

Desempenho das Redes 4G e 5G Utilizando Modelos Computacionais de Propagação de Sinais

Thiago de Carvalho Rêgo
PPGEE/DET/CE
Universidade Federal Rural do Semi-
Árido - UFERSA
Mossoró/Brasil
thiago.rego@alunos.ufersa.edu.br

André Pedro Fernandes Neto
PPGEE/DECA/CE
Universidade Federal Rural do Semi-
Árido - UFERSA
Mossoró/Brasil
andrepedro@ufersa.edu.br

Humberto Dionísio de Andrade
PPGEE/DET/CE
Universidade Federal Rural do Semi-
Árido - UFERSA
Mossoró/Brasil
humbertodionisio@ufersa.edu.br

Idalmir de Souza Queiroz Júnior
PPGEE/DET/CE
Universidade Federal Rural do Semi-
Árido - UFERSA
Mossoró/Brasil
idalmir@ufersa.edu.br

Fred Sizenando Rossiter Pinheiro
DCO/CT
Universidade Federal do Rio Grande
do Norte - UFRN
Natal/Brasil
fredrossiter@uol.com.br

Gutemberg Soares da Silva
DCO/CT
Universidade Federal do Rio Grande
do Norte - UFRN
Natal/Brasil
guttembergue@gmail.com

Resumo—Este artigo compara o desempenho de redes 4G e 5G usando modelos computacionais de propagação de sinais. São analisados sete modelos que focam em métricas como perda de percurso, altura da ERB, altura do usuário e distância em diferentes cenários urbanos, suburbanos e rurais. Este trabalho utilizou o SCILAB para realizar a simulação, considerando frequência, distância, altura e ambiente. Conclui-se que o modelo COST231 é mais eficaz em ambientes urbanos e rurais, enquanto o modelo Okamura-Hata se destaca em áreas suburbanas.

Palavras-chave: 4G, 5G, Modelos de Propagação, Okamura-Hata, Perda de Percurso, Cobertura.

I. INTRODUÇÃO

A propagação de sinais de tecnologia 5G representa um desafio, mesmo com o avanço das tecnologias de comunicação. Isto se deve à sensibilidade a obstáculos e uma menor capacidade de penetração. A tecnologia 5G usa o padrão LTE que é o padrão predominante no Brasil, e opera em frequências mais elevadas que a tecnologia 4G, que opera abaixo de 6 GHz, nas faixas de ondas milimétricas (*mmWave* - *millimeter wave*) [1]. A faixa *mmWaves* se refere ao espectro de frequências entre 30 GHz e 300 GHz, com comprimento de onda na faixa de 1 a 10 mm. A *Federal Communications Commission* - FCC, redefiniu a extremidade inferior da faixa de ondas milimétricas nos EUA para começar na faixa superior da banda *Super High Frequency* – SHF (3 a 30 GHz), começando em 24 GHz, passando para a banda *Extremely High Frequency* – EHF (30 a 300 GHz) indo até 47 GHz, que atualmente é a extremidade superior do espectro alocado para 5G.

Os modelos de propagação visam presumir a intensidade do sinal recebido no receptor [2]. Foram utilizados 7 modelos determinísticos neste trabalho: 3GPP (*Third Generation Partnership Project* GBSCM), NYUSIM, METIS (*Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twentyInformation Society*), ITU_P1411 (*International Telecommunication Union*), Okamura – Hata e COST231 (*Cooperation in Science and Technology*).

Este artigo utiliza técnicas computacionais de propagação de sinal para efetuar uma comparação das tecnologias de quarta e quinta geração em vários cenários, trabalhando nas frequências de 700, 850, 1800, 2100 e 3500 MHz, para realizar uma análise de cada geração, comparando os modelos de propagação e analisando qual deles melhor se comporta diante dos obstáculos.

II. MODELOS ESTUDADOS

A. Modelo de 3GPP

Este modelo foi criado por uma parceria de sete organizações mundiais de desenvolvimento de padrões de telecomunicações, constituídas por ARIB (*Association of Radio Industries and Companies*) no Japão, a ATIS (*Alliance for Telecommunications Industry Solutions*) na América do Norte, a CCSA (*China Communications Standards Association*), o ETSI (*European Telecommunication Standards Institute*), a TSDSI (*Telecommunications Standards Development Society, India*), a TTA (*Telecommunication Technology Association*) da Coreia do Sul e a TCC (*Toronto Transit Commission*) no Canadá [3]. Vale ressaltar que este modelo utilizado é focado em ambiente outdoor, considerando fatores que definem o tipo de ambiente estudado como em (1).

$$PL = 28.0 + 22 \cdot \log_{10}(d) + 20 \cdot \log_{10}(f/1e9) + C \quad (1)$$

C = 0 para zona urbana

C = -5 para zona suburbana

C = -10 para zona rural

B. Modelo NYUSIM

Possui característica de largura de banda de até 1 GHz, utilizando de cluster de tempo e espaço separados para identificar atraso e direção de múltiplos caminhos este modelo é capaz simular a correlação espacial do movimento do receptor (Rx) na área local, trabalhando em um range de 0.5 a 150 GHz, em (2) é possível ser aplicado em cenários *indoor* ou *outdoor* [4].

$$PL_{LOS} = 32.4 + 20 \cdot \log_{10}(f/1e9) + 20 \cdot \log_{10}(d) \quad (2)$$

$\Delta = 2$. perda adicional para NLOS

$PL = PL_{LOS} + \Delta$

C. Modelo METIS

Caracteriza-se pela sua ampla faixa de frequência, elevada largura de banda, modelagem de polarização 3D de alta precisão. Pode entregar diversas metodologias de modelo de canal, bem como, modelos estocásticos ou híbridos, trabalha em um intervalo de 2 a 60 GHz mostrado na equação (3), possui limitações quando aplicado em ambiente *indoor* [4].

$$PL = 22.7 * \log_{10}(d) + 27.0 + 20 * \log_{10}(f/1e9) \quad (3)$$

D. Modelo ITU_P1411

Este é um modelo para sistemas de comunicação de rádio outdoor de curto alcance [5]. Seu uso é limitado a um alcance de 5 quilômetros e é recomendado não o usar em distâncias maiores que um quilômetro. Para caminhos com menos de 1 quilômetro de comprimento, as perdas de propagação são devidas principalmente a edifícios e vegetação, e não a variações na elevação do solo. Além disso, a maioria das ligações de curto alcance tende a ocorrer em áreas urbanas e suburbanas, onde o terminal está nas mãos de um pedestre ou localizado em um veículo. Sua equação reduzida é apresentada em (4).

$$PL = 20 * \log_{10}(d) + 20 * \log_{10}(f/1e9) + 32.4 \quad (4)$$

E. Okamura – Hata

Este modelo é um dos mais utilizados e vários outros modelos se baseiam pelos seus resultados [6]. Sua maior característica é considerar que não existem bloqueios dominantes entre transmissor e receptor afirmando que as características do terreno variam pausadamente, caracterizando ambientes *outdoor*. Sua equação é dada em (5).

$$PL = 69.55 + 26.16 * \log_{10}(f/1e6) - 13.82 * \log_{10}(hb) - a_{hm} + (44.9 - 6.55 * \log_{10}(hb)) * \log_{10}(d/1e3) - C \quad (5)$$

C = 0 para urbano;

C = 2 * (log₁₀(f/28))² - 5.4 para suburbano;

C = 4.78 * (log₁₀(f))² + 18.33 * log₁₀(f) - 40.94 para rural.

$$a_{hm} = (1.1 * \log_{10}(f/1e6) - 0.7) * hm - (1.56 * \log_{10}(f/1e6) - 0.8) \text{ para o fator de correção}$$

F. Modelo COST231

Foi desenvolvido como uma ampliação do modelo anterior, para atender as faixas de frequências de 500 MHz a 2000 MHz. Possui ajustes para os tipos de ambientes: urbanos, suburbanos e rurais. Carrega na sua estrutura computacional, simplicidade e disponibilidade de fatores de correção, tornando-o muito utilizado para previsão de perda de percurso em ambientes *outdoor* [7]. A equação que define o modelo é apresentada em (6).

$$L0 = 32.4 + 20 * \log_{10}(f/1e9) + 20 * \log_{10}(d/1e3) \quad (6)$$

$$Lrts = -16.9 - 10 * \log_{10}(20) + 10 * \log_{10}(f/1e6) + 20 * \log_{10}(hb - hm)$$

$$Lmsd = 0$$

$$PL = L0 + Lrts + Lmsd$$

G. Modelo Ray Tracing

O método de *Ray Tracing* ou traçado de raios é baseado na óptica de raios que resolve as equações de Maxwell em regime de alta frequência. Portanto, o método de traçado de raios é uma ferramenta geral de modelagem de propagação que fornece estimativas de perda de caminho, ângulo de chegada/saída e atrasos de tempo. Ao contrário dos modelos teóricos e empíricos, o método de traçado de raios não fornece fórmulas simples para o cálculo da perda de caminho, por este motivo, requer mais informações do ambiente, enriquecendo

a carga de detalhes sendo possível uma modelagem 3D ideal para situações indoor [8]. Este modelo é definido pela equação (7).

$$PL = 20 * \log_{10}(d) + 20 * \log_{10}(f/1e9) + 32.4 + 10 * \text{ruído} \quad (7)$$

Para uma maior compreensão e comparação dos modelos estudados, a Tabela 1 apresenta as principais características dos modelos abordados e o nível de complexidade de implementação.

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS DE PROPAGAÇÃO

Modelo	Complexidade de Implementação	Comentário
3GPP	Média a Alta	Modelagem padronizada, mas requer ajuste de parâmetros de cenário.
NYUSIM	Alta	Baseado em simulações detalhadas; exige muitos parâmetros estatísticos.
METIS	Alta	Requer informações detalhadas do ambiente (urbano, rural etc.).
ITU P.1411	Média	Fórmulas simples para cenários típicos; pouca parametrização
OKAMURA-HATA	Baixa	Muito simples; poucos parâmetros necessários
COST231	Baixa a Média	Exige detalhes sobre obstáculos e ambiente urbano (altura dos edifícios, largura de ruas)
RAY Tracing	Muito Alta	Necessita de um modelo 3D completo do ambiente e alto poder computacional

III. METODOLOGIA

Para a realização do estudo dos métodos, foi definido os cenários em termos de propagação, como sendo urbano, suburbano e rural, pois, levou-se em consideração todas as regiões alvo que devem ser atendidas pelo sinal. Foram selecionados oito modelos para execução da simulação: 3GPP, NYUSIM, METIS, ITU-R P.1411, Okamura-Hata, COST 231, *Ray Tracing*. Deste modo, foram definidos os parâmetros apresentados na Tabela 2.

TABELA 2. PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO

Parâmetros	Valor	
Tecnologia	4G	5G
Frequência (MHz)	700, 850, 1800, 2100	3500

Distância (m)	10 até 1000	10 até 1000
Altura da estação base (m)	30	30
Altura do usuário (m)	1,5	1,5
Ambiente	urbano, suburbano e rural	urbano, suburbano e rural

Definido os parâmetros, foi elaborado um algoritmo no *software* SCILAB com a finalidade de simular e comparar os modelos de propagação de sinais para redes 4G e 5G, para cada frequência foi executado três simulações diferentes, alterando os tipos de ambiente para que o código entregasse os gráficos que comparam as curvas de perda de percurso e por fim, comparação das curvas avaliando os métodos que melhor se comportam em cada cenário. Portanto, a Fig. 1 ilustra o fluxograma do algoritmo.

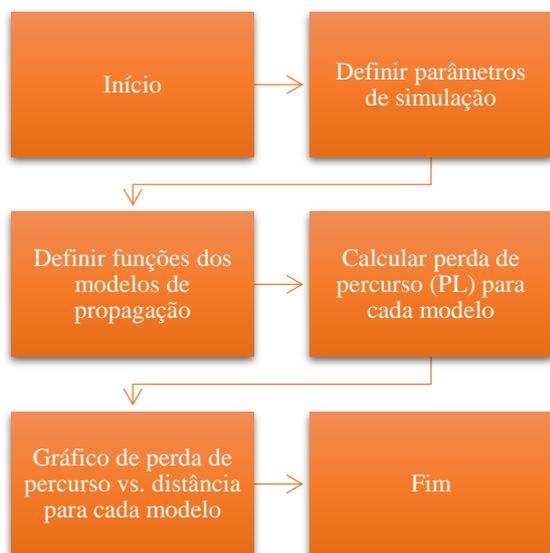


Fig. 1. Fluxograma do algoritmo

IV. RESULTADOS OBTIDOS

Através da simulação computacional, e considerando valores de distância entre transmissor e receptor, pôde-se identificar quais modelos de propagação melhor se comportam levando em consideração o ambiente e a tecnologia utilizada. Nas Fig. 2 e 4, em um ambiente urbano, o modelo COST231 entregou uma menor perda de propagação, enquanto a Fig. 3 apresentou uma menor perda de propagação no modelo Okamura-Hata.

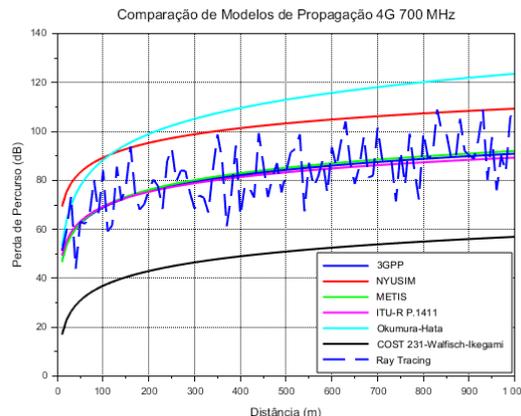


Fig. 2. Gráfico para 4G urbano à 700 MHz

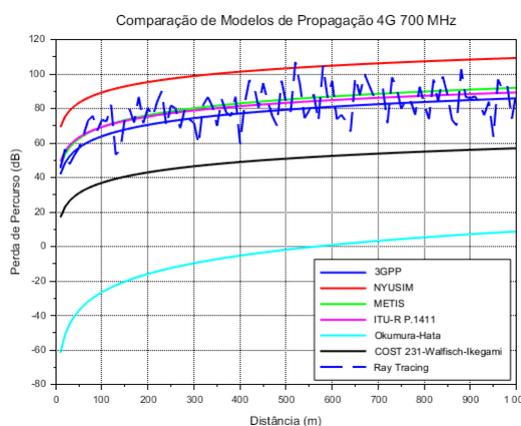


Fig. 3. Gráfico para 4G suburbano 700 MHz.

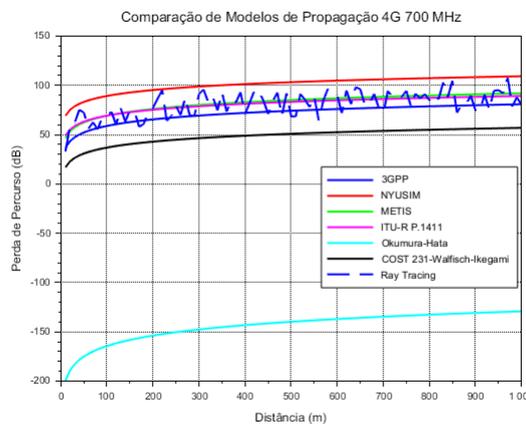


Fig. 4. Gráfico para 4G rural 700 MHz

Para a simulação na frequência de 850 MHz, as Fig. 5 e 7 apresentaram no gráfico uma menor atenuação nos modelos COST 231, contudo, na Fig. 6, o modelo Okamura-Hata obteve um melhor desempenho.

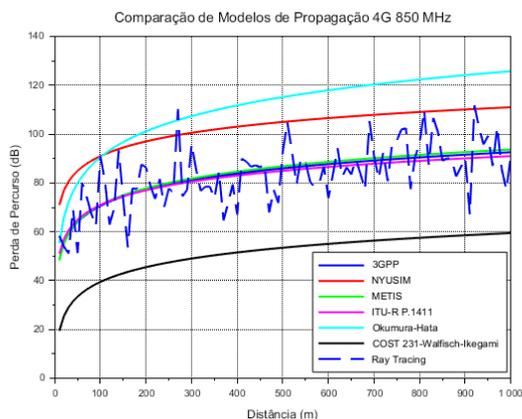


Fig. 5. Gráfico para 4G urbano 850 MHz

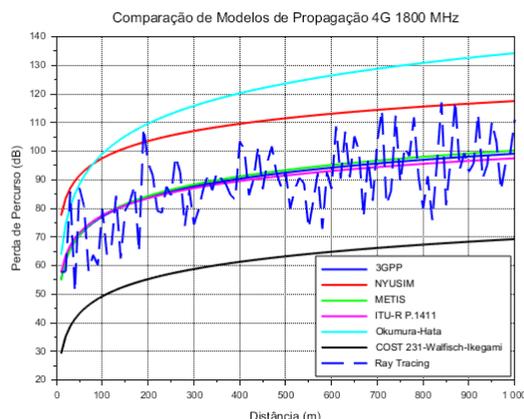


Fig. 8. Gráfico para 4G urbano 1800 MHz.

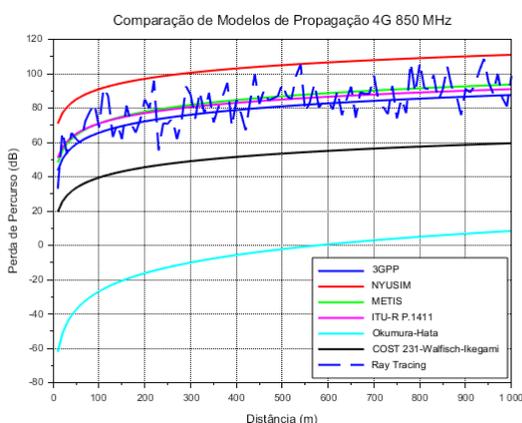


Fig. 6. Gráfico para 4G suburbano 850 MHz.

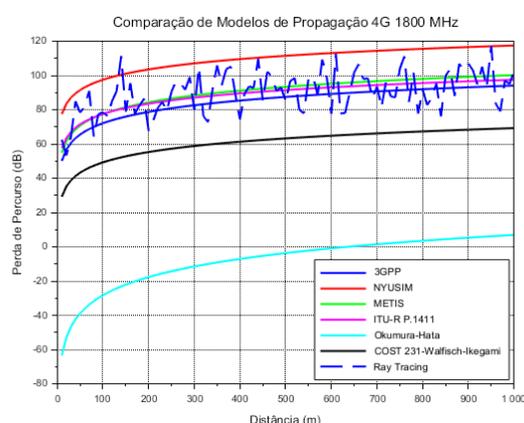


Fig. 9. Gráfico para 4G suburbano 1800 MHz.

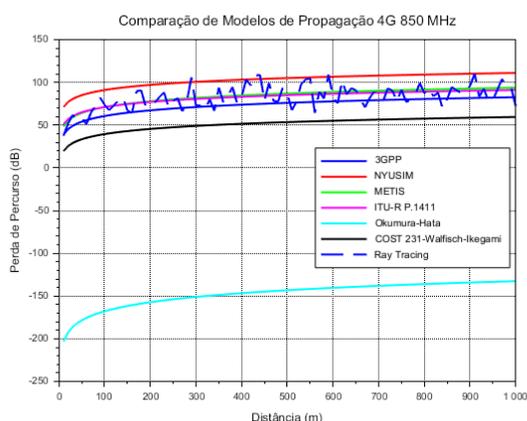


Fig. 7. Gráfico para 4G rural 850 MHz.

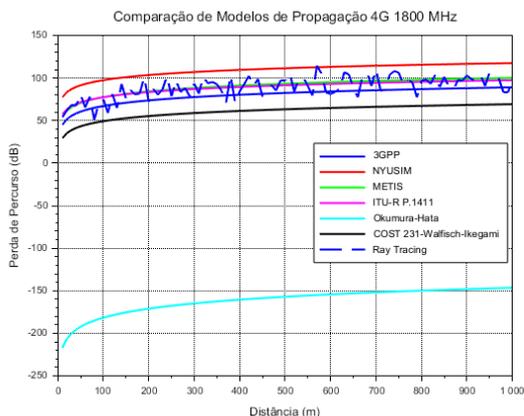


Fig. 10. Gráfico para 4G rural 1800 MHz.

Os resultados das Fig. 8 e 10 mostram que o modelo de COST231 se sobressai diante dos outros modelos, em contrapartida, na Fig. 9 o melhor modelo é o de Okamura-Hata.

Foi observado que, à medida que as frequências aumentam, no estudo da tecnologia 4G utilizando uma frequência de 2100 MHz, os gráficos das Fig. 11 e 13 demonstram que o modelo COST 231 apresenta a menor atenuação. Por outro lado, na Fig. 12, o modelo Okumura-Hata é o que exhibe a menor perda de sinal.

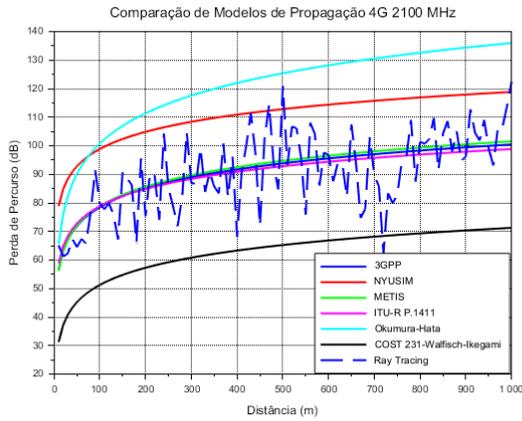


Fig. 11. Gráfico para 4G urbano 2100 MHz.

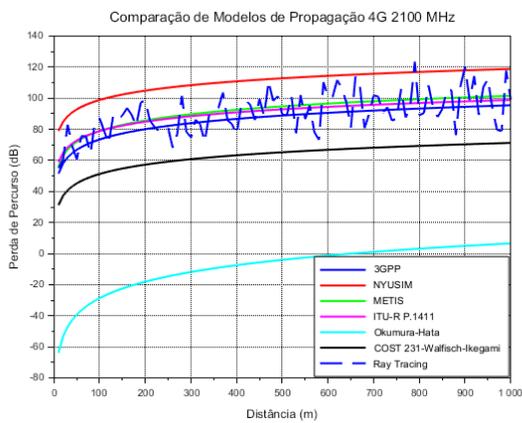


Fig. 12. Gráfico para 4G suburbano 2100 MHz.

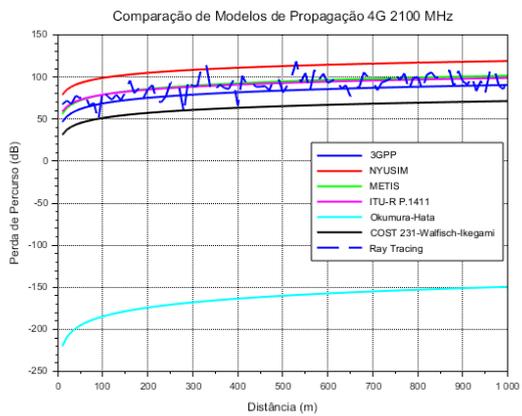


Fig. 13. Gráfico para 4G rural 2100 MHz.

Mudando toda a configuração, onde os testes foram realizados para um novo modelo de telefonia móvel, embora ainda compartilhe do mesmo núcleo de rede, o 5G oferece velocidade aproximadamente 40% maior que a tecnologia 4G. É possível observar um comportamento muito parecido com as frequências anteriores, de forma que, as Fig. 14 e 16, entregam o modelo COST231 como a melhor opção. Deste

modo, para uma zona suburbana, o modelo Okumura-Hata será a melhor opção, assim mostra a Fig. 15.

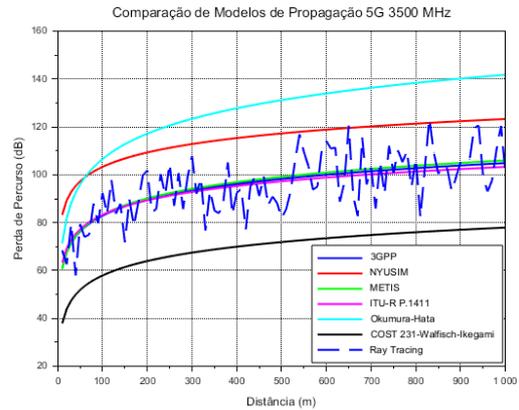


Fig. 14. 5G urbano 3500 MHz.

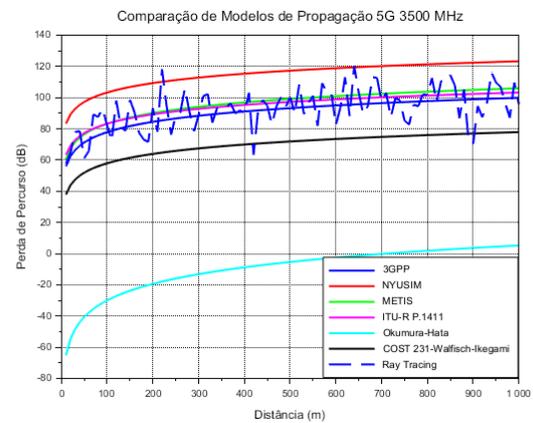


Fig. 15. Gráfico para 5G suburbano 3500 MHz.

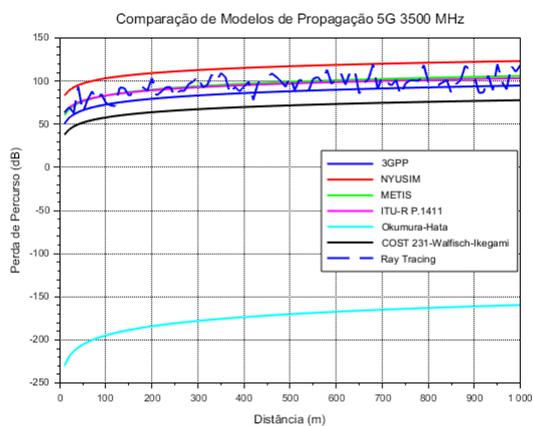


Fig. 16. Gráfico para 5G rural 3500 MHz.

A Fig. 17 evidencia que as curvas referentes à tecnologia 5G apresentam uma perda de percurso mais acentuada em distâncias maiores, em decorrência da utilização de frequências mais elevadas. Em contrapartida, as curvas associadas à tecnologia 4G demonstram uma perda de percurso reduzida, refletindo o maior alcance proporcionado pelas frequências mais baixas. Essa análise foi realizada em

um contexto geral, sem a consideração de fatores específicos do ambiente de propagação, como obstáculos, relevo ou condições atmosféricas.

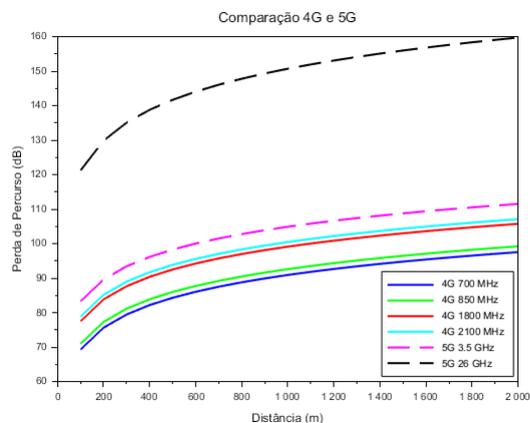


Fig. 17. Gráfico comparativo geral para 4G e 5G.

V. CONCLUSÃO

Verificou-se que, para cada tipo de ambiente, é possível empregar modelos de propagação que incorporam variáveis específicas que influenciam diretamente na atenuação do sinal, tais como características do terreno, obstáculos e condições de propagação. Em todas as simulações realizadas, observou-se que o modelo *Ray Tracing* apresentou uma sensibilidade significativa aos ruídos ao longo do percurso de propagação. Esse comportamento é atribuído à natureza do modelo, que considera múltiplos percursos entre o transmissor e o receptor, incluindo efeitos como linha de visada direta (LOS), reflexões, difrações e espalhamento.

Para simular condições críticas e realistas, os valores utilizados no código foram gerados de forma aleatória, permitindo uma avaliação robusta do desempenho do modelo em cenários complexos e variados. Esta abordagem possibilitou uma análise comparativa mais precisa entre os modelos, destacando suas particularidades e limitações em diferentes contextos de propagação.

Para trabalhos futuros, é possível considerar dados reais para diversos tipos de ambientes, através de captura de potência de sinal das operadoras existentes no município e posteriormente aplicando os métodos de propagação considerando ambientes *indoor* e *outdoor*. Vale ressaltar que os modelos estudados em sua grande maioria focam em ambientes *outdoor*, por este motivo, aqueles que se destacam em ambientes *indoor*, precisam de algumas adaptações para uma análise mais confiável.

Em resumo, a pesquisa abre possibilidades para novos estudos considerando ambientes e dados reais através de campanha de medição para uma abordagem mais ampla, contribuindo para uma análise da qualidade do sinal disponibilizado pelas operadoras de celular, bem como a previsão de sinal em regiões distantes dos transmissores.

REFERÊNCIAS

[1] Y. D. J. A. C. Sousa *et al.*, “Planejamento de Cobertura de Redes 5G utilizando Inteligência Artificial através de Software de Geolocalização, RNA e Bayesianas”, em *Anais do XLII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais*, Sociedade

Brasileira de Telecomunicações, 2024. doi: 10.14209/sbrt.2024.1571028540.

- [2] S. D. de Lima, *Análise e simulação dos aspectos de transmissão de sinais 5g em macro células em ambientes urbanos*, Patos de Minas - MG., 2023. Acesso em: 10 de fevereiro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://encurtador.com.br/ajFPS>
- [3] D. Liao, *Implementação de QoS em rede 5G através do Network Slicing*, Universidade Federal de Santa Catarina., 2023. [Online]. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/248721>
- [4] H. Poddar, S. Ju, D. Shakya, e T. S. Rappaport, “A Tutorial on NYUSIM: Sub-Terahertz and Millimeter-Wave Channel Simulator for 5G, 6G, and Beyond”, *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 26, n° 2, p. 824–857, 2024, doi: 10.1109/COMST.2023.3344671.
- [5] International Telecommunication Union (ITU), *Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz*, 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1411>
- [6] A. F. Molisch, *Wireless communications*, 2nd ed. Chichester, West Sussex, U.K.: Wiley: IEEE, 2011. [Online]. Disponível em: <https://researchpapers4scolars.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/06/andreas-f-molisch-wireless-comm.pdf>
- [7] E. Jorge Júnior, “Utilização de inteligência computacional no aprimoramento dos modelos de propagação perda no espaço livre, Okumura-Hata, COST 231, ECC-33, Egl e a recomendação ITU-P.1546”, Universidade Federal de Uberlândia, 2024. doi: 10.14393/ufu.te.2024.791.
- [8] Z. Yun e M. F. Iskander, “Ray Tracing for Radio Propagation Modeling: Principles and Applications”, *IEEE Access*, vol. 3, p. 1089–1100, 2015, doi: 10.1109/ACCESS.2015.2453991.