cibersegurança) e questões éticas e regulatórias. A pesquisa bibliográfica baseou-se na análise de 38 referências acadêmicas publicadas entre 2018 e 2024, abrangendo estudos nacionais e internacionais. Dentre essas fontes, 23 correspondem a artigos científicos internacionais publicados em periódicos indexados como IEEE Access, JMIR Formative Research, Electronics e Sensors; 5 são artigos nacionais, provenientes de revistas brasileiras da área da saúde e tecnologia; 2 são trabalhos acadêmicos (dissertações e TCCs); 4 artigos foram apresentados em conferências internacionais; 2 correspondem a relatórios técnicos e 1 é um livro utilizado como referência metodológica.

Reconhece-se, por fim, que a pesquisa possui limitações, especialmente pelo recorte temporal que pode excluir estudos anteriores, além do fato de que, em muitos países, o 5G ainda se encontra em fase de implementação, o que concentra a literatura em análises de viabilidade e casos piloto em detrimento de aplicações já consolidadas.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 TELEMEDICINA E SAÚDE DIGITAL

A telemedicina é compreendida como a prática de prestação de serviços médicos a distância, viabilizada pelo uso de tecnologias de comunicação e informação. Historicamente, sua evolução ocorreu em paralelo ao avanço das redes de telecomunicações, passando de simples consultas via telefone para sistemas complexos de transmissão de dados e imagens em tempo real (SILVA, M. A., 2022).

No contexto da saúde digital, a telemedicina desempenha papel estratégico ao ampliar o acesso a serviços especializados em regiões remotas, reduzir custos logísticos e melhorar a eficiência do atendimento (CERRI, 2023). Entre suas principais aplicações destacam-se as consultas médicas virtuais, o monitoramento remoto de pacientes crônicos, a realização de diagnósticos à distância e, mais recentemente, as cirurgias assistidas por robôs (DEVI et al., 2023).

Antes da chegada do 5G, as redes 3G e 4G possibilitaram avanços significativos, mas apresentavam limitações críticas: latência elevada (30–50 ms), instabilidade em transmissões de alta resolução e baixa capacidade de suportar conexões massivas (SIDDIQI; YU; JOUNG, 2019). Essas restrições comprometiam a execução de procedimentos que exigem respostas em tempo real, como telecirurgias, restringindo a telemedicina a serviços menos críticos, como consultas virtuais e troca de informações clínicas básicas.

3.2 TECNOLOGIA 5G E SUA APLICAÇÃO NA SAÚDE

A quinta geração de redes móveis (5G) representa um salto qualitativo em relação às gerações anteriores, pois combina alta taxa de transmissão de dados, maior confiabilidade e latência ultrabaixa em um mesmo ecossistema. Suas bases tecnológicas assentam-se em três pilares: Enhanced Mobile Broadband (eMBB), voltado para ampliar a largura de banda; Massive Machine Type Communications (mMTC), que viabiliza a conexão simultânea de milhões de dispositivos; e Ultra-Reliable Low Latency Communications (URLLC), essencial para aplicações críticas que exigem tempos de resposta entre 1 e 10 ms, como ocorre em procedimentos médicos remotos (POPOVSKI et al., 2019; SIDDIQI; YU; JOUNG, 2019).

Quando comparado às gerações anteriores (Quadro 1), os avanços são evidentes: no 3G, as latências médias eram da ordem de centenas de milissegundos, inviabilizando aplicações

interativas em tempo real; no 4G, houve ganhos significativos, com latências reduzidas para 30–50 ms, possibilitando videoconferências e teleconsultas com boa qualidade, mas ainda insuficientes para cirurgias remotas ou diagnósticos que demandam sincronização quase instantânea (JAIN; JAIN, 2022). Já o 5G atinge tempos de resposta até dez vezes menores, o que abre espaço para aplicações críticas. (POPOVSKI et al., 2019; BERLET et al., 2022).

Quadro 1 - Comparativo das gerações móveis e aplicações em saúde

Geração	Velocidade média	Latência	Aplicações em saúde possíveis	Limitações
3G	Até 2 Mbps	100–200 ms	Consultas básicas via vídeo	Baixa qualidade de vídeo, inviável para emergências
4G/LTE	100 Mbps	30–50 ms	Monitoramento remoto, exames de imagem em tempo quase real	Latência ainda alta para cirurgias críticas
5G	Até 10 Gbps	1–10 ms	Telessurgerias, monitoramento UTI em tempo real, IoMT massivo	Requer infraestrutura moderna e segura

Fonte: adaptado de SIDDIQI; YU; JOUNG, (2019); POPOVSKI et al., (2019); BAIRAGI et al., (2020)

Um dos elementos técnicos que garantem essa confiabilidade é o uso de novos esquemas de codificação de canal, como os códigos LDPC e Polar. O design e a otimização desses códigos nos sistemas de comunicação 5G têm como principal objetivo melhorar o desempenho e reduzir a latência, mantendo a flexibilidade necessária para atender aos diversos cenários de aplicação. Ambos os esquemas foram incorporados à arquitetura do 5G, com adaptações específicas voltadas à eficiência computacional, à compatibilidade de taxas de código e ao uso otimizado de hardware.

Nos códigos polares, avanços significativos foram alcançados com o desenvolvimento do decodificador RP-SCL (Reduced Path Successive Cancellation List), que reduz a complexidade computacional ao eliminar caminhos redundantes, diminuindo o tempo de processamento e o uso de memória (ABDULWAHAB; KADHIM, 2021). Além disso, uma arquitetura de hardware flexível baseada em listas foi projetada para suportar diferentes tamanhos de quadros e taxas de código, atingindo uma latência máxima inferior a 24 μ s, parâmetro essencial para aplicações 5G em tempo real (MOUHOUBI et al., 2021). A possibilidade de concatenação de códigos polares com LDPC reforça sua capacidade de alcançar compatibilidade de taxas e bom desempenho em canais degradados.

Os códigos LDPC, por sua vez, utilizam técnicas de decodificação por passagem de mensagens, aprimoradas por meio do método de gargalo de informações, o que mantém o desempenho mesmo com precisão finita e reduz a complexidade do sistema (STARK et al., 2020). Além disso, a implementação de codificadores quase cíclicos permite maior eficiência de uso do hardware, possibilitando o processamento flexível de múltiplos tipos de código e minimizando recursos ociosos (PETROVIC et al., 2021).

Em síntese, enquanto os códigos polares se destacam por sua baixa latência e eficiência em mensagens curtas, os códigos LDPC oferecem maior robustez e confiabilidade sob diferentes condições de canal. Dessa forma, a escolha entre ambos depende dos requisitos específicos da aplicação, como a sensibilidade à latência, a capacidade de correção de erros e as demandas de processamento do sistema.

Além disso, a arquitetura do 5G permite a coexistência entre diferentes tipos de tráfego com por exemplo, o tráfego de vídeo de alta demanda (eMBB) e o tráfego crítico (URLLC), o que requer mecanismos de alocação dinâmica que são essenciais na arquitetura das redes 5G, pois otimizam a utilização dos recursos disponíveis e garantem maior eficiência e flexibilidade na prestação de serviços. Onde por meio da divisão de rede (network slicing), é possível isolar e destinar recursos específicos a diferentes serviços, assegurando Qualidade de Serviço (QoS) personalizada (LIN et al., 2023).

O gerenciamento sensível ao contexto, apoiado em mapas ambientais de rádio (REM), permite o compartilhamento dinâmico do espectro e melhora o desempenho em tempo real (KRYSZKIEWICZ et al., 2018). Além disso, técnicas baseadas em aprendizado por reforço profundo possibilitam a alocação autônoma e adaptativa de recursos, ajustando a rede conforme as demandas e métricas de QoS (SUN et al., 2019). Esses mecanismos proporcionam melhor aproveitamento de recursos, QoS aprimorada e maior escalabilidade (LIETO et al., 2018; REHMAN et al., 2020), embora também exijam sistemas de controle mais sofisticados para equilibrar a eficiência com a complexidade de gerenciamento, bem como estratégias de isolamento que se baseiam no conceito de fatiamento de rede (network slicing), que permite a criação de múltiplas redes virtuais isoladas sobre uma única infraestrutura física para garantir a prioridade dos procedimentos médicos (WAN et al., 2018).

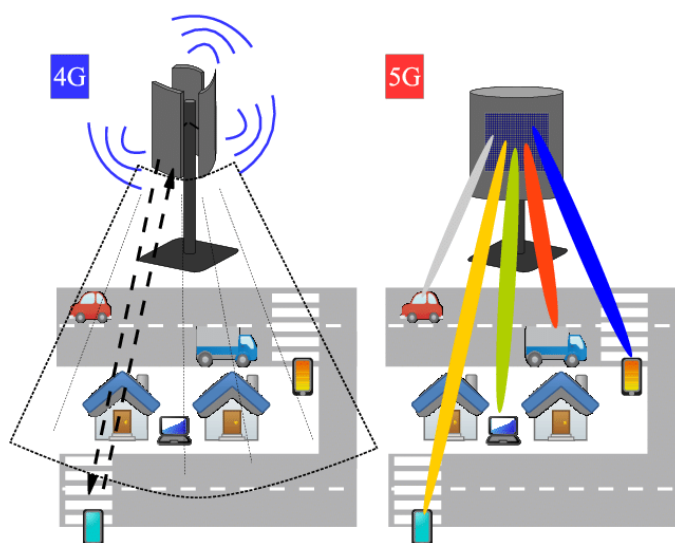
No contexto hospitalar, a integração do 5G demanda não apenas a instalação de antenas small cells que têm se destacado como uma solução essencial para otimizar o desempenho das redes sem fio em ambientes internos de alto tráfego, pois ampliam a capacidade da rede, melhoram a cobertura e oferecem uma alternativa economicamente viável à expansão das

macroestruturas tradicionais. Essas estações base de baixa potência são estrategicamente implantadas para aliviar o tráfego das macrocélulas, garantindo melhor qualidade de sinal, especialmente em locais com barreiras físicas significativas (Jaimes-Illanes, 2021; Diago-Mosquera et al., 2020). Entretanto, sua implementação enfrenta desafios relacionados à propagação de ondas de rádio, à interferência entre células próximas e às questões regulatórias do uso de espectro compartilhado, exigindo planejamento e coordenação rigorosos para assegurar a eficiência e a conformidade da operação (Foukas et al., 2018; Diago-Mosquera et al., 2020). No mesmo sentido de integração temos também a conexão com redes de fibra óptica e a adoção de edge computing que desempenha um papel fundamental na otimização do desempenho das redes 5G, ao reduzir a latência, aumentar a taxa de transferência e aprimorar a alocação de recursos em tempo real.

Por processar dados próximos aos usuários finais, essa tecnologia supera as limitações da computação em nuvem tradicional, minimizando o congestionamento e proporcionando respostas mais rápidas, aspecto essencial para aplicações críticas como o sistema de monitoramento remoto de pacientes em tempo real, especialmente em unidades críticas, onde cada milissegundo pode ser determinante para a intervenção médica (Hassan et al., 2019). Além disso, a transferência de tarefas para servidores periféricos contribui para maior rendimento da rede, enquanto protocolos de roteamento inteligentes garantem alta eficiência na transmissão de dados ("Interference Aware Cooperative Routing f...", 2022). A qualidade de experiência dos usuários também é aprimorada, uma vez que ferramentas como o MecPerf possibilitam medições de desempenho mais precisas e otimização contínua dos serviços (Caiazza et al., 2020). Contudo, a adoção da computação de ponta impõe desafios relacionados à segurança e ao gerenciamento eficiente de recursos, exigindo estruturas robustas para integração com tecnologias já existentes (Hong, 2020).

Além disso, destaca-se a técnica de beamforming figura 1, que é utilizada para concentrar sinais de rádio na direção dos clientes com os quais estão se comunicando, a fim de melhorar a capacidade e taxa de transferência no 5G o sinal é direcionado em forma de feixe para o dispositivo (OLIVEIRA; ALENCAR; LOPES, 2018).

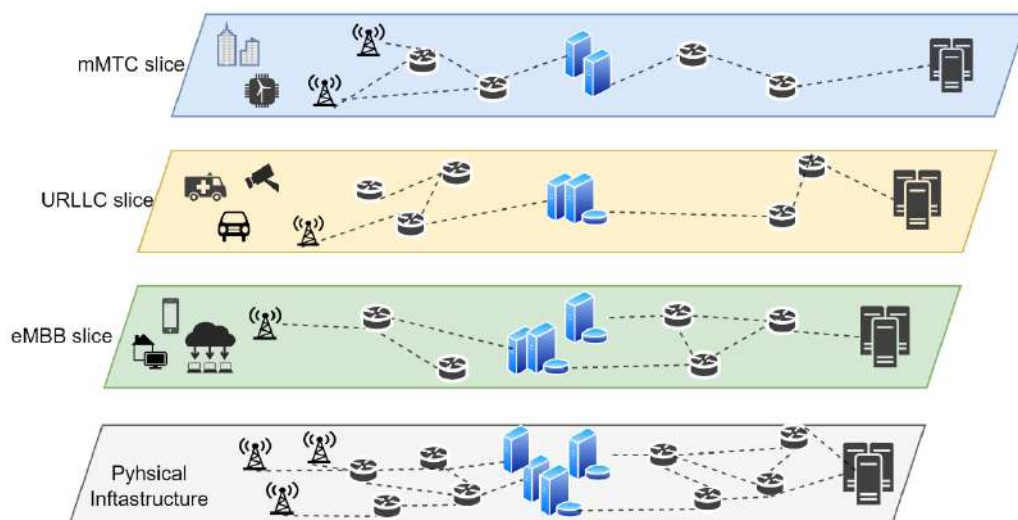
Figura 1- Esquemas de transmissão em redes 4G e 5G com e sem formação de feixe



Fonte: 5G and Beyond: Past, Present and Future of the Mobile Communications - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Transmission-schemes-in-4G-and-5G-networks-with-and-without-beamforming-respectively_fig3_350353475

O uso da network slicing, técnica que permite a criação de “fatias” virtuais da rede 5G figura 2, dedicadas a aplicações específicas é outro avanço essencial. Ela garante que aplicações críticas operem com prioridade absoluta e sem interferências de tráfego paralelo, mesmo em cenários de alta demanda, como hospitais superlotados (POPOVSKI et al., 2018); (NIKBAKHT et al., 2022). Essa arquitetura garante previsibilidade e segurança na comunicação, condições indispensáveis para a saúde digital.

Figura 2- fatiamento de rede para diferentes tipos de serviços.



Fonte: DOMEKE, A.; CIMOLI, B.; MONROY, I. T., 2022.

Outro aspecto importante refere-se à cobertura geográfica. Embora o 5G já esteja em implantação em áreas urbanas, sua expansão para regiões rurais e remotas enfrenta desafios de custo e infraestrutura. Nesse sentido, estudos recentes apontam a integração de redes satelitais ao ecossistema 5G como alternativa para ampliar a conectividade em regiões isoladas, como comunidades ribeirinhas da Amazônia e áreas de difícil acesso (WANG et al., 2018). Essa convergência tem potencial para reduzir desigualdades no acesso à saúde, tornando viáveis teleconsultas e diagnósticos de alta complexidade em regiões até então desassistidas.

Finalmente, observa-se que a implementação do 5G não ocorre de forma isolada, mas em um cenário de convivência com redes anteriores (4G e até 3G). O compartilhamento de espectro com redes anteriores tem se mostrado uma estratégia eficaz para aumentar a eficiência e a velocidade das comunicações sem fio, promovendo melhor aproveitamento dos recursos e redução de interferências. Por meio de mecanismos como o Acesso Compartilhado Licenciado (LSA), é possível realizar o compartilhamento dinâmico de frequências, resultando em ganhos expressivos na eficiência espectral e no desempenho geral da rede (Onidare et al., 2020). A integração do LSA com tecnologias multicelulares de múltiplas entradas e saídas (MU-MIMO) também contribui para otimizar a qualidade de serviço e o controle de interferência (Ntougias, 2019). No entanto, a gestão eficiente da interferência e a garantia da qualidade de serviço ainda representam desafios significativos, especialmente em faixas de ondas milimétricas, exigindo técnicas de coordenação avançadas e contínua pesquisa para equilibrar desempenho e estabilidade operacional (Ghadikolaei et al., 2020; Ntougias, 2019).

Para a telemedicina, esses elementos técnicos significam que a plena realização de aplicações críticas dependerá tanto do avanço da infraestrutura quanto de políticas públicas que garantam capilaridade da rede, assim, a tecnologia 5G representa um elemento essencial para a transformação da telemedicina, não apenas pela velocidade e confiabilidade, mas sobretudo pela latência ultrabaixa que torna viável um novo patamar de atendimento médico remoto. Entretanto, sua aplicação na saúde requer um ecossistema integrado de telecomunicações, investimentos em infraestrutura, interoperabilidade hospitalar e segurança cibernética robusta, de modo a assegurar que os avanços tecnológicos se traduzam em benefícios concretos para a sociedade.

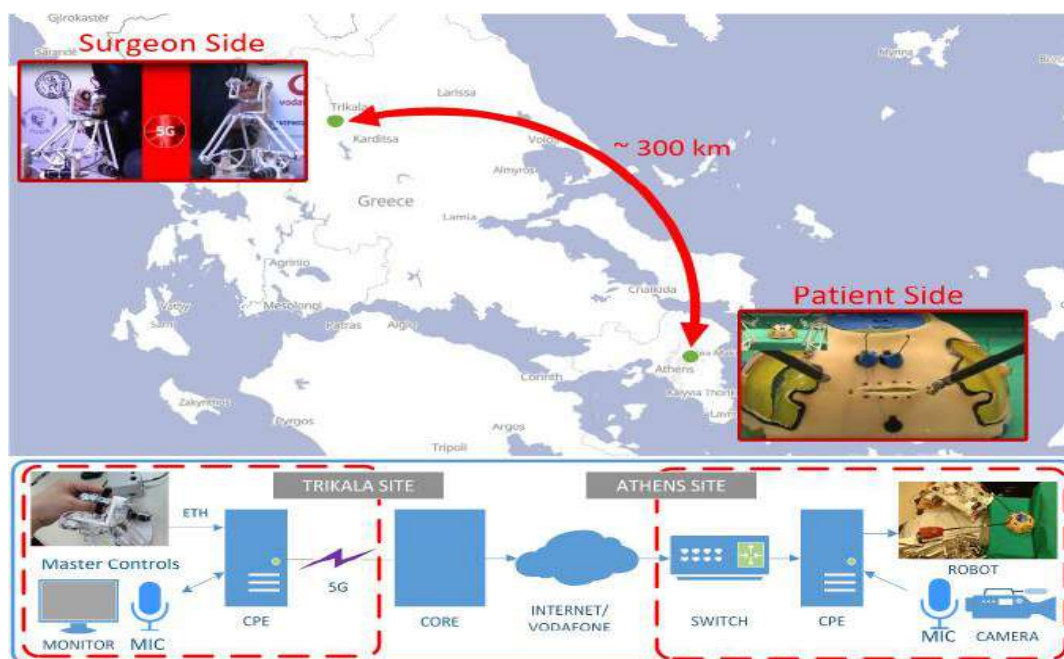
3.3 AVANÇOS VIABILIZADOS PELO 5G NA TELEMEDICINA

A implementação da tecnologia 5G na área da saúde abre caminho para um conjunto de avanços inéditos, impulsionados principalmente pela latência ultrabaixa (URLLC) e pela alta confiabilidade de transmissão. Essas características são determinantes para aplicações médicas críticas, que dependem de respostas em tempo real e da integridade absoluta dos dados transmitidos (POPOVSKI et al., 2019).

Entre os avanços mais significativos está a telecirurgia, possibilitada pelo uso de sistemas robóticos interligados por redes 5G. Ao garantir tempos de resposta entre 1 e 10 ms, o 5G viabiliza movimentos sincronizados e altamente precisos, permitindo que um cirurgião realize procedimentos complexos em pacientes localizados a centenas de quilômetros de distância.

Experimentos documentados já confirmaram a viabilidade dessa aplicação, como as telecirurgias assistidas testadas em ambientes controlados (SOUZA; SANTOS, 2023); (SOUZA et al., 2024). Um exemplo recente foi o conjunto de experimentos de telecirurgia sobre 5G na Grécia usando um novo protótipo de robô cirúrgico chamado “Double Delta”. Os experimentos consistiram em exercícios cirúrgicos simples em um kit de treinamento cirúrgico robótico onde o cirurgião estava teleoperando o robô a cerca de 300 km de distância, figura 3.

Figura 3 - Localização geográfica da demonstração de telecirurgia e diagrama abstrato dos componentes nos dois locais



Fonte: MOUSTRIS, G.; TZAFESTAS, C.; KONSTANTINIDIS, K. A long distance telesurgical demonstration on robotic surgery phantoms over 5G. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, v. 18, n. 9, p. 1577–1587, 2023.

Esses resultados sugerem que, em um futuro próximo, será possível integrar a robótica médica a centros de saúde periféricos, ampliando o acesso a procedimentos antes restritos a hospitais de ponta.

Outro avanço notável é o monitoramento contínuo em tempo real dos sinais vitais, essencial para pacientes em estado crítico em unidades de terapia intensiva (UTI) ou em acompanhamento domiciliar, figura 4. A combinação do 5G com a Internet das Coisas Médica (IoMT) possibilita a coleta e transmissão contínua de sinais vitais por dispositivos vestíveis e sensores inteligentes, assegurando que qualquer alteração no quadro clínico seja detectada imediatamente (CERRI, 2023; SANTANA et al., 2024). Essa capacidade amplia a eficácia das equipes médicas e reduz o tempo de resposta em situações de emergência, além de diminuir reinternações e custos hospitalares.

Figura 4 - central de monitorização

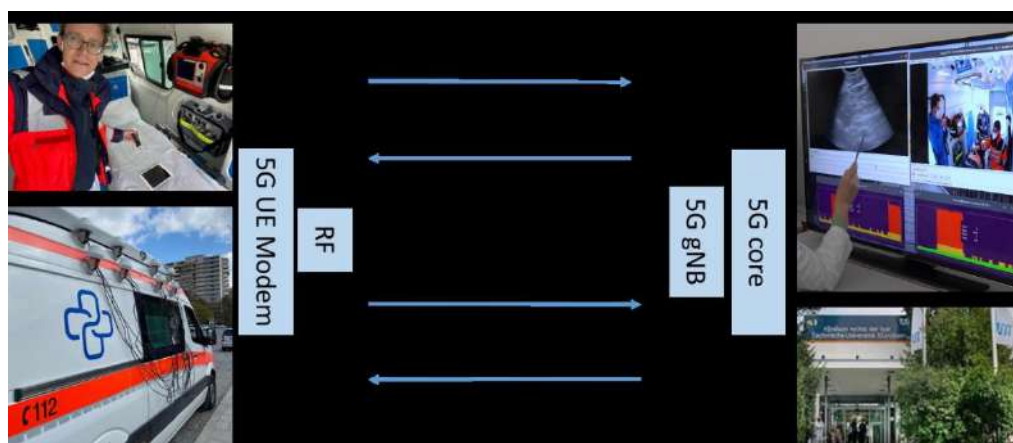


Fonte: **SPACELABS HEALTHCARE**. Vigilância central com o Xhibit XC48. Disponível em: <https://spacelabshealthcare.com/pt/produtos/monitoramento-e-conectividade-do-paciente/monitoramento-central/vigilancia-central-com-o-xhibit-xc48/>. Acesso em: 11 fev. 2025.

Na área de diagnósticos por imagem, o 5G possibilita transmissões de altíssima resolução com mínima latência, garantindo que exames de tomografia, ressonância magnética e ultrassonografia sejam enviados e analisados em tempo real. (BERLET et al., 2022), por exemplo, foi demonstra a viabilidade da transmissão de ultrassonografias móveis realizadas em ambulâncias conectadas por redes 5G, com envio imediato das imagens para hospitais de

referência, agilizando a tomada de decisão médica em atendimentos de emergência, como podemos observar na figura 5, a estrutura utilizada para o teste de campo contou com: Carro de ambulância (à esquerda) equipado com ultrassom móvel e câmera com panorâmica, inclinação e zoom conectada a um modem UE. Este último está conectado a uma unidade de RF, que por sua vez está conectada às antenas UE no teto superior do carro da ambulância. O local remoto do hospital (à direita) está conectado ao 5G.

Figura 5 - Estrutura para o teste de campo 5G



Fonte: **BERLET, Maximilian et al.** Emergency telemedicine mobile ultrasounds using a 5G-enabled application: development and usability study. *JMIR Formative Research*, v. 6, n. 5, e36824, 2022.

Este tipo de aplicação reforça o caráter transformador do 5G na integração entre o ambiente pré-hospitalar e unidades de saúde de maior complexidade.

Além disso, o 5G tem permitido o desenvolvimento de consultas remotas entre especialistas internacionais, potencializadas pela integração com inteligência artificial (IA). (KARAKO et al., 2020) relataram experiências em que médicos localizados em diferentes países puderam colaborar em diagnósticos complexos em tempo real, combinando análises clínicas humanas e suporte de algoritmos de IA. Esse modelo abre caminho para uma prática médica globalizada e colaborativa, em que pacientes podem se beneficiar do conhecimento de equipes multidisciplinares geograficamente dispersas.

Por fim, é importante destacar o impacto do 5G na expansão do atendimento em regiões remotas. A integração da rede terrestre com satélites em órbita baixa (LEO) que a orbitarem mais próximo da terra do que os satélites geoestacionários (GEO), resultando em latência significativamente menor (cerca de 20–40 ms), comparável à fibra óptica isso amplia o alcance do 5G para áreas rurais e de difícil acesso, possibilitando que comunidades isoladas também tenham acesso a teleconsultas, monitoramentos e diagnósticos em tempo real (WANG et al.,

2018). Essa convergência tem potencial para reduzir desigualdades históricas de acesso à saúde, sobretudo em países como o Brasil, onde a distribuição de especialistas ainda é extremamente desigual.

Em síntese, os avanços viabilizados pelo 5G na telemedicina vão muito além da melhoria de desempenho em comunicações. Trata-se de uma transformação estrutural, que une robótica médica, IoT, diagnósticos em tempo real e colaboração internacional, apontando para uma saúde mais conectada, acessível e eficiente.

3.4 DESAFIOS DA TELEMEDICINA 5G

Apesar do potencial transformador da telemedicina baseada em 5G, sua implementação em larga escala enfrenta desafios técnicos, operacionais, regulatórios e sociais que precisam ser superados para garantir a eficácia, a segurança e a equidade no acesso aos serviços de saúde.

Do ponto de vista técnico, um dos principais entraves é a infraestrutura de telecomunicações. Para que as comunicações ultra confiáveis e de baixa latência (URLLC) funcionem de forma plena, é necessário expandir a cobertura de fibra óptica, promover a densificação de antenas (small cells) e integrar soluções de edge computing, que processam dados próximos ao usuário final, reduzindo ainda mais os tempos de resposta (PASSOS, 2019); SILVA, M. A., 2022). Contudo, essa modernização exige altos investimentos e enfrenta obstáculos relacionados ao planejamento urbano, à regulação de antenas e à viabilidade econômica em regiões de baixa densidade populacional.

Outro desafio é a gestão do espectro de radiofrequências. Em países como o Brasil, a transição do 4G para o 5G ocorre de forma gradual, com compartilhamento de espectro entre as gerações, o que pode comprometer a qualidade do serviço e gerar instabilidade em aplicações críticas (WAN et al., 2018). Além disso, o tráfego misto entre diferentes serviços (URLLC para saúde, eMBB para streaming, mMTC para IoT) impõe desafios à priorização de recursos de rede, especialmente em contextos hospitalares com alta demanda de dados (WAN et al., 2018).

A interoperabilidade entre sistemas também constitui um obstáculo relevante. Muitos hospitais ainda operam com sistemas de prontuários eletrônicos fragmentados e plataformas não compatíveis bem como a transmissão de dados dos aparelhos que utilizam protocolos de comunicação diferentes, dificultando a integração com redes 5G com dispositivos da Internet das Coisas Médica (IoMT). Essa fragmentação tecnológica limita a eficiência do monitoramento contínuo e a análise de dados clínicos em tempo real (SANTANA et al., 2024).

Outro ponto sensível refere-se à segurança cibernética e à privacidade de dados médicos. A transmissão em tempo real de informações altamente sensíveis, como imagens diagnósticas e sinais vitais, aumenta a exposição a ataques cibernéticos e riscos de vazamentos e tornando-se ainda mais perigoso quando a possibilidade de controle remoto de aparelhos, como bombas de infusão e muitos outros. Estudos indicam que, embora o 5G traga mecanismos de encriptação mais avançados, ainda há vulnerabilidades que podem comprometer a confidencialidade e a integridade dos dados (LIMA, 2024); SILVA; SOUZA; ALVEZ, 2023) e (SANTANA et al., 2024). Nesse sentido, a criação de protocolos robustos de segurança, associados a normas de compliance e auditorias periódicas, é essencial para garantir confiança na adoção da tecnologia.

Além dos desafios técnicos, existem barreiras regulatórias e éticas. Do ponto de vista regulatório, a ausência de normas específicas para procedimentos médicos, dificulta a padronização das práticas e a definição de responsabilidades em casos de falhas ou erros médicos (SOUZA; SANTOS, 2023). Do ponto de vista ético, surgem questionamentos sobre a responsabilidade profissional em telecirurgias e sobre a tomada de decisão assistida por inteligência artificial, que podem gerar dilemas relacionados à autonomia do paciente e à imputação de responsabilidade em eventuais falhas (BAIRAGI et al., 2020).

Por fim, é preciso considerar a desigualdade de acesso. Embora as aplicações de telemedicina 5G tenham avançado em grandes centros urbanos, regiões rurais e remotas ainda enfrentam dificuldades de conectividade. A integração de satélites em órbita baixa (LEO) ao ecossistema 5G surge como alternativa promissora para ampliar o alcance, mas ainda esbarra em custos elevados e falta de políticas públicas consistentes (WANG et al., 2018). Esse cenário indica o risco de que o 5G, em vez de reduzir desigualdades, possa aprofundá-las caso sua implementação não seja acompanhada por estratégias inclusivas de acesso.

Assim, os desafios da telemedicina baseada em 5G vão além da dimensão tecnológica. Eles abrangem aspectos de infraestrutura, interoperabilidade, segurança, regulamentação e equidade social, todos fundamentais para que os avanços científicos se traduzam em melhorias reais no cuidado médico. Superar esses obstáculos exige esforços coordenados entre governos, indústria, instituições de saúde e comunidade científica, consolidando o 5G como um pilar efetivo da saúde digital.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A revisão da literatura recente (2018–2024) permitiu identificar tanto os avanços já viabilizados pela telemedicina baseada em redes 5G quanto os desafios que ainda limitam sua plena implementação. Os achados evidenciam que, enquanto a tecnologia apresenta grande potencial para transformar a prática médica, sobretudo em aplicações críticas que exigem comunicação em tempo real, sua consolidação em escala nacional e internacional depende da superação de obstáculos técnicos, regulatórios e sociais (Quadro 2).

Quadro 2 - Avanços vs. Desafios

Categoria	Avanços	Desafios
Latência e URLLC	Redução para 1–10 ms, viabilizando telecirurgias e diagnósticos em tempo real (POPOVSKI et al., 2019;(SOUZA et al., 2024) CARVALHO; CASTRO, 2024).	Necessidade de infraestrutura robusta (fibra, edge computing) para garantir estabilidade (SILVA; SOUZA; ALVEZ, 2023) e (SANTANA et al., 2024).
Aplicações Clínicas	Cirurgias robóticas remotas, ultrassonografia via 5G em ambulâncias e áreas rurais (KARAKO et al., (2020); BERLET et al., 2022).	Falta de regulamentação específica para telecirurgia e dúvidas éticas sobre responsabilidade médica (SOUSA; SANTOS, 2023).
Integração IoMT	Monitoramento contínuo em UTIs e com wearables, ampliando o suporte ao paciente (SILVA; SOUZA; ALVEZ, 2023) e (SANTANA et al., 2024).	Interoperabilidade limitada entre sistemas hospitalares e padrões heterogêneos de dados (DEVI et al., 2023).
Gestão de Rede	Network slicing para criar canais exclusivos para saúde, evitando congestionamento (POPOVSKI et al., 2018).	Coexistência com serviços eMBB pode causar competição de recursos críticos (BAIRAGI et al., 2020).
Segurança e Privacidade	Tecnologias de criptografia avançada e segmentação de rede dedicadas ao setor médico.	Riscos de ciberataques e sequestro de dados hospitalares (LIMA, (2024); SANTOS, (2022).
Equidade e Acesso	Potencial para democratizar acesso a especialistas em áreas remotas (SOUSA; SANTOS (2023); KARAKO et al. (2020)).	Desigualdade na implementação: zonas rurais ainda sofrem com baixa cobertura (SANTANA et al., 2024).

(Fonte: dados da pesquisa).

No que se refere aos avanços, a literatura destaca o impacto da latência ultrabaixa (URLLC), que possibilita aplicações como telecirurgias assistidas por robôs com precisão de movimentos em tempo real (SOUSA; SANTOS (2023); SOUZA et al., 2024), o monitoramento contínuo de pacientes críticos em UTIs e em atendimento domiciliar por meio da Internet das Coisas Médica (CERRI, 2023; SANTANA et al., 2024) e os diagnósticos de imagem em alta

resolução, transmitidos com mínima latência, como no caso das ultrassonografias móveis em ambulâncias conectadas por 5G (BERLET et al., 2022). Outro avanço reportado é a realização de consultas e diagnósticos colaborativos internacionais, potencializados pela integração entre 5G e inteligência artificial, permitindo que especialistas em diferentes países atuem em conjunto em tempo real (KARAKO et al., 2020). Além disso, recursos como a network slicing garantem a criação de fatias dedicadas da rede, assegurando prioridade para aplicações médicas críticas mesmo em ambientes congestionados (POPOVSKI et al., 2018; (NIKBAKHT et al. 2022). A expansão da cobertura também tem sido viabilizada pela integração com satélites em órbita baixa (LEO), alternativa promissora para ampliar o alcance da telemedicina em regiões rurais e remotas (WANG et al. (2018).

Esses resultados confirmam que o 5G oferece avanços disruptivos para a saúde digital, permitindo que procedimentos antes inviáveis com o 4G se tornem realidade, sobretudo nas áreas de cirurgia robótica, diagnósticos em tempo real e monitoramento intensivo. Entretanto, tais avanços ainda estão concentrados em contextos experimentais, pilotos hospitalares e países com infraestrutura mais robusta, como China, Coreia do Sul e Estados Unidos, o que evidencia a desigualdade de estágios de implementação em nível global (KARAKO et al. (2020); SOUZA et al., 2024).

Ao mesmo tempo, a revisão revelou desafios estruturais e operacionais expressivos. No Brasil, um dos principais entraves é a infraestrutura de telecomunicações insuficiente, que exige investimentos maciços em fibra óptica, densificação de antenas (small cells) e edge computing para garantir comunicações estáveis e de baixa latência (PASSOS, 2019); SILVA, M. A., 2022). A gestão do espectro e a convivência entre diferentes tipos de tráfego (URLLC, eMBB e mMTC) também se apresentam como problemas, visto que a sobreposição de demandas pode comprometer a qualidade do serviço em aplicações críticas de saúde (WAN et al., 2018; NIKBAKHT et al. 2022).

Outro ponto recorrente refere-se à interoperabilidade hospitalar, ainda limitada por sistemas fragmentados de prontuários eletrônicos e plataformas pouco compatíveis, o que compromete a integração plena da telemedicina 5G ao ecossistema hospitalar (SANTANA et al., 2024). Além disso, a segurança cibernética e a privacidade de dados médicos configuram desafios centrais: embora o 5G traga novos protocolos de encriptação, a complexidade da rede e o número crescente de dispositivos conectados aumentam a superfície de vulnerabilidade a ataques (LIMA, 2024; SILVA; SOUZA; ALVEZ, 2023) e SANTANA et al., 2024).

No campo regulatório e ético, persistem incertezas quanto à responsabilidade profissional em procedimentos remotos, especialmente em telecirurgias, bem como dilemas sobre a tomada de decisão clínica mediada por inteligência artificial (SOUSA; SANTOS, 2023; SOUZA et al., 2024). Além disso, o descompasso entre inovação tecnológica e regulamentação dificulta a definição de normas claras que assegurem padronização e segurança.

Por fim, a revisão destacou a questão da desigualdade de acesso. Enquanto grandes centros urbanos já começam a usufruir dos primeiros benefícios da telemedicina 5G, regiões rurais e remotas ainda permanecem sem cobertura adequada. A integração do 5G com satélites LEO surge como solução promissora, mas ainda enfrenta barreiras de custo e falta de políticas públicas consistentes (WANG et al. 2018; SANTANA et al., 2024). Esse cenário aponta o risco de que, caso não haja políticas inclusivas, o 5G possa aprofundar desigualdades em vez de reduzi-las.

Em síntese, os resultados e a discussão apontam que a telemedicina 5G apresenta um grande potencial transformador, capaz de democratizar o acesso à saúde de alta complexidade, reduzir desigualdades regionais e otimizar a eficiência clínica. No entanto, sua plena consolidação depende da superação de desafios técnicos, regulatórios e sociais. Para o Brasil, em particular, a questão central não é apenas tecnológica, mas envolve a criação de políticas públicas de inclusão digital, investimentos coordenados em infraestrutura e regulamentações específicas para a saúde digital, de modo a alinhar o ritmo da inovação global às necessidades locais.

5 CONCLUSÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso teve como objetivo analisar os avanços e desafios da telemedicina baseada em redes 5G, com foco na latência ultrabaixa (URLLC) e em suas implicações para procedimentos médicos remotos. A partir de uma revisão de literatura publicada entre 2018 e 2024, onde foram examinados artigos acadêmicos, dissertações, estudos de caso e relatórios técnicos, permitindo uma compreensão abrangente do estado da arte e das perspectivas futuras.

Os resultados demonstraram que o 5G configura-se como um marco disruptivo para a saúde digital, viabilizando aplicações de alto impacto, como telecirurgias assistidas por robôs, diagnósticos de imagem em tempo real, monitoramento contínuo de pacientes críticos e consultas colaborativas internacionais mediadas por inteligência artificial. Esses avanços foram impulsionados pela capacidade de o 5G oferecer latência de 1 a 10 ms, confiabilidade elevada e suporte à conectividade massiva, características que o diferenciam radicalmente das gerações anteriores (3G e 4G).

No entanto, os estudos também evidenciaram que a adoção plena da telemedicina 5G ainda enfrenta desafios estruturais e regulatórios significativos. Entre os principais obstáculos estão a insuficiência da infraestrutura de telecomunicações no Brasil, a necessidade de densificação de antenas e expansão da fibra óptica, a complexidade da gestão do espectro e do tráfego misto, a fragmentação dos sistemas hospitalares, os riscos de segurança cibernética e a ausência de normas regulatórias específicas para procedimentos médicos remotos. Soma-se a esses fatores a desigualdade de acesso entre regiões urbanas e rurais, que pode ampliar disparidades já existentes caso não sejam implementadas políticas públicas inclusivas.

As contribuições deste trabalho podem ser divididas em dois eixos principais. Do ponto de vista acadêmico, ao sistematizar e categorizar os avanços e desafios do 5G aplicado à telemedicina, fornece uma visão crítica e comparativa que pode servir de base para futuras pesquisas. Do ponto de vista prático, oferece subsídios para profissionais de saúde, gestores públicos e formuladores de políticas, ao indicar caminhos para a implementação segura e eficaz dessa tecnologia em sistemas de saúde.

Por fim, destaca-se que a telemedicina 5G, embora ainda em estágio inicial no Brasil, apresenta um grande potencial transformador, capaz de democratizar o acesso a serviços médicos de alta complexidade, reduzir desigualdades regionais e otimizar a eficiência clínica. Para que esse potencial se concretize, será necessário superar os obstáculos identificados por

meio de investimentos coordenados em infraestrutura, regulamentação clara, protocolos robustos de segurança cibernética e políticas públicas inclusivas. Nesse sentido, a consolidação da telemedicina 5G não deve ser vista apenas como um desafio tecnológico, mas como uma oportunidade estratégica para promover a modernização e a equidade nos sistemas de saúde.

6 REFERÊNCIAS

ABDULWAHAB, Walled Khalid; KADHIM, Abdulkareem Abdulrahman. Reduced Path Successive Cancellation List Decoding for Polar Codes. *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, v. 11, n. 1, p. 12–23, 2021. DOI: <https://doi.org/10.46604/ijeti.2021.6376>

BAIRAGI, Anupam Kumar; CHATTERJEE, Madhusree; GHOSH, Subrata; GHOSH, Subhajit. Coexistence mechanism between eMBB and uRLLC in 5G wireless networks. *IEEE Transactions on Communications*, v. 69, n. 3, p. 1736-1749, 2020. DOI: [10.1109/TCOMM.2020.3040307](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.3040307)

BERLET, Maximilian et al. Emergency telemedicine mobile ultrasounds using a 5G-enabled application: development and usability study. *JMIR Formative Research*, v. 6, n. 5, e36824, 2022. DOI: <https://doi.org/10.2196/36824>.

CAIAZZA, Chiara; BERNARDI, Leonardo; BEVILACQUA, Marco Giorgio; et al. MECPerf: Uma ferramenta de nível de aplicação para estimar o desempenho da rede em ambientes de computação de borda. *Conferência de Software e Aplicações de Computadores*, p. 1163–1168, 2020. Disponível em: <https://arpi.unipi.it/bitstream/11568/1063679/1/mecperf-compsac-preprint.pdf>

CARVALHO, R.; CASTRO, R. C. O. S. A telemedicina no processo de democratização da saúde no Brasil: uma revisão integrativa. *Brazilian Journal of Implantology and Health Sciences*, [S. l.], v. 6, n. 2, p. 1737–1751, 2024. DOI: <https://doi.org/10.36557/2674-8169.2024v6n2p1737-1751>.

CERRI, G. A tecnologia pode ajudar o SUS a salvar vidas. *Boletim do Instituto de Saúde – BIS*, São Paulo, v. 24, edição especial, p. 63–67, 2023. DOI: 10.52753/bis.v24iEdição especial.39938. Disponível em: <https://periodicos.saude.sp.gov.br/bis/article/view/39938>.

DOMEKE, A.; CIMOLI, B.; MONROY, I. T. Integration of network slicing and machine learning into edge networks for low-latency services in 5G and beyond systems. *Applied Sciences*, v. 12, n. 13, p. 6617, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12136617>

DE LUCCA, Jefferson; MAURO, Paulo Sérgio Gaudêncio. Desafios da tecnologia 5G. *Revista Interface Tecnológica*, Taquaritinga, SP, v. 17, n. 1, p. 29–39, 2020. DOI: 10.31510/inf.v17i1.708. Disponível em: <https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/article/view/708>.

DEVI, Delshi Howsalya et al. 5G technology in healthcare and wearable devices: a review. *Sensors*, v. 23, n. 5, p. 2519, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23052519>.

DIAGO-MOSQUERA, Melissa Eugenia; ARAGON-ZAVALA, Alejandro; CASTANON, Gerardo. Bringing It Indoors: A Review of Narrowband Radio Propagation Modeling for Enclosed Spaces. *IEEE Access*, v. 8, p. 103875–103899, 2020. Disponível em: <https://dblp.uni-trier.de/db/journals/access/access8.html#Diago-MosqueraZ20>

FOUKAS, Xenofon; MARINA, Mahesh K.; KONTOVASILIS, Kimon. Iris: Deep Reinforcement Learning Driven Shared Spectrum Access Architecture for Indoor Neutral-Host

Small Cells. arXiv: Networking and Internet Architecture, 2018 PISHRO-NIK. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1812.06183>

GIL, A. C. Métodos e técnicas de pesquisa social. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

HASSAN, Najmul; YAU, Kok-Lim Alvin; WU, Celimuge. Edge Computing em 5G: uma revisão. *IEEE Access*, v. 7, p. 127276–127289, 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8821283>

HONG, Sung-tae. Rumo a redes 5G mais eficientes através de agendamento dinâmico de tráfego. – 2020. Disponível em: <https://scholarworks.unist.ac.kr/bitstream/201301/31938/1/Towards%20Efficient%20G%5G%20Networks%20via%20Dynamic%20Traffic%20Tcheduling.pdf>

JAIMES-ILLANES, Gabriel. Planning and simulation for radio access networks on “small cells” technology for heterogeneous environments. *Revista Investigación & Desarrollo*, v. 21, n. 1, p. 17–36, 2021. Disponível em: <https://www.upb.edu/revista-investigacion-desarrollo/index.php/id/article/download/236/620>

JAIN, S.; JAIN, P. K. 5G technology for healthcare and its health effects: wonders, dangers, and diligence. *Journal of Family Medicine and Primary Care*, v. 11, n. 11, p. 6683–6686, 2022. DOI: https://doi.org/10.4103/jfmpe.jfmpe_1426_22.

KARAKO, K. et al. Realizing 5G- and AI-based doctor-to-doctor remote diagnosis: opportunities, challenges, and prospects. *Bioscience Trends*, v. 14, n. 5, p. 314–317, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5582/bst.2020.03364>.

LIETO, Alessandro; MALANCHINI, Ilaria; CAPONE, Antonio. Enabling Dynamic Resource Sharing for Slice Customization in 5G Networks. *Global Communications Conference*, p. 1–7, 2018. Disponível em: <https://re.public.polimi.it/bitstream/11311/1084134/1/Globecom2018-Lieto.pdf>

LIMA, L. C. Segurança em redes 5G: desafios atuais e perspectivas futuras. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Telecomunicações) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2024.

LIN, Jia-You; CHOU, Ping-Hung; HWANG, Ren-Hung. Dynamic Resource Allocation for Network Slicing with Multi-Tenants in 5G Two-Tier Networks. *Sensors*, v. 23, n. 10, p. 4698, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/10/4698/pdf?version=1683885847>

MOUSTRIS, G.; TZAFESTAS, C.; KONSTANTINIDIS, K. A long distance telesurgical demonstration on robotic surgery phantoms over 5G. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, v. 18, n. 9, p. 1577–1587, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11548-023-02913-2>

MOUHOUBI, Oualid; ABDEL NOUR, Charbel; BAGHDADI, Amer. Low Latency Architecture Design for Decoding 5G NR Polar Codes. *In: [s.l.: s.n.]*, 2022, p. 16–28. Disponível em: <https://hal.science/hal-03707939/document>

NIKBAKHT, H.; WIGGER, M.; EGAN, M.; SHAMAI, S.; GORCE, J.-M.; POOR, H. V. An information-theoretic view of mixed-delay traffic in 5G and 6G. *Entropy*, v. 24, n. 5, p. 637, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/e24050637>.

OLIVEIRA, L. A. N.; ALENCAR, M. S.; LOPES, W. T. A. Evolução da Arquitetura de Redes Móveis Rumo ao 5G. *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, v. 8, n. 2, p. 43–50, 2018.

PASSOS, Carlos Nestor. Transformação digital na saúde: desafios e perspectivas. *Revista Científica do Hospital Santa Izabel*, Salvador, v. 3, n. 3, p. 178-184, set. 2019. ISSN 2526-5563. DOI: <https://doi.org/10.35753/rchsi.v3i3.53>.

PETROVIC, Vladimir L.; EL MEZENI, Dragomir M.; RADOSEVIC, Andreja. Flexible 5G New Radio LDPC Encoder Optimized for High Hardware Usage Efficiency. *Electronics*, v. 10, n. 9, p. 1106, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/9/1106>

POPOVSKI, P.; TRILLINGSGAARD, K. F.; SIMEONE, O.; DURISI, G. 5G wireless network slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: a communication-theoretic view. *IEEE Access*, v. 6, p. 55765-55779, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2872781>.

POPOVSKI, P. et al. Wireless access for ultra-reliable low-latency communication: principles and building blocks. *IEEE Network*, v. 32, p. 16-23, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/MNET.2018.1700258>.

REHMAN, Waheed Ur; SALAM, Tabinda; ALMOGREN, Ahmad; et al. Improved Resource Allocation in 5G MTC Networks. *IEEE Access*, v. 8, p. 49187–49197, 2020. Disponível em: <https://dblp.uni-trier.de/db/journals/access/access8.html#RehmanSAHDB20>

WAQAS, Abdullah; MAHMOOD, Hasan; SAEED, Nasir. Interference aware cooperative routing for edge computing-enabled 5G networks. *IEEE Sensors Journal*, v. 22, n. 4, p. 3777-3784, 2022. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.01520>

ROCHA JR., Vamberto; ARAUJO, Jean; NOGUEIRA, Bruno; ANDRADE, Ermeson. Modeling and analysis of a telesurgery environment considering a 5G network. *Revista de Informática Teórica e Aplicada – RITA*, v. 30, n. 2, p. 124-131, 2023. DOI: <https://doi.org/10.22456/2175-2745.137324>.

SANTANA, A. et al. A telemedicina no processo de democratização da saúde no Brasil. *Brazilian Journal of Implantology and Health Sciences*, v. 6, n. 2, p. 34-48, 2024. DOI: <https://doi.org/10.36557/2674-8169.2024v6n2p1737-1751>.

SANTOS, Maria Victória Gonçalves. Tecnologia 5G NR e suas aplicações no ramo do agronegócio. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2022. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/218049>.

SIDDIQI, M. A.; YU, H.; JOUNG, J. 5G ultra-reliable low-latency communication implementation challenges and operational issues with IoT devices. *Electronics*, v. 8, n. 9, p. 981, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics8090981>.

SILVA, Jéssica Graciela da; SOUZA, Luana da Silva Pereira de; ALVEZ, Thiago Salhab. Aplicações da tecnologia de redes sem fio 5G na área da saúde. *Prospectus*, Itapira, v. 5, n. 2, p. 201-213, jul./dez. 2023. Disponível em: <https://prospectus.fatecitapira.edu.br/index.php/pst/article/view/176>.

SILVA, M. A. Comunicações móveis celulares e sem fios aplicadas a e-saúde em ambientes hospitalares. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Biomédica) – Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://teses.usp.br/handle/123456789/37144>.

SOUSA, Gualter; SANTOS, Arnaldo. The viability of telesurgery service in the Autonomous Region of the Azores, supported by the 5G network. *Procedia Computer Science*, v. 219, p. 422-430, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.308>.

SOUZA, Caio; MENDONÇA, Felipe; REIS, Renata; DAMASCENO, Maria; BALIEIRO, Andson. Segurança em telecirurgia robótica baseada em redes 5G. *Anais da Conferência Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação – CISTI 2024*, [S. l.], 2024. Disponível em: <https://cisti.eu/2024/proceedings>.

SUN, Guolin; GEBREKIDAN, Zemuy Tesfay; BOATENG, Gordon Owusu; et al. Dynamic Reservation and Deep Reinforcement Learning Based Autonomous Resource Slicing for Virtualized Radio Access Networks. *IEEE Access*, v. 7, p. 45758–45772, 2019. Disponível em: <https://dblp.uni-trier.de/db/journals/access/access7.html#SunGBAJ19>

STARK, Maximilian; WANG, Linfang; BAUCH, Gerhard; et al. Decoding Rate-Compatible 5G-LDPC Codes With Coarse Quantization Using the Information Bottleneck Method. v. 1, p. 646–660, 2020. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9091572/>

WAN, Lei; GUO, Zhiheng; WU, Yong; BI, Wenping; YUAN, Jinhong; ELKASHLAN, Maged; HANZO, L. 4G/5G spectrum sharing: efficient 5G deployment to serve enhanced mobile broadband and Internet of Things applications. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, p. 1-1, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/MVT.2018.2865830>.

WANG, N. et al. Satellite support for enhanced mobile broadband content delivery in 5G. In: *2018 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, Valencia, Spain, 2018, p. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/BMSB.2018.8436902>.

KRYSZKIEWICZ, Pawel; KLIKS, Adrian; KUŁACZ, Łukasz; et al. Context-Based Spectrum Sharing in 5G Wireless Networks Based on Radio Environment Maps. *Wireless Communications and Mobile Computing*, v. 2018, p. 3217315-1-3217315–15, 2018. DOI: [10.1155/2018/3217315](https://doi.org/10.1155/2018/3217315)

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus João Pessoa - Código INEP: 25096850
	Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, CEP 58015-435, João Pessoa (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0002-56 - Telefone: (83) 3612.1200

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

TCC

Assunto:	TCC
Assinado por:	Gustavo Cavalcante
Tipo do Documento:	Dissertação
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Gustavo Araujo Cavalcante, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC1 - CCSTST-JP , em 24/03/2026 13:35:30.

Este documento foi armazenado no SUAP em 24/03/2026. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1814329
Código de Autenticação: 9f0ae90a15

