IPE DIGITAL

SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO DE MACROCÉLULAS URBANAS IMT OPERANDO EM 6/7 GHZ E EM 3,5 GHZ

Modeladas Conforme Diretrizes da ITU

Por *Agostinho Linhares* e *Leonardo Euler de Morais*

https://ipedigital.tech

2024

SUMÁRIO EXECUTIVO

Durante a Conferência Mundial de Radiocomunicações 2023 (WRC-23), a Administração Brasileira atuou para identificar a faixa de 6.425 – 7.125 MHz para IMT, o que é uma sinalização que a decisão de destinar toda a faixa de 6 GHz (5.925 – 7.125 MHz) para o WiFi6E pode ser revista. Anteriormente, o 3GPP já havia padronizado o uso da referida faixa para sistemas licenciados 5G, no Release 17 da tecnologia NR (*New Radio*). Tal faixa recebeu a nomenclatura de “banda n104”. Recentemente, a Anatel abriu uma Tomada de Subsídios que questiona o uso dessa faixa para sistema IMT e para equipamentos de radiação restrita (ex. WiFi).

Este relatório apresenta os resultados dos estudos comparativos de desempenho de macrocélulas urbanas IMT operando em 6/7 GHz e em 3,5 GHz, seguindo o padrão da ITU, com usuários localizados tanto em ambientes externos, quanto internos. O objetivo é demonstrar a viabilidade do uso da faixa de 6/7 GHz para macrocélulas, inclusive atendendo usuários em ambientes internos (*indoor*). Para isso, se utiliza a metodologia de simulação recomendada pela ITU, com a ferramenta desenvolvida pela Anatel (SHARC), que implementa a Recomendação ITU-R M.2101-0.

Neste trabalho, se modela as principais características do sistema 5G nas referidas faixas, como antenas *beamforming*, com usuários situados tanto em ambientes *indoor* quanto *outdoor*, com os *smartphones* utilizando controle de potência, todos esses parâmetros seguindo diretrizes da ITU.

Os resultados demonstram que o uso da faixa de 6/7 GHz para IMT será importante para garantir um *trade-off* capacidade e cobertura, possuindo características complementares e sinergias com a operação em 3,5 GHz.

Assim, demonstrando a viabilidade do uso da faixa de 6/7 GHz para macrocélulas IMT em ambientes urbanos, pretende-se contribuir com e impulsionar as discussões do uso dessa importante faixa para as tecnologias 5G e 6G no Brasil.

EXECUTIVE SUMMARY

During the World Radiocommunication Conference 2023 (WRC-23), the Brazilian Administration worked towards identifying the 6,425 – 7,125 MHz band for IMT, signaling a reconsideration of the decision to allocate the entire 6 GHz band (5,925 – 7,125 MHz) to WiFi6E. Previously, the 3GPP had already standardized the use of this band for licensed 5G systems in Release 17 of the New Radio (NR) technology, designated as "band n104." Recently, Anatel initiated a Public Consultation questioning the use of this band for IMT systems and restricted radiation equipment (e.g., WiFi).

This report presents the results of comparative performance studies of urban macrocells operating in the 6/7 GHz and 3.5 GHz bands, following the ITU guidelines, with users located in both outdoor and indoor environments. The objective is to demonstrate the feasibility of using the 6/7 GHz band for macrocells, including serving users in indoor environments. To achieve this, the simulation methodology recommended by the ITU is employed, using the tool developed by Anatel (SHARC), which implements ITU-R Recommendation M.2101-0.

In this study, the main characteristics of the 5G system in the mentioned bands are modeled. This includes features such as beamforming antennas, users located in both indoor and outdoor environments, and smartphones utilizing power control. All these parameters adhere to the guidelines set by the ITU.

The results demonstrate that the use of the 6/7 GHz band for IMT will be important to ensure a capacity and coverage trade-off, possessing complementary characteristics and synergies with operation in the 3.5 GHz band.

Therefore, by demonstrating the feasibility of using the 6/7 GHz band for IMT macrocells in urban environments, the intention is to contribute to and drive discussions regarding the utilization of this crucial spectrum for 5G and 6G technologies in Brazil.

Simulação de Desempenho de Macrocélulas Urbanas IMT Operando em 6/7 GHz e em 3,5 GHz, Modeladas Conforme Diretrizes da ITU

Resumo

A WRC-23 identificou a faixa de 6/7 GHz para uso do IMT, inclusive para o Brasil. A Anatel está com uma Tomada de Subsídios aberta que questiona o uso dessa faixa tanto para sistemas IMT, quanto para equipamentos de radiação restrita (ex. WiFi). Este estudo modela o desempenho de macrocélulas urbanas IMT operando em 6/7 GHz, comparando com resultados quando se opera em 3,5 GHz, seguindo o padrão da ITU, com usuários localizados tanto em ambientes externos, quanto internos.

Os resultados deste trabalho demonstram que o uso da faixa de 6/7 GHz para IMT será importante para garantir um *trade-off* capacidade e cobertura, possuindo características complementares e sinergias com a operação de sistemas IMT em 3,5 GHz, e será importante para atender a necessidade crescente de espectro por sistemas 5G e evoluções em bandas intermediárias.

Abstract

The WRC-23 has identified the 6/7 GHz band for countries wishing to implement IMT, including Brazil. Anatel has an open Public Consultation that questions the use of this band for IMT systems or restricted radiation equipment (e.g., WiFi). This study models the performance of urban IMT macrocells operating at 6/7 GHz, comparing with the results of an operation in 3.5 GHz, following the ITU standard, with users located in outdoor and in indoor environments.

The results of this study demonstrate that the use of the 6/7 GHz band for IMT will be crucial to ensure a trade-off between capacity and coverage, possessing complementary characteristics and synergies with the operation of IMT systems at 3.5 GHz. This band will be essential to meet the growing spectrum demand for 5G and beyond systems in mid-bands.

1 - Introdução

Durante a última Conferência Mundial de Radiocomunicações (WRC-23), que findou em 15 dezembro de 2023, a Administração Brasileira atuou para identificar a faixa de 6.425 – 7.125 MHz para IMT (*International Mobile Telecommunications*) e foi bem-sucedida. Destaca-se que quando se trata de sistemas IMT em 6/7 GHz, está-se considerando tanto o IMT-2020 (equivalente aos sistemas 5G), quanto o IMT-2030 (equivalente aos futuros sistemas 6G). O 3GPP já havia padronizado o uso da referida faixa para sistemas licenciados 5G, no Release 17 da tecnologia NR (*New Radio*), ainda em 2022 (MWL, 2022). Tal faixa recebeu a nomenclatura de "banda n104".

Na sequência da WRC-23, a Anatel abriu a Tomada de Subsídios nº 2, de 31 de janeiro de 2024, que está disponível para contribuições até 9 de abril de 2024, por meio do Sistema Participa Anatel. Nesta Tomada de Subsídios se questiona, entre diversos temas correlatos, sobre o uso da faixa de radiofrequências de 6/7 GHz, tanto em relação a sistemas IMT, quanto para radiação restrita. Em relação ao uso para sistemas IMT, além de ajudar a atender a necessidade crescente por espectro de tais sistemas, que é necessário para suprir a demanda de tráfego exponencial da população, o uso dessa faixa por sistemas 5G/6G trará os maiores benefícios econômico-sociais, como já demonstrado no Relatório de Atividades de outubro de 2023.

Adicionalmente, destaca-se que, conforme indicado em estudos da União Internacional de Telecomunicações (ITU), espera-se que a mesma infraestrutura de instalação de estações radiobase (*grid*) seja utilizado tanto para sistemas operando na faixa de 3,5 GHz, quanto em 6/7 GHz[1].

Em 2017, a ITU aprovou a Recomendação ITU-R M.2101-0 (ITU,2017), com o objetivo de definir a metodologia para modelagem e simulação de redes IMT para utilização em estudos de compartilhamento e compatibilidade entre IMT e outros sistemas e/ou aplicações. Dentro do escopo dessa recomendação, inclui-se o cálculo de *throughput* (vazão) da rede, dado em função de eficiência espectral (bits por segundo por Hertz ou, simplesmente, bps/Hz).

[1] Annex 4.4 to Working Party 5D Chairman's Report, Document 5D/716-E (Ciclo 2019 - 2023)

Complementarmente, em (ITU, 2021), se apresenta a formulação para o mapeamento entre o cálculo da relação sinal mais interferência sobre o ruído (SINR - *signal-to-interference-plus-noise ratio*), e o respectivo cálculo de *throughput*. Neste caso, o desempenho é modelado para sistemas SISO (*single input, single output*).

Na prática, sistemas 5G utilizam MIMO (*multiple input, multiple output*), logo, resultados simulados com a metodologia da ITU poderão ser bem mais eficientes no mundo real. P. ex., no caso de uso de MIMO 8x8 (8 transmissores e 8 receptores), em determinadas situações e aplicando multiplexação espacial[2], o sistema poderá apresentar um desempenho até oito vezes superior, em termos de bps/Hz, em relação à quando se simula um sistema SISO (1x1).

Este relatório apresenta estudo comparativo sobre o uso das faixas de 6/7 GHz e 3,5 GHz para macrocélulas, inclusive atendendo usuários em ambientes internos (*indoor*), utilizando como referência parâmetros desenvolvidos na União Internacional de Telecomunicações (ITU). Com isso, objetiva-se demonstrar a viabilidade do uso da faixa de 6 GHz para macrocélulas. Para isso, se utiliza a metodologia recomendada pela ITU, com a ferramenta de simulação desenvolvida pela Anatel (SHARC), que implementa a Recomendação ITU-R M.2101-0.

Sucintamente, a ITU recomenda na M.2101-0 que seja implementada simulação em nível de sistema, o que é amplamente utilizada em estudos de compartilhamento e compatibilidade envolvendo redes IMT. Este método é baseado em análise de Monte Carlo, que permite avaliar a probabilidade de interferência simulando simultaneamente a agregação de múltiplas fontes interferentes.

Assim, este estudo foi desenvolvido para demonstrar a viabilidade do uso da faixa de 6/7 GHz para macrocélulas no Brasil, comparando o desempenho dessa faixa com aquele obtido com a faixa de 3,5 GHz. Este estudo está dividido da seguinte forma: a **Seção 2** discorre sobre como modelar o sistema IMT; a **Seção 3** explica os modelos de antena, de canal de propagação e de cálculo de desempenho, utilizados neste trabalho e que são baseados na metodologia recomendada pela ITU; na sequência, a **Seção 4** apresenta os parâmetros de entrada para

[2] Técnica em MIMO que aumenta as taxas de transmissão enviando a carga útil de dados em fluxos separados (*streams*) através de antenas espacialmente separadas.

simulação, com base em documentos da ITU; enquanto a **Seção 5** discute os resultados do trabalho em função dos dados iniciais, para na sequência, a **Seção 6** expandir a avaliação da Seção anterior, considerando novos cenários; por fim, a **Seção 7** apresenta comentários e considerações finais.

2 – Modelando o Sistema IMT

O sistema IMT é modelado com sendo implementado em um *grid* de macrocélulas, com uma ERB possuindo três setores, cada setor aponta para o azimute 30º, 150º ou 270º (0º é o norte), conforme indicado na Fig.1.

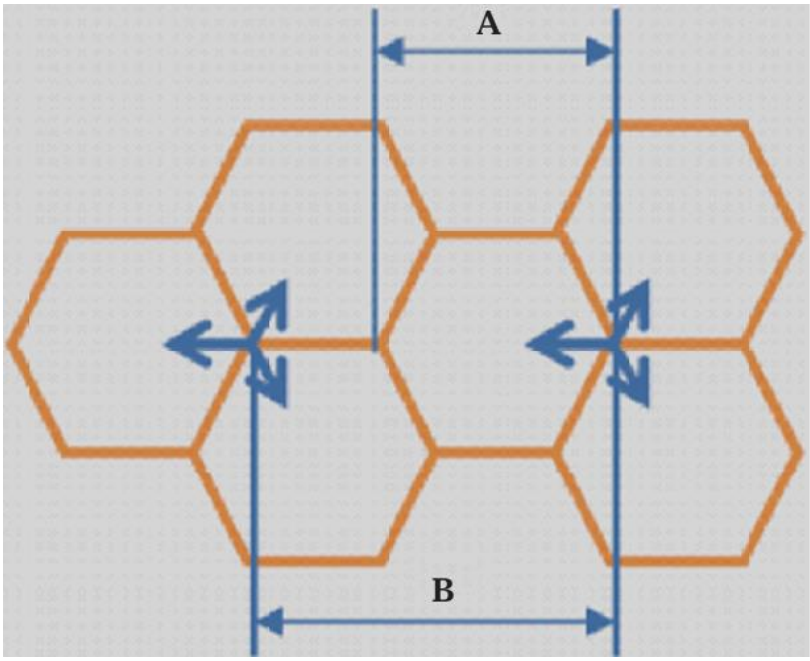
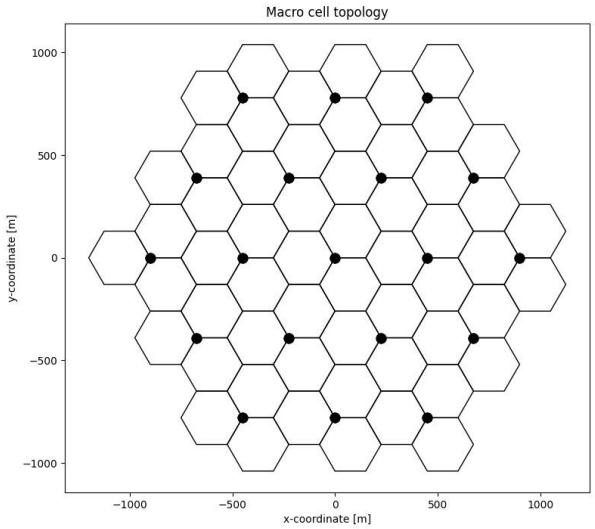


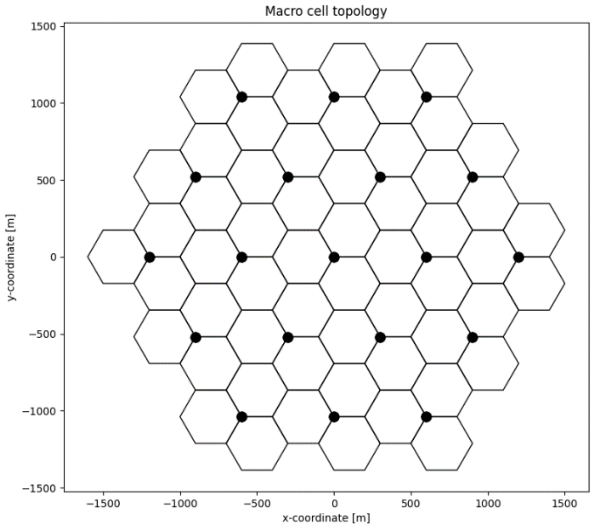
Fig. 1 – O raio de cobertura de um setor é indicado pela distância “A”, enquanto a distância entre sítios é dada pela distância “B”.

Fonte: Recomendação ITU-R M.2101-0.

A Fig. 2 apresenta a topologia simulada, representada pelo *cluster* central de uma rede, contendo 19 sítios, cada sítio contendo 3 setores, consequentemente, perfazendo um total de 57 setores. Não obstante existir a expectativa de se utilizar o mesmo *grid* para as faixas de 3,5 GHz e de 6/7 GHz, se utilizará inicialmente os parâmetros definidos pela ITU, que foram ajustados para um determinado raio de cobertura, em função da faixa de frequências, a saber: raio de um setor de 300 metros e distância entre sítios de 450 metros para a faixa de 6/7 GHz, paralelamente aos 400 metros e 600 metros para faixa de 3,5 GHz. Posteriormente, serão simuladas redes no mesmo *grid* de raio de 300 metros para confirmar os achados desse trabalho. A Fig.2 apresenta os *grids* para as faixas de 6 GHz e 3,5 GHz indicados pela ITU.



(a) – 6 GHz



(b) – 3,5 GHz

Fig.2 – Topologia de macrocélula, com um *cluster* central contendo 19 sítios e 57 setores. Cada sítio é representado por um ponto preto.

Para cada setor, se distribui aleatoriamente 3 equipamentos de usuários (UE – *user equipment*) a cada rodada de simulação (*snapshot*), seguindo uma distribuição uniforme. Neste contexto, UE é equivalente à *smartphone*. Para cada *smartphone* se aloca um terço (1/3) dos recursos de bloco (RB – *resource blocks*), de tal forma que 100% dos RB são utilizados, isto é, se implementa o modelo de tráfego *full-buffer*. A probabilidade de que em um *snapshot* um determinado setor esteja ativo foi configurado para 20%.

Quando um setor está ativo, seu sistema avançado de antena (AAS – *Advanced Antenna* System) conforma um feixe para cada *smartphone*, ou em outras palavras, é criado um *beaforming* para cada usuário. No modelo da ITU, no enlace de descida (*downlink*) a potência equivalente isotropicamente radiada (e.i.r.p) é dividida igualmente para cada feixe. Por outro lado, no enlace de subida (*uplink*), o *smartphone* possui antena isotrópica e implementa controle de potência. Controle de potência é uma técnica em que o transmissor emite somente a potência necessária buscando o uso eficiente de bateria e a minimização de interferência em outros enlaces, de tal forma que se o usuário estiver mais perto da ERB, tende a transmitir uma menor potência, em relação aos usuários localizados mais distantes.

Um enlace desejado ERB-usuário ou usuário-ERB tem o potencial de interferir indesejavelmente em outros enlaces existentes. Assim, para avaliar a eficiência do sistema, além de calcular a potência desejada que chega ao receptor, se calcula a interferência agregada proveniente de outros transmissores IMT espalhados pelas demais células ativas. A essa interferência agregada soma-se o ruído gerado internamente no sistema de recepção. Com esses parâmetros, obtém-se o SINR, que posteriormente se mapeia em um determinado *throughput*, como será mais bem detalhado nas seções subsequentes.

3 – Modelos de Antena, Canal de Propagação e Cálculo de Desempenho

Nesta seção será explanado o modelo de antena indicado pela ITU para uso em simulações na faixa de 6/7 GHz e de 3,5 GHz, assim como o equacionamento do canal de propagação, e os parâmetros que devem ser utilizados para a avaliação de *throughput* a partir dos valores SINR calculados.

3.1 Sistema Avançado de Antena (AAS) ou Antena com *Beamforming*

A antena com *beamforming* é baseada em um arranjo de antenas e consiste em um número de elementos radiantes idênticos localizados em um mesmo plano com uma distância de separação fixa (p. ex., $\lambda/2$ ou meio-comprimento de onda), todos os elementos tendo padrões de radiação idênticos e "apontando" ao longo do eixo ortogonal ao plano do arranjo. Uma função de ponderação é usada para direcionar o feixe em diferentes direções. O ganho total da antena é a soma (em escala logarítmica) do ganho do arranjo e do ganho do elemento.

Destaca-se que se espera a implementação de antena *beamforming* somente na ERB, quando se trata do uso das faixas de 6/7 GHz e 3,5 GHz. Assim, o modelamento da antena nos *smartphones* considera uma antena isotrópica com ganho de -4 dBi.

A Tabela 1 apresenta as características da antena *beamforming* de referência indicada pela ITU (2021) para a faixa de 6425 – 7125 MHz.

Tabela 1: Características da Antena *Beamforming* para a Faixa de 6 425-7 125 MHz

	Cenário macro urbano	Faixa de 6/7 GHz	Faixa de 3,5 GHz
1	**Características da Antena da ERB**		
1.1	Padrão de Antena	Rec. ITU-R M.2101 Anexo 1, seção 5	Modelo de AAS Estendido (ITU, 2021)
1.2	Ganho do elemento (dBi)**(Nota 1)**	5,5	6,4
1.3	Feixe de 3dB horizontal/vertical de um elemento único (grau)	90º para H 90º para V	90º para H 65º para V
1.4	Relação frente/costas (dB)	30 tanto para H, quanto V	30 tanto para H, quanto V
1.5	Polarização da Antena	Linear ±45º	Linear ±45º
1.6	Configuração do arranjo de antena (Linhas × Coluna) **(Nota 2)**	16 × 8 elementos	4 × 8 elementos

	Cenário macro urbano	Faixa de 6/7 GHz	Faixa de 3,5 GHz
1.7	Espaçamento dos elementos radiantes - Horizontal/Vertical	0,5 comp. de onda (λ) para H 0,5 λ para V	0,5 λ para H 2,1 λ para V (espaçamento entre *sub-arrays*) 0,7 λ para V (espaçamento dentro do *sub-array*)
1.8	Perdas ôhmicas do arranjo (dB) **(Nota 1)**	2	2
1.9	Potência conduzida (antes das perdas ôhmicas) por elemento de antena (dBm) **(Nota 6)**	22 **(Nota 5)**	28 **(Nota 5)**
1.10	Ângulo de cobertura máximo da ERB no plano horizontal (grau)	±60	±60
1.11	Varredura vertical da ERB (grau) **(Notas 3, 4, 7)**	90-120	90-100
1.12	*Downtilt* mecânico (grau) **(Nota 4)**	10	6
1.13	Ganho máximo	26,5 dBi	26,2 dBi
1.13	e.i.r.p máxima (de operação)	72,65 dBm	72,28 dBm

Nota 1: O ganho do elemento na linha 1.2 inclui a perda dada na linha 1.8. Isto significa que este parâmetro na linha 1.8 não é necessário para o cálculo do ganho da antena composta BS e e.i.r.p.

Nota 2: 16 × 8 significa que existem 16 elementos radiantes verticais e 8 horizontais. Para o modelo AAS Estendido, 4 x 8 significa que existem 4 *sub-arrays* radiantes verticais e 8 *sub-arrays* radiantes horizontais.

Nota 3: A faixa de cobertura vertical é dada no sistema de coordenadas globais, ou seja, 90° no horizonte.

Nota 4: A faixa de cobertura vertical na linha 1.11 inclui a inclinação mecânica para baixo dada na linha 1.12.

Nota 5: Para antena AAS a potência conduzida por elemento assume 16 × 8 × 2 elementos (ou seja, potência por elemento em cada polarização H/V). Para a antena AAS Estendido a potência conduzida por elemento assume 4 x 8 x 2 *sub-arrays* (ou seja, potência por elemento em cada polarização H/V).

Nota 6: Nos estudos de compartilhamento, a potência de transmissão calculada usando a linha 1.9 é aplicada à largura de faixa típica de 100 MHz.

Nota 7: Nos estudos de compartilhamento, os UEs que estão abaixo da faixa de cobertura podem ser considerados atendidos pelo limite “inferior” do feixe elétrico, ou seja, feixe direcionado para o limite máximo do ângulo de cobertura. Uma distância mínima BS-UE ao longo do solo de 35 m deve ser usada para ambientes macro urbanos.

A Fig.3 apresenta o diagrama de radiação simulado para os ângulos de elevação e azimute de zero grau para a faixa de 6/7 GHz.

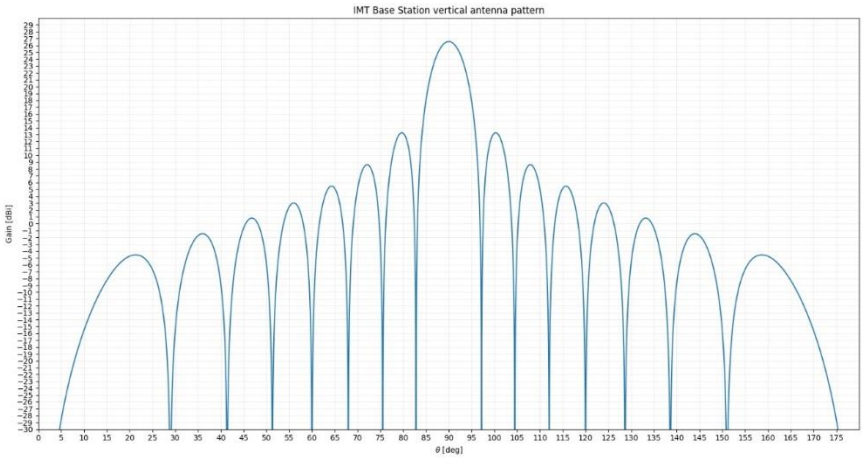


Fig.3(a) – Diagrama de radiação no plano vertical na frequência 6.725 GHz.

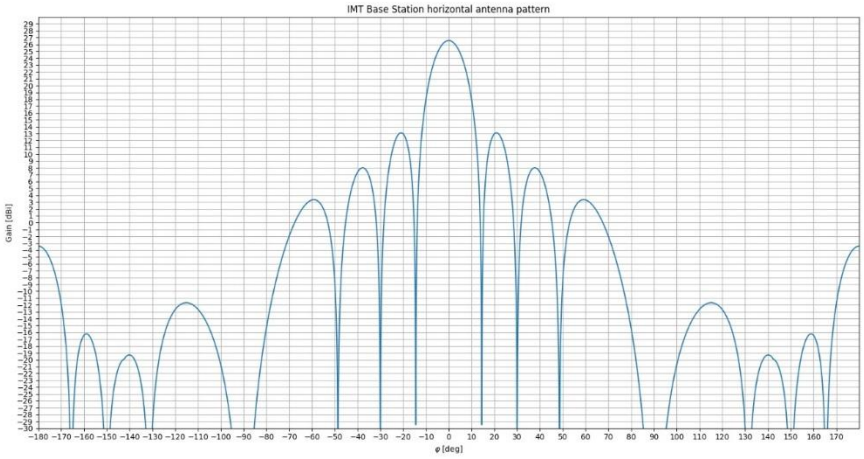


Fig.3(b) – Diagrama de radiação no plano horizontal na frequência 6.725 GHz.

A Fig.4 apresenta o diagrama de radiação simulado para os ângulos de elevação e azimute de zero grau para a faixa de 3,5 GHz.

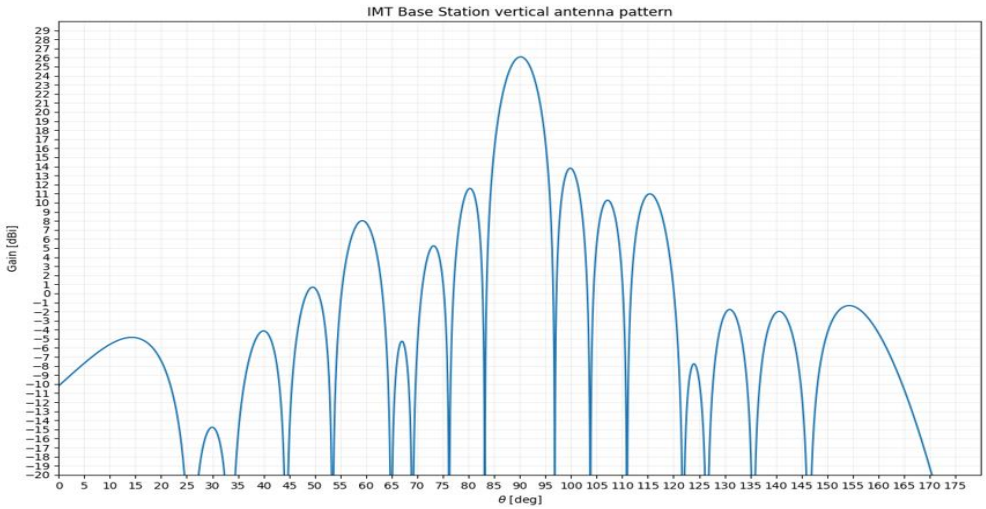


Fig.4(a) – Diagrama de radiação no plano vertical na frequência 3,45 GHz.

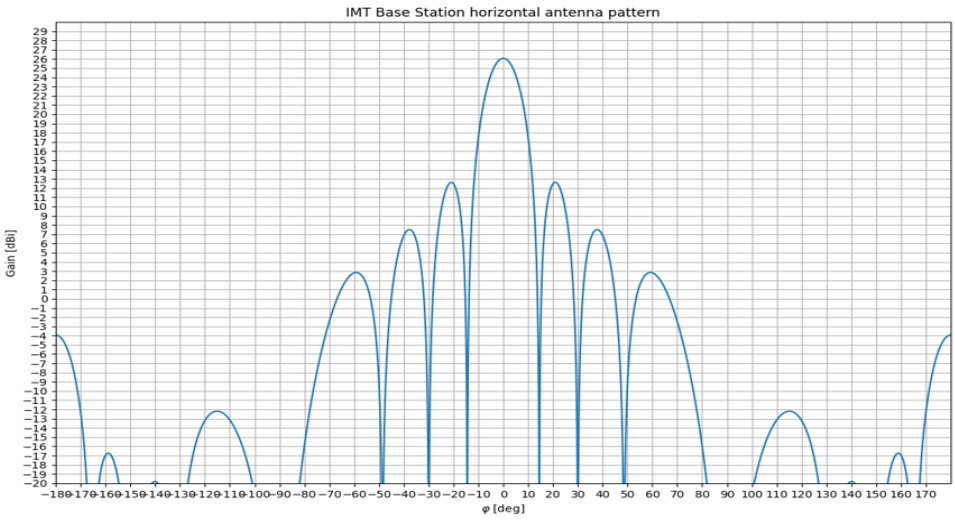


Fig.4(b) – Diagrama de radiação no plano horizontal na frequência 3,45 GHz.

3.2 Canal de Propagação

O canal de propagação foi modelado considerando a principal referência de quando se avalia o desempenho de sistemas 5G, tanto na ITU, quanto no 3GPP, que é o Relatório Técnico 3GPP TR 38.901 (3GPP, 2018).

3.2.1 Modelo TR 38.901 (versão 15.0.0 *Release* 15)

O modelo de propagação 3GPP TR 38.901 segue o formato ABC (ou Alfa-Beta-Gama) para perda de percurso (*path loss*), com um parâmetro representando um valor fixo (A), outro que varia em função da distância (B), e o terceiro que varia em função da frequência (C). Adicionalmente, há variações em função se o enlace ERB-UE está em visada direta (LOS – *line of sight*) ou não (NLOS – non-*line of sight*), assim como possível ajustes em função das alturas das antenas da ERB e do UE. Além disso, se considera o desvanecimento por sombreamento (SF – *Shadow Fading*), modelado pela adição de uma variável aleatória gaussiana, de média zero e desvio-padrão σ_{SF}.

A Tabela 2 apresenta o equacionamento implementado para o ambiente urbano de macro células.

Tabela 2: Modelo de Propagação 3GPP para Ambiente Macro Urbano

UMa	LOS	$PL_{\text{UMa-LOS}} = \begin{cases} PL_1 & 10\text{m} \le d_{2D} \le d'_{BP} \\ PL_2 & d'_{BP} \le d_{2D} \le 5\text{km} \end{cases}$, see note 1 $PL_1 = 28.0 + 22\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c)$ $PL_2 = 28.0 + 40\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c) - 9\log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2)$	$\sigma_{SF} = 4$	$1.5\text{m} \le h_{UT} \le 22.5\text{m}$ $h_{BS} = 25\text{m}$
	NLOS	$PL_{\text{UMa-NLOS}} = \max(PL_{\text{UMa-LOS}}, PL'_{\text{UMa-NLOS}})$ for $10\text{m} \le d_{2D} \le 5\text{km}$ $PL'_{\text{UMa-NLOS}} = 13.54 + 39.08\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c) - 0.6(h_{UT} - 1.5)$	$\sigma_{SF} = 6$	$1.5\text{m} \le h_{UT} \le 22.5\text{m}$ $h_{BS} = 25\text{m}$ Explanations: see note 3

Ademais, para avaliar se determinado enlace ERB-UE está em situação de LOS ou NLOS, se sorteia um número entre 0 e 1, e se calcula a probabilidade de o enlace estar em situação de LOS. Se o número sorteado for menor ou igual a probabilidade de LOS (Pr_{LOS}), então se utiliza a fórmula de PL para o cenário LOS, senão NLOS. O cálculo de Pr_{LOS} para ambiente macro urbano é feito conforme as equações a seguir:

UMa	$\Pr_{LOS} = \begin{cases} 1 & , d_{2D\text{-}out} \le 18\text{m} \\ \left[\frac{18}{d_{2D\text{-}out}} + \exp\left(-\frac{d_{2D\text{-}out}}{63}\right)\left(1 - \frac{18}{d_{2D\text{-}out}}\right)\right]\left(1 + C'(h_{UT})\frac{5}{4}\left(\frac{d_{2D\text{-}out}}{100}\right)^3 \exp\left(-\frac{d_{2D\text{-}out}}{150}\right)\right) & , 18\text{m} < d_{2D\text{-}out} \end{cases}$ where $C'(h_{UT}) = \begin{cases} 0 & , h_{UT} \le 13\text{m} \\ \left(\frac{h_{UT} - 13}{10}\right)^{1.5} & , 13\text{m} < h_{UT} \le 23\text{m} \end{cases}$

3.2.2 Perda por Penetração em Prédios (BEL - *Building Entry Loss*)

A perda de percurso total considera além da PL calculada no item 3.2.1, a perda por penetração. A ITU indica o uso da Recomendação ITU-R Rec.P.2109-2 (*Prediction of building entry loss*).

Basicamente, neste modelo, há dois tipos de prédios, a saber: (i) sem tratamento térmico (ou prédio tradicional); (ii) termicamente eficiente. A maioria dos prédios no Brasil não tem tratamento térmico, assim, o modelo utilizado para perda por penetração em prédio (BEL) considerou a opção de prédio tradicional (tipo (i)).

Um ponto que merece destaque é que foi feita a **comparação entre a BEL estimada nas frequências de 3,45 GHz e de 6,725 GHz**. **A mediana da BEL (prédio tradicional) nessas duas frequências tem uma diferença de apenas 1,2 dB**. A Fig.3 apresenta a distribuição de frequência acumulada (CDF) para a perda por penetração em prédio tradicional nessas duas radiofrequências.

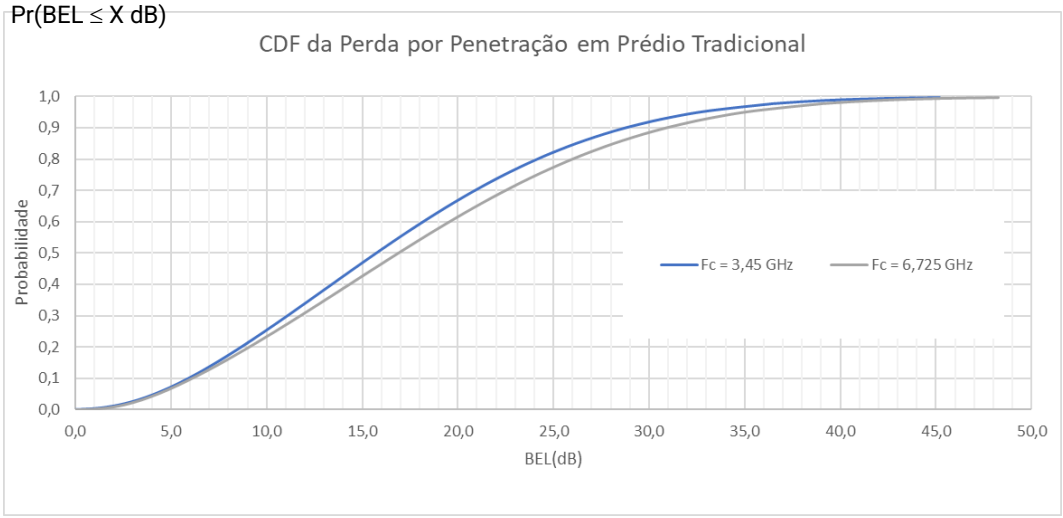


Fig.3 – CDF da perda por penetração em prédio tradicional nas frequências de 3,45 GHz e 6,725 GHz.

3.3 Cálculo de Desempenho

As equações a seguir aproximam a vazão (*throughput*) em um canal com um determinado SINR (dB), ao usar a adaptação de enlace:

$$Throughput\ (SINR), bps/Hz\ = \begin{cases} 0 & para\ SINR < \ SINR_{MIN} \\ \alpha \cdot S(SINR) & para\ SINR_{MIN} \leq SINR < SINR_{MAX} \\ \alpha \cdot S(SINR_{MAX}) & para\ SINR\ \geq\ SINR_{MAX} \end{cases}$$

onde:

$S(SINR)$ Limite de Shannon, $S(SINR) = \log_2(1 + 10^{SINR/10})$ (bps/Hz);

α Fator de atenuação, representando a implementação de perdas;

$SINR_{MIN}$ SINR mínimo do conjunto de códigos, dB;

$SINR_{MAX}$ SINR máximo do conjunto de códigos, dB.

A Tabela 3 apresenta os parâmetros que descrevem o desempenho básico do nível de enlace para a tecnologia 5G NR.

Tabela 3: Parâmetros que descrevem o desempenho básico do nível de enlace para o 5G NR

Parâmetro	DL	UL	Notas
α	0,6	0,4	Representa a perda de implementação
$SINR_{MIN}$, dB	−10	−10	Baseado em QPSK, taxa de 1/8 (DL) e taxa de 1/5 (UL)
$SINR_{MAX}$, dB	30	22	Baseado em 256-QAM, taxa de 0,93 (DL) e 64-QAM, taxa de 0,93 (UL)

4 – Parâmetros de Entrada

As Tabelas 4 e 5 apresentam os parâmetros utilizados para os sistemas IMT.

Tabela 4: Parâmetros relacionados à implantação de ERB IMT em 6/7 GHz e em 3,5 GHz

	Macro urbano (6/7 GHz)	**Macro urbano (3,5 GHz)**
Altura da antena	18 m	20 m
Setorização	3 setores	3 setores
Raio do setor	**300 m**	**400 m**
Reuso de frequências	1	1
Largura típica de faixa	100MHz	100MHz
Fator de carga da rede (probabilidade do setor estar ativo X%)	20%	20%
TDD / FDD	TDD	TDD
Fator de atividade da ERB TDD	75%	75%
Figura de ruído (dB)	6	6

Tabela 5: Parâmetros da UE operando em 3,5 GHz e em 6/7 GHz

	Macro urbano
Uso de UE em ambiente interno	70%
Perda de penetração de UE em ambiente interno	Rec. ITU-R P.2109
Densidade de equipamentos do usuário para terminais que transmitem simultaneamente **(Nota 1)**	3 UEs por setor
Altura do UE	1,5 m
Potência média de saída do terminal do usuário	Conforme controle de potência de transmissão

	Macro urbano
Ganho típico de antena para UE	−4 dBi
Perda corporal	4 dB
Fator de atividade UE TDD	25%
Modelo de controle de potência	Recomendação ITU-R M.2101 Anexo 1, seção 4.1
Potência máxima de UE, PCMAX	23 dBm
P0_PUSCH, valor de potência alvo por RB (em dBm) **(Nota 2)**	−92,2
Fator de compensação da perda de percurso, α (equivalente a "*balancing factor*" na Rec. ITU-R M.2101)	0,8
Figura de ruído (dB)	9

Nota 1: Os UEs compartilham igualmente a largura de faixa do canal, ou seja, cada UE recebe 1/3 da largura de faixa do canal (ver Rec. ITU-R M.2101, Seção 3.4.1, item 1e-f.). Nos estudos de compartilhamento, assume-se que o feixe AAS BS se forma em direção a cada UE usando toda a matriz.

Nota 2: A potência alvo é definida por RB, considerando largura de faixa do RB de 180 kHz correspondente ao espaçamento de subportadora de 15 kHz.

5 - Resultados

Definidos os parâmetros de simulação, foi avaliado o desempenho do sistema IMT (5G) operando em 3,5 GHz e em 6/7 GHz (frequências centrais em 3.450 MHz e em 6.725 MHz). Em cada cenário, foram simulados 2.000 *snapshots*, o que geram mais de 68 mil cálculos de enlaces ERB-UE (2.000 x 57 x 0,2 x 3).

Observa-se da simulação de *downlink*, Fig.4, que para o 6/7 GHz mais de 1/3 dos usuários estariam operando com máxima eficiência, e mais de 50% dos usuários com eficiência superior a 70% do máximo. De uma maneira não intuitiva, os resultados de 6/7 GHz foram

melhores do que os resultados em 3,5 GHz, e isso será detalhado na próxima Seção. Usuários que não estejam em uma posição propícia para fechar um enlace em 6/7 GHz ou em 3,5 GHz (baixo SINR) são atendidos em frequências mais baixas.

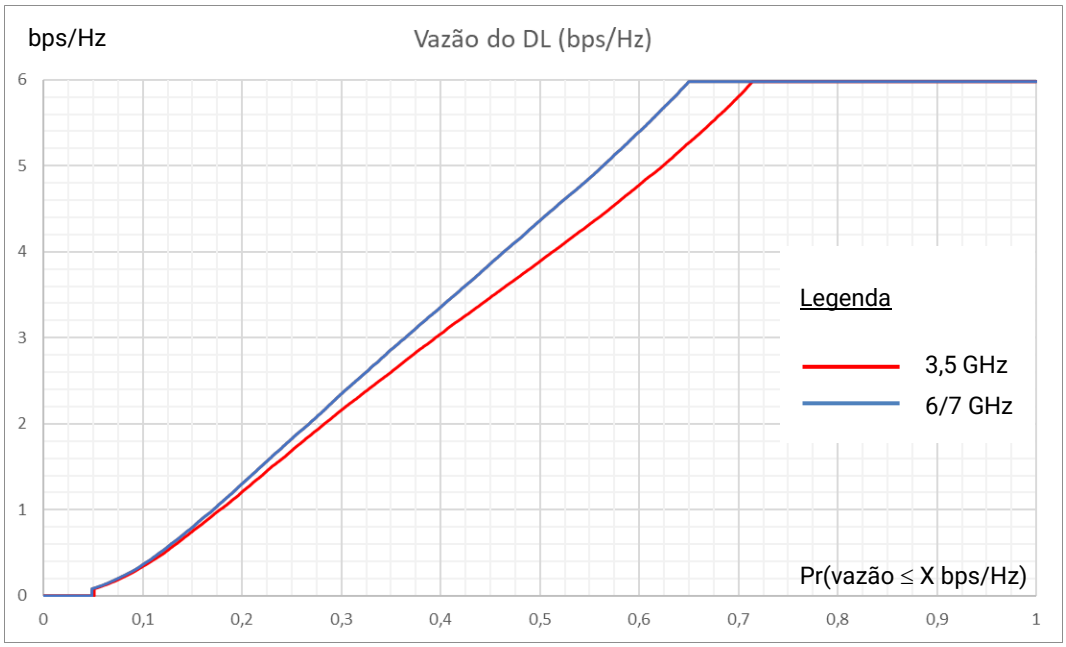


Fig. 4 – CDF da vazão (bps/Hz) no *downlink*. Mais de 1/3 dos usuários em 6/7 GHz estariam com a eficiência máxima.

Em relação a simulação de *uplink*, a Fig.5 mostra que, satisfatoriamente, quase 30% dos usuários em 6/7 GHz estariam operando com a máxima eficiência, e quase 50% desses usuários estariam operando com a metade da eficiência máxima. Como esperado, um percentual superior de usuários, em relação ao enlace de *downlink*, não teria um SINR razoável, de tal forma que, na prática, se conectariam à ERB em frequências mais baixas. Os resultados em 6/7 GHz para *uplink* também foram superiores aos resultados do 3,5 GHz, e o racional desse fenômeno será detalhado na próxima Seção.

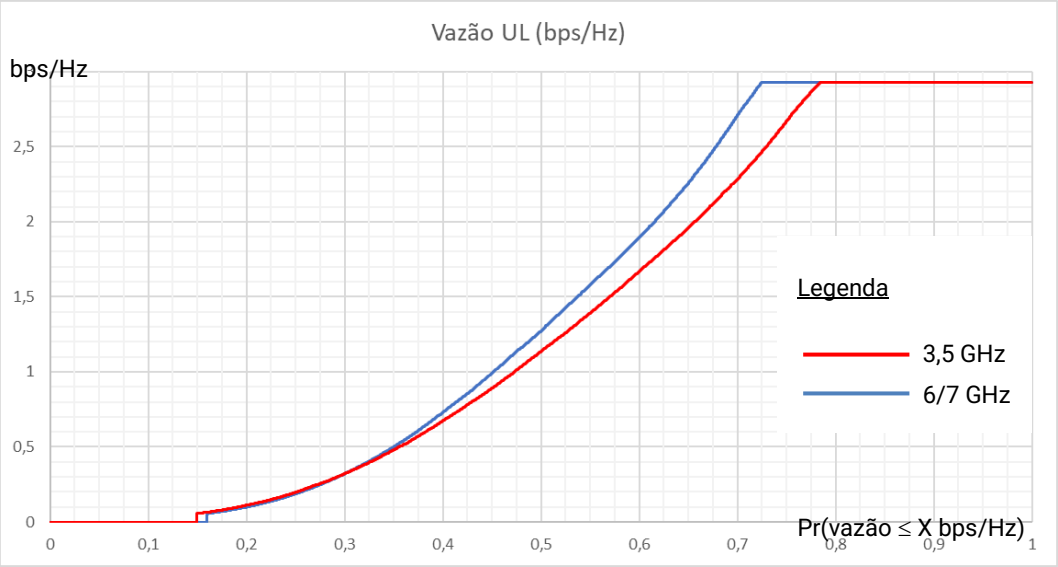


Fig. 5 – CDF da vazão (bps/Hz) no *uplink*. Quase 30% dos usuários em 6/7 GHz estariam com a eficiência máxima.

Avaliando isoladamente os desempenhos dos sistemas em 3,5 GHz e em 6/7 GHz, parte desses resultados pode ser explicado pelo modelo de simulação da ITU, que considera o cenário "*full buffer*", isto é, sempre todos os RB são utilizados dentro de um setor, aumentando a chance de interferências intercelular, o que na prática, seriam minimizadas pela comunicação entre ERB's, a fim de fazer uma alocação mais eficiente de RB. Assim, os números apresentados nessa simulação são conservadores. Adicionalmente, uma simulação com um percentual menor de usuários em ambientes internos tende a apresentar melhores números (ex. 20% ou 50%, ao invés de 70% de usuários *indoor*), assim como uma alocação menor RB aumentará a eficiência no *uplink*. P.ex., se ao invés de alocar 1/3 dos RB para cada UE, fosse alocado menos RB, além de aumentar o nível SNR (sinal sobre ruído), o nível de interferências tenderia a diminuir, com um potencial de impactar positivamente a relação SINR, consequentemente, o *throughput* médio.

Os resultados apresentados neste trabalho são compatíveis com aqueles apresentados no artigo de Morini *et al* (2023), corroborando que o uso do IMT em 6/7 GHz será importante para garantir um *trade-off* capacidade e cobertura.

6 – Análise Complementar da Comparação entre 3,5 GHz e 6/7 GHz

Um importante resultado intermediário que deve ser avaliado é a CDF da perda de percurso, incluindo a perda por penetração, apresentado na Fig. 6. Percebem-se situações em que o usuário pode estar afastado da ERB, em uma área com sombreamento, e em ambiente *indoor*. Quanto mais distante da ERB, maiores as chances do usuário se encontrar sem visada direta à antena *beamforming*. Para referência, a mediana para a perda de percurso para um usuário sem visada direta à ERB, a 300m da fonte do sinal, é de 127 dB para 6.725 MHz, e de 126 dB a 400m da fonte do sinal na frequência de 3.450 MHz. Essa diferença ocorre porque em um ambiente NLOS, no modelo (3GPP, 2018), a potência do sinal decai com o expoente de 3,908 em relação a distância, e decai com o expoente de 2 em relação a frequência, de tal forma a gerar uma diferença, na mediana, de apenas 1 dB na borda de cada célula. Por outro lado, a interferência agregada em 3,5 GHz tende a ser superior em relação a interferência agregada em 6/7 GHz, pelo mesmo motivo apresentado anteriormente, de tal forma a gerar uma maior degradação na SINR.

Dessa forma, o que estaria ocorrendo é que os usuários em 6/7 GHz, como estão em um *grid* de raio de 300 m, estão, na média, mais próximos da ERB comparado com os usuários da faixa de 3,5 GHz, que estão distribuídos uniformemente em uma área de cobertura de raio de 400 m. Como já explicado anteriormente, a probabilidade de não estar em visada direta aumenta com a distância, e o modelo de propagação NLOS resulta em uma atenuação mais acelerada do sinal. A Fig.6 mostra o cruzamento das curvas de perdas de percurso (incluindo BEL) entre as duas faixas, onde inicialmente o 3,5 GHz tem uma perda de percurso menor, mas devido a ocorrência de usuários mais distantes, a probabilidade de NLOS aumenta, e a perda em 6/7 GHz acaba sendo menor em uma região entre os percentis aproximados de 13% e 50%. Como a interferência co-canal em 3,5 GHz acabou sendo maior em relação a outra faixa estudada, o SINR e consequentemente a vazão em 6/7 GHz apresentou resultados ligeiramente superiores.

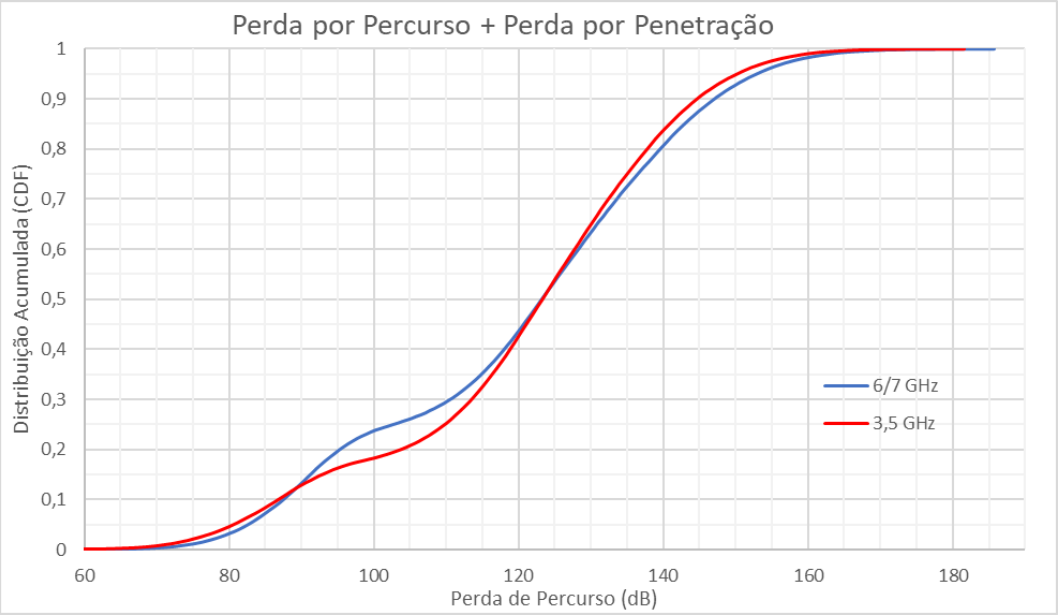


Fig. 6 – CDF da perda por percurso (total), incluindo a perda por penetração. O raio da célula em 3,5GHz é de 400m e em 6/7 GHz é de 300m.

A análise combinada das Fig.5 e 6 sugere que a alocação eficiente de RB dos usuários das faixas em 3,5 GHz e 6/7 GHz possibilitaria que os 16% de usuários em 6/7 GHz e 15% de usuários em 3,5 GHz que não teriam fechado o enlace de *uplink* na Fig.5 poderiam ser reduzidos para menos de 5%. Isto é, mais de 95% dos usuários poderiam se conectar no *downlink* e *uplink* na faixa de 6/7 GHz ou de 3,5 GHz, porém, a ERB que decidirá em qual faixa o usuário acampará, em função do balanceamento de carga e de qualidade do SINR. Além disto, a seleção adequada de RB reduzirá a degradação de SINR para todas as ERB's e os usuários.

Adicionalmente, para complementar as simulações que utilizaram os parâmetros de entrada indicados pela ITU, se realizaram simulações adicionais considerando as seguintes alterações em relação ao sistema em 3,5 GHz: (i) redução no raio da célula para 300 m; e (ii)

altura da antena para 18 m (indicando o possível uso das duas faixas de frequências na mesma antena).

A Fig.7 demonstra que os resultados para o *uplink* apresenta um ganho relevante na eficiência espectral do 3,5 GHz, quando as faixas de 3,5 GHz e 6/7 GHz operam no mesmo *grid* de 300m, que adicionalmente, trará diversos ganhos, pois a mesma infraestrutura será utilizada por ambos os sistemas, inclusive a mesma antena poderá abarcar os elementos tanto do 3,5 GHz, quando do 6/7 GHz.

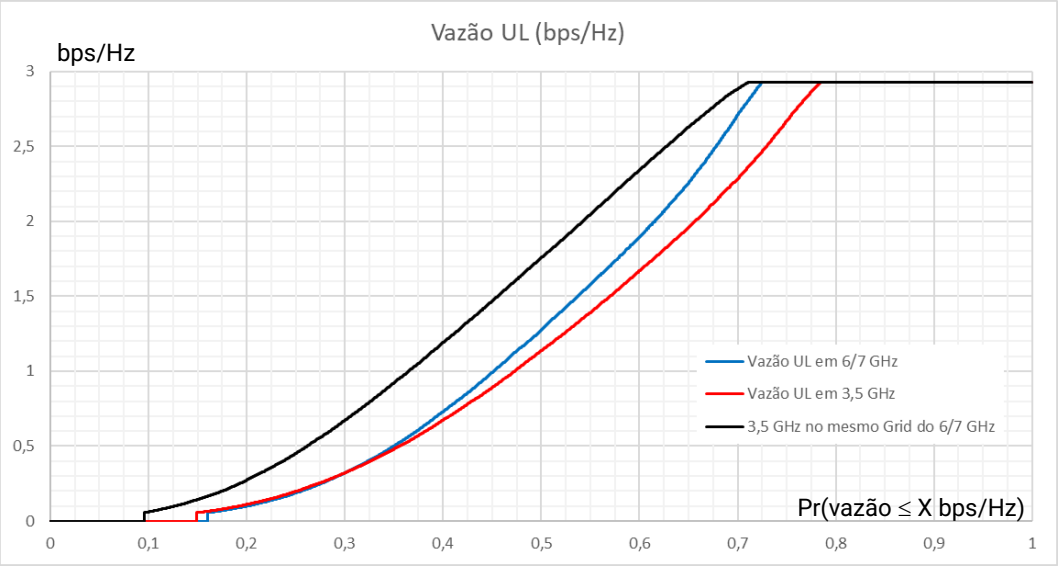


Fig. 7 – CDF da vazão (bps/Hz) no *uplink* com o 3,5 GHz compartilhando o *grid* do 6/7 GHz. A eficiência espectral do 3,5 GHz irá aumentar pelo incentivo em ter um *grid* único com o 6/7 GHz, gerando diversos ganhos.

Também foi simulado o *downlink* do 3,5 GHz no *grid* de 300m, que gerou uma melhoria em sua eficiência espectral em relação ao *grid* de 400m, apesar do acréscimo de interferências entre células, sugerindo a necessidade de outros ajustes, p.ex., relacionados a potência radiada.

7 – Comentários Finais

Este trabalho utilizou modelos de simulação da ITU para demonstrar a viabilidade do uso da faixa de frequências de 6/7 GHz no cenário macro urbano, comparando o resultado de desempenho dessa faixa, com a faixa de 3,5 GHz.

Nos cenários simulados, a maioria dos usuários conseguiu conexão com alta eficiência espectral, seja em ambiente *indoor* ou *outdoor*. Estes resultados são compatíveis com recente artigo científico, que avaliou com medições em campo o desempenho de sistemas 5G operando na faixa de 6/7 GHz (Morini *et al*, 2023).

No *downlink* da faixa de 6/7 GHz, mais de 1/3 dos usuários estariam operando com máxima eficiência, e mais de 50% dos usuários com eficiência superior a 70% do máximo. Por outro lado, também considerando os parâmetros de entrada da ITU para o 3,5 GHz, em seu *downlink*, quase 30% dos usuários estariam operando com máxima eficiência. Esses resultados são bem promissores e demonstram o potencial de melhoria na experiência do usuário com o uso da faixa de 6/7 GHz.

A análise de resultados do *uplink* é mais complexa e deve ser efetuada em perspectiva, pois sistemas reais implementam controle de acesso ao meio que busca minimizar a interferência intercelular. Adicionalmente, a alocação de recursos de blocos é dinâmica, inclusive na quantidade de RB. A combinação desses elementos melhora significativamente o desempenho, e não está incluída na metodologia da ITU.

Dos resultados da simulação, deriva-se que mais de 95% dos usuários que tentassem conexão na faixa 6/7 GHz poderiam ser servidos pela referida rede. Porém, a ERB que decidirá em qual faixa acampará o usuário, em função do balanceamento de carga e da qualidade do SINR. Em outras palavras, usuários que não estejam em uma posição propícia para fechar um enlace em 6/7 GHz (baixo SINR) serão atendidos em frequências mais baixas.

Quando se considera o 6/7 GHz e o 3,5 GHz operando no mesmo *grid*, isto é, células com raio de 300 m, obtém-se um ganho de desempenho no 3,5 GHz, justamente por seus usuários estarem também mais próximos da ERB. Esses resultados confirmam que o uso combinado do

3,5 GHz com o 6/7 GHz trazem ganhos de escala e de escopo (ex. faixas de 3,5 GHz e 6/7 GHz operando na mesma antena, aumentando a eficiência espectral do 3,5 GHz por estar no mesmo *grid* do 6/7 GHz).

Concluindo, o presente estudo corrobora que o uso da faixa de 6/7 GHz para IMT será importante para garantir um *trade-off* capacidade e cobertura, possuindo características complementares e sinergias com a operação em 3,5 GHz, e será importante para atender a necessidade crescente de espectro por sistemas 5G e evoluções em bandas intermediárias.

Referências Bibliográficas

MWL, 2022. "3GPP officially completed the specification of the upper 6GHz licensed band for 5G", Mobile World Live, 10 de junho de 2022. Disponível em https://www.mobileworldlive.com/huawei-updates/3gpp-officially-completed-the-specification-of-the-upper-6ghz-licensed-band-for-5g/

ITU, 2017. "Modelling and simulation of IMT networks and systems for use in sharing and compatibility studies". União Internacional de Telecomunicações. Disponível em: https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2101

ITU, 2021. "Report on the 38th meeting of Working Party 5D (e-Meeting, 7-18 June 2021), Capítulo 4, Anexo 4.4". Disponível em https://www.itu.int/md/R19-WP5D-C-0716/en

3GPP, 2018. "5G: Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 version 15.0.0 Release 15)". Disponível em https://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/38_series/38.901/38901-f00.zip

Morini, Marcello, *et al.* 2023. "Will the Upper 6 GHz Bands Work for 5G NR? A Urban Field Trial". WiNTECH '23: Proceedings of the 17th ACM Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental evaluation & Characterization,October 2023. Disponível em https://dl.acm.org/doi/10.1145/3615453.3616517