



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE CASTANHAL
FACOMP – FACULDADE DE COMPUTAÇÃO
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

EVANDRO BRUNO DUARTE DA SILVA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE REDES 5G EM DIFERENTES
BANDAS DE FREQUÊNCIA UTILIZANDO O NYUSIM**

CASTANHAL – PA
2024

EVANRO BRUNO DUARTE DA SILVA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE REDES 5G EM DIFERENTES
BANDAS DE FREQUÊNCIA UTILIZANDO O NYUSIM**

Trabalho de relatório sobre simulações de redes 5G feitas no NYUSIM submetido ao colegiado da Faculdade de Computação da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para a obtenção de nota na disciplina de TCC

Orientador: José Jailton Junior

CASTANHAL - PA

2024

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	4
1.1	Problematização.....	5
2	OBJETIVOS.....	6
2.1	Objetivo Geral.....	6
2	REFERENCIAL TEORICO.....	6
2.1	Redes 5G: Uma Visão Geral.....	6
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	8
3.1	NYUSIM.....	8
3.2	Variação da frequência.....	8
3.3	Execução da simulação e análise gráfica.....	9
3.4	Características e Requisitos dos Cenários de Simulação.....	9
4	RESULTADOS.....	11
4.1	Zona urbana (Umi).....	11
4.2	Zona rural.....	22
5	CONCLUSÃO.....	33
	REFERÊNCIAS.....	34

1 INTRODUÇÃO

A quinta geração de redes móveis, conhecida como 5G, surge como uma das inovações mais relevantes em telecomunicações, com promessas de melhorar significativamente a velocidade, capacidade e conectividade em diversas aplicações. Essa tecnologia foi desenvolvida para atender às crescentes demandas da sociedade digital, sendo considerada uma resposta aos desafios que as redes anteriores, como o 4G, enfrentaram em relação à capacidade de transmissão e latência em áreas densamente povoadas e para dispositivos com alta demanda de dados (Oliveira; Alencar; Lopes, 2018). Segundo Oliveira et al. (2018), a evolução para o 5G é motivada pela necessidade de integração de novas tecnologias como Internet das Coisas (IoT), veículos autônomos e aplicações de realidade aumentada, que exigem uma rede mais rápida e confiável.

O 5G opera em duas faixas de frequência principais: a faixa sub-6 GHz (FR1) e as ondas milimétricas acima de 24 GHz (FR2). A faixa FR1 oferece maior penetração de sinal, porém com menor capacidade de dados e alcances mais longos, enquanto a FR2 possibilita uma transferência de dados extremamente rápida, ideal para cenários urbanos de alta densidade, mas é sensível a obstáculos, como paredes e vegetação densa (Cubillos Betancourt, 2024). Essas diferenças de desempenho tornam a escolha de frequência um fator decisivo para o sucesso de redes 5G em diferentes ambientes, como áreas urbanas e rurais, conforme destacado por Liu et al. (2022), que observaram variações notáveis de desempenho em simulações realizadas com o NYUSIM.

Para atender a essas demandas e explorar o potencial das redes 5G, o NYUSIM se destaca como uma ferramenta essencial para simulações de canal. O NYUSIM é amplamente utilizado em pesquisas de redes móveis, oferecendo suporte para diferentes cenários de propagação e faixas de frequência. Cubillos Betancourt (2024), ao avaliar o desempenho de ondas milimétricas em redes 5G com o NYUSIM, demonstrou a importância de simulações precisas para o planejamento de redes que utilizam frequências mais altas. Outro estudo realizado por Kousias et al. (2022) apresentou uma análise detalhada sobre a cobertura de redes 5G não autônomas, revelando que o NYUSIM é eficaz para prever o desempenho de redes 5G em ambientes com alta interferência.

A propagação de ondas milimétricas (mmWave), especialmente em ambientes urbanos e rurais, ainda enfrenta desafios significativos devido à suscetibilidade do sinal a obstruções e

à variação na propagação com diferentes frequências. Em um estudo recente, Hammed et al. (2023) investigaram como fenômenos naturais, como tempestades de areia e poeira, afetam a propagação de sinal em redes 5G, apontando que condições ambientais podem influenciar diretamente a qualidade da conexão. Al-Shuwaili e Jamel (2021) também identificaram que as frequências mais altas sofrem degradação em áreas com alta presença de obstáculos, sendo recomendadas simulações específicas para cada cenário, como as realizadas pelo NYUSIM.

As simulações de propagação em redes 5G são fundamentais para o desenvolvimento de infraestruturas de comunicação que atendam de forma eficaz as necessidades dos usuários. Por meio de simulações, é possível entender como diferentes frequências se comportam em ambientes variados, garantindo uma conectividade mais robusta e eficiente. A análise de redes 5G em diferentes bandas de frequência, utilizando simuladores como o NYUSIM, permite identificar as melhores configurações para maximizar a eficiência e minimizar as limitações inerentes às ondas milimétricas (Sánchez et al., 2023).

A escolha de diferentes bandas de frequência e a análise de seu desempenho justificam-se pela necessidade de explorar todas as faixas disponíveis para a rede 5G, maximizando sua eficiência em qualquer ambiente, seja urbano ou rural. A compreensão dessas características ajuda a resolver problemas de cobertura e interferência, permitindo que as redes sejam mais adaptáveis e resilientes às condições do ambiente (ALI et al., 2024). Esse estudo também se justifica pelo impacto direto que a rede 5G exerce sobre tecnologias emergentes, com potencial para revolucionar setores como saúde, transporte e segurança pública, que demandam conexões rápidas e confiáveis (Minoli; Occhiogrosso, 2019).

O presente estudo teve como objetivo realizar uma análise comparativa do desempenho de redes 5G em diferentes bandas de frequência, por meio de simulações no NYUSIM, com foco nas áreas urbanas e rurais, a fim de identificar como cada frequência se comporta nesses ambientes.

1.1 Problematização

Como o desempenho das redes 5G varia entre diferentes bandas de frequência em ambientes urbanos e rurais, e quais implicações essas variações trazem para a cobertura e eficiência dessas redes?

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar comparativamente o desempenho de redes 5G em diferentes bandas de frequência, utilizando o simulador NYUSIM, para compreender as limitações e potencialidades de cada faixa em cenários urbanos e rurais, visando contribuir para o desenvolvimento de redes de comunicação mais eficientes e adaptadas às particularidades de cada ambiente.

2.2 Objetivos Específicos

■ Identificar e comparar a intensidade do sinal e a perda de propagação em bandas de frequência de 50 a 150 GHz em cenários urbanos e rurais, avaliando como esses fatores afetam a cobertura e a confiabilidade das redes 5G.

■ Avaliar o impacto de diferentes frequências na latência e na largura de banda disponíveis em redes 5G, verificando a influência de cada faixa de frequência na capacidade de atender a demandas específicas de cada ambiente.

■ Desenvolver uma análise gráfica dos resultados das simulações realizadas no NYUSIM, destacando padrões de desempenho de acordo com o ambiente e a faixa de frequência, para auxiliar na tomada de decisões sobre a implementação de redes 5G.

2 REFERENCIAL TEORICO

2.1 Redes 5G: Uma Visão Geral

O 5G é a próxima geração de redes móveis, sucedendo o 4G. Ele oferece melhorias significativas em relação à velocidade, capacidade e confiabilidade. Essa tecnologia visa conectar não apenas dispositivos móveis, mas também outros objetos como eletrodomésticos inteligentes e carros autônomos (DIGITAL TRENDS, 2024). Conforme ilustrado na Figura 1, o 5G tem as diferentes bandas de frequência para proporcionar uma conectividade mais rápida e eficiente (FCC, 2024).

O 5G utiliza duas faixas de frequência principais:

- **Faixa de Frequência 1 (FR1):** Inclui bandas de frequência abaixo de 6 GHz, como 700 MHz, 1800 MHz e 2600 MHz, que são também usadas pelo 4G. O 5G amplia essa faixa para cobrir um espectro de 410 MHz a 7125 MHz (QUALCOMM, 2024). A Figura 1 mostra um exemplo da propagação de ondas milimétricas nessa faixa de frequência, ilustrando como essas ondas são menos sensíveis a obstáculos do que as de frequências mais altas (NYU, 2024).
- **Faixa de Frequência 2 (FR2):** Inclui bandas de frequência de 24,25 GHz a 71,0 GHz, conhecidas como “ondas milimétricas” (mmWave), que oferecem maior capacidade e velocidades ultra-rápidas, mas possuem alcance reduzido e menor capacidade de penetração em edifícios (LIFEWIRE, 2024). Conforme ilustrado na Figura 1, as ondas mmWave são mais adequadas para áreas de alta densidade populacional, onde a cobertura é garantida por múltiplos pontos de acesso.

Figura 1: onda milimétrica (mmWave) e sub-6GHz



Fonte: Quoracdn, disponível em: <https://qph.cf2.quoracdn.net/main-qimg-8f8d9749f179fdb416a8cd15bb5c366b> acesso em 25 de outubro de 2024.

A escolha das frequências afeta a velocidade, a cobertura e a capacidade da rede 5G. Frequências mais altas (mmWave) oferecem velocidades ultrarrápidas, mas têm menor alcance e penetração em edifícios. Em contrapartida, frequências mais baixas (sub-6 GHz) têm maior alcance e melhor penetração, porém com velocidades um pouco reduzidas (FCC, 2024). Em resumo, o 5G é uma combinação de várias faixas de frequência, cada uma com suas próprias vantagens e desvantagens. Esse balanceamento de frequência permite que as redes 5G ofereçam uma cobertura mais abrangente e uma experiência de usuário melhorada (NYU, 2024).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 NYUSIM

O NYUSIM é um simulador de canal inovador que suporta simulações de canal do mundo real, baseadas em quedas e consistência espacial, para cenários como urban microcell (UMi), urban macrocell (UMa), rural macrocell (RMa), indoor hotspot (InH) e indoor factory (InF) (CUBILLOS BETANCOURT, 2024). O NYUSIM está disponível nas plataformas MATLAB e ns-3 e tem sido amplamente utilizado em diversas aplicações e avaliações de desempenho relacionadas ao 5G. A versão 4.0 do NYUSIM em MATLAB foi expandida para cobrir a faixa de frequência de 0,5 GHz a 150 GHz e permite simulações de canal baseadas em quedas e consistência espacial para os cenários mencionados (OLIVEIRA; ALENCAR; LOPES, 2018). Além disso, o simulador oferece modelos de canal para ambientes internos e externos, com suporte a diferentes faixas de frequência. A versão 4.0 também inclui uma interface gráfica do usuário atualizada, que oferece funcionalidades aprimoradas, como a possibilidade de upload de arquivos de parâmetros de entrada para execução de simulações. Desde o lançamento da versão 1.0 do NYUSIM, as três primeiras versões ultrapassaram 100.000 downloads, destacando sua relevância como ferramenta para pesquisadores e profissionais no campo de comunicações sem fio de alta frequência (AL-SHUWAILI; JAMEL, 2021).

O NYUSIM é amplamente utilizado para avaliar cenários de comunicação sem fio em frequências de ondas milimétricas, especialmente em simulações que visam compreender a propagação de sinais em redes 5G. Neste estudo, foram realizadas 20 simulações utilizando a versão 4.0 do NYUSIM, sendo 10 para áreas urbanas e 10 para áreas rurais. As simulações foram realizadas em ambientes UMi e RMa, representando, respectivamente, cenários urbanos e rurais. Definimos parâmetros como a frequência do portador e a largura de banda para garantir a consistência e precisão das análises de desempenho.

3.2 Variações da frequência

Foram realizadas 10 simulações para áreas urbanas e 10 para áreas rurais, variando a frequência de 50 GHz a 150 GHz, com incrementos de 10 GHz. Essa variação foi essencial para avaliar o comportamento do canal em diferentes faixas de frequência, permitindo observar como cada faixa se comporta em termos de intensidade do sinal e alcance em diferentes ambientes.

3.3 Execução da simulação e análise gráfica

Utilizou-se a interface gráfica do NYUSIM para configurar os parâmetros de entrada das simulações. O simulador também oferece a possibilidade de upload de arquivos de parâmetros de entrada em formato “.txt”, possibilitando a execução da simulação com valores específicos predefinidos. Após configurados, o NYUSIM executa simulações de canal com base em quedas e consistência espacial para o cenário selecionado, seja ele urbano ou rural. Ao examinar os gráficos de frequências simuladas, é possível obter uma visão detalhada de como as ondas 5G se comportam em diferentes cenários, identificando áreas com maior ou menor cobertura e possíveis desafios para a implementação das redes 5G.

Em resumo, este relatório explora tanto os conceitos teóricos quanto as aplicações práticas das redes 5G, com foco nas frequências e suas implicações na conectividade global. Assim, busca-se analisar as nuances dessas redes e entender como elas moldarão o futuro da comunicação sem fio.

3.4 Características e Requisitos dos Cenários de Simulação

Para compreender as diferenças de desempenho das redes 5G em ambientes urbanos e rurais, é essencial conhecer as características específicas e os requisitos de cada cenário. Esses contrastes influenciam diretamente o comportamento das frequências e a propagação do sinal, refletidos nos gráficos de simulação.

Cenário Urbano (Urban Microcell - UMi):

O cenário urbano representa áreas densamente povoadas, como centros de cidades e zonas comerciais, onde há uma grande quantidade de edifícios e barreiras físicas que impactam a

propagação do sinal. Esse ambiente requer uma alta densidade de pontos de acesso devido à baixa penetração e ao alcance limitado das frequências mais altas, como as ondas milimétricas. As características do ambiente urbano, incluindo altos níveis de interferência e múltiplos obstáculos, tornam a utilização de frequências mais elevadas (acima de 24 GHz) vantajosa para proporcionar maior capacidade e velocidade. No entanto, esses sinais são suscetíveis a bloqueios e perdas rápidas de intensidade, o que demanda uma maior quantidade de antenas para garantir a cobertura e a qualidade do serviço.

Cenário Rural (Rural Macrocell - RMa):

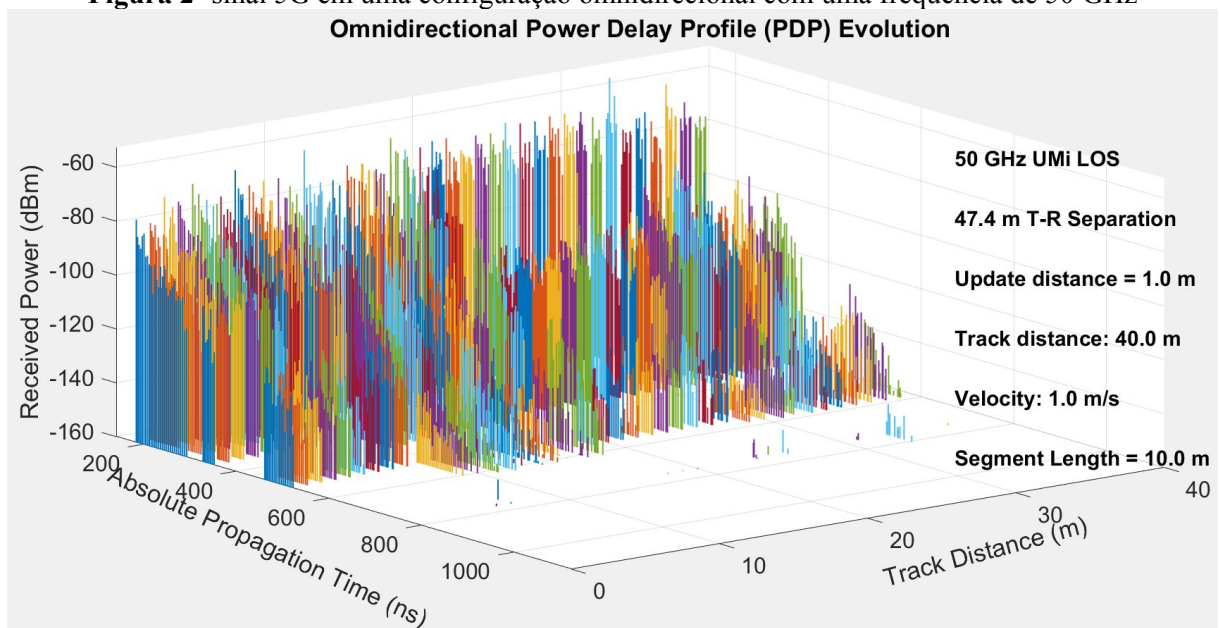
O cenário rural, por outro lado, é caracterizado por áreas com baixa densidade populacional e uma menor quantidade de barreiras físicas, como edifícios e infraestrutura urbana. Nesses locais, a propagação do sinal ocorre em distâncias maiores, o que torna frequências mais baixas (sub-6 GHz) mais eficazes para proporcionar uma cobertura extensa e garantir a penetração do sinal em terrenos mais amplos. Além disso, o ambiente rural apresenta menores níveis de interferência, permitindo que o sinal se propague com menos degradação ao longo do trajeto. Esse cenário exige uma abordagem de cobertura com menos pontos de acesso, mas com maior potência, para atingir áreas mais remotas, compensando a baixa densidade de infraestrutura.

Esses contrastes entre os dois cenários permitem observar, nos gráficos de propagação, diferenças marcantes no comportamento do sinal. No ambiente urbano, a necessidade de alta densidade de antenas e a dificuldade de penetração do sinal são evidentes, enquanto, no ambiente rural, a maior faixa de cobertura e a menor interferência proporcionam um desempenho diferente. Compreender essas características ajuda a interpretar os resultados das simulações e a identificar a frequência ideal para cada ambiente.

4 RESULTADOS

4.1 Zona urbana (Umi)

Figura 2- sinal 5G em uma configuração omnidirecional com uma frequência de 50 GHz
Omnidirectional Power Delay Profile (PDP) Evolution

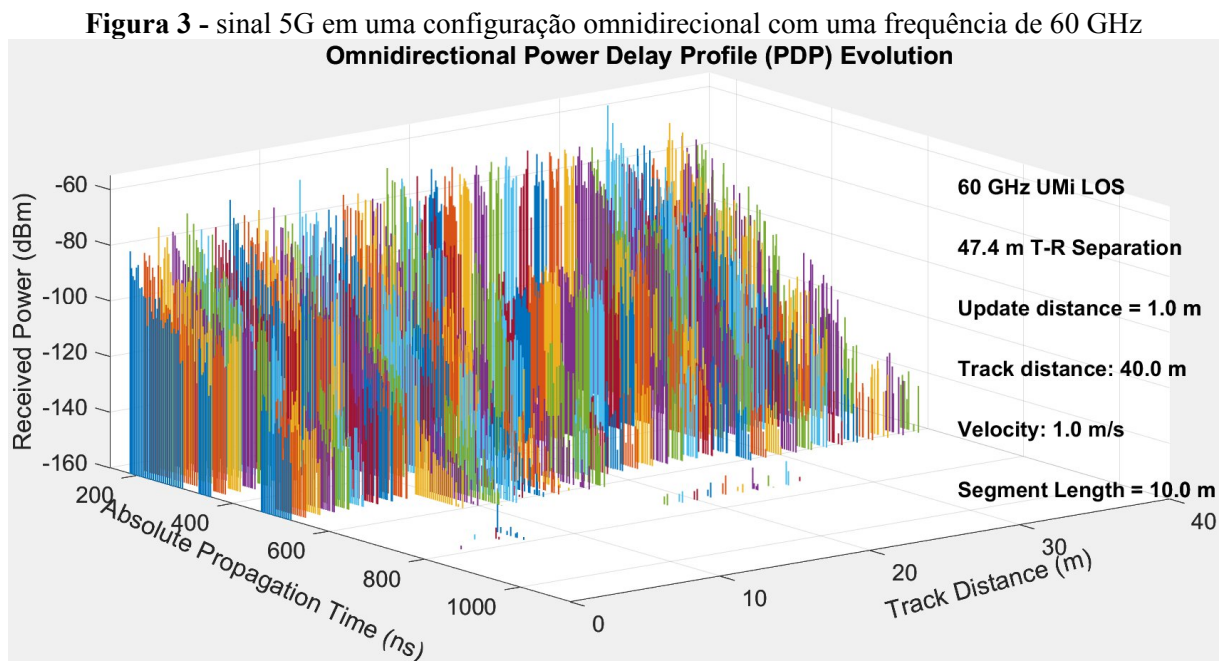


Fonte: (autor)2024

A análise do gráfico acima obtido através do NYUSIM revela importantes compreensões sobre a propagação de sinal 5G em uma configuração omnidirecional com uma frequência de 50 GHz. O gráfico retrata a relação entre a distância percorrida pela trilha e a potência recebida, expressa em decibéis miliwatts (dBm), juntamente com o tempo de propagação absoluto em nanossegundos (ns). Notavelmente, observa-se que a potência de maior pico está a uma distância de aproximadamente 30 metros, com um valor ligeiramente maior que -60 dBm.

Além disso, é possível observar que há uma correlação inversa entre o tempo de propagação absoluto e a potência recebida: à medida que o tempo de propagação aumenta, a potência recebida diminui. Isso sugere uma degradação do sinal conforme a distância percorrida

aumenta, conforme esperado em ambientes de propagação sem fio. A tendência de queda na potência recebida em relação ao aumento do tempo de propagação também pode ser atribuída a fenômenos como atenuação, dispersão e reflexão, que afetam a qualidade e a intensidade do sinal ao longo do tempo e da distância.

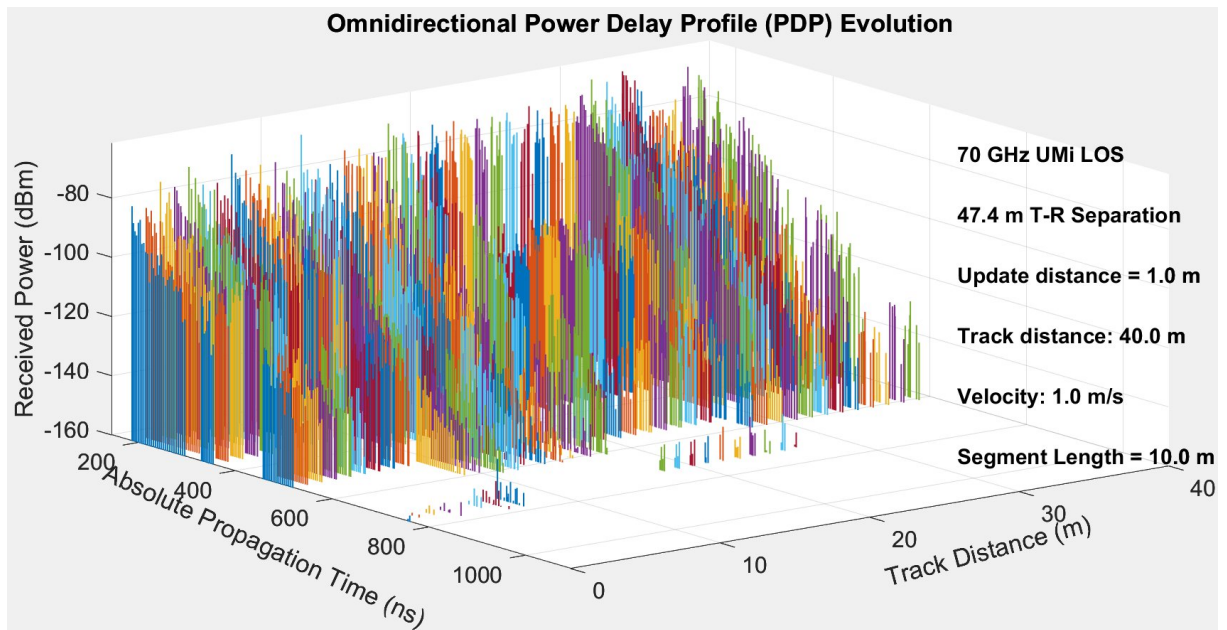


Fonte: (autor)2024

A análise do gráfico acima obtido através do NYUSIM para investigar a propagação da rede 5G em microcidades revela uma configuração omnidirecional com uma frequência de 60 GHz. É possível observar no gráfico que a potência recebida atinge seu pico máximo próximo a uma distância de pouco mais de 30 metros, registrando um valor consistente em torno de -60 dBm.

Além disso, o gráfico demonstra uma tendência crescente de intensidade do sinal a mais na região próxima a 800 ns, em comparação com o gráfico anterior, estas novas barras de intensidade de sinal estão situadas aproximadamente entre 0 e 10 metros e entre 15 e 25 metros. Essas barras adicionais sugerem uma maior complexidade na propagação do sinal em distâncias mais longas, o que pode ser atribuído a fenômenos como obstruções, reflexões múltiplas e atenuação.

Figura 4 - sinal 5G em uma configuração omnidirecional com uma frequência de 70 GHz

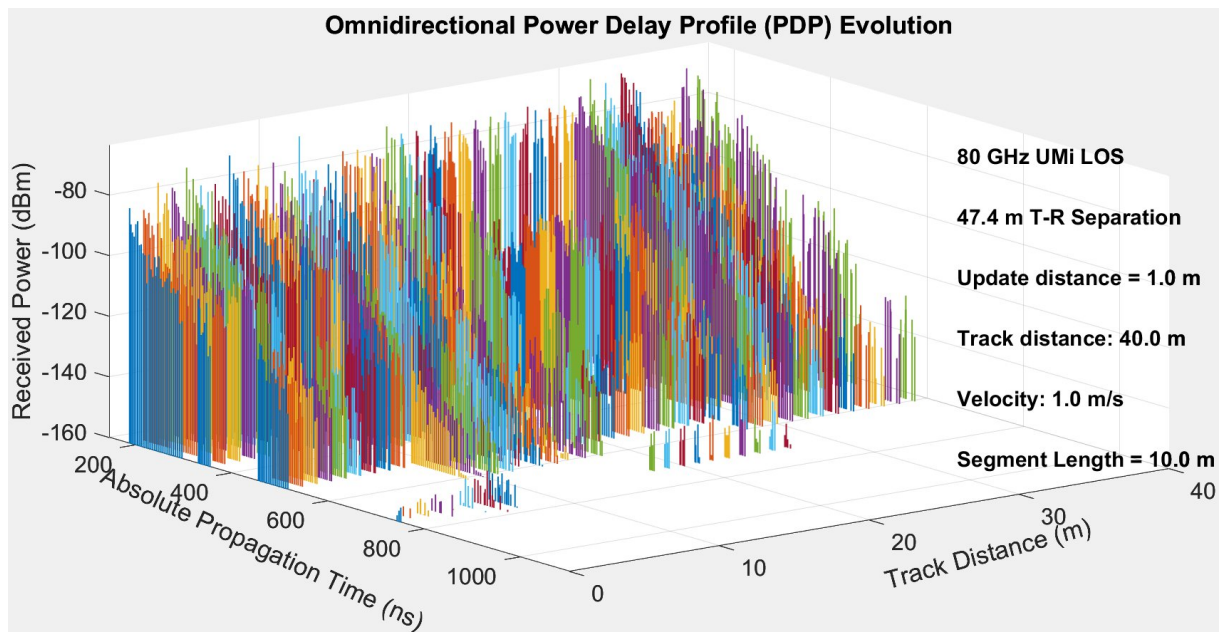


Fonte: (autor)2024

A análise do gráfico acima oferece dados importantes para o entendimento das características de transmissão em ambientes urbanos de menor escala. Este gráfico, que representa uma configuração omnidirecional com uma frequência de 70 GHz, revela que a potência recebida atinge seu pico máximo próximo a uma distância de 33 metros, com um valor um pouco maior de -80 dBm, indicando uma intensidade de sinal relativamente mais fraca em comparação com frequências mais baixas.

Além disso, o gráfico apresenta um maior número de barras de intensidade de sinal na região próxima a 800 ns em comparação com os gráficos anteriores, essas barras de intensidade de sinal estão concentradas entre 0 e aproximadamente 10 metros e entre aproximadamente 15 e 25 metros, sugerindo uma maior complexidade na propagação do sinal em distâncias mais longas no decorrer do tempo.

Figura 5 - sinal 5G em uma configuração omnidirecional com uma frequência de 80 GHz

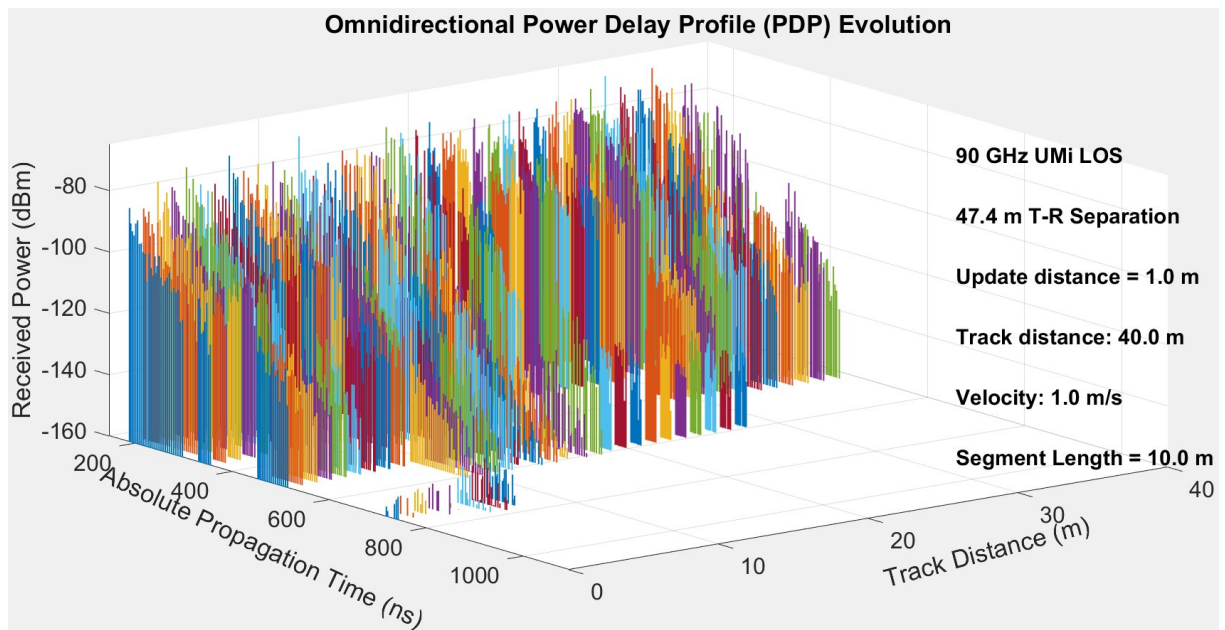


Fonte: (autor)2024

O gráfico acima, configurado como omnidirecional e operando na frequência de 80 GHz, revela que a potência recebida tem seus picos máximos nessa frequência próximo a uma distância de aproximadamente um pouco mais de 10 metros e entre as distâncias de aproximadamente 30 e 40 metros, registrando um valor um pouco maior que -80 dBm, indicando uma intensidade de sinal relativamente mais fraca em comparação com frequências mais baixas.

Além disso, o gráfico revela um aumento no número e no pico nas barras de intensidade do sinal na região próxima a 800 ns em comparação com os gráficos anteriores, sugerindo uma propagação mais complexa do sinal em distâncias maiores. Também é possível notar um ligeiro aumento na quantidade de Barras de intensidade do sinal em relação aos gráficos anteriores.

Figura 6 - sinal 5G em uma configuração omnidirecional com uma frequência de 90 GHz

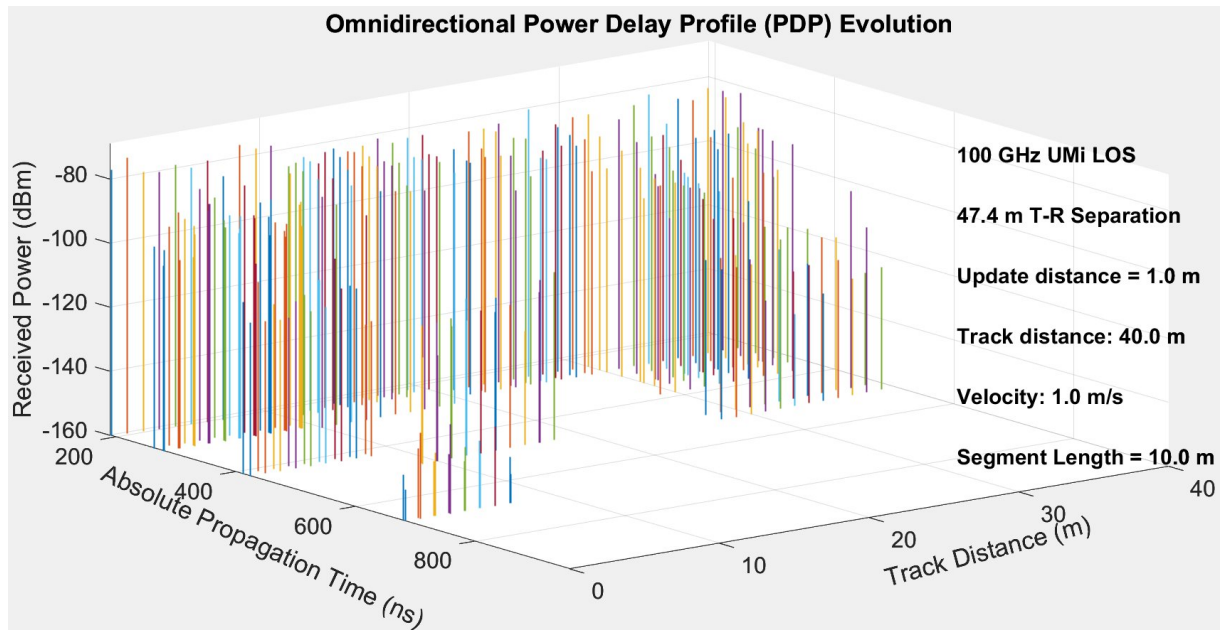


Fonte: (autor)2024

Neste gráfico acima, configurado como omnidirecional e operando na frequência de 90 GHz, observa-se que o pico de potência recebida permanece com a barra de intensidade do sinal um pouco maior que -80 dBm, com uma menor quantidade de barras de intensidade de sinal atingindo esse pico nessa mesma região em comparação com gráficos anteriores em frequências mais baixas, é possível notar que a maioria desses picos de aproximadamente -80 dbm está entre 30 e 40 metros.

Além disso, todas as barras de intensidade do sinal próximos da região de tempo de 800 ns estão com picos mais elevados e estão todos concentrados entre 0 e 10 metros, representando uma mudança significativa em relação aos gráficos anteriores, nos quais a distribuição dos segmentos próximos a 800 ns era mais ampla.

Figura 7 - sinal 5G em uma configuração omnidirecional com uma frequência de 100 GHz

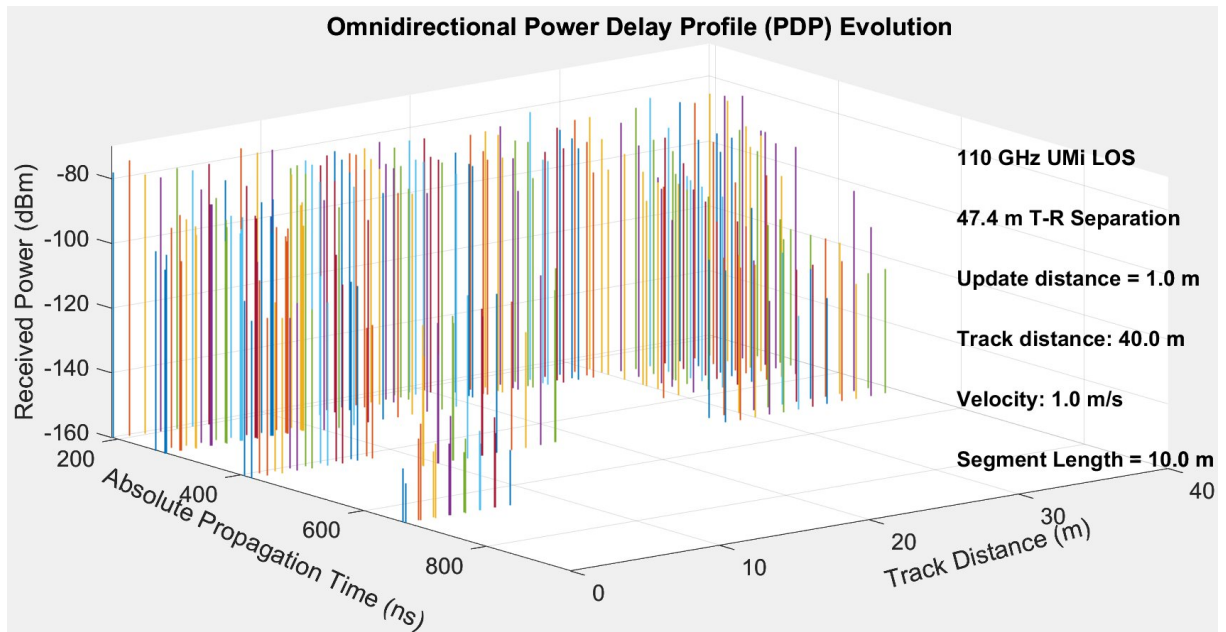


Fonte: (autor)2024

A potência recebida no gráfico acima (dBm), atinge um número um pouco maior que -80 na região entre 0 e 10 metros, e sugere uma boa recepção do sinal, indicando uma cobertura satisfatória dentro do ambiente simulado. A distribuição da propagação temporal absoluta (ns) exibe barras de intensidade de sinal mais distantes em torno de 680 ns para distâncias entre 0 e 10 metros. Este fenômeno é particularmente relevante, pois reflete uma resposta temporal distinta em comparação com gráficos anteriores, evidenciando uma variação bem acentuada na propagação do sinal.

Além disso, a frequência do sinal em 100 GHz Umi LOS e a distância de trajetória de 40 metros contribuem para a compreensão do comportamento da propagação. Uma das mais evidentes e principais alterações nesse gráfico é que ele apresenta bem menos barras de intensidade de sinal em comparação com gráficos anteriores e os picos de potência nesta região em torno de 680 ns são mais elevados.

Figura 8 - sinal 5G em uma configuração omnidirecional com uma frequência de 110 GHz

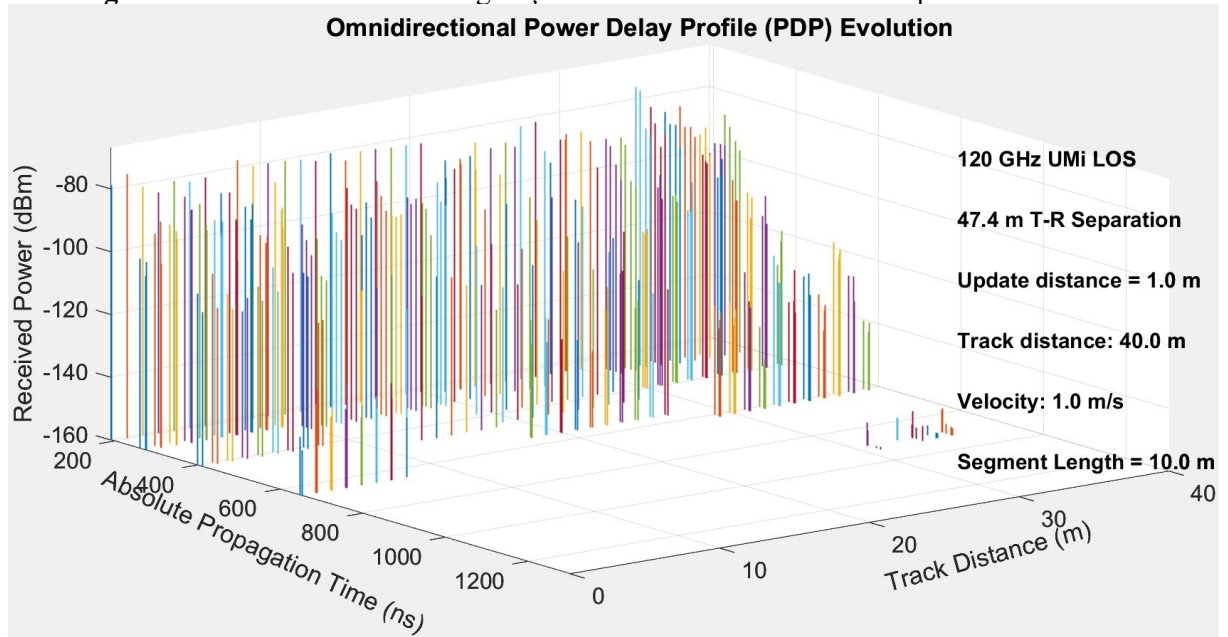


Fonte: (autor)2024

A análise do gráfico do Power Delay Profile (PDP) omnidirecional revela compreensões significativas sobre a propagação do sinal 5G em microcidades, conforme simulado no ambiente do NYUSIM. Destaca-se que a frequência do sinal de 110GHz influencia diretamente a evolução do perfil de atraso de potência. A maior barra de intensidade de sinal recebida, registrando pouco mais de -80 dBm, é observada em distâncias entre 0 e 5 metros.

Esta descoberta sugere uma eficácia significativa da propagação do sinal em distâncias extremamente curtas, ressaltando a importância da proximidade para uma conectividade robusta em ambientes urbanos compactos. Além disso, é perceptível uma ligeira diminuição nos picos das barras de intensidade de sinal nessa mesma região em comparação com o gráfico anterior, indicando possíveis variações na propagação do sinal em diferentes frequências. A análise da Absolute Propagation Time (tempo absoluto de propagação) revela que as barras de intensidade de sinal mais distantes, cerca de 680 ns, ocorrem em uma faixa de distância entre 0 e 10 metros, apresentando uma extensão ligeiramente maior do que no gráfico anterior na mesma região.

Figura 9 - sinal 5G em uma configuração omnidirecional com uma frequência de 120 GHz

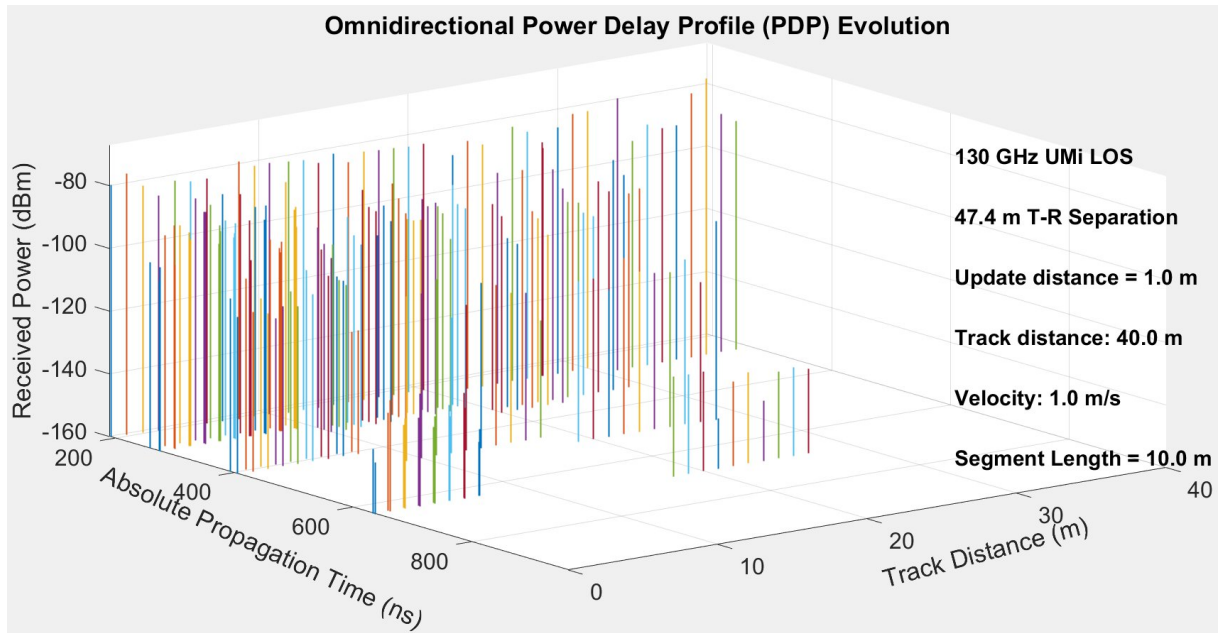


Fonte: (autor)2024

A análise do gráfico acima revela aspectos significativos da propagação do sinal 5G em microcidades, simulado no ambiente do NYUSIM. Notavelmente, a frequência do sinal de 120GHz assim como no gráfico anterior destaca-se como um fator crucial na evolução do perfil de atraso de potência. Observa-se que a barra de intensidade de sinal de maior potência recebida, registrando um valor ligeiramente menor que -80 dBm, ocorre em uma faixa de distância entre 30 e 40 metros.

Este achado sugere uma eficácia relevante da propagação do sinal em distâncias moderadas, dentro do contexto de uma microcidade. Além disso, a análise da Absolute Propagation Time (tempo absoluto de propagação) revela que os segmentos mais distantes, aproximadamente 900 ns, ocorrem dentro da mesma faixa de distância, marcando uma observação pioneira neste estudo.

Figura 10 - sinal 5G em uma configuração omnidirecional com uma frequência de 130 GHz

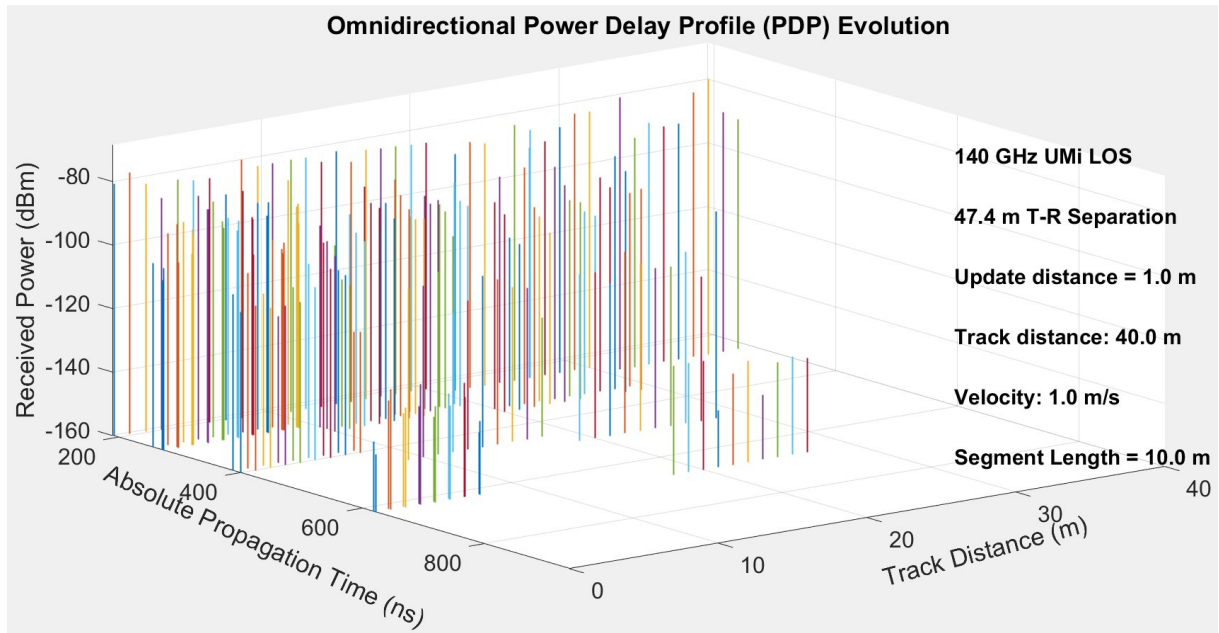


Fonte: (autor)2024

Analisando o gráfico acima que possui uma frequência de sinal de 130GHz, é possível notar que as barras de intensidade de sinal com maior dbm, pouco menor que -80 dBm, estão localizadas em distâncias de aproximadamente 2 metros e aproximadamente 40 metros. Destaca-se que, em comparação com gráficos anteriores, este apresenta uma redução significativa no número de barras de intensidade de sinal identificadas. Este fenômeno sugere uma possível simplificação ou homogeneização na propagação do sinal em frequências mais elevadas, indicando uma maior concentração de energia em distâncias específicas.

A análise da Absolute Propagation Time (tempo absoluto de propagação) revela barras de intensidade de sinal mais distantes, em torno de 650 ns, concentrados em duas faixas principais de distância: aproximadamente entre 0 e 8 metros, e entre 15 e 28 metros. Esta observação destaca uma distribuição não uniforme do tempo de propagação, sugerindo variações na eficácia da conectividade em diferentes áreas da microcidade. A amplitude da faixa de distância, que varia de 0 a 40 metros, oferece uma visão abrangente da propagação do sinal, destacando a importância da análise detalhada para informar o planejamento e a implementação de redes 5G otimizadas para ambientes urbanos compactos.

Figura 11 - sinal 5G em uma configuração omnidirecional com uma frequência de 140 GHz

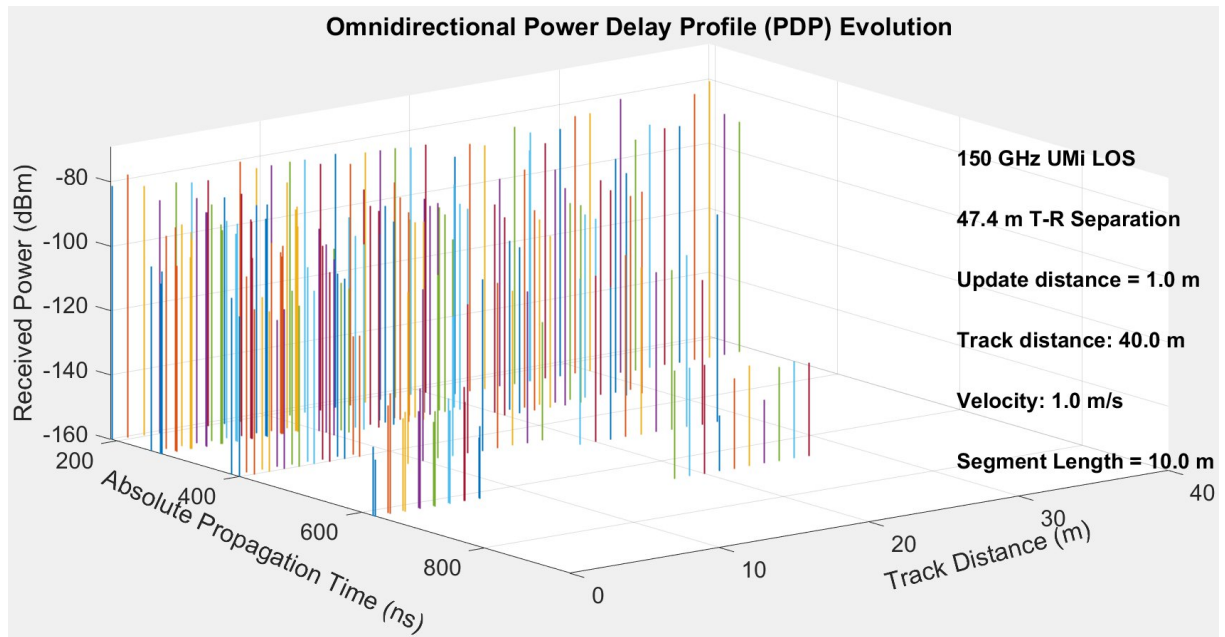


Fonte: (autor)2024

A análise do gráfico gerado no NYUSIM para o relatório acadêmico que simula a propagação de uma rede 5G com 140GHz de frequência em uma área urbana de microcidade com uma track distance de 0 a 40 metros revela algumas informações importantes. Primeiramente, notamos que a barra de intensidade de sinal com o pico mais alto está localizada um pouco antes dos 5 metros, indicando que nesse ponto a intensidade do sinal é mais forte. Além disso, quando uma das barras de intensidade de sinal atinge um Received power um pouco acima de -80dBm, observamos que a intensidade do sinal é consideravelmente boa nesse ponto específico.

Outro ponto relevante é que quanto menor o absolute propagation time, maior são as barras de intensidade do sinal. As maiores barras de intensidade do sinal são aquelas com o menor valor de ns, indicando uma propagação mais eficiente nesses casos. Também é importante notar que as barras de intensidade do sinal com o maior absolute propagation time estão localizadas em torno de 610ns e geralmente em uma track distance entre 0 e 10 metros ou entre 15 e 25 metros. Por fim, podemos observar que o gráfico com a frequência de 130GHz apresenta poucas alterações em relação ao gráfico anterior, o que sugere uma consistência nos resultados obtidos para diferentes frequências. Essas informações são cruciais para entender a propagação da rede 5G e podem auxiliar na otimização do seu desempenho em ambientes urbanos.

Figura 12 - sinal 5G em uma configuração omnidirecional com uma frequência de 150 GHz



Fonte: (autor)2024

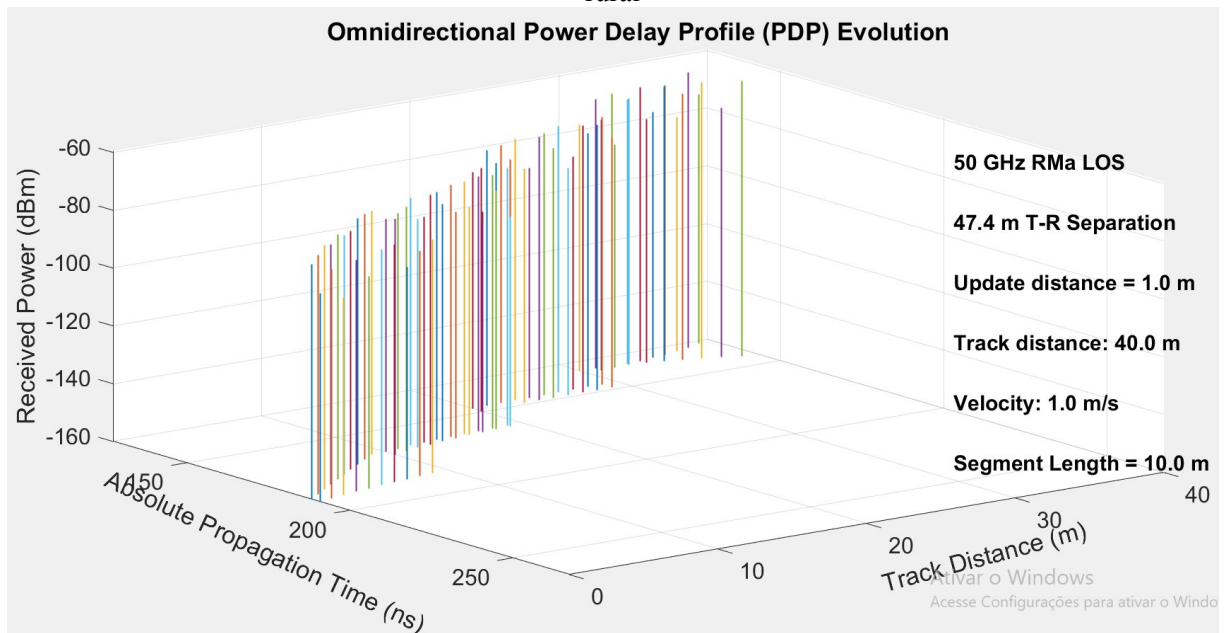
A análise do gráfico gerado no NYUSIM para simular a propagação de uma rede 5G com frequência de 150GHz em uma área urbana de microcidade com track distance de 0 a 40 metros mostra que a intensidade do sinal atinge seu pico pouco antes dos 5 metros, quando um dos sinais alcança uma potência recebida um pouco acima de -80 dBm. Observa-se que quanto menor o absolute propagation time (tempo de propagação), maior é a intensidade do sinal.

As maiores intensidades de sinal são encontradas em valores menores de ns. Nota-se que as intensidades de sinal com maior tempo de propagação estão localizadas em torno de 610 ns e ocorrem em track distances entre 0 e 10 ou entre 15 e 25 metros.

Além disso, o gráfico evidencia que a propagação do sinal na frequência de 150GHz é semelhante à frequência de 140GHz, com poucas ou nenhuma alteração significativa. Este padrão sugere que a propagação do sinal é consistente e previsível em ambas as frequências dentro da área urbana estudada. Esses resultados são importantes para o dimensionamento e otimização de redes 5G em ambientes urbanos, permitindo uma melhor compreensão da propagação do sinal e aprimorando o design da rede para alcançar uma cobertura eficiente e confiável.

4.2 Zona rural

Figura 13 - Sinal 5G em uma configuração omnidirecional com uma frequência de 50 GHz na zona rural

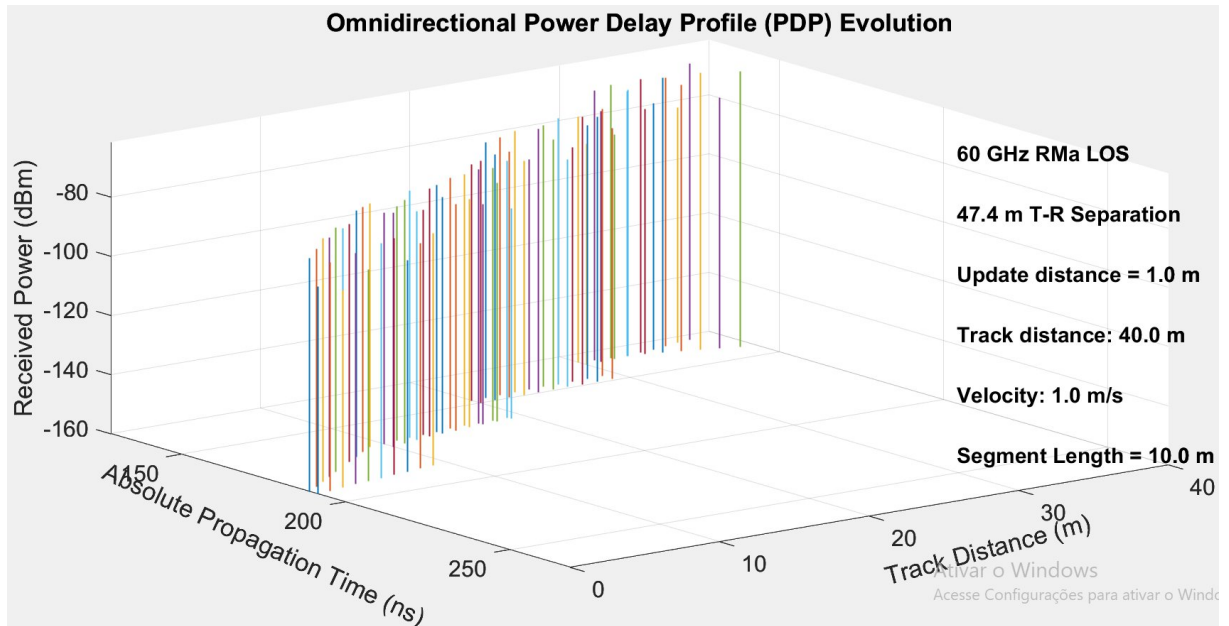


Fonte: (autor)2024

A análise do gráfico gerado pelo NYUSIM para simulação da propagação de uma rede 5G em uma área rural com frequência de 50GHz revela diversos aspectos importantes. Observa-se que a intensidade do sinal aumenta à medida que a distância também aumenta, atingindo o pico em torno dos 40 metros.

O valor do Received Power (potência recebida) é próximo a -60 dBm o que é considerado bom para comunicações sem fio. O tempo de propagação absoluto está inversamente relacionado à intensidade do sinal, sugerindo que quanto mais rápido o sinal chega, mais forte ele é. A localização das barras de intensidade do sinal com o maior tempo de propagação em aproximadamente 180ns pode indicar a presença de fenômenos como reflexões que atrasam a chegada do sinal em relação ao sinal direto. Esses resultados são essenciais para o planejamento e otimização de redes 5G em ambientes rurais.

Figura 14 - Sinal 5G em uma configuração omnidirecional com uma frequência de 60 GHz na zona rural



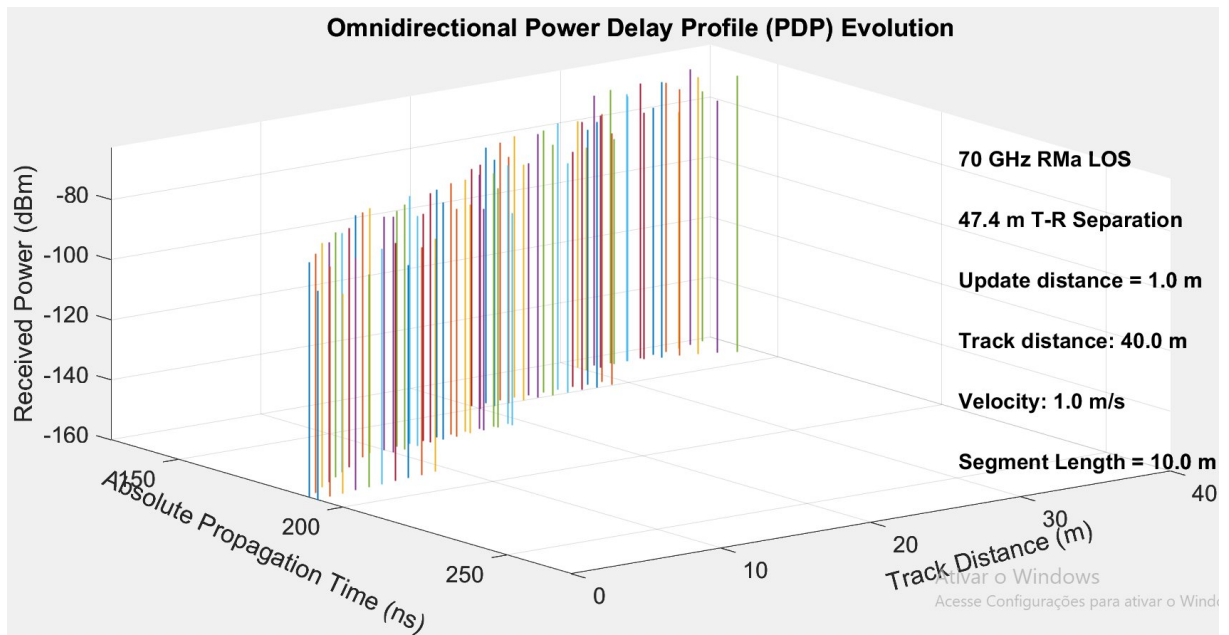
Fonte: (autor)2024

Análise do gráfico gerado no NYUSIM de uma rede 5G com 60GHz de frequência em uma área rural revela algumas informações importantes. Inicialmente, é possível observar que as barras de intensidade de sinal apresentam uma crescente à medida que a track distance aumenta, chegando ao pico um pouco antes dos 40 metros, quando uma das barras de intensidade atinge um Received power (dBm) ligeiramente maior que -80dBm. Isso indica que, à medida que a distância entre os dispositivos e a antena aumenta, o sinal se enfraquece.

Além disso, foi observado que quanto menor o absolute propagation time (ns), maiores são as barras de intensidade do sinal. Isso sugere que um tempo de propagação mais baixo está relacionado a uma intensidade de sinal mais alta. É interessante notar que as barras de intensidade do sinal com o maior absolute propagation time (ns) estão concentradas em torno de 180ns, todas em uma track distance entre 0 e 10 metros.

Isso pode indicar que em distâncias mais curtas a propagação do sinal é mais eficiente. Por fim, o valor máximo de dBm atingido está ligeiramente menor do que o registrado no gráfico anterior, o que pode indicar uma variação na intensidade do sinal dependendo da distância e do tempo de propagação. Essas informações são fundamentais para a compreensão da propagação da rede 5G e podem auxiliar na otimização da cobertura em áreas rurais.

Figura 15 - Sinal 5G em uma configuração omnidirecional com uma frequência de 70 GHz na zona rural

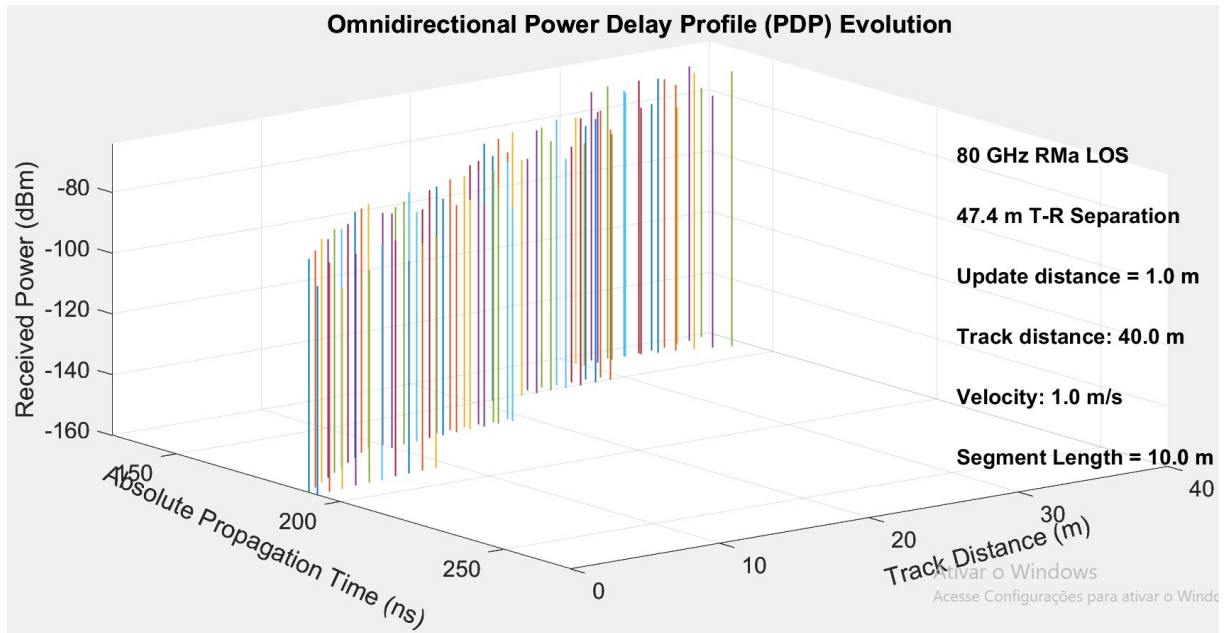


Fonte: (autor)2024

O gráfico gerado no Nysim para a simulação da propagação de uma rede 5G com frequência de 70GHz em uma área rural apresenta barras de intensidade de sinal que aumentam conforme a distância da trajetória (track distance) aumenta, atingindo um pico pouco antes dos 40 metros, quando uma das barras alcança um valor de Received Power um pouco superior a -80 dBm.

Nota-se também que as barras de intensidade do sinal são maiores para absolute propagation times menores em nanossegundos (ns). As barras de maior intensidade, localizadas em torno de 180ns, estão concentradas em track distances entre 0 e 10 metros. Comparando com a simulação anterior com frequência de 60GHz, observa-se que as barras de intensidade do sinal apresentam algumas alterações, mas de maneira geral o padrão é semelhante.

Figura 16 - Sinal 5G em uma configuração omnidirecional com uma frequência de 80 GHz na zona rural

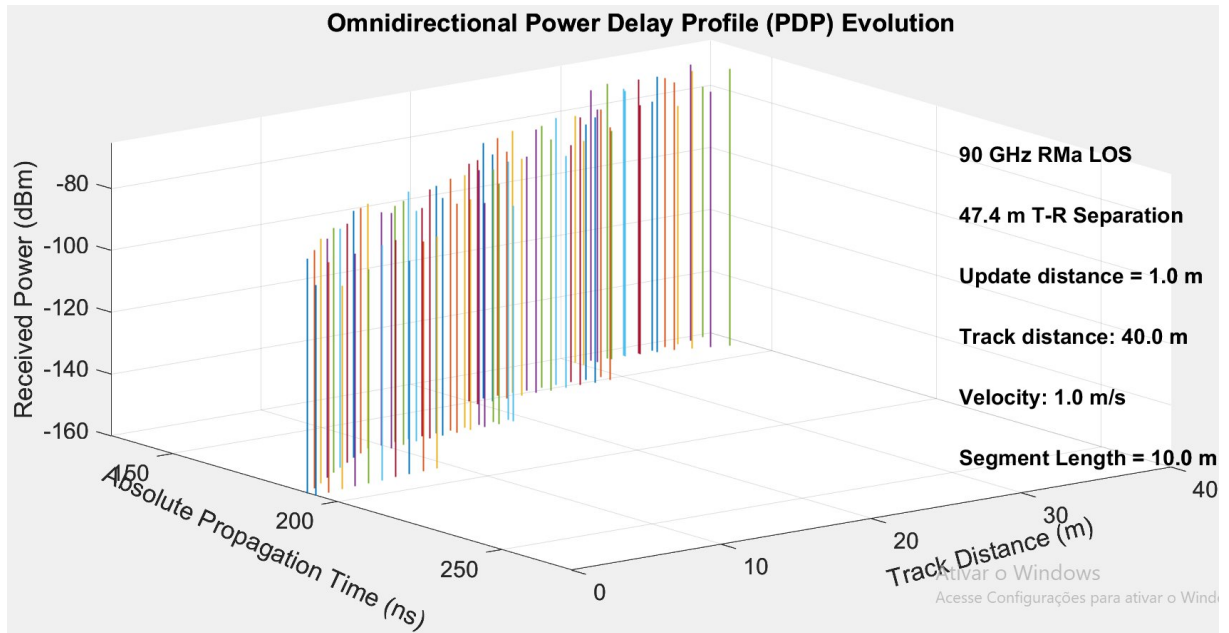


Fonte: (autor)2024

Ao analisar o gráfico gerado no simulador NYUSIM da propagação de uma rede 5G com 80GHz de frequência em uma área rural, foi observado que as barras de intensidade de sinal apresentam um crescimento conforme a distância de rastreamento aumenta, alcançando seu pico pouco antes dos 40 metros, onde uma das barras atinge um Received power(dBm) um pouco acima de -80 dBm.

Foi observado que quanto menor o absolute propagation time(ns), maiores são as barras de intensidade do sinal. Outro ponto relevante é que as barras de intensidade do sinal com o maior absolute propagation time (ns) estão concentradas em torno de 180ns e todas situadas em uma distância de rastreamento entre 0 e 10 metros. Também foi possível notar que esse padrão de intensidade de sinal é semelhante ao observado em redes com frequência de 70GHz.

Figura 17 - Sinal 5G em uma configuração omnidirecional com uma frequência de 90 GHz na zona rural



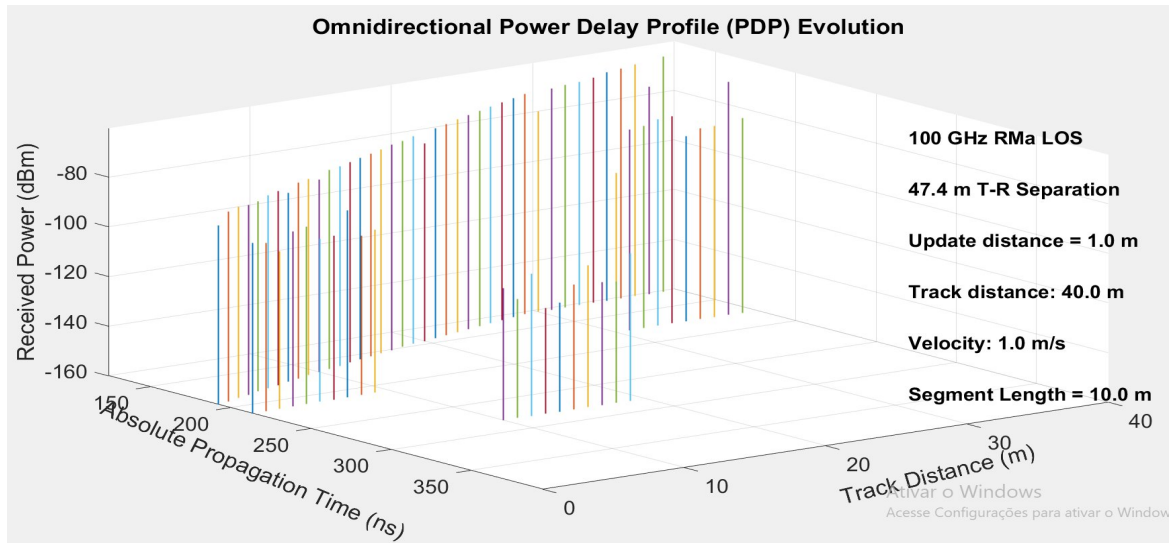
Fonte: (autor)2024

A análise do gráfico gerado no Nysim para o relatório acadêmico que simula a propagação de uma rede 5G com 90GHz de frequência em uma área rural revela algumas informações importantes. Notamos que as barras de intensidade de sinal apresentam uma tendência crescente à medida que a distância de rastreamento aumenta, atingindo o pico um pouco antes dos 40 metros, quando uma das barras atinge um Received power um pouco superior a -80 dBm.

Observamos que quanto menor o absolute propagation time, maiores são as barras de intensidade do sinal. As barras de intensidade do sinal com o maior absolute propagation time estão concentradas em torno de 180ns e todas estão dentro de uma faixa de 0 a 10 metros de distância de rastreamento, também é interessante notar que os gráficos analisados, variando de 60GHz a 90GHz, são bastante semelhantes, com algumas pequenas alterações nas barras de intensidade do sinal.

Isso sugere uma consistência na propagação do sinal em diferentes faixas de frequência na rede 5G em questão, apesar de algumas variações pontuais. Essas informações são cruciais para o entendimento e otimização da cobertura e desempenho da rede 5G em ambientes rurais.

Figura 18 - Sinal 5G em uma configuração omnidirecional com uma frequência de 100 GHz na zona rural



Fonte: (autor)2024

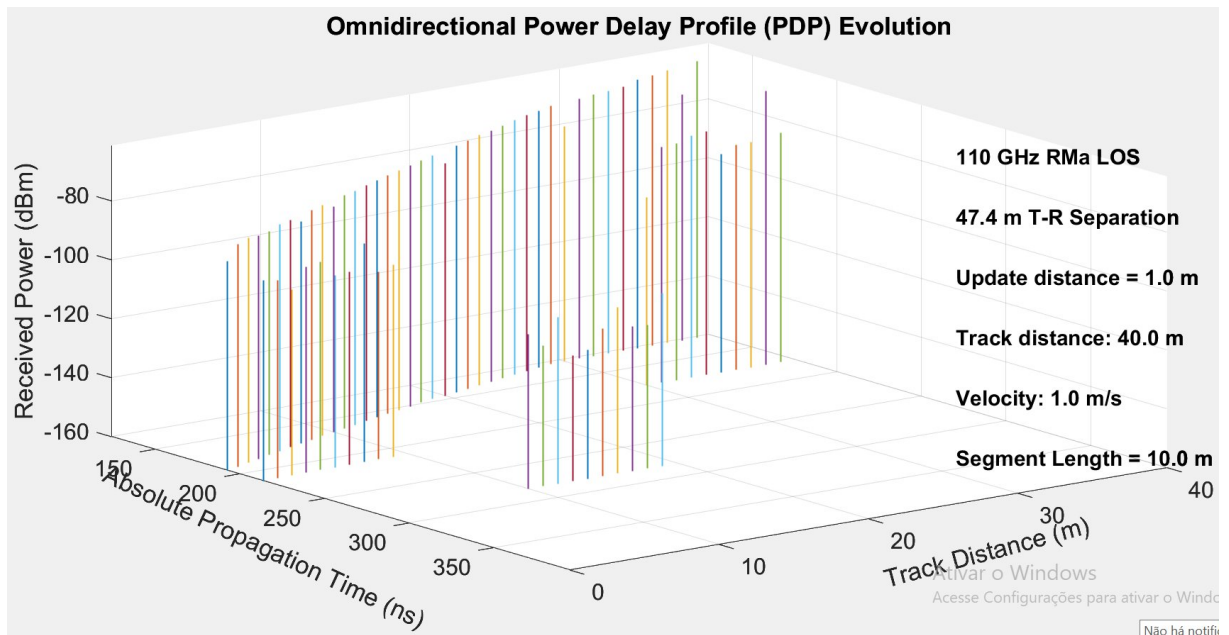
A partir da análise do gráfico gerado no Nysim para a simulação da propagação de uma rede 5G com 100GHz de faixa de frequência em uma área rural, podemos observar algumas tendências interessantes. Primeiramente, percebemos que as barras de intensidade do sinal apresentam uma crescente à medida que a distância de trajeto aumenta, atingindo o pico um pouco antes dos 40 metros, onde uma das barras de intensidade de sinal alcança um Received power(dBm) em torno de -70dBm, o que representa o maior valor de dBm registrado até o momento.

Notamos que quanto menor o absolute propagation time(ns), maior é a intensidade do sinal, indicando uma relação inversa entre o tempo de propagação e a potência recebida. É importante destacar que as barras de intensidade do sinal com os maiores absolute propagation time (ns) estão concentradas em torno de 280ns, todas localizadas em uma track distance entre 10 e 20 metros.

Essa concentração sugere uma maior instabilidade do sinal nessa faixa de distância tendo como consequência o ns superior a 250. Outro ponto relevante é a grande divergência observada neste gráfico em comparação aos demais, com a maior variação na localização das barras de intensidade do sinal e a presença de barras localizadas em torno de 280ns. Isso pode indicar uma maior complexidade na propagação do sinal nessa região específica da área rural.

Em resumo, o gráfico analisado apresenta características únicas que demonstram a propagação do sinal 5G em uma área rural com 100GHz de faixa de frequência.

Figura 19 - Sinal 5G em uma configuração omnidirecional com uma frequência de 110 GHz na zona rural



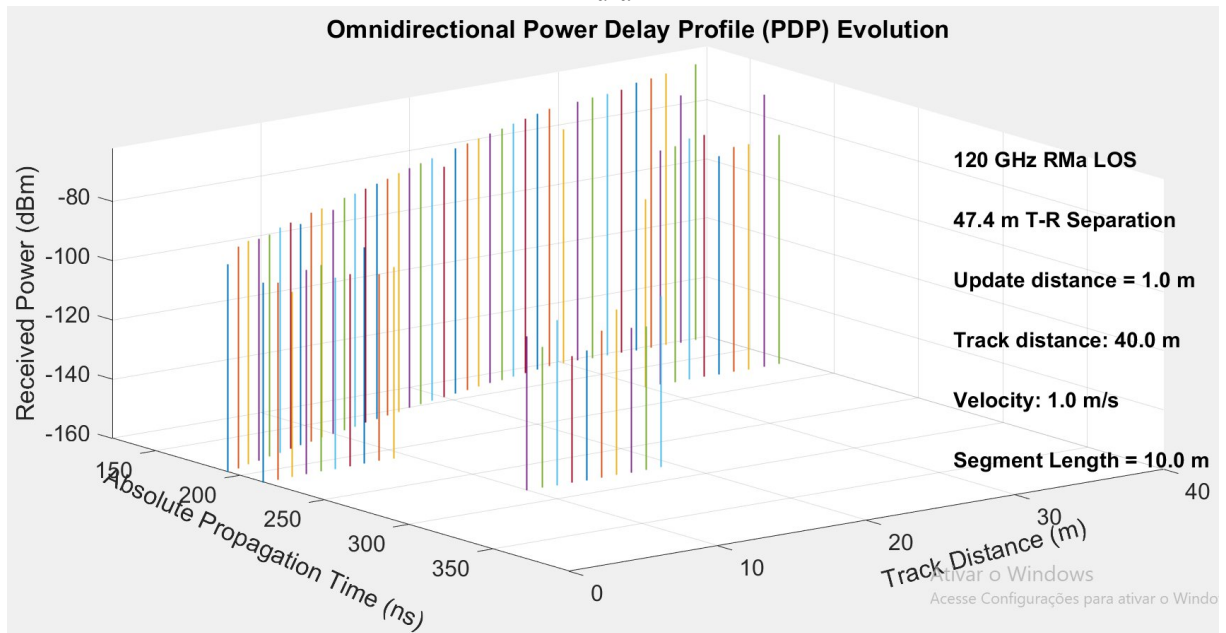
Fonte: (autor)2024

O gráfico gerado no Nysim para a simulação da propagação de uma rede 5G com 110GHz RMa los de frequência em uma área rural apresenta barras de intensidade de sinal que aumentam à medida que a distância do gráfico aumenta, atingindo o pico pouco antes dos 40 metros, quando uma das barras de intensidade de sinal atinge um Received power(dBm) um pouco acima de -80dbm.

Notamos que quanto menor o absolute propagation time(ns), maiores são as barras de intensidade do sinal, sendo as maiores barras de intensidade do sinal aquelas com menor ns. Além disso, as barras de intensidade do sinal localizadas com o maior absolute propagation time (ns) estão aproximadamente em 280 ns e estão todas em uma track distance entre 10 e 20 metros.

Analisando o gráfico sob a perspectiva do ns, as barras de intensidade do sinal entre 100 e 200ns apresentam uma queda constante no dbm, sendo as barras próximas a 100ns as com maiores dbm e as próximas de 200ns as com menores dbm. Isso sugere uma relação inversa entre o tempo de propagação absoluto e a intensidade do sinal recebido, com os ns menores correspondendo a uma maior intensidade de sinal.

Figura 20 - Sinal 5G em uma configuração omnidirecional com uma frequência de 120 GHz na zona rural



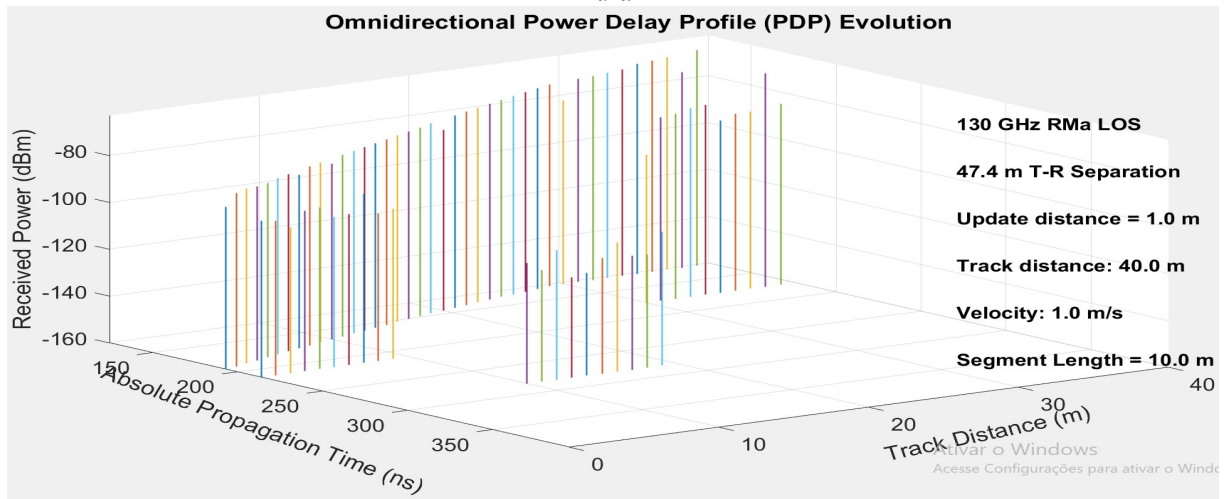
Fonte: (autor)2024

A análise do gráfico gerado no NYUSIM para a simulação da propagação de uma rede 5G com frequência de 120GHz em uma área rural revela alguns padrões interessantes. Observa-se que as barras de intensidade de sinal apresentam uma tendência crescente à medida que a distância de transmissão aumenta, atingindo seu pico um pouco antes dos 40 metros, quando uma das barras de intensidade de sinal alcança um Received Power slightly greater than -80dBm.

É possível notar que quanto menor o Absolute Propagation Time (ns), maiores são as barras de intensidade do sinal. As maiores barras de intensidade de sinal estão associadas aos menores valores de ns. É importante destacar que as barras de intensidade do sinal com o maior Absolute Propagation Time (ns) estão concentradas em torno de 280ns e todas estão localizadas em uma faixa de distância de 10 a 20 metros, outro ponto relevante é a semelhança do gráfico com a simulação anterior, utilizando a frequência de 110GHz, com poucas ou nenhuma alteração significativa.

Essa consistência sugere uma certa estabilidade na propagação do sinal considerando diferentes frequências de operação. Essas observações são fundamentais para compreender o comportamento da propagação do sinal em uma rede 5G de alta frequência em áreas rurais, permitindo melhorias no planejamento e otimização da cobertura e capacidade do sistema.

Figura 21 - Sinal 5G em uma configuração omnidirecional com uma frequência de 130 GHz na zona rural



Fonte: (autor)2024

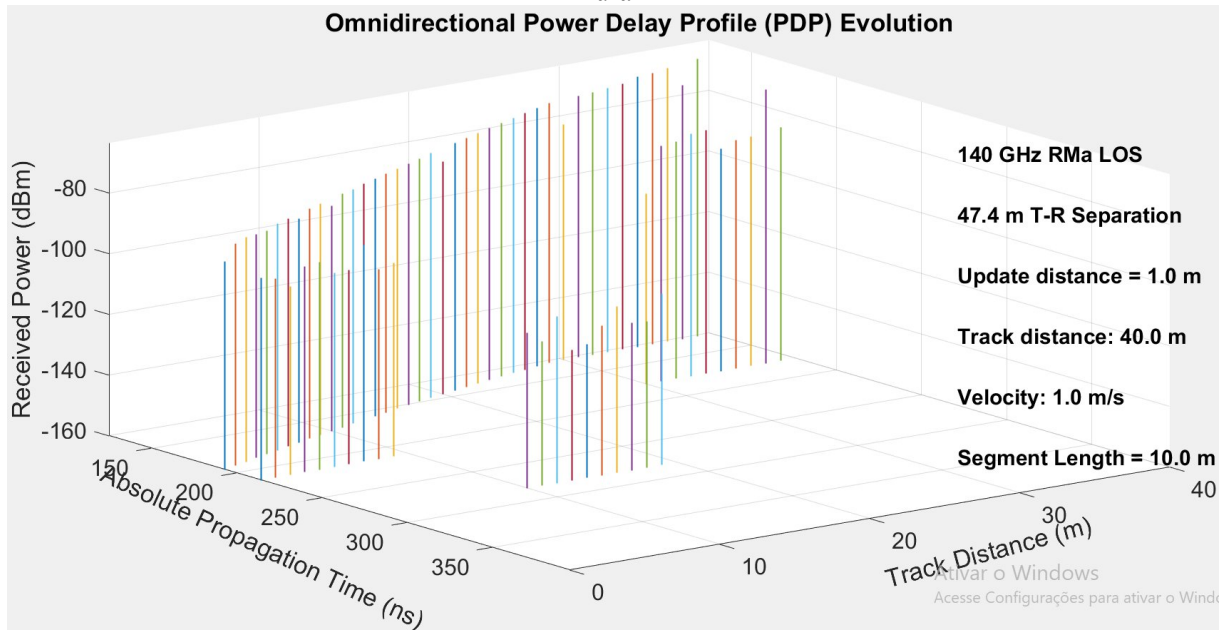
A análise do gráfico gerado no simulador NYUSIM para a propagação de uma rede 5G com frequência de 130GHz em uma área rural com track distance de 0 a 40 metros revela algumas tendências interessantes. Primeiramente, podemos observar que as barras de intensidade do sinal apresentam uma tendência crescente à medida que a track distance aumenta, atingindo o pico um pouco antes dos 40 metros, onde uma das barras alcança um Received Power um pouco acima de -80dBm.

Isso sugere que a intensidade do sinal é mais forte em distâncias maiores, o que pode ser um fator importante na configuração da rede. Além disso, é possível notar que as barras de intensidade do sinal são mais numerosas em track distances menores, indicando que a intensidade do sinal é mais forte em distâncias próximas.

Da mesma forma, as maiores barras de intensidade do sinal correspondem aos menores absolute propagation time (ns), mostrando que quanto menor o tempo de propagação, maior a intensidade do sinal. Observa-se também que as barras de intensidade do sinal com maior absolute propagation time (ns) estão concentradas em torno de 280ns e em track distances entre 10 e 20 metros.

Essa informação pode ser útil na otimização da cobertura da rede nessa faixa de distância. Por fim, vale destacar que o padrão do gráfico para frequência de 130GHz é muito semelhante ao observado para a frequência de 120GHz, indicando uma consistência no comportamento da propagação do sinal em ambas as frequências. Isso pode ser útil na tomada de decisões sobre a escolha da frequência mais adequada para a área de cobertura em questão.

Figura 22 - Sinal 5G em uma configuração omnidirecional com uma frequência de 140 GHz na zona rural



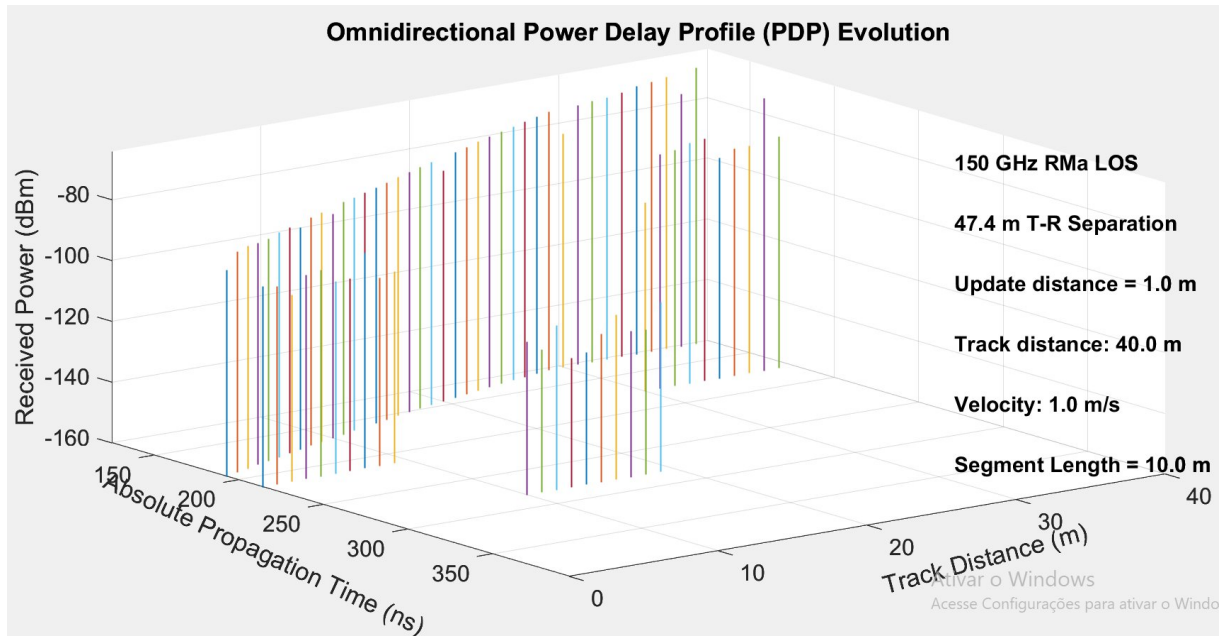
Fonte: (autor)2024

É interessante destacar que o comportamento do gráfico acima de 140GHz se assemelha ao da frequência de 130GHz, com poucas ou nenhuma alteração significativa. Isso sugere uma certa consistência na propagação do sinal em diferentes frequências, o que é um dado relevante para a análise e otimização de redes.

O gráfico gerado no nysim para a simulação da propagação de uma rede 5G com 140GHz RMa los de frequência em uma área rural revela informações importantes sobre a intensidade do sinal em relação à distância e ao tempo de propagação, observa-se que as barras de intensidade de sinal apresentam uma tendência crescente à medida que a track distance aumenta, atingindo o seu pico pouco antes dos 40 metros, quando uma das barras alcança um Received power um pouco acima de -80dbm.

Isso indica que, quanto maior a distância percorrida pelo sinal, maior a intensidade do mesmo. Além disso, é possível notar que as barras de intensidade do sinal são maiores quando o absolute propagation time é menor, sugerindo que um menor tempo de propagação resulta em um sinal mais forte. As maiores barras de intensidade de sinal estão concentradas em torno de 280ns em uma track distance de 10 a 20 metros.

Figura 23 - Sinal 5G em uma configuração omnidirecional com uma frequência de 150 GHz na zona rural



Fonte: (autor)2024

A análise do gráfico gerado no Nysim para a simulação da propagação de uma rede 5G com 150GHz de frequência em uma área rural mostra que as barras de intensidade de sinal apresentam uma crescente à medida que a distância percorrida aumenta, chegando ao pico um pouco antes dos 40 metros, quando uma das barras de intensidade de sinal atinge um Received power (dBm) ligeiramente superior a -80dBm.

É interessante observar que quanto menor o absolute propagation time (ns), maiores são as barras de intensidade do sinal. As maiores barras de intensidade de sinal estão associadas aos valores menores de ns. Destaca-se também que as barras de intensidade do sinal com o maior absolute propagation time (ns) estão localizadas em torno de 280ns, todas com uma track distance entre 10 e 20 metros.

É possível notar que o comportamento do gráfico com frequência de 140GHz é bastante semelhante ao apresentado pela frequência de 150GHz, indicando resultados consistentes e estáveis ao longo das faixas de frequência de 110GHz a 150GHz. Por outro lado, os gráficos com frequências de 50GHz e 100GHz mostraram resultados mais divergentes em relação aos demais. Essa análise evidencia a importância da frequência na propagação da rede 5G, bem como a influência da distância percorrida e do tempo de propagação no sinal recebido. Essas

informações são relevantes para o planejamento e otimização de redes de comunicação sem fio em áreas rurais.

Quadro Comparativo dos Cenários Rural e Urbano em Função dos Principais Requisitos de Rede 5G

Requisito	Cenário Urbano (UMi)	Cenário Rural (RMa)
Propagação de Sinal	Propagação limitada por obstáculos como prédios e construções, maior suscetibilidade a bloqueios.	Propagação mais aberta, com menores interferências, alcance mais extenso.
Tempo Absoluto de Propagação	Maior, devido à reflexão e obstruções frequentes.	Menor, pois há menos obstáculos, permitindo um percurso mais direto do sinal.

Intensidade de Sinal (dBm)	Intensidade de sinal semelhante ao cenário rural, sem variações significativas nas faixas de frequência testadas.	Intensidade de sinal semelhante ao cenário urbano, com comportamento de dBm consistente nas mesmas faixas de frequência.
Faixa de Frequência com Maior Custo-Benefício	90 GHz é a faixa ideal, pois acima disso (100 GHz) há uma perda de sinal acentuada.	A faixa de 90 GHz é recomendada, a partir de 100 GHz a perda é quase irrelevante. Caso seja aceitável essa perda de 90 pra 100, 150 GHz pode ser vantajoso por ampliar a intensidade do sinal.
Requisito de Infraestrutura	Alta densidade de pontos de acesso para compensar o bloqueio do sinal.	Menor densidade de pontos de acesso necessária; preferível infraestrutura com maior potência de alcance.
Desafios de Implementação	Elevada interferência e necessidade de equipamentos de alta densidade em locais estratégicos.	Cobertura ampla, mas com desafios em áreas muito remotas; sensível a condições climáticas.

Fonte: autor(2024)

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos no estudo realizado no NYUSIM comparando as frequências de 50 a 150 GHz nos cenários de microcidade (UMi) e área rural (RMa), é possível observar diferenças significativas na propagação de sinal entre os dois ambientes. A propagação de sinal em ambientes urbanos apresentou uma quantidade maior de barras de intensidade em comparação com o ambiente rural, o que indica uma cobertura de sinal mais ampla em cenários urbanos. No entanto, o tempo absoluto de propagação foi menor na área rural, resultando em maior velocidade de transmissão devido à menor quantidade de barreiras físicas.

Em ambos os cenários, a intensidade do sinal (em dBm) foi semelhante, indicando que as faixas de frequência utilizadas na simulação têm um comportamento consistente em ambientes variados. Com base na análise de desempenho, recomenda-se a faixa de frequência de 90 GHz para os cenários urbano e rural. A frequência de 90 GHz mostrou-se ideal devido ao equilíbrio entre intensidade e perdas mínimas de alcance.

Para frequências acima de 100 GHz, observou-se uma acentuada perda de sinal, especialmente em ambientes urbanos. No entanto, no cenário rural, onde as barreiras físicas são menos prevalentes, a faixa de 150 GHz pode ser considerada vantajosa se houver aceitação

para a perda de intensidade de sinal observada entre 90 GHz e 100 GHz. Essa opção pode ser explorada para alcançar uma cobertura mais ampla, especialmente em áreas que exigem menos infraestrutura de pontos de acesso.

Essas observações contribuem para o planejamento e otimização de redes de comunicação sem fio 5G em diferentes contextos e oferecem uma base para estudos futuros focados na eficiência e custo-benefício das frequências em ambientes variados.

REFERÊNCIAS

ALI, S. et al. Propagation Modeling of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) 5G Wireless Networks in Rural Mountainous Regions Using Ray Tracing. **Drones**, v. 8, n. 7, p. 334, 2024.

AL-SHUWAILI, A.; JAMEL, T. M. 5G channel characterization at millimeter-wave for Baghdad city: An NYUSIM-based approach. In: 2021 18th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD). IEEE, 2021. p. 468-473.

CUBILLOS BETANCOURT, B. Evaluación de un canal de ondas milimétricas en escenarios 5G con NYUSIM.

DIGITAL TRENDS. Digital Trends. Digital Trends, 2024. Disponível em: <https://www.digitaltrends.com>. Acesso em: 13 jun. 2024.

FCC. Federal Communications Commission. FCC, 2024. Disponível em: <https://www.fcc.gov>. Acesso em: 13 jun. 2024.

HAMMED, Z. S.; AMEEN, S. Y.; ZEEBAREE, S. R. M. Investigation of 5G Wireless Communication with Dust and Sand Storms. **J. Commun.**, v. 18, n. 1, p. 36-46, 2023.

HIARLEY, M.; JÚNIOR, J. J. Transmissão Sem Fio em Altas Frequências para rede 5G e 6G. In: Anais da XXIV Escola Regional de Alto Desempenho da Região Sul. SBC, 2024. p. 85-88.

KOUSIAS, K. et al. Coverage and performance analysis of 5G non-standalone deployments. In: Proceedings of the 16th ACM Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation & Characterization. 2022. p. 61-68.

LIFEWIRE. Lifewire. Lifewire, 2024. Disponível em: <https://www.lifewire.com>. Acesso em: 25 jul. 2024.

LIU, R. et al. Simulation and field trial results of reconfigurable intelligent surfaces in 5G networks. **IEEE Access**, v. 10, p. 122786-122795, 2022.

MINOLI, D.; OCCHIOGROSSO, B. Practical aspects for the integration of 5G networks and IoT applications in smart cities environments. **Wirel. Commun. Mob. Comput.**, v. 2019, n. 1, p. 5710834, 2019.

NSNAM. Ns-3. Nsnam, 2024. Disponível em: <https://www.apps.nsnam.org>. Acesso em: 13 jun. 2024.

NYU. Wireless Engineering. NYU, 2024. Disponível em: <https://wireless.engineering.nyu.edu>. Acesso em: 13 jun. 2024.

OLIVEIRA, L. A. N.; ALENCAR, M. S.; LOPES, W. T. A. Evolução da arquitetura de redes móveis rumo ao 5G. **Rev. Technol. Inf. Comun.**, v. 8, n. 2, p. 43-50, 2018.

QUALCOMM. Academy. Qualcomm, 2024. Disponível em: <https://academy.qualcomm.com>. Acesso em: 13 jun. 2024.

SÁNCHEZ, D. et al. MIMO simulation in 5G networks: Py5cheSim and DeepMIMO integration. In: 2023 XLIX Latin American Computer Conference (CLEI). IEEE, 2023. p. 1-7.