

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS POLITÉCNICO CURITIBA

Fernando Mira Machuca

Avaliação de desempenho de sistemas de comunicação sem fio na
faixa de ondas milimétricas

CURITIBA
2019

FERNANDO MIRA MACHUCA

Avaliação de desempenho de sistemas de comunicação sem fio
na faixa de ondas milimétricas.

**Trabalho de Conclusão de Curso sub-
metido à Universidade Federal do Pa-
raná, como requisito necessário para
obtenção do grau de Bacharel em En-
genharia Elétrica**

Curitiba, junho de 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FERNANDO MIRA MACHUCA

Esta Monografia foi julgada adequada para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, sendo aprovada em sua forma final pela banca examinadora:

Orientador(a): Prof. : Dr. Evelio Martín
García Fernández
Universidade Federal do Paraná - UFPR

Prof. Ph.D. Luis Henrique Assumpção Lolis
Universidade Federal do Paraná - UFPR

Prof. Dr. César Augusto Dartora
Universidade Federal do Paraná - UFPR

Curitiba, 14 de junho de 2019

Resumo

Com a finalidade de avaliar o desempenho de sistemas de comunicação sem fio na faixa de ondas milimétricas utilizando o software de simulação NYUSIM, foram desenvolvidos dois métodos para, a partir dos valores de saída simulados pelo software NYUSIM, obter a curva de probabilidade de outage em função da relação sinal ruído média.

Palavras-chave: comunicação sem fio, NYUSIM, ondas milimétricas, probabilidade de outage.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Perfil de atraso de potência omnidirecional.	15
Figura 2 – Perfil de atraso de potência direcional.	15
Figura 3 – Parâmetros NYUSIM	17
Figura 4 – Conjunto para dez metros variando potência transmitida.	18
Figura 5 – Conjunto para vinte metros variando potência transmitida.	18
Figura 6 – Conjunto para quarenta metros variando potência transmitida.	18
Figura 7 – Valores de entrada no código.	20
Figura 8 – Entradas auxiliares para iterações automáticas.	20
Figura 9 – Probabilidade de outage em função da SNR média para 28GHz	22
Figura 10 – Probabilidade de outage em função da SNR média para 60GHz	23
Figura 11 – Simulação desenvolvida para 1 Tx e 1 Rx	25

Lista de abreviaturas e siglas

dB - Decibel

dBm - Decibel miliwatt

NYU - New York University (Universidade de Nova Iorque)

NYUSIM - New York University Simulator

LOS - Line of Sight (Linha de visão)

NLOS - Non Line of Sight (Sem linha de visão)

IoT - Internet of things (Internet das coisas)

Wi Fi - dispositivos de rede local sem fios baseados no padrão IEEE 802.11

m - metros

mm - milímetros

mmWave - millimeter wave (onda milimétrica)

GHz - Giga Hertz

MHz - Mega Hertz

ITU - International Communication Union (União Internacional de Comunicação)

5G - Quinta geração de telefonia móvel

6G - Sexta geração de telefonia móvel

PDP - Power delay profile (Perfil de atraso de potência)

UMi - Urban Microcell (Microcélula Urbana)

UMa - Urban Macrocell (Macrocélula Urbana)

URa - Rural Macrocell (Macrocélula Rural)

Rx - Antena receptora

Tx - Antena transmissora

SNR - Signal noise ratio (Relação sinal ruído)

MatLab - Matrix Laboratory

Sumário

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Problemática	10
1.2	Objetivo	11
1.2.1	Objetivo Geral	11
1.2.2	Objetivos Específicos	11
2	REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1	Ondas Milimétricas	12
2.2	Desvanecimento	12
2.2.1	Desvanecimento de larga escala	12
2.2.2	Desvanecimento de pequena escala	12
2.2.2.1	Sombreamento	12
2.2.2.2	Multicaminhos	13
2.3	Probabilidade de Outage	13
2.4	NYUSIM	13
3	METODOLOGIA	16
3.1	Método 1	16
3.1.1	Exemplo método 1	16
3.2	Método 2	19
3.2.1	Exemplo método 2	19
4	RESULTADOS	21
4.1	Resultados método 1 - 28GHz	21
4.2	Resultados método 1 - 60GHz	22
4.3	Resultados método 2 - 28GHz	24
5	CONCLUSÃO	26
5.1	Trabalhos futuros	26
	REFERÊNCIAS	27
	ANEXOS	28
	ANEXO A – SCRIPT DE TRATATIVA DO MÉTODO 1	29

ANEXO B – CÓDIGO FONTE DO NYUSIM COM ALTERAÇÕES .	33
ANEXO C – SCRIPT DE TRATATIVA DO MÉTODO 2	35

1 Introdução

Desde os primórdios da internet no final da década de 60 já foram constatados avanços sem precedentes no que diz respeito ao volume de tráfego de dados através dessa ferramenta, possibilitando que nos tempos atuais, a internet esteja presente em todos os âmbitos da sociedade moderna, servindo para entreter, seja com jogos eletrônicos online, streaming de vídeo, vídeo sob demanda, streaming de música, entre outros, mas também sendo usada como ferramenta para desenvolvimento econômico e social, auxiliando nos estudos e formação dos jovens, pois possibilita que a informação seja mais difundida e descentralizada, avanços da indústria visando melhoria no processo e corte de custos, como exemplo a indústria 4.0 e Internet of Things (IoT), de acordo com [Rappaport et al. 2017].

Várias invenções e ideias foram necessárias para que a internet atingisse o patamar de disseminação e popularidade que possui nos dias atuais. Uma dessas invenções é a rede local de acesso sem fio, baseada no padrão IEEE 802.11, mais conhecida como Wi-Fi. O Wi-Fi, assim como as tecnologias de telefonia móvel que permitem o acesso a internet através de planos telefônicos, facilitaram o acesso a internet e com isso sua disseminação, uma vez que já não era necessário ter um cabo conectado ao dispositivo e o acesso a internet se tornou possível até fora da residência.

1.1 Problemática

Devido a facilidade de uso da rede sem fio e as inúmeras funcionalidades da internet, fez com que surgisse nas pessoas o desejo de ter em suas casas uma rede particular, porém, na frequência de operação do Wi-Fi, as ondas eletromagnéticas atravessam paredes e interferem com as ondas das redes adjacentes, fazendo com que nos grandes centros urbanos exista interferência entre redes. Essa configuração se torna mais crítica quando o centro urbano possui prédios, pois desse modo passa a existir interferência de todas as direções, gerando assim instabilidade no acesso.

Além da interferência, as redes sem fio precisam lidar com altas taxas de transmissão para que o usuário não sinta problemas no seu acesso, como exemplo, quando a pessoa está utilizando um serviço de vídeo sob demanda, no qual, caso a rede apresente qualquer problema de acesso o usuário irá perceber, pois o vídeo pode congelar ou reduzir a qualidade de exibição.

Aumentando a frequência de operação da rede sem fio, é possível aumentar a banda utilizada, fazendo com que uma rede com maior frequência e maior banda tenha uma taxa de transmissão maior que uma rede com menor frequência e banda menor. Outro ponto a

ser considerado é que na faixa de ondas milimétricas, a onda eletromagnética sofre uma atenuação maior no caminho e é mais sensível a efeitos da atmosfera, o que impossibilita de operar um sistema em ondas milimétricas por grandes distâncias, reduzindo assim interferência com redes adjacentes.

Para suprir essas necessidades encontradas na comunicação sem fio deu-se início ao desenvolvimento de sistemas de comunicação sem fio na faixa de ondas milimétricas que, a rigor, abrange comprimentos de onda de 10mm até 1mm, ou, em outras palavras, frequências de 30GHz até 300GHz de acordo com a International Communication Union (ITU), denominando essa faixa de frequência de extrema alta frequência.

A contribuição do atual trabalho é de avaliar o desempenho de sistemas de comunicação para modelos de canais de 5G e 6G através do software de simulação de enlace NYUSIM, desenvolvido pelo grupo NYU WIRELESS.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo Geral

Consiste em avaliar o desempenho de sistemas de comunicação sem fio na faixa de ondas milimétricas utilizando o software de simulação NYUSIM para modelos de canais 5G e 6G.

1.2.2 Objetivos Específicos

Com a finalidade de avaliar o desempenho de sistemas de comunicação sem fio na faixa de ondas milimétricas, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- Estudo de viabilidade do uso do simulador de canais 5G NYUSIM para avaliação de desempenho de sistemas de comunicação sem fio;
- Desenvolver procedimento para determinar a probabilidade de outage para diferentes cenários de comunicação sem fio a partir de perfis de potência obtidos com o NYUSIM; e,
- Avaliar através de simulações o desempenho de diferentes cenários de comunicação sem fio em termos de probabilidade de outage.

2 Revisão de Literatura

2.1 Ondas Milimétricas

Ondas milimétricas, do inglês Millimeter Wave (mmWave), são as ondas eletromagnéticas que possuem comprimento de onda entre 10mm e 1mm, ou seja, ondas com frequência de 30GHz até 300GHz.

Quando o objetivo é fazer sistemas de comunicação sem fio nessa faixa de frequência, problemas com relação a atenuação sofrida pelo sinal são inevitáveis, pois nessas frequências qualquer variação do meio, por exemplo umidade, pressão, temperatura, intensidade da chuva, entre outros efeitos que a atmosfera esteja sujeita a sofrer irá fazer com que o sinal degrade além do esperado. Outro ponto de atenção é que o espaço irá interferir na transmissão, pois o sinal irá refletir e refratar em obstáculos e na antenna receptora irá haver mais que uma potência recebida, em instantes de tempo distintos, caracterizando o fenômeno de multipercurso.

2.2 Desvanecimento

No desvanecimento existem dois fenômenos considerados, o desvanecimento de larga escala e o desvanecimento de pequena escala.

2.2.1 Desvanecimento de larga escala

O fenômeno de desvanecimento de larga escala, também conhecido como perda no caminho de espaço livre (Free-Space Path Loss), é a atenuação sofrida pela onda eletromagnética durante a transmissão de informação de um ponto ao outro sem que haja barreira entre os pontos de comunicação, dizendo que os pontos possuem linha de visão, do inglês line of sight (LOS), [Goldsmith 2005].

2.2.2 Desvanecimento de pequena escala

2.2.2.1 Sombreamento

O sombreamento é o comportamento randômico que um canal de comunicação sem fio irá apresentar devido a objetos que possam obstruir a passagem do sinal, fazendo com que a potência recebida não seja unicamente degradada pelos efeitos de perda no caminho, [Goldsmith 2005].

2.2.2.2 Multicaminhos

O fenômeno de multicaminhos consiste em um efeito que irá causar na recepção do sinal um comportamento indesejado, no qual não será recebido apenas uma potência, mas sim várias potências com intensidades distintas e atrasos distintos, devido ao fato da onda percorrer mais de um caminho, e esses caminhos apresentam distâncias variáveis e atenuações diferentes. Uma modelagem do multicaminhos é através do perfil de intensidade de multicaminho (multipath intensity profile), ou como também é conhecido, perfil de atraso de potência (power delay profile), [Goldsmith 2005].

2.3 Probabilidade de Outage

Dado um canal de comunicação sem fio, com uma antena transmissora enviando informação a uma taxa de transmissão de R bits por segundo, é dito que um canal se encontra em Outage quando, momentaneamente, a capacidade de transmissão do canal C se torna inferior a taxa de transmissão R . Desse modo, na recepção do sinal não se pode ter uma taxa de erro tão pequena quanto a desejada, [Alfaroby, Adriansyah e Anwar 2018].

Com isso, a probabilidade de outage se torna uma métrica que auxilia na análise do canal, pois se o canal possui uma baixa probabilidade de outage, isso o torna possível de ser utilizado, por outro lado se o canal apresenta, por exemplo, uma probabilidade de cinquenta por cento de outage, o tornaria um canal inapropriado para a utilização, já que na metade das tentativas de transmissão o canal não conseguiria carregar a informação da antena transmissora para a receptora sem degradar o sinal de forma irreversível.

2.4 NYUSIM

O software de simulação utilizado foi o NYUSIM, desenvolvido pela NYU WIRELESS, que se trata de um programa escrito em scripts do MatLab que foi desenvolvido para simular transmissões entre antenas para valores de frequência de 500MHz até 100GHz, podendo variar largura de banda, potência transmitida, cenário de transmissão, tipo de ambiente, altura da antena transmissora, distância entre antenas, vegetação, pressão, umidade, intensidade de chuva, antenas, organização das antenas, quantidade de antenas entre outras medidas.

O software NYUSIM, disponível em [WIRELESS 2019], é resultado de um período de seis anos de transmissões na faixa de ondas milimétricas, o que permitiu que o grupo NYU WIRELESS determinasse parâmetros para cada cenário de transmissão, por exemplo, microcélula urbana (UMi), macrocélula urbana (UMa) e macrocélula rural (URa), e a partir desses valores de parâmetros do canal, são realizados cálculos através da ferramenta

MatLab, que por fim resulta nas saídas do software, por exemplo, perfil de atraso de potência, perdas no caminho, informações sobre a antena, entre outros resultados.

Será desenvolvido um exemplo com o cenário que segue:

- Frequência de operação: 28GHz
- Largura de banda: 200MHz
- Cenário: UMi
- Ambiente: LOS
- Distância entre antenas: 20 metros
- Potência transmitida: 0dBm
- Quantidade de antenas RX: 1
- Quantidade de antenas TX: 1
- Valores como pressão, umidade, temperatura, chuva, vegetação, polarização e as propriedades das antenas não foram alterados em comparação aos valores padrões do NYUSIM.

A figura 1 contém uma das saídas do software NYUSIM, que apresenta o perfil de atraso de potência omnidirecional para o cenário descrito.

Outra saída existente é o perfil de atraso de potência direcional, o qual apresenta distinção em comparação ao PDP omnidirecional devido ao fato de que apresenta os efeitos de antenas, ou seja, o PDP direcional está sujeito aos ganhos e aos direcionamentos das antenas. o PDP direcional pode ser visto na figura 2.

Nas figuras 1 e 2 é possível visualizar o fenômeno de multicaminhos, comentado anteriormente, pois o canal de comunicação é apenas um, porém, pode apresentar vários caminhos possíveis entre dois pontos para sinais nessas frequências, fazendo com que na recepção não seja recebido apenas um valor de potência, mas sim vários valores ao longo do tempo.

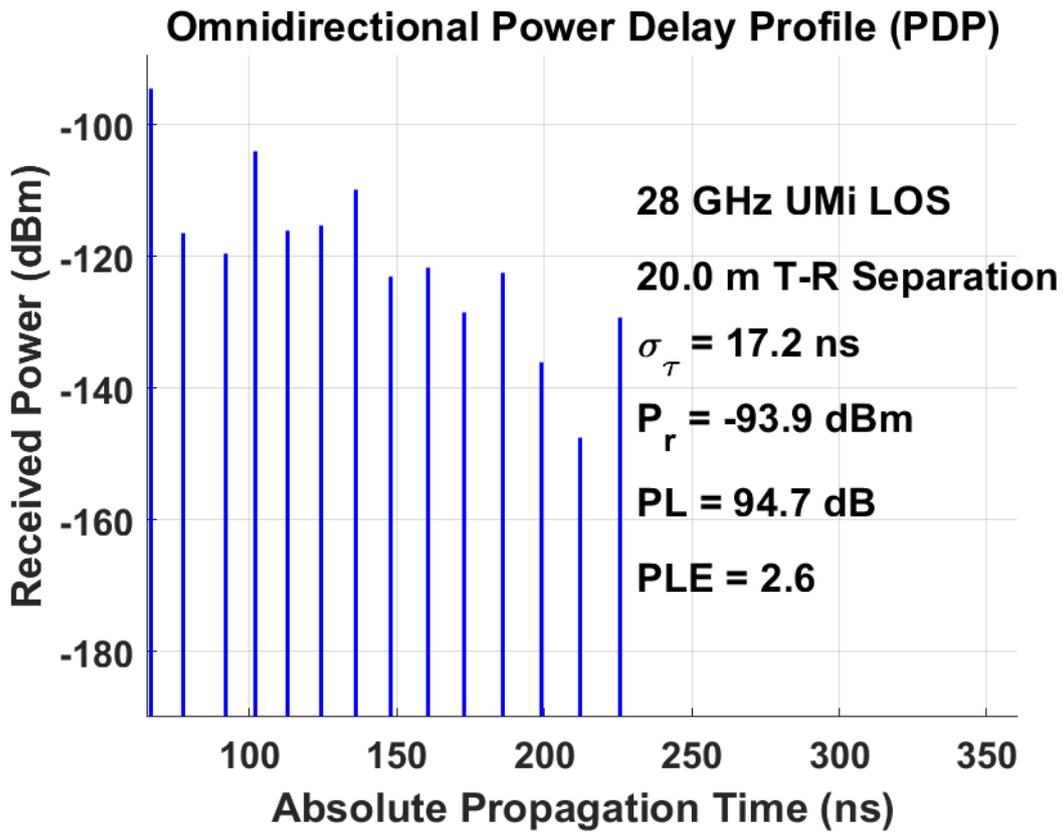


Figura 1 – Perfil de atraso de potência omnidirecional.

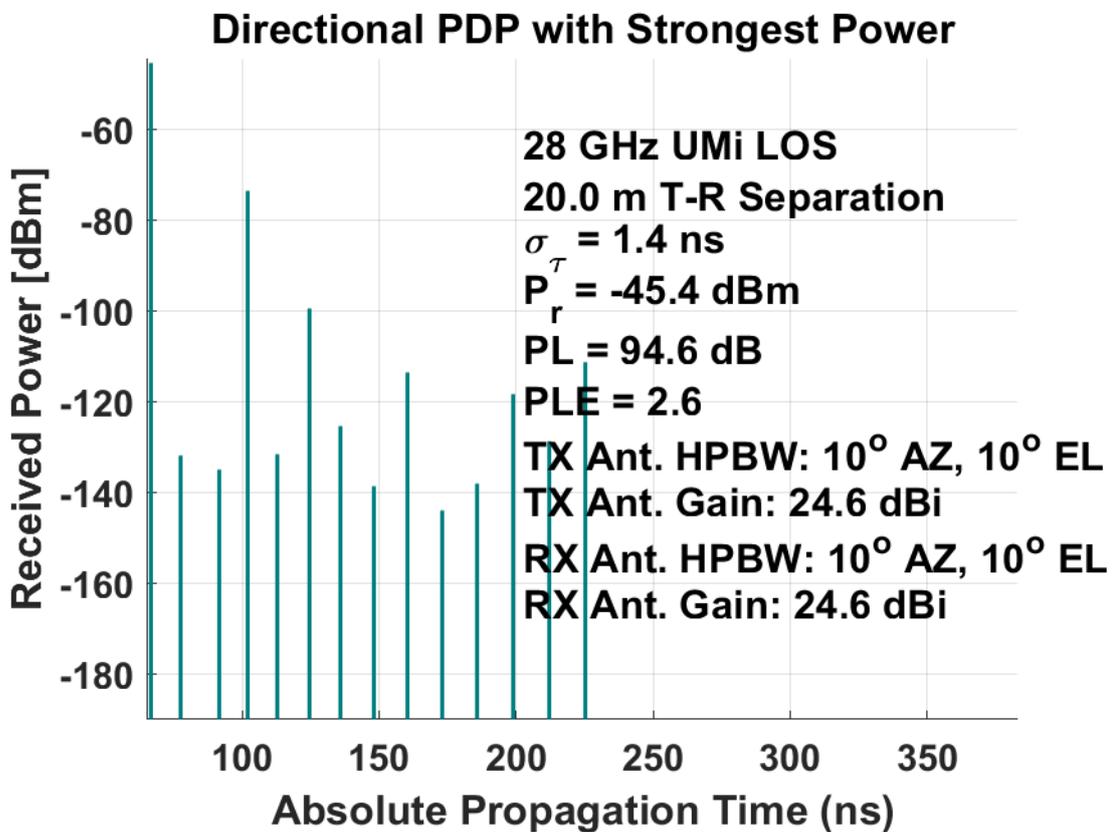


Figura 2 – Perfil de atraso de potência direcional.

3 Metodologia

Para realizar a análise do comportamento do canal através do software NYUSIM foram desenvolvidos dois métodos.

O primeiro método consiste em analisar as perdas no canal e por conta disso foi escolhido a potência recebida omnidirecional, calculada no NYUSIM considerando somente a potência transmitida e as perdas no canal para se obter a potência recebida omnidirecional.

O segundo método tem por objetivo realizar a análise não apenas utilizando as perdas no caminho, mas também considerar que na recepção existe um arranjo de antenas e que essas antenas alteram o valor de potência recebida, de acordo com seus respectivos ganhos e direcionamentos, e podem alterar também a dinâmica do canal, por exemplo, fazendo o canal apresentar uma quantidade menor de caminhos possíveis.

Será comentada sobre a variável *Number of Rx Locations*, que se trata basicamente da quantidade de iterações executadas pelo NYUSIM para aquele cenário, ou seja, definido um cenário alvo, colocar *Number of Rx Locations* sendo dez fará com que o NYUSIM simule dez vezes, uma simulação para cada antena receptora que o usuário deseja.

3.1 Método 1

O primeiro método consiste em:

- Escolher um cenário alvo, definindo frequência, largura de banda, cenário, ambiente, temperatura, pressão, umidade, chuva, vegetação e polarização da onda.
- Escolher um valor para a variável *Number of Rx Locations*, de tal modo que esse valor seja o inverso do valor meta de precisão para a probabilidade de outage.
- Realizar simulações variando tanto a distância entre antenas, como também potência transmitida, visando gerar pontos separados para conseguir definir uma curva de probabilidade de outage em função da SNR média.

Dito isso, a seguir será desenvolvido um exemplo.

3.1.1 Exemplo método 1

Seguindo os passos discretizados anteriormente, a primeira ação a ser tomada é escolher um cenário alvo, como pode ser visto na figura 3 que apresenta a tela do NYUSIM

com seus parâmetros de entrada, foi escolhido para esse caso a frequência de operação de 28GHz, com largura de banda de 200MHz, cenário UMi, ambiente LOS, *Number of Rx Locations* de duzentos e demais medidas como segue.

NYUSIM
Millimeter-Wave Channel Simulator

1. To begin the simulator, click Start
2. Set your input parameters below
3. Select a folder to save files
4. Click Run
5. To run another simulation, click Reset, and repeat Steps 2-4

Channel Parameters

Distance Range Option: Standard (10-500 m)
Frequency (0.5-100 GHz): 28 GHz
RF Bandwidth (0-800 MHz): 200 MHz
Scenario: UMi
Environment: LOS
T-R Separation Distance (10-500/10,000 m): Lower Bound: 10 m, Upper Bound: 10 m
TX Power (0-50 dBm): 0 dBm
Base Station Height (10-150 m): 35 m

Barometric Pressure: 1013.25 mbar
Humidity (0-100%): 50 %
Temperature: 20 °C
Rain Rate (0-150 mm/hr): 0 mm/hr
Polarization: Co-Pol
Foliage Loss: No
Distance Within Foliage: 0 m
Foliage Attenuation: 0.4 dB/m
Number of RX Locations: 200

Antenna Properties

TX Array Type: ULA
RX Array Type: ULA
Number of TX Antenna Elements Nt: 1
Number of RX Antenna Elements Nr: 1
TX Antenna Spacing (in wavelength, 0.1-100): 0.5
RX Antenna Spacing (in wavelength, 0.1-100): 0.5
Number of TX Antenna Elements Per Row Wt: 1
Number of RX Antenna Elements Per Row Wr: 1
TX Antenna Azimuth HPBW (7°-360°): 10 °
TX Antenna Elevation HPBW (7°-45°): 10 °
RX Antenna Azimuth HPBW (7°-360°): 10 °
RX Antenna Elevation HPBW (7°-45°): 10 °

Select a Folder to Save Files
/Users/

Output File
Text File

Start Reset Run Exit

Figura 3 – Parâmetros NYUSIM

Relembrando que o *Number of Rx Locations* se trata do número de antenas para o qual o NYUSIM irá calcular, fazendo com que seja igual ao número de iterações para o cenário, que nesse caso se trata de dez metros de separação entre antenas e potência transmitida de 0 dBm, que irá resultar em duzentos valores distintos de potência recebida, pelo fato de o canal não se manter constante.

Ao ser finalizada a simulação, é obtido o primeiro conjunto de pontos que será utilizado na construção da curva de probabilidade de outage para o canal. Serão necessários mais alguns conjuntos para que seja possível definir uma curva para a probabilidade de outage, desse modo, os outros conjuntos serão obtidos variando a distância entre as antenas e as potências transmitidas. A organização utilizada pode ser vista na figura 4.

Como pode ser visto na figura 4, cada pasta apresentada contém duzentas iterações do NYUSIM, que apresentam diferenças na potência transmitida em cada caso. Esse aglomerado de pastas formam o conjunto para distância entre antenas de dez metros. Foram então simulados mais cenários, variando a distância entre antenas mantendo a variação, também, de potência transmitida, como pode ser visto nas figuras 5 e 6.

- 28GHzPt0BW200D10
- 28GHzPt3BW200D10
- 28GHzPt6BW200D10
- 28GHzPt9BW200D10
- 28GHzPt12BW200D10

Figura 4 – Conjunto para dez metros variando potência transmitida.

- 28GHzPt0BW200D20
- 28GHzPt3BW200D20
- 28GHzPt6BW200D20
- 28GHzPt9BW200D20
- 28GHzPt12BW200D20

Figura 5 – Conjunto para vinte metros variando potência transmitida.

- 28GHzPt0BW200D40
- 28GHzPt3BW200D40
- 28GHzPt6BW200D40
- 28GHzPt9BW200D40
- 28GHzPt12BW200D40

Figura 6 – Conjunto para quarenta metros variando potência transmitida.

Cada pasta apresentada nas figuras 4, 5 e 6 possui internamente duzentas simulações do NYUSIM, ou seja, duzentas potências recebidas omnidirecionais, uma para cada simulação.

Com isso, foi calculada a potência do ruído levando em conta a largura de banda de 200MHz e na sequência foi calculada a SNR para cada uma das duzentas simulações. Esses duzentos valores de SNR foram comparados com um valor de SNR meta, supondo que esse SNR meta seja necessário para que o sistema de decodificação opere corretamente e, caso seja recebido um valor menor que o SNR meta, o decodificador não terá capacidade de receber o sinal corretamente, definindo assim o outage.

Após a comparação ter sido feita, foi extraído a probabilidade de outage desses valores que não atingiram o SNR meta, e essa probabilidade de outage será a referência no eixo das ordenadas, para o eixo das abscissas foi tirada a média das SNRs desses duzentos valores.

Por fim, para cada pasta haverá um valor de SNR média e um valor de probabilidade de outage. Essa tratativa comentada é vista no anexo A, que se trata de um script que

executa no software MatLab.

3.2 Método 2

O segundo método consiste em:

- Escolher um cenário alvo, definindo frequência, largura de banda, cenário, ambiente, temperatura, pressão, umidade, chuva, vegetação, polarização da onda, arranjo de antenas e quantidade de antenas, tanto transmissoras quanto receptoras.
- Escolher um valor para a variável *Number of Rx Locations*, de tal modo que esse valor seja o inverso do valor meta de precisão para a probabilidade de outage.
- Realizar simulações variando tanto a distância entre antenas, como também potência transmitida, visando gerar pontos separados para conseguir definir uma curva de probabilidade de outage em função da SNR média.

A principal diferença existente entre os métodos é a de que para o método 2 ser implementado foram necessárias alterações no código fonte do NYUSIM, pois o software não exporta o valor da potência recebida direcional, sendo essa a potência que sofre os efeitos de ganho, direcionamento, arranjo e quantidade de antenas. Para melhorar a estruturação dos dados e facilitar as simulações, foi implementado também dois vetores novos, um de distâncias e outro de potências que se deseja obter os resultados de simulação, com a finalidade de não ser necessário criar a estrutura de pastas vista no método 1, e também evitar ter que alterar os valores de distância e potência de modo manual.

No anexo B pode ser visto o código fonte do NYUSIM com as alterações comentadas e no anexo C pode ser visto o script de tratamento da saída do anexo B.

Dito isso, a seguir será desenvolvido um exemplo.

3.2.1 Exemplo método 2

Devido ao fato de utilizar o próprio código fonte para executar o NYUSIM, os valores de entrada foram deixados em código, como pode ser visto na figura 7 que apresenta algumas entradas de exemplo, como a frequência de operação, a largura de banda desejada, o tipo de cenário e o ambiente desejado. Importante salientar que essas entradas vistas na figura 7 foram utilizadas como exemplo, de modo que são necessárias tantas entradas quanto as vistas anteriormente na interface do NYUSIM no exemplo do método 1, presente na figura 3.

Além das entradas necessárias pelo NYUSIM, existem as que foram adicionadas para facilitar as simulações, que podem ser vistas na figura 8.

```
%% Input parameters (subject to change per users' own needs)
% Carrier frequency in GHz (0.5-100 GHz)
f = 28; freq = num2str(f);
% RF bandwidth in MHz (0-1000 MHz)
RFBW = 200;
% Operating scenario, can be UMi (urban microcell),UMa (urban macrocell),
% or RMa (Rural macrocell)
sceType = 'UMi';
% Operating environment, can be LOS (line-of-sight) or NLOS (non-line-of-sight)
envType = 'NLOS';
```

Figura 7 – Valores de entrada no código.

```
iteracoes = 200;
distancias=[600 700 800 900 1000 1100 1200];
potencias=[0 3];
```

Figura 8 – Entradas auxiliares para iterações automáticas.

Como pode ser visto na figura 8, foram adicionados dois vetores que serão os responsáveis pelos distintos cenários, ou seja, nesse exemplo estarão disponíveis ao término da simulação valores de potências recebidas direcionais para os cenários de potência transmitida de 0dBm e 3dBm para cada uma das distâncias entre antenas no vetor "distancias". A variável "iteracoes" foi adicionada para facilitar a visualização, mas ela simplesmente passa seu valor para a variável *Number of RX Locations*.

Após a escolha do cenário, configuração das entradas e execução da simulação, a tratativa da saída da simulação é implementada no anexo C, que faz com que para cada cenário gerado exista um valor de SNR média e um valor de probabilidade de outage.

4 Resultados

Retomando o objetivo do trabalho, que consiste em analisar a viabilidade de utilizar o software NYUSIM para obter um modelo de canal para 5G, serão apresentados os resultados obtidos.

4.1 Resultados método 1 - 28GHz

O cenário utilizado no exemplo do método 1 se trata do mesmo que foi utilizado para produzir os resultados que serão apresentados nesta seção. Note que como foi mostrado em [Rappaport et al. 2017], onde é apresentada uma curva de probabilidade de LOS em função da distância, para distâncias entre antenas menores que 50 metros, a probabilidade de ser LOS é maior que 70%, fazendo com que o ambiente escolhido seja LOS.

A configuração do cenário completo foi:

- Frequência de operação: 28GHz
- Largura de banda: 200MHz
- Cenário: UMi
- Ambiente: LOS
- Distância entre antenas: 10m, 20m e 40m, para espalhar os pontos na curva
- Potência transmitida: varia de 0dBm até 12dBm com passo de 3dBm, para espalhar os pontos na curva
- Localizações das antenas RX: 200
- Valores como pressão, umidade, temperatura, chuva, vegetação, polarização e as propriedades das antenas não foram alterados em comparação aos valores padrões do NYUSIM.

O resultado apresentado na figura 9 foi obtido a partir das simulações descritas no exemplo do método 1, que criam o conjunto de pastas e para cada pasta existe um ponto na curva de probabilidade de outage em função da SNR média. Importante comentar que os pontos na figura 9 foram gerados considerando um SNR meta de 5dB.

Como pode ser visto na figura 9, é possível obter uma curva para a probabilidade de outage em função da SNR média, apenas escolhendo pontos estratégicos para a simulação,

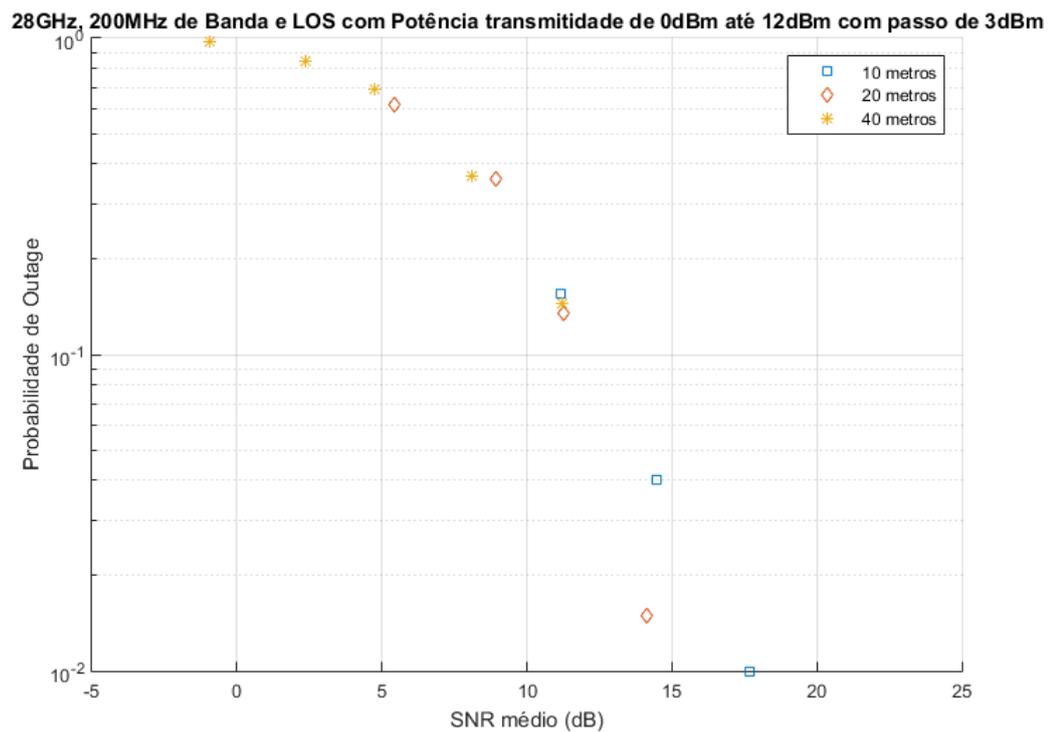


Figura 9 – Probabilidade de outage em função da SNR média para 28GHz

fazendo com que esses pontos se espalhem para obter vários valores de probabilidade de outage. Importante notar que próximo de uma probabilidade de outage de 10^{-2} , que se encontra próximo do limite de precisão da simulação, existe um ponto que se encontra fora da curva, fazendo com que seja necessário realizar um maior número de iterações.

4.2 Resultados método 1 - 60GHz

Foi desenvolvido também simulações para analisar como o canal de comunicação sem fio se comporta para um cenário de frequência de operação maior. O cenário alvo dessa simulação foi:

- Frequência de operação: 60GHz
- Largura de banda: 800MHz
- Cenário: UMi
- Ambiente: LOS
- Distância entre antenas: 10m, 15m e 30m, para espalhar os pontos na curva
- Potência transmitida: varia de 12dBm até 27dBm com passo de 3dBm, para espalhar os pontos na curva

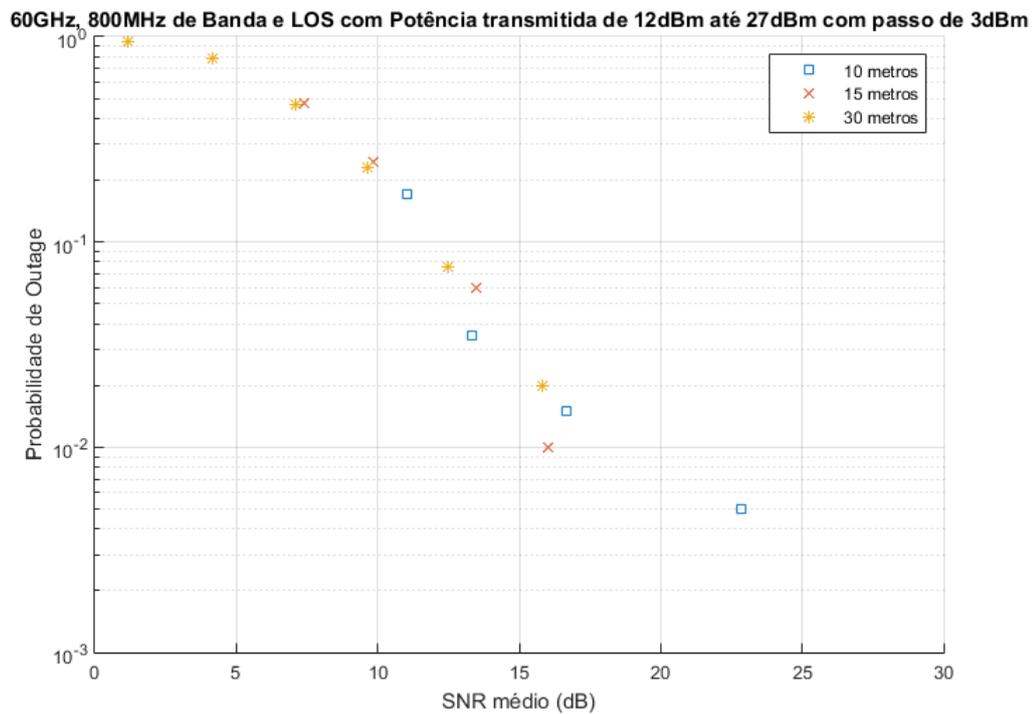


Figura 10 – Probabilidade de outage em função da SNR média para 60GHz

- Localizações das antenas RX: 200
- Valores como pressão, umidade, temperatura, chuva, vegetação, polarização e as propriedades das antenas não foram alterados em comparação aos valores padrões do NYUSIM.

Em comparação com o primeiro cenário simulado, de 28GHz, o cenário atual, além de uma frequência de operação maior, também apresenta uma largura de banda maior, que implica em uma maior quantidade de potência de ruído. Os pontos obtidos para o cenário de 60GHz podem ser vistos na figura 10. Importante comentar que o valor de SNR meta para essa curva também foi de 5dB.

Para se obter pontos com valores de probabilidade de outage próximos dos valores obtidos na curva de 28GHz, foi necessário realizar o aumento da potência transmitida, pois mantendo a potência transmitida de 0dBm até 12dBm, poucos pontos apresentaram desempenho melhor que o SNR meta, fazendo com que a probabilidade de outage sempre se mantivesse próxima de 1. Esse acontecimento era esperado, pois a atenuação do canal de comunicação para a frequência de 60GHz é maior que para a frequência de 28GHz, de acordo com [Alfaroby, Adriansyah e Anwar 2018], além de que para o cenário de 60GHz foi considerado uma largura de banda de 800MHz, que implica em maior potência de ruído, piorando a relação sinal ruído.

4.3 Resultados método 2 - 28GHz

Conforme foi comentado, o método 2 considera o valor de potência recebida direcional, que faz uso dos valores de ganho e direcionamento das antenas, fazendo com que seja necessário um aumento das distâncias entre antenas para que seja possível visualizar a curva de probabilidade de outage, assim como as distribuições mostradas nos gráficos dos resultados do método 1.

Foram utilizados dois valores de potência transmitida, 0dBm e 3dBm, e a distância entre antenas variando de 400 metros até 1400 metros, com passo de 100 metros, para obter os pontos mostrados na figura 11. Importante salientar que [Rappaport et al. 2017] mostrou uma curva de probabilidade de LOS em função da distância e que acima de 250 metros de separação entre antenas a probabilidade de haver linha de visão já se encontra abaixo de 10%, fazendo com que o ambiente simulado nesse caso seja NLOS.

O cenário escolhido é dado por:

- Frequência de operação: 28GHz
- Largura de banda: 200MHz
- Cenário: UMi
- Ambiente: NLOS, devido a distância entre antenas
- Distância entre antenas: 400m até 1400m, com passo de 100m para espalhar os pontos na curva
- Potência transmitida: 0dBm e 3dBm
- Quantidade de Rx: 1
- Quantidade de Tx: 1
- Localizações das antenas RX: 200
- Valores como pressão, umidade, temperatura, chuva, vegetação, polarização e as propriedades das antenas não foram alterados em comparação aos valores padrões do NYUSIM.

O resultado da simulação pode ser visto na figura 11.

Dos pontos mostrados na figura 11, nota-se uma tendência da probabilidade de outage não zerar, devido ao fato de que o ambiente simulado se trata do NLOS, fazendo com que o canal de comunicação degrade o sinal transmitido em algumas iterações da simulação e a probabilidade de outage para essas distâncias não se aproxime de zero.

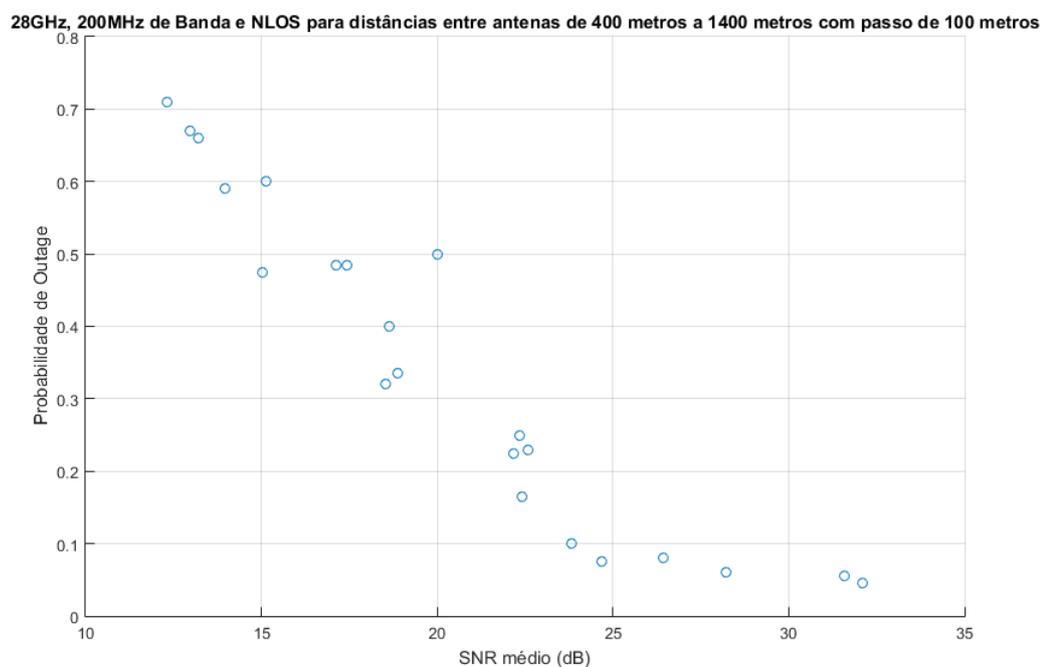


Figura 11 – Simulação desenvolvida para 1 Tx e 1 Rx

5 Conclusão

O objetivo do trabalho consistia em avaliar o desempenho de sistemas de comunicação sem fio na faixa de ondas milimétricas utilizando o software de simulação NYUSIM para modelos de canais 5G e 6G.

Foram desenvolvidos dois métodos de estruturação e tratamento dos dados de saída do NYUSIM para tornar possível a análise do canal de comunicação sem fio nessas frequências de operação que estão sendo implementadas atualmente como a quinta geração de telefonia móvel. Os resultados obtidos apresentam coerência e se mostraram semelhantes aos obtidos em [Alfaroby, Adriansyah e Anwar 2018], onde é desenvolvida outra metodologia para obtenção da curva de probabilidade de outage em função da relação sinal ruído, a partir do perfil de atraso de potência do canal.

5.1 Trabalhos futuros

O NYUSIM apresenta vários parâmetros de canal que possibilitam diversificar a análise realizada, fazendo com que seja possível obter curvas de probabilidade de outage em função da SNR média para um canal que seja mais próximo do real para uma determinada aplicação, melhorando assim a confiabilidade da implementação do sistema de comunicação sem fio.

Além de diversificar as análises realizadas, existem também margens para melhorias no código do NYUSIM no que diz respeito a gerar dados em massa, otimizando as iterações para que o conjunto de dados seja gerado em um menor tempo.

Referências

ALFAROBY, M.; ADRIANSYAH, N. M.; ANWAR, K. Study on Channel Model for Indonesia 5G Networks. *Research Gate*, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/324976057_Study_on_Channel_Model_for_Indonesia_5G_Networks>. Citado 3 vezes nas páginas 13, 23 e 26.

GOLDSMITH, A. *Wireless Communications*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2005. 24–84 p. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 13.

RAPPAPORT, T. S. et al. Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks—With a Focus on Propagation Models. *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, v. 65, n. 12, p. 6213–6230, 2017. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7999294>>. Citado 3 vezes nas páginas 10, 21 e 24.

WIRELESS, N. *NYU Tandon School of Engineering*. 2019. Disponível em: <<https://wireless.engineering.nyu.edu/>>. Citado na página 13.

Anexos

ANEXO A – Script de tratativa do método 1

```

clear all;
% hold off;
% close all;
clc;

Prec = [];
SNR = [];
SNR_dB = [];
SNRm = 0;
SNRm_dB = 0;
vetorSNRm_dB = [];
PDP = [];
prOut = [];
Pm = 0;
AuxMatrix = [];

%28GHz e 200MHz de Banda 10m, 20m, 40m LOS e 100m NLOS
%Pastas = {'\ Conjunto_5\28GHzPt0BW200D20' , ...
'\ Conjunto_5\28GHzPt3BW200D20' , ...
'\ Conjunto_5\28GHzPt6BW200D20' , ...
'\ Conjunto_5\28GHzPt9BW200D20' , '\ Conjunto_5\28GHzPt12BW200D20' };
%Pastas = {'\ Conjunto_6\28GHzPt0BW200D10' , ...
'\ Conjunto_6\28GHzPt3BW200D10' , ...
'\ Conjunto_6\28GHzPt6BW200D10' , ...
'\ Conjunto_6\28GHzPt9BW200D10' , '\ Conjunto_6\28GHzPt12BW200D10' };
Pastas = {'\ Conjunto_7\28GHzPt0BW200D40' , ...
'\ Conjunto_7\28GHzPt3BW200D40' , ...
'\ Conjunto_7\28GHzPt6BW200D40' , ...
'\ Conjunto_7\28GHzPt9BW200D40' , '\ Conjunto_7\28GHzPt12BW200D40' };
%Pastas = {'\ Conjunto_8\28GHzPt0BW200D100' , ...
'\ Conjunto_8\28GHzPt3BW200D100' , ...
'\ Conjunto_8\28GHzPt6BW200D100' , ...
'\ Conjunto_8\28GHzPt9BW200D100' , ...

```

```

'\ Conjunto_8\28GHzPt12BW200D100' };
%Pastas = {'\ Conjunto_9\28GHzPt12BW200D100' , ...
'\ Conjunto_9\28GHzPt15BW200D100' , ...
'\ Conjunto_9\28GHzPt18BW200D100' , ...
'\ Conjunto_9\28GHzPt21BW200D100' , ...
'\ Conjunto_9\28GHzPt24BW200D100' };
%28GHz e 200MHz de Banda 10m, 20m, 40m LOS e 100m NLOS

%60GHz e 800MHz de Banda 10m, 15m e 30m LOS
%Pastas = {'\ Conjunto_13\60GHzPt12BW800D10' , ...
'\ Conjunto_13\60GHzPt15BW800D10' , ...
'\ Conjunto_13\60GHzPt18BW800D10' , ...
'\ Conjunto_13\60GHzPt21BW800D10' , ...
'\ Conjunto_13\60GHzPt24BW800D10' , ...
'\ Conjunto_13\60GHzPt27BW800D10' };
%Pastas = {'\ Conjunto_14\60GHzPt12BW800D15' , ...
'\ Conjunto_14\60GHzPt15BW800D15' , ...
'\ Conjunto_14\60GHzPt18BW800D15' , ...
'\ Conjunto_14\60GHzPt21BW800D15' , ...
'\ Conjunto_14\60GHzPt24BW800D15' , ...
'\ Conjunto_14\60GHzPt27BW800D15' };
%Pastas = {'\ Conjunto_15\60GHzPt12BW800D30' , ...
'\ Conjunto_15\60GHzPt15BW800D30' , ...
'\ Conjunto_15\60GHzPt18BW800D30' , ...
'\ Conjunto_15\60GHzPt21BW800D30' , ...
'\ Conjunto_15\60GHzPt24BW800D30' , ...
'\ Conjunto_15\60GHzPt27BW800D30' };
%60GHz e 800MHz de Banda 10m, 15m e 30m LOS

NomeArquivo = 'OmniPDPInfo.mat';

SNRmeta = 5;

Boltzmann = 1.38064852 * 10^(-23);
T = 20 + 273.15;
BW = 200 * 10^6;
Pruido = Boltzmann * T * BW;

for Iteracoes = 1:size(Pastas, 2)

```

```

prOut(Iteracoes) = 0;

%Le o arquivo contendo as distancias
%e as potencias recebidas
Pasta = strcat(pwd,char(Pastas(1,Iteracoes)));
Arquivo = fullfile(Pasta,NomeArquivo);
load(Arquivo);
%Le o arquivo contendo as distancias
%e as potencias recebidas

for i = 1:size(OmniPDPInfo,1)

    Prec(i) = (10^(OmniPDPInfo(i,2)/10))/1000;
    SNR(i) = Prec(i)/Pruido;
    SNR_dB(i) = 10*log10(SNR(i));
    Pm = Pm + Prec(i);

end

Pm = Pm/size(OmniPDPInfo,1);

SNRm = Pm/Pruido;
SNRm_dB = 10*log10(SNRm);

%    for i = 1:size(OmniPDPInfo,1)
%        if SNR_dB(i) <= SNRm_dB
%            AuxMatrix(Iteracoes,i) = 1;
%        else
%            AuxMatrix(Iteracoes,i) = 0;
%        end
%    end

for i = 1:size(OmniPDPInfo,1)
    if SNR_dB(i) <= SNRmeta
        AuxMatrix(Iteracoes,i) = 1;
    else
        AuxMatrix(Iteracoes,i) = 0;
    end
end

```

```
end

% for i = 1:size(OmniPDPInfo,1)
%
%     vetorSNRm_dB(i) = SNRm_dB;
%
% end

vetorSNRm_dB(Iteracoes) = SNRm_dB;

for i = 1:size(OmniPDPInfo,1)

    prOut(Iteracoes) = prOut(Iteracoes) + ...
        AuxMatrix(Iteracoes, i);

end

prOut(Iteracoes) = prOut(Iteracoes)/size(OmniPDPInfo,1);

%scatter(vetorSNRm_dB, Prec)
hold on;

end

figure(1);
scatter(vetorSNRm_dB, prOut, '*');
grid on;
set(gca, 'yscale', 'log');

figure(2);
scatter(vetorSNRm_dB, prOut, '*');
grid on;
```

ANEXO B – Código fonte do NYUSIM com alterações

```

clear all; close all; tic

iteracoes = 200;
distancias=[400 500 600 700 800 900 1000 1100 1200 1300 1400];
potencias=[3];
percorreDistancia = 1;
percorrePotencia = 1;
PotenciaRecebidaDir = zeros(1, size(distancias,2)*...
size(potencias,2)*iteracoes);
contadorPotencias = 1;

for percorreDistancia=1:size(distancias,2)
    for percorrePotencia=1:size(potencias,2)
        % Set the current folder as the running folder
        runningFolder = pwd;
        % Input parameters (subject to change
        % per users' own needs)
        % Carrier frequency in GHz (0.5–100 GHz)
        f = 28; freq = num2str(f);
        % RF bandwidth in MHz (0–1000 MHz)
        RFBW = 200;
        % Operating scenario, can be UMi (urban microcell),
        % UMa (urban macrocell),
        % or RMa (Rural macrocell)
        sceType = 'UMi';
        % Operating environment,
        % can be LOS (line-of-sight) or NLOS (non-line-of-sight)
        envType = 'NLOS';
        % Minimum and maximum T-R
        % separation distance (10–10,000 m)
        %
        dmin = 20; dmax = 20;
        dmin = distancias(percorreDistancia);
        dmax = distancias(percorreDistancia);
    end
end

```

```
% Transmit power in dBm (0–50 dBm)
TXPower = potencias(percorrePotencia);
% Base station height in meters (10–150 m),
% only used for the RMa scenario
h_BS = 15;

...O restante do código permanece sem alterações...

end
end
```

ANEXO C – Script de tratativa do método 2

```

conjuntos = size(PotenciaRecebidaDir,2)/iteracoes;

SNRmeta = 10;

Boltzmann=1.38064852*10^(-23);
T=20+273.15;
BW=200*10^6;
Pruido=Boltzmann*T*BW;

SNR=[];
SNR_dB=[];
SNRm=0;
SNRm_dB=0;
vetorSNRm_dB=[];
PDP=[];
prOut=[];
Pm = 0;
AuxMatrix=[];
contadorAuxMatrix=1;

for percorreConjuntos=1:conjuntos

    Pm = 0;
    prOut(percorreConjuntos) = 0;

    for i=(1:iteracoes)+(iteracoes*(percorreConjuntos-1))

        SNR(i) = PotenciaRecebidaDir(i)/Pruido;
        SNR_dB(i) = 10*log10(SNR(i));
        Pm = Pm + PotenciaRecebidaDir(i);

    end

end

```

```

Pm = Pm/iteracoes;

SNRm = Pm/Pruido;
SNRm_dB = 10*log10(SNRm);

for i=(1:iteracoes)+(iteracoes*(percorreConjuntos-1))
    if SNR_dB(i) <= SNRmeta
        AuxMatrix(percorreConjuntos, contadorAuxMatrix) = 1;
    else
        AuxMatrix(percorreConjuntos, contadorAuxMatrix) = 0;
    end
    contadorAuxMatrix = contadorAuxMatrix + 1;
end

contadorAuxMatrix = 1;

% for i = 1:size(OmniPDPInfo,1)
%
%     vetorSNRm_dB(i) = SNRm_dB;
%
% end

vetorSNRm_dB(percorreConjuntos) = SNRm_dB;

for i = 1:iteracoes

    prOut(percorreConjuntos) = prOut(percorreConjuntos) ...
    + AuxMatrix(percorreConjuntos, i);

end

prOut(percorreConjuntos) = ...
prOut(percorreConjuntos)/iteracoes;

%scatter(vetorSNRm_dB, Prec)
%hold on;

end

```