

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS Faculdade de Tecnologia - FT Engenharia de
Telecomunicações

André Luiz Lima Da Silva R.A.:164090

Francisco de Oliveira Régis R.A.:167677

Orientador: Leandro Ronchini Ximenes

Estudo acerca da transmissão de sinais nas redes móveis de quinta geração.

Dezembro de 2020

Limeira - São Paulo

“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino”. (Leonardo da Vinci

AGRADECIMENTOS

Agradecemos
primeiramente a DEUS pois sem ele nada
seria possível

aos nosso país pelo fundamental
apoio fornecido durante todo período

ao nosso orientador pelo direcionamento e
suporte ao trabalho

a UNICAMP e a faculdade de tecnologia
pela oportunidade de adquirir novos
conhecimentos

e por fim, aos integrantes da
banca que nos deram a honra de sua
participação e nos auxiliaram ao longo de
nossa formação

RESUMO

As redes de comunicações móveis de 5ª Geração ou 5G estão em fase de implementação no país, porém devido a alguns entraves gerados pela *COVID-19* o leilão de frequências para o 5G somente deve ocorrer em 2021. Devido à limitação de investimentos e infraestrutura de redes deste tipo no país, existem poucas ferramentas para determinar o desempenho de redes 5G em território nacional. Nesse trabalho, serão abordadas as funcionalidades de um *software* de modelagem de canal, chamado de Quadriga. Aqui serão apresentadas simulações, realizadas por meio do Quadriga, nas faixas de frequência esperadas para o 5G no Brasil e uma análise de seu desempenho conforme variam-se alguns parâmetros da simulação, como o trajeto e a velocidade de um receptor móvel.

Palavras-chave: 5G, Massive MIMO, MIMO, Quadriga, mmWave, BeamForming.

ABSTRACT

The 5th Generation or 5G mobile communications networks are being implemented in the country, but due to some obstacles generated by COVID-19, the frequency auction for the 5G should only occur in 2021. Resulting from the limitation of investments and infrastructure of networks of this type in the country, there are tools to determine the performance of 5G networks in the national territory. In this work, they will be approached as characteristics of a channel modeling software, called Quadriga. Here will be presented simulations, carried out by Quadriga, in the expected frequency ranges for 5G in Brazil and an analysis of its performance as some simulation parameters vary, such as the path and speed of a mobile receiver.

Key-words: 5G, Massive MIMO, MIMO, Quadriga, mmWave, BeamForming.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Esquemático das possíveis aplicações do 5G
- Figura 2 - Desvanecimento em pequena escala.
- Figura 3 - Formas de exploração de diversidade.
- Figura 4 - Funcionamento do beamforming de acordo com o número de arranjos
- Figura 5 - Ganhos em vazão de dados observado por usuários com conexão 5G mmwave
- Figura 6 - Visão geral simplificada da modelagem usada no Quadriga.
- Figura 7 - Passos para o cálculo dos coeficientes de canal com evolução temporal.
- Figura 8 - Rota utilizada para a simulação.
- Figura 9 - Rota Configurada no Quadriga para simulação.
- Figura 10 - Perfil de Movimento do Veículo ao longo do tempo.
- Figura 11 - Mapa de calor para o transmissor localizado em P1.
- Figura 12 - Variação de potência recebida pelo tempo ao longo da trajetória para 3,6 GHz.
- Figura 13 - Variação de potência em relação à distância para 3,6 GHz.
- Figura 14 - Antena localizada no ponto P5 e direção do feixe em 135°.
- Figura 15 - Variação de potência recebida pelo receptor com o transmissor no ponto P5 para 3,6 GHz.
- Figura 16 - Antena localizada em P7 e direção do feixe em 315°.
- Figura 17 - Variação de potência recebida pelo receptor com transmissor no ponto P7 e ângulo em 315 com operação em 3,6 GHz.
- Figura 18 - Antena localizada em P3 e direção do feixe em 300°.
- Figura 19 - Variação de potência recebida pelo receptor com transmissor no ponto P3 e direção do feixe em 300° com operação em 3,6 GHz.
- Figura 20 - Mapa de calor para antena localizada em P7 para operação em 28 GHz com beamforming
- Figura 21 - Variação de potência recebida pelo receptor com o transmissor operando em 28 GHz utilizando beamforming.
- Figura 22 - Transmissor localizado no P4 e mapa de calor, esta figura não leva em conta o cenário utilizado e LOS/NLOS, somente a perda de potência no espaço livre nas coordenadas.
- Figura 23 - Transmissor localizado em P3 e direção do feixe em 105° (3,6 GHz).

Figura 24 - Perfil de potência recebida pelo receptor com o transmissor em P3 para operação em 3,6GHz.

Figura 25 - Transmissor localizado em p5 e direção do feixe em 270° (3,6 GHz).

Figura 26 - Perfil de potência recebida pelo receptor com o transmissor em P5 operando em 3,6 GHz.

Figura 27 - Mapa de calor com transmissor localizado em P1 com o transmissor operando em 28 GHz utilizando beamforming.

Figura 28 - Variação de potência recebida pelo receptor com o transmissor localizado em P1 operando em 28 GHz utilizando beamforming.

Figura 29 - Mapa de calor com transmissor localizado em P3 com o transmissor operando em 28 GHz utilizando beamforming.

Figura 30 - Variação de potência recebida pelo receptor com o transmissor localizado em P3 operando em 28 GHz utilizando beamforming.

Figura 31 - Mapa de calor o transmissor localizado em P5 Variação operando em 28 GHz utilizando beamforming.

Figura 32 - Variação de potência recebida pelo receptor com o transmissor localizado em P5 operando em 28 GHz utilizando beamforming.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Conjuntos de cenários fornecidos juntamente com o software padrão.

Tabela 2 - Resumo dos Cenários utilizados para cada ponto.

Tabela 3 - Potência Recebida(dBm) (3,6 GHz)

Tabela 4 - Potência Recebida(dBm) (30 GHz)

Tabela 5 - Tabela de coeficientes de canal para 3,6 GHz

Tabela 6 - Tabela de coeficientes de canal para 30 GHz

Tabela 7 - Razão entre $\frac{P_r}{P_t}$ (3,6 GHz)

Tabela 8 - Razão entre $\frac{P_r}{P_t}$ (30 GHz)

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- 1G** - Primeira Geração de Tecnologia Móvel
- 2G** - Segunda geração de tecnologia de telefonia móvel
- 3G** - Terceira geração de tecnologia de telefonia móvel
- 3GPP** - Third Generation Partnership Project
- 4G** - Quarta geração de tecnologia de telefonia móvel
- 5G** - Quinta geração de tecnologia de telefonia móvel
- AMPS** - Advanced Mobile Phone System
- BS** - Base Station
- CDMA** - Code Division Multiple Access
- CDMA-2000** - Code Division Multiple Access
- COVID-19** - Corona Virus Disease 2019
- CSI** - Channel State Information
- D2D** - Device to Device
- eMBB** - enhanced Mobile Broadband
- mMTC** - massive Machine Type Communications
- FDD** - Frequency Division Duplexing
- FDMA** - Frequency Division Multiple Access
- FEC**-Forward error correction
- FFSK** - Fast Frequency Shift Keying
- FM** - Modulação em Frequência
- GMSK** - Gaussian Minimum Shift Keying
- GPRS** - General Packet Radio System
- GSM** - Global System Mobile
- GSM EDGE** - Enhanced Data rates for GSM Evolution
- HSPA** - High-Speed Packet Access
- HSPA+** - Evolved High Speed Packet Access
- IEEE** - Institute of Electrical and Electronics Engineers
- IMT** - International Mobile Telecommunications
- IMT** - Advanced - International Mobile Telecommunications-Advanced
- IMT-2000** - International Mobile Telecommunications-2000

IoT - Internet of Things
ITU-R - International Telecommunication Union- Radiocommunication Sector
LTE - Long Term Evolution
LOS - Line of Sight
LSPs - Large Scale Parameters
M2M - Machine to Machine
MIMO - Multiple Input Multiple Output
MT - Mobile Terminal
NLOS - Non Line of Sight
NMT - Nordic Mobile Telephone
OFDM - Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
O2I - Outdoor-to-Indoor
Quadriga - QUAsi Deterministic RadIo channel GenerAtor
RF - Rádio frequência
RMS - Root mean square
SCM - 3GPP Spatial Channel Model
SNR - Signal-to-Noise Ratio
SSG - Sequence State Generator
TACS - Total Access Communication System
TCP/IP - Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TDD - Time Division Duplexing
UHF - Ultra High Frequency
TDMA - Time Division Multiple Access
UIT - União Internacional de Telecomunicações
UMTS - Universal Mobile Telecommunications Service
URLLC - Ultra Reliable Low Latency Communications
VoIP - Voice Over Internet Protocol
WCDMA - Wideband CDMA
WLAN - Wireless Local Area Network
WSSUS - Wide-Sense Stationary Uncorrelated Scattering

SUMÁRIO

1.Introdução	12
1.2 Objetivo e justificativa do projeto.	13
2.Fundamentos Teóricos do trabalho	15
2.1 Evolução da tecnologia	15
2.3 Aplicações do 5G	17
2.4 Desvanecimento de Larga Escala	19
2.5 Desvanecimento de Pequena Escala.	21
2.6 Diversidade Espacial	23
2.7 <i>Massive MIMO</i>	25
2.8 <i>Beamforming</i>	26
2.9 Ondas milimétricas	27
3. Introdução ao Quadriga	28
3.1 Fluxo do programa Quadriga	31
3.3 Cenários de propagação	35
4. Simulações	37
4.1 Transmissor fixo e receptor móvel	37
4.2 Transmissor em diversos pontos	42
4.3 Simulações usando beamforming	45
4.4 Tabela de coeficientes de Canal	47
5. Conclusões e perspectivas	52
6. Referências bibliográficas	53
7. Anexos	56

1.Introdução

Dito de forma simplificada, pode-se dizer que o padrão de comunicações móveis de quinta geração (também conhecida como 5G) visa melhorias sobre o padrão de telefonia atual (4G) em quase todos seus aspectos técnicos. Sua estrutura, tecnologias e protocolos viabilizam novos serviços, como uma rede mais rápida, de menor latência de comunicação e com um suporte maior a um número massivo de usuários. O aumento do tráfego global causado pelo crescimento exponencial de serviços de streaming, realidade virtual e aumentada, bem como o simples fato do aumento de usuários, vêm se tornando um grande desafio para as atuais redes 4G instaladas. Em um curto prazo essas redes não suportariam a demanda pelo gigantesco volume de dados. As previsões da Ericsson apontam que o tráfego de dados móveis crescerá cerca de 43% ao ano, atingindo 107 exabytes (EB) por mês até o final de 2023 [1].

Associado ao aumento do tráfego global está o surgimento de novas tecnologias e conceitos como a Internet das Coisas (IoT – *Internet of Things*), Comunicação Dispositivo a Dispositivo (D2D) e Comunicação Máquina a Máquina (M2M), que trazem consigo variados, e em geral desafiadores, requisitos de conectividade para uma boa experiência. Para atender a esses requisitos é necessária uma nova arquitetura de rede móvel e tecnologias de camada física além daquela que o atual 4G oferece [2].

De fato, é certo que as redes 5G possuem potencial para causar uma revolução em nossa sociedade. As tecnologias e conceitos D2D, M2M e IoT, já mencionadas e previstas dentro dos padrões 5G, devem trazer mudanças significativas no dia a dia das populações atendidas por estas redes. A implementação da chamada indústria 4.0, somente possível com esta tecnologia, tem o potencial de causar um grande impacto no setor produtivo em escala global e transformar os mercados globais[6].

Um ponto crítico de qualquer sistema de comunicação móvel é sua tecnologia de acesso sem fio, compreendendo as camadas física e de enlace, que conectam os dispositivos móveis com estações rádio base. Em um mundo ideal, espera-se que o 5G permita taxas de dados elevadíssimas, com cobertura quase omnipresente, além de ultra confiabilidade, baixa latência e um alta eficiência energética para um grande número de conexões heterogêneas [7].

1.2 Objetivo e justificativa do projeto.

O Brasil, na data da geração dessa monografia, encontra-se na fase de licenciamento de espectro para as redes de quinta geração. Infelizmente, ainda existem poucos estudos acerca de seus desempenhos em um cenário nacional, que levem em conta as particularidades da geografia local. Grande parte dessa limitação é devida à carência de investimentos em pesquisa em 5G, de uma infraestrutura consolidada de desenvolvimento de novas tecnologias em comunicações móveis e de uma legislação flexível e adaptada para estas novas redes.

Este trabalho pretende contribuir com um estudo de implementação do modelo de canal **Quadriga** (*QUAsi Deterministic Radio channel GenerAtor*) [18] para redes 5G. Com este modelo de canal quasi-determinístico é possível estimar o desempenho de um enlace 5G por meio de simulações mais realistas, que levem em conta o cenário de propagação do enlace e seus parâmetros de operação, mais especificamente, sua frequência de operação. O estudo foi feito utilizando-se como pano de fundo um cenário de propagação suburbano tipicamente nacional. O cenário escolhido para as simulações é a região entre a Faculdade de Tecnologia (FT-UNICAMP) e a Faculdade de Ciências Aplicadas (FCA-UNICAMP), localizadas na cidade de Limeira-SP.

O estudo leva em conta o desempenho de enlaces de transmissão nesse cenário. Mais particularmente, por meio simulações com esse modelo de canal são estimadas as potências recebidas por um terminal móvel ao longo de um trajeto que liga os dois campus. São também usadas diferentes configurações de antenas e disposições de uma estação-base ao longo do percurso, além de diferentes velocidades de deslocamento pelos terminais móveis, o que permite verificar a flexibilidade do modelo de canal em consideração, além de avaliar o que estas diferentes configurações impactariam no desempenho do enlace caso ele fosse implementado na vida real.

1.3 Organização da monografia

Esta monografia de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) está dividida em 7 seções. Na Seção 2 são apresentados os fundamentos teóricos do trabalho, incluindo uma rápida passagem pela evolução da telefonia celular, além de conceitos teóricos e superficiais sobre desvanecimento de canal, MIMO massivo e ondas milimétricas. Recomenda-se a leitura dessa seção ao leitor não familiarizado com este tópico, já que ela é necessária para a compreensão das seções seguintes.

Na Seção 3 é feita a introdução ao *software* de simulação que utiliza o modelo de canal Quadriga, apresentando seu funcionamento e uma breve introdução acerca de seu funcionamento. Na Seção 4 são apresentadas as simulações desenvolvidas, incluindo simulações com: diferentes frequências de operação da onda portadora; diferentes segmentos de deslocamento do terminal móvel, considerando variação da velocidade do receptor; uso de diferentes padrões de radiação, considerando a utilização de formatação de feixe (*beamforming*); construção de matrizes de canais a partir das medidas de potência do sinal recebido.

Por fim, na Seção 5 é apresentada a conclusão e perspectivas, seguida pela Seção 6 de referências bibliográficas e da Seção de Anexos.

2. Fundamentos Teóricos do trabalho

Nesta seção serão abordados tópicos que colaboram com o entendimento do funcionamento do software Quadriga. Será apresentada uma breve passagem pelas gerações de telefonia móvel já lançadas, bem como uma revisão de determinados conceitos acerca das comunicações móveis.

2.1 Evolução da tecnologia

A comunicação sem fio pode ser resumida na transferência de informação à distância sem o uso de condutores elétricos ou cabos [3]. Pode se dizer que esse tipo de comunicação teve início com a patenteamento do sistema de comunicação por ondas de rádio feita por Guglielmo Marconi em 1897, que desenvolveu o primeiro telégrafo sem fio [4]. À medida que a tecnologia avança e novas pesquisas são realizadas, novas gerações de redes móveis surgiram ao longo dos anos.

1G. A primeira geração de telefonia celular foi anunciada no início dos anos 80 e foi fundamental para as redes que conhecemos hoje. Utilizava modulação FM e OFDMA como método de múltiplo acesso. Diferentes padrões foram criados pelos países:

- **AMPS:** Utilizado na América do Norte, foi desenvolvido pela Bell Labs, utilizando a faixa de frequência de 824-849 MHz para canal reverso e 869-894 MHz para canal direto, cada canal possuía largura de banda de 30 kHz.
- **NMT:** Utilizado nos países nórdicos, utilizando modulação FM para canais de voz e FFSK (Chaveamento rápido de frequência) para canais de sinalização. Os países que a implementaram utilizavam diferentes faixas de frequência.
- **TACS:** Utilizado no Reino Unido e países da Europa, é uma variante do AMPS. Possuindo pequenas diferenças, foi desenvolvido pela AT&T. [5]

2G - Os sistemas de segunda geração, totalmente digitais, surgiram no mercado nos anos 90 com uma taxa de dados de 64 kbps. Com um sinal de rádio de baixa potência; as baterias para telefones com redes 2G duravam mais. Serviços como e-mail e SMS (*Short Message Service*) foram possíveis a partir dessa geração. Diferentemente de sistemas de primeira geração, os sistemas 2G utilizam técnicas de

modulação digital e técnicas de acesso múltiplo TDMA e CDMA, com duplexação na frequência FDD. A utilização de técnicas digitais permitiu maior segurança por meio de criptografia de dados, bem como maior robustez contra ruído e interferência [5]. O padrão 2G mais conhecido é o GSM.

2.5G - Nas redes GPRS foram introduzidas redes de comutação de pacotes para lidar com a transmissão de dados, enquanto a comunicação por voz digital continuava utilizando a estrutura da rede GSM. A rede GRPS utiliza a multiplexação por divisão de tempo e pode alcançar uma taxa de até 171,2 kbps. Para sua implementação a partir de uma rede GSM, torna-se necessário a implementação de novos gateways (i.e., *Serving GPRS Support Node* – SGSN e *Gateway GPRS Support Node* - GGSN), bem como atualizações de software, não havendo a necessidade de nenhuma aquisição de hardware novo na estação-base [5].

2.75G - EDGE é uma atualização avançada do padrão GSM e requer novo *hardware* e *software* nas instalações existentes. O padrão EDGE utiliza as modulações 8-PSK e GMSK (Chaveamento por deslocamento mínimo gaussiano), alcançando taxas teóricas máximas de 473,6 kbits/s. [5]

3G - As atividades do 3G foram iniciadas na Europa e na América do Norte sob os respectivos nomes: IMT-2000 (International Mobile Telecommunications-2000) e CDMA-2000 (Code Division Multiple Access). Existem muitas tecnologias 3G, como o W-CDMA (*Wideband CDMA*) também conhecido como UMTS e o CDMA-2000, ambos possuindo muitos recursos semelhantes, sendo que, a principal diferença surge no W-CDMA que é compatível com redes GSM, enquanto o CDMA-2000 é compatível com o padrão IS-95.

A característica básica da tecnologia 3G é, portanto, maior taxa de transferência de dados e maior integração com aplicações sobre IP.[5]

3.5G HSPA - O padrão HSPA, uma evolução do UMTS com taxa de transmissão em torno de 8 a 10 Mbits/s sobre uma largura de banda de 5MHz, é um dos primeiros padrões a implementar a tecnologia MIMO (*Multiple Input Multiple Output*). Pode atingir velocidades teóricas de 337 Mbit/s no *downlink* e 34 Mbit/s em *uplink*. [5]

3.75G-HSPA+ - O padrão HSPA+, uma evolução do HSPA, faz uso da tecnologia de *beamforming* em que o feixe de transmissão de uma antena é formatado para aumentar a potência no usuário de interesse. Além disso, este padrão possui suporte à arquitetura de rede ALL-IP, podendo atingir taxas de até 42,2 Mbit/s [5].

4G-LTE - O setor de telecomunicações da ITU-R (União Internacional de Telecomunicações, em português) definiu um conjunto de requisitos para os padrões 4G em março de 2008, o chamado *IMT-Advanced*. Teoricamente, atinge uma velocidade de 100 megabits por segundo em movimento e 1 gigabits por segundo em repouso. Fornece velocidades de *download* até de 100 Mbit/s e de 50 Mbit/s para *upload*. Combina a técnica de múltiplo acesso como o OFDMA e com a tecnologia MIMO [5].

4G LTE-A - (LTE-Avançado) - Padronizado em 2011, é a evolução do padrão LTE, sendo retrocompatível com o LTE, atingindo taxas teóricas de até 3,3 Gbit/s [5].

2.3 Aplicações do 5G

O 5G terá diversas aplicações para diferentes áreas. Elas usarão funcionalidades da rede de acordo com a sua necessidade. Em IMT-2020, o 5G terá como alvo três famílias de casos de uso com recursos muito distintos: *Enhanced Mobile Broadband* (eMBB), *massive Machine Type Communications* (mMTC) e *Ultra Reliable Low Latency Communications* (URLLC).

As três categorias de casos de uso do 5G são ilustradas na Figura 1.

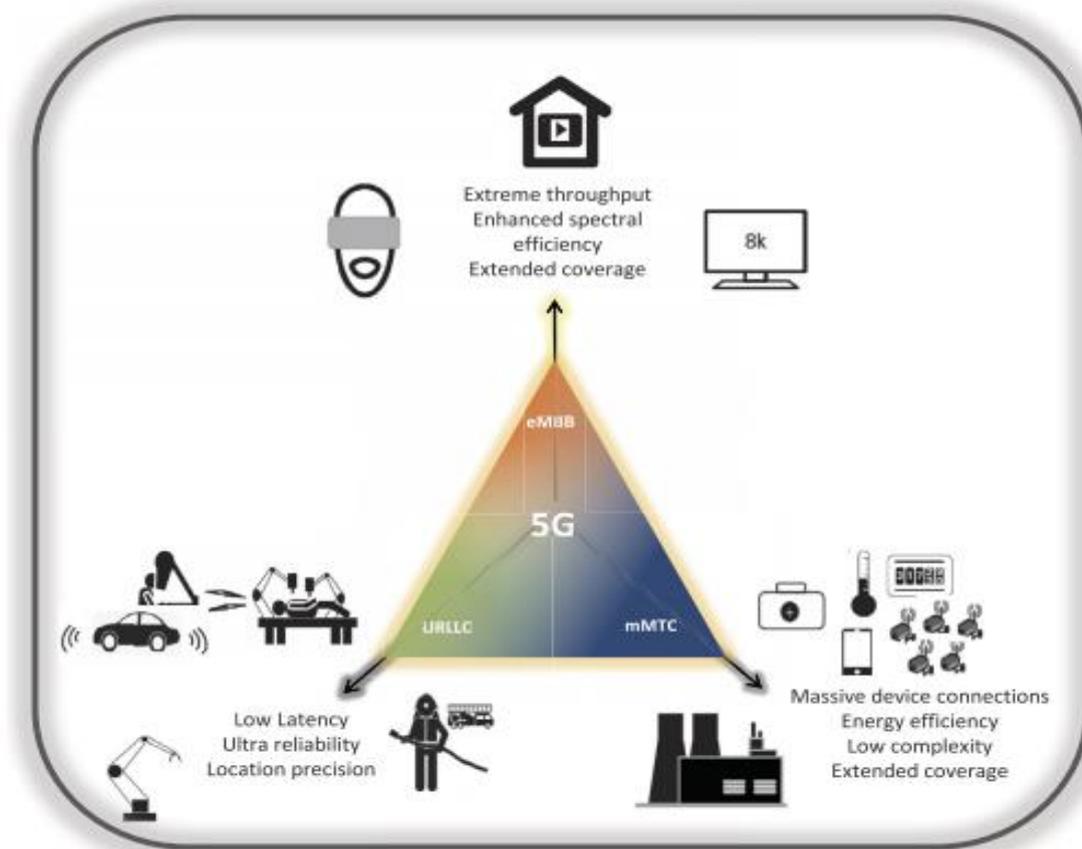


Figura 1 – Casos de uso do 5G [7]

eMBB:

Traduzido para o Português como Banda Larga Móvel Aprimorada, esta categoria é a extensão natural do cenário clássico de conectividade de banda larga móvel sob os padrões atuais de telecomunicações móveis. Ela aborda a conectividade centrada no ser humano, incluindo acesso a conteúdo, serviços e dados multimídia. Isso é feito fornecendo as altas taxas de dados que são necessárias para suportar futuros serviços de multimídia e o crescente volume de tráfego gerado por esses serviços. O caso de uso do eMBB cobre uma variedade de cenários, incluindo:

- Conectividade de *hotspot*, que é caracterizada por uma alta densidade de usuários e taxas de dados extremamente altas, mas com baixa mobilidade.
- Cobertura de área ampla, onde a densidade do usuário e as taxas de dados são menores, mas a mobilidade é maior.

mMTC:

O crescimento da Internet das Coisas está causando uma proliferação de dispositivos conectados sem fio que trafegam dados. Na verdade, espera-se que o número de tais dispositivos ultrapasse em breve o número de dispositivos que transportam tráfego gerado por humanos. O foco do mMTC é fornecer conectividade a um grande número de dispositivos, que transmitem esporadicamente uma pequena quantidade de tráfego, com baixa latência na troca de informações. Espera-se que os dispositivos mMTC tenham uma bateria de longa duração e baixíssimo consumo de energia para permitir implantações remotas. Um recurso exclusivo desse caso de uso é que os dispositivos MTC serão extremamente heterogêneos em termos de recursos, custo, consumo de energia e potência de transmissão. [7]

URLLC:

Requisitos ainda mais rigorosos de baixa latência e confiabilidade na transmissão de dados são as características que distinguem esta categoria de caso de uso. As aplicações previstas incluem controle sem fio de processos de fabricação e produção industriais, cirurgia médica remota e veículos autônomos.

2.4 Desvanecimento de Larga Escala

O caminho do sinal entre o transmissor e receptor pode variar desde uma linha de visada até obstruções severas causadas por prédios e montanhas. Em geral, os modelos de canais de rádio móvel são considerados aleatórios, já que o próprio movimento do usuário influencia na variação da potência do sinal recebido.

Quando entre transmissor e receptor existe uma linha de visada (sinal se propaga sem sofrer efeitos de reflexão, dispersão, difração etc.), comumente se utiliza o modelo de propagação no espaço livre, dado pela seguinte equação [12]:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (1)$$

Em que:

- P_r = Potência recebida
- P_t = Potência transmitida
- G_t = Ganho de potência do arranjo de transmissão
- G_r = Ganho de potência do arranjo de recepção
- λ = Comprimento de onda (portadora)
- d = Distância Entre receptor e transmissor
- L = Outras perdas

Como é possível observar na equação (2), em uma situação de propagação da onda em espaço livre, a potência ainda cai com o quadrado da distância.

A chamada perda de caminho (*path loss*) representa o grau de atenuação da potência do sinal, e é definida como a razão entre a potência transmitida efetiva e a potência recebida [12]. Na escala logarítmica a perda de caminho é dada em dB por

$$PL(dB) = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = -10 \log \left[\frac{G_t G_r \lambda^2}{4\pi^2 d^2} \right] \quad (2)$$

De forma geral, os modelos de propagação indicam que a perda de caminho em uma distância d pode ser calculada através da seguinte fórmula [13]:

$$\overline{P_L}(dB) = \overline{P_L}(d_0) + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (3)$$

em que n é o expoente de perda de caminho, variando conforme o cenário de propagação, e d_0 é uma distância arbitrária de referência.

Em geral, a fórmula mais completa da perda de caminho em larga escala não é determinística devido aos vários fenômenos presentes na propagação do sinal, como o sombreamento. A mesma pode ser dada então por [13]:

$$\overline{P}_L(dB) = \overline{P}_L(d_0) + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma, \quad (4)$$

em que X_σ é uma variável aleatória representando o efeito de sombreamento, com distribuição gaussiana de média zero e desvio padrão σ . [13]

2.5 Desvanecimento de Pequena Escala.

O desvanecimento de pequena escala (*small-scale fading*) é utilizado para representar as flutuações do sinal recebido em função de um curto período de tempo ou distância. Um exemplo de um comportamento da potência de um sinal recebido em função do desvanecimento de pequena escala é dado pela Figura 2.

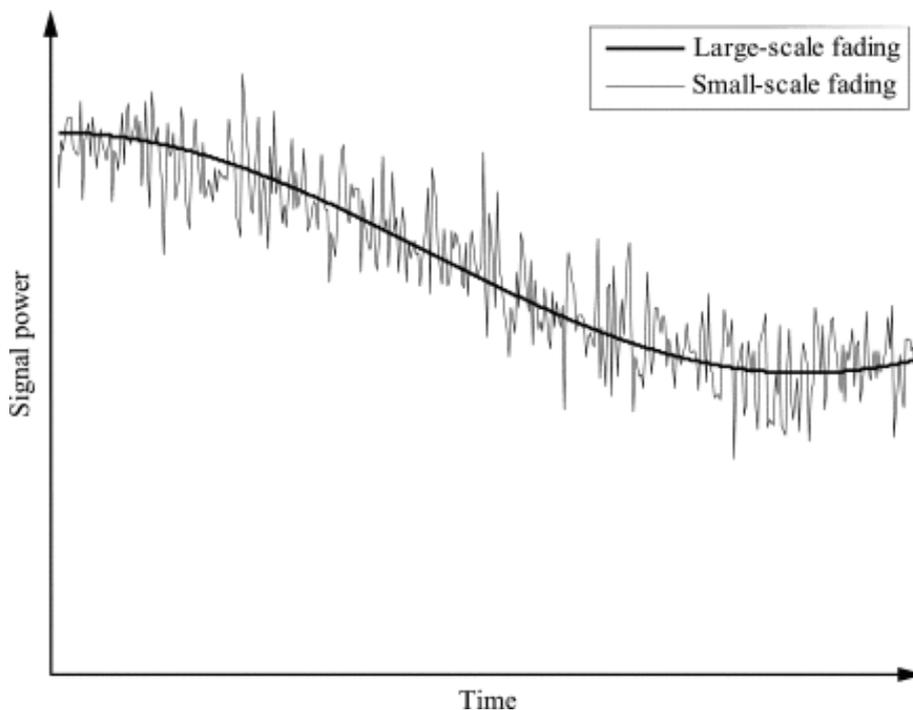


Figura 2 - Desvanecimento de pequena escala [19]

Fatores que influenciam o desvanecimento de pequena escala:

- **Propagação por múltiplos caminhos:** A presença de objetos ao longo do percurso percorrido pelo sinal pode gerar múltiplas versões do sinal transmitido por conta de fenômenos como reflexão, dispersão etc., esses sinais chegam na antena receptora deslocados em tempo ou espaço. A presença de fases e amplitudes aleatórias dos componentes de caminho múltiplo induzem o desvanecimento em pequena escala.
- **Velocidade relativa entre transmissor e receptor:** Movimento relativo entre a estação-base e a estação móvel causa uma modulação em frequência aleatória devido ao efeito/deslocamento Doppler.
- **Velocidade dos objetos ao redor:** Se os objetos no canal de rádio estiverem em movimento, eles induzem um deslocamento Doppler variável ao longo do tempo, se a velocidade dos objetos é maior que a da estação móvel, o efeito domina a atenuação em pequena escala, caso contrário o movimento dos objetos pode ser ignorado.

Os fenômenos acima descritos, de desvanecimento de pequena escala podem ser traduzidos em dois parâmetros que descrevem o comportamento de canal: largura de banda de coerência e tempo de coerência.

Largura de banda de coerência

A largura de banda de coerência é uma medida estatística da faixa de frequências sobre as quais o canal pode ser considerado “uniforme”, ou seja, o canal passa todos os componentes espectrais com ganho aproximadamente igual e fase linear. Em outras palavras, as componentes em frequência têm uma alta correlação em amplitude. Seja σ_t o atraso rms dos atrasos gerados pela existência de multipercursos, a largura de banda de coerência, para uma correlação mínima de 90% entre quaisquer duas componentes espectrais, é definida como [15]:

$$B_c = \frac{1}{50\sigma_t}. \quad (5)$$

A definição pode ser relaxada para um coeficiente de correlação de 50%. Nesse caso, a largura de banda de coerência é dada, então [15]:

$$B_C = \frac{1}{5\sigma_t} \quad (6)$$

Caso a largura de banda do sinal seja superior a B_C , então o canal é dito ser seletivo em frequência. Caso contrário, diz-se que o canal tem desvanecimento plano ou *flat*.

Tempo de Coerência

O tempo de coerência T_c é a medida estatística do intervalo de tempo no qual a resposta ao impulso do canal permanece aproximadamente invariável. Em outras palavras, o tempo de coerência é o intervalo de tempo no qual quaisquer dois sinais transmitidos sofrem atenuações altamente correlacionadas [15]. F_m é a frequência máxima causada pelo efeito doppler.

Caso o tempo de coerência seja definido por uma correlação de 50%, ele é dado por [15]:

$$T_c \approx \frac{9}{16\pi f_m} \quad (7)$$

Logo, pode-se dizer que sinais que são transmitidos com uma separação de tempo maior que T_c são afetados diferentemente pelo mesmo canal, podendo o sinal sofrer distorção ao longo do trajeto de propagação.

2.6 Diversidade Espacial

Diversidade de sinal é uma forma de se melhorar a recepção em um sistema de comunicações sem fio. As técnicas de diversidade se aproveitam do fato de que várias cópias de um mesmo sinal possuem menor probabilidade de sofrerem desvanecimento profundo se as atenuações de seus canais de comunicação forem descorrelacionadas. De modo simples, se um caminho de rádio sofre uma atenuação profunda, algum outro caminho de propagação, preferencialmente independente, pode permitir um sinal recepção com maior SNR. Para este trabalho a diversidade espacial possui particular importância [17].

Um método para se implementar diversidade espacial em um sistema é a utilização de múltiplas antenas transmissoras e/ou receptoras. Com a diversidade espacial pode ser possível a efetiva realização de múltiplos caminhos descorrelacionados, com queda da taxa de erro de bits sem um aumento na potência de transmissão ou largura de banda. Além do mais, com técnicas de combinação de múltiplas antenas, é possível elevar a SNR no receptor em relação a SNR obtida com uma única antena transmissora.

A diversidade espacial pode ser dividida em diversidade de transmissão e diversidade de recepção:

- **Diversidade de transmissão:**

A diversidade de transmissão refere-se a quando duas ou mais antenas transmitem o mesmo sinal. Logo, os dois ou caminhos descorrelacionados são gerados porque as antenas transmissoras encontram-se espaçadas de pelo menos meio comprimento de onda.

- **Diversidade de Recepção:**

Na diversidade de recepção, temos duas ou mais antenas recebendo o mesmo sinal, certamente percorrendo um ou mais caminhos descorrelacionados.

A combinação de múltiplas antenas no transmissor e no receptor é conhecida como **MIMO (Multiple Input, Multiple Output)**.

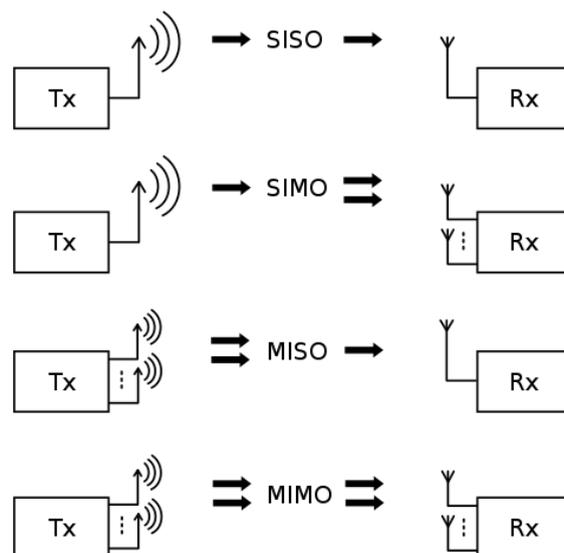


Figura 3 - Formas de exploração de diversidade. [24]

2.7 Massive MIMO

A tecnologia *Massive Multiple Input Multiple Output* é uma das tecnologias mais promissoras tecnologias do 5G. No *Massive MIMO*, tanto o transmissor quanto o receptor possuem um grande número de antenas transmitindo e recebendo sinais, trazendo assim uma grande eficiência espectral, bem como a possibilidade de transmitir um sinal de energia mais focado para os casos de baixo alcance, proporcionando grandes melhorias na capacidade do sistema. Em geral, as vantagens do *Massive MIMO* podem ser resumidas em:

- **Confiabilidade de Capacidade e Conexão:** O emprego do Massive MIMO aumenta diretamente o ganho de diversidade, aumentando a capacidade do canal e a robustez de conexão, pois oferece resistência ao desvanecimento devido ao multipercurso. [8][9]
- **Eficiência Espectral:** Ao multiplexar espacialmente muitos usuários, temos uma melhora na eficiência espectral devido ao grande número de antenas, que gera mais vazão de dados e ganho de multiplexação.[8][9]
- **Eficiência Energética:** Devido à combinação coerente, a potência de transmissão é inversamente proporcional ao número de antenas portanto, à medida que aumentamos o número de antenas, a potência de transmissão será significativamente reduzida e a taxa de transferência também pode ser aumentada sem aumentar a potência de transmissão, aumentando a eficiência energética [8][9].
- **Segurança e aumento de robustez:** Interferência intencional e jamming são preocupações constantes em sistemas de comunicações móveis, um grande número de antenas leva a um grande grau de liberdade que pode ser usado para cancelar sinais de jammers intencionais, os sistemas MIMO também são inerentemente robustos contra ataques passivos de espionagem devido à tecnologia beamforming [8][9].

No entanto, assim como toda tecnologia, existem alguns problemas a serem trabalhados no Massive MIMO, como:

- **Estimação de Canal:** A estimação de canal é um importante fator no desempenho de sistemas de comunicações móveis, a estação base necessita de uma estimação precisa de canal para

atingir o potencial do MIMO. Na prática, no entanto, com o aumento de canais utilizados pelo MIMO, a obtenção da CSI se torna complexa, sendo um problema a ser trabalhado.

- **Detecção de símbolos:** Para realização da pré-codificação na estação base é necessário uma medição precisa do CSI. Detectores atuais funcionam bem em canais com poucos usuários. No entanto, o *Massive MIMO* requer detectores mais avançados e complexos, um equilíbrio entre desempenho e complexidade deve ser alcançado.

Algumas outras desvantagens do *Massive MIMO* são a degradação de performance devido à degradação de *hardware*, causada pela utilização de componentes de RF de baixo custo, feedback de canal e arquiteturas.[8],[9]

2.8 Beamforming

O *beamforming*, ou formatação de feixe, é uma técnica para focar a energia de rádio transmitida ou recebida em uma direção de interesse. Tal técnica é normalmente realizada aplicando-se um controle na fase da corrente elétrica de cada antena de um arranjo de múltiplas antenas, de modo que os campos eletromagnéticos dos diferentes elementos sejam combinados de forma construtiva na direção desejada. Na sua forma digital, a mudança do ângulo de maior ganho de um arranjo é implementada pela multiplicação dos sinais de cada antena por um vetor de pesos. Em outras palavras, os pesos podem ser usados para controlar tanto a direção do feixe de um padrão, quanto a largura do feixe (diretividade) e os lóbulos laterais.

Outro efeito do uso de *Beamforming* é que as mudanças dinâmicas do canal serão maiores e mais rápidas devido ao bloqueio repentino do feixe. Para canais que são altamente dispersivos na direção (grande espalhamento), as antenas de alto ganho não são muito úteis, pois elas captam / direcionam apenas uma pequena fração do sinal do transmissor para o receptor. Nesse caso, técnicas de combinação de antenas totalmente coerentes são mais adequadas. No entanto, essas técnicas são muito complexas e os recursos caros, quando os tamanhos de antenas são muito grandes em termos do número de elementos. [7]

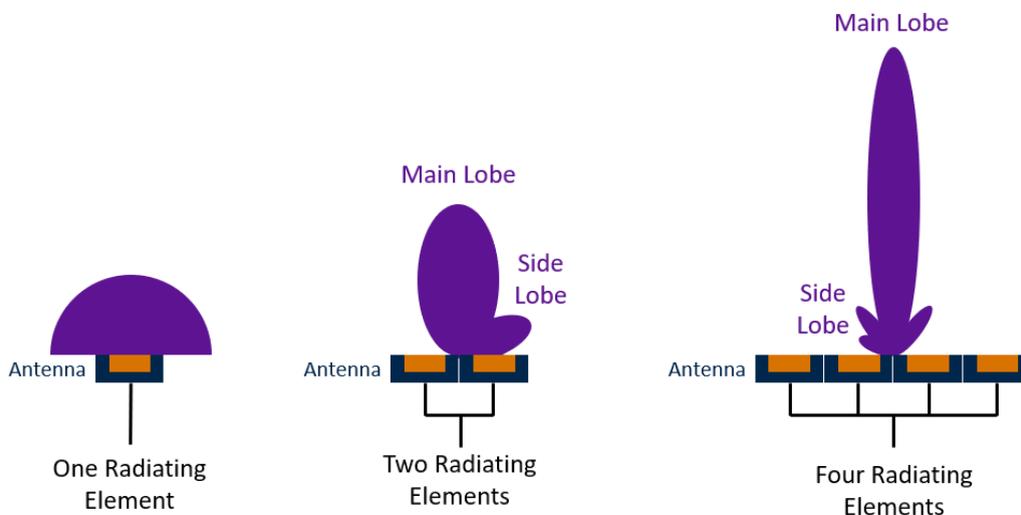


Figura 4 - Funcionamento do beamforming de acordo com o número de arranjos [22]

2.9 Ondas milimétricas

As redes 5G tipicamente operam em distintas faixas de frequências. Uma dessas faixas é a faixa de ondas milimétricas, também chamadas de *mmWaves*, correspondendo às faixas de frequência de 30 a 300 GHz, com comprimentos de onda então da ordem de 10 mm a 1mm. O uso das ondas milimétricas é interessante sobretudo porque a faixa de frequência entre 300 Mhz e 5 GHz encontra-se em estado de grande ocupação por outros serviços de comunicações sem fio.

Outras vantagens das ondas milimétricas são [10]

- Altas frequências permitem que haja redução no tamanho das antenas;
- Maiores larguras de banda disponíveis em espectros ainda não licenciados (aumento da capacidade).
- Maior resistência à interferência e *jamming*.

Por outro lado, algumas desvantagens são:

- A fabricação de componentes eletrônicos que operam em mmWave é mais custosa;
- Ondas milimétricas possuem baixíssimo alcance;

A Figura 5 mostra um comparativo do ganho de vazão de dados observados por usuários usando a rede LTE E 5G em frequências menores que 6 GHz com aqueles usando a rede 5G operando em *mmWave*.



Figura 5 - Ganhos em vazão de dados em Mbps observado por usuários com conexão 5G *mmwave* [30]

3. Introdução ao Quadriga

O Software Quadriga (*QUasi Deterministic RadIo channel GenerAtor*) foi recentemente desenvolvido para a geração de respostas ao impulso de um canal de rádio em simulações de padrões de comunicações móveis contemporâneos. O *software* do modelo Quadriga, disponibilizado em código aberto, foi desenvolvido no Instituto Fraunhofer Heinrich Hertz para modelar canais MIMO em configurações de redes móveis, como indoor, outdoor, satélite, entre outras.

O simulador Quadriga v2.2.0 é baseado na linguagem do MATLAB, sua instalação é direta e não requer nenhuma alteração nas configurações do sistema. Para usar o Quadriga, basta extrair o arquivo ZIP contendo os arquivos do modelo e adicionar a pasta “Quadriga src” do arquivo extraído ao diretório do MATLAB. [18]

Além de ser um modelo de canal baseado em geometria tridimensional, que permite combinar um modelo determinístico direcional com variáveis aleatórias, como ângulos de chegada em um arranjo de antenas, o Quadriga contém uma coleção de recursos presentes em outros modelos espaciais de canal como *SCM* [27] e *WINNER II* [26]. Em geral, as principais características do Quadriga são:

- **Modelo de propagação tridimensional:** Como um modelo de canal baseado em geometria, o Quadriga permite a inserção de diferentes padrões de radiação, incluindo diferentes polarizações e tamanhos de arranjos de antenas, assim como de um grande número de *clusters* de espalhamento espacial,

- **Avaliação contínua no tempo e espaço dos parâmetros estatísticos do canal:** O *software* do Quadriga permite, entre outras funcionalidades, calcular a potência do sinal recebido para cada ponto de recepção definido pelo usuário, gerando uma série de medidas em relação ao tempo e espaço (e.g., distância entre transmissor e receptor);
- **Desvanecimento em pequena e larga escala:** Por meio do controle do número de multipercursos, gerados pela presença de *clusters*, da possibilidade de inserção das velocidades dos terminais móveis, e do controle de parâmetros de perda de propagação e sombreamento, o Quadriga permite simular tanto desvanecimento de larga quanto de pequena escala, incluindo o desvanecimento seletivo ou não em frequência.
- **Transições entre vários cenários de propagação:** o *software* Quadriga é flexível na simulação em que o terminal móvel se desloca entre diferentes cenários, como entre um ambiente de linha de visada para um ambiente sem linha de visada.

Como já foi dito, o modelo Quadriga é um modelo de canal quasi-determinístico baseado em geometria, em que a posição e ganhos dos espalhadores (*scatterers*), como edifícios e árvores, são definidos de forma aleatória. Uma visão geral simplificada do modelo é ilustrada na Figura 6. Para cada caminho, o modelo determina o ângulo de partida (o ângulo entre o transmissor e o cluster de dispersão), o ângulo de chegada (o ângulo entre o receptor e o cluster de dispersão) e o comprimento total de cada caminho que resulta em um atraso τ do sinal. Como ilustração, apenas dois caminhos (LOS e NLOS) são mostrados na figura.

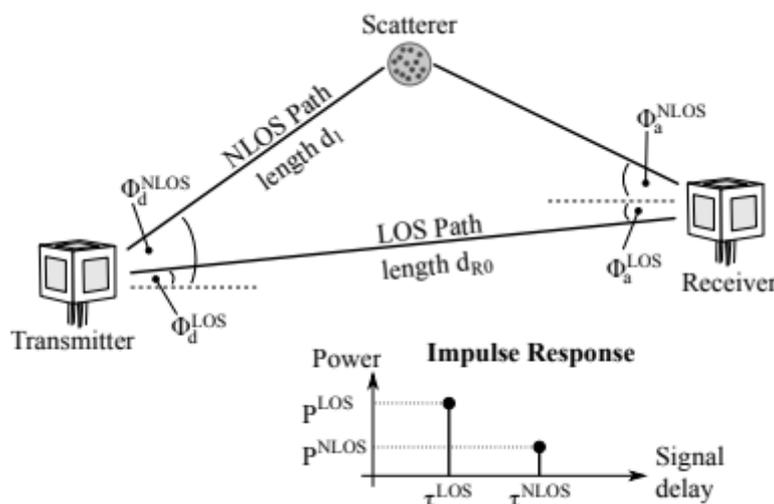


Figura 6 - Visão geral simplificada da modelagem usada no Quadriga [18]

Um *cluster* de espalhamento descreve uma área ou objeto onde muitos eventos de dispersão, como reflexão e refração, ocorrem simultaneamente sobre a onda incidente, como por exemplo na copa de uma árvore ou em uma parede de construção rugosa.

No Quadriga cada *cluster* é aproximado por uma composição de até 20 espalhadores individuais, cada um responsável por apenas uma reflexão da onda. Esses sinais podem ser resolvidos no domínio espacial, em que eles geram um espalhamento angular aleatório entre 1 a 6 graus na onda espalhada. Na saída do canal, esses sinais (também chamados de subcaminhos ou multipercursos) são combinados em um único sinal que é representado por um único caminho.

Para emular um ambiente de dispersão com um espalhamento angular mais amplo, muitos *clusters* devem ser combinados -- o Quadriga não possui limite superior para o número de *clusters*. No entanto, dependendo de quão largo é o espalhamento angular, os valores típicos são em torno de 10 *clusters* para propagação LOS e 20 *clusters* para NLOS. O posicionamento dos clusters é aleatório, porém limitado pelo espalhamento angular e pelo espalhamento do atraso no ambiente, que são entradas definidas pelo usuário do *software*.

O espalhamento angular de ambientes tipicamente simulados (e.g., urbano, rural e indoor) tem valores em torno de 20 a 90 graus, e logo é também maior do que o espalhamento angular por *cluster*. No entanto, mesmo com muitos *clusters*, o espalhamento Doppler costuma ser menor no Quadriga do que fosse utilizado um canal Rayleigh, graças ao menor número de multipercursos e à limitação angular deles.

Resumindo:

- Um ambiente de propagação típico urbano requer 8-20 clusters;
- Cada *cluster* representa até 20 multipercursos ou subcaminhos, resultando em torno de 160 - 400 multipercursos no total;
- Cada multipercursos é modelado como uma única reflexão da onda;
- Os 160-400 multipercursos são eventualmente ponderados pelos ganhos (direcionais) dos arranjos de antenas. Os 20 multipercursos para cada cluster são então combinados, o que resulta em efetivamente 8-20 multipercursos – 1 multipercursos por *cluster*.
- Para um sistema MIMO com múltiplas antenas transmissoras e receptoras, cada coeficiente de canal é associado ao ganho entre uma antena transmissora e uma antena receptora. Logo, cada

coeficiente de canal é composto pela combinação dos multipercursos dos vários *clusters* associados a este par de antenas.

3.1 Fluxo do programa Quadriga

Para um ambiente de propagação (por exemplo, urbano, suburbano ou rural) as características do canal são inicialmente descritas por estatísticas dos LSPs (*Large Scale Parameters* ou parâmetros de larga escala), definidos no código do Quadriga. Esses parâmetros são armazenados em arquivos de configuração que podem ser editados pelo usuário do modelo. O usuário do *software* precisa então configurar o layout da rede (*network layout*), que é relacionados ao LSPs:

- Definir a posição do transmissor (por exemplo, as posições da estação base - BS ou a posição orbital do satélite);
- Definição das propriedades (e.g., padrão de radiação) da antena para o transmissor e o receptor;
- Definir as coordenadas da trajetória do usuário (receptor);
- Definir estados (ou segmentos) ao longo da trajetória do usuário, e.g., presença de linha de visada ou velocidade média do terminal móvel;
- Atribuir um ambiente de propagação (cenário) padronizado para cada segmento de acordo com suas características (ver Seção 3.2).

A trajetória descreve a posição do terminal móvel no sistema de coordenadas bidimensional. Para cada segmento da trajetória, os *clusters* são calculados de acordo com os valores dos LSPs em cada ponto do mapa. As posições dos *clusters* são aleatórias dentro dos limites dados pelo LSP. Por exemplo, um dado atraso de propagação limita a distância possível entre os clusters e o terminal devido à perda de propagação da onda.

A definição da trajetória do terminal móvel, assim como dos segmentos ou estados de cada segmento são realizados pelo Gerador de sequência de estado (SSG). Na implementação atual do Quadriga, diferentes SSGs estão disponíveis:

- Definição manual de todos os parâmetros pelo usuário, por exemplo, a definição de trajetos curtos,

- Conjunto de parâmetros estatísticos a serem utilizados ao longo do percurso (definição de cenários LOS e NLOS e parâmetros derivados desses cenários).
- Trajetória e sequência de segmentos deduzidos de dados de medições reais.

Os arquivos de configuração definem as propriedades dos LSPs. Para cada estado (também chamado de cenário) um conjunto de propriedades é fornecido. Normalmente, um dos dois arquivos de configuração pode ser usado:

- Um para o "bom estado" (também chamado de cenário LOS)
- O outro para o "estado ruim" (cenário NLOS).

3.2 Passos para a obtenção da resposta ao impulso do canal

A Figura 7, mostra um resumo dos passos que o Quadriga realiza para calcular a resposta ao impulso do canal. O layout de rede (isto é, as posições das estações base, configuração das antenas e suas direções), as posições e trajetórias dos terminais móveis, e os cenários de propagação são dados como variáveis de entrada (*Input variables*). Os coeficientes de canal são então calculados em sete passos (blocos A a G), detalhados a seguir.

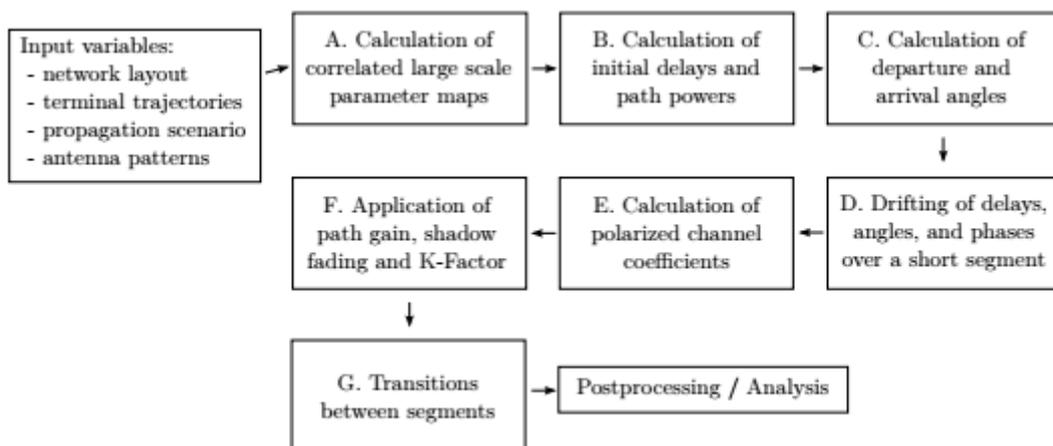


Figura 7 - Passos para o cálculo dos coeficientes de canal com evolução temporal. [18]

A. Cálculo dos parâmetros de larga escala

O primeiro passo consiste em garantir que os parâmetros de larga escala (LSPs) estão corretos. Como eles não variam repentinamente com o tempo ou espaço, os terminais móveis que estiverem próximos uns dos outros sofrerão efeitos de propagação semelhantes.

B. Cálculo dos atrasos iniciais e potência dos multipercursos

Depois de calculados os LSPs, parâmetros de desvanecimento de pequena escala são calculadas para cada terminal móvel separadamente, esta etapa toma estatísticas de espalhamento de atraso, dados pelo cenário de propagação escolhido, e as traduz em um conjunto de diferentes multipercursos, cada um com seu atraso e potência relativos.

C. Cálculo dos ângulos de chegada e saída dos *clusters*

Aqui o Quadriga toma os valores de espalhamento angular para determinar os ângulos de chegada e saída relativos a cada *cluster*. Nesta etapa assume-se que o meio de propagação consiste em até 20 *clusters*, e que não há relação geométrica entre atrasos e ângulos em cada multipercurso.

D. Desvios nos atrasos, ângulos e fases em um segmento curto

Esta etapa incorpora a mobilidade e coordenadas esféricas em ambas as pontas do enlace de comunicação, Dado os ângulos e atrasos (saída da etapa C), quando o terminal móvel se move para uma localização diferente em um curto intervalo de tempo, a posição dos espalhadores de todos os multipercursos são mantidas fixas enquanto as direções e atrasos são atualizados. Isto também leva a uma atualização nas fases dos ganhos relativos a cada um dos multipercursos.

E. Cálculo de coeficientes de canais polarizados

Esta etapa cuida dos efeitos de antena e polarização. As antenas são descritas por seu padrão de radiação 3D na região em coordenadas esféricas de campo distante. No entanto no QuadriGa esses padrões são dados em um sistema de coordenadas local específico das antenas. Portanto, esta etapa inclui um método para rotacionar as antenas de modo que elas obedeçam às orientações definidas no sistema global de coordenadas usado como entrada no modelo; além do mais, mudanças adicionais na polarização podem ocorrer devido ao espalhamento em algum multipercurso. Os efeitos resultantes são tratados por um método em que sucessivas transformações lineares inspiradas pelo cálculo de Jones [28] são realizadas para calcular o estado de polarização do multipercurso e os coeficientes.

G. Aplicação da perda de caminho, Sombreamento e fator K .

Nesta etapa, os parâmetros de larga escala restantes da etapa A: a perda de caminho em função da distância e sombreamento são aplicados aos coeficientes de canal. Quando a posição do terminal móvel é alterada durante a etapa D, o fator de Rice (K) na nova localização pode ser diferente, sobretudo se há alguma mudança em relação à linha de visada, o que também é levado em conta nesta fase.

H. Transições entre os segmentos

Sequências longas de coeficientes de canal necessitam considerar o surgimento e desaparecimento de clusters de dispersão bem como transições entre diferentes ambientes de propagação. Isto é resolvido separando-se as trajetórias do terminal móvel em segmentos. Um segmento pode ser visto como um intervalo no qual os parâmetros de propagação de larga escala não são alterados consideravelmente e o canal mantém suas propriedades estacionárias no sentido amplo. Passos de canal (Channel steps) ou traços são então gerados independentemente para cada segmento, esses steps individuais são combinados em uma sequência maior no último passo.

Após estas etapas, o programa gera um *array* de quatro dimensões contendo o par transmissor/receptor, multipercurso e o valor do coeficiente.

3.3 Cenários de propagação

Nas várias etapas da Figura 7, parâmetros de desvanecimento de pequena e larga escala são utilizados. Esses parâmetros são dependentes do cenário de propagação da onda portadora, que por sua vez determina os espalhamentos de atraso e angulares, a distância entre transmissor e receptor, a velocidade média dos terminais móveis naquele cenário, entre outros. O Quadriga é adaptado a trabalhar com diferentes cenários de propagação.

Um cenário no Quadriga pode incluir vários arquivos que descrevem as condições de propagação para linha de visada (LOS), linha de não visada (NLOS) e de ambiente externo para ambiente interno (O2I). A tabela a seguir descreve os grupos de parâmetros e sua aplicabilidade compatíveis com a iniciativa 3GPP.

Tabela 1 - Conjuntos de cenários fornecidos juntamente com o software padrão

3GPP 3D model	
3GPP 3D UMa - 3GPP 3D Urban Macro-Cell	
3GPP 3D UMa LOS 3GPP 3D UMa LOS O2I 3GPP 3D UMa NLOS 3GPP 3D UMa NLOS O2I	Para estações base terrestres típicas implementadas acima de telhados em áreas urbanas densamente povoadas. Os parâmetros cobrem LOS, NLOS e O2I. O raio máximo da célula é de cerca de 1 km, a frequência da portadora é fixada em 2 GHz, a altura do BS é de 25 metros e a altura do MT pode variar de 1,5 a 22,5 m.
3GPP 3D UMi - 3GPP 3D Urban Micro-Cel	
3GPP 3D UMa LOS 3GPP 3D UMa LOS O2I 3GPP 3D UMa NLOS 3GPP 3D UMa NLOS O2I	Para BSs de células pequenas terrestres típicas implementadas abaixo do telhado em áreas urbanas densamente povoadas. Os parâmetros cobrem LOS, NLOS e O2I. O raio máximo da célula é de cerca de 200 m, a frequência da portadora é fixada em 2 GHz, a altura do BS é de 10 metros e a altura do MT pode variar de 1,5 a 22,5 m.
3GPP NR model	
3GPP 38.901 Indoor Mixed Office, 3GPP 38.901 Indoor Open Office - 3GPP NR Indoor Office	
3GPP 38.901 Indoor LOS 3GPP 38.901 Indoor NLOS	Para implantações internas típicas, como WiFi ou femto-células cobrindo frequências portadoras de 500 MHz a 100 GHz. A altura da antena BS é fixada em 3 metros e a altura da antena MT em 1 metro. Dois tipos de escritórios são cobertos: escritório misto e escritório aberto. Eles diferem apenas na probabilidade de LOS.
3GPP 38.901 UMa - 3GPP NR Urban Macro-Cell	
3GPP 38.901 UMa LOS 3GPP 38.901 UMa LOS O2I 3GPP 38.901 UMa NLOS 3GPP 38.901 UMa NLOS O2I	Para estações base terrestres típicas implementadas acima de telhados em áreas urbanas densamente povoadas. Os parâmetros cobrem LOS, NLOS e O2I. O raio máximo da célula é de cerca de 1 km, a frequência da portadora pode variar de 500 MHz a 100 GHz, a altura do BS é de 25 metros e a altura do MT pode variar de 1,5 a 22,5 m
3GPP 38.901 UMi - 3GPP NR Urban Micro-Cell	
3GPP 38.901 UMi LOS 3GPP 38.901 UMi LOS O2I 3GPP 38.901 UMi NLOS 3GPP 38.901 UMi NLOS O2I	Para estações base terrestres típicas implantadas abaixo de telhados em áreas urbanas densamente povoadas. Os parâmetros cobrem LOS, NLOS e O2I. O raio máximo da célula é de cerca de 200 m, a frequência da portadora pode variar de 500 MHz a 100 GHz, a altura do BS é de 10 metros e a altura do MT pode variar de 1,5 a 22,5 m
3GPP 38.901 RMa - 3GPP NR I Rural Macro-Cel	
3GPP 38.901 RMa LOS 3GPP 38.901 RMa LOS O2I 3GPP 38.901 RMa NLOS 3GPP 38.901 RMa NLOS O2I	Para estações rurais típicas. Os parâmetros cobrem LOS, NLOS e O2I. O raio máximo da célula é de cerca de 10 km, a frequência da portadora pode variar de 500 MHz a 100 GHz, a altura da BS pode variar de 10 a 150 m, e a altura do MT pode variar de 1,5 a 22,5 m

4. Simulações

Para exemplificar o funcionamento do software Quadriga, buscou-se realizar simulações de desempenho de redes 5G em um cenário de propagação realista. Para isso, utilizou-se a rota partindo da Faculdade de Tecnologia (FT-UNICAMP) até a Faculdade de Ciências Aplicadas (FCA-UNICAMP) da Universidade Estadual de Campinas na cidade de Limeira, SP (Figura 8).

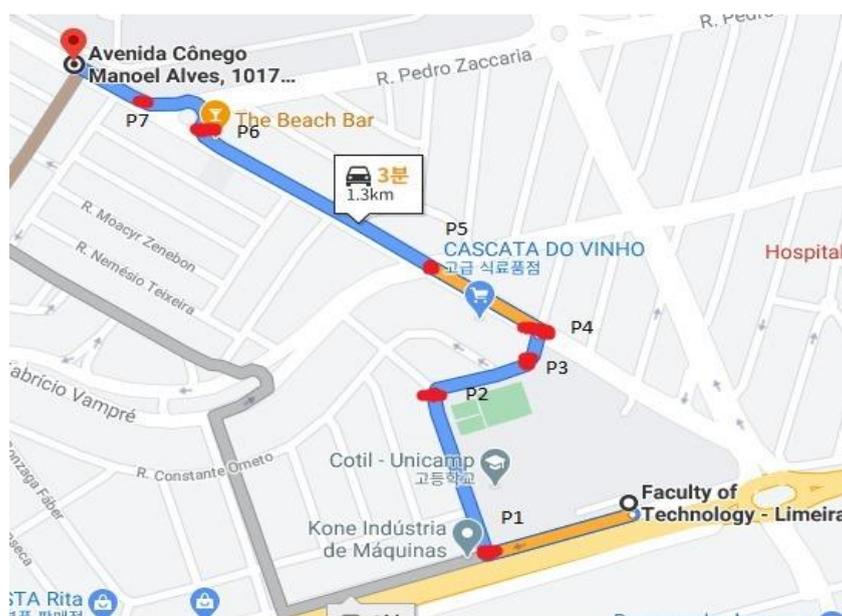


Figura 8 - Rota utilizada para a simulação. [25]

4.1 Transmissor fixo e receptor móvel

Utilizando os tutoriais e a documentação do Quadriga foi possível configurar as simulações de acordo com o pretendido. Para configuração da rota, foram usados sete pontos (P1 a P7), mostrados na Figura 8. O perfil de cenários utilizado foi o *3GPP 38.901 UMa 3GPP NR Urban Macro-Cell* (Tabela 1), que está de acordo com a especificação das redes 5G e que aparentemente atende o cenário de propagação escolhido. No ponto P5 foi estipulado um evento, em que o veículo interrompe a trajetória por alguns segundos por conta do semáforo presente no cruzamento.

Para cada ponto foi definida a presença ou não de linha de visada (LOS ou NLOS). Como não foi feito um estudo *in-loco*, a hipótese aqui é que apenas os três pontos/segmentos mais próximos do

ponto da antena transmissora (i.e., P1, P2 e P3) tinham linha de visada. Para o cenário LOS o Quadriga define o fator de Rice em $K \approx 2,24$ (3,5 dB) e para o cenário NLOS tem-se que $K = 0$.

A Tabela 2 abaixo demonstra o perfil utilizado em cada ponto, o cenário e a premissa básica para a escolha do perfil.

Tabela 2: Resumo dos Cenários utilizados para cada ponto

Ponto do Percurso	Perfil	Cenário	Premissa
P1	3GPP_38.901_UMa_LOS	Urbano com visada	Próximo ao TX
P2	3GPP_38.901_UMa_LOS	Urbano com visada	Próximo ao TX
P3	3GPP_38.901_UMa_LOS	Urbano com visada	Próximo ao TX
P4	3GPP_38.901_UMa_NLOS	Urbano sem visada	Distante do TX
P5	3GPP_38.901_UMa_NLOS	Urbano sem visada	Distante do TX
P6	3GPP_38.901_UMa_NLOS	Urbano sem visada	Distante do TX
P7	3GPP_38.901_UMa_LOS	Urbano sem visada	Distante do Tx

. Para a simulação, foi suposto um veículo em movimento ao longo da rota e um transmissor localizado na coordenada [0,0] (Figura 9). O veículo funciona como receptor, com cada ponto possuindo uma especificação de cenário. Perceba que as coordenadas da Figura 9 correspondem ao trajeto do veículo no mapa da Figura 8. Nesta simulação o transmissor se mantém fixo no ponto inicial da rota, antes do ponto P1.

A frequência utilizada foi de 3,6 GHz com um uma antena de arranjo 8x4 utilizando o modelo de antena do modelo de canal *3GG-3D* [29] e uma antena omnidirecional para o receptor.

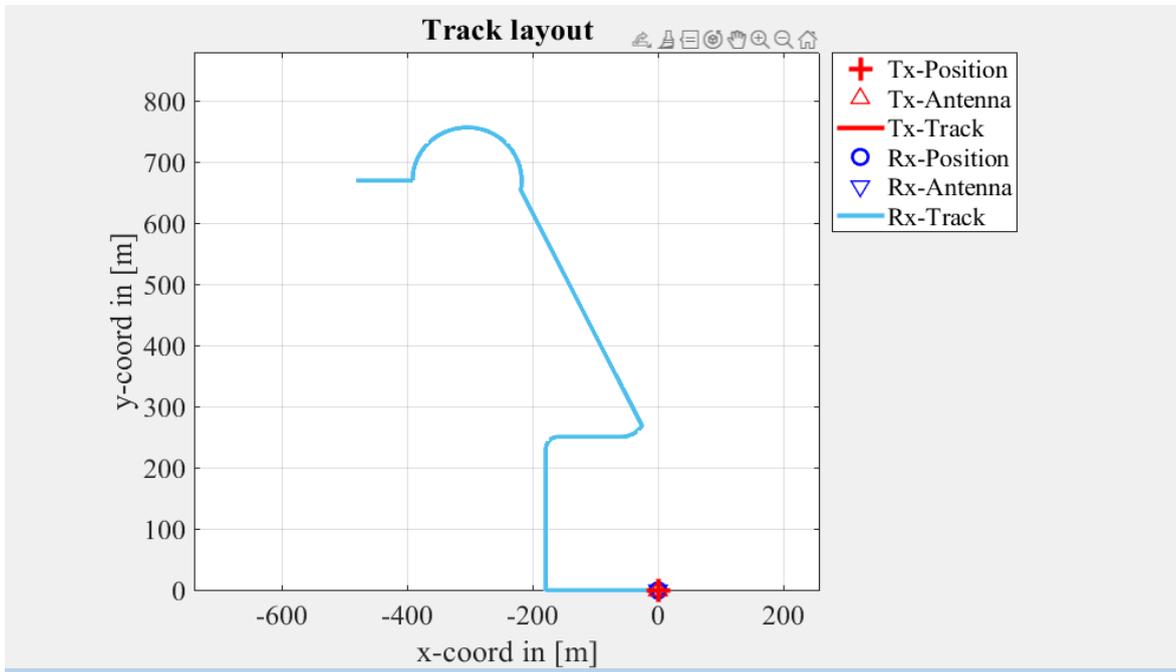


Figura 9 - Rota Configurada no Quadriga para simulação.

A Figura 10 mostra o perfil de movimento do carro ao longo da trajetória. A velocidade máxima do veículo escolhida foi de 36 km/h. É possível observar que o veículo interrompe o percurso por dois momentos: o primeiro para cruzar a avenida e o segundo por conta do semáforo.

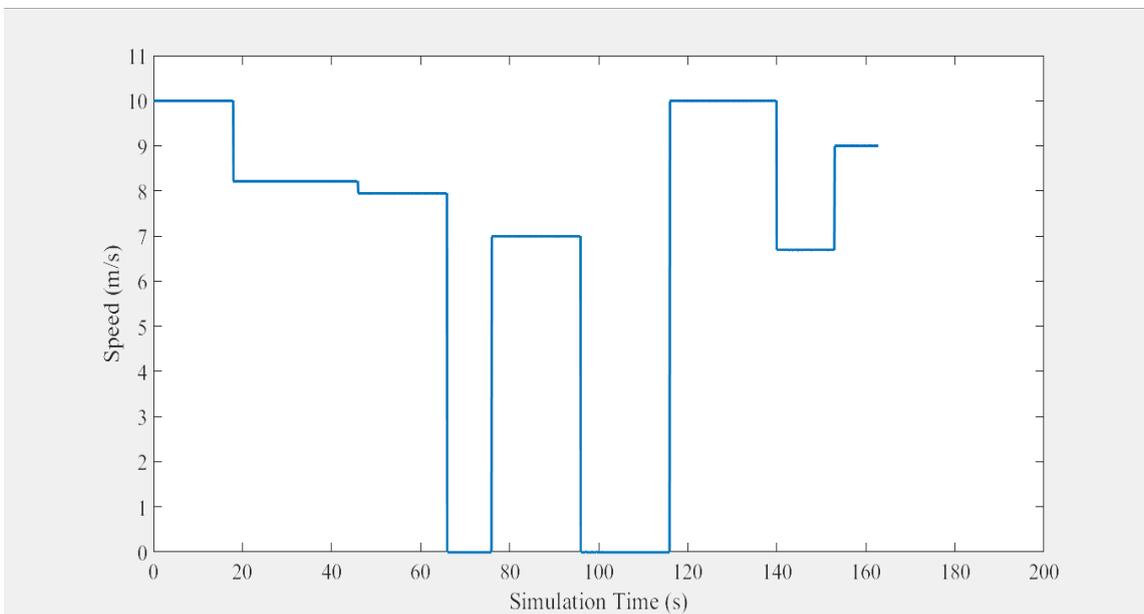


Figura 10 - Perfil de Movimento do veículo ao longo do tempo.

A Figura 11 mostra, como um mapa de calor, a potência do sinal recebido pelo veículo. É importante salientar que esse mapa considera somente a perda de potência no espaço livre ao longo do percurso. O ângulo do feixe nessas e nas próximas simulações são fixos.

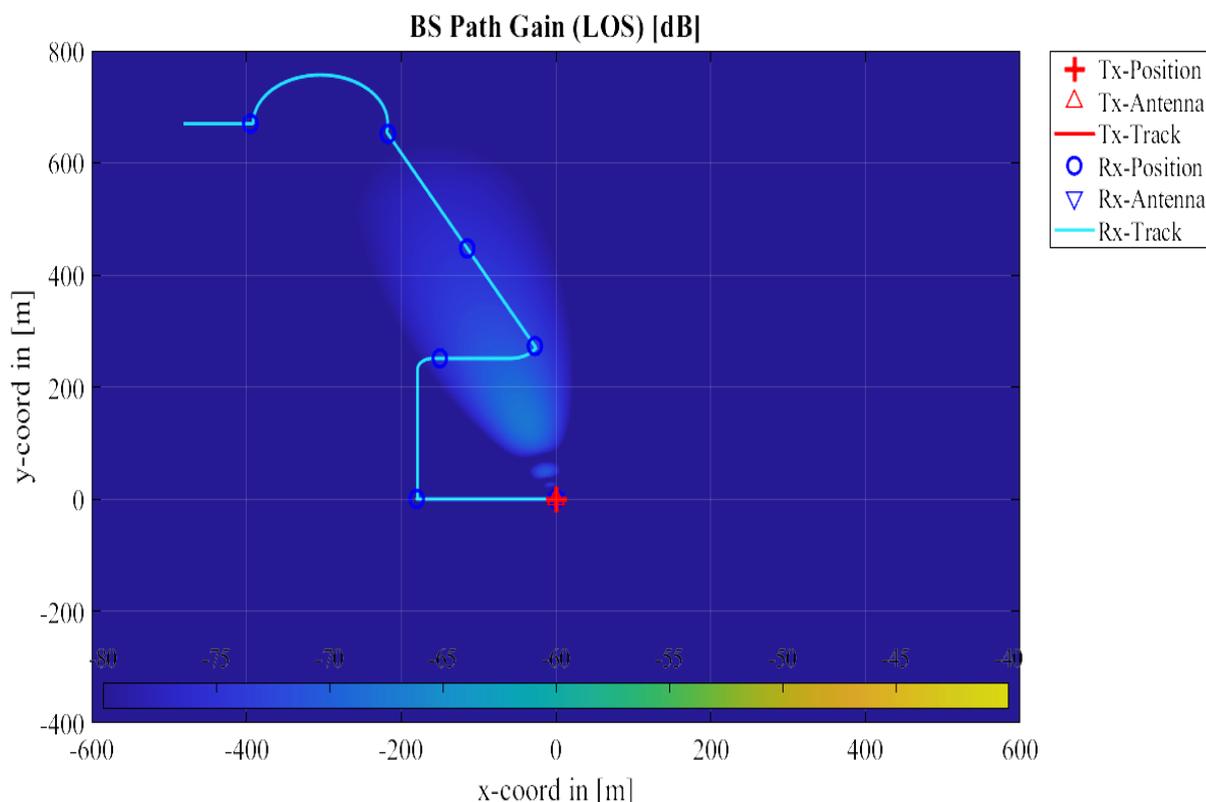


Figura 11 - Mapa de calor para o transmissor localizado em P1.

Por outro lado, o Quadriga possibilita o cálculo de potência recebida ao longo do percurso, levando em conta também os cenários de propagação entre transmissor e receptor. Dessa forma, é possível então a formação de um gráfico Potência recebida x Tempo de percurso (ou tempo de simulação) (Figura 12), ou, alternativamente, o gráfico de Potência recebida x Distância (Figura 13). A distância foi calculada indiretamente por meio do produto do tempo de simulação pela velocidade média do terminal móvel em cada segmento, dada pela Figura 10.

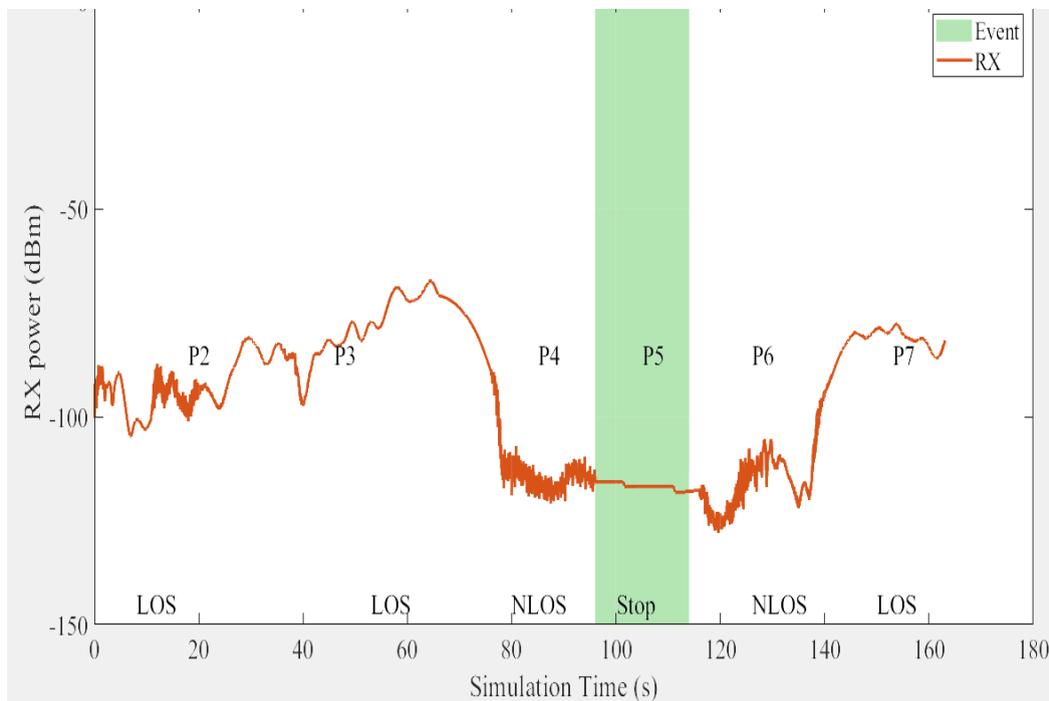


Figura 12 - Variação de potência recebida pelo tempo ao longo da trajetória para 3,6 GHz.

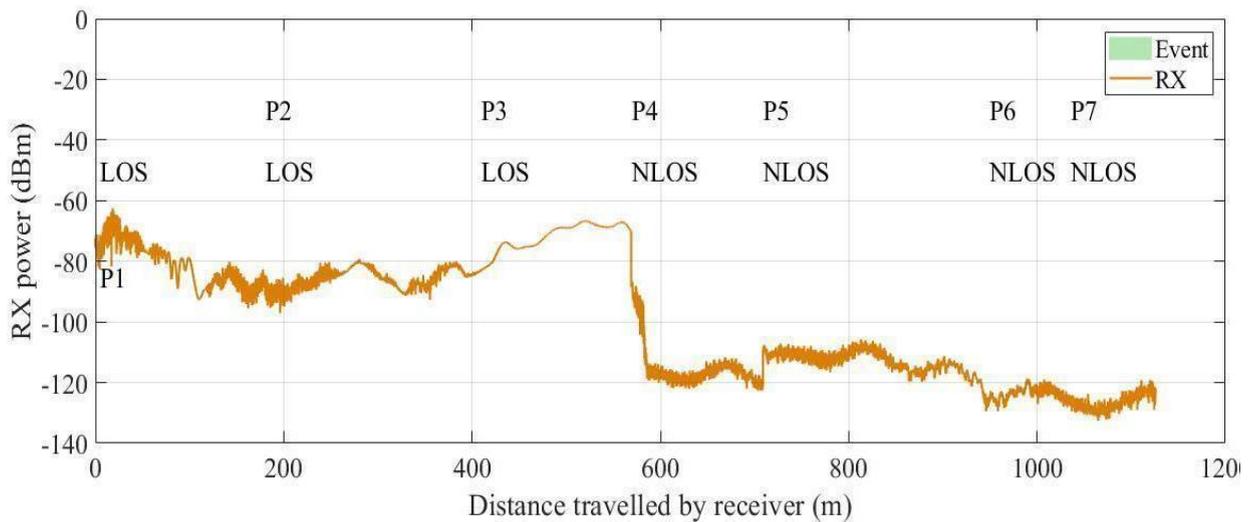


Figura 13 - Variação de potência em relação à distância para 3,6 GHz.

4.2 Transmissor em diversos pontos

Posteriormente, buscou-se realizar um levantamento da potência recebida média para antenas localizadas em diferentes pontos do trajeto de modo a obter-se informações sobre o desempenho de transmissão em diferentes localizações e orientações do feixe da antena, as configurações das antenas e frequência de operação são as mesmas do caso anterior. Os pontos escolhidos foram: P3, P5 e P7.

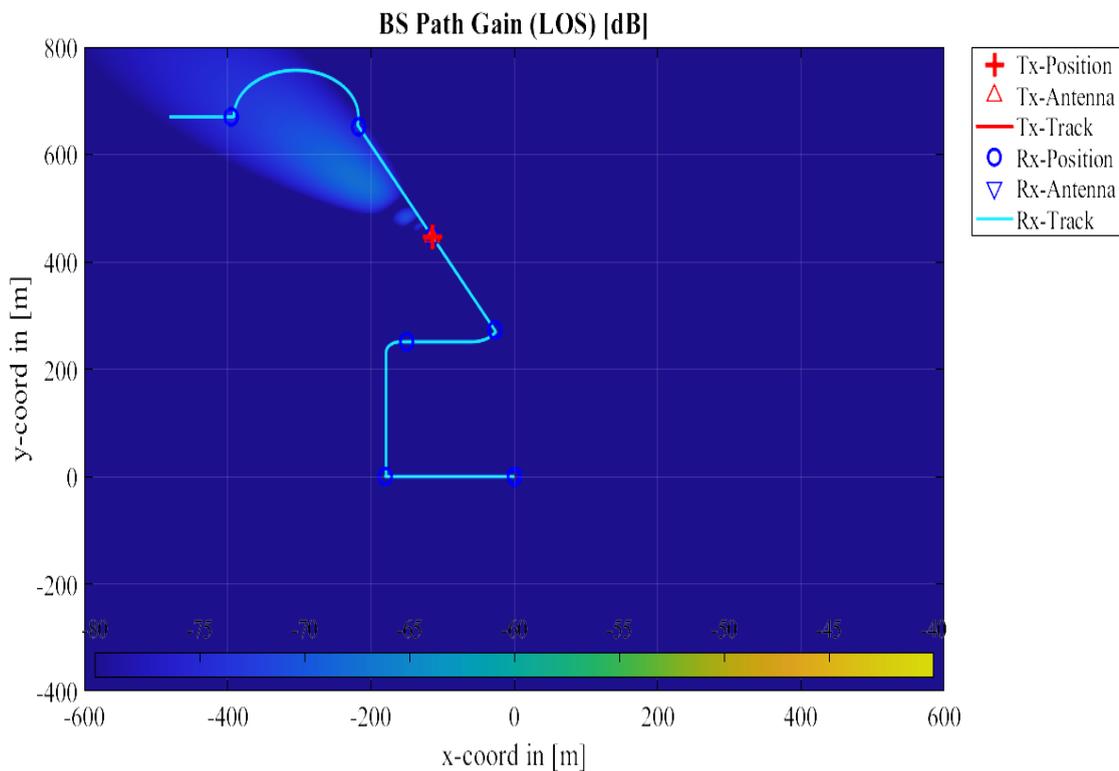


Figura 14 - Antena localizada no ponto P5 e direção do feixe em 135°.

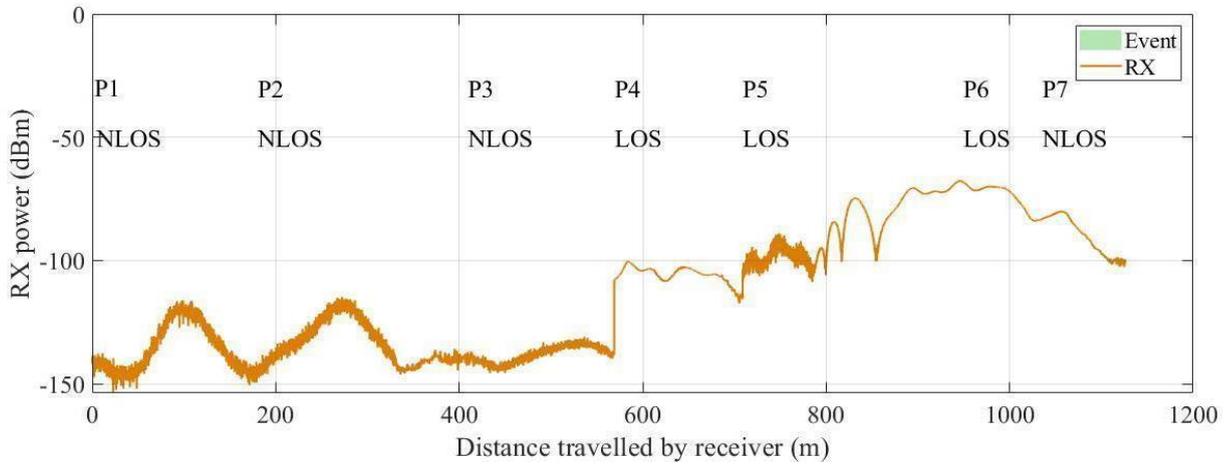


Figura 15 - Variação de potência recebida pelo receptor com o transmissor no ponto P5 para 3,6 GHz.

Pode-se observar que no ponto P5 o transmissor apresenta desempenho razoável nos pontos P4 ao P6, muito devido a presença de linha de visada e proximidade ao transmissor, na seção de anexo, há a simulação para o feixe em outra direção.

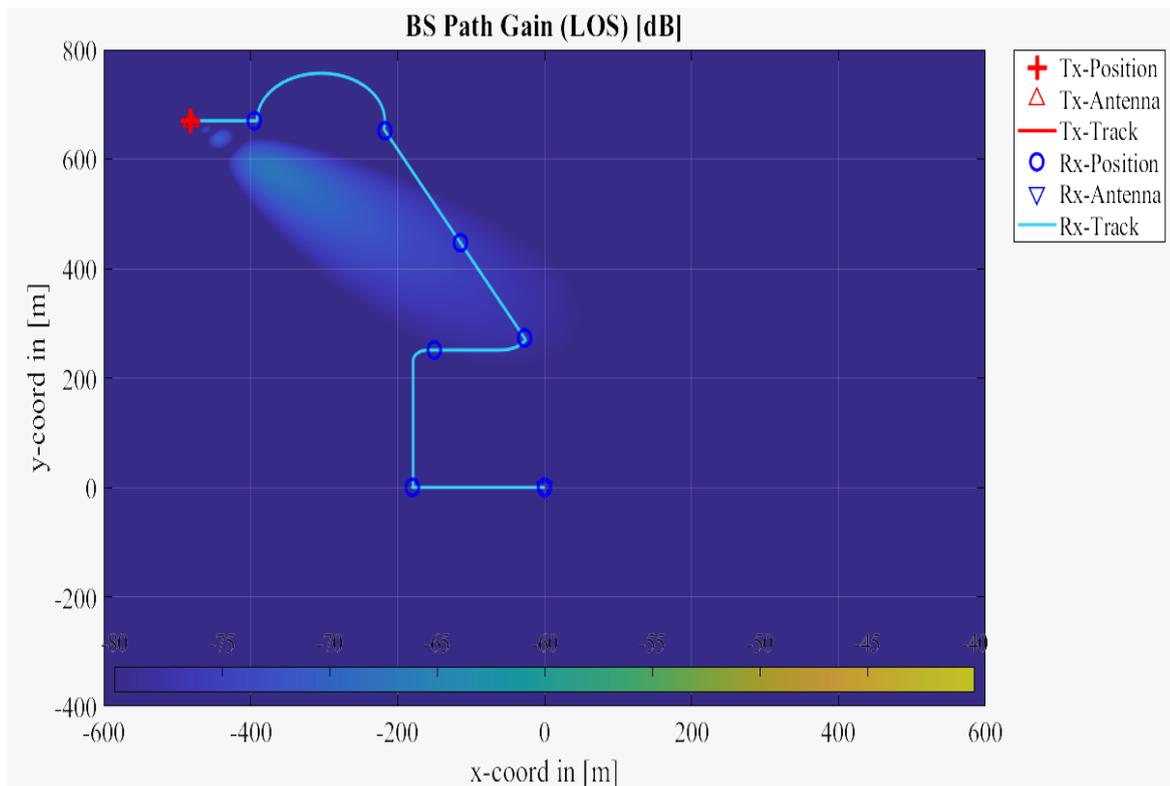


Figura 16 - Antena localizada em P7 e direção do feixe em 315°.

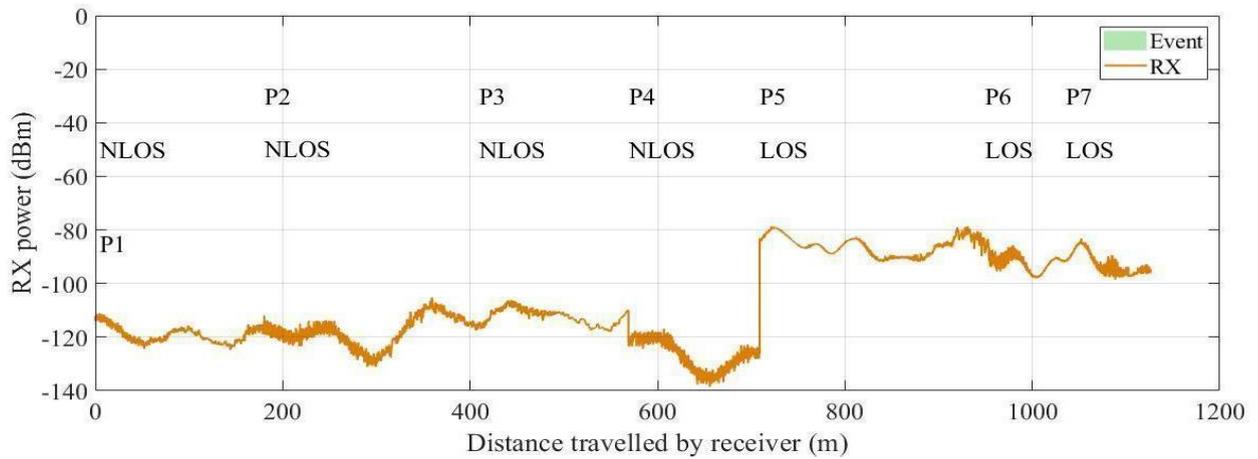


Figura 17 - Variação de potência recebida pelo receptor com transmissor no ponto P7 e ângulo em 315° com operação em 3,6 GHz.

Para a antena em P7 Podemos observar um bom desempenho de P5 a P7, também é possível observar uma alta ausência de linha visada para esse ponto.

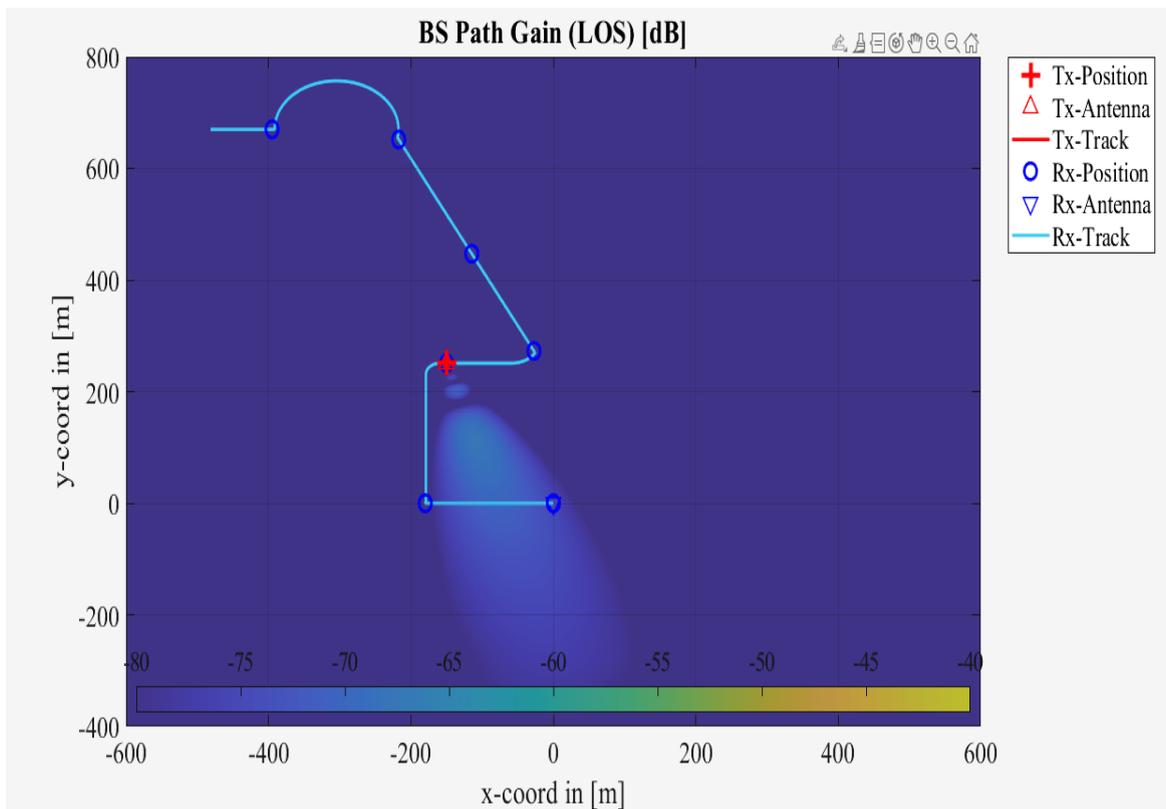


Figura 18 - Antena localizada em P3 e direção do feixe em 300°

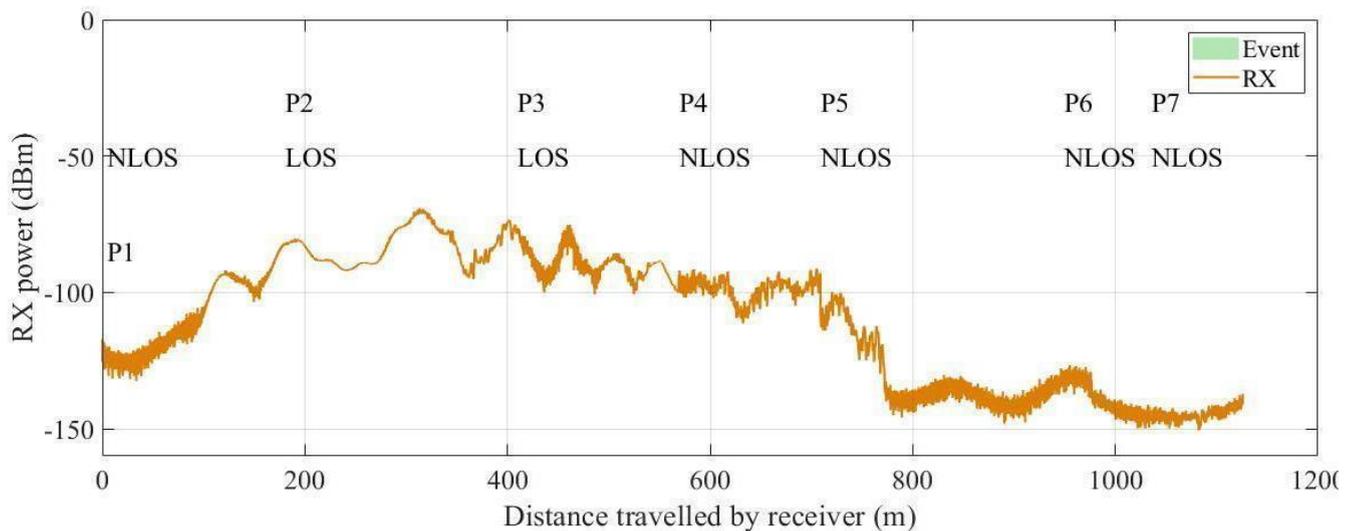


Figura 19 - Variação de potência recebida pelo receptor com transmissor no ponto P3 e direção do feixe em 300° com operação em 3,6 GHz

Para o transmissor em P3, existe uma alta potência de recepção nos pontos do início do trajeto, é possível observar uma queda de potência gradual a partir de P4 e uma forte queda entre P5 e P6 que se mantém constante até o fim do percurso, conforme esperado, na seção de anexo há a simulação para outra direção de feixe.

Em geral, a partir das figuras, é possível observar a grande variação do perfil de potência conforme variam-se os pontos e a direção do *beamforming*, devido à variação de cenários, LOS/NLOS e movimento do carro (receptor). Percebe-se também que o sinal não atinge a potência máxima no ponto exato em que se encontra a antena, isso ocorre por conta do feixe da antena que está concentrado entre P4 e P5.

4.3 Simulações usando beamforming

Em seguida simulou-se os cenários agora com o canal utilizando a técnica MIMO beamforming e o transmissor operando na faixa de 28 GHz de modo a simular transmissões na faixa de mmWave (Ondas Milimétricas). Foi usada a mesma configuração 8 x 4 da simulação anterior. Vale salientar que

foi necessário diminuir a amostragem do gráfico de potência para que fosse possível realizar as simulações devido às limitações técnicas de hardware.

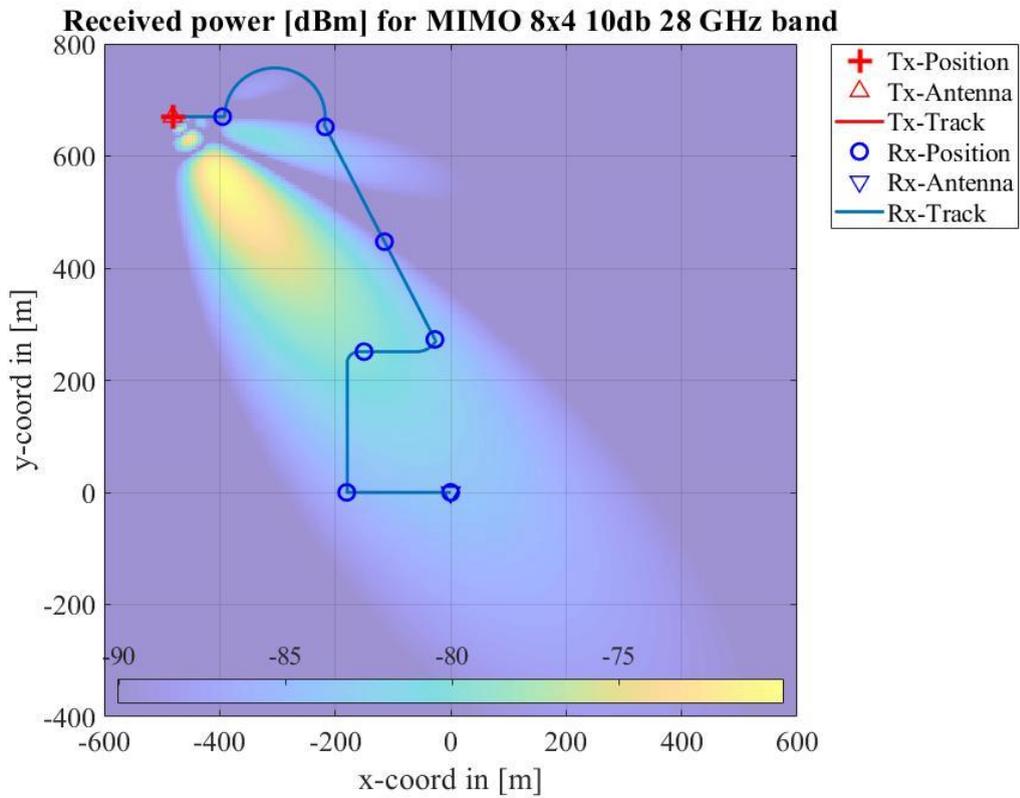


Figura 20 - Mapa de calor para antena localizada em P7 para operação em 28 GHz utilizando beamforming.

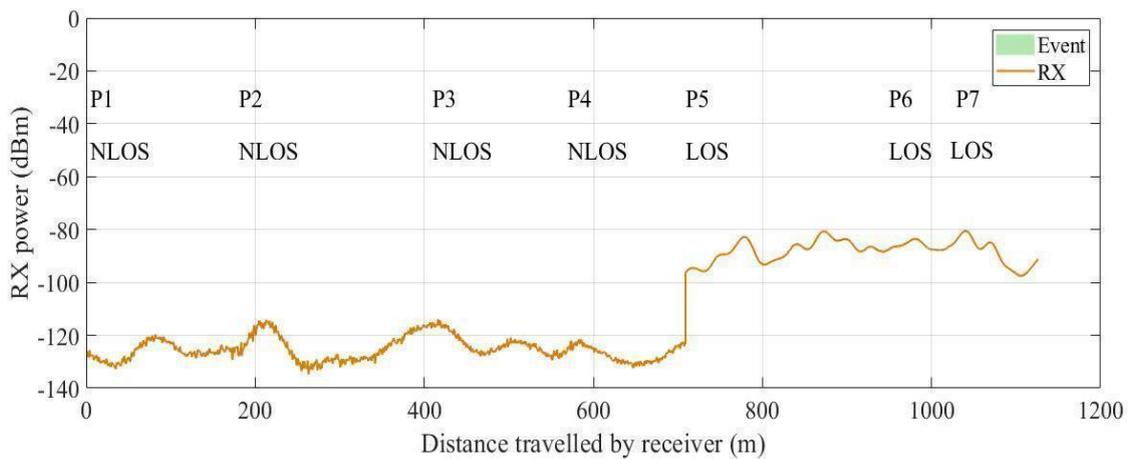


Figura 21 - Variação de potência recebida pelo receptor com o transmissor operando em 28 GHz utilizando beamforming.

Pode-se observar pelo mapa de calor (Figura 22) que agora existem expressivos lóbulos laterais, característica do beamforming. O Quadriga permite que o foco do lóbulo principal possa ser configurado pelo usuário. Para cada direção do feixe da antena, o foco do lóbulo principal teve que ser adequadamente definido com o objetivo de se obter o melhor desempenho. Com relação às curvas de potência, observa-se que além do efeito da presença ou não de linha de visada, a direção dos feixes dos lóbulos secundários também altera a potência recebida pelo receptor. Essa é a principal diferença observada em relação às simulações da Seção 4.2. Na seção de Anexos, encontram-se os resultados dessa simulação com a antena transmissora disposta em outros pontos.

4.4 Tabela de coeficientes de Canal

No percurso previamente estabelecido, há oito pontos em que é possível fixar um transmissor ou receptor. Esses pontos são marcados por círculos azuis como pode-se ver na Figura 22, onde nesta figura o transmissor se encontra no ponto 4. Fixando a coordenada do transmissor e variando a posição do receptor, é possível obter vetores de potência de recepção ao longo dos percursos, como feito nas Seções anteriores. Se o transmissor for colocado em um dos 8 possíveis pontos diferentes ao longo do trajeto, então 8 vetores de potência recebida podem ser gerados. Sendo assim, é possível obter uma matriz de potência recebida quadrada 8×8 , que relaciona em suas linhas os pontos de posicionamento do receptor e em suas colunas os pontos de posicionamento do receptor.

Para extrair esses dados e montar a tabela/matriz de recepção, foi necessário realizar algumas modificações no layout da simulação. A primeira mudança é que o sistema passou a ser SISO, com antenas omnidirecionais no receptor e transmissor. Aqui os transmissores são posicionados a 25m de altura e os receptores em 2m.

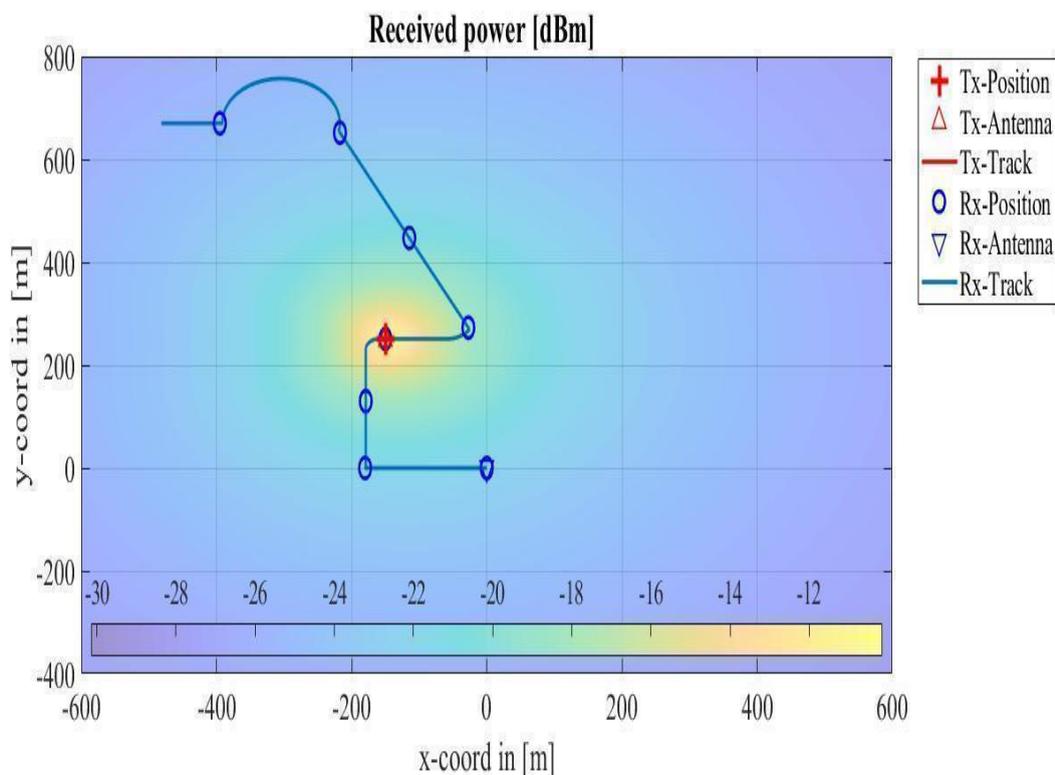


Figura 22 - Transmissor localizado no P4 e mapa de calor, esta figura não leva em conta o cenário utilizado e LOS/NLOS, somente a perda de potência no espaço livre nas coordenadas.

As Tabelas 3 e 4 a seguir apresentam a potência de recepção para os pontos do percurso em dBm para uma operação em 3,6 GHz e 26 GHz, respectivamente. Como esperado, podemos observar uma queda geral na potência de recepção em 30 GHz se comparado a 3,6 GHz devido ao fato de que quanto maior a frequência, maior a atenuação sofrida pelo sinal. Isto pode ser observado em todas as tabelas seguintes.

Potência Recebida (dBm): as linhas representam as coordenadas dos receptores e as colunas dos transmissores. Operando em 3,6 GHz								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
P1	-19,44	-45,39	-63,52	-34,96	-46	-56,75	-77,32	-85,69
P2	-42,74	-23,35	-36,75	-37,99	-67	-91,73	-87,87	-91,04
P3	-37,81	-32,9	-14	-27,85	-71,2	-80,79	-88,82	-91,66
P4	-34,72	-42,12	-24,41	-22,87	-32,67	-69,63	-89,57	-80,82
P5	-46,782	-43,88	-41,75	-33,64	-16,75	-47,88	-58,85	-85,33
P6	-54,11	-54,32	-63,4	-59,23	-39,97	-25,95	-42,57	-46,22
P7	-91,62	-92,38	-69,7	-50,27	-51,84	-41,18	-22,4	-35,69
P8	-87,89	-86,59	-73,6	-85,7	-47,48	-38,31	-27,65	-33,2

Tabela 3

Potência Recebida (dBm) As linhas representam os receptores e as colunas os transmissores. Operando em 30 GHz								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
P1	-43,47	-48	-59,2	-68,4	-60,6	-73,8	-113,1	-111,1
P2	-62,2	-38,38	-48,4	-68,7	-69,4	-111,4	-117,6	-106,4
P3	-59,15	-52,33	-32,41	-55,69	-58,34	-92,6	-109,3	-100,3
P4	-55,09	-60,5	-40,35	-32,82	-50,36	-57,69	-99,5	-93,9
P5	-64,5	-62,5	-64,1	-54	-37,45	-52,07	-103,7	-102,9
P6	-67,9	-69,5	-63,4	-59,14	-53,51	-39,46	-61,5	-65,9
P7	-66,6	-98	-100,4	-64,1	-62,5	-59,82	-39,8	-54,9
P8	-107,8	-117,4	-109,7	-102,8	-104,7	-63	-44,72	-52,02

Tabela 4

Por fim, as Tabelas 4 e 6 mostram os coeficientes complexos do canal nos oito pontos para as diferentes frequências de operação. Esses coeficientes são utilizados pelo Quadriga para cálculo da potência de recepção, mas aqui são dados como o ganho completo entre cada par de antena transmissora-receptora. É importante ressaltar que o Quadriga simula diversos multipercursos durante

a transmissão, que possuem diferentes coeficientes de canal, de acordo com o cenário de propagação escolhido. Os valores apresentados nas Tabelas 5 e 6 são calculados pela média dos ganhos observados em cada multipercorso.

Tabela de coeficientes de canal para 3,6 GHz as linhas correspondem às coordenadas do receptor e colunas as do transmissor.								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
P1	(8,69+1,36j) e-04	3.02e-05 - 4.04e-05j	(1,65-4,26j) e-05	(2,76-2,33j) e-05	1.27e-05 + 4.01e-05j	1.91e-05 + 2.38e-05j	-1.35e-07 + 1.58e-07j	-2.82e-07 + 1.52e-07j
P2	(2,41-1,8j) e- 5	-5.62e-04 + 1.98e- 04j	-2,26e-05 - 3,85e-05j	(2e- 05+9,80je-6)	-1.66e-05 - 2.07e-05j	-4.31e-06 - 3.10e-05j	-6.62e-08 - 1.28e-07j	-5.40e-07 - 6.90e-07j
P3	(4,85+6,93j) e-05	1.94e-04 + 6.94e- 05j	-3,68e-04 - 3,90e-04j	-3,37e- 05+1,03je- 04	1.17e-05 - 2.56e-05j	4.33e-06 - 3.36e-06j	1.35e-07 + 3.47e-07j	-3.06e-07 + 2.60e-07j
P4	(-2,95e- 5+7,5je-6)	2.62e-05 - 1.02e-05j	1,08e-04 + 3,30e-05j	-1,83e-04- 6,71e-05	-6.94e-05 - 1.24e-05j	1.01e-05 + 9.40e-06j	-5.83e-07 + 1.35e-06j	6.97e-07 - 1.96e-07j
P5	-1,08e- 05+8,85e-06j	3,66e-05 + 7.48e- 06j	-4,1e-05 + 2,69e-05j	-1,76e- 04+7,09je- 05	7.69e-04 - 7.16e-04j	3.03e-04 - 4.28e-05j	1.04e-05 + 1.73e-05j	1.03e-06 - 1.71e-07j
P6	-2,7e- 05+3,76e-05	-1.36e-08 + 1.11e- 07j	-4.54e-07 + 6.67e-07j	-2,15e- 05+4,14e- 05j	-3.70e-05 + 1.22e-05j	-5.33e-04 + 2.61e-04j	2.96e-04 - 3.29e-04j	3.73e-05 + 4.80e-05j
P7	-4,50e-08- 1,6je-07	-9.46e-07 - 7.42e- 07j	2.57e-07 - 3.91e-07j	-1,26e-06- 8,29e-08j	2.76e-05 + 6.30e-08j	3.95e-05 - 6.09e-05j	5.03e-04 + 8.56e-04j	1.27e-04 - 5.52e-05j
P8	-1,78e-07- 6,38je-08	-3.41e-07 + 9.67e- 07j	2.09e-07 - 2.17e-06j	-8,45e-07- 1,81e-6j	1.80e-06 - 3.92e-07j	-1.98e-05 + 3.05e-05j	-6.58e-05 + 1.66e-04j	-4.07e-05 + 1.13e-04

Tabela 5

Tabela de coeficientes de canal para 30 GHz as linhas correspondem às coordenadas do receptor e colunas as do transmissor.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
P1	-1.41e-05 - 4.60e-05j	-4.61e-06 + 6.94e- 06j	5.85e-06 + 9.07e-06j	1.92e-06 - 3.08e-06j	2.43e-06 + 4.32e-06j	-1.54e-06 - 3.52e-07j	-3.06e-08 + 2.29e-08j	-2.35e-08 - 6.02e-09j
P2	-1.03e-05 - 6.89e-06j	-1.28e-04 + 7.76e- 05j	-2.08e-05 - 3.19e-05j	-3.28e-06 - 5.918e-06j	-2.66e-06 - 1.47e-06j	2.106e-06 + 5.988e-07j	-1.40e-09 - 2.90e-08j	2.97e-08 - 3.13e-08j
P3	-2.58e-06 - 3.52e-06j	-8.04e-06 - 1.76e- 05j	2.5893e-05 - 6.0008e-05j	7.25e-06 + 1.8165e-06j	6.68e-06 - 4.91e-07j	-7.78e-07 - 1.26e-07j	8.75e-09 + 2.78e-08j	-1.57e-08 - 6.51e-09j
P4	-2.96e-06 + 1.75e-06j	3.90e-06 - 2.34e-06j	-1.19e-05 + 3,68e-06j	6.33e-05 - 1.9e-05j	1.66e-06 - 7.42e-06j	3.24e-08 + 4.40e-08j	5.20e-08 - 4.49e-09j	2.99e-07 - 1.30e-07j
P5	-2.97e-06 - 6.31e-07j	2.62e-06 - 3.82e-07j	-4.26e-06 + 1.23e-05j	-7.70e-06 + 3.30e-05j	9.41e-06 - 1.40e-05j	-8.45e-06 + 9.52e-07j	-1.61e-06 + 5.02e-07j	-2.05e-07 + 7.97e-08j
P6	1.86e-06 - 1.90e-06j	2.44e-08 + 1.13e- 09j	-1.27e-07 - 3.07e-08j	1.84e-06 + 3.07e-06j	1.49e-04 + 9.67e-05j	2.02e-05 - 3.06e-05j	-2.04e-06 + 4.39e-06j	1.27e-05 + 2.47e-06j
P7	1.43e-08 - 3.71e-09j	4.05e-08 - 2.34e-08j	-3.38e-09 + 6.51e-09j	5.24e-09 - 8.58e-09j	-1.00e-06 + 3.01e-06j	1.79e-06 + 3.91e-06j	-5.25e-05 - 1.67e-05j	3.14e-06 - 7.03e-06j
P8	-1.25e-09 - 1.06e-08j	-9.74e-09 - 4.26e- 09j	-73,6	-1.09e-08 + 2.34e-08j	-2.20e-08 - 2.89e-08j	3.91e-06 - 1.14e-06j	3.27e-05 + 2.72e-05j	-1.24e-05 + 5.37e-06j

Tabela 6

5. Conclusões e perspectivas

A partir dos estudos realizados, podemos observar que o *software* Quadriga se mostra uma opção interessante para simulação de canais em redes 5G. Os resultados das simulações realizadas são coerentes como o que se esperava. Nesse trabalho não foram validados os resultados obtidos por meio de medições de campo, embora esse seja um caminho natural na continuação deste trabalho.

O *software* Quadriga ainda fornece parâmetros importantes para se determinar a matriz de canal MIMO. A partir dos resultados obtidos e da matriz de canal gerada, seria possível realizar estudos de otimização de redes 5G em faixas de frequência Sub-6 GHz e *mmWave*. A matriz de canal de um enlace de comunicação pode ser usada para determinar a capacidade daquele canal, além de permitir a otimização da relação sinal-ruído na recepção por meio de técnicas de *beamforming*.

A possibilidade de mapeamento da potência recebida ao longo de um trajeto também permitirá o planejamento de redes 5G em cenários mais realistas de locomoção de usuários. Seria possível determinar, por exemplo, a distribuição de antenas e estações rádio base ao longo de vias públicas, como ruas, avenidas e rodovias.

6. Referências bibliográficas

[1] Ericsson Mobility Report 2018

Disponível em <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/reports>

[2] Oliveira, N; Alencar, M E Lopes, W - Evolução da Arquitetura de Redes Móveis Rumo ao 5G, 2018

[3] The History Of Wireless Technology- StoryMap. Disponível em

<http://www.exigentnetworks.ie/thehistory-of-wireless-technology-storymap/>. Acesso em jun.2020

[4] A Survey: Wireless Mobile Technology Generations With 5G. Disponível em

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.679.8498&rep=rep1&type=pdf>.

Acesso em jun.2020

[5] Moreira, M - 5G – Evolução, MIMO massivo, beamforming e formas de onda Disponível em

https://app.uff.br/riuff/bitstream/1/7056/1/Martha_Moreira_TCC_5G.pdf. Acesso em julho de 2020

[6] PANWARL, N; SHARMA, S; SINGH, A.- A Survey on 5G: The Next Generation of Mobile Communication, 2016

[7] A, Zaidi et al.- 5G Physical Layer: Principles, Models and Technology Components, 2018

[8] MOKHTARI, Z.; SABBAGHIAN, M.; DINIS, R. A Survey on Massive MIMO Systems in Presence of Channel and Hardware Impairments. Multidisciplinary Digital Publishing Institute Sensors Journal. Janeiro 2019. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/330152675_A_Survey_on_Massive_MIMO_Systems_in_Presence_of_Channel_and_Hardware_Impairments

[9] ARAÚJO, D. et al. Massive MIMO: survey and future research topics.IET Communications.

Mai 2016. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7581208>

- [10] Uwaechia, A.; Mahyuddin N. A Comprehensive Survey on Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation Wireless Networks: Feasibility and Challenges. IEEE Access Journal, Volume 8, p. 62367 - 62414. Março 2020
- [11] Shannon, C. Communication in the presence of noise. Proceedings of the IRE, Volume 37, n. 1., p 10-21, janeiro 1949
- [12] Rappaport, Theodore S. Comunicação sem fio: Princípios e práticas, 2º edição, São Paulo, Pearson Prentice Hall. p. 73. 2009
- [13] Rappaport, Theodore S. Comunicação sem fio: Princípios e práticas, 2º edição, São Paulo, Pearson Prentice Hall. p. 91. 2009
- [14] Rappaport, Theodore S. Comunicação sem fio: Princípios e práticas, 2º edição, São Paulo, Pearson Prentice Hall. p. 118-119. 2009
- [15] Rappaport, Theodore S. Comunicação sem fio: Princípios e práticas, 2º edição, São Paulo, Pearson Prentice Hall. p. 130-136. 2009
- [16] Rappaport, Theodore S. Comunicação sem fio: Princípios e práticas, 2º edição, São Paulo, Pearson Prentice Hall. p. 139, 2009
- [17] Rappaport, Theodore S. Comunicação sem fio: Princípios e práticas, 2º edição, São Paulo, Pearson Prentice Hall. p. 247, 2009
- [18] Fraunhofer Heinrich Hertz Institute Quadriga <<https://Quadriga-channel-model.de/>>. Acesso em agosto de 2020
- [19] D, Qu in OQAM/FBMC for Future Wireless Communications, 2018
- [20] Dammann, A Performance of Cyclic Delay Diversity in Ricean Channels, 2018

[21] Mobile Communications - National Chiao Tung University, 2018

[22] Wikimedia Commons contributors. File:Rice distribution PDF.png. Wikimedia Commons, the free média repository. Disponível em:

https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Rice_distributiona_PDF.png&oldid=486078562. Acesso em 15 de dezembro de 2020.

[23] Weisstein, E . "Modified Bessel Function of the First Kind." *MathWorld*--A Wolfram Web Resource. Disponível em:

<https://mathworld.wolfram.com/ModifiedBesselFunctionoftheFirstKind.html>. [S.D.]. Acesso em 14 de dezembro de 2020

[24] Wikimedia Commons contributors

File:MIMO_SIMO_MISO_SISO_explanation_without_confusion.svg Wikimedia Commons, the free média repository. Disponível em:

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MIMO_SIMO_MISO_SISO_explanation_without_confusion.svg. Acesso em 16 de dezembro de 2020.

[25] Google Maps - Disponível em:

https://www.google.com/maps/place/Faculdade+de+Tecnologia+da+Unicamp/@-22.562406,-47.4251129,15z/data=!4m2!3m1!1s0x0:0xf7f5dbc6128be719?sa=X&ved=2ahUKEwjTopKOWvbtAhVZH7kGHThOCwsQ_BIwDXoECBgQBQ. Acesso em 15 de agosto de 2020.

[26] Kyosti P, Meinila J, et al.,” IST-4-027756 WINNER II D1.1.1 V 1.1: WINNER II interim channel models,” tech. Rep., 2006. Disponível em: <http://www.ist-winner.org>. Acesso em 12 de dezembro de 2020.

[27] Spatial Channel Model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) Simulations, document 3GPP TR 25.996 V12.0.0, Sep. 2014. Disponível em:

https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/125900_125999/125996/11.00.00_60/tr_125996v110000p.pdf. Acesso em 18 de dezembro de 2020.

[28] R, Jones, “A new calculus for the treatment of optical systems, i. description and discussion of the calculus,” Journal of the Optical Society of America, vol. 31, pp. 488–493, July 1941.

[29] Antena 3GPP 3D - 3GPP specifications - R 36.873, v12.5.0, pp.17 - Disponível em: <https://www.3gpp.org/specifications/specification-numbering>.

Acesso em: 21 de dezembro de 2020

[30] HOLCMAN, A.” Deploying mmWave to unleash 5G’s full potential”. Disponível em: <https://www.qualcomm.com/news/onq/2020/11/10/deploying-mmwave-unleash-5gs-full-potential>

Acesso em: 28 de dezembro de 2020.

7. Anexos

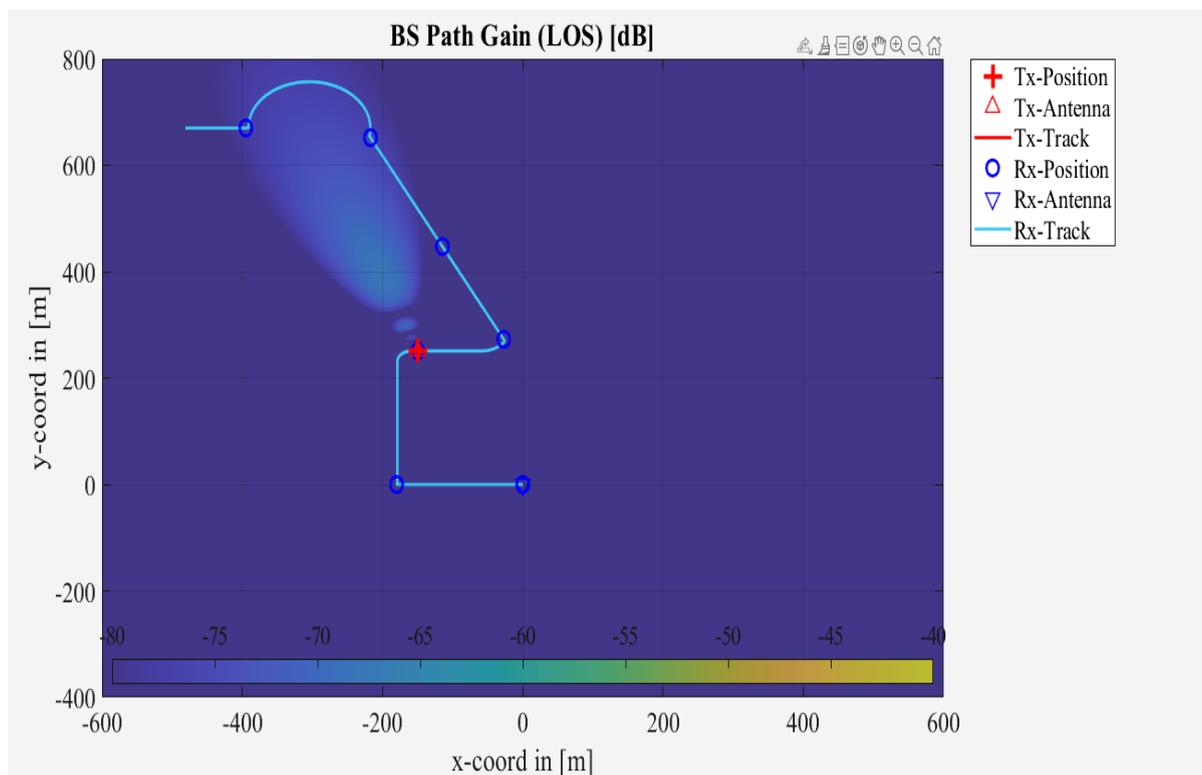


Figura 23 - Transmissor localizado no ponto P3 e direção do feixe em 105° (3,6 GHz).

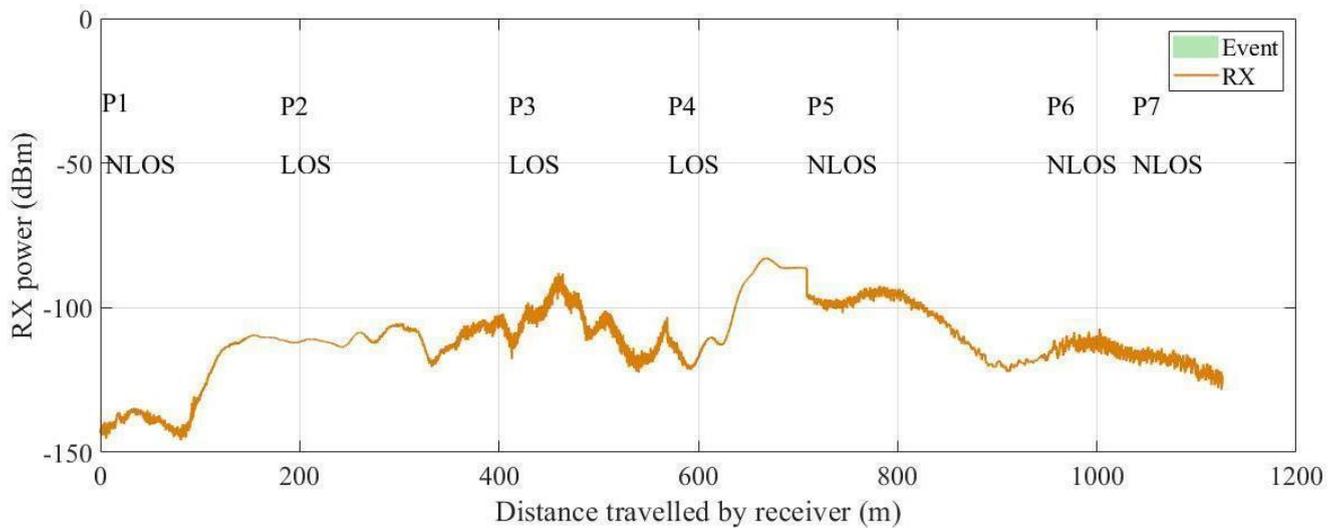


Figura 24 - Perfil de potência recebida pelo receptor com o transmissor em P3 para operação em 3,6GHz.

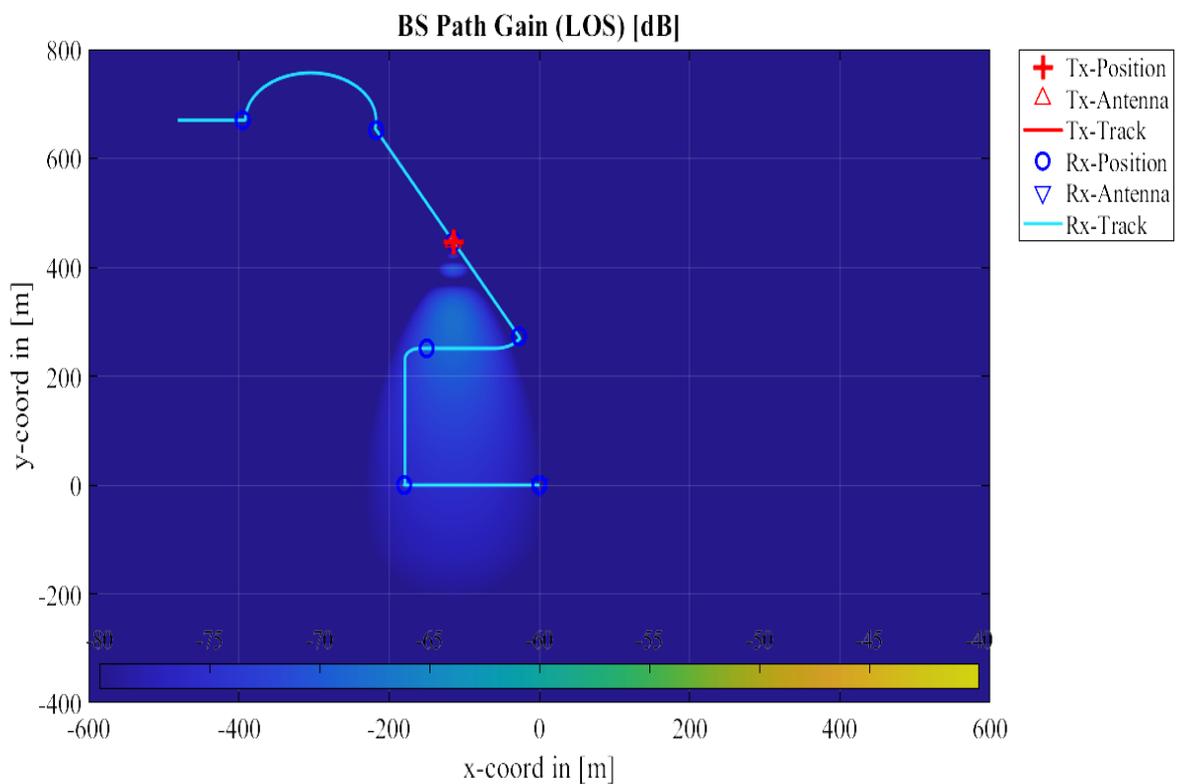


Figura 25 - Transmissor localizado no ponto P5 e direção do feixe em 270° (3,6 GHz).

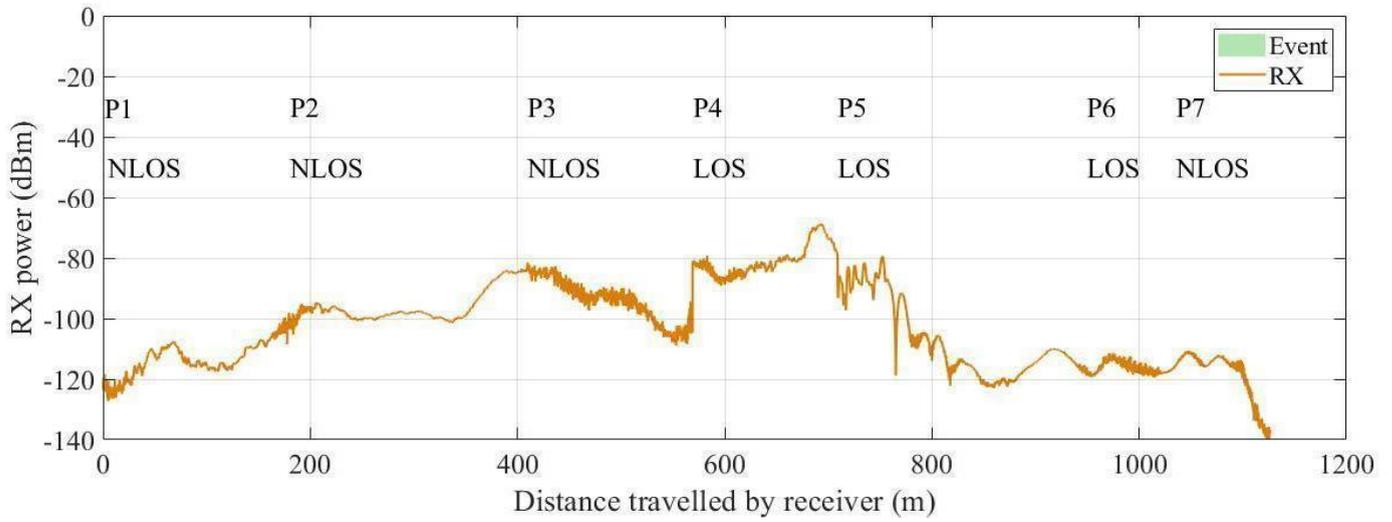


Figura 26 - Perfil de potência recebida pelo receptor com o transmissor em P5 operando em 3,6 GHz.

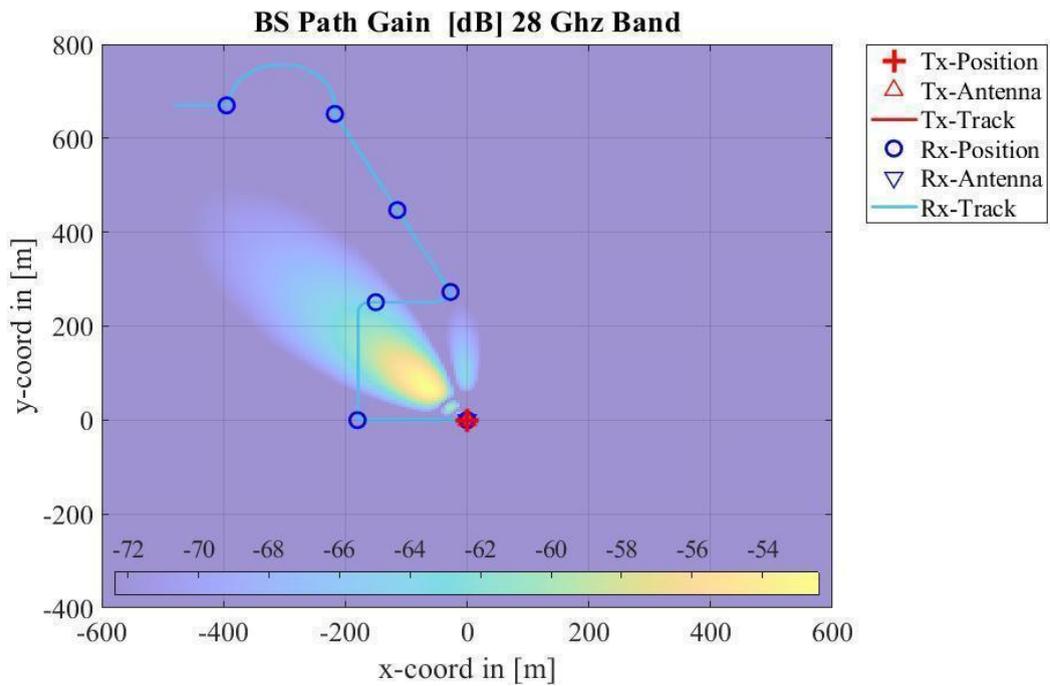


Figura 27 - Mapa de calor com transmissor localizado em P1 com o transmissor operando em 28 GHz utilizando beamforming.

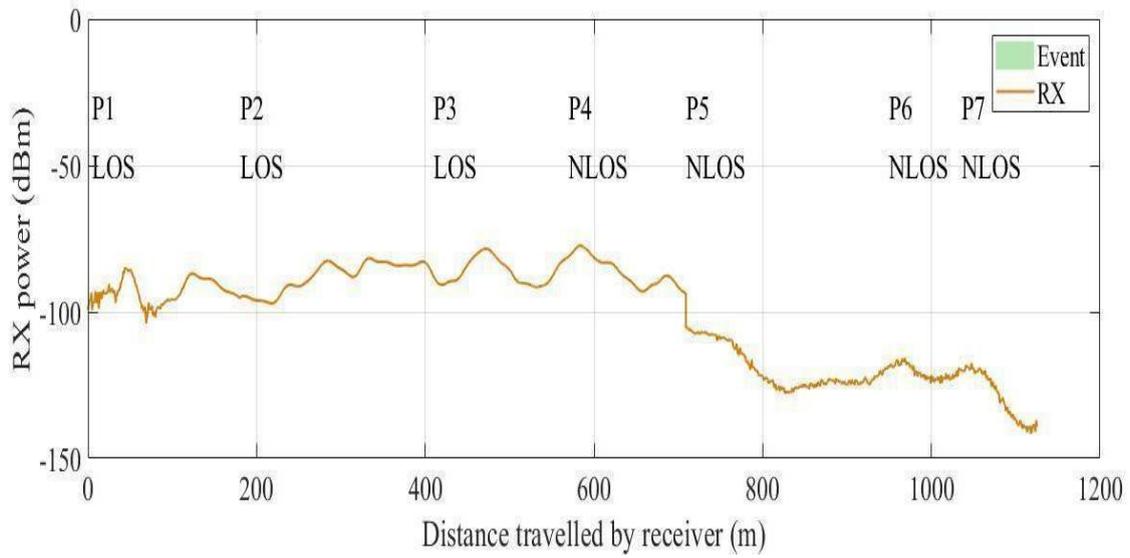


Figura 28 - Variação de potência recebida pelo receptor com o transmissor localizado em P1 operando em 28 GHz utilizando beamforming.

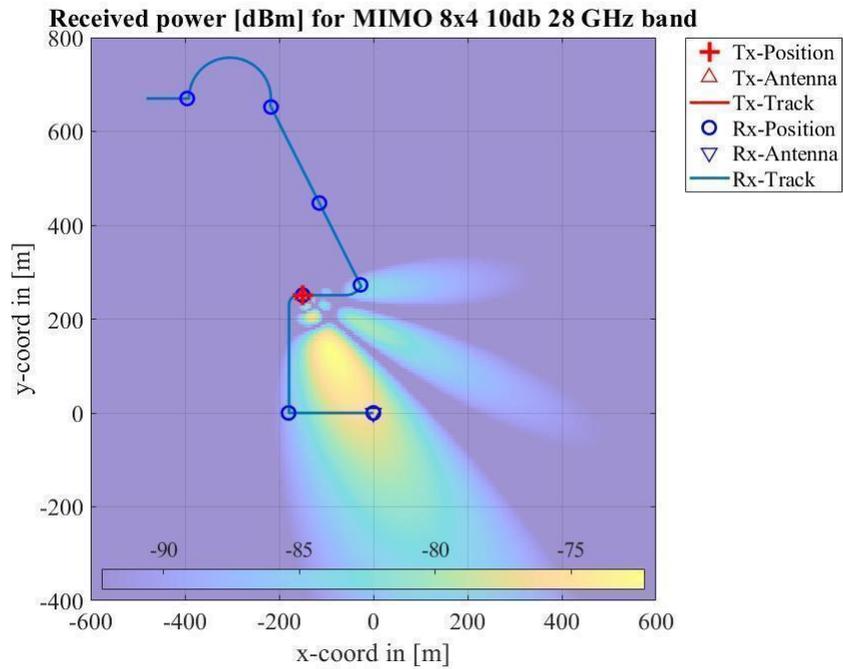


Figura 29 - Mapa de calor com transmissor localizado em P3 com o transmissor operando em 28 GHz utilizando beamforming.

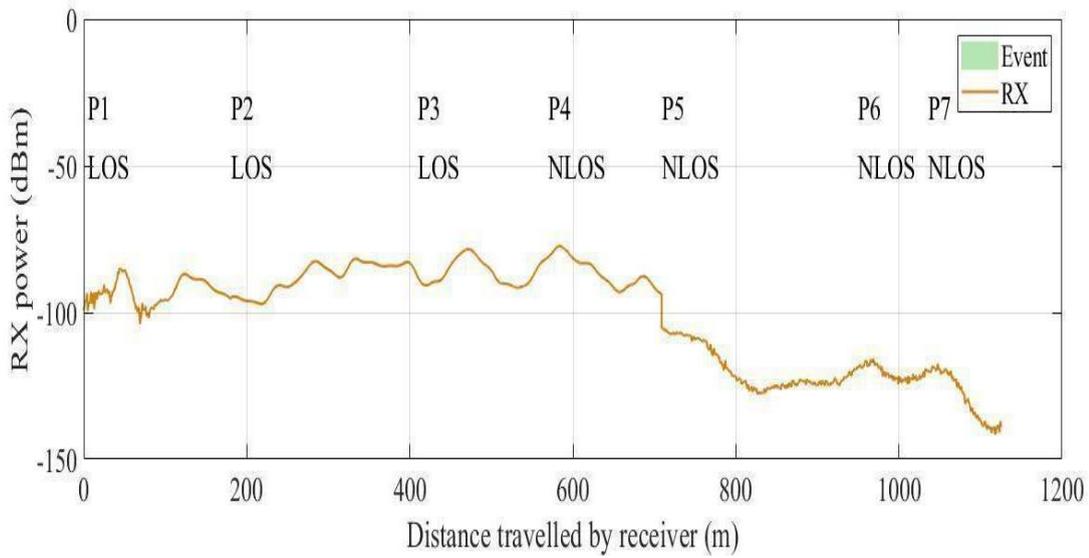


Figura 30 - Variação de potência recebida pelo receptor com o transmissor localizado em P3 operando em 28 GHz utilizando beamforming.

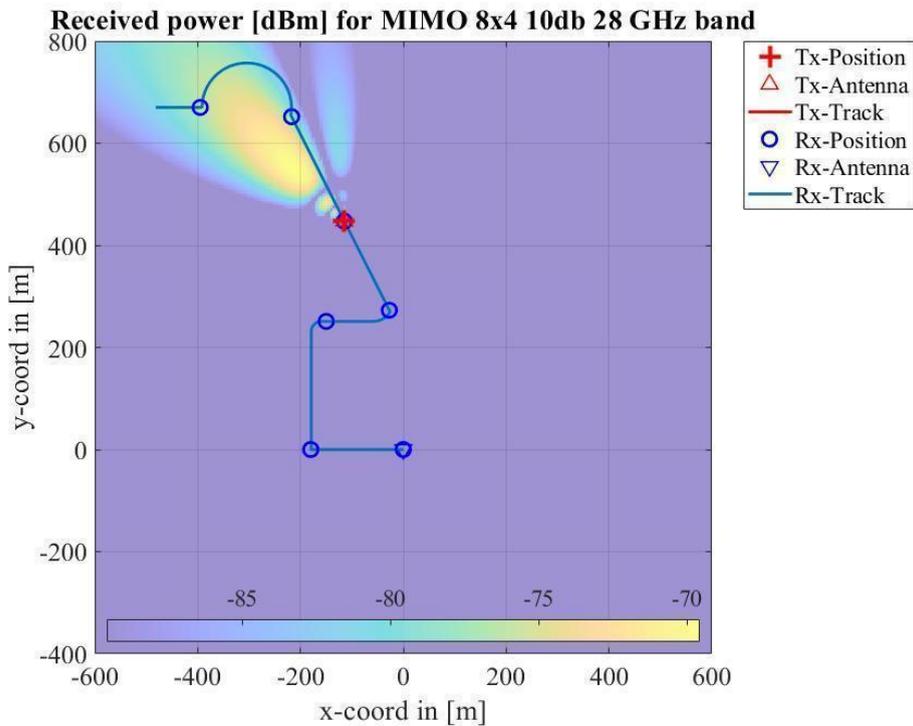


Figura 31 - Mapa de calor o transmissor localizado em P5 Variação operando em 28 GHz utilizando beamforming.

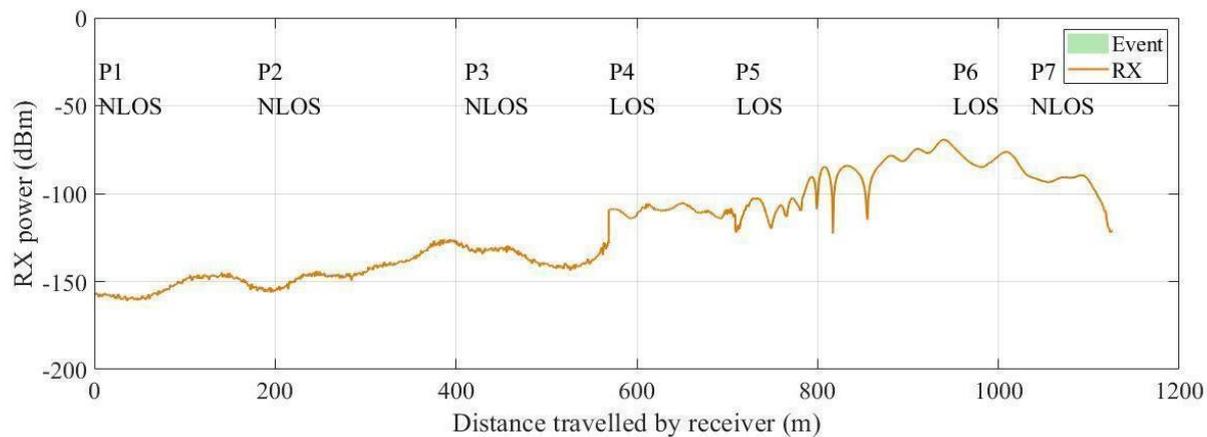


Figura 32 - Variação de potência recebida pelo receptor com o transmissor localizado em P5 operando em 28 GHz utilizando beamforming.

Ganho do absoluto do Canal - As linhas representam os receptores e as colunas os transmissores.

Operando em 3,6 GHz

	P1	P2)	P3	P4	P5	P6	P7	P8
P1	1,14E-06	1,14E-06	4,45E-11	3,19E-08	2,51E-09	2,11E-10	1,85E-16	2,70E-13
P2	5,32E-09	4,23E-07	-2,11E-08	1,59E-08	2,00E-11	7,71E-14	1,63E-13	7,87E-14
P3	1,66E-08	5,13E-08	3,98E-06	1,64E-07	7,59E-12	8,34E-13	1,31E-13	6,82E-14
P4	3,37E-08	6,14E-09	3,62E-07	5,16E-11	5,41E-08	1,09E-15	-1,10E-13	8,28E-13
P5	2,08E-09	4,09E-09	6,68E-09	4,33E-08	2,11E-06	2,05E-09	1,30E-10	2,93E-13
P6	3,88E-10	-3,70E-10	-4,66E-11	1,17E-10	-1,16E-08	2,54E-07	-5,53E-09	2,39E-09
P7	6,89E-14	5,78E-14	1,07E-11	-2,35E-10	6,55E-10	-7,62E-09	5,75E-07	2,70E-08
P8	1,66E-13	2,19E-13	-4,37E-12	2,69E-13	1,79E-09	1,48E-08	1,84E-07	4,79E-08

Tabela 7

Ganho absoluto do canal As linhas representam as linhas correspondem às coordenadas do receptor e as colunas do transmissor. Operando em 30 GHz								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
P1	-4,27E-09	-1,58E-09	-1,20E-10	1,45E-10	8,71E-11	4,17E-12	4,90E-16	7,76E-16
P2	6,03E-11	1,45E-08	-1,45E-09	1,35E-11	1,15E-11	7,24E-16	-1,74E-16	-2,29E-15
P3	-1,22E-10	-5,85E-10	-5,74E-08	2,14E-10	-1,47E-10	-5,50E-14	-1,17E-15	-9,33E-15
P4	3,10E-09	8,81E-11	9,23E-09	5,22E-08	9,20E-10	1,84E-10	1,12E-14	4,07E-13
P5	3,55E-11	5,62E-11	3,89E-11	-3,98E-10	1,80E-08	6,21E-10	4,93E-15	6,18E-15
P6	1,62E-11	1,12E-11	4,57E-11	-1,22E-10	4,46E-10	1,13E-08	7,08E-11	6,46E-11
P7	2,19E-11	1,58E-14	9,12E-15	3,89E-11	6,17E-11	1,04E-10	1,05E-08	-1,15E-10
P8	1,66E-15	1,82E-16	1,07E-15	5,25E-15	3,39E-15	5,01E-11	3,37E-09	6,28E-10

Tabela 8