



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**

Faculdade de Engenharia de São João da Boa Vista

LEONARDO MENDES DA SILVA

Estudo sobre a Eficiência do NB-IoT no Canal de Subida de Dados

São João da Boa Vista

2024

LEONARDO MENDES DA SILVA

Estudo sobre a Eficiência do NB-IoT no Canal de Subida de Dados

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Conselho de Curso de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações da Faculdade de Engenharia de São João da Boa Vista, Universidade Estadual Paulista, como requisito parcial para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Abrantes Penchel

São João da Boa Vista

2024

S586e

Silva, Leonardo Mendes da

Estudo sobre a eficiência do NB-IoT no canal de subida de dados /
Leonardo Mendes da Silva. -- São João da Boa Vista, 2024

51 p. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de
Telecomunicações) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista

Orientador: Rafael Abrantes Penchel

1. Sistemas de telecomunicação.. 2. Sistemas de transmissão de
dados. 3. Internet das coisas. I. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO SOBRE A EFICIÊNCIA DO NB-IoT NO CANAL DE SUBIDA DE DADOS

Aluno: Leonardo Mendes da Silva
Orientador: Prof. Dr. Rafael Abrantes Penchel

Banca Examinadora:

- Rafael Abrantes Penchel (Orientador)
- Ivan Aritz Aldaya Garde (Examinador)
- Plinio Santini Dester (Examinador)

Os formulários de avaliação e a ata da defesa, na qual consta a aprovação do trabalho, devidamente assinados pela banca encontram-se no prontuário eletrônico do aluno.

São João da Boa Vista, 06 de dezembro de 2024

A minha família, pelo incentivo e a todos meus amigos, que me acompanharam durante o período da graduação.

Agradecimentos

Agradeço a Deus, pelo privilégio da vida e por me proporcionar condições ideais de aprendizado.

Aos meus pais, Marcos e Marli, por sempre me incentivarem à busca pelo conhecimento e me proporcionarem o melhor cenário para que isso acontecesse.

À minha irmã, Mariane, e minha sobrinha, Manuella, que sempre estiveram do meu lado me mostrando o sentido da palavra família.

Aos meus amigos de república, Raphael Parreira, Renan Bairral e Thierry Ronchi, por serem minha família durante a graduação, por todas as risadas, conselhos, incentivos e discussões.

À minha melhor amiga, Elza Andrade, por sempre me apoiar, acreditar em mim e falar verdades quando necessário.

Por fim, a todos os professores da Faculdade de Engenharia de São João, pelo tempo dedicado a ensinar e por mostrar o incrível mundo das Telecomunicações.

*“ A ciência não nos ensina apenas a compreender o mundo, mas também a mudá-lo para
melhor.”*

(Carl Sagan, 1934-1996)

Resumo

Neste trabalho, é avaliado o desempenho do NB-IoT no Canal Compartilhado de Uplink Físico de Banda Estreita (NPUSCH) para possíveis aplicações em *Smart Grid*. Nesse contexto, o NB-IoT se destaca como uma solução viável devido ao baixo consumo de energia e à alta capacidade de cobertura, podendo ser alocado em redes licenciadas LTE. O estudo tem como objetivo avaliar o desempenho de transmissão em canal de uplink, analisando a razão de erro de blocos (BLER) em diferentes configurações de transmissão, espaçamentos de subportadoras e modulações, além de variar o número de repetições de transmissão. As simulações demonstram como a escolha do espaçamento de subportadoras e do número de repetições influencia a qualidade de transmissão em diferentes cenários de SNR. Os resultados encontrados sugerem que o modo de transmissão single-tone com espaçamento de 15 kHz e modulação BPSK apresenta melhor desempenho em condições adversas de SNR, configurando-se como uma solução eficiente para a comunicação em redes elétricas inteligentes.

Palavras-chave: NB-IoT; NPUSCH; *Uplink*; BLER.

Abstract

In this work, the performance of NB-IoT in the Narrowband Physical Uplink Shared Channel (NPUSCH) for potential Smart Grid applications. In this context, NB-IoT stands out as a viable solution due to its low power consumption and high coverage capacity, with the possibility of being deployed in licensed LTE networks. The study aims to assess uplink channel transmission performance by analyzing the block error rate (BLER) under different transmission configurations, subcarrier spacings, and modulations, as well as varying the number of transmission repetitions. Simulations demonstrate how the choice of subcarrier spacing and the number of repetitions influence transmission quality across different SNR scenarios. The results suggest that the single-tone transmission mode with 15 kHz subcarrier spacing and BPSK modulation delivers superior performance under adverse SNR conditions, establishing itself as an efficient solution for communication in smart electrical grids.

Keywords: NB-IoT; NPUSCH; *Uplink*; BLER.

Lista de ilustrações

Figura 1.	Sistema Elétrico de Potência.	18
Figura 2.	Requisitos de cobertura de rede.	21
Figura 3.	Arquitetura 4G LTE.	23
Figura 4.	OFDMA x SC-FDMA.	25
Figura 5.	Grade de recurso do LTE.	26
Figura 6.	Modos de operação do NB-IoT.	27
Figura 7.	Diagrama de bloco para NPUSCH.	30
Figura 8.	Curva BLER 3.75 kHz, Single-mode e BPSK	35
Figura 9.	Curva BLER 3.75 kHz, Single-mode e QPSK	36
Figura 10.	Curva BLER 15 kHz, Single-mode e BPSK	37
Figura 11.	Curva BLER 15 kHz, Single-mode e QPSK	37
Figura 12.	Curva comparativa <i>single-mode</i>	39
Figura 13.	Curva BLER 15 kHz, 3 subportadora, <i>Multi-mode</i> e QPSK	40
Figura 14.	Curva BLER 15 kHz, 6 subportadora, Multi-mode e QPSK	40

Lista de tabelas

Tabela 1.	Faixa de frequencias.	22
Tabela 2.	Números de sub-portadoras para diferentes espaçamentos	27
Tabela 3.	Duração do Slot	28
Tabela 4.	Parâmetros SC-FDMA.	33
Tabela 5.	Parâmetros de simulação	34

Lista de abreviaturas e siglas

NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
TICs	Tecnologia da Informação e Comunicação
IoT	Internet das Coisas (<i>Internet of Things</i>)
LPWAN	<i>Low-Power Wide Area Network</i>
LoRa	<i>Long Range</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
NB-IoT	<i>Narrowband Internet of Things</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency - Division Multiple Access</i>
SC-FDMA	<i>Single - Carrier Frequency -Division Multiple Access</i>
BLER	Razão de Erro de Blocos
REIs	Redes Elétricas Inteligentes
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SG	<i>Smart Grid</i>
BNDS	O Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
MIMO	<i>Multiple- Inpute Multiple-Output</i>
TCP/IP	Protocolo de Controle de Transmissão / Protocolo de Internet
EPS	<i>Evolved Packet System)</i>
E-UTRAN	<i>Evolved-Universal Terrestrial Radio Acess Network</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
QoS	Qualidade de Serviço
MME	<i>MobilityEntity</i>
SGW	<i>Serving Gateway</i>

TDD	<i>Time Division Duplex</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
DL	<i>Downlink</i>
UL	<i>Uplink</i>
TTI	<i>Transmit Time Interval</i>
RB	<i>Resource Blocks</i>
RE	<i>Resource Element</i>
RU	<i>Resource Unit</i>
UE	<i>End User</i>
NPUSCH	<i>Narrowband Physical Uplink Shared Channel</i>
BPSK	<i>Binary Phase-Shift Keying</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i>
DMRS	<i>Demodulation Reference Signal</i>
TBS	Tamanho de Bloco de Transporte
CRC	Código de Redundância Cíclica
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
IFFT	<i>Inverse fast Fourier Transform</i>

Lista de símbolos

b	Bits
$c(i)$	Sequência de Embaralhamento
N_{bits}	Número de bits
n_{NTI}	Identificador Temporário da Rede de Rádio
n_s	Índice do Primeiro Slot de Transmissão
s_f	Índice do Primeiro Quadro de Transmissão
$N_{ID}^{NC_{cell}}$	Identidade da Célula
S_{ymb}	Número de Símbolos
M_{SC}^{NPUSCH}	Símbolos Modulados
N_{RB}^{NPUSCH}	Largura de Banda do Canal
N_{SC}^{RB}	Número de Subportadora Disponível
$d_u(n)$	Sequência de DMRS
R_{REP}^{NPUSCH}	Número de Repetições
N_{slots}^{UL}	Total de Slots Disponíveis em <i>Uplink</i>
$N_{Identical}^{NPUSCH}$	
$y_{(l)}(t)$	Sinal de Transmissão <i>multi-tone</i>
$y_{(l,k)}(t)$	Sinal de Transmissão <i>single-tone</i>
T_s	Tempo de Transmissão
N_{CP}	Comprimento do Prefixo Cíclico
$h(t)$	Resposta ao impulso do canal
β_i	Atenuação de Multipercurso
τ_i	Atraso de Multipercurso
L	Número de diferentes caminhos de transmissões

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Motivação	15
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivos específicos	16
1.3	Organização do trabalho	16
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	18
2.1	Sistema Elétrico de Potência	18
2.1.1	Rede de distribuição convencional	19
2.1.2	Smart Grids	19
2.2	Aplicações Smart Grid	20
2.3	Telecomunicações para Smart Grids	20
2.3.1	Modelo de telecomunicações	21
2.3.2	Meios de transmissão de dados	21
2.3.2.1	Meios sem fio	22
2.4	Tecnologias de comunicação sem fio para IoT	22
2.4.1	Long Term Evolution - LTE	22
2.4.1.1	Arquitetura LTE	23
2.4.1.2	Largura de Banda	24
2.4.1.3	Modos de acesso	24
2.4.1.4	Alocação de recursos	25
2.4.2	NB-IoT	26
2.4.2.1	Alocação recursos NB-IoT	27
2.4.2.2	Modo de transmissão	27
3	MODELO DO SISTEMA	30
3.0.1	Sequência do sinal referência	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1	Análise de Desempenho	35
5	CONCLUSÃO	42
	REFERÊNCIAS	43
	APÊNDICE A – CÓDIGO DE SIMULAÇÃO EM MATLAB	45

1 Introdução

Neste primeiro capítulo, é apresentada a transformação digital do setor elétrico, enfatizando a importância da infraestrutura de telecomunicações para esse desenvolvimento, trazendo o conceito de IoT aplicado a redes de banda estreita.

1.1 Motivação

O setor elétrico está passando por uma grande transformação digital, e a infraestrutura de telecomunicações desempenha um papel essencial no desenvolvimento deste novo modelo de negócio, especialmente no contexto de *Redes Elétricas Inteligentes* ou *Smart Grids*. Segundo o NIST (National Institute of Standards and Technology) esse termo é definido como “uma rede moderna que permite o fluxo bidirecional de energia, usando comunicação nos dois sentidos e técnicas de controle, que possibilitará novas funcionalidades e novas aplicações” (GREER et al., 2014). Este novo modelo veio para substituir o modelo convencional do sistema de energia.

A evolução das Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) representa um marco significativo para a eficiência energética e sustentabilidade do setor elétrico. Neste contexto, o avanço dos meios de comunicação sem fio e a adoção de políticas de incentivo e regulação tornam-se instrumentos essenciais para a efetivação da digitalização e modernização de diversos setores, incluindo o setor elétrico.

Outro conceito relevante neste cenário é o da Internet das Coisas (IoT, Internet of Things), que propõe a ideia de que qualquer objeto pode estar conectado à rede de Internet, criando uma nova interação entre pessoas e máquinas. Para o desenvolvimento de um cenário IoT, é necessário um baixo volume de dados transmitidos, baixo consumo de energia e capacidade de conectar um grande número de dispositivos e usuários. Para atender a essa demanda, surgiu a tecnologia sem fio LPWAN (*Low-Power Wide Area Network*, ou, rede de área ampla de baixo consumo de energia). Este tipo de rede pode operar em bandas não licenciadas, como Long Range (LoRa) e Sigfox, e em bandas licenciadas, como o LTE, coexistindo com o protocolo de *Narrowband IoT* (NB-IoT) (MEKKI et al., 2018).

Com o avanço das redes elétricas inteligentes, a LPWAN tem ganho destaque como uma tecnologia habilitadora para aplicações em sistemas de energia elétrica. Esses sistemas incorporam dispositivos e sensores que coletam informações em tempo real e as transmitem para um centro de análise, contribuindo para a eficiência operacional, monitoramento e diagnósticos de falhas no sistema elétrico. Para atender a esses requisitos, é fundamental que a comunicação seja segura, confiável e apresente uma boa qualidade de serviço (QoS)

(LI et al., 2018).

O NB-IoT, operando na banda licenciada do LTE, surge como uma oportunidade para substituir o uso de banda não licenciadas em aplicações em *Smart Grids*, uma vez que as frequências não licenciadas são suscetíveis a interferências constantes. O protocolo NB-IoT aproveita as vantagens do LTE, como a eficiência de comunicação no *downlink* e a eficiência no consumo de potência de transmissão no *uplink*, benefícios que são proporcionados pelo uso das técnicas OFDMA e SC-FDMA (LI et al., 2018).

O estudo e análise da Razão de Erro de Blocos (BLER) são fundamentais para avaliar o desempenho da comunicação NB-IoT, permitindo verificar a probabilidade de que blocos de dados recebidos no receptor sejam recebidos com erros. Muitos sistemas NB-IoT enfrentam condições adversas de canal de transmissão de dados, e o cálculo da BLER reflete a robustez do sistema, sendo que valores mais altos de BLER indicam uma maior probabilidade de erros de transmissão (QIN et al., 2020).

1.2 Objetivos

A proposta deste trabalho é avaliar o desempenho da transmissão de dados no sentido *uplink* do NB-IoT, com foco na análise da Razão de Erro de Blocos (BLER) em diferentes cenários, considerando relação sinal-ruído (SNR), o número de repetições e os formatos de transmissão disponíveis no protocolo NB-IoT.

1.2.1 Objetivos específicos

Fornecer uma visão geral do conceito de *Smart Grid* e demonstrar como suas aplicações promovem a modernização da infraestrutura do sistema elétrico. A revisão bibliográfica focará na introdução dos conceitos fundamentais para o desenvolvimento das *Smart Grids*.

Apresentar uma visão detalhada dos sistemas LTE e NB-IoT, explicando a estruturação desses protocolos, incluindo os esquemas de múltiplos acessos e a alocação de recursos essenciais para a transmissão de dados. Além disso, será abordada a modelagem de um sinal *uplink* NB-IoT, considerando repetições de blocos de transporte.

Realizar simulações computacionais para avaliar o desempenho de transmissão de dados em um canal de *uplink* baseado em repetições de blocos.

1.3 Organização do trabalho

Os capítulos seguintes deste trabalho estão organizados da seguinte maneira: No capítulo 2, apresenta-se uma revisão bibliográfica com os conceitos relacionados ao tema.

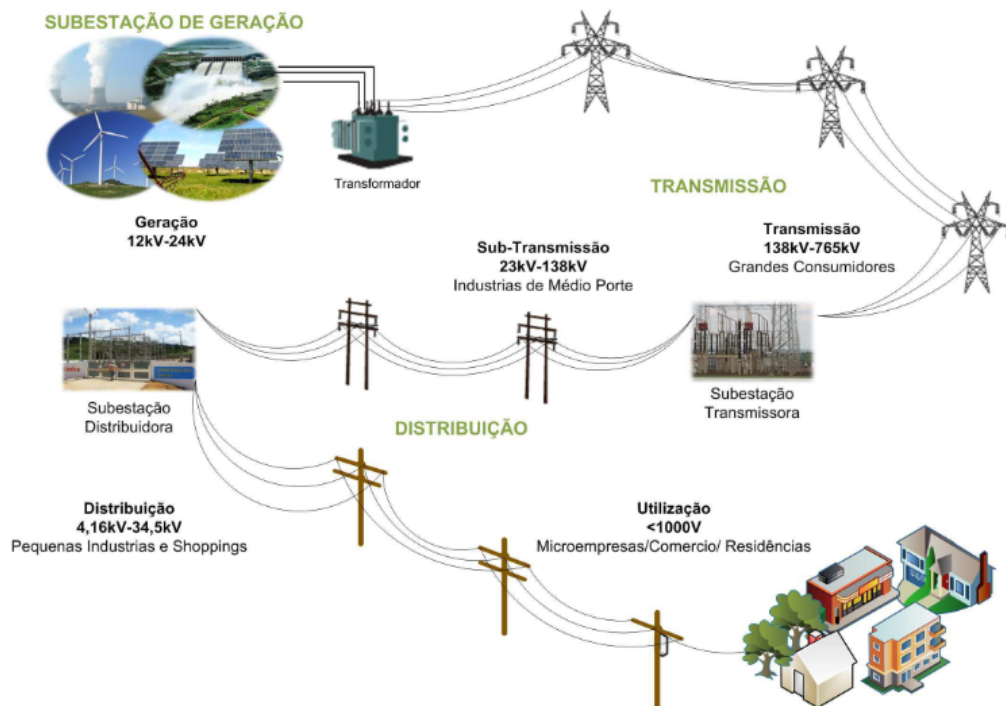
No capítulo 3, é modelado o sistema de transmissão de dados no NPUSCH, trazendo a estruturação e organização dos dados dentro de uma subportadora. No capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos para o sistema proposto e as respectivas discussões. Por fim, o capítulo 5 traz as conclusões deste trabalho.

2 Fundamentos teóricos

2.1 Sistema Elétrico de Potência

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) abrange as etapas de geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica. Ele é responsável por garantir o equilíbrio entre a oferta e a demanda de eletricidade, assegurando um fornecimento contínuo e sem interrupções para o consumidor final, o que, por sua vez, possibilita o desenvolvimento tecnológico e social.

Figura 1. Sistema Elétrico de Potência.



Fonte:(LOPES et al., 2012).

A etapa de geração é o processo de conversão de diferentes fontes de energia em eletricidade, realizadas por meio de usinas termelétricas, hidrelétricas, solares ou eólicas. A transmissão, por sua vez, envolve o transporte dessa energia gerada até as subestações de transmissão, onde ocorre a transformação de tensão, além do controle e monitoramento da energia. Essa energia é então entregue às redes de distribuição de média e baixa tensão, que atendem de forma segura e eficiente os consumidores residenciais, comerciais e industriais.

2.1.1 Rede de distribuição convencional

Uma rede de distribuição convencional segue um modelo antigo, caracterizado por equipamentos robustos e sem atualizações tecnológicas, o que torna o processo de operação e manutenção complexo. A falta de modernização compromete a confiabilidade e a eficiência do sistema.(LEITE; CRUZ, 2018).

Nos últimos anos o cenário de consumo e distribuição de energia elétrica tem passado por mudanças significativas, impulsionadas pela descarbonização, descentralização e digitalização. Essas mudanças exigem uma transformação abrangente em todo o sistema elétrico, não se restringindo apenas ao segmento de distribuição. A descarbonização visa a transição para fontes de energia renováveis, como a solar, eólica e biomassa, com o objetivo de reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Já a digitalização e descentralização do setor estão transformando a forma como a energia é gerada e distribuída. Esse novo modelo permite que os consumidores finais desempenhem um papel mais ativo no sistema elétrico, possibilitando a geração de sua própria energia por meio de microgeração, além de definir seu perfil de consumo conforme sua demanda.

Estas transformações contribuem para uma rede mais eficiente, segura e sustentável. Contudo, devido a essas mudanças, os agentes do setor enfrentam desafios regulatórios e tecnológicos para garantir a disponibilidade e qualidade da energia que chega até os consumidores.

2.1.2 Smart Grids

O termo “*Smart Grid*” (SG), ou redes elétricas inteligentes (REI), refere-se à integração de tecnologias da informação e comunicação (TIC) com a rede elétrica, modernizando os meios tradicionais de operação (HAMIDI; SMITH; WILSON, 2010). O surgimento desse conceito foi motivado pela necessidade de incorporar diferentes fontes de energia à rede, além do aumento no número de consumidores. Em uma rede inteligente, os elementos da rede se comunicam entre si, trocando informações em tempo real, o que permite um gerenciamento mais eficiente do sistema elétrico e possibilita a autoconfiguração do sistema.

Segundo um relatório divulgado pela biblioteca digital do BNDS (RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013), a implementação das *Smart Grids* pode ser compreendida na aplicação em três principais frentes. A primeira visa aumentar a inteligência do Sistema Elétrico de Potência, promovendo cenários de *flexibilidade*, ou seja, a capacidade do sistema de se adaptar às variações de demanda de consumo, interagindo de forma eficaz com as diversas fontes de energia. A *eficiência* busca reduzir as perdas de energia e otimizar o uso dos recursos energéticos. Nesse contexto, as redes inteligentes introduzem a bidirecionalidade no fluxo de energia.

A segunda frente envolve a substituição de medidores tradicionais por medidores

inteligentes (*smart metering*), que oferecem diferentes funções. Esses medidores possibilitam a coleta de informações de consumo de energia do ponto de vista do consumidor e, por parte das concessionárias de distribuição, a realização de operações de “corte e religamento” dos consumidores.

A terceira frente diz respeito à utilização de equipamentos residenciais inteligentes, que são capazes de se conectar aos medidores inteligentes e ajustar o consumo de energia conforme o histórico de uso.

A implementação das *Smart Grids* no Brasil encontra um cenário favorável devido ao extenso e robusto sistema elétrico existente no país, à diversidade da matriz energética e ao aumento contínuo do consumo de energia *per capita*. Neste cenário de desenvolvimento elétrico, os principais motivadores para a adoção das REIs incluem a busca por maior eficiência comercial e energética, melhoria na confiabilidade do sistema, segurança operacional e a promoção de sustentabilidade econômica e ambiental (RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013).

2.2 Aplicações Smart Grid

Os sensores e medidores inteligentes permitem a coleta e transmissão de dados em tempo real sobre o serviço de energia e as condições da rede elétrica. O sistema de sensoriamento envolve diversos elementos conectados que trabalham de forma integrada para melhorar a eficiência da rede de energia elétrica.

Os sensores são dispositivos que monitoram diferentes parâmetros da rede, proporcionando uma visão detalhada das condições operacionais. As informações coletadas são enviadas a um centro de controle, onde são analisadas para garantir a eficiência e a confiabilidade do sistema elétrico (VIJAYAPRIYA; KOTHARI, 2011).

2.3 Telecomunicações para Smart Grids

A infraestrutura de telecomunicações é um componente essencial para a evolução das *Smart Grids*. Ela possibilita a troca bidirecional de informações em tempo real sobre diversos ativos da rede elétrica, o que torna a rede mais inteligente, eficiente e escalável. A comunicação eficaz entre medidores inteligentes, sensores, dispositivos de automação e sistemas de controle centralizados permite uma melhor gestão da distribuição de energia.

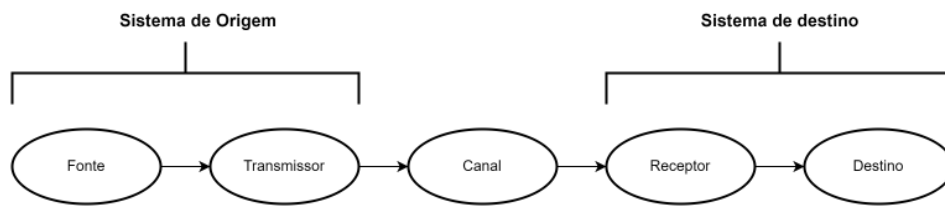
A rápida evolução do setor de telecomunicações, em comparação com o setor elétrico, tem promovido constantes inovações nos meios de comunicação utilizados nas aplicações das *Smart Grids*. Essas redes dependem de uma infraestrutura robusta de telecomunicações para operar de forma eficiente. Além disso, o contínuo avanço das

telecomunicações possibilita o desenvolvimento de novas aplicações, que contribuirão ainda mais para a resiliência, sustentabilidade e segurança do setor elétrico.

2.3.1 Modelo de telecomunicações

Um sistema de telecomunicações é estruturado para possibilitar a troca de informações entre dois usuários distintos, sendo composto por cinco elementos fundamentais: fonte, transmissor, canal, receptor e destino.

Figura 2. Requisitos de cobertura de rede.



Fonte: Adaptado de (STALLINGS, 2007).

A fonte é o dispositivo responsável por gerar os dados a serem transmitidos. O transmissor converte e codifica esses dados em sinais eletromagnéticos. O canal é o meio por onde o sinal se desloca, podendo ser por meio de cabos ou pelo ar. O receptor recebe o sinal do canal e decodifica os dados, para que sejam interpretados e processados corretamente pelo dispositivo final, que é o destino do sinal (STALLINGS, 2007).

2.3.2 Meios de transmissão de dados

Para que a transmissão de informações entre diferentes usuários e localidades ocorra, é necessário um meio físico para transportar esses dados. Esses meios de transmissão são classificados em duas categorias principais: meios cabeados e meios sem fio.

Os meios cabeados utilizam tecnologias como cabo coaxial, cabo de par trançado, cabos de linhas de energia e, principalmente, fibra óptica, que oferece altas taxas de transmissão. Já os meios sem fio utilizam o ar como meio de propagação, transmitindo dados pelo espaço livre, utilizando ondas de rádio, micro-ondas ou tecnologia de comunicação via satélite.

Esses meios de transmissão diferem em termos de velocidade de propagação, taxa de transmissão e confiabilidade. A fibra óptica oferece maior capacidade de transmissão e menor latência em comparação com as tecnologias sem fio, que, embora proporcionem flexibilidade e mobilidade, são mais suscetíveis a interferências e limitações de largura de banda.

Os meios de transmissão são definidos na camada 2 do modelo OSI, conhecida como a camada de enlace de dados. Nesta camada, são especificadas características técnicas, como

frequência de operação, largura de banda ocupada, modulação aplicada à transferência de dados e taxa de transmissão que o meio físico pode suportar.

2.3.2.1 Meios sem fio

Os meios de comunicação sem fio possibilitam a transmissão de dados por meio de ondas eletromagnéticas que se propagam pelo ar, com o transmissor e receptor se conectando através de antenas. A transmissão dos dados ocorre dentro de um espectro de ondas eletromagnéticas, isto é, em uma faixa de frequência que corresponde às oscilações do sinal. As faixas de frequências são definidas de acordo com a tabela a seguir:

Tabela 1. Faixa de frequências.

Simbologia	Frequência	Subdivisão
Very Low Frequency (VLF)	3-30 kHz	Ondas Myriamétricas
Low Frequency (LF)	30-300 kHz	Ondas kilométricas
Medium Frequency (MF)	300-3000 kHz	Ondas Hectométricas
High Frequency (HF)	3-30 MHz	Ondas Decamétricas
Very High Frequency (VHF)	30-300 MHz	Ondas Métricas
Ultra High Frequency (UHF)	300-3000 MHz	Ondas Decimétricas
Super High Frequency (SHF)	3-30 GHz	Ondas Centimétricas
Extremely High Frequency (EHF)	30-300 GHz	Ondas Milimétricas
Tremendous High Frequency (THF)	300-3000 GHz	Ondas Decimilimétricas

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Cada faixa de frequência define as características de propagação do sinal. Faixas de frequência mais baixas têm uma melhor capacidade de propagação a longas distâncias e maior penetração em superfícies maciças, mas oferecem canais com menor largura de banda, o que limita a quantidade de dados que podem ser transmitidos simultaneamente. Por outro lado, as faixas de frequência mais altas apresentam uma propagação menos eficiente, sendo mais suscetíveis a bloqueios e interferências; contudo, proporcionam maior largura de banda, permitindo taxas de transmissão mais altas em menos tempo.

2.4 Tecnologias de comunicação sem fio para IoT

2.4.1 Long Term Evolution - LTE

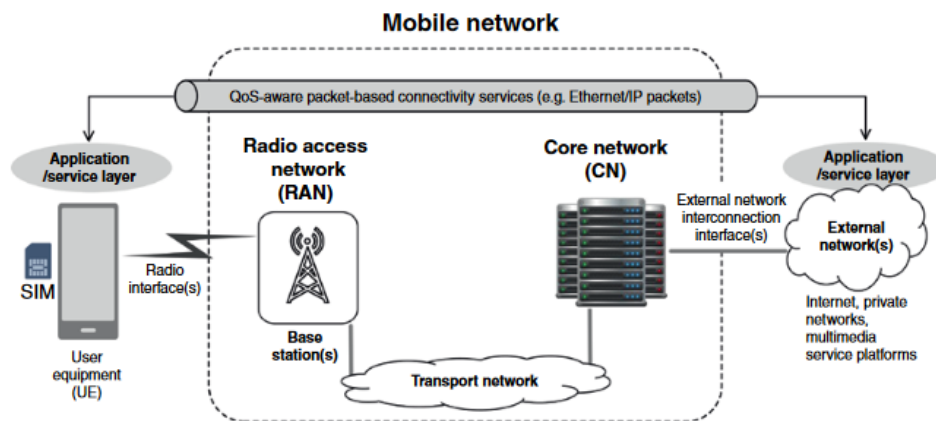
A tecnologia *Long Term Evolution*, ou simplesmente LTE, desenvolvida pela 3GPP, é a quarta geração de comunicação sem fio. Esta geração oferece alta velocidade de transmissão, baixa latência e boa eficiência espectral em comparação com as tecnologias celulares anteriores. As redes LTE são amplamente utilizadas em redes públicas e privadas para atender a aplicações em diversos setores da economia. A principal inovação desta rede em relação às anteriores é a adoção de técnicas de OFDM (*Orthogonal Frequency Division*

Multiplexing) para possibilitar acessos ortogonais, além de um eficiente sistema de antenas baseado na tecnologia MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*). Além disso, o núcleo da rede é fundamentado no protocolo TCP/IP, que é baseado na transmissão de pacotes.

2.4.1.1 Arquitetura LTE

Para a tecnologia *Long Term Evolution*, foi desenvolvida uma nova arquitetura de rede, com a introdução de uma estação rádio base denominada eNodeB. Com esse desenvolvimento, a rede LTE é organizada em duas partes principais: o núcleo e o acesso, o que a torna menos complexa em comparação com as arquiteturas utilizadas anteriormente. Esse novo modelo de arquitetura foi denominado EPS (*Evolved Packet System*), no qual o meio de acesso é chamado de E-UTRAN (*Evolved-Universal Terrestrial Radio Access Network*), e o núcleo é denominado EPC (*Evolved Packet Core*) (SANTOS, 2010).

Figura 3. Arquitetura 4G LTE.



Fonte:(SENDIN; MATANZA; FERRÚS, 2021).

Nesta arquitetura, a *eNodeB* passa a desempenhar diversas funções, entre as quais se destacam o controle de rádio e tráfego, garantindo a QoS proposta. Além disso, ela é responsável pelo processo e pela decisão de *handover* dos dispositivos móveis, assegurando que apenas uma célula se comunique com o dispositivo em um determinado momento, o que reduz a possibilidade de perda de pacotes durante o processo de *handover* (SANTOS, 2010).

O núcleo da rede LTE é baseado e dividido em dois tipos de serviços: MME (*Mobility Management Entity*) e SGW (*Serving Gateway*). O MME gerencia a mobilidade, a sinalização e o estabelecimento da conexão com a *eNodeB*, enquanto o SGW tem a função de encaminhar os pacotes IP entre o dispositivo e a rede de internet (SENDIN; MATANZA; FERRÚS, 2021).

2.4.1.2 Largura de Banda

Para o padrão LTE, em comparação com tecnologias passadas, ocorre um aumento da banda de operação das portadoras, o que garante um melhor desempenho da rede e a possibilidade de agregar serviços ao sistema. Segundo (3GPP, 2011), as bandas compatíveis com o protocolo são 1,4, 3, 5, 10, 15 e 20 MHz, podendo operar nos modos TDD (*Time Division Duplex*) ou FDD (*Frequency Division Duplex*). Para o modo TDD, tanto no sentido *downlink* quanto *uplink*, utiliza-se a mesma frequência de transmissão, o que difere do modo FDD, no qual a transmissão *uplink* e *downlink* ocorrem em frequências separadas, o que melhora a cobertura do sinal em comparação ao modo anterior (SANTOS, 2010).

2.4.1.3 Modos de acesso

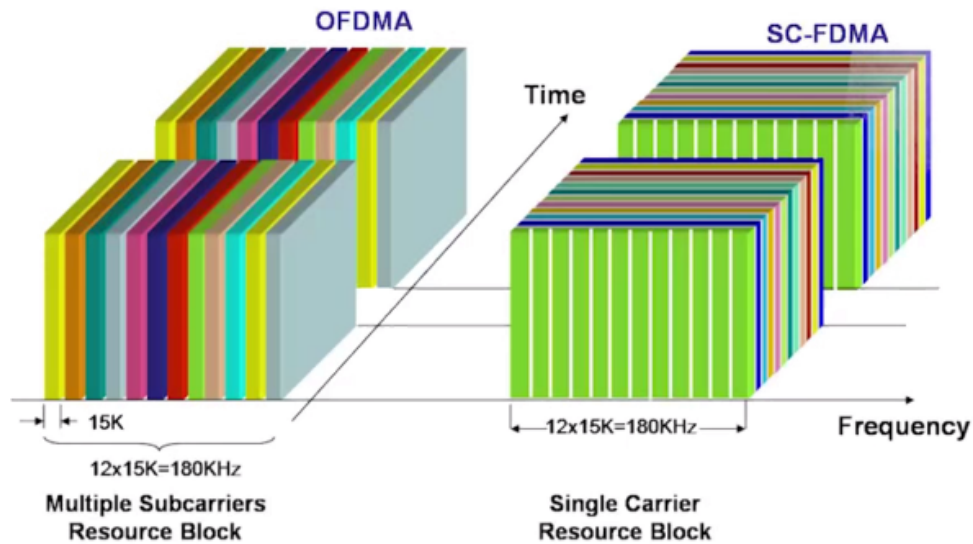
Com o novo modelo de arquitetura, transmissão e QoS para o LTE, foram propostas diferentes técnicas de acesso, como o OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Nesta técnica, as portadoras são sobrepostas umas às outras para aumentar a eficiência espectral. Nesse sentido, as informações são distribuídas em várias frequências, ou subportadoras, que são espaçadas por uma frequência ou prefixos cíclicos, garantindo a ortogonalidade de acesso (HOLMA, 2009).

Para o *downlink*, a técnica de acesso múltiplo utilizada é o OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), que organiza os canais no domínio da frequência. No OFDMA, múltiplas subportadoras são alocadas para diferentes usuários, e as informações são transmitidas simultaneamente em várias subportadoras, com cada uma delas transportando uma parte da informação. Além disso, os símbolos de OFDM, que são os blocos de dados modulados, são dispostos no domínio do tempo. O OFDMA é eficaz em ambientes de canais dispersos no tempo e na frequência, pois as subportadoras ortogonais permitem que a interferência entre elas seja minimizada.

No *uplink*, por outro lado, a técnica utilizada é o SC-FDMA (*Single-Carrier Frequency Division Multiple Access*). Embora o SC-FDMA também utilize subportadoras no domínio da frequência, ele é diferente do OFDMA no sentido de que, em vez de múltiplas subportadoras transmitindo dados simultaneamente, o SC-FDMA emprega uma modulação de portadora única para cada usuário. Isso significa que os dados são transmitidos usando uma única portadora, o que resulta em uma menor potência de pico de transmissão em comparação com o OFDMA. A potência de transmissão mais baixa no SC-FDMA é vantajosa para dispositivos móveis, especialmente em tecnologias como NB-IoT, onde o consumo de energia e a eficiência no uso de espectro são essenciais. Embora o SC-FDMA tenha um desempenho diferente do OFDMA em termos de transmissão, ele oferece vantagens em termos de redução da potência de transmissão, o que é crucial em cenários de *uplink* com dispositivos que possuem recursos limitados, como dispositivos de IoT.

Portanto, enquanto o OFDMA é ideal para o *downlink*, onde a capacidade de transmitir múltiplos fluxos de dados de maneira eficaz é necessária, o SC-FDMA é mais adequado para o *uplink*, devido à sua capacidade de reduzir a potência de transmissão, tornando-o mais eficiente para dispositivos que precisam economizar energia e operar em condições de canal mais desafiadoras.

Figura 4. OFDMA x SC-FDMA.



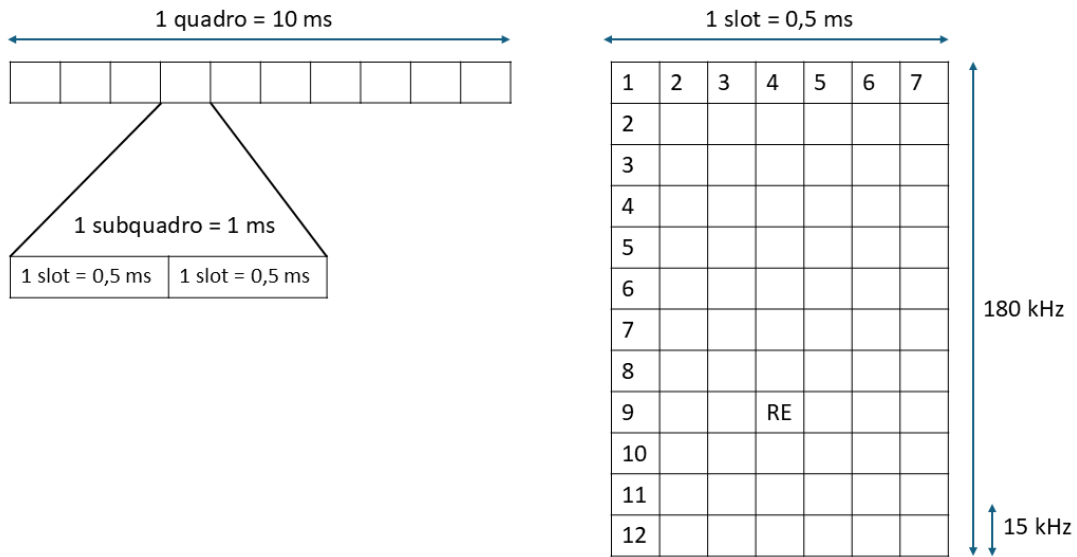
Fonte: (SENDIN; MATANZA; FERRÚS, 2021).

2.4.1.4 Alocação de recursos

Os recursos no LTE são alocados em uma escala tempo x frequência. Na escala de tempo, o sinal é dividido em quadros de 10 ms de duração, sendo que cada quadro contém 10 subquadros de 1 ms, o que define o intervalo de transmissão (TTI (*Transmit Time Interval*)). Cada subquadro, por sua vez, é composto por dois slots de 0,5 ms. Na escala de frequência, cada *slot* é utilizado para alocar partes de 180 kHz, chamadas de *Resource Blocks* (RBs), que são usadas no mapeamento dos canais físicos. Esses canais físicos, também conhecidos como *Resource Elements* (REs), representam símbolos OFDM. A quantidade de RBs está diretamente relacionada à largura de banda utilizada na portadora LTE. A duração de cada símbolo OFDM é de $67,777 \mu s$, com um prefixo cíclico de $4,7 \mu s$, totalizando um tempo de transmissão de símbolo de $71,367 \mu s$ (CASTRO; PEDROSO, 2015).

Um RB é um *slot* no tempo com 7 símbolos OFDM e 180 kHz na frequência, subdividido em 12 subportadoras de 15 kHz. O menor número de REs alocados para um usuário em determinado momento é de 2 RBs (CASTRO; PEDROSO, 2015).

Figura 5. Grade de recurso do LTE.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

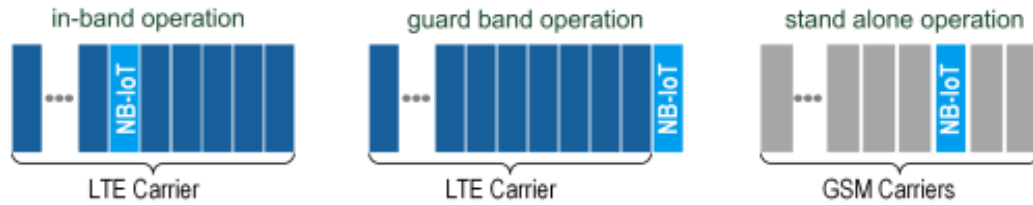
2.4.2 NB-IoT

O NB-IoT é um protocolo de comunicação baseado no padrão LTE, projetado para atender a diferentes aplicações e funcionalidades. O NarrowBand Internet of Things (NB-IoT) é um protocolo de acesso de banda estreita introduzido pelo 3GPP para atender às demandas e requisitos das LPWANS (*Low Power Wide Area Networks*). Este protocolo permite um grande número de conexões, boa cobertura, baixo consumo de energia e dispositivos de baixa complexidade. Duas inovações importantes do NB-IoT são a capacidade de transmitir pequenos pacotes de dados no plano de controle por meio do Canal de Sinalização de Rádio (SRB), e a possibilidade de retomar a conexão de Controle de Recurso de Rádio (RRC) sem a necessidade de estabelecer uma nova conexão a cada envio de dados.

Na camada física, o NB-IoT utiliza uma banda de 180 kHz tanto para *uplink* quanto para *downlink*, o que representa uma largura de banda bem menor em comparação à do LTE. O NB-IoT pode ser implementado de três maneiras diferentes dentro do espectro LTE: o modo *stand-alone*, onde uma banda independente é utilizada, sem sobreposição com a banda do LTE; no modo *guard-band*, onde uma portadora NB-IoT é alocada em uma das duas portadoras de guarda do LTE; e no modo *in-band*, onde um único bloco de recurso dentro da largura de banda LTE é reservado para a transmissão de dados NB-IoT (SCHLIENZ; RADDINO, 2016).

O modo de transmissão do NB-IoT é estruturado para operar no modo de duplexação por divisão de frequência (FDD) semi-duplex. O modo de duplexação semi-duplex significa que o dispositivo pode receber ou transmitir informações, mas não consegue realizar ambas

Figura 6. Modos de operação do NB-IoT.



Fonte: (SCHLIENZ; RADDINO, 2016).

as operações simultaneamente. Para cada mudança entre *uplink* e *downlink*, é inserido um intervalo de guarda entre eles, garantindo a comutação entre a arquitetura de recepção e transmissão (MALIK et al., 2018).

2.4.2.1 Alocação recursos NB-IoT

A alocação de recurso no NB-IoT segue os mesmos princípios do LTE, onde as transmissões de *downlink* e *uplink* são alocadas em uma escala tempo x frequência. Cada quadro é composto por 10 subquadros, com duração de 1 ms, e cada subquadro é, por sua vez, dividido em 2 *slots* de 0,5 ms. Para o sentido de *downlink* cada subquadro é composto por 12 subportadoras com espaçamento de 15 kHz entre as subportadoras.

No sentido *uplink*, podem ser configurados dois diferentes espaçamentos de subportadoras: 15 kHz e 3,75 kHz. Quando o espaçamento utilizado for de 15 kHz, a duração de cada quadro será a mesma do *downlink*, ou seja, 10 ms. Se o espaçamento for de 3,75 kHz, o número de subportadoras aumentará para 48, o que eleva a duração de cada slot para 2 ms. Nesse caso, cada quadro de transmissão será composto por 5 slots de 2 m (KANJ; SAVAUX; GUEN, 2020).

Tabela 2. Números de sub-portadoras para diferentes espaçamentos

Espaçamento Sub-portadora	Nº de sub-portadora
3,75 kHz	48
15 kHz	12

Fonte: (PROJECT, 2018b)

2.4.2.2 Modo de transmissão

Para a transmissão de dados no NB-IoT existem dois modos: *single-tone* e *multi-tone*. Esses modos possibilitam diferentes configurações para o uso de subportadoras. No *downlink*, o único modo possível é o de *multi-tone*, no qual todas as 12 subportadoras disponíveis são utilizadas simultaneamente para a transmissão de dados. Já no *uplink*, é possível escolher o modo de transmissão a ser utilizado, dependendo do espaçamento da subportadora. Quando o espaçamento é de 3,75 kHz, apenas o modo *single-tone* é

permitido, o que significa que somente uma subportadora será utilizada para a transmissão de dados. Com o espaçamento de 15 kHz, ambos os modos estão disponíveis. No caso do modo *multi-tone* com espaçamento de 15 kHz, existem quatro configurações possíveis de transmissão, utilizando 3, 6 ou 12 subportadoras, o que proporciona diferentes taxas de dados (ZAYAS; MERINO, 2017).

Para a transmissão no *uplink* existe uma menor unidade que pode ser transferida independentemente do espaçamento de subportadora, denominada de Unidade de Recurso (RU). A RU organiza o número de *slots*, elementos de recursos (RE), símbolos e sua duração para a transmissão de dados. Para as transmissões de *single-tone*, a RU é composta pelo mesmo número de REs, 112 REs, independentemente do espaçamento de subportadora escolhido, seja 15 kHz ou 3,75 kHz. Entretanto, o espaçamento de 3,75 kHz aumenta a duração do slot em quatro vezes em comparação ao espaçamento de 15 kHz, o que estende a duração da RU para 32 ms com 3,75 kHz, enquanto a duração com 15 kHz é de 8 ms. Para as transmissões em modo *multi-tones*, uma RU contém 168 REs, independentemente da configuração de subportadoras utilizada (três, seis ou doze subportadoras). Em transmissões multi tons, a duração da RU varia de acordo com o número de subportadoras em uso; quanto maior o número de subportadoras, menor a duração da RU (KANJ; SAVAUX; GUEN, 2020).

Tabela 3. Duração do Slot

Espaçamento Sub-portadora	Nº de sub-portadora	Nº de Slots	Duração do Slot
3.75 kHz	1	16	32 ms
15 kHz	1	16	8 ms
	3	8	4 ms
	6	4	2 ms
	12	2	1 ms

(PROJECT, 2018b)

Para a transmissão de dados do usuário final para a eNodeB, diferente do que é proposto no LTE, o canal de acesso aleatório e o canal de dados e controle foram otimizados para suportar a eficiência energética do sistema. O *Narrowband Physical Uplink Shared Channel* (NPUSCH) é o canal dedicado à transmissão de dados e informações de controle no UE, permitindo que dispositivos de baixa potência enviem pequenas quantidades de dados de maneira eficiente, sendo ideal para a utilização em arquiteturas para IoT. Segundo a especificação técnica TS 36.211 do 3GPP, o canal NPUSCH existe em dois formatos: o Formato 1, utilizado para a transmissão de dados *uplink* e o Formato 2, usado para a transmissão de informações de controle, como confirmação ou rejeição de pacotes (ACK/NACK). Ambos os formatos de NPUSCH oferecem diferentes requisitos de recursos, ajustando-se às transmissões e variando o espaçamento entre subportadoras e o número de subportadoras (N_{SC}) (KANJ; SAVAUX; GUEN, 2020).

O Formato 1 foi projetado para a transmissão de dados *uplink* e consiste em várias camadas de alocação e processamento de recursos, otimizando a transmissão.. Neste formato, os dados são organizados em *Resource Unit* (RU), que são alocações de recursos de frequência e tempo. As RUs variam de acordo com o modo de transmissão, que podem ser *single-tone* ou *multi-tone*. No modo *single-tone*, é possível configurar o espaçamento entre subportadoras em 3,75 kHz ou 15 kHz, e apenas uma subportadora é alocada para a transmissão. Já o modo *multi-mode* pode utilizar 3, 6 ou 12 subportadoras. Tanto o modo *single-tone* como o modo *multi-tone*, cada slot possui 7 ou 6 símbolos OFDM, a depender do espaçamento de subportadora.

O processamento de sinal no Formato 1 envolve diversas etapas para melhorar a confiabilidade do canal. Inicialmente, é aplicada uma codificação convolucional de taxa 1/3, aumentando a redundância e a resistência contra erros. Em seguida, ocorre o mapeamento de modulação, utilizando BPSK no modo *single-tone*, o que torna o canal mais robusto a ruídos, e QPSK tanto no *single-tone* quanto no *multi-tone*, oferecendo uma maior taxa de bits. Após isso, o NPUSCH aplica a técnica SC-FDMA, que reduz a relação pico-média de potência (PARP), contribuindo para a eficiência contra desvanecimento do sinal (KANJ; SAVAUX; GUEN, 2020).

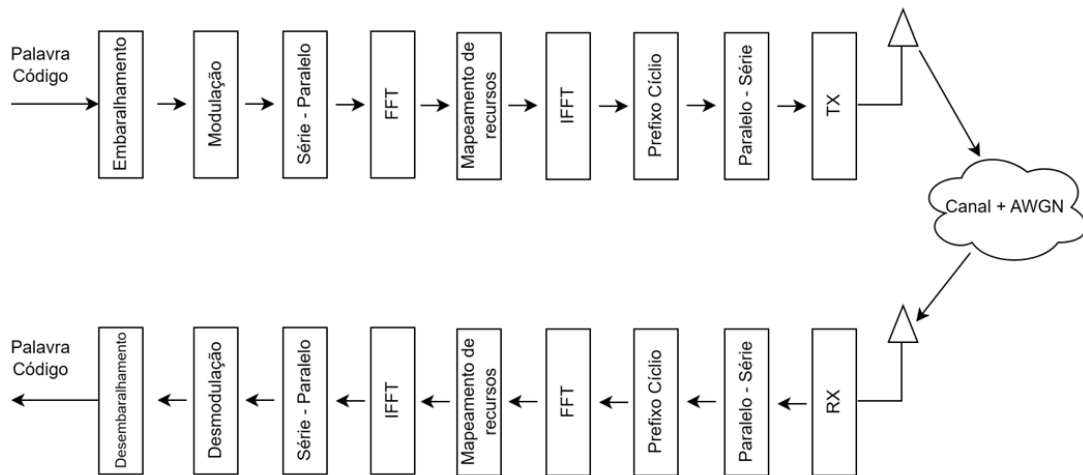
Para lidar com canais adversos, o NPUSCH no Formato 1 inclui mecanismos de repetição. Essa técnica permite que o mesmo bloco de dados seja transmitido várias vezes, aumentando a probabilidade de recuperação correta dos dados no receptor. O nível de repetição é configurado conforme a necessidade do dispositivo e a qualidade do canal, podendo variar de 1 a 128 vezes, a fim de garantir uma pequena razão de erro de bloco (BLER). A sincronização de potência no Formato 1 possibilita que o dispositivo transmita informações no momento correto, sendo essa sincronização dinâmica e dependente das condições do receptor (KANJ; SAVAUX; GUEN, 2020).

O canal de Demodulation Reference Signal (DMRS) trabalha em conjunto com o NPUSCH no processo de demodulação dos dados transmitidos. O DMRS fornece uma sequência de referência conhecida, permitindo que o receptor estime os efeitos do canal. O DMRS é embutido nos slots de transmissão NPUSCH e ocupa um conjunto específico de símbolos OFDM. Sua alocação na grade de recursos depende do espaçamento entre as subportadoras e do formato de transmissão. A principal função do DMRS é suportar a estimativa de canal, permitindo que o receptor calcule a resposta do canal para compensar os efeitos de desvanecimento, ruído e atrasos. Esse processo reduz a razão de erro de bloco (BLER) e aumenta a confiabilidade da comunicação (KANJ; SAVAUX; GUEN, 2020).

3 Modelo do sistema

O modelo de sistema para o *uplink* do NB-IoT é projetado para lidar de forma eficiente com a transmissão de dados. Nesse sistema, são integrados canais, uma sequência de sinal de referência, além dos blocos necessários para a estimação e equalização do sinal.

Figura 7. Diagrama de bloco para NPUSCH.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.0.1 Sequência do sinal referência

As informações binárias que precisam ser transmitidas são agrupadas em um tamanho de bloco de transporte (TBS) e chegam à unidade de codificação de canal. Esse TBS é transmitido ao longo de várias Unidades de Recurso (RUs), que são alocadas de acordo com um esquema de agendamento definido por TS 136.213 (PROJECT, 2018c) em sua Tabela 16.5.1.1.-2. O número de RUs disponíveis para cada transmissão é determinado por diversos fatores, incluindo as condições de rede e a quantidade de dados a ser transmitida.

No processamento do canal, diversas etapas são realizadas para preparar os dados para a transmissão. Primeiro, é feita a anexação de um Código de Redundância Cíclica (CRC) ao bloco de transporte, que para o NB-IoT normalmente consiste em um código de 24 bits, utilizando um polinômio gerador especificado em (PROJECT, 2018a). Em seguida, aplica-se a codificação turbo, utilizando um código de taxa 1/3. Essa técnica de codificação contribui para melhorar a robustez da transmissão em condições ruins de sinal. Finalmente, esse processo gera um código de entrada enviado ao canal NPUSCH, onde a transmissão real dos dados acontece.

Em um sistema NB-IoT, um bloco de bits pode ser representado como $b =$

$[b_1, b_2, \dots, b_{N-1}]$. Os bits b são então embaralhados usando uma sequência de embaralhamento especificada em (PROJECT, 2018b). A relação entre os bits originais e os bits embaralhados é expressa pela equação:

$$b^*(i) = [b(i) + c(i)] \mod 2, \quad (3.1)$$

onde i pode variar de 0 a $N_{bit} - 1$, e $c(i)$ representa a sequência de embaralhamento, também determinada por TS 136.211 (PROJECT, 2018b), representada pela equação 3.2:

$$c_{init} = n_{RNTI} \cdot 2^{14} + n_f \mod 2 \cdot (2^{13}) + [n_s/2] \cdot 2^9 + N_{ID}^{NCell}, \quad (3.2)$$

em que n_{RNTI} é o identificador temporário da rede de rádio, identificando a conexão do usuário na rede, n_s é o índice do primeiro slot da transmissão do código e n_f o índice do primeiro frame da transmissão. E por fim N_{ID}^{NCell} é a identidade da célula. Para transmissões que envolvem repetições no NPUSCH, a sequência de embaralhamento é reinicializada após cada transmissão idêntica.

O bloco de bits embaralhado $b^*(i)$ é modulado usando esquemas de modulação compatíveis com o NB-IoT, como BPSK e QPSK. O resultado dessa modulação é um bloco de símbolos representados por valores complexos, denotados como $S_{symb} = [S_0, S_1, \dots, S_{N_{symb}-1}]$, onde N_{symb} representa o número total de símbolos que foram modulados a partir do bloco original de bits. Os símbolos modulados são relacionados em grupos denominados M_{SC}^{NPUSCH} , no qual cada grupo corresponde a um símbolo SC-FDMA. E a quantidade de grupos é calculada como:

$$M_{SC}^{NPUSCH} = N_{RB}^{NPUSCH} \cdot N_{SC}^{RB}, \quad (3.3)$$

o N_{RB}^{NPUSCH} aqui representa a largura de banda do canal NPUSCH e N_{SC}^{RB} o número de subportadoras disponíveis em um bloco de recurso. A modulação resultante é transformada para o domínio da frequência por meio da Transformada Discreta de Fourier (DFT), transformando os símbolos, agora representados em (PROJECT, 2018b) como:

$$X = [X_0, X_1, \dots, X_{N_{symb}-1}]. \quad (3.4)$$

Em sistema de transmissão *uplink* símbolos DMRS são multiplexados juntamente com os símbolos de dados. A sequência DMRS para o número de subportadoras distribuído em uma RU é determinado em (PROJECT, 2018b) como:

$$d_u(n) = \frac{1}{\sqrt{2}}(1 + j)(1 - 2c(n))w(n \mod 16), \quad (3.5)$$

em que n podendo variar entre 0 e R_{REP}^{NPUSCH} , identificando o número de subportadoras.

Onde R_{REP}^{NPUSCH} representa o número de repetições do mesmo sinal, N_{slots}^{UL} o total de slots de *uplink* disponíveis e N_{RU} número total de unidades de recursos utilizados. A primeira sequência de DMRS é especificada pelo (PROJECT, 2018b) por um pulso unitário de comprimento 31, garantindo que a sequência comece com um estado conhecido.

Após todo o tratamento do código a ser transmitido, são realizados o mapeamento dos elementos de recursos físicos, onde cada símbolo é alocado em uma subportadora para a transmissão. O canal NPUSCH pode ser mapeado para uma ou mais RU, e cada unidade pode ser transmitida várias vezes (R_{REP}^{NPUSCH}) de acordo com (PROJECT, 2018c). Os símbolos no domínio da frequência definida na equação [3.4] são mapeados de forma sequencial (k,l), sendo k o índice de subportadora e l o índice do símbolo. O mapeamento é inicialmente feito no primeiro slot da unidade de recurso atribuída, garantindo que todos os elementos sejam alocados antes de passar para o próximo slot. Após o mapeamento para N_{slots} , a sequência de símbolos de cada slot pode ser repetida $N_{Identical}^{NPUSCH}$ vezes, para assim seguir para os próximos slots de símbolos.

O número de repetições de símbolos idênticos é definido por (PROJECT, 2018b), como

$$N_{Identical}^{NPUSCH} = \begin{cases} \min([R_{REP}^{NPUSCH}/2], 4); N_{SC}^{RU} > 1; \\ 1; N_{SC}^{RU} = 1. \end{cases} \quad (3.6)$$

Após o mapeamento dos símbolos do domínio da frequência nas subportadoras, o próximo passo é aplicar a Transformada Inversa de Fourier Discreta (IFFT). Essa transformação converte os dados do domínio da frequência para o domínio do tempo, criando um sinal que pode ser transmitido. O sinal resultante no domínio do tempo para um símbolo SC-FDMA l em um slot de *uplink* é dado em (PROJECT, 2018b), que a representa os símbolos contidos dentro de um *Resource Element* com o espaçamento Δf entre as subportadoras.

$$y_l(t) = \sum_{k=-[N_{SC}^{RU}/2]}^{[N_{SC}^{RU}/2]-1} a_{k(-),l} \cdot e^{j2\pi(k+1/2)\Delta f(t-N_{CP}T_s)}. \quad (3.7)$$

Quando se trata de transmissão em *multi-tone*, o sinal no domínio do tempo para um símbolo SC-FDMA l e k subportadoras é definido como:

$$y_{l,k}(t) = a_{k(-),l} \cdot e^{j\phi_{k,l}} e^{j2\pi(k+1/2)\Delta f(t-N_{CP}T_s)}. \quad (3.8)$$

No qual T_s é a unidade básica de tempo que a transmissão de um slot é calculada para NB-IoT, calculada como $T_s = (1/\Delta f \cdot N)$, e N_{CP} representa o comprimento do prefixo cíclico, definido em TS 36.211. E $k^{(-)} = k + [N_{sc}^{RU}/2]$.

Tabela 4. Parâmetros SC-FDMA.

Parametros	$\Delta f = 3,75$ kHz	$\Delta f = 15$ kHz
N	8192	2048
$N_{CP,l}$	256	160 para $l = 0$ 144 para $l = 1, 2, \dots, 6$
k	-24, -23, ..., 23	-6, -5, ..., 6

Fonte:(PROJECT, 2018b).

Quando um sinal é transmitido, ele é convertido para uma frequência mais elevada, e este sinal é afetado por vários fatores ao longo do caminho até o receptor. O sinal recebido pode ser modelado como uma convolução do sinal transmitido com a Resposta ao Impulso do Canal (CIR) e adição de ruído guassiano Branco Aditivo. Esse sinal é modelado a partir das equações:

$$r_{multi-tone} = h(t) * y_l(t) + w(t); \quad (3.9)$$

$$r_{single-tone} = h(t) * y_{l,k}(t) + w(t). \quad (3.10)$$

Em que $h(t)$ representa a resposta ao impulso do canal de multipercurso e $w(t)$ o ruído Guaussiano. Sendo a resposta ao impulso do canal expressa por:

$$h(t) = \sum_{i=0}^{L-1} \beta_i \delta(t - \tau_i), \quad (3.11)$$

para β_i representa a atenuação de multipercurso, τ_i o atraso para multipercurso e L o numero de diferentes caminhos de transmissão.

Na recepção o sinal é descrito e interpretado através de:

$$r_{multi-tones} = \sum_{i=0}^{L-1} \beta_i y_l(t - \tau_i) + w(t); \quad (3.12)$$

$$r_{single-tone} = \sum_{i=0}^{L-1} \beta_i y_{k,l}(t - \tau_i) + w(t). \quad (3.13)$$

O próximo capítulo apresenta a análise dos resultados do modelo do sistema a partir de métricas de BLER e SNR.

4 Resultados e Discussão

Esta simulação foi realizada para gerar uma curva de BLER do NPUSCH através de vários pontos de SNR e parâmetros de transmissão de dados. Para essa análise, foi utilizada a ferramenta de simulação MATLAB com recurso da biblioteca *LTE Toolbox*. A biblioteca oferece um conjunto de funções e modelos que facilitam a modelagem de diversos aspectos das redes móveis, incluindo a transmissão e recepção de sinais, modulação, multiplexação, codificação e decodificação de dados, controle de erros e análise de desempenho.

Para a geração do NPUSCH, foi considerado o Formato 1, alocado para a transmissão de dados do *uplink*. Neste formato, o dispositivo NB-IoT ajusta dinamicamente o tamanho de seu bloco de transporte com base em uma combinação de esquema de modulação, codificação e alocação de recursos do canal. De acordo com a especificação TS136.213 o tamanho do bloco de transporte para este formato é definido como 136. Os parâmetros utilizados na simulação estão sendo apresentados na Tabela 5.

Além disso, foi assumido um ambiente urbano, levando em conta o desvanecimento multipercurso do tipo *Rayleigh*, que representa a variação da amplitude do sinal ao encontrar obstáculos ao longo do caminho. Também foram ativados os sinais DMRS, por meio de uma sequência de sinais que variam ao longo do tempo e da frequência, com o objetivo de minimizar os efeitos causados pelo desvanecimento de multipercurso.

Tabela 5. Parâmetros de simulação

Parâmetros	Valores
Formato de Transmissão	Formato 1 (Dados)
Nº de blocos de transporte	25
Nº de repetições	2, 4, 16
Range SNR	-20 à 0.7
Tipo de ambiente	Urbano
Modulação	QPSK/BPSK

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A simulação para transmissão de dados no NPUSCH ocorre em várias etapas. Inicialmente, é gerada uma sequência de bits com o tamanho de bloco desejado. Essa sequência passa por processos de codificação CRC, codificação turbo e embaralhamento, resultando em símbolos ideais para a transmissão. Os símbolos gerados são então mapeados dentro de uma grade de recursos para gerar a forma de onda no domínio do tempo, utilizando modulação SC-FDMA.

Na forma de onda gerada, é adicionado um ruído branco gaussiano aditivo (AWGN) para simular a degradação do sinal na recepção. Após a recepção, os símbolos são extraídos

da grade recebida e o bloco de transporte é reconstruído por demodulação e decodificação. Por fim, a razão de erro do bloco de transporte (BLER) é calculada para cada ponto de SNR.

$$BLER = \frac{TBR}{TBT}, \quad (4.1)$$

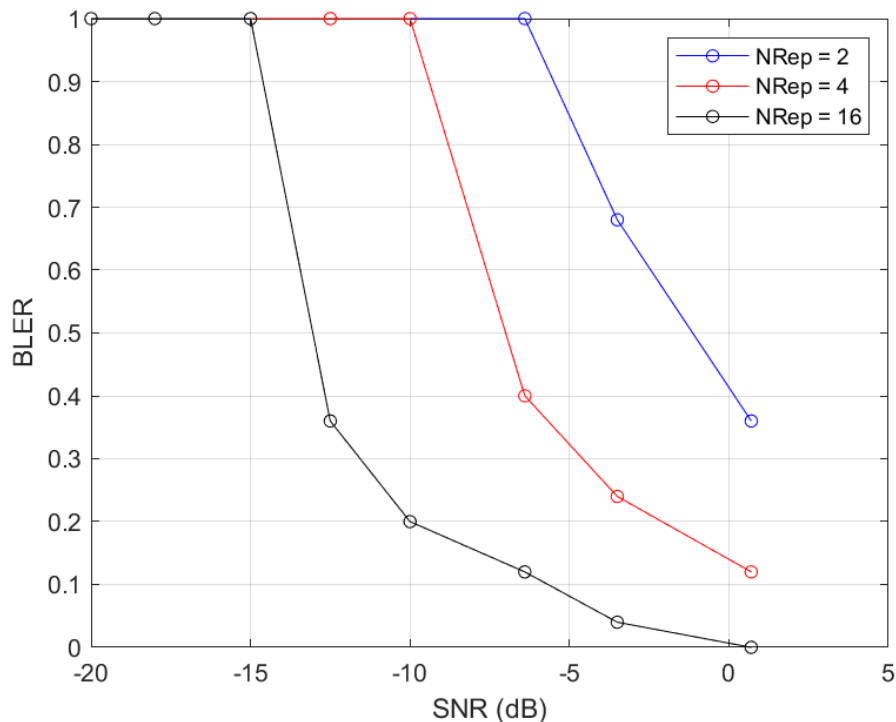
onde TBR representa o número total de blocos recebidos e TBT o número total de blocos transmitidos.

Os resultados das simulações para avaliar o desempenho do NPUSCH foram analisados os impactos do número de repetições no processo de transmissão, utilizando modulações QPSK e BPSK, com diferentes espaçamentos entre subportadoras de 3,75 kHz e 15 kHz. Foram avaliadas as transmissões de **single-tone** para 3,75 kHz e para 15 kHz, e de *multi-tones* para 15 kHz. O desempenho foi analisado com base em um valor de BLER aceitável para transmissão entre 10 e 15% .

4.1 Análise de Desempenho

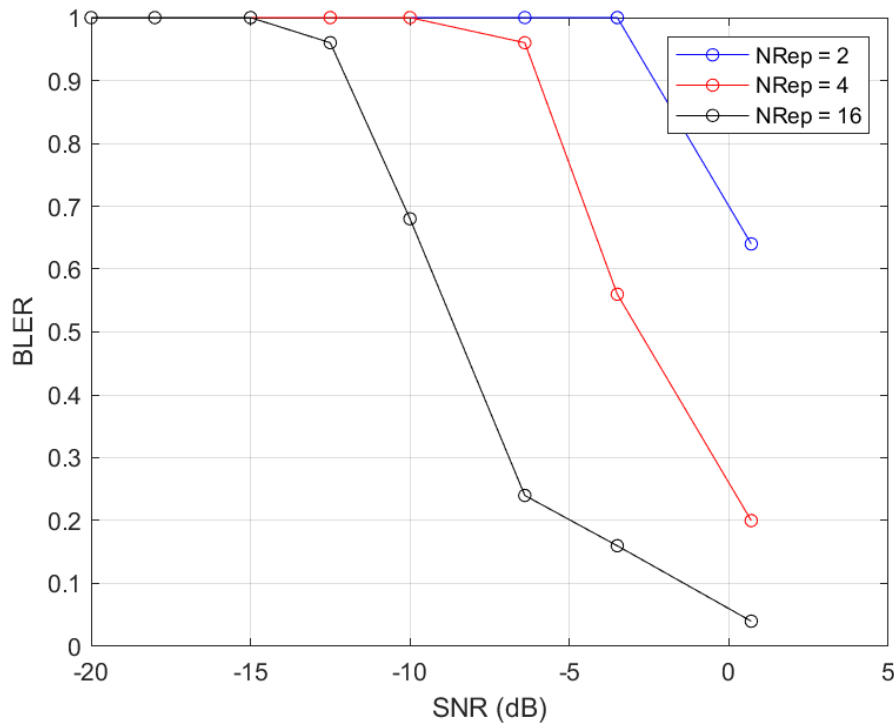
A primeira análise está relacionada ao modo de transmissão *single-tone*, utilizando espaçamento de subportadoras de 3,75 kHz e 15 kHz, com dois tipos de modulação: QPSK e BPSK, e variando o número de repetições entre 2, 4 e 16.

Figura 8. Curva BLER 3.75 kHz, Single-mode e BPSK



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 9. Curva BLER 3.75 kHz, Single-mode e QPSK



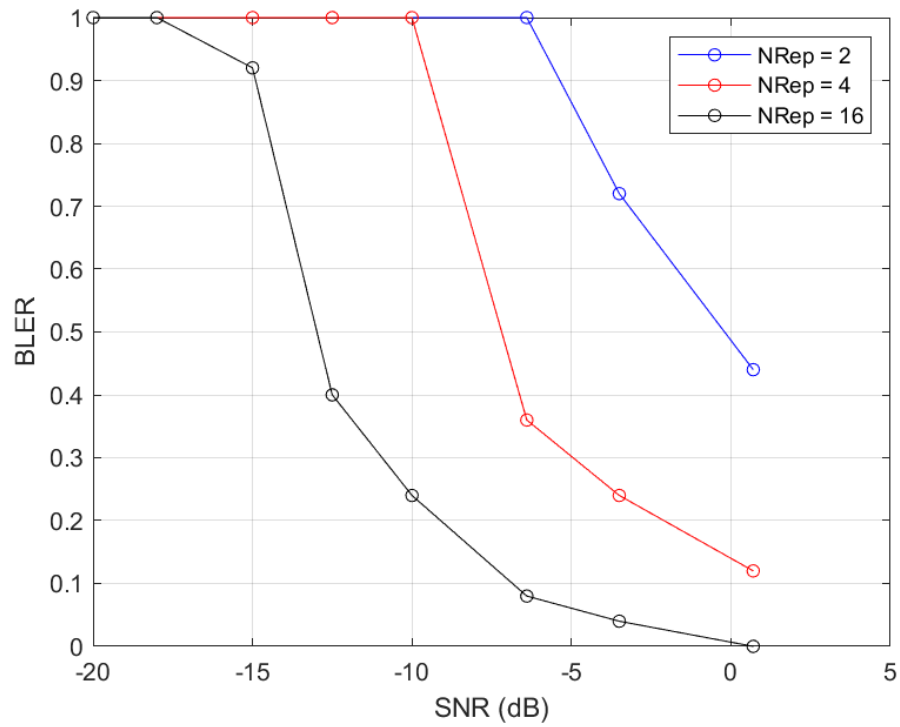
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Nos gráficos [8], [9], [10] e [11], observa-se que, à medida que o SNR aumenta de -20 dB para 0,7 dB, o BLER diminui progressivamente, indicando uma maior confiabilidade na transmissão de dados. Essa tendência está alinhada com o comportamento esperado, já que níveis mais altos de SNR geralmente resultam em melhor qualidade de sinal e menores taxas de erro. Em níveis muito baixos de SNR, os valores de BLER são relativamente altos, sugerindo uma maior suscetibilidade a erros na transmissão de dados. No entanto, à medida que o SNR melhora, os valores de BLER diminuem significativamente, indicando uma performance de transmissão mais robusta.

Quando a SNR atinge -5 dB ou valores mais altos, o BLER se aproxima de um cenário ideal, indicando que a transmissão de dados ocorre de forma eficiente e com poucos erros.

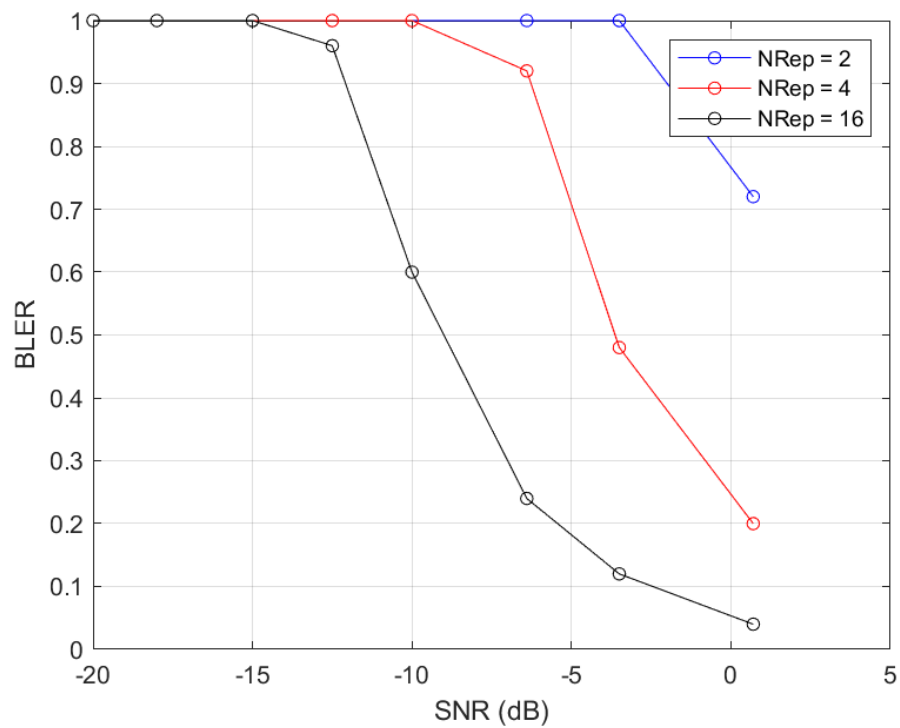
No caso de 16 repetições, os valores de BLER diminuem consideravelmente à medida que o SNR aumenta, o que indica que, com um maior número de repetições, o desempenho do sistema melhora, resultando em uma redução na taxa de erro, especialmente em níveis baixos de SNR. Em contrapartida, com apenas 2 repetições, o BLER permanece elevado, mesmo em níveis moderados de SNR, o que sugere que, com um número menor de repetições, o sistema não consegue atingir os requisitos de desempenho desejados em termos de taxa de erro.

Figura 10. Curva BLER 15 kHz, Single-mode e BPSK



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 11. Curva BLER 15 kHz, Single-mode e QPSK



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

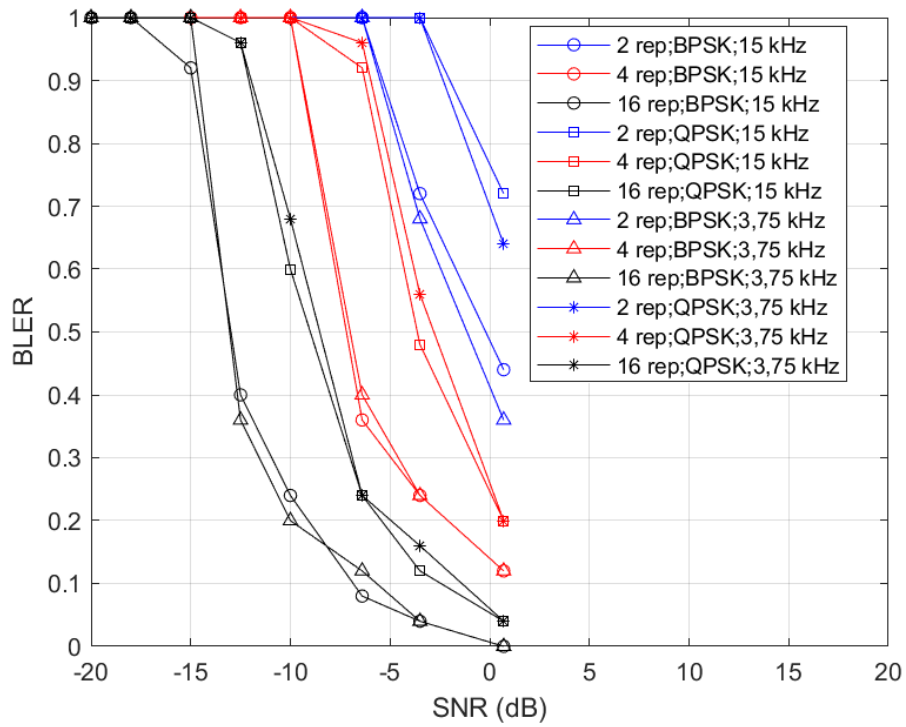
Em comparação às curvas de BLER para espaçamentos de 15 kHz e 3.75 kHz, observa-se que o espaçamento de 15 kHz geralmente apresenta valores de BLER mais baixos em condições adversas de SNR. A BLER decresce mais rapidamente à medida que aumenta a SNR para 15 kHz, pois o sistema é capaz de isolar o sinal das interferências e ruídos de maneira mais eficiente. Para 3.75 kHz, a curva de BLER tende a decrescer mais lentamente e requer mais repetições para atingir o mesmo nível de BLER do espaçamento de 15 kHz, especialmente em SNRs baixas, onde o ruído e o desvanecimento são mais significativos. Em resumo, o espaçamento de 15 kHz oferece um melhor compromisso entre resolução espectral e robustez contra interferência, mantendo a BLER baixa com menos repetições. O espaçamento de 3.75 kHz, por outro lado, sofre mais com interferência de subportadora, ruído e desvanecimento seletivo, elevando a BLER em ambientes com condições ruins de sinal.

Outra avaliação importante refere-se à escolha do tipo de modulação do sistema. A escolha entre as modulações QPSK e BPSK tem um impacto significativo no desempenho do NPUSCH, especialmente no modo *single-tone*. Ambas as modulações apresentam características que influenciam na transmissão de dados.

A modulação BPSK oferece uma robustez em condições de canal ruidoso, em comparação à modulação QPSK, porém com o QPSK é possível ter uma taxa de transmissão de dados mais elevada.

A escolha por um espaçamento de 15 kHz e a modulação QPSK apresenta uma relação entre capacidade e robustez. Embora a QPSK ofereça uma maior capacidade em comparação ao BPSK, sua sensibilidade a ruído e desvanecimentos pode comprometer o desempenho em ambientes com baixo SNR. Para mitigar esse impacto, seria necessário aumentar o número de repetições, o que pode impactar a latência e a eficiência energética do sistema. Em contrapartida, o BPSK, por sua simplicidade e maior distância entre os pontos da constelação, permite alcançar uma BLER aceitável com um número menor de repetições, tornando-o uma opção mais robusta para este cenário.

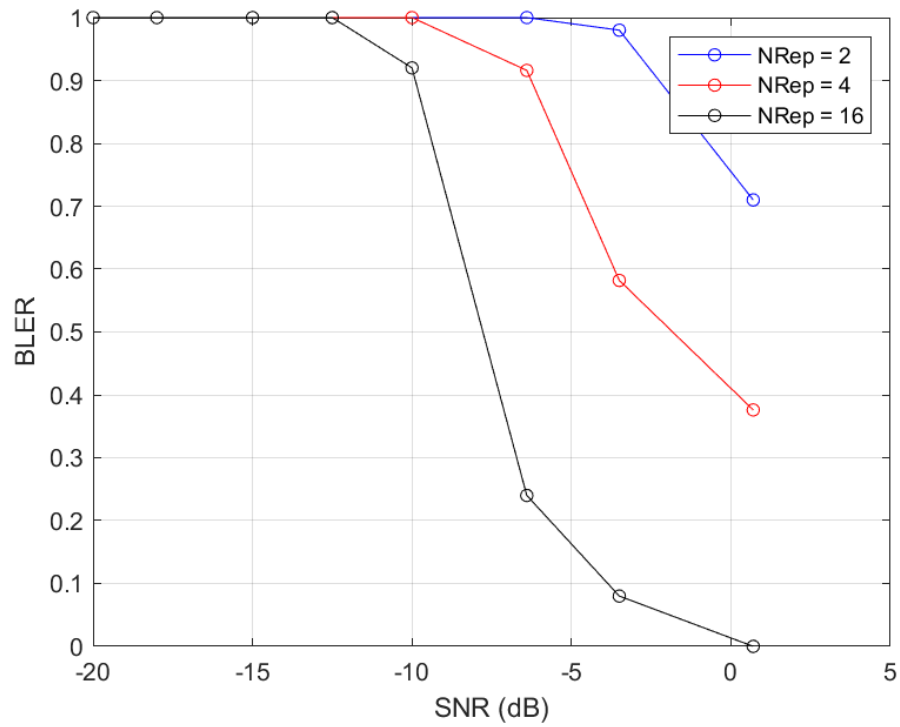
Ao empregar um espaçamento de 3,75 kHz, observamos que a modulação QPSK apresenta uma razão de erro de bloco (BLER) ligeiramente superior ao BPSK em condições desafiadoras. A maior densidade de pontos na constelação QPSK a torna mais sensível a ruídos e interferências, exigindo um número maior de repetições para atingir a mesma confiabilidade. No entanto, a QPSK permite transmitir mais dados em uma mesma banda. A escolha entre QPSK e BPSK neste cenário envolve uma relação entre robustez e capacidade, sendo o BPSK mais adequado para ambientes com alto nível de ruído e a QPSK para aplicações que priorizam a taxa de dados.

Figura 12. Curva comparativa *single-mode*

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

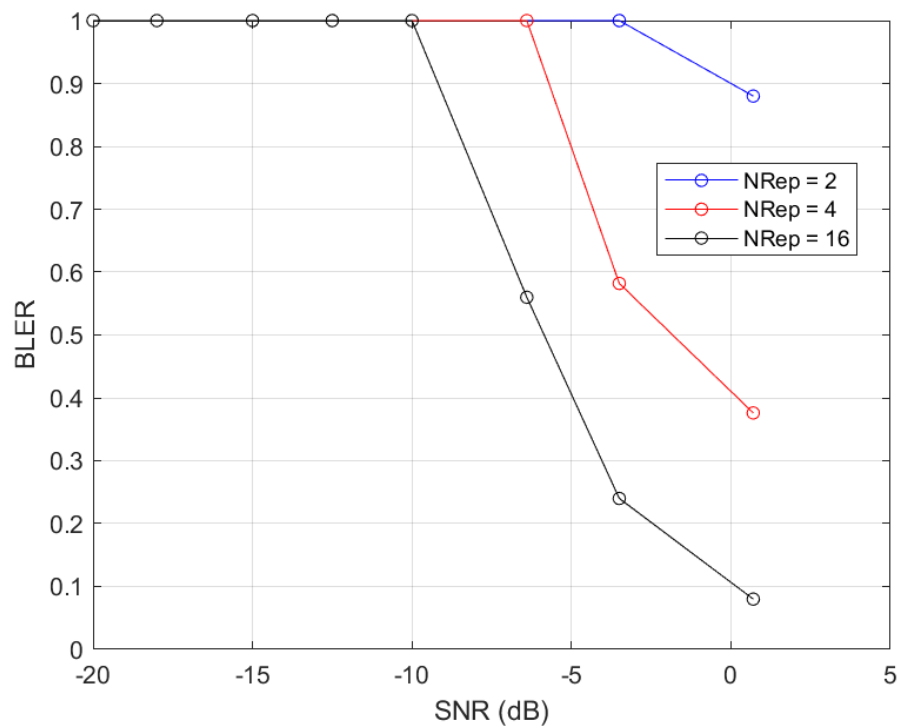
Ao analisar o modo de transmissão *multi-mode*, considerando um espaçamento de subportadoras de 15 kHz e modulação QPSK, utilizando 3 e 6 subportadoras, com números de repetições de 2, 4 e 16, é possível realizar uma análise de como o aumento do número de subportadoras impacta a qualidade da comunicação e a razão de erro de blocos, conforme mostrado nas Tabelas [13] e [14]

Figura 13. Curva BLER 15 kHz, 3 subportadora, *Multi-mode* e QPSK



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 14. Curva BLER 15 kHz, 6 subportadora, *Multi-mode* e QPSK



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Em modo de transmissão *multi-tone*, o sistema possui a flexibilidade de ajustar o número de subportadoras utilizadas, adaptando-se a diferentes condições de canal. Similarmente ao modo *single-tone*, o aumento do número de repetições contribui para uma redução na razão de erro de bloco (BLER). No entanto, no modo *multi-tone* com QPSK e espaçamento de 15 kHz, a BLER é influenciada tanto pela quantidade de subportadoras quanto pelo número de repetições, tornando a relação entre esses parâmetros mais complexa.

Com um número menor de subportadoras, como 3, a transmissão é mais resistente a interferências, permitindo alcançar uma BLER mais baixa com menos repetições. No entanto, a capacidade de transmitir dados é limitada. Ao aumentar para 6 subportadoras, a capacidade aumenta, mas a sensibilidade a ruídos e desvanecimentos também cresce, exigindo um ajuste no número de repetições para garantir a qualidade da comunicação.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi avaliado o desempenho do canal de *uplink* para o NB-IoT em diferentes modos de transmissão, utilizando diferentes espaçamentos entre subportadoras e dois tipos de modulações. As simulações foram realizadas utilizando o *LTE Toolbox* disponível no *software* MATLAB, a fim de avaliar a curva de BLER. O desempenho do sistema foi avaliado baseado nas repetições de transmissão de blocos.

A partir dos resultados obtidos, concluiu-se que, à medida que o número de repetições de transmissão de bloco aumenta e as condições de SNR melhoram, os valores de BLER tendem a zero, possibilitando uma transmissão bem-sucedida.

O modo *single-tone* demonstrou ser mais robusto em ambientes com baixa relação sinal-ruído (SNR). Ao utilizar apenas uma subportadora, esse modo concentra toda a potência em um único canal, tornando-o menos suscetível a interferências. Essa simplicidade do sistema, combinada com a concentração de energia, resulta em uma razão de erro de bloco (BLER) mais baixa, mesmo com um número menor de repetições. O espaçamento de 15 kHz se mostrou ideal para esse modo, proporcionando um bom equilíbrio entre a capacidade de transmissão e a robustez do sistema.

O modo *multi-tone* permite a utilização de um número maior de subportadoras, aumentando a capacidade de transmissão de dados. No entanto, essa flexibilidade exige um ajuste cuidadoso do número de repetições para manter a razão de erro de bloco (BLER) em níveis aceitáveis. À medida que aumentamos o número de subportadoras, a sensibilidade a ruídos e interferências também cresce, necessitando de um número maior de repetições para garantir a confiabilidade da transmissão. Embora o modo *multi-tone* ofereça uma maior capacidade, sua robustez é mais evidente em ambientes com alta relação (SNR).

O NB-IoT, com seus modos de transmissão *single-mode* e *multi-mode*, oferece uma solução altamente escalável e adaptável para aplicações de transmissão *uplink*. Essa flexibilidade permite ajustar a rede para atender a diversas demandas de capacidade e robustez, tornando-o ideal para cenários que exigem comunicação de baixo consumo de energia e longos alcances. Dessa forma, a adoção do NB-IoT contribui significativamente para o avanço das Smart Grids, alinhando-se às demandas futuras de melhorias na rede elétrica.

Referências

- 3GPP. *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception*. [S.l.]: ETSI Std., Rev, 2011. Citado na página 24.
- CASTRO, C.; PEDROSO, C. M. Uso de redes lte para comunicação de pmus em sistemas smart grid. *XXXIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações-SBrT*, 2015. Citado na página 25.
- GREER, C.; WOLLMAN, D. A.; PROCHASKA, D.; BOYNTON, P. A.; MAZER, J. A.; NGUYEN, C.; FITZPATRICK, G.; NELSON, T. L.; KOEPKE, G. H.; JR, A. R. H. et al. Nist framework and roadmap for smart grid interoperability standards, release 3.0. Chris Greer, David A. Wollman, Dean Prochaska, Paul A. Boynton, Jeffrey A ... , 2014. Citado na página 15.
- HAMIDI, V.; SMITH, K. S.; WILSON, R. C. Smart grid technology review within the transmission and distribution sector. In: *2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–8. Citado na página 19.
- HOLMA, H. Lte for umts: Ofdma and sc-fdma based radio access. *John Wiley & Sons google schola*, v. 2, p. 109–118, 2009. Citado na página 24.
- KANJ, M.; SAVAUX, V.; GUEN, M. L. A tutorial on nb-iot physical layer design. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 22, n. 4, p. 2408–2446, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 27, 28 e 29.
- LEITE, J. V. A.; CRUZ, A. Ferreira dos S. Estudo e aplicação da smart grid no sistema elétrico de distribuição brasileiro. *Seminário Estudantil de Producao Academica*, v. 16, 2018. Citado na página 19.
- LI, Y.; CHENG, X.; CAO, Y.; WANG, D.; YANG, L. Smart choice for the smart grid: Narrowband internet of things (nb-iot). *IEEE Internet of Things Journal*, v. 5, n. 3, p. 1505–1515, 2018. Citado na página 16.
- LOPES, Y.; FRANCO, R. H. F.; MOLANO, D. A.; SANTOS, M. A. dos; CALHAU, F. G.; BASTOS, C. A. M.; MARTINS, J. S.; FERNANDES, N. C. Smart grid e iec 61850: Novos desafios em redes e telecomunicações para o sistema elétrico. *XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, 2012. Citado na página 18.
- MALIK, H.; PERVAIZ, H.; ALAM, M. M.; MOULLEC, Y. L.; KUUSIK, A.; IMRAN, M. A. Radio resource management scheme in nb-iot systems. *IEEE Access*, v. 6, p. 15051–15064, 2018. Citado na página 27.
- MEKKI, K.; BAJIC, E.; CHAXEL, F.; MEYER, F. Overview of cellular lpwan technologies for iot deployment: Sigfox, lorawan, and nb-iot. In: IEEE. *2018 ieee international conference on pervasive computing and communications workshops (percom workshops)*. [S.l.], 2018. p. 197–202. Citado na página 15.

PROJECT 3rd G. P. Lte; evolved universal terrestrial radio access (e-utra);multiplexing and channel coding. *ETSI TS*, v. 136, n. 212, p. v15.2.1, 2018. Citado na página 30.

PROJECT 3rd G. P. Lte; evolved universal terrestrial radio access (e-utra);physical channels and modulation. *ETSI TS*, v. 136, n. 211, p. v15.2.0, 2018. Citado 5 vezes nas páginas 27, 28, 31, 32 e 33.

PROJECT 3rd G. P. Lte; evolved universal terrestrial radio access (e-utra);physical layer procedures. *ETSI TS*, v. 136, n. 213, p. v14.2.0, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 32.

QIN, A.; TANG, R.; WU, P.; XIA, M. An efficient npusch receiver design for nb-iot system. In: *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–5. Citado na página 16.

RIVERA, R.; ESPOSITO, A. S.; TEIXEIRA, I. Redes elétricas inteligentes (smart grid): oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

SANTOS, D. dos. Planejamento de cobertura e capacidade de redes de acesso em banda larga com tecnologia lte. *Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro.[documento em línea]* http://www.lambda.maxwell.ele.puc-rio.br/17607/17607_1.PDF. [Consultado: 17 junho. 2018], 2010. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.

SCHLIENZ, J.; RADDINO, D. Narrowband internet of things whitepaper. *White Paper, Rohde&Schwarz*, p. 1–42, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.

SENDIN, A.; MATANZA, J.; FERRÚS, R. *Smart Grid Telecommunications: Fundamentals and Technologies in the 5G Era*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 25.

STALLINGS, W. *Data and computer communications*. [S.l.]: Pearson Education India, 2007. Citado na página 21.

VIJAYAPRIYA, T.; KOTHARI, D. P. Smart grid: an overview. *Smart Grid and Renewable Energy*, Scientific Research Publishing, v. 2, n. 4, p. 305–311, 2011. Citado na página 20.

ZAYAS, A. D.; MERINO, P. The 3gpp nb-iot system architecture for the internet of things. In: IEEE. *2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. [S.l.], 2017. p. 277–282. Citado na página 28.

APÊNDICE A . Código de simulação em MATLAB

O código gera uma curva BLER (Block Error Rate) para o canal NPUSCH do NB-IoT para vários pontos de SNR e parâmetros de transmissão. Os sinais NPUSCH e DRS (Narrowband Demodulation Reference Signal) são transmitidos em todos os slots. Operando slot a slot para cada ponto de SNR, o cálculo do BLER compreende as seguintes etapas:

- Geração da grade de recursos: Gera uma grade de recursos e a preenche com símbolos NPUSCH.
- Criação da forma de onda de banda base: Modula a grade usando SC-FDMA (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access).
- Passagem pelo canal: Passa a forma de onda por um canal com ruído e desvanecimento.
- Operações do receptor: Realiza a demodulação SC-FDMA, estimação de canal e equalização.
- Obtenção do CRC de bloco: Decodifica os símbolos equalizados para obter o CRC de bloco.
- Determinação do desempenho do NPUSCH: Usa o resultado do CRC de bloco na saída do decodificador de canal para determinar o desempenho do NPUSCH.

```

numTrBlks = 15; % Number of simulated transport blocks
SNRdB = [-20 -10 -6.4 -3.5 0.7 2 5 8]; % Range of SNR values in dB
simReps = [16 64]; % Repetitions to simulate

ue = struct(); % Initialize the UE structure
ue.NBULSubcarrierSpacing = '15kHz'; % 3.75kHz, 15kHz
ue.NNCellID = 10; % Narrowband cell identity

chs = struct();
chs.NPUSCHFormat = 'Data'; % NPUSCH payload type ('Data' or
'Control')
% The number of subcarriers used for NPUSCH 'NscRU' depends on the NPUSCH
% format and subcarrier spacing 'NBULSubcarrierSpacing' as shown in TS
36.211
% Table 10.1.2.3-1. There are 1,3,6 or 12 continuous subcarriers for
NPUSCH
chs.NBULSubcarrierSet = 0:0; % Range is 0-11 (15kHz); 0-47 (3.75kHz)
chs.NRUsc = length(chs.NBULSubcarrierSet);
% The symbol modulation depends on the NPUSCH format and NscRU as given
by
% TS 36.211 Table 10.1.3.2-1
chs.Modulation = 'QPSK';
chs.CyclicShift = 0; % Cyclic shift required when NRUsc = 3 or 6
chs.RNTI = 20; % RNTI value
chs.NLayers = 1; % Number of layers
chs.NRU = 1; % Number of resource units
chs.SlotIdx = 0; % The slot index
chs.NTurboDecIts = 5; % Number of turbo decoder iterations
chs.CSI = 'On'; % Use channel CSI in PUSCH decoding

% RV offset signaled via DCI (See 36.213 16.5.1.2)
rvDCI = 0;
% Calculate the RVSeq used according to the RV offset
rvSeq = [2*mod(rvDCI+0,2) 2*mod(rvDCI+1,2)];

if strcmpi(chs.NPUSCHFormat,'Data')
    infoLen = 136; % Transport block size for NPUSCH format 1
elseif strcmpi(chs.NPUSCHFormat,'Control')
    infoLen = 1; % ACK/NACK bit for NPUSCH format 2
end

channel = struct(); % Initialize channel config
structure
channel.Seed = 6; % Channel seed
channel.NRxAnts = 2; % 2 receive antennas
channel.DelayProfile = 'ETU'; % Delay profile
channel.DopplerFreq = 1; % Doppler frequency in Hz
channel.MIMOCorrelation = 'Low'; % Multi-antenna correlation
channel.NTerms = 16; % Oscillators used in fading model
channel.ModelType = 'GMEDS'; % Rayleigh fading model type
channel.InitPhase = 'Random'; % Random initial phases
channel.NormalizePathGains = 'On'; % Normalize delay profile power

```

```
channel.NormalizeTxAnts = 'On';           % Normalize for transmit antennas
```

```
% Channel estimator behavior  
perfectChannelEstimator = true;
```

```
% Configure channel estimator  
cec.PilotAverage = 'UserDefined';        % Type of pilot symbol averaging  
cec.TimeWindow = 1;                      % Time window size in REs  
cec.FreqWindow = 23;                     % Frequency window size in REs  
cec.InterpType = 'Cubic';                % 2D interpolation type  
channelEstimationLength = 8;              % Channel estimation length in ms
```

```
chs.SeqGroupHopping = 'on'; % Enable/Disable Sequence-Group Hopping for  
UE
```

```
chs.SeqGroup = 0;                        % Higher-layer parameter  
groupAssignmentNPUSCH
```

```
% Get number of time slots in a resource unit NULSlots according to  
% TS 36.211 Table 10.1.2.3-1
```

```
if strcmpi(chs.NPUSCHFormat, 'Data')  
    if chs.NRUsc == 1  
        NULSlots = 16;  
    elseif any(chs.NRUsc == [3 6 12])  
        NULSlots = 24/chs.NRUsc;  
    else  
        error('Invalid number of subcarriers. NRUSc must be one of  
1,3,6,12');  
    end  
elseif strcmpi(chs.NPUSCHFormat, 'Control')  
    NULSlots = 4;  
else  
    error('Invalid NPUSCH Format (%s). NPUSCHFormat must be ''Data'' or  
''Control''', chs.NPUSCHFormat);  
end  
chs.NULSlots = NULSlots;
```

```
% Get the slot grid and number of slots per frame  
emptySlotGrid = lteNBResourceGrid(ue); % Initialize empty slot grid  
slotGridSize = size(emptySlotGrid);  
NSlotsPerFrame = 20/(slotGridSize(1)/12);
```

```
tSlot = 10e-3/NSlotsPerFrame; % Slot duration  
symbolsPerSlot = slotGridSize(2); % Number of symbols per slot
```

```
% Get a copy of the configuration variables ue, chs and channel to create  
% independent simulation parfor loops
```

```
ueInit = ue;  
chsInit = chs;  
channelInit = channel;
```

```

for repIdx = 1:numel(simReps)

    chsInit.NRep = simReps(repIdx); % Number of repetitions of the NPUSCH
    NSlotsPerBundle = chsInit.NRU*chsInit.NULSlots*chsInit.NRep; % Number
of slots in a codeword bundle
    TotNSlots = numTrBlks*NSlotsPerBundle; % Total number of simulated
slots

    % Initialize BLER and throughput result
    maxThroughput = zeros(length(SNRdB),1);
    simThroughput = zeros(length(SNRdB),1);
    bler = zeros(1,numel(SNRdB)); % Initialize BLER result

    for snrIdx = 1:numel(SNRdB)
        % parfor snrIdx = 1:numel(SNRdB)
        % To enable the use of parallel computing for increased speed comment
out
        % the 'for' statement above and uncomment the 'parfor' statement
below.
        % This needs the Parallel Computing Toolbox (TM). If this is not
installed
        % 'parfor' will default to the normal 'for' statement.

        % Set the random number generator seed depending on the loop
variable
        % to ensure independent random streams
        rng(snrIdx,'combRecursive');

        ue = ueInit; % Initialize ue configuration
        chs = chsInit; % Initialize chs configuration
        channel = channelInit; % Initialize fading channel configuration
        numBlkErrors = 0; % Number of transport blocks with errors
        estate = struct('SlotIdx',chs.SlotIdx); % Initialize NPUSCH
encoder state
        dstate = estate; % Initialize NPUSCH decoder state
        offset = 0; % Initialize overall frame timing offset
        trblk = []; % Initialize the transport block
        npuschHest = []; % Initialize channel estimate
        noiseEst = []; % Initialize noise estimate

        % Display the number of slots being generated
        fprintf('\nGenerating %d slots corresponding to %d transport
block(s) at %g dB SNR\n',TotNSlots,numTrBlks,SNRdB(snrIdx));

        for slotIdx = 0+(0:TotNSlots-1)
            % Calculate the frame number and slot number within the frame
            ue.NFrame = fix(slotIdx/NSlotsPerFrame);
            ue.NSlot = mod(slotIdx,NSlotsPerFrame);
            % Create the slot grid
            slotGrid = emptySlotGrid;

            if isempty(trblk)

```

```

% Initialize transport channel decoder state
dstateULSCH = [];

if strcmpi(chs.NPUSCHFormat,'Data')
    % UL-SCH encoding is performed for the two RV values
    % transmitting the codewords. The RV sequence used is
    % from the rvDCI value signaled in the DCI and
    % between 0 and 2 as given in TS 36.213 Section
    % Define the transport block which will be encoded to
    % codewords for different RV
    trblk = randi([0 1],infoLen,1);

    % Determine the coded transport block size
    [~, info] = lteNPUSCHIndices(ue,chs);
    outblklen = info.G;
    % Create the codewords corresponding to the two RV
    % in the first and second block, this will be repeated
    % blocks are transmitted
    chs.RV = rvSeq(1); % RV for the first block
    cw = lteNULSCH(chs,outblklen,trblk); % CRC and Turbo
    chs.RV = rvSeq(2); % RV for the second block
    cw = [cw lteNULSCH(chs,outblklen,trblk)]; %#ok<AGROW>
    % CRC and Turbo coding is repeated
else
    trblk = randi([0 1],1); % 1 bit ACK
    % For ACK, the same codeword is transmitted every
    % defined in TS 36.212 Section 6.3.3
    cw = lteNULSCH(trblk);
end
blockIdx = 0; % First block to be transmitted
end

% Copy SlotIdx for the SCFDMA modulator
chs.SlotIdx = estate.SlotIdx;

% Set the RV used for the current transport block
chs.RV = rvSeq(mod(blockIdx,size(rvSeq,2))+1);

% NPUSCH encoding and mapping onto the slot grid
txsym =
lteNPUSCH(ue,chs,cw(:,mod(blockIdx,size(cw,2))+1),estate);
slotGrid(lteNPUSCHIndices(ue,chs)) = txsym;

% NPUSCH DRS and mapping on to the slot grid

```

```

[dmrs,estate] = lteNPUSCHDRS(ue,chs,estate);
slotGrid(lteNPUSCHDRSIndices(ue,chs)) = dmrs;

% If a full block is transmitted, increment the clock counter
so that
% the correct codeword can be selected
if estate.EndOfBlk
    blockIdx = blockIdx + 1;
end

% Perform SC-FDMA modulation to create the time domain
waveform
[txWaveform,scfdmaInfo] = lteSCFDMAModulate(ue,chs,slotGrid);

% Add 25 sample padding. This is to cover the range of delays
% expected from channel modeling (a combination of
% implementation delay and channel delay spread)
txWaveform = [txWaveform; zeros(25, size(txWaveform,2))];
%#ok<AGROW>

% Initialize channel time for each slot
channel.InitTime = slotIdx*tSlot;

% Pass data through channel model
channel.SamplingRate = scfdmaInfo.SamplingRate;
[rxWaveform,fadingInfo] = lteFadingChannel(channel,
txWaveform);

% Calculate noise gain
SNR = 10^(SNRdB(snrIdx)/10);

% Normalize noise power to take account of sampling rate,
which is
% a function of the IFFT size used in SC-FDMA modulation
N0 = 1/sqrt(2.0*double(scfdmaInfo.Nfft)*SNR);

% Create additive white Gaussian noise
noise = N0*complex(randn(size(rxWaveform)), ...
    randn(size(rxWaveform)));

% Add AWGN to the received time domain waveform
rxWaveform = rxWaveform + noise;

%-----
-----
%
% Receiver
%-----
-----

% Perform timing synchronization, extract the appropriate
% subframe of the received waveform, and perform SC-FDMA
% demodulation
if (perfectChannelEstimator)
    offset = hPerfectTimingEstimate(fadingInfo);

```

```

else
    [t,mag] = lteULFrameOffsetNPUSCH(ue, chs, rxWaveform,
dstate);
    % The function hSkipWeakTimingOffset is used to update
the
    % receiver timing offset. If the correlation peak in
'mag'
    % is weak, the current timing estimate 't' is ignored and
    % the previous estimate 'offset' is used
    offset = hSkipWeakTimingOffset(offset,t,mag);
end

% Synchronize the received waveform
rxWaveform = rxWaveform(1+offset:end, :);

% Perform SC-FDMA demodulation on the received data to
recreate
% the resource grid, including padding in the event that
% practical synchronization results in an incomplete slot
being
% demodulated
rxSlot = lteSCFDMADemodulate(ue, chs, rxWaveform);
[K,L,R] = size(rxSlot);
if (L < symbolsPerSlot)
    rxSlot = cat(2, rxSlot, zeros(K, symbolsPerSlot-L, R));
end

% Channel estimation
if (perfectChannelEstimator)
    % Perfect channel estimation
    ue.TotSlots = 1; % Channel estimate for 1 slot
    estChannelGrid = lteULPerfectChannelEstimate(ue, chs,
channel, offset);
    noiseGrid = lteSCFDMADemodulate(ue, chs, noise(1+offset:end
,:));
    noiseEstSlot = var(noiseGrid(:));
else
    [estChannelGrid, noiseEstSlot] =
lteULChannelEstimateNPUSCH(ue, chs, cec, rxSlot, dstate);
end

% Get NPUSCH indices
npuschIndices = lteNPUSCHIndices(ue, chs);

% Get NPUSCH resource elements from the received slot
[rxNpuschSymbols, npuschHestSlot] =
lteExtractResources(npuschIndices, ...
    rxSlot, estChannelGrid);

% Perform channel estimate and noise estimate buffering in
% the case of practical channel estimation
if (perfectChannelEstimator)
    npuschHest = npuschHestSlot;
    noiseEst = noiseEstSlot;

```

```

else
    npuschHest = cat(3,npuschHest,npuschHestSlot);
    noiseEst = cat(1,noiseEst,noiseEstSlot);
    if (size(npuschHest,3) > channelEstimationLength)
        npuschHest = npuschHest(:,:,2:end);
        noiseEst = noiseEst(2:end);
    end
end

% Decode NPUSCH
[rxcw,dstate,symbols] = lteNPUSCHDecode(...
    ue, chs, rxNpuschSymbols,
mean(npuschHest,3), mean(noiseEst),dstate);

% Decode the transport block when all the slots in a block
have
% been received
if dstate.EndOfBlk
    % Soft-combining at transport channel decoder
    [out, err, dstateULSCH] =
lteNULSCHDecode(chs,infoLen,rxcw,dstateULSCH);
end

% If all the slots in the bundle have been received, count
the
% errors and reinitialize for the next bundle
if dstate.EndOfTx
    if strcmpi(chs.NPUSCHFormat,'Control')
        err = ~isequal(out,trblk);
    end
    numBlkErrors = numBlkErrors + err;
    % Re-initialize to enable the transmission of a new
transport
    % block
    trblk = [];
end

end
% Calculate the block error rate
bler(snrIdx) = numBlkErrors/numTrBlks;
fprintf('NPUSCH BLER = %.4f \n',bler(snrIdx));
% Calculate the maximum and simulated throughput
maxThroughput(snrIdx) = infoLen*numTrBlks; % Max possible
throughput
simThroughput(snrIdx) = infoLen*(numTrBlks-numBlkErrors); %
Simulated throughput
fprintf('NPUSCH Throughput(%%) = %.4f
%%\n',simThroughput(snrIdx)*100/maxThroughput(snrIdx));

end

```