

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CAMPUS NEPOMUCENO**

ALAN DE MELO PIMENTA

**PROJETO DE COBERTURA REDE MÓVEL 5G PARA A CIDADE DE
NEPOMUCENO - MG**

NEPOMUCENO

2024

ALAN DE MELO PIMENTA

**PROJETO DE COBERTURA REDE MÓVEL 5G PARA A CIDADE DE
NEPOMUCENO - MG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Felipe de Souza Delgado
Coorientador: Márcio Wladimir Santana

NEPOMUCENO

2024

ALAN DE MELO PIMENTA

**PROJETO DE COBERTURA REDE MÓVEL 5G PARA A CIDADE DE
NEPOMUCENO - MG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em ____ de setembro de 2024.

Prof. Dr Felipe de Souza Delgado
CEFET - MG

Prof. MSc. Márcio Wladimir Santana
CEFET - MG

Prof. MSc. Alencar Franco de Souza
CEFET-MG

DEDICATÓRIA

À luz que guiou cada passo da minha jornada acadêmica, dedico este trabalho à minha amada mãe, Arabela de Melo Pimenta, e ao meu pai, Ernani de Souza Pimenta. Suas palavras de incentivo e seu amor incondicional foram a força motriz por trás de todas as minhas conquistas. Este trabalho é um tributo ao legado de dedicação e perseverança que vocês me ensinaram.

Às minhas adoráveis irmãs, Sintia Cristiane de Melo Pimenta e Melyssa de Melo Pimenta, cujo apoio constante e carinho foram fundamentais em cada desafio enfrentado.

À minha querida e amada namorada, Andressa Mara Souza, que esteve ao meu lado nos momentos de alegria e nas horas de desafio. Seu apoio e compreensão foram a âncora que me manteve firme durante as tempestades. Este trabalho é dedicado ao amor que compartilhamos e às muitas mais conquistas que ainda teremos juntos.

Ao meu filho extraordinário, João Vitor Souza Maia, a luz que ilumina os meus dias e a razão pela qual busco constantemente a excelência. Cada página deste trabalho é dedicada a você, meu maior orgulho e motivação.

Agradeço profundamente a todos vocês por terem sido pilares sólidos ao longo da minha jornada no curso de Engenharia Elétrica. Suas palavras de estímulo, gestos de apoio e amor incondicional foram a bússola que me guiou até este ponto. Que este trabalho seja não apenas um testemunho do meu esforço, mas também uma expressão de gratidão a todos que tornaram possível esta conquista. Que possamos continuar a trilhar caminhos de sucesso juntos.

Com amor e eterna gratidão,

Alan de Melo Pimenta.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a Deus, cuja presença constante foi minha fonte inesgotável de inspiração e fortaleza ao longo de toda a minha jornada acadêmica. Sua graça iluminou meu caminho, orientando-me nas escolhas e abençoando cada etapa desta trajetória.

À minha amada família, dedico meu mais sincero agradecimento. Seu apoio incondicional, compreensão e incentivo foram os alicerces que me impulsionaram a superar desafios e a celebrar conquistas. Cada membro da minha família contribuiu de maneira significativa para a minha formação, e é com o coração transbordando de reconhecimento que expresso minha gratidão.

Aos respeitáveis professores que moldaram minha trajetória acadêmica, quero estender uma gratidão especial. Reconheço a orientação do dedicado orientador, Felipe de Souza Delgado. Sua orientação dedicada, conselhos valiosos e comprometimento foram pilares fundamentais para meu desenvolvimento como estudante e como indivíduo. Cada etapa do caminho foi enriquecida pela sua sabedoria e apoio constante.

À instituição CEFET Campus IX - Nepomuceno, expresso minha gratidão pela infraestrutura, oportunidades de aprendizado e pelo ambiente propício ao desenvolvimento acadêmico. O suporte oferecido pelos profissionais e a atmosfera educativa foram fatores cruciais para a minha jornada.

Meus agradecimentos se estendem a todos que, de alguma forma, contribuíram para esta conquista. Amigos, colegas de classe e todos os que compartilharam este percurso comigo, meu mais sincero agradecimento por fazerem parte desta história que hoje celebramos com alegria e gratidão.

“Não fui eu que lhe ordenei? Seja forte e corajoso! Não se apavore, nem se desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar”.

Josué 1:9.

RESUMO

A evolução da comunicação móvel tem sido marcada por significativos avanços tecnológicos. Desde a primeira geração (1G) analógica, na década de 1980, até a segunda geração (2G), que introduziu a digitalização e o envio de mensagens de texto, e a terceira geração (3G), que possibilitou o acesso à internet móvel, cada fase transformou a experiência do usuário. A quarta geração (4G) trouxe transmissão de dados em alta velocidade, permitindo o streaming de vídeos e a conexão simultânea de múltiplos dispositivos. A quinta geração (5G), lançada em 2019, oferece latência ultrabaixa e velocidades até 100 vezes maiores que o 4G, além de suportar um número massivo de dispositivos conectados. O padrão 5G New Radio (NR), desenvolvido pelo 3rd Generation Partnership Project (3GPP), abrange cenários de banda larga móvel aprimorada (eMBB), comunicações massivas entre máquinas (mMTC) e comunicações ultraconfiáveis e de baixa latência (URLLC). Este projeto foca na implementação do 5G NR na cidade de Nepomuceno-MG, atualmente atendida apenas pela tecnologia 4G. O estudo utiliza os softwares Link Budget e Radio Mobile para avaliar a cobertura e a eficiência da rede, com base no modelo de propagação SUI. Os resultados indicam a necessidade de seis Estações Rádio Base (ERBs) para cobrir a área urbana de forma eficaz. Essa iniciativa visa trazer melhorias significativas na conectividade e no desempenho da região, estabelecendo uma base sólida para estudos e desenvolvimentos futuros na infraestrutura de telecomunicações da cidade.

Palavras-chave: Telecomunicações. 5G NR. Modelo de Propagação. Projeto de Cobertura.

ABSTRACT

The evolution of mobile communication has been marked by significant technological advancements. From the analog first generation (1G) in the 1980s to the digital second generation (2G), which introduced text messaging, and the third generation (3G), which enabled mobile internet access, each step has transformed the user experience. The fourth generation (4G) provided high-speed data transmission, allowing for video streaming and the simultaneous connection of multiple devices. The fifth generation (5G), launched in 2019, offers ultralow latency and up to 100 times the speed of 4G, supporting a massive number of connected devices. The 5G New Radio (NR) standard, developed by the 3rd Generation Partnership Project (3GPP), addresses enhanced mobile broadband (eMBB), massive machine-type communications (mMTC), and ultra-reliable low-latency communications (URLLC) scenarios. This project focuses on the implementation of 5G NR in Nepomuceno-MG, a city currently served only by 4G technology. The study employs the Link Budget and Radio Mobile software to evaluate network coverage and efficiency, utilizing the SUI propagation model. Results indicate the need for six Base Transceiver Stations (BTS) to cover the urban area effectively. This initiative aims to bring significant improvements in connectivity and performance to the region, setting a foundation for further studies and development in the city's telecommunications infrastructure.

Keywords: Telecommunications. 5G NR. Propagation Model. Coverage Project.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Cenários de aplicação do 5G.	17
FIGURA 2. Faixas de espectro utilizadas no 5G.....	19
FIGURA 3. Aplicações do Radio Mobile.	25
FIGURA 4. Área Urbana da cidade de Nepomuceno-MG.....	27
FIGURA 5. Parâmetros de configuração de rede.	32
FIGURA 6. Parâmetros de configuração do sistema transmissor.	33
FIGURA 7. Parâmetros de configuração do sistema receptor.....	34
FIGURA 8. ERB`s distribuídas na zona urbana de Nepomuceno-MG.....	36

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Parâmetros do Modelo SUI.....	22
TABELA 2. Parâmetros do Modelo de Antena.....	29
TABELA 3. Parâmetros para o cálculo de Máxima perda de propagação.....	30
TABELA 4. Cálculos de raio das células.....	31
TABELA 5. Cálculos de sensibilidade de recepção.....	31
TABELA 6. Resultado final do número de ERB's.....	35

LISTA DE EQUAÇÕES

$L = A + 10n \log (d/d_0) + X_F + X_h + S$ para $d > d_0$	(1)21
$A = 20 \log (4\pi d_0 / \lambda)$	(2)21
$n = a - bh_b + (c / h_b)$	(3).....21
$X_F = 6 \log (F / 2000)$	(4)22
$X_h = -10,8 \log (h_r / 2)$ para os terrenos do tipo A e B.	(5).....22
$X_h = -20 \log (h_r / 2)$ para o terreno tipo C.	(6)22
$P_{rx} = P_{tx} + \sum \text{Ganhos} - \sum \text{Perdas} - \sum \text{Margens}$	(7).....23
$Rx_{sen} = -174 + 10 \log_{10}(BW_{total}) + SNR + NF u_e$	(8).....23
$BW_{total} = 12 \Delta f NRB$	(9)23
$A_{ERB's} = (9 / 8) \sqrt{3} d^2$	(10).....24
$N_{ERB's} = A_{total} / A_{ERB's}$	(11).....24

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
1.1.	Objetivos.....	15
1.1.1.	Objetivo Geral.....	15
1.1.2.	Objetivos Específicos.....	15
2.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1.	Tecnologia 5G.....	16
2.2.	Modelo de Propagação.....	19
2.3.	Link Budget.....	22
2.4.	Software Rádio Mobile.....	25
2.5.	Município de Nepomuceno - MG.....	27
3.	METODOLOGIA.....	29
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
5.	CONCLUSÃO.....	37
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38

1. INTRODUÇÃO

A comunicação móvel teve uma evolução significativa desde o seu início. A primeira geração (1G), lançada na década de 1980, trouxe a telefonia analógica, permitindo realizar as primeiras chamadas móveis (SOUZA, 2020). Nos anos 1990, a segunda geração de conexão móvel (2G) introduziu a digitalização, possibilitando o envio de mensagens de texto (SMS) entre celulares e melhorando a qualidade das chamadas (SILVA, 2021). No início dos anos 2000, o 3G, correspondente à terceira geração de conexão móvel, revolucionou o setor ao oferecer internet móvel. Logo, tornou-se possível a navegação de usuários na web e o uso de aplicativos básicos (PARKVALL, 2017).

A partir de 2010, a quarta geração (4G) da tecnologia da rede móvel, também conhecida como LTE – *Long Term Evolution*, ampliou as capacidades da transmissão de dados. Por exemplo, com a tecnologia conseguiu-se atingir taxas de transmissão de dados muito superiores, o que permitiu o streaming de vídeo em alta definição. Além disso, tornou-se possível conectar simultaneamente uma maior quantidade de dispositivos (DALMAN, 2020). Por fim, a quinta geração (5G), lançada em 2019, representa um “salto quântico” com relação aos padrões anteriores, com velocidades de até 100 vezes maiores que a quarta geração (4G), com latência ultrabaixa e capacidade para suportar um número massivo de dispositivos conectados (“5G; NR; BASE STATION (BS) RADIO TRANSMISSION AND RECEPTION (3GPP TS 38.104 VERSION 17.7.0 RELEASE 17”), 2024).

Atualmente, o padrão de rede de acesso 5G *New Radio* (NR), desenvolvido pelo 3rd *Generation Partnership Project* (3GPP), se destaca como uma evolução significativa, projetada para atender a três principais cenários: banda larga móvel aprimorada, comunicação massiva entre máquinas e comunicações de alta confiabilidade e baixa latência (PARKVALL ET AL., 2017).

O primeiro cenário é de banda larga móvel aprimorada, *Enhanced Mobile Broadband* (eMBB), onde o objetivo é oferecer velocidades de transmissão de dados mais altas, proporcionando uma experiência de acesso às aplicações de rede significativamente melhor para os usuários em comparação com os padrões anteriores (PARKVALL, 2017).

No segundo cenário tem-se as comunicações massivas entre máquinas, *Massive Machine Type Communications* (mMTC), que é a conexão de um grande número de dispositivos, essencial para a Internet das Coisas (IoT). Em ambientes como cidades inteligentes e indústrias automatizadas, o mMTC permite a comunicação eficiente entre milhões de sensores e dispositivos, garantindo a integração e o controle em larga escala (PARKVALL, 2017).

Finalmente, *Ultra-Reliable and Low Latency Communications* (URLLC), o terceiro cenário é projetado para aplicações críticas que exigem extrema confiabilidade e baixíssimo tempo que um dado viaje de um ponto a outro na rede, chamado de latência. Este cenário é crucial para tecnologias como veículos autônomos, cirurgias remotas e sistemas de segurança industrial, onde até pequenos atrasos podem ser inaceitáveis (PARKVALL, 2017). Assim a latência é um fator determinante no 5G, especialmente em aplicações URLLC, onde é vital que a comunicação ocorra em tempo real para garantir a precisão e a segurança.

Diante dessa diversidade de cenários, o 3GPP delineou duas faixas de frequências, FR1 (*Frequency Range 1*) e FR2 (*Frequency Range 2*), para implementação dos sistemas 5G NR. A faixa FR1, compreende frequências sub-6 GHz, que variam de 450 MHz a 6000 MHz, com largura de banda máxima por portadora de 100 MHz. Por outro lado, a faixa FR2 abrange as frequências de ondas milimétricas (mmWave) no intervalo de 24250 MHz a 52600 MHz com largura de banda máxima por portadora de 400 MHz (“5G; NR; BASE STATION (BS) RADIO TRANSMISSION AND RECEPTION (3GPP TS 38.104 VERSION 17.7.0 RELEASE 17”), 2024).

Desta forma, cada faixa de frequência possui características específicas, como propagação e efeito Doppler. Essas características afetam o perfil de múltiplos percursos e assim, o sinal pode atingir o receptor por diferentes caminhos, causando distorções (“5G; NR; BASE STATION (BS) RADIO TRANSMISSION AND RECEPTION (3GPP TS 38.104 VERSION 17.7.0 RELEASE 17”), 2024).

A tecnologia 5G começou a ser implementada em nosso país a partir das capitais e se expandiu para as demais cidades. Atualmente, a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) tem liberado a frequência de 3,5 GHz para que as operadoras ativem o 5G e com isso, estima-se que o sinal esteja ativo em pelo menos 589 cidades (ANATEL - “FAIXA DE 3,5 GHz DISPONÍVEL EM 194 MUNICÍPIOS”, 2024). No entanto, a cidade de Nepomuceno-MG conta apenas com cobertura 4G, o que destaca a importância do projeto de implementação do 5G NR na região. Para garantir o sucesso desse projeto de cobertura e transição tecnológica, é essencial utilizar ferramentas especializadas. Este trabalho emprega dois softwares gratuitos, Link Budget e Radio Mobile, que são essenciais para avaliar a cobertura e eficiência do sistema proposto. O Link Budget desempenha um papel crucial na estimativa da cobertura de cada ERB e na determinação do número necessário de ERB`s, enquanto o Radio Mobile é utilizado para prever a cobertura, fornecendo uma validação prática dos resultados teóricos.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

O propósito central deste Trabalho de Conclusão de Curso é realizar um projeto abrangente de cobertura para uma rede móvel 5G NR operando na faixa de frequência de 3,5GHz, focando especificamente no cenário de banda larga móvel aprimorada, *Enhanced Mobile BroadBand* (eMBB), para a cidade de Nepomuceno-MG. O projeto abordará detalhes cruciais, tais como o Link Budget, com ênfase na área urbana da cidade, visando calcular o número otimizado de *ERB's* necessários para atender aos rigorosos critérios de cobertura exigidos.

Para validar a eficácia do projeto, foi empregada uma predição de cobertura utilizando o software Radio Mobile. Esta etapa visa comprovar e validar os resultados obtidos anteriormente nos cálculos de Link. Ao integrar essas diversas análises, o trabalho busca oferecer uma compreensão abrangente e prática da implementação de uma rede móvel 5G NR na cidade de Nepomuceno-MG, contribuindo para o avanço do conhecimento e fornecendo perspectivas valiosas para a implementação bem-sucedida de infraestruturas de telecomunicações avançadas.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Realizar uma análise detalhada da topologia urbana da cidade de Nepomuceno-MG, considerando características como densidade populacional, geografia e estruturas urbanas, visando embasar as decisões relacionadas ao posicionamento estratégico dos sites da rede 5G NR.
- Executar o Link Budget para a área urbana de Nepomuceno-MG, considerando as características específicas da faixa de frequência de 3,5GHz, a fim de determinar com precisão a potência de transmissão necessária e, assim, calcular o número ótimo de sites para atender aos critérios exigentes de cobertura.
- Realizar uma predição de cobertura utilizando o software Radio Mobile para validar e comparar os resultados obtidos nos cálculos teóricos de Link Budget, proporcionando uma verificação prática da eficácia do projeto de cobertura e sua coerência com as condições reais de propagação do sinal na cidade de Nepomuceno-MG.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Tecnologia 5G

A quinta geração de redes móveis (5G), cujos padrões foram estabelecidos pelo 3rd *Generation Partnership Project* (3GPP), apresenta a capacidade de elevar a banda larga móvel a níveis extremos em termos de capacidade, disponibilidade e vazão.

Apesar de ser capaz de proporcionar uma banda larga móvel com taxas de transmissão de dados significativamente superiores em comparação com as atuais redes 4G, o 5G vai além de ser apenas uma evolução da banda larga móvel.

As funcionalidades do 5G, conforme especificações e recomendações amplamente discutidas na União Internacional das Telecomunicações (UIT), podem ser agrupadas em três categorias principais: (I) aprimoramento da banda larga móvel (eMBB - *Enhanced Mobile Broadband*), (II) comunicações ultra confiáveis e de baixa latência (URLLC - *Ultra Reliable Low Latency Communication*) e (III) comunicações massivas entre máquinas (mMTC - *Massive Machine Type Communication*). Assim, um sistema 5G adequado deve, no mínimo, incorporar essas funcionalidades padronizadas pela UIT (GOV, 2021).

Com base nessas capacidades, as operadoras móveis oferecerão conectividade personalizada para atender às demandas específicas de diversos grupos de usuários, incluindo setores econômicos particulares, também conhecidos como "verticais". Cada vertical apresenta necessidades específicas de conectividade, abrangendo aspectos como largura de banda, velocidade e requisitos de qualidade, tanto para suas operações internas quanto para integrar produtos e serviços aos seus clientes finais correspondentes.

Observa-se que o 5G representa uma expansão significativa da concepção de conectividade, introduzindo novas dimensões e possibilidades. Embora seja verdade que a Internet das Coisas (IoT) e a indústria 4.0 sejam temas discutidos há muito tempo, as tecnologias fundamentais para essas soluções já existem, e há uma variedade de casos de sucesso na implementação desses conceitos. No entanto, a verdadeira popularização dessas tecnologias ocorrerá com a disseminação das redes 5G, aproveitando as novas funcionalidades que essa geração oferece.

A Figura 1 ilustra exemplos concretos de diversos serviços que serão viabilizados pelas redes 5G (GOV, 2021). Pode-se observar os três cenários principais para a aplicação da tecnologia 5G, onde no topo da pirâmide encontra-se a Banda Larga Móvel Aprimorada (eMBB - *Enhanced Mobile Broadband*), que se concentra em aplicações que demandam alta velocidade de transmissão de dados. Exemplos incluem o streaming em 4K, também conhecido como UHD

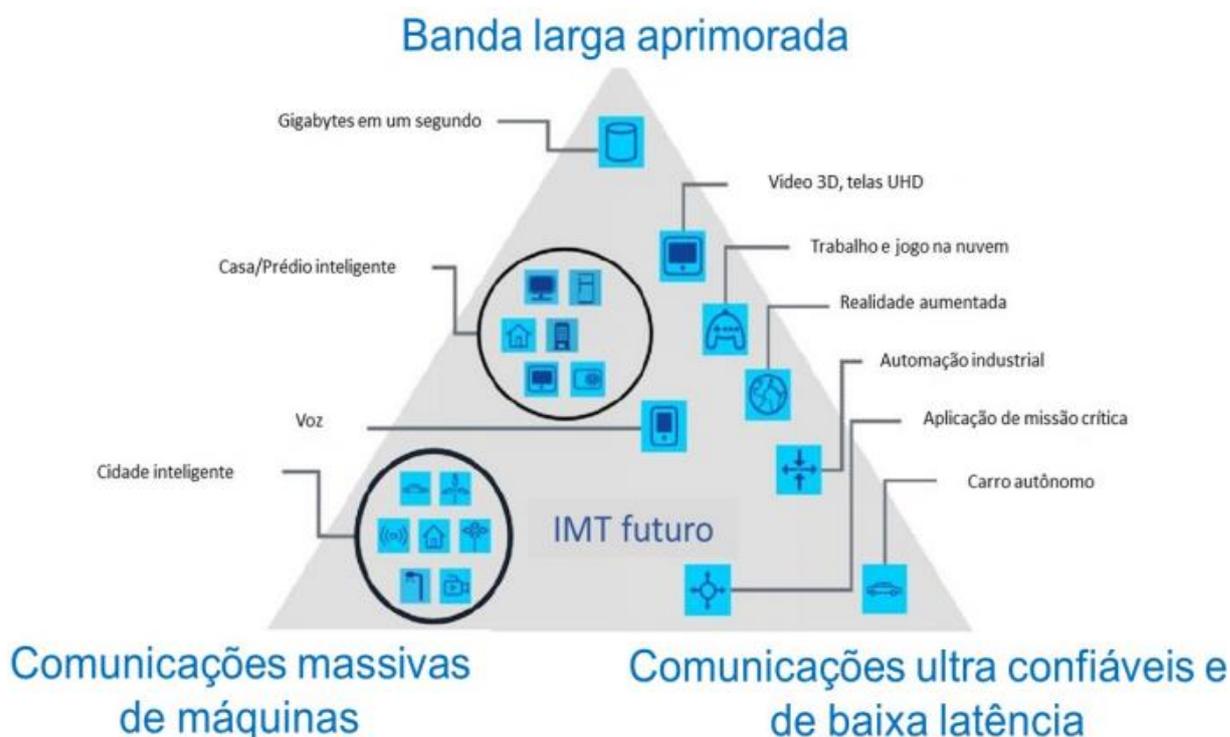
screens, trabalho e jogos na nuvem, realidade aumentada, e o uso de gigabits por segundo (GOV, 2021).

Já o lado direito da pirâmide representa as Comunicações Ultra Confiáveis e de Baixa Latência (URLLC - *Ultra-Reliable and Low Latency Communications*), voltadas para aplicações que exigem latência extremamente baixa e alta confiabilidade. Entre essas aplicações estão a automação industrial e rural, telemedicina e veículos autônomos (GOV, 2021).

Por fim, no lado esquerdo da pirâmide tem-se as Comunicações Massivas entre Máquinas (mMTC - *Massive Machine Type Communications*), que se concentram na interconexão de um grande número de dispositivos IoT (Internet das Coisas) com baixa necessidade de transmissão de dados. Exemplos incluem cidades inteligentes, casas e escritórios inteligentes (GOV, 2021).

A pirâmide demonstra a amplitude de usos e as diferentes demandas que a tecnologia 5G busca atender, abrangendo desde aplicações que requerem alta velocidade até aquelas que necessitam de alta confiabilidade e um grande número de conexões simultâneas.

FIGURA 1. Cenários de aplicação do 5G.



Fonte: REC. ITU-R M.2083, 2015.

O êxito na implementação de uma rede 5G é influenciado significativamente pela quantidade e diversidade do espectro disponível, abrangendo frequências baixas, médias e altas. Esse desafio é particularmente complexo devido às características econômicas associadas ao uso do espectro eletromagnético, e mesmo com esforços dedicados para otimizar e expandir a eficiência do uso do espectro, a escassez de radiofrequência, crucial para alcançar capacidade e alcance socialmente desejados na transmissão, emerge como o principal obstáculo à entrada de novas empresas no mercado móvel.

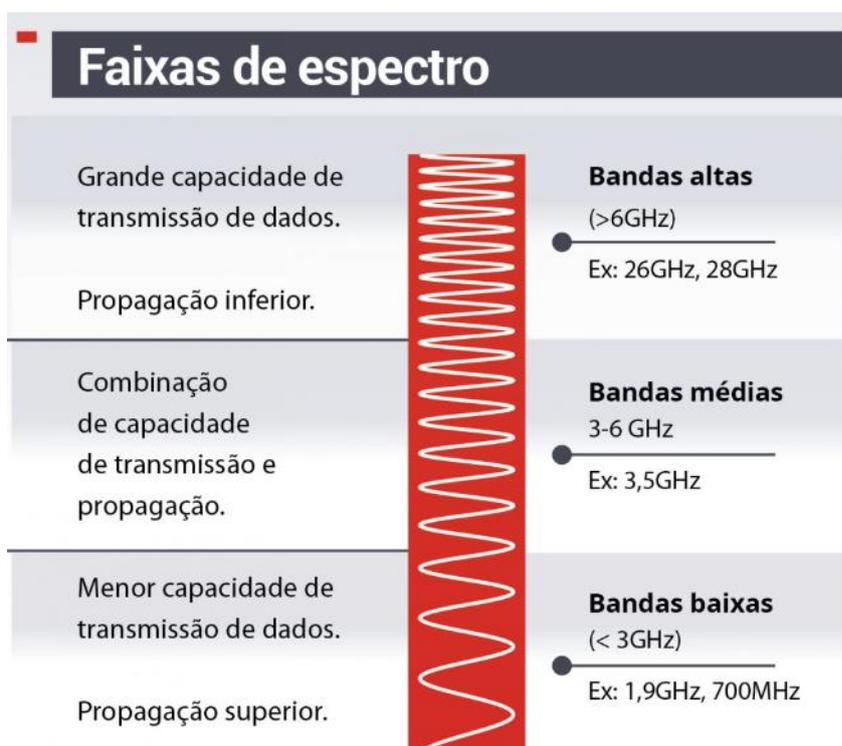
Diante desse cenário, o primeiro passo da Anatel consistiu em identificar as características físicas de cada faixa de espectro e compreender como cada uma poderia ser explorada para proporcionar diversos benefícios. A Figura 2, mostra as diferentes faixas de espectro utilizadas na tecnologia 5G, classificadas em bandas altas, médias e baixas, cada uma com características distintas em termos de capacidade de transmissão de dados e propagação do sinal.

As bandas altas, situadas acima de 6 GHz, como as faixas de 26 GHz e 28 GHz, possuem uma grande capacidade de transmissão de dados, mas apresentam uma propagação inferior, ou seja, o sinal tem menor alcance e é mais suscetível a obstruções. Já as bandas médias, que abrangem frequências entre 3 e 6 GHz, como a faixa de 3,5 GHz, oferecem um equilíbrio entre capacidade de transmissão de dados e propagação do sinal. Essa combinação as torna uma escolha popular para implantações 5G, oferecendo um bom desempenho tanto em áreas urbanas quanto suburbanas.

Por fim, as bandas baixas, com frequências abaixo de 3 GHz, como as faixas de 1,9 GHz e 700 MHz, apresentam uma menor capacidade de transmissão de dados, mas possuem uma excelente propagação, o que significa que o sinal pode cobrir distâncias maiores e penetrar melhor em edificações.

Essas diferentes faixas de espectro são escolhidas de acordo com os requisitos específicos de cobertura e capacidade de cada região, permitindo que o 5G atenda a uma ampla gama de necessidades de conectividade (ADMIN 2017).

FIGURA 2. Faixas de espectro utilizadas no 5G.



Fonte: 5G AMERICAS. "5G SPECTRUM RECOMMENDATIONS", 2024.

Embora as operadoras de rede disponham de várias opções para a implementação de suas redes, a escolha que se destaca como mais benéfica para a sociedade brasileira é aquela que permite usufruir plenamente do potencial do 5G.

Essa seleção criteriosa do padrão assegura a conformidade com os requisitos estabelecidos internacionalmente e sinaliza a busca por uma infraestrutura de comunicação avançada, capaz de atender de forma abrangente e eficaz às crescentes demandas por conectividade e desempenho ("5G; NR; BASE STATION (BS) RADIO TRANSMISSION AND RECEPTION (3GPP TS 38.104 VERSION 17.7.0 RELEASE 17"), 2024) Assim, a adoção do 5G NR Release 17 representa um compromisso com a excelência tecnológica e uma estratégia direcionada para posicionar o Brasil no cenário global das comunicações móveis de última geração.

2.2. Modelo de Propagação

Os modelos de propagação desempenham um papel crucial nas análises computacionais de cobertura, sendo fundamentais para prever a eficácia e o alcance das redes de comunicação. A escolha cuidadosa do modelo apropriado resulta em previsões mais precisas e contribui para um dimensionamento eficiente do sistema, evitando custos adicionais decorrentes de falhas no projeto.

Entretanto, criar um modelo que se ajuste perfeitamente às complexas condições de propagação é uma tarefa desafiadora. Diversos fenômenos físicos estão intrinsecamente associados à propagação de ondas de rádio, e sua manifestação varia de acordo com a faixa de frequência de operação. Entre os principais fenômenos físicos que influenciam sistemas de comunicações sem fio, destacam-se: (“5G; NR; BASE STATION (BS) RADIO TRANSMISSION AND RECEPTION (3GPP TS 38.104 VERSION 17.7.0 RELEASE 17”), 2024).

- Difração causada por obstruções no percurso;
- Desvanecimento decorrente do efeito multipercurso;
- Atenuação provocada por gases atmosféricos;
- Atenuação devido à presença de chuva;
- Diminuição da discriminação de polarização cruzada em ambientes multipercursos;
- Distorção do sinal resultante de desvanecimento seletivo de frequência e atraso durante a propagação multipercurso (ALVES DE ALENCAR, G.; BRAZ, R.; DA COSTA, F., 2023).

Para o projeto de cobertura apresentado neste trabalho será usado o modelo de predição de cobertura SUI, desenvolvido pela Universidade de Stanford em parceria com o IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*), (KAITZ, T.; TRINKWON, B., 2023). O referido modelo foi elaborado como uma solução para o planejamento de redes *Worldwide Interoperability for Microwave* (WiMAX) em uma banda de 3,5 GHz e, desta forma, adequa-se ao projeto de cobertura 5G desenvolvido nesse trabalho.

O modelo de propagação SUI representa uma extensão avançada dos tradicionais modelos Okomura-Hata e Cost231 (AN EMPIRICALLY, 2023). Desenvolvido para abranger a faixa de frequência de 1900 MHz a 3500 MHz, o SUI é configurado para suportar distâncias máximas de até 8 km entre o transmissor e o receptor. As alturas das antenas na estação base podem variar de 10 a 80 metros, enquanto as alturas das antenas nas estações móveis abrangem de 2 a 10 metros, ambas medidas em relação ao solo (AN EMPIRICALLY, 2023).

Este modelo demonstra sua versatilidade ao ser aplicável em uma ampla variedade de tipos de terrenos. Além disso, ao incorporar características de propagação mais refinadas, como a consideração de diferentes zonas climáticas, variações de densidade de vegetação, e os efeitos de obstáculos urbanos, o SUI contribui para uma análise mais precisa e abrangente das

comunicações sem fio. Desta forma, oferecendo uma valiosa ferramenta para planejamento e otimização de redes em diferentes contextos e ambientes.

No modelo SUI, a perda de propagação (*Maximum Path Loss*) entre o transmissor e o receptor, representada por L em decibéis (dB), é expressa por: (AN EMPIRICALLY, 2023).

$$L = A + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_F + X_h + S \text{ para } d > d_0 \quad (1)$$

onde:

- (A) é um termo constante, obtido através da equação 2;
- (n) é o expoente que caracteriza o ambiente de propagação, obtido pela equação 3;
- (d) é a distância entre o transmissor e o receptor.
- (d_0) é uma distância de referência;
- (X_F) é o fator de correção da frequência em dB, dado pela equação 4;
- (X_h) é um termo relacionado ao fator de correção da altura do receptor em dB, dado pela equação 5;
- (S) é o fator de correção para obstáculos entre o transmissor e o receptor em dB;
- ($d > d_0$) indica que a fórmula é válida para distâncias maiores que (d_0).

Para determinar o valor de A , tem-se: (AN EMPIRICALLY, 2023).

$$A = 20 \log \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) \quad (2)$$

em que λ é o comprimento de onda em metros. Além disso, n é o coeficiente de propagação dado pela seguinte equação: (AN EMPIRICALLY, 2023).

$$n = a - b h_b + \left(\frac{c}{h_b} \right) \quad (3)$$

em que o h_b é a altura referente ao transmissor, em metros. Além disso, as constantes a , b e c são dependentes do terreno, de acordo com a Tabela 1.

TABELA 1. Parâmetros do Modelo SUI.

Parâmetro	Terreno A	Terreno B	Terreno C
a	4,6	4	3,6
b	0,0075	0,0065	0,005
c	12,6	17,1	20

Fonte: KAITZ, T.; TRINKWON, B., 2023.

Para determinar o fator de correção de frequência em dB:

$$X_F = 6 \log \left(\frac{F}{2000} \right) \quad (4)$$

em que F é a frequência em MHz. Por fim, o termo relacionado ao fator de correção de altura do receptor em dB é dado conforme:

$$X_{h=} = -10,8 \log \left(\frac{h_r}{2} \right) \text{ para os terrenos do tipo A e B.} \quad (5)$$

$$X_{h=} = -20 \log \left(\frac{h_r}{2} \right) \text{ para o terreno tipo C.} \quad (6)$$

onde h_r é a altura do receptor em metros. Destaca-se que os tipos de terrenos A, B e C são considerados como urbano, suburbano e rural, respectivamente. Além disso, os diferentes tipos de terreno A, B e C, influenciam no parâmetro S, que assume valores de 10,6 dB, 8,2 dB e 5dB, respectivamente (COPARISON OF EMPIRICAL).

2.3. Link Budget

O processo conhecido como link budget é amplamente utilizado para avaliar as características dos enlaces de rádio. Por meio desse processo, é possível determinar a quantidade de *ERB's* necessários para garantir a cobertura de uma determinada área de interesse, respeitando os limites definidos pelos critérios de projeto. O equacionamento genérico de um enlace de rádio, que deve ser adaptado a cada tipo de sistema a ser implementado, é representado por: (“5G; NR; BASE STATION (BS) RADIO

TRANSMISSION AND RECEPTION (3GPP TS 38.104 VERSION 17.7.0 RELEASE 17”), 2024).

$$P_{rx} = P_{tx} + \sum \text{Ganhos} - \sum \text{Perdas} - \sum \text{Margem} \quad (7)$$

Ou seja, o link budget contabiliza todos os ganhos e perdas entre transmissão e recepção. Na equação (7) P_{rx} é a potência de recepção em dBm, P_{tx} é a potência de transmissão em dBm, $\sum \text{Ganhos}$ representa o total de ganhos do sistema em dB e $\sum \text{Perdas}$ representa o total de perdas do sistema em dB.

A potência de recepção P_{rx} é um importante parâmetro na determinação da qualidade do sistema na borda da célula. Esse parâmetro é o menor nível de sinal, conhecido como sensibilidade de recepção ($R_{x_{sen}}$), que garante os demais critérios de projeto, conforme (“5G; NR; BASE STATION (BS) RADIO TRANSMISSION AND RECEPTION (3GPP TS 38.104 VERSION 17.7.0 RELEASE 17”), 2024).

$$R_{x_{sen}} = -174 + 10 \log_{10}(BW_{Total}) + SNR + NF_{ue} \quad (8)$$

em que -174 é a densidade espectral de ruído em dBm/Hz, que indica o ruído presente em cada hertz de largura de banda. Esse valor é comumente considerado o limite térmico de ruído em sistemas de comunicação (“5G; NR; BASE STATION (BS) RADIO TRANSMISSION AND RECEPTION (3GPP TS 38.104 VERSION 17.7.0 RELEASE 17”), 2024). Já BW_{Total} é a banda útil do sistema em Hz, ou seja, a faixa de frequências disponível para a transmissão de sinais, descrita conforme (“5G; NR; BASE STATION (BS) RADIO TRANSMISSION AND RECEPTION (3GPP TS 38.104 VERSION 17.7.0 RELEASE 17”), 2024).

$$BW_{total} = 12 \Delta f NRB \quad (9)$$

em que Δf é o espaçamento entre subportadoras, e NRB refere-se ao número de Resource Blocks, que é a menor unidade de alocação de recursos em uma rede LTE ou 5G.

A SNR é a relação sinal-ruído do móvel em dB, e NF_{ue} é a figura de ruído do móvel, também medida em dB. A figura de ruído do móvel representa o nível de degradação que o sinal sofre devido ao ruído introduzido pelo receptor do dispositivo móvel. Em termos práticos, ela indica o quanto o ruído adicional afeta a qualidade do sinal recebido no aparelho. Um valor

mais baixo de NFu_e significa que o dispositivo é mais eficiente em captar sinais fracos, resultando em uma comunicação de melhor qualidade.

Uma vez determinada a Pr_x e definidos os demais parâmetros do projeto, é possível calcular a perda de propagação (*Maximum Coupling Loss*), que é um dos componentes do Somatório de Perdas, representado pela variável L na equação (1).

Utilizando a perda de propagação calculada no modelo de propagação descrito pela equação (7), em conjunto com as alturas da estação base e do móvel, o tipo de terreno suburbano e a frequência de operação, é possível calcular o raio das ERB's, representado pela variável d na equação (1).

Com o raio da célula (d), torna-se viável calcular a área de um site ($A_{ERB's}$) considerando-se que o mesmo tem antenas setorizadas, bem como o número total de sites ($N_{ERB's}$) que depende da área total (A_{total}) da cidade de Nepomuceno e necessários para a cobertura de uma determinada área, conforme representada pelas equações: (AN EMPIRICALLY, 2023).

$$A_{ERB's} = \left(\frac{9}{8}\right) \sqrt{3} d^2 \quad (10)$$

$$N_{ERB's} = \left(\frac{A_{total}}{A_{ERB's}}\right) \quad (11)$$

Tendo em vista que o link budget faz um balanço com todos os ganhos e perdas entre a transmissão e recepção do sinal, é possível determinar a perda máxima permitida no percurso em estudo, conhecida como *Maximum Allowed Path Loss* (MAPL) (“5G; NR; BASE STATION (BS) RADIO TRANSMISSION AND RECEPTION (3GPP TS 38.104 VERSION 17.7.0 RELEASE 17”), 2024). A MAPL define a maior atenuação que o sinal pode sofrer sem se tornar-se inutilizável no receptor. Tal métrica é crucial para determinar o alcance prático de uma célula e é essencial para o planejamento de redes de comunicação, assegurando que a cobertura e a qualidade do serviço sejam mantidas.

Por fim, o link budget é uma ferramenta vital para engenheiros de telecomunicações, pois permite um bom planejamento de rede, que determina o posicionamento ideal de antenas e estações base para garantir cobertura total adequada. O link budget é importante também para Otimização de Desempenho, que ajusta parâmetros do sistema para maximizar a qualidade do sinal e minimizar interferências e também realizar diagnóstico de problemas, onde identifica e resolve problemas de sinal em redes existentes, melhorando a confiabilidade do serviço.

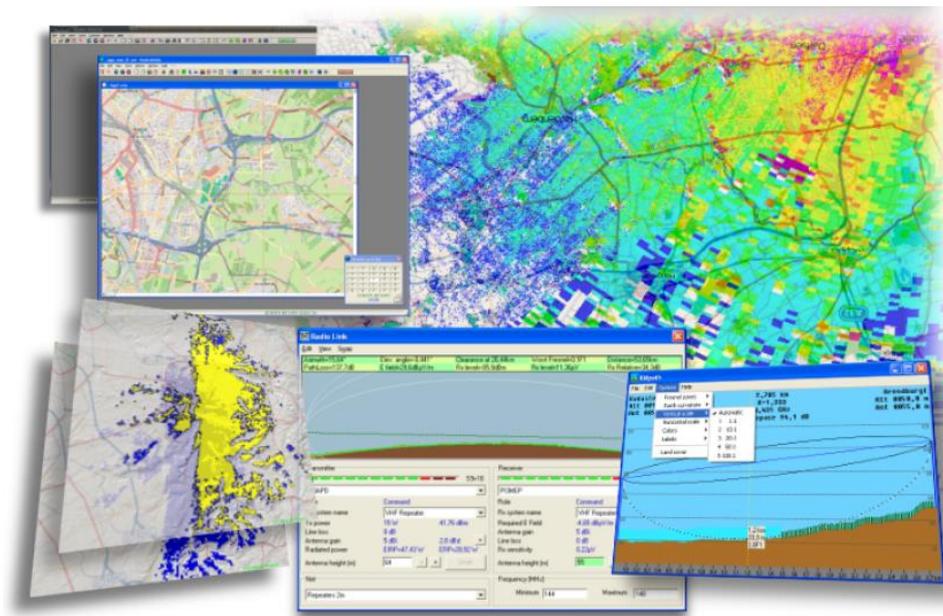
2.4. Software Rádio Mobile

O Radio Mobile é um software amplamente utilizado no campo das telecomunicações para modelagem e análise da propagação de sinais de rádio. Desenvolvido pelo engenheiro Roger Coudé, ele é essencial para o planejamento e otimização de redes de comunicação sem fio, como redes de rádio amador e Wi-Fi. Este software usa mapas topográficos e modelos de propagação para prever a cobertura e a intensidade do sinal em diferentes condições ambientais.

Esse software baseia-se em modelos de propagação de rádio para prever a intensidade do sinal. Entre os modelos mais utilizados está o Longley-Rice, também conhecido como ITM (Irregular Terrain Model), que considera fatores como o terreno, obstruções e condições atmosféricas (ADMIN, 2014). Esses modelos são cruciais para entender como o sinal de rádio se comporta em diferentes ambientes.

O software utiliza mapas topográficos digitais para analisar o efeito do terreno na propagação do sinal, conforme observa-se na Figura 3.

FIGURA 3. Aplicações do Radio Mobile.



Fonte: RADIO MOBILE, RF PROPAGATION SIMULATION SOFTWARE, 2024.

Além disso, é possível criar um modelo tridimensional do terreno em estudo, permitindo uma análise mais precisa. Para isso, pode-se importar mapas detalhados, provenientes de fontes como o Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).

A configuração de parâmetros de antena é outra característica essencial do Radio Mobile. O software permite ajustar detalhes como ganho, altura e padrão de radiação das

antenas, facilitando a simulação de diferentes tipos de antenas e suas orientações para otimizar a cobertura do sinal.

Para aplicações práticas, o software Radio Mobile é amplamente utilizado por operadores de rádio amador para planejar a cobertura de suas estações e otimizar a comunicação. Em redes Wi-Fi e WLAN, o software ajuda na colocação de pontos de acesso para garantir uma cobertura completa e minimizar interferências. Além disso, serviços de emergência utilizam o Radio Mobile para planejar redes de comunicação de resposta a desastres, garantindo a eficácia da comunicação em situações críticas (RADIO MOBILE - RF PROPAGATION SOFTWARE, 2023).

No planejamento de infraestrutura de telecomunicações, o Radio Mobile é uma ferramenta valiosa para maximizar a cobertura e a eficiência de redes comerciais, incluindo redes celulares. A capacidade de gerar mapas de cobertura visualmente intuitivos facilita o planejamento e a análise, permitindo ajustes precisos na infraestrutura de comunicação (RADIO MOBILE - RF PROPAGATION SOFTWARE, 2023).

O Radio Mobile oferece diversas vantagens, como ser gratuito e de código aberto, o que o torna acessível para uma ampla gama de usuários. A sua precisão é garantida pelo uso de dados topográficos detalhados e modelos de propagação confiáveis. Além disso, a sua flexibilidade do software permite a personalização de parâmetros para diferentes tipos de redes e ambientes (RADIO MOBILE - RF PROPAGATION SOFTWARE, 2023).

No entanto, o Radio Mobile apresenta alguns desafios. A curva de aprendizado pode ser íngreme, exigindo conhecimento técnico para a importação de mapas e configuração de parâmetros. A precisão das previsões de cobertura também depende da qualidade e resolução dos dados topográficos utilizados. Além disso, sendo um software de código aberto, o suporte pode ser limitado, dependendo da comunidade de usuários para atualizações e melhorias (RADIO MOBILE - RF PROPAGATION SOFTWARE, 2023).

Sendo assim, o software Radio Mobile é uma ferramenta essencial para o planejamento e otimização de redes de comunicação sem fio. Sua capacidade de modelar a propagação de sinais de rádio com alta precisão, utilizando dados topográficos e modelos de propagação avançados, o torna indispensável para engenheiros e técnicos de telecomunicações. Embora apresente alguns desafios, suas vantagens em termos de flexibilidade, custo-efetividade e precisão compensam amplamente, fazendo do Radio Mobile uma escolha valiosa para o planejamento de redes de comunicação (RADIO MOBILE - RF PROPAGATION SOFTWARE, 2023).

2.5. Município de Nepomuceno - MG

O município de Nepomuceno está localizado no estado de Minas Gerais, Brasil, e atualmente houve a liberação para uso da faixa de 3,5 GHz pelo 5G, mas não houve a ativação do sinal por nenhuma prestadora pela rede (ANATEL - “FAIXA DE 3,5 GHz DISPONÍVEL EM 194 MUNICÍPIOS”, 2024). Este referencial teórico examina os aspectos geográficos, climáticos, demográficos e topográficos de Nepomuceno, com foco específico no planejamento de um projeto de cobertura de rede 5G para a área urbana da cidade.

A área total da cidade de Nepomuceno é de aproximadamente 827 km², e conta com uma área urbana de 8 km², conforme observa-se Figura 4.

FIGURA 4. Área Urbana da cidade de Nepomuceno-MG.



Fonte: GOOGLE EARTH, 2024.

A cidade está situada na região sul de Minas Gerais, dentro da mesorregião do Sul e Sudoeste de Minas. Geograficamente, Nepomuceno está localizada a uma latitude de 21°14'16" sul e uma longitude de 45°14'47" oeste, e está a aproximadamente 280 km da capital do estado, Belo Horizonte. A localização geográfica estratégica de Nepomuceno facilita o acesso a importantes centros urbanos e rodovias, tornando-a ideal para a implementação de infraestrutura de telecomunicações avançada (IBGE, 2024).

O clima tropical de altitude de Nepomuceno, caracterizado por verões quentes e chuvosos e invernos secos e amenos, oferece condições favoráveis para a instalação e operação de infraestrutura de telecomunicações. A temperatura média anual é de aproximadamente 21°C, com picos superiores a 30°C durante o verão e mínimas que podem cair abaixo de 10°C no inverno. A precipitação é concentrada de outubro a março, enquanto os meses de abril a setembro são mais secos. Essas condições climáticas, com variações extremas de temperatura relativamente limitadas, contribuem para um ambiente estável e favorável para a manutenção e operação dos sistemas de telecomunicações (IBGE, 2024).

A diversidade do relevo em Nepomuceno, com suas áreas de planalto, vales e colinas, é uma característica marcante da região. Situada a uma altitude média de 850 metros acima do nível do mar, a cidade apresenta formações topográficas como serras e elevações moderadas, que podem representar desafios para a propagação de sinais de rádio. No entanto, o uso de tecnologias avançadas de modelagem de terreno, como o software Radio Mobile, permite um planejamento eficiente da cobertura de rede, assegurando que o sinal 5G alcance toda a área urbana da cidade (PREFEITURA MUNICIPAL DE NEPOMUCENO, 2024).

Com uma população de cerca de 27.000 habitantes, sendo a maioria residente na área urbana, Nepomuceno apresenta um cenário em que a distribuição populacional é um fator crucial no planejamento da rede 5G. Para assegurar que todos os residentes urbanos tenham acesso à nova tecnologia de comunicação, é essencial considerar essa distribuição no projeto da rede (PREFEITURA MUNICIPAL DE NEPOMUCENO, 2024).

A implementação de uma rede 5G na área urbana de Nepomuceno visa fornecer uma infraestrutura de telecomunicações de alta qualidade, suportando velocidades de dados significativamente maiores e latências menores em comparação com as redes 4G. Esse avanço tecnológico beneficiará diversos setores, como educação, saúde, comércio e serviços públicos.

Para o sucesso do projeto, é essencial realizar um planejamento detalhado utilizando ferramentas de modelagem de propagação de sinal, como o Radio Mobile, para analisar a cobertura e a intensidade do sinal em diferentes condições topográficas e ambientais. A instalação de antenas 5G deve considerar a variação do relevo e a distribuição da população urbana para otimizar a cobertura e minimizar zonas de sombra. Além disso, a infraestrutura deve ser projetada para suportar as condições climáticas locais, garantindo estabilidade e confiabilidade da rede ao longo do ano.

3. METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos neste trabalho, desenvolveu-se as seguintes atividades:

- a) Estudo bibliográfico e delimitação do problema;
- b) A coleta de dados relacionados ao hardware com ênfase na antena modelo Comba L45-806-T00. Esta antena foi escolhida por suas características técnicas específicas, que a tornam adequada para a aplicação em redes 5G. A Tabela 2 apresenta os dados coletados.

TABELA 2. Parâmetros do Modelo de Antena.

CONFIGURAÇÕES DE HARDWARE (Modelo Comba L45-806-T00)	
Potência de transmissão (W)	120
Potência de transmissão (dBm)	50,79
Perda do cabo na estação base (dB)	0
Ganho da antena na estação base (dBi)	18
Altura da antena na estação base (m)	50
Perda no cabo do usuário (dB)	0
Ganho de antena do usuário (dB)	0
Ganho de direção do rádio (dB)	0
Altura da antena do usuário (m)	1,5

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A potência de transmissão foi especificada em 120 W. Quando convertida para dBm, esse valor corresponde a 50,79 dBm. Este dado foi obtido a partir do manual técnico do fabricante, que detalham as capacidades de transmissão dos equipamentos.

O ganho da antena foi determinado em 18 dBi. Este valor reflete a capacidade da antena de concentrar a energia do sinal em uma direção específica, o que é essencial para maximizar a cobertura e a eficiência da rede. Além disso, definiu-se a altura da antena em 50 metros, de acordo com as recomendações para garantir uma propagação eficiente do sinal e cobertura adequada na área de interesse (“5G; NR; BASE STATION (BS) RADIO TRANSMISSION AND RECEPTION (3GPP TS 38.104 VERSION 17.7.0 RELEASE 17”), 2024)

Enquanto as perdas de sinal no cabo foram consideradas nulas (0 dB), tanto na estação base quanto no lado do usuário, assumindo que não existem cabos, e sim por propagação no espaço livre. Por fim, considerou-se como 0 dB o ganho de antena e ganho de direção do rádio

no usuário, pressupondo que o equipamento do usuário é padrão e não possui características específicas de ganho.

- c) Cálculo da máxima perda de propagação utilizando a equação (7), baseada em dados apresentados pelo 3GPP (3GPP TS 38.104 VERSION 17.7.0 RELEASE 17) e dados relacionados ao modelo de antena utilizado. Com os dados da tabela e a equação (7), chegou-se ao resultado da Máxima Perda de Propagação, conforme observa-se na Tabela 3.

TABELA 3. Parâmetros para o cálculo de Máxima perda de propagação.

MÁXIMA PERDA DE PROPAGAÇÃO	
Perda corporal (dB)	1,5
Perda de penetração (dB)	5
Margem de desvanecimento lento (dB)	0
Perda de folhagem (dB)	3
Perda de chuva (dB)	0
Margem de interferência (dB)	5
Ganho da antena na estação base (dBi)	18
Ganho de antena do usuário (dB)	0
Ganho de direção do rádio (dB)	0
Perda do cabo na estação base (dB)	0
Perda no cabo do usuário (dB)	0
Sensibilidade de recepção (dBm)	-83,08
Máxima perda de propagação	137,37

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

- d) Cálculo do raio das células (d) em diferentes ambientes (urbano, suburbano e rural) a partir da equação (1), conforme os parâmetros apresentados na Tabela 4. Onde o A (m) é um termo constante, X_f (Hz) é o fator de correção da frequência, X_h é o fator de correção da altura do receptor e n é o expoente que caracteriza o ambiente de propagação.

TABELA 4. Cálculos de raio das células.

RAIO DAS ERB'S			
Parâmetros	Urbano	Sub-urbano	Rural
A (m)	83,32	83,32	83,32
X_f (Hz)	1,46	1,46	1,46
X_h (m)	1,35	1,35	2,50
n (Np/m)	4,48	4,02	3,75
Perda de propagação	137,37	137,37	137,37
Raio das células (d)	808,48	1.178,58	1.593,38

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

- e) Cálculo da sensibilidade de recepção através da equação (8), onde os parâmetros usados foram obtidos através do 3GPP e a banda útil do sistema representado por BW_{total} (MHz), foi obtida através da equação (9).

A Tabela 5 apresenta três parâmetros usados para o cálculo da equação (8), todos definidos conforme as especificações do 3GPP. A figura de ruído do móvel, com valor de 6 dB, reflete a sensibilidade do receptor do dispositivo móvel ao ruído. A relação sinal-ruído SNR do móvel, com valor de 5 dB, representa a qualidade do sinal recebido em relação ao nível de ruído, e o número de *Resource Blocks* que é 273, foi definido pelo 3GPP para uma operação eficiente dentro de uma largura de banda específica.

TABELA 5. Cálculos de sensibilidade de recepção.

SENSIBILIDADE DE RECEPÇÃO	
Frequência central (MHz)	3500
Número de resource blocks	273
Largura de banda por subportadora BW_{sc} (KHz)	30
Figura de ruído do móvel - NF_{ue} (dB)	6
Relação sinal ruído do móvel - SNR (dB)	5
Banda útil do sistema - BW_{total} (MHz)	98,28
Sensibilidade de recepção (dBm)	-83,08

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Para a altura do transmissor (h_b) utilizou-se um valor de 50 metros, baseado na torre de telefonia móvel existente na cidade. Já a altura do receptor h_r (m), que está relacionado à altura da antena receptora, foi definida como 1,5 metros. Esse valor é geralmente associado à altura média de um dispositivo móvel em uso, como um smartphone na mão de uma pessoa. Além disso, a área da cidade é de 8 km², o comprimento de onda (λ) correspondente à frequência de 3500 MHz e a distância de referência tem o valor de 100 m, que é uma distância onde as características do canal de propagação são bem conhecidas e podem ser usadas como base para previsões em distâncias maiores.

- f) Validação dos resultados em relação ao número de sites necessários para cobrir o município de Nepomuceno-MG, utilizando o Radio Mobile.

As principais configurações do Radio Mobile incluem parâmetros de rede, sistemas de transmissão e recepção das ERB's, e sistemas de transmissão e recepção dos dispositivos móveis. No projeto em questão, adotou-se os seguintes parâmetros de rede: clima continental temperado, antenas com polarização vertical, frequência de operação de 3500 MHz e modo estatístico com 95% de probabilidade de cobertura da área, conforme ilustra a Figura 5.

FIGURA 5. Parâmetros de configuração de rede.

The screenshot shows the 'Propriedades de rede' dialog box with the following settings:

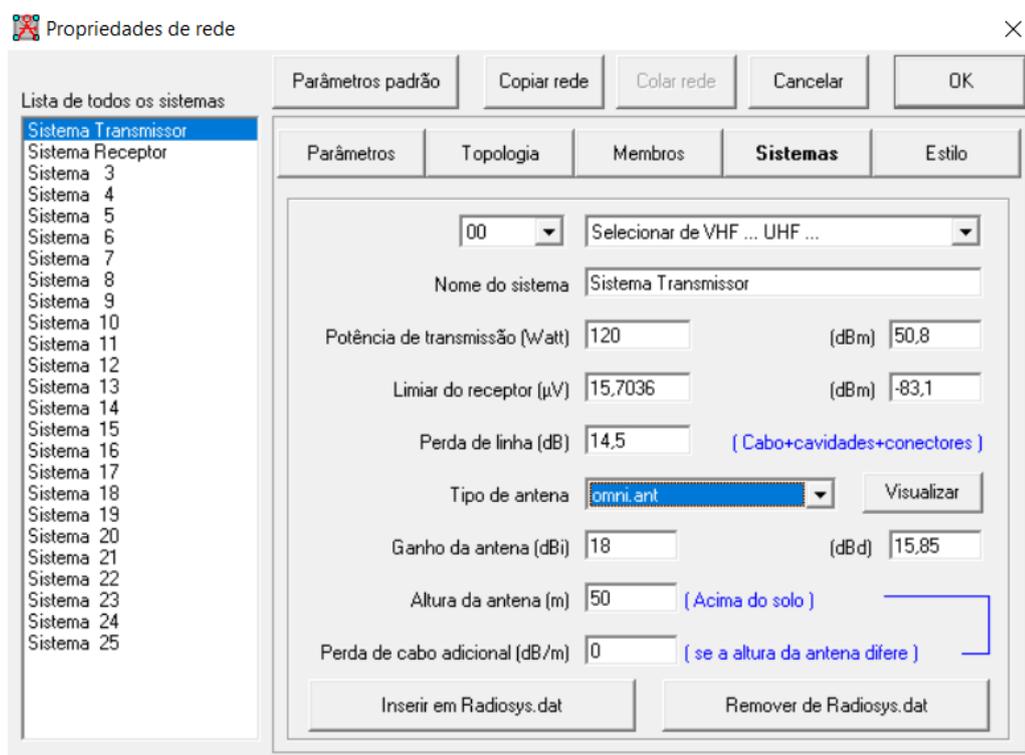
- Nome da rede:** TCC ALAN PIMENTA
- Frequência mínima (MHz):** 3500
- Máxima frequência (MHz):** 3500
- Polarização:** Vertical (selected), Horizontal
- Modo estatístico:** Móvel (selected), Ponto, Acidental, Radiodifusão
- % de tempo:** 95
- % de locais:** 50
- % de situações:** 95
- Perda adicional:** Cidade, Floresta, % 0
- Refratividade da superfície (N-Units):** 301
- Condutividade do solo (S/m):** 0,005
- Permissividade média do solo:** 15
- Clima:** Temperado continental (selected), Equatorial, Sub-tropical continental, Sub-tropical marítimo, Deserto, Temperado marítimo sobre a terra, Temperado marítimo sobre o mar

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A figura 6 mostra a configuração de um sistema transmissor no software Radio Mobile, onde são definidos diversos parâmetros para simulação da cobertura de sinal. A potência de transmissão está ajustada para 120 watts, equivalente a 50,8 dBm, o que determina a força do sinal emitido. O limite do receptor é de 15,7036 μ V (-83,1 dBm), representando a sensibilidade mínima que o receptor pode detectar. Com relação à perda de linha ao longo dos cabos e conectores, considerou-se um valor de 14,5 dB. Além disso, o sistema utiliza uma antena omnidirecional, que distribui o sinal igualmente em todas as direções, com um ganho de 18 dBi, o que aumenta o alcance do sinal em uma direção específica.

A antena está instalada a 50 metros acima do solo, altura que influencia positivamente na cobertura. Não há perda de sinal adicional por metro de cabo considerada na configuração, além da perda já mencionada. Esses parâmetros permitem ao software calcular a propagação do sinal e a cobertura em diferentes áreas.

FIGURA 6. Parâmetros de configuração do sistema transmissor.

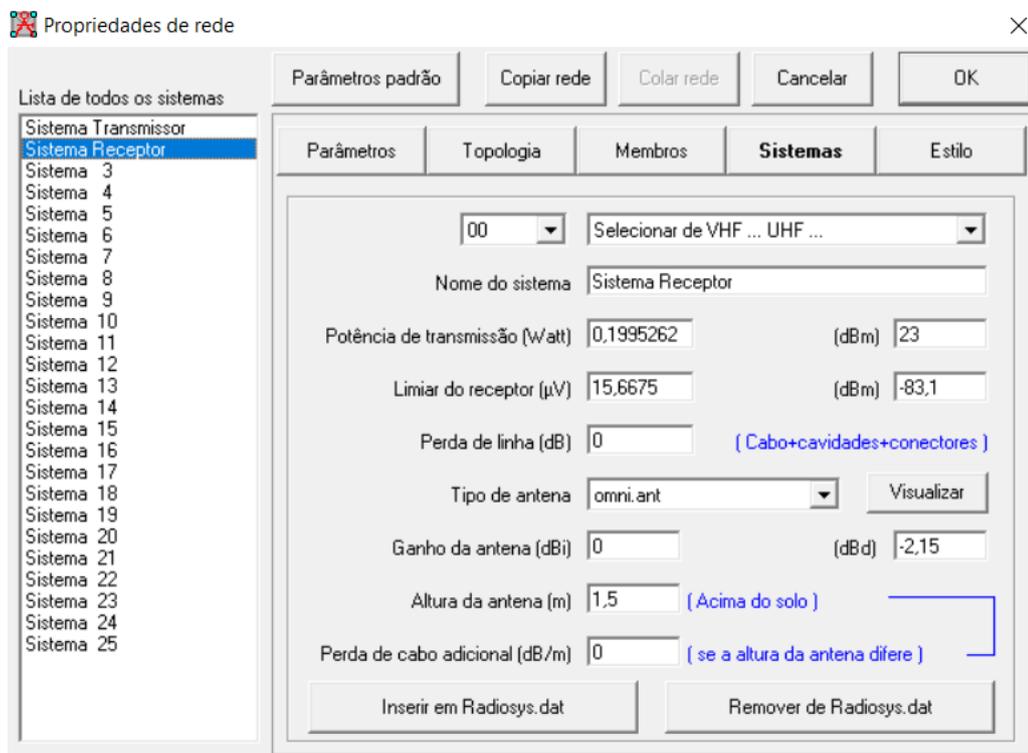


Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Já na configuração do sistema receptor utilizado no software, configurou-se a sensibilidade do receptor, pelo limite de 15,6675 μ V (-83,1 dBm), que define o sinal mínimo detectável. Além disso, não há perda de sinal ao longo dos cabos, já que a perda de linha é configurada como zero. O sistema utiliza uma antena omnidirecional posicionada a uma altura

de 1,5 metros acima do solo, sem ganho adicional (0 dBi), o que significa que o sinal é captado igualmente em todas as direções.

FIGURA 7. Parâmetros de configuração do sistema receptor.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Com os parâmetros de rede, transmissão e recepção devidamente definidos, o software Radio Mobile foi utilizado para simular e avaliar a intensidade do sinal no projeto de cobertura do 5G na cidade de Nepomuceno. Esses parâmetros, que incluem aspectos como frequência de operação, potência de transmissão, ganho de antena, sensibilidade do receptor, entre outros, são fundamentais para garantir uma análise precisa da propagação do sinal e da qualidade da cobertura.

O Radio Mobile permite a criação de mapas detalhados de intensidade de sinal, possibilitando a visualização das áreas onde a cobertura 5G será mais eficaz. Essa análise é crucial para identificar possíveis áreas de sombra ou regiões com baixa intensidade de sinal, permitindo ajustes no posicionamento das Estações Rádio Base (ERBs) e nos parâmetros de configuração para otimizar a cobertura. No caso de Nepomuceno, os resultados gerados pelo Radio Mobile fornecem uma visão clara da distribuição do sinal, assegurando que a rede 5G proposta atenda às demandas de conectividade com alta qualidade e eficiência em toda a zona urbana da cidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados incluem a definição da cobertura estimada para a cidade de Nepomuceno, MG, considerando a frequência de 3,5 GHz. O projeto visa proporcionar uma cobertura robusta e com capacidade adequada para suportar as demandas crescentes de conectividade na região.

Após a realização dos cálculos com base no modelo de propagação SUI, determinou-se que a área de cobertura de cada Estação Rádio Base (ERB) é de 1,27 km². Dado que a área total da cidade de Nepomuceno exige uma cobertura completa e eficiente, foi calculado que são necessárias seis ERBs para garantir a cobertura total da zona urbana.

Com base na análise da cobertura de cada ERB, foi possível garantir que a distribuição planejada seja suficiente para cobrir toda a extensão urbana da cidade de Nepomuceno-MG, assegurando uma rede 5G eficiente e de alta qualidade para os habitantes.

A Tabela 6 resume os cálculos realizados e os resultados obtidos através das equações (10) e (11), destacando a importância da correta avaliação da área de cobertura de cada ERB para o sucesso do projeto.

TABELA 6. Resultado final do número de ERB's.

Resultados	Urbana	Sub-urbana	Rural
Área das ERB's (km²)	1,27	2,71	4,95
Número de ERB's	6,28	2,96	1,62

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A Figura 8, mostra as seis ERB's distribuídas na zona urbana da cidade de Nepomuceno, com o mapa de intensidade de propagação obtido através do Software Radio Mobile.

O mapa exibido utiliza uma sobreposição de cores para representar a intensidade de propagação do sinal em diferentes áreas da cidade.

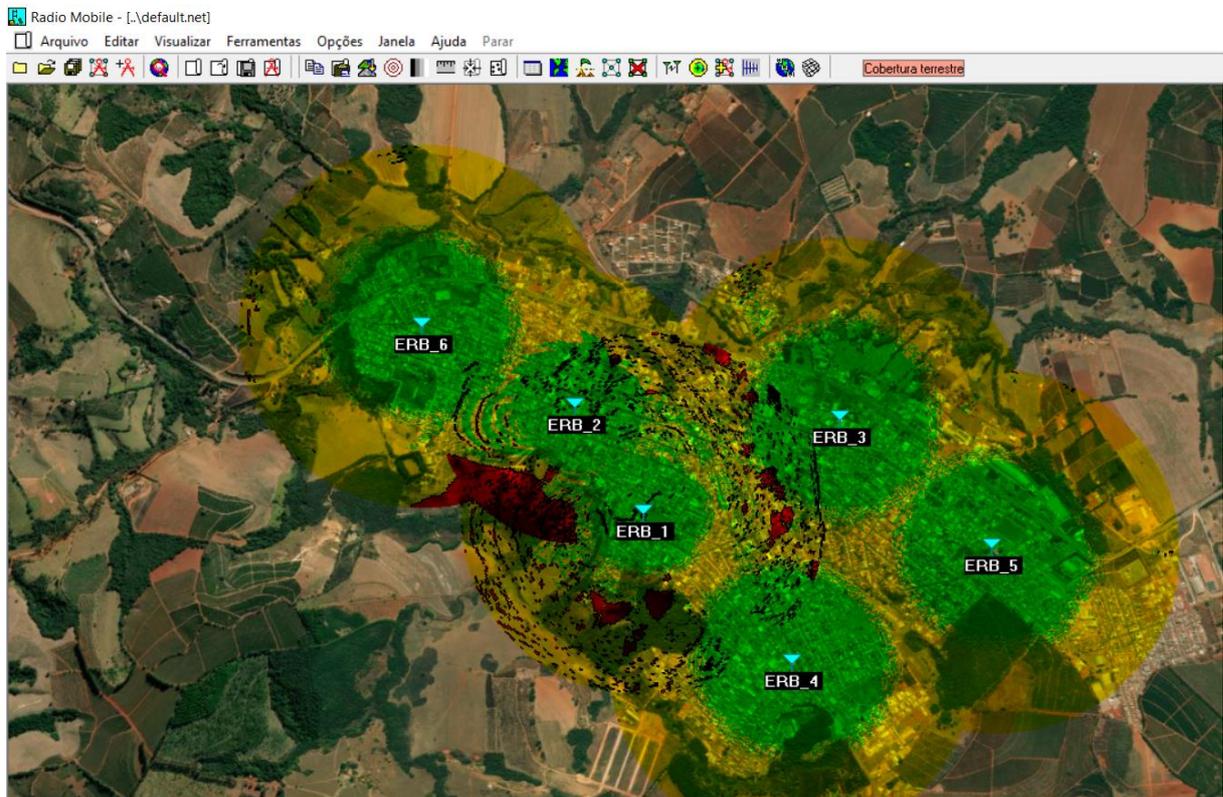
As ERBs são identificadas como ERB_1, ERB_2, ERB_3, ERB_4, ERB_5 e ERB_6, e estão estrategicamente posicionadas para maximizar a cobertura e garantir uma qualidade de sinal adequada em toda a região. As áreas em verde indicam uma cobertura de sinal forte, enquanto as áreas em amarelo e vermelho indicam zonas com menor intensidade de sinal, potencialmente necessitando de ajustes na distribuição das ERBs ou no aumento da potência transmitida.

Esse mapa é essencial para o projeto de cobertura da cidade de Nepomuceno, pois permite avaliar visualmente a distribuição do sinal e identificar áreas que podem precisar de

melhorias na infraestrutura de telecomunicações. A utilização do software Radio Mobile foi fundamental para a geração dessa análise, uma vez que ele possibilita simulações detalhadas baseadas em modelos de propagação de sinal, levando em consideração o relevo, a vegetação e outras características do terreno.

Em resumo, a imagem é uma representação visual da estratégia de cobertura proposta para a implementação de uma rede de comunicação eficiente na cidade de Nepomuceno, destacando a importância do planejamento cuidadoso na distribuição das ERBs para garantir uma cobertura de sinal adequada para os usuários.

FIGURA 8. ERB`s distribuídas na zona urbana de Nepomuceno-MG.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

5. CONCLUSÃO

A implementação de uma rede 5G na cidade de Nepomuceno-MG marca um avanço crucial na infraestrutura de telecomunicações local, oferecendo melhorias significativas na conectividade e no desempenho dos serviços. Através de ferramentas como o Link Budget e o software Radio Mobile, foi realizada uma análise detalhada da cobertura e da eficiência do sistema proposto. Os cálculos baseados no modelo de propagação SUI determinaram que são necessárias 6 Estações Rádio Base (ERBs) para cobrir toda a zona urbana da cidade de maneira eficaz. Essa distribuição assegura que a demanda por conectividade seja plenamente atendida, proporcionando à população acesso a uma rede de alta velocidade e baixa latência.

Além disso, este projeto de cobertura serve como base sólida para futuros estudos sobre o 5G na cidade, facilitando a posterior implantação do sistema. Com o projeto de cobertura já definido, Nepomuceno está bem posicionada para aproveitar os benefícios da nova tecnologia, promovendo o desenvolvimento econômico e social da região e consolidando-se como um modelo para outras cidades que buscam modernizar suas redes de telecomunicações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADMIN. **5G Spectrum Recommendations**. Disponível em: <<https://www.5gamericas.org/5g-spectrum-recommendations>>. Acesso em: 24 ago. 2024.
- ADMINISTRATOR. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**. Disponível em: <<https://ieeeps.org/publications/ieee-antennas-and-propagation-magazine>>. Acesso em: 24 ago. 2024.
- ALVES DE ALENCAR, G.; BRAZ, R.; DA COSTA, F. **Aplicações de Imagens de Sensoriamento Remoto no Estudo de Modelos de Propagação em Redes de Comunicações Sem fio**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/07.15.12.26/doc/p1290.pdf>>. Acesso em: 4 dez. 2023.
- An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore**. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/778178>>. Acesso em: 4 dez. 2023
- ANATEL - **Faixa de 3,5 GHz está disponível em mais 194 municípios**. Disponível em: <<https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/noticias/faixa-de-3-5-ghz-esta-disponivel-em-mais-194-municipios>>. Acesso em: 16 set. 2024.
- Comparison of empirical propagation path loss models for fixed wireless access systems | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore**. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1543252>>. Acesso em: 5 dez. 2023.
- Comba Telecom - Antennas & Subsystems**. Disponível em: <<https://www.comba-telecom.com/en/products-and-services/antennas>>. Acesso em: 29 ago. 2024.
- Edital do 5G – o que isso significa? – Brasil, Economia e Governo**. Disponível em: <<https://www.brasil-economia-governo.org.br/2021/03/10/edital-do-5g-o-que-isso-significa/>>. Acesso em: 4 dez. 2023.
- Google Earth**. Disponível em: <<https://earth.google.com/web/search/Nepomuceno>>. Acesso em: 4 dez. 2023.
- IBGE | Portal do IBGE | IBGE**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/nepomuceno/panorama>>. Acesso em: 4 dez. 2023.
- KAITZ, T.; TRINKWON, B. **Title Channel Models for Fixed Wireless Applications Date**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.ieee802.org/16/tg3/contrib/802163c-01_29r4.pdf>. Acesso em: 4 dez. 2023.
- PARKVALL, E. **5G NR : the next generation wireless access technology**. [s.l: s.n.].
- PARKVALL, S. et al. NR: The New 5G Radio Access Technology. **IEEE Communications Standards Magazine**, v. 1, n. 4, p. 24–30, dez. 2017.

PHILLIPS, C.; SICKER, D.; GRUNWALD, D. A Survey of Wireless Path Loss Prediction and Coverage Mapping Methods. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 15, n. 1, p. 255–270, 2013.

Prefeitura Municipal de Nepomuceno. Disponível em:
<<https://www.nepomuceno.mg.gov.br/>>. Acesso em: 10 ago. 2024.

Radio Mobile - RF propagation simulation software - Welcome... Disponível em:
<<http://radiomobile.pe1mew.nl/>>. Acesso em 26 ago. 2024.

Radio Mobile WEB Site. Disponível em: <<http://www.ve2dbe.com/english1.html>>. Acesso em: 4 dez. 2023.

SILVA, A. M. **Comunicação móvel: dos primórdios ao 5G**. São Paulo: Editora Técnica, 2021.

SOUZA, F. **A evolução das redes móveis: de 1G a 5G**. Rio de Janeiro: Editora da UFRJ, 2020.

TIETJEN, J. S. Anita Longley's Legacy: The Longley-Rice Model - Still Going Strong After Almost 50 Years [Historical Corner]. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, v. 55, n. 3, p. 237–240, jun. 2013.

5G; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception (“5G; NR; BASE STATION (BS) RADIO TRANSMISSION AND RECEPTION (3GPP TS 38.104 VERSION 17.7.0 RELEASE 17”), 2024). Disponível em:
<https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/138104/17.07.00_60/ts_138104v170700p.pdf>. Acesso em: 4 dez. 2023.



RELATÓRIO FINAL DE CURSO Nº 23/2025 - DENP (11.62.04)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 26/05/2025 13:51)

FELIPE DE SOUZA DELGADO

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO

DENP (11.62.04)

Matrícula: ###834#6

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/documentos/> informando seu número: **23**, ano: **2025**, tipo:
RELATÓRIO FINAL DE CURSO, data de emissão: **26/05/2025** e o código de verificação: **49a00d071b**