

## AVALIAÇÃO DE MODELOS DE PERDA DE PERCURSO PARA FREQUÊNCIAS 5G: APLICAÇÃO NO CONTEXTO URBANO DE SANTARÉM - PA

ASSESSMENT OF PATH LOSS MODELS FOR 5G FREQUENCIES IN THE URBAN  
SCENARIO OF SANTARÉM, BRAZIL

EVALUACIÓN DE MODELOS DE PÉRDIDA DE TRAYECTORIA PARA FRECUENCIAS 5G:  
APLICACIÓN EN EL CONTEXTO URBANO DE SANTARÉM - PA

Isaías Amaral Repolho<sup>1</sup>

Paula Renatha Nunes da Silva<sup>2</sup>

**RESUMO:** A estimativa precisa da perda de percurso (Path Loss - PL) é essencial para estimar a cobertura do transmissor e otimizar o desempenho de redes sem fio, especialmente em áreas urbanas e subúrbias de grandes cidades. O presente artigo apresenta uma análise comparativa entre os modelos de perda de percurso FSPL (Free Space Path Loss) e COST 231 Walfisch-Ikegami, com foco em aplicações no ambiente urbano de Santarém, Pará, considerando as principais faixas de frequência para redes 5G no Brasil (3,5 GHz, 26 GHz e 66 GHz). A pesquisa destaca a importância da modelagem precisa da perda de percurso para garantir a eficiência, cobertura e confiabilidade das redes de comunicação sem fio, sobretudo diante do aumento da demanda por conectividade de alta velocidade. Utilizando simulações em MATLAB, os autores observaram que o modelo FSPL apresenta comportamento mais estável em frequências elevadas, enquanto o modelo COST 231 W-I apresenta limitações fora de sua faixa original de validação. Os resultados evidenciam a necessidade de adoção de modelos adequados ao contexto de implantação das redes, sobretudo nas faixas de ondas milimétricas, que exigem maior densidade de antenas para compensar as perdas. O estudo reforça a importância do uso de modelos avançados, como o ray tracing, no planejamento de futuras redes de comunicação.

1317

**Palavras-chave:** 5G. Modelagem. ondas Milimétricas. Perda de percurso. Redes sem fio.

**ABSTRACT:** Accurate estimation of path loss (PL) is essential for predicting transmitter coverage and optimizing the performance of wireless networks, especially in urban and suburban areas of large cities. This paper presents a comparative analysis between the FSPL (Free Space Path Loss) and COST 231 Walfisch-Ikegami path loss models, focusing on applications in the urban environment of Santarém, Pará, considering the main frequency bands allocated for 5G networks in Brazil (3.5 GHz, 26 GHz, and 66 GHz). The research highlights the importance of accurate path loss modeling to ensure efficiency, coverage, and reliability of wireless communication networks, particularly in the face of increasing demand for high-speed connectivity. Using MATLAB simulations, the authors observed that the FSPL model shows more stable behavior at higher frequencies, whereas the COST 231 W-I model presents limitations beyond its original validation range. The results emphasize the need to adopt models appropriate to the network deployment context, especially in the millimeter-wave bands, which require higher antenna density to compensate for signal losses. The study reinforces the importance of employing advanced models, such as ray tracing, in the planning of future communication networks.

**Keywords:** 5G. Loss path. Milimetrics waves. Wireless networks.

<sup>1</sup>Discente do curso de Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Oeste do Pará - UFOPA.

<sup>2</sup>Professora, orientadora. Universidade Federal do Oeste do Pará - UFOPA.

Doutora em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Oeste do Pará - UFPA.

**RESUMEN:** La estimación precisa de la pérdida de trayectoria (Path Loss - PL) es esencial para predecir la cobertura del transmisor y optimizar el rendimiento de las redes inalámbricas, especialmente en zonas urbanas y suburbanas de grandes ciudades. El presente artículo presenta un análisis comparativo entre los modelos de pérdida de trayectoria FSPL (Free Space Path Loss) y COST 231 Walfisch-Ikegami, con enfoque en aplicaciones en el entorno urbano de Santarém, Pará, considerando las principales bandas de frecuencia destinadas a las redes 5G en Brasil (3,5 GHz, 26 GHz y 66 GHz). La investigación destaca la importancia de una modelización precisa de la pérdida de trayectoria para garantizar la eficiencia, cobertura y confiabilidad de las redes de comunicación inalámbricas, especialmente ante el aumento de la demanda de conectividad de alta velocidad. Mediante simulaciones realizadas en MATLAB, los autores observaron que el modelo FSPL presenta un comportamiento más estable en frecuencias elevadas, mientras que el modelo COST 231 W-I presenta limitaciones fuera de su rango original de validación. Los resultados evidencian la necesidad de adoptar modelos adecuados al contexto de implementación de las redes, en especial en las bandas de ondas milimétricas, que exigen una mayor densidad de antenas para compensar las pérdidas. El estudio refuerza la importancia del uso de modelos avanzados, como el ray tracing, en la planificación de las redes de comunicación del futuro.

**Palabras clave:** 5G. Modelado. Ondas milimétricas. Pérdida de trayectoria. Redes inalámbricas.

## INTRODUÇÃO

O desenvolvimento progressivo de redes de comunicação em 5G é fundamental para alavancar a próxima revolução tecnológica, que impacta diretamente na transformação industrial em termos de digitalização e no desenvolvimento de comunicações mais avançadas. Fatores como eficiência, baixa latência de comunicação, disponibilidade e confiança são de extrema importância em um mundo cada vez mais conectado (OLIVEIRA, 2021), tornando assim os serviços mais confiáveis.

Enquanto as gerações anteriores (2G, 3G e 4G) focaram primariamente em aprimorar a comunicação e o acesso móvel à internet, o 5G foi concebido com um propósito de servir como a infraestrutura de conectividade para a 4<sup>a</sup> revolução industrial. O seu maior diferencial não se reduz apenas à capacidade de realizar downloads mais rápidos, mas na habilidade de criar ecossistemas inteiramente novos de dispositivos, serviços e modelos de negócios (BAILEY, 2023).

A comunicação 5G, para ser confiável, deve ter como aspecto crucial garantido a modelagem precisa da perda de percurso, que impacta diretamente na cobertura do sinal, na interferência e a eficiência geral da rede, em virtude do crescente cenário de crescimento da conectividade rápida. Portanto, a análise destas perdas entre transmissores e receptores é de grande importância.

Em comunicações *wireless* é a Perda de Percurso que descreve a atenuação ou perda que uma onda (ou sinal eletromagnético) sofre ao se propagar do transmissor até o receptor, ou seja, é caracterizada por um decaimento lento comparado a sinais em pequena escala (LEITE, 2021), levando o sinal a ter uma potência recebida inferior a potência transmitida. Além disso, existem outros fatores que irão causar alguma modificação na propagação do sinal, como a reflexão, difração, espalhamento e efeito Doppler, incluindo os ganhos das antenas, a frequência de operação, a potência transmitida e a distância entre o transmissor e o receptor (SHAIBU *et al.*, 2023). Felizmente, os comprimentos de onda curtos dos sinais em ondas milimétricas permitem a integração de vários elementos de antena em uma área reduzida, resultando em melhorias significativas no processamento espacial que, em princípio, podem ao menos compensar a perda isotrópica de percurso associada

A Perda de Percurso depende da taxa de potência transmitida em relação à recebida, expressa em decibéis conforme a equação (1) (ABHAYA WARDHANA *et al.*, 2005).

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right), \quad (1)$$

Onde  $d$  é a distância entre transmissor e receptor.

$d_0$  é o ponto de referência e;

$n$  é o expoente de Perda.

1319

Para a predição da perda de percurso em ambientes específicos, são empregados modelos de propagação. Tais modelos são formulações matemáticas que consideram um conjunto de parâmetros essenciais, como a frequência de operação, a potência de transmissão e a altura das antenas transmissora e receptora. Além disso, deve-se usar a estimativa para planejar o atendimento da demanda reprimida por conectividade sem fio em áreas remotas, rurais e de baixa densidade demográfica, reforçando a necessidade de uma infraestrutura de telecomunicações.

O planejamento deve convergir com Plano de Uso do Espectro de Radiofrequências no Brasil, visto que desde novembro de 2021, com a realização do Leilão do 5G, há a possibilidade de diversas empresas de telefonia móvel do país poderem usar as faixas de frequência de 700 MHz, 2,3 GHz, 3,5 GHz e 26 GHz. O manual de gestão do Espectro da UIT (União Internacional de Telecomunicações) e o ICT toolkit foram a base para o planejamento do uso do espectro de radiofrequências no Brasil, motivado pela utilização eficiente e acesso equitativo a essas redes no âmbito internacional. Além das faixas vendidas em 2021, o Plano de Uso do

Espectro de Radiofrequências no Brasil prevê, a partir de 2025, estudos para implementação de faixas de ondas milimétricas de 37 GHz, 45 GHz, 47 GHz e 66 GHz, já que essas faixas de frequência são fundamentais para aplicações que exigem altíssima velocidade.

O objetivo do presente trabalho é apresentar a comparação entre o modelo FSPL e o modelo COST-231 na área urbana de Santarém, no Estado do Pará. Para tanto, realizou-se o estudo dos principais modelos de Perda de Percurso para estimar a atenuação em diferentes faixas de frequência. As simulações apresentadas foram realizadas em Matlab, com ênfase nas faixas do Plano de Uso do Espectro da Anatel para a tecnologia 5G e para estudos de futuras gerações de comunicação sem fio. A faixa de 3,5 GHz é a principal frequência para a cobertura ampla do 5G no Brasil. A faixa de 26 GHz (ondas milimétricas) é crucial para oferecer altíssimas taxas de transmissão e baixa latência em áreas de grande concentração de usuários. Por fim, a faixa de 66 GHz, inserida na banda de ondas milimétricas (*mmWave*) entre 60 e 70 GHz, representa uma fronteira para as futuras comunicações, sendo estudada para aplicações de altíssima capacidade e comunicações de curto alcance.

Todo o trabalho é baseado em pesquisas em artigos, livros, sites, softwares e trabalhos de conclusão de curso, com o objetivo de fornecer um conteúdo rico em informações sobre o assunto. Os tópicos que sucedem esta introdução, descrevem a fundamentação teórica, bem como a apresentação dos resultados dos modelos empregados.

1320

Vale ressaltar que devido a necessidade clara de instalar novas torres, mastros e plataformas de suporte em edificações para expandir a cobertura geográfica do 5G, e aumentar a capacidade das redes atualmente em operação, torna-se evidente a importância de estudos acerca das perdas de percurso em determinadas frequências está alinhada à estratégia da Anatel, reconhecendo a importância da utilização de modelos de propagação precisos e adequados para as faixas utilizadas no país, garantindo maior precisão e confiabilidade no planejamento de implementação de serviços em 5G.

## REFERENCIAL TEÓRICO

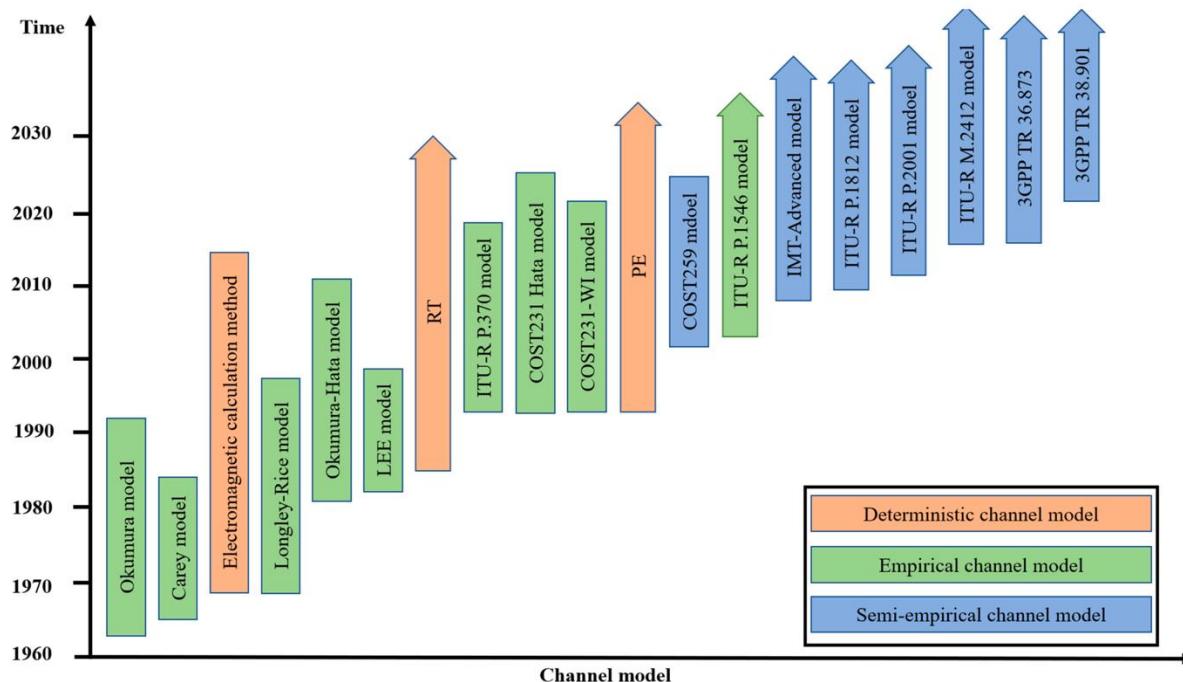
A pesquisa e o desenvolvimento na propagação de ondas de rádio têm grande relevância nos sistemas de comunicação. Como a intensidade do sinal diminui à medida que a distância entre o transmissor e o receptor aumenta, que somados aos mecanismos de propagação das ondas eletromagnéticas (reflexão, difração e espalhamento) tornam o ambiente de propagação bastante complexo.

A perda de percurso é usada para descrever a atenuação de uma onda eletromagnética à medida que ela se propaga pelo espaço. Um modelo preciso, simples e geral para a perda de percurso é essencial para o orçamento de enlace, a previsão de cobertura, a otimização do desempenho do sistema e a seleção das localizações das estações-base (BS). Consequentemente, pesquisadores e engenheiros têm se dedicado intensamente a encontrar modelos razoáveis para a previsão da perda de percurso em diferentes cenários e em diferentes frequências. Diversas campanhas de medição foram realizadas em todo o mundo para coletar dados, os quais têm sido utilizados para construir, ajustar e avaliar esses modelos (DE CARVALHO, 2021; NOTARI e TRAVASSOS, 2025).

Os modelos de predição de perda de percurso (*path loss*) foram construídos com base em métodos empíricos ou determinísticos. Os modelos empíricos baseiam-se principalmente em medições realizadas em uma determinada faixa de frequência e em um cenário específico. Eles fornecem descrições estatísticas da relação entre a perda de percurso e parâmetros de propagação, como frequência, distância entre antenas, altura das antenas, entre outros, como pode ser visto na Figura 1.

**Figura 1** - Desenvolvimento Cronológico de Modelos de Predição de Perda de Percurso.

1321



**Fonte:** WANG et al, 2023.

De acordo com a Figura 2 observa-se que métodos empíricos são abundantes, enquanto métodos determinísticos são os que menos prevalecem. Segundo Wang *et al.* (2023) os modelos propostos nas fases iniciais e intermediárias baseiam-se em métodos empíricos, sendo que, nos últimos anos, observou-se um aumento significativo nos modelos baseados em métodos semi-empíricos. Os modelos determinísticos ainda utilizados atualmente incluem os métodos de traçado de raios (*ray tracing*) e equações parabólicas. Portanto, pode-se inferir que os métodos de modelagem semiempíricos serão a abordagem predominante na modelagem futura. Os métodos empíricos, devido à sua simplicidade e precisão aceitável, provavelmente continuarão sendo amplamente utilizados em modelagens de áreas pequenas ou em ajustes localizados de modelos no futuro.

A modelagem empírica é um método de modelagem de parâmetros de canal que utiliza estatística matemática. O modelo empírico utiliza características de propagação padronizadas, dados cumulativos de testes ou curvas estatísticas para interpolar ou extrapolar de acordo com os parâmetros de frequência dos equipamentos, e realiza a análise preditiva por meio de uma série de correções. Para fins de otimização de redes sem fio na literatura especializada é listada as particularidades e situações de aplicabilidade de cada modelo a seguir:

Modelo COST 231 W-I: Este modelo empírico é mais apropriado para ambientes rurais e suburbanos que possuem altura regular de edificações. Além disso, este modelo oferece uma previsão de perda de percurso mais precisa ao considerar parâmetros mais detalhados do ambiente de estudo. Mais adequado para frequências de 800 MHz a 2000 MHz. (ZAKARIA e IVANEK, 2016; HOOMOD *et al.*, 2018; ALAM *et al.*, 2014)

Modelo de Terreno da UIT: A série de recomendações da UIT apresenta métodos adequados para planejamento e predição em uma ampla faixa de frequências (30 MHz a 3 GHz). Pode ser utilizado com informações mínimas sobre o caminho de propagação e, por ter a validação de um órgão internacional, facilita acordos entre países. (ZAKARIA e IVANEK, 2016)

Modelo de Perda de Percurso HATA: Modelo empírico útil para a faixa de frequência de 150 MHz a 1500 MHz. Este é o modelo mais amplamente utilizado em áreas urbanas e suburbanas, porém, suas equações se restringem a cenários macrocelulares. (HOOMOD *et al.*, 2018)

Modelo ECC-33 ou Hata – Okumura Estendido: É um modelo apropriado para a faixa de Frequência Ultra Alta (UHF) e, de acordo com recomendações recentes da União

Internacional de Telecomunicações – Radiocomunicação (UIT-R), pode ser utilizado até 3,5 GHz. (HOOMOD *et al.*, 2018; ALAM *et al.*, 2014)

**Modelo Ericsson:** O modelo Ericsson é um software fornecido pela empresa Ericsson para uso em planejamento de redes sem fio. Este modelo foi desenvolvido com base no modelo Okumura-Hata modificado, aprimorado com base em medições de campo. (HOOMOD *et al.*, 2018; ALAM *et al.*, 2014)

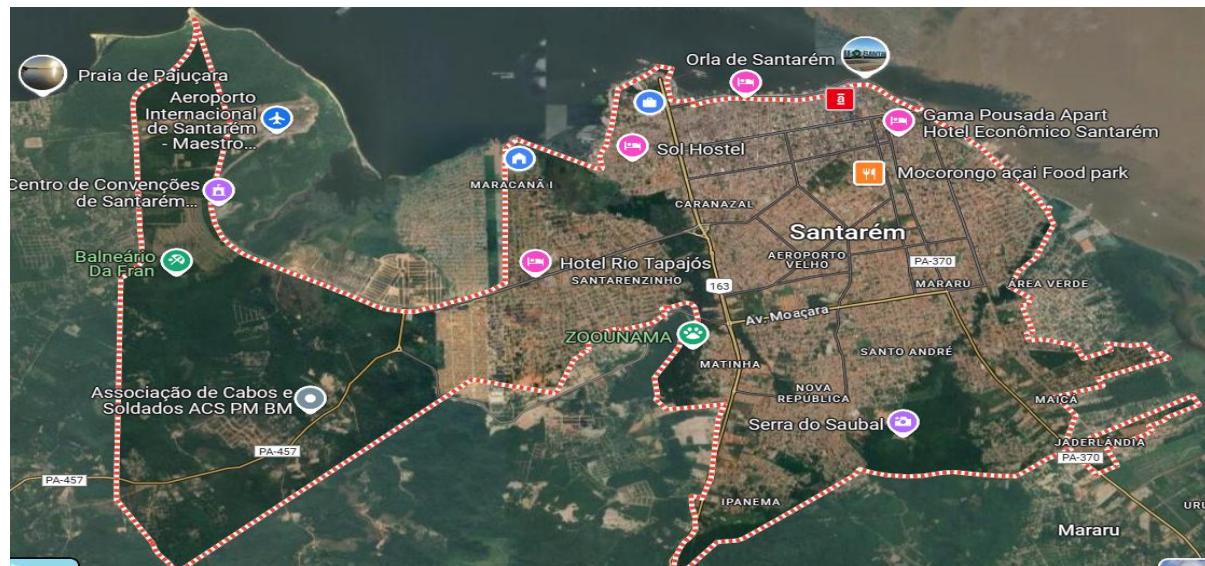
**Modelo SUI:** O modelo SUI é uma extensão do modelo HATA, usado em frequências acima de 1900 MHz para prever a perda de percurso em três tipos de ambientes: Tipo A, Tipo B e Tipo C, correspondentes a diferentes níveis de obstrução e vegetação. O modelo fornece um conjunto de parâmetros ajustáveis, como o expoente de perda de percurso e o fator de sombreamento, para se adequar a cada tipo de terreno. (ALAM *et al.*, 2014 1; MOLLEL e KISANGIRI, 2014).

Além disso, muitos modelos empíricos são desenvolvidos para ambientes específicos como: visada direta (LOS - line-of-sight), sem visada direta (NLOS – non line-of-sight), propagação em ambientes internos, propagação em ambientes externos e em diferentes frequências, os quais são relatados em diversos trabalhos de pesquisa sobre a caracterização de modelos de canais sem fio em diferentes ambientes (ALHAMMADI *et al.*, 2019), desde que — 1323 — sejam obtidos os mapas 3D das construções (PHAIBOON e PHOKHARATKUL, 2022; MORAITIS *et al.*, 2021; QIU *et al.*, 2022; ESWARAMOORTHI *et al.*, 2025).

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para fins de comparação entre o modelo FSPL e o modelo COST 231 W-I, o foco da simulação recai sobre o ambiente urbano de Santarém, no estado do Pará, cidade de porte médio que apresenta uma combinação de áreas densamente urbanizadas e zonas de vegetação densa, como pode ser visto na Figura 2, com expansão periférica. Para simulação de perdas no ambiente urbano de Santarém, Pará, foram consideradas as faixas de frequência de 3,5 GHz, 26 GHz e 66 GHz.

**Figura 2** - Vista aérea da cidade de Santarém - PA.



**Fonte:** Internet

Os parâmetros para a simulação são listados na Tabela 1, que levaram em conta algumas características particulares e outras um pouco mais genéricas. As frequências de operação foram selecionadas com base nas faixas designadas para a tecnologia 5G no Brasil pela Anatel, enquanto a altura das antenas foi estabelecida em 15m, um valor típico de implantações de microcélulas, adequadas para cenários urbanos de alta densidade de construções. Em complemento, para a altura média dos prédios e largura das ruas foram estabelecidos parâmetros com aproximações genéricas a partir de análise observacional do mapa da cidade.

1324

**Tabela 1.** Parâmetros de simulação.

Parâmetros	Valores
Frequência de Operação	3,5 GHz, 26 GHz e 66 GHz
Distância entre receptor e transmissor	3 km
Altura da Antena transmissora	15 m
Altura do dispositivo	2 m
Largura das Ruas	6 m
Distância entre construções	7 m
Grau de orientação das ruas	90°

## EQUAÇÃO DE PERDA DE PERCURSO EM ESPAÇO LIVRE (FSPL)

Em telecomunicações, a perda de percurso em espaço livre (FSPL – *free-space path loss*) refere-se à redução na intensidade de um sinal eletromagnético ao se propagar em linha reta através do espaço livre (geralmente o ar), sem a presença de obstáculos que provoquem reflexão

ou difração. Essa perda não considera fatores como o ganho das antenas, transmissor e do receptor, nem as perdas relacionadas a imperfeições nos equipamentos.

A FSPL calcula a atenuação de um sinal em um meio ideal, desconsiderando parâmetros como reflexão, difração, distância entre antenas e altura das edificações. Portanto, ele representa a perda mínima teórica que um sinal pode sofrer em função da distância e da frequência. A perda de percurso em espaço livre é diretamente proporcional ao quadrado da distância entre o transmissor e o receptor, assim como ao quadrado da frequência do sinal de rádio. Em qualquer tipo de comunicação sem fio, o sinal tende a se espalhar à medida que a distância aumenta. Por isso, uma antena com área fixa captará menos potência de sinal quanto mais afastada estiver da antena transmissora. Esse fenômeno é a principal causa de perda de sinal em comunicações via satélite.

A equação (2) é utilizada para o cálculo FPSL .

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{(4\pi d)^2}{\lambda^2} = \frac{(4\pi f d)^2}{c^2} \quad (2)$$

Onde:

$\lambda$  é o comprimento de onda do sinal, em metros;

1325

$f$  é a frequência do sinal, em Hertz;

$d$  é a distância do transmissor em metros; e

$c$  é a velocidade da luz no vácuo,  $2,99792458 \times 10^8$  m/s.

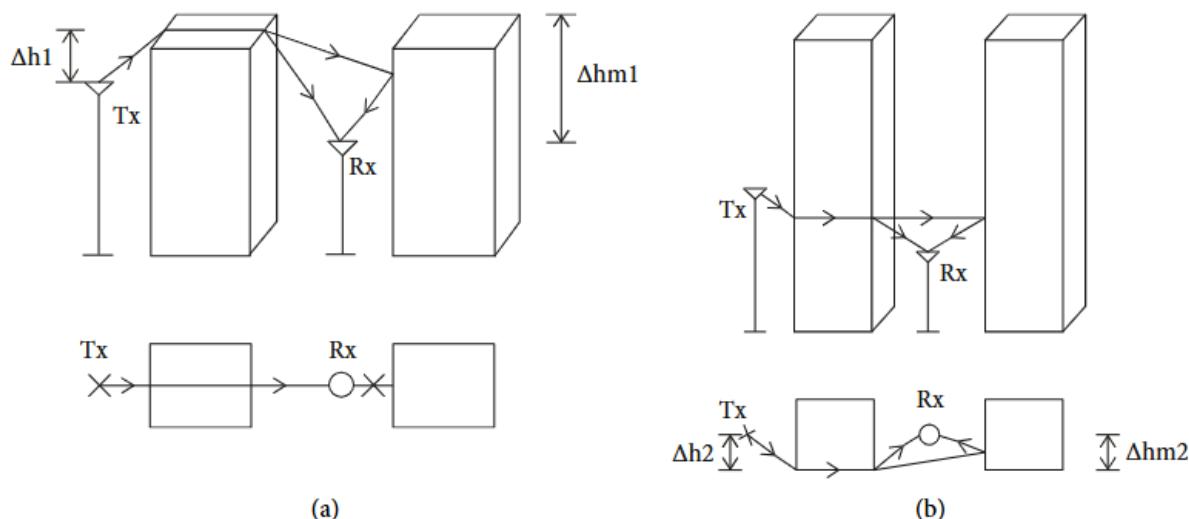
Vale ressaltar que a equação (2) é precisa apenas no campo distante (*far field*), onde se pode assumir a propagação esférica, e, portanto, não é válida nas proximidades do transmissor, e pode ter a sua representação em forma logarítmica conforme a equação (1).

## MODELO COST 231 Walfisch-Ikegami (W-I)

O modelo COST 231 (W-I) é considerado o modelo mais apropriado para ambientes urbanos ou suburbanos que possuem altura regular das construções (ZAKARIA e IVANEK, 2016), e, portanto, apropriado para analisar as perdas em áreas centrais, como no caso da cidade de Santarém. Outro ponto importante sobre a localidade é que a cidade não é tão verticalizada, e, portanto, em ambientes com edificações de baixa altura, onde as antenas das estações rádio base estão posicionadas próximas ou acima dos telhados, a propagação das ondas ocorre ao redor desses telhados, por meio de difrações e reflexões nas superfícies dos edifícios, conforme ilustrado na Figura 3(a) (PHAI BOON e PHOKHARATKUL, 2022).

Por outro lado, em ambientes com edifícios altos ou quando as antenas estão abaixo da altura dos prédios ao redor, a propagação acontece pelas laterais das construções, por meio de reflexões nas fachadas e difrações nos cantos dos edifícios, como mostrado na Figura 3(b). As perdas totais de percurso podem ser estimadas como a soma da perda em espaço livre ( $L_{fsl}$ ), calculada pela equação (5) com a perda por difração em múltiplas superfícies (*multiscreen diffraction loss*).

**Figura 3** - Mecanismos de difração em torno dos prédios. (a) sobre o telhado e (b) esquinas das edificações.



**Fonte:** Phaiboon, 2022.

A sua precisão é relativamente alta, devido às diferentes situações, como altura da antena, distância entre construções e distância entre transmissor e receptor. A equação para os modelos em condição de visada não-direta (NLOS) é calculada de acordo com a equação 3:

$$PL_{NLOS} = L_{fsl} + L_{rts} + L_{msd}, \quad (3)$$

Para áreas urbanas e suburbanas, utiliza-se a equação (4):

$$PL_{NLOS} = L_{FSL} \text{ quando } L_{rts} + L_{msd} > 0, \quad (4)$$

Onde  $L_{fsl}$  é a perda em espaço livre;

$L_{rts}$  é a difração entre o topo dos telhados e a rua; e

$L_{msd}$  é a perda por difração em múltiplas telas.

Em seguida, utiliza-se a equação de perda em espaço livre em (5):

$$L_{fsl} = 32,45 + 20 \log(d) + 20 \log(f) \quad (5)$$

A difração entre o topo dos telhados e a rua é encontrada por meio das equações (6) e (7), cujos termos podem ser calculados pelas equações de (8) a (10):

$$L_{rts} = -10 \log(\omega) - 16,9 + 1 - \log(f) + 20 \log(H_{mobile}) + L_{ori} \quad (6)$$

$$L_{rts} = 0 \text{ se } h_{roof} > h_{mobile}, \quad (7)$$

$$L_{ori} = 2.5 + 0.075(\varphi - 35) \quad \text{para} \quad 35 \leq \varphi \leq 55 \quad (8)$$

$$L_{ori} = 4 - 0.114(\varphi - 55) \quad \text{para} \quad 55 \leq \varphi \leq 90 \quad (9)$$

$$L_{ori} = -10 + 0.354\varphi \quad \text{para} \quad 0 \leq \varphi \leq 35 \quad (10)$$

Antes de calcular a perda por difração em múltiplas telas, é necessário encontrar a diferença entre a altura da antena transmissora e a altura média dos telhados dos edifícios ( $\Delta h_{base}$ ) através da equação (11):

$$\Delta h_{base} = h_{base} - h_{roof}, \quad (11)$$

A diferença de altura entre o telhado dos edifícios e a altura do dispositivo móvel é definida pela equação (12):

$$\Delta h_{mobile} = h_{roof} - h_{mobile} \quad (12)$$

A perdas por difração em múltiplas telas  $L_{msd}$  são definidas pelas equações (13) e (14):

$$L_{msd} = k_a + L_{bsh} + k_d \log_{10}(f) - 9 \log_{10}(B) - 9 \log_{10}(f) \text{ para } L_{msd} > 0, \quad (13)$$

$$L_{msd} = 0 \text{ para } L_{msd} > 0, \quad (14)$$

Onde a perda adicional que ocorre devido à antena transmissora estar muito acima dos telhados ( $L_{bsh}$ ) pode ser calculada através das equações (15) e (16):

$$L_{bsh} = 0 \text{ se } h_{base} \leq h_{roof}, \quad (15)$$

$$L_{bsh} = -18 \log_{10}(1 + \Delta h_{base}) \text{ se } h_{base} > h_{roof}, \quad (16)$$

Os fatores de correção de perda  $k_d$ ,  $k_a$ ,  $k_f$  dependem das equações (17) a (23):

$$k_d = 18 + 15 \left( \frac{\Delta h_{base}}{h_{roof}} \right) \text{ para } h_{base} \leq h_{roof}, \quad (17)$$

$$k_d = 18 \text{ se } h_{base} > h_{roof}, \quad (18)$$

$$k_a = 54 - 0.8 \Delta h_{base} \text{ para } d \geq 0.5 \text{ km e } h_{base} \leq h_{roof}, \quad (19)$$

$$k_a = 54 - 0.8 \Delta h_{base} \left( \frac{d}{0.5} \right) \text{ para } d < 0.5 \text{ km e } h_{base} \leq h_{roof}, \quad (20)$$

$$k_a = 54 \text{ para } h_{base} > h_{roof}, \quad (21)$$

$$k_f = -4 + 1,5 \left( \frac{f}{925} - 1 \right) \text{ para áreas urbanas,} \quad (22)$$

$$k_f = -4 + 0,7 \left( \frac{f}{925} - 1 \right) \text{ para áreas suburbanas,} \quad (23)$$

Onde  $B$  é a distância, em metros, de prédio a prédio,

$d$  é a distância entre transmissor e receptor,

$f$  é a frequência em GHz,

$\varphi$  é o grau de orientação das ruas,

$w$  é a largura das ruas em metros.

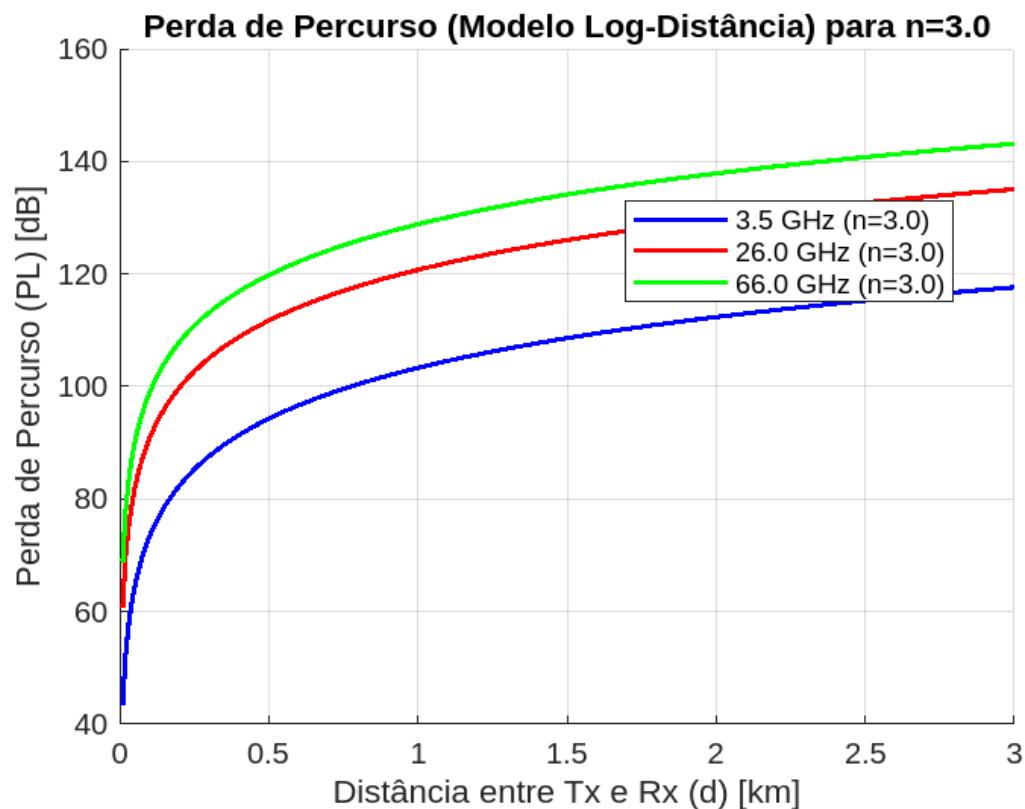
A equação para a condição de linha de visada é expressa da seguinte forma:

$$PL_{los} = 20 \log(f) + 42,6 + 26 \log(d) \quad (24)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

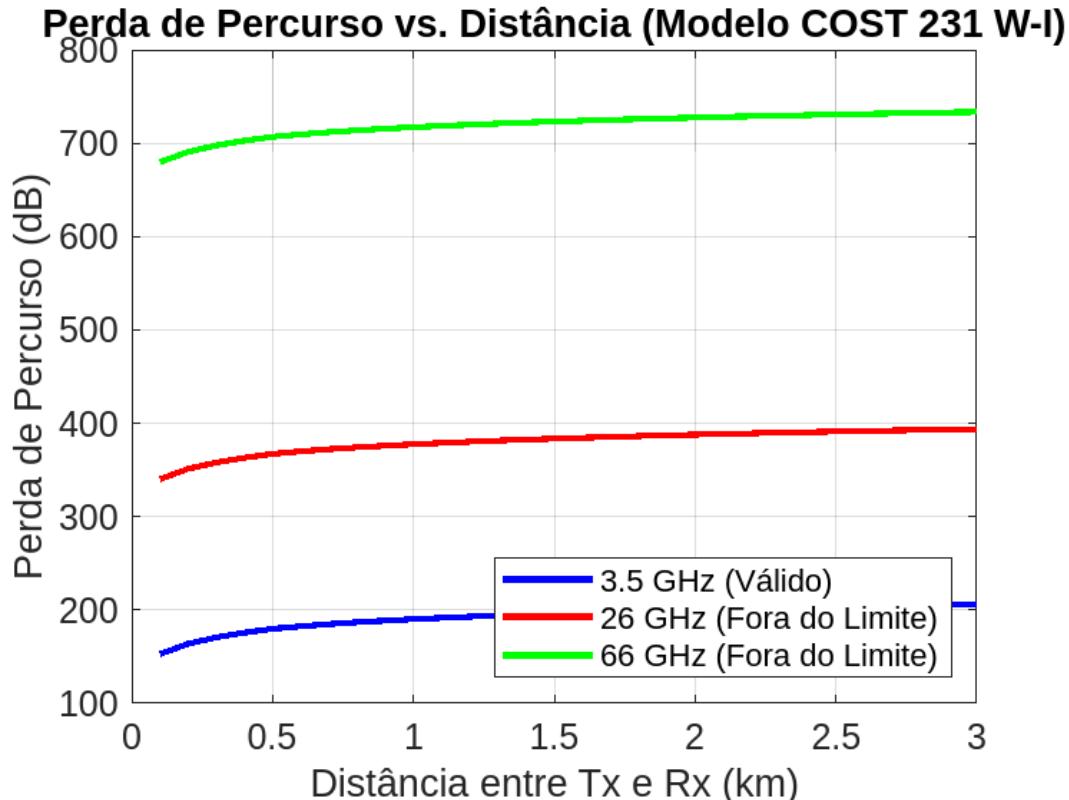
A simulação conduzida para determinar o comportamento da perda de percurso para cada modelo pode ser observado nas Figuras 4 e 5.

**Figura 4** - Impacto da Frequência na Perda de Percurso usando o Modelo Log-Distância ( $n=3.0$ ).



**Fonte:** Autor, 2025.

**Figura 4** - Comparativo de Perda de Percurso e Limites de Frequência do Modelo COST 231 W-I.



Fonte: Autor, 2025.

1329

Na Figura 4 inicialmente há uma diferença considerável de valores no modelo COST 231 W-I a cada mudança de frequência, devido aos blocos de perda que irão se somar de acordo com os parâmetros estabelecidos. Outro motivo é a baixa precisão do modelo para frequências mais elevadas. Em contrapartida, no modelo Log-Distância ou FSPL, a frequência impacta primariamente o termo de referência inicial, resultando em um deslocamento quase paralelo das curvas, como visto na Figura 4. Portanto, para as novas faixas de frequência estudadas pela Anatel para aplicações em larga escala no Brasil, o uso do modelo COST 231 tornaria a análise incoerente, com valores extremos de perda (superiores a 700 dB) mostrando um estouro no modelo.

É importante notar que, utilizando diferentes aproximações de parâmetros, seria possível observar diferentes perfis de perda, porém, tais variações não seriam significativas a ponto de alterar as conclusões do estudo. Como esperado, as maiores perdas ocorrem na faixa de ondas milimétricas para ambos os modelos, assim resultando em um menor raio de cobertura para cada célula, comprovando a necessidade de um maior número de antenas ativas nas redes,

as quais cobririam áreas geográficas que antes seriam atendidas por uma única antena de 3,5 GHz.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O cálculo da perda de percurso é um dos principais fatores a serem estimados, uma vez que os planejadores de rede dependem de modelos de propagação de sinal para otimizar os sistemas de comunicação sem fio e alcançar um bom nível de qualidade de serviço. Portanto, é muito importante encontrar um modelo de propagação adequado para os diferentes tipos de ambientes, a fim de fornecer diretrizes para o planejamento. Nesse contexto, este trabalho analisou dois modelos distintos para as novas faixas de frequência do 5G, e os resultados evidenciaram uma divergência substancial entre eles, especialmente nas faixas de ondas milimétricas. A extrapolação do modelo COST 231 W-I para frequências muito elevadas, por exemplo, gerou valores de perda que destacam os limites de sua aplicação fora de sua faixa de validação original. Apesar das diferenças, ambos os modelos corroboraram o princípio físico de que a atenuação do sinal aumenta drasticamente com a frequência. Esta constatação fornece uma diretriz clara para o planejamento de redes 5G: a implementação de bandas como 26 GHz e 66 GHz exigirá uma maior quantidade de células presentes da rede para compensar o menor raio de cobertura de cada célula. Finalmente, é necessário ressaltar que, para superar as limitações de modelos empíricos, as técnicas determinísticas de Traçado de Raios (*Ray Tracing*) são cada vez mais utilizadas na indústria. Tais modelos oferecem uma previsão significativamente mais acurada ao simular os caminhos reais de propagação do sinal (reflexão, difração etc.), representando o estado da arte para obter a melhor previsão de perda de percurso ao projetar as redes de comunicação da próxima geração, embora exijam um alto custo computacional e mapas tridimensionais detalhados do ambiente. Para que o potencial tecnológico das novas redes não seja limitado por um planejamento inadequado, a tendência é que os estudos de propagação e as ferramentas de simulação continuem a avançar, garantindo uma implementação de rede cada vez mais precisa, eficiente e economicamente viável.

1330

## REFERÊNCIAS

OLIVEIRA, Ozias Santos da Conceição. REDES DE COMUNICAÇÕES MÓVEIS 5G: Contextualização a partir de uma revisão da literatura. 2021. 127 f. Dissertação (Mestrado em Economia) - Faculdade de Ciências e Letras, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Araraquara, 2021.

BAILEY, Thomas Royall. The Evolution of 5G: Delineating the Impact and Limitations across Transportation, Education, Healthcare, Agriculture, and Manufacturing. 2023. 31 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Administração de Empresas em Sistemas de Informação) - Sam M. Walton College of Business, University of Arkansas, Fayetteville, 2023.

LEITE, Rávilla Raianni Silva. Estudo da Perda de Percurso e do Perfil de Atraso de Potências na Frequência de 3500 MHz em Regiões Urbanas Densamente Vegetadas. 2021. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

SHAIBU, Farouq E. et al. Performance of path loss models over mid-band and high-band channels for 5G communication networks: A review. *Future Internet*, v. 15, n. 11, p. 362, 2023.

ABHAYAWARDHANA, Viraj S. et al. Comparison of Empirical Propagation Path Loss Models for Fixed Wireless Access Systems. In: 2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference; 2005; Estocolmo. p. 73-77.

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ANATEL). Anatel aprova consulta pública para implementar o 5G. Brasília, DF: ANATEL, 2020. Disponível em: <https://www.anatel.gov.br/institucional/component/content/article/171-manchete/2491-anatel-aprova-consulta-publica-para-lidar-faixas-de-frequencias-para-o-5g>. Acesso em: 21 de maio de 2025.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). The ICT business toolkit for a green world. Geneva: ITU, 2012. Geneva: ITU, 2012. 1331

DE CARVALHO, Andre Augusto Pacheco et al. Empirical path loss model in city-forest environment for mobile communications. *Journal of Communication and Information Systems*, v. 36, n. 1, p. 70-74, 2021.

NOTARI, Eduardo Fabricio; TRAVASSOS, Xisto Lucas. 5G new radio open radio access network implementation in Brazil: Review and cost assessment. In: *Telecom.* MDPI, 2025. p. 24.

WANG, Jian; HAO, Yulong; YANG, Cheng. The Current Progress and Future Prospects of Path Loss Model for Terrestrial Radio Propagation. *Electronics*, v. 12, n. 24, p. 4959, 2023.

ZAKARIA, Yahia; IVANEK, Lubomir. Propagation modelling of path loss models for wireless communication in urban and rural environments at 1800 GSM frequency band. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, v. 14, n. 2, p. 139-144, jun. 2016.

HOOMOD, Haider Kadhim et al. Analyzing Study of Path loss Propagation Models in Wireless Communications at 0.8 GHz. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1003, n. 1, p. 012028, 2018.

ALAM, Didarul et al. Performance Evaluation of Different Frequency Bands of WiMAX and Their Selection Procedure. *International Journal of Advanced Science and Technology*, v. 62, p. 1-18, 2014.

MOLLEL, Michael S.; KISANGIRI, Michael. Comparison of Empirical Propagation Path Loss Models for Mobile Communication. *Computer Engineering and Intelligent Systems*, v. 5, n. 9, p. 1-11, 2014.

ALHAMMADI, Mariam et al. Large-scale empirical model for a 2.4 GHz wireless network in an outdoor environment. In: *2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*. IEEE, 2019. p. 1-4.

PHAIBOON, Supachai; PHOKHARATKUL, Pisit. Accurate Empirical Path Loss Models with Route Classification for mmWave Communications. *International Journal of Antennas and Propagation*, v. 2022, n. 1, p. 2780029, 2022.

MORAITIS, Nektarios et al., Performance evaluation of machine learning methods for path loss prediction in rural environment at 3.7 GHz. *Wireless Netw*, v. 27, p. 4169-4188, 2021.

QIU, Kehai et al. Pseudo Ray-Tracing: Deep Learning Assisted Outdoor mm-Wave Path Loss Prediction. *IEEE Wireless Communications Letters*, v. 11, n. 8, p. 1629-1633, 2022.

ESWARAMOORTHI, R. et al. Hierarchical Auto-Associative Polynomial Convolutional Neural Network With Gorilla Troops Optimization for an Effective Millimeter-Wave Path Loss Modeling in 5G-IoT Mobile Communication System. *International Journal of Communication Systems*, v. 38, n. 4, p. e6109, 2025.