



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS DA COMPUTAÇÃO
MESTRADO EM ENGENHARIA INFORMÁTICA E DE TELECOMUNICAÇÕES
UNIVERSIDADE AUTÓNOMA DE LISBOA
“LUÍS DE CAMÕES”

No Contexto Português pode o 5G ser substituto do Sistema Tetra?

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Informática
e de Telecomunicações

Autor: Ulisses Manuel Gonçalves Pinto

Orientador: Professor Doutor Mário Pedro Guerreiro Marques da Silva

Número do candidato: 30002889

Julho de 2023

Lisboa

Dedicatória

Dedico esta dissertação à minha família, por sempre acreditar em mim e por todo o apoio durante esta caminhada tão importante, quer a nível pessoal como profissional. Eu nunca serei capaz de agradecer o suficiente por isso.

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer ao Orientador desta Dissertação, Prof. Doutor Mário Marques da Silva. Agradeço-lhe por me ter aceite como seu aluno, pelos conselhos que me deu, pela sabedoria que me transmitiu e por todas as palavras de apoio e encorajamento que forneceu. Foi um privilégio ter sido seu aluno não só na Dissertação, mas também nas unidades curriculares por ele lecionadas.

Agradeço também à minha mulher e filhas a compreensão pelas horas, dias e meses em que estive mais ausente, agradeço as suas palavras de compreensão e incentivo na persecução deste objetivo.

Agradeço de igual forma à minha família que me apoiou sempre neste longo percurso, ensinando-me que a resiliência de um caminho também é composta por amor e carinho, e que só com estes podemos muitas das vezes não desistir e enfrentar as adversidades da vida com um sorriso na cara. Sem eles eu não teria atingido mais esta etapa.

A eles o meu mais sincero e profundo Obrigado.

Deixo também uma palavra de agradecimento aos meus professores(as) que sempre me acompanharam não só na licenciatura, mas também no mestrado, a estes quero agradecer por me terem passado um pouco da sua sabedoria, por me terem esclarecido e por me terem ajudado a crescer intelectualmente.

Epígrafe

“A educação é a arma mais poderosa que você pode usar para mudar o mundo.”

Nelson Mandela

Resumo

Hodiernamente, muito se tem debatido no espaço público a propósito da rede de emergência nacional, denominada de Sistema Integrado de Redes de Emergência e Segurança de Portugal (SIRESP). No entanto, duas questões se colocam: pode o SIRESP ser melhorado? Deve o SIRESP ser substituído por redes de telecomunicações mais recentes como o 5G?

A criticidade desta rede está esplanada no Decreto-Lei n.º 81-A/19, de 17 de junho [1], onde a mesma deixa de ser empresa privada e integrando o Sector Empresarial do Estado e vendo o seu papel na operacionalidade da rede reforçado, na medida em que dá suporte às comunicações de entidades críticas, tais como, a Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil (ANEPC), Autoridade de Segurança Alimentar e Económica (ASAE), Autoridade Marítima Nacional (AMN), Direção Geral dos Serviços Prisionais (DGSP), Estado-Maior-General das Forças Armadas (EMGFA), Guarda Nacional Republicana (GNR), Polícia de Segurança Pública (PSP), Polícia Judiciária (PJ), Instituto Nacional de Emergência Médica (INEM).

Sabemos que no território nacional têm ocorrido várias catástrofes, podendo-se destacar os incêndios de Pedrogão Grande, como aquele em que a rede SIRESP mais foi contestada na sua operacionalidade. Estes fenómenos catastróficos, devido às alterações climáticas, tendem a ser mais frequentes, o que torna ainda mais premente o debate e a análise do futuro da rede de emergência nacional.

Pretende-se com esta dissertação realizar uma análise científica em duas dimensões. Na primeira, analisar os requisitos da rede SIRESP e perceber se os mesmos podem ser atendidos pela rede 5G, isto é, poderá o 5G substituir o *Terrestrial Trunked Radio* TETRA?

Na segunda, validar os pressupostos através da aplicação do método de Monte Carlo, ou seja, verificar qual o nível de desempenho nos mais diversos cenários.

Pretende-se, ainda, apresentar um olhar desprendido da rede SIRESP e, em particular, da norma TETRA que lhe dá suporte, em comparação com a rede 5G, procurando contribuir de forma positiva para o aperfeiçoamento da rede de emergência nacional.

Por último, perspetivar o futuro e verificar o que poderá mudar com o 6G.

Palavras-chave: PMR, SIRESP; TETRA; 5G.

Abstract

Nowadays, much has been debated in the public space about the national emergency network called Integrated System of Emergency and Security Networks of Portugal (SIRESP), where two questions arise. Can SIRESP be improved? Should SIRESP be replaced by newer telecom networks like 5G?

The criticality of this network is outlined in DL 81-A/19 of 17 June [1], where it ceases to be a private company and passes to the State Business Sector, seeing its essential role in the operation of the network reinforced, insofar as it gives support for communications from critical entities such as ANEPC, ASAE, AMN, DGSP, EMGFA, GNR, PSP, PJ, INEM, among others.

We know that several catastrophes have occurred in the national territory, highlighting by the fires in Pedrogão Grande, as the one in which the SIRESP network was most contested in its operation. These catastrophic phenomena, due to climate change, tend to be more frequent, which makes the debate and analysis of what is intended for the national emergency network even more urgent.

This dissertation intends to carry out a scientific analysis in two dimensions. First, analyzing the requirements of the SIRESP network and whether they can be met by the 5G network and in the second, validating the assumptions through the application of the Monte Carlo method.

Another objective of this dissertation is to present a detached look at the SIRESP Network and in particular the TETRA standard that supports it, compared to the 5G network, seeking to contribute positively to the improvement of the national emergency network.

Keywords: PMR, SIRESP; TETRA; 5G.

Índice

Dedicatória	3
Agradecimentos	4
Epígrafe	5
Resumo	6
Abstract	7
Índice	8
Lista de Quadros	10
Lista de Figuras	11
Lista de Abreviaturas	12
1 Introdução	14
1.1 Objetivos.....	16
1.1.1 Objetivos específicos	16
1.2 Caracterização do problema	16
1.3 Justificação	17
1.4 Metodologia.....	18
2 Estado da arte	19
2.1 Private or Professional Mobile Radio.....	19
2.2 Public Access Mobile Radio	21
2.3 Digital Mobile Radio.....	23
2.4 Terrestrial Trunked Radio	24
2.4.1 Largura de banda e métodos de acesso	26
2.4.2 Modos de Operação	29
2.4.3 Serviços	32
2.5 SIRESP	32
2.5.1 Cobertura	33

2.6	Evolução dos sistemas celulares.....	34
2.7	5G	36
2.7.1	Funcionamento	39
2.7.2	Capacidade	41
2.7.3	Antenas	41
2.7.4	Latência	44
3	TETRA vs 5G	48
3.1	Análise comparativa	49
4	Implementação de algoritmos e análise de resultados	51
4.1	Pressupostos da simulação	51
4.1.1	Método de Monte Carlo	52
4.1.2	Bit Error Rate	53
4.1.3	Modulação por múltipla portadora versus única portadora	53
4.1.4	Low-Density Parity Check (LDPC)	54
4.1.4.1	Estrutura do código LDPC.....	55
4.1.5	Match Filter Bound (MFB)	56
4.1.6	Zero Forcing (ZF)	56
4.2	Análise e Resultados das Simulações.....	58
5	Conclusões	63
6	Sugestões para trabalhos futuros	65
	Bibliografia	66

Lista de Quadros

Tabela 1 – Arquitetura do modelo OSI e sua correspondência na norma TETRA	25
Tabela 2 - Principais parâmetros do TETRA	26
Tabela 3 - Comparação entre as versões do 3GPP [7]	35
Tabela 4 - Casos de numerologia 5G	47
Tabela 5 - Análise comparativa de serviços.....	49
Tabela 6 - Simulações realizadas	52

Lista de Figuras

Figura 1 - Comparação da eficiência de espectro, n.º de canais em 200kHz para diferentes tecnologias.....	28
Figura 2 - Modo DMO	29
Figura 3 - Modo LST	30
Figura 4 - Modo TMO	30
Figura 5 – Modo DMO	31
Figura 6 - Modo Gateway.	31
Figura 7 - Simulação de cobertura da estação de base do Cabeço do Pião [2].....	34
Figura 8 – Algumas Versões do 3GPP [8]	37
Figura 9 - Casos de uso [7]	40
Figura 10 - Requisitos de desempenho do 5G [8].....	45
Figura 11- OFDM vs SC-FDE [14]	54
Figura 12 - Desempenho BER para TETRA e 5G para 4x32 MIMO	58
Figura 13 - Desempenho BER para TETRA e 5G para 4x128 MIMO	59
Figura 14 - Desempenho BER para TETRA e 5G para 32x128 MIMO	60
Figura 15 - Desempenho BER para 5G 4x32 MIMO - 4x128 MIMO	61
Figura 16 - Desempenho BER para 5G 4x128 MIMO - 32x128 MIMO	62

Lista de Abreviaturas

3GPP	3rd Generation Partnership Project
ANEPC	Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil
ASAE	Autoridade de Segurança Alimentar e Económica
AMN	Autoridade Marítima Nacional
BER	Bit Error Rate
CELP	Coded Excited Linear Predictive
DGSP	Direção Geral dos Serviços Prisionais
DMO	Direct Mode Operation
DMR	Digital Mobile Radio
DPMR	Digital Private Mobile Radio
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
EMGFA	Estado-Maior-General das Forças Armadas
ERC	European Radiocommunications Committee
ETSI	Telecommunications Standards Institute
FDE	Frequency Domain Equalizers
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GNR	Guarda Nacional Republicana
GSM	Global System for Mobile Communications
IoT	Internet of Things
FFT	Fast Fourier Transform
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
INEM	Instituto Nacional de Emergência Médica
IP	Internet Protocol
ISI	Inter-Symbol Interference
LDPC	Low-Density Parity Check
LST	Local Site Trunking
LTE	Long Term Evolution
MEC	Multi-Access Edge Computing
MFB	Match Filter Bound
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MMC	Método de Monte Carlo

MMTC	Massive Machine-Type Communications
NFV	Network Function Virtualization
5G-NR	5G-New Radio
NSA	Non-Standalone
NXDN	Next Generation Digital Narrowband
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OSI	Open System Interconnection
PAMR	Public Access Mobile Radio
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
PJ	Polícia Judiciária
PMR	Private Mobile Radio
PPDRN	Public Protection and Disaster Relief Networks
PSP	Polícia de Segurança Pública
QPSK	Quaternary Phase Shift Keying
SA	Standalone
SC	Single Carrier
SC-FDE	Single-Carrier Frequency Domain Equalization
SDN	Software Defined Networking
SEF	Serviço de Estrangeiros e Fronteiras
SIRESP	Sistema Integrado de Redes de Emergência e Segurança de Portugal
TDMA	Time Division Multiple Access
TETRA	Terrestrial Trunked Radio
TMO	Trunking Mode Operation
UHF	Ultra High Frequency
URLLC	Ultra-reliable Low Latency Communications
ZF	Zero Forcing

1 Introdução

Muito se tem debatido no espaço público o tema da rede emergência nacional, denominada de Sistema Integrado de Redes de Emergência e Segurança de Portugal (SIRESP). Neste contexto, duas questões se levantam. Pode o SIRESP ser melhorado? Deve o SIRESP ser substituído por redes de telecomunicações mais recentes, como o 5G?

Podemos observar no debate público várias referências a estas questões. Assim, por exemplo, num artigo da TSF¹, afirmou o Ministro da Administração Interna o seguinte:

A rede enquanto tal funcionou. Teve constrangimentos, ou seja, momentos de pico de utilização. (...) Tem sido identificado que tem havido, por vezes, um uso que tem de ser melhorado, nomeadamente o uso por tempo muito demorado da rede, isso cria obstáculos à entrada de outros operadores.

No mesmo artigo, reporta ainda a ANEPC à Renascença o seguinte:

No período temporal em que ocorreram três incêndios de grande dimensão no distrito de Leiria, foram reportados à ANEPC constrangimentos pontuais na rede SIRESP, motivados por uma sobrecarga da rede devido a uma deficiente utilização da mesma, e não associados a qualquer problema da estrutura da rede.

Podemos ainda observar que este tema não é recente, porquanto, tem vindo a ser debatido há vários anos, como exemplifica, um artigo publicado no SAPO24², onde se fala do percurso da rede SIRESP e do comportamento do mesmo nas grandes emergências.

Indica o referido artigo para vários períodos onde foram relatadas falhas. Assim, no ano de 2013 e 2016 apontou o seguinte:

(...) as fragilidades do sistema começaram logo a ser ouvidas em 2013 num incêndio que deflagrou na Serra do Caramulo quando dois bombeiros do Carregal do Sal morreram. Já no temporal de janeiro desse ano, também em Pedrógão Grande, foram apontadas falhas ao SIRESP.(...) Um relatório do Ministério da Administração Interna (MAI) concluiu também que no incêndio de agosto de 2016, nos concelhos de Abrantes e do Sardoal, o sistema de comunicações de emergência teve um problema e a situação só foi normalizada ao fim de 17 horas.

No ano seguinte, em 2017, aponta-se como o ano onde mais falhas ocorreram, não só nos incêndios de Pedrógão Grande em Julho.

Mas as grandes falhas do SIRESP aconteceram em 2017 no incêndio de Pedrógão Grande. No verão desse ano, o SIRESP voltou a registar interrupções em fogos de Alijó, Abrantes, Mealhada, Cantanhede e no distrito de Castelo Branco. O relatório da comissão técnica independente ao incêndio de Pedrógão Grande concluiu que este sistema está “baseado em tecnologia ultrapassada” e “obsoleta”, tendo sido “notória a falha” deste sistema de comunicações e das redes móveis no fogo.

¹ TSF <https://rr.sapo.pt/noticia/pais/2022/07/31/mai-admite-que-uso-do-siresp-tem-de-ser-melhorado/294243/>

² SAPO <https://24.sapo.pt/atualidade/artigos/siresp-a-rede-de-comunicacoes-de-emergencia-marcada-por-varias-polemicas-desde-sempre>

Mas também nos incêndios de Outubro, “A 15 de outubro desse ano, a região centro volta a ser varrida pelas chamas e surgem novamente problemas no SIRESP com várias corporações de bombeiros a apontarem falhas ao sistema.”.

Nesse ano chegou a considerar-se que as referidas falhas da rede tenham contribuído para uma pior prestação do socorro. Assim:

Um outro documento elaborado pelo Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais da Universidade de Coimbra também concluiu que a falha do sistema de comunicações no incêndio de Pedrógão Grande terá contribuído para a falta de coordenação dos serviços de combate e de socorro, dificuldade de pedido de socorro e agravamento das consequências do fogo.

Já no ano de 2022, no jornal Observador³, a propósito dos fogos de Leiria foram identificados, pelo presidente da ANEPC, períodos pontuais de sobrecarga da rede SIRESP. “O presidente da Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil (ANEPC) disse (...) que o Sistema Integrado de Redes de Emergência e Segurança de Portugal (SIRESP) não tem falhas, mas admitiu períodos pontuais de excesso de utilização.”.

Como se pode verificar pelo exposto anteriormente, este tema é alvo de grande discussão e análise, uma vez que as alternativas podem ser várias.

Pretende-se, portanto, verificar se, no contexto português, pode o SIRESP ser substituído pelo 5G. Procurar-se-á abordar o preenchimento dos requisitos operacionais apresentados pela rede SIRESP às entidades, bem como, as diferenças de desempenho das duas redes.

³ Observador <https://observador.pt/2022/08/14/presidente-da-protecao-civil-diz-que-siresp-nao-tem-falhas/>

1.1 Objetivos

O objetivo geral desta dissertação é verificar se o SIRESP pode ser substituído pelo 5G.

Para tal, será analisada a norma TETRA, que dá suporte à rede SIRESP e as tecnologias que dão suporte a rede 5G.

Referenciar que nas pesquisas efetuadas não foram encontrados muitos estudos nacionais deste tema, razão pela qual se procurará analisar casos de estudo de outros países, onde esta temática tenha sido já debatida.

1.1.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos da presente dissertação são os seguintes:

- Análise das diversas redes de telecomunicações e as respetivas tecnologias que dão suporte à emergência;
- Análise da rede SIRESP e da norma TETRA;
- Identificação de requisitos das redes das forças e dos serviços de segurança;
- Análise da rede 5G identificando características e modos de funcionamento;
- Análise comparativa da resposta tecnológica de cada rede, ou seja, TETRA versus 5G;
- Estudo de desempenho das redes SIRESP e 5G, através da simulação utilizando o método de Monte Carlo.

1.2 Caracterização do problema

As comunicações críticas estão no centro do funcionamento dos serviços e forças de segurança e revestem-se de requisitos específicos que permitem uma comunicação eficaz na execução da sua missão no terreno. Estas incluem sistemas e dispositivos móveis de radiocomunicações, que devem fornecer comunicações fiáveis e seguras em todos os momentos, sendo estes requisitos, na sua génese, em tudo semelhantes às várias forças e serviços de segurança que operam no país. São exemplo disso os bombeiros, a GNR, a PSP, o Serviço de Estrangeiros e Fronteiras (SEF), Exército, entre outros.

Atualmente, a rede utilizada por todos os agentes de proteção civil, anteriormente mencionados, é a rede SIRESP. No entanto, nos últimos anos, muito se tem falado sobre a próxima rede de comunicações. Começam a surgir novas necessidades de comunicações com taxas de transmissão de dados mais altas que suportem serviços como transmissão de vídeo ao vivo, Internet das Coisas (*Internet of Things* [IoT]), entre outros.

Atualmente, os serviços das forças de segurança e socorro não podem beneficiar dessas novas tecnologias, sendo desejada uma solução mais sustentável para comunicações de emergência.

Este trabalho procurará avaliar se, aos dias de hoje, é possível dotar as forças de segurança de novas funcionalidades e capacidades, mantendo os serviços críticos que já possuem e que são impeditivos de alteração de rede, caso não sejam satisfeitos.

1.3 Justificação

O padrão 5G especificado pela *3rd Generation Partnership Project (3GPP)* possui formas de implementação das redes de segurança e socorro com diferentes implicações, quer económicas, quer de segurança.

O 5G aspira oferecer velocidade de até 10 Gbit/s, com menos de 10 ms de latência. A rede utiliza tecnologias inovadoras, tais como, *Network Function Virtualization (NFV)*, *Software Defined Networking (SDN)*, *Multi-Access Edge Computing (MEC)* e *Network Slicing (NS)*.

Espera-se que estas tecnologias facilitem a inovação e novos casos de uso em vários campos, podendo fornecer a infraestrutura subjacente para inovações futuras, como, entre outros, inteligência artificial, IoT, *big data* e realidade virtual/aumentada. Tais tecnologias inovadoras podem ser benéficas para os serviços de segurança no futuro. No entanto, podemos identificar alguns problemas de segurança no 5G, sendo de destacar a fuga ou acesso a informações confidenciais com o comprometimento da privacidade dos utilizadores, a perda de dados e a negação de serviço (*Denial of Service [DoS]*).

Esta dissertação visa analisar e comparar as redes TETRA e 5G no contexto português, analisando não só os requisitos operacionais implementados nas entidades às quais o SIRESP dá resposta e comparando, tecnicamente, a sua implementação no 5G, mas também analisando o desempenho de cada uma.

Quando se fala de comunicações críticas, fala-se de comunicações onde a falta de conectividade pode implicar a perda de vidas humanas ou a possibilidade de salvar outras. Até recentemente, as tecnologias dominantes usadas em redes para telecomunicações críticas eram aquelas que coletivamente são chamadas de *Land Mobile Radio (LMR)*. Estas redes são projetadas para comunicação de voz fiável e transmissão de quantidades limitadas de dados.

Com o rápido desenvolvimento de tecnologias que permitem a transmissão de grandes quantidades de dados, incluindo transmissão de vídeo, como *Long Term Evolution* (LTE) e 5G, as redes de banda larga para comunicações críticas começam a estar representadas.

Na prática pretende-se com esta investigação, contribuir com elementos claros e fundamentados para a discussão da temática, permitindo a que a tomada de decisões seja feita de uma forma mais clara e sustentada.

1.4 Metodologia

Esta dissertação começa por apresentar o tema através da análise das tecnologias existentes, que suportam ou podem suportar redes privadas de segurança, sendo objeto de análise a rede SIRESP (em especial a norma TETRA que a suporta) e a rede 5G. Serão ainda analisadas as redes que lhes antecederam, respetivamente o *Private Mobile Radio* (PMR) que antecedeu a TETRA e o LTE que antecedeu o 5G, por forma a enquadrar a evolução tecnológica.

Será caracterizada a rede SIRESP nos aspetos referentes á sua história, arquitetura e requisitos, bem como, a rede 5G, identificando características e modos de funcionamento que possam dar resposta aos requisitos das forças de segurança.

Esta fase será suportada numa pesquisa exploratória de artigos e documentos que permitam explanar conceitos e visões sobre o tema.

Posteriormente e através de uma análise científica e da utilização do método de Monte Carlo, procurar-se-á verificar o pressuposto inicial “*NO CONTEXTO PORTUGUÊS, PODE O 5G SER SUBSTITUTO DO TETRA?*”.

Esta parte será dividida em dois capítulos, a saber, no primeiro, apresenta-se o conceito teórico do método de Monte Carlo e, no segundo, serão apresentadas as simulações realizadas, bem como, os algoritmos e cálculos efetuados.

Por último, são apresentadas as conclusões desta Dissertação, algumas dificuldades que surgiram ao longo da elaboração da mesma e propostas para trabalhos futuros.

2 Estado da arte

As redes de telecomunicações de suporte à emergência, também designadas por *Public Protection and Disaster Relief Networks* (PPDRN)⁴, têm como objetivo implementar comunicações resilientes entre todas as forças de emergência e segurança, por forma a que estas comuniquem entre si mesmo em situações de acidente grave ou catástrofe (incêndios, cheias, sismos, entre outros).

Existem diversas tecnologias que permitem a implementação deste tipo de redes, tais como: *Digital Mobile Radio* (DMR); *Digital Private Mobile Radio* (DPMR); *Terrestrial Trunked Radio* (TETRA); *Long Term Evolution / Public Protection and Disaster Relief* (LTE/PPDR).

Esta dissertação terá como foco a análise das tecnologias TETRA e LTE/PPDR. A tecnologia TETRA é responsável pelo suporte à rede SIRESP, enquanto a LTE/PPDR demonstra o uso das redes 5G no contexto de situações de emergência.

A norma TETRA foi desenvolvida, desde o princípio, como uma norma aberta, que padronizasse a PMR dentro do Instituto Europeu de Normas de Telecomunicações (*European Telecommunications Standards Institute* [ETSI]) [5]. Este facto traria uma enorme vantagem comercial dentro da Europa, quer do ponto de vista dos construtores, quer dos governos, para a aprovação de contratos com normas *standards*, possibilitando uma economia de escala.

2.1 Private or Professional Mobile Radio

As *Private or Professional Mobile Radio* (PMR) têm desfrutado de grande sucesso na Europa há muitos anos e dão suporte a uma ampla comunidade de utilizadores. Disponível para uso de espectro licenciado e não licenciado, a aplicação das PMR vai desde os *walkie-talkies* de baixo custo, voltados para o mercado consumidor, até sistemas de segurança pública e de missão crítica.

As PMR foram desenvolvidas para utilizadores corporativos que necessitem de manter contato em distâncias relativamente curtas com uma estação de base, e através desta a interligação com uma central de despacho (exemplos: empresa de táxi, empresa de segurança). São também amplamente utilizadas pelos serviços de emergência, sendo que, nestes casos, são constituídas por uma ou mais estações base e vários terminais móveis. Estes sistemas, na

⁴ Comissão Europeia - <https://cordis.europa.eu/project/id/313015>

maioria dos casos, dão suporte a um grupo fechado de utilizadores que normalmente pertencem e são operados pela mesma organização que os seus operadores.

As PMR são sistemas de comunicações de voz e dados de baixo débito, por rádio bidirecionais, de pessoa para pessoa, que usam equipamentos como, rádio portáteis, rádio móveis, rádios de estação de base e consolas de despacho. Nesse caminho, eles diferem dos sistemas móveis celulares públicos que serão descritos no capítulo 2.6.

Desde seus primeiros projetos, os sistemas PMR desenvolveram-se em sistemas *trunked*, sendo o mais notável o TETRA. *Trunking* é uma técnica onde os recursos da rede de comunicação são partilhados, proporcionando flexibilidade e economia na alocação dos recursos da rede. Normalmente, um canal de comunicação é alocado para a duração de uma chamada e, em seguida, libertado automaticamente para permitir que seja usado para outra chamada, entre diferentes utilizadores no mesmo sistema. A técnica também permite que várias estações base estejam interligadas e forneçam cobertura numa área mais ampla do que com uma única estação de base.

Os sistemas de rádio PMR são baseados em padrões como MPT-1327, TETRA, *Project 25* (P25 ou APCO-25) e DMR, que são projetados para uso dedicado por organizações específicas, ou padrões como *Next Generation Digital Narrowband* (NXDN) destinados ao uso comercial geral. Esses sistemas são usados pela polícia, bombeiros, ambulâncias e serviços de emergência e por empresas comerciais, como táxis e serviços de entrega [11].

Os sistemas PMR geralmente fornecem facilidades para grupos fechados de utilizadores, chamada em grupo e push-to-talk, e têm tempos de configuração de chamada que geralmente são curtos em comparação com sistemas celulares. Muitos sistemas PMR permitem operação em modo direto, no qual os terminais podem comunicar-se diretamente entre si, sem utilizar uma estação de base, quando estão fora da área de cobertura de uma rede.

As formas mais simples de PMR são os sistemas "walkie-talkie", em que os equipamentos comunicam uns com os outros diretamente e não há necessidade de estações base ou uma rede de controle. Os equipamentos são independentes, mas apesar de serem sistemas baratos e fáceis de operar, não são muito flexíveis, pois precisam estar dentro do alcance um do outro, não sendo possível comunicações para outras redes. Para comunicações localizadas dentro de um edifício ou área geográfica reduzida poderá ser o suficiente.

2.2 Public Access Mobile Radio

Public Access Mobile Radio (PAMR) é um sistema de comunicação móvel, que permite acesso público a frequências de rádio designadas. Esse sistema é amplamente utilizado em várias áreas, como segurança pública, transporte, serviços públicos e outras indústrias, que requerem comunicação sem fio confiável e eficiente.

O PAMR engloba não apenas os sistemas PMR desenvolvidos para permitir o acesso público, mas também tecnologias avançadas como o TETRA, o GSM e o 5G. Essas tecnologias podem ser aplicadas para atender às necessidades de conectividade móvel em diferentes setores, oferecendo soluções robustas e abrangentes de comunicação.

Consideram-se PAMR, os sistemas PMR desenvolvidos para permitir o acesso público (por assinatura). Podendo rivalizar ou até exceder a complexidade de sistemas móveis celulares públicos, uma vez que os utilizadores podem, a título de exemplo, agrupar-se para executar sistemas em conjunto ou ter esses sistemas disponíveis para eles.

Os utilizadores dos sistemas PAMR geralmente não são os mesmos, proprietários e operadores do sistema. Tradicionalmente, os sistemas PMR são baseados em padrões europeus para o equipamento, mas operados sob licença e sujeitos a planos nacionais de licenciamento de frequência. Uma exceção é o PMR 446⁵, um *walkie-talkie* de consumo que possui seis canais analógicos alocados na maioria dos países europeus para uso sem licença.

O PAMR é projetado para fornecer cobertura de comunicação abrangente em áreas geográficas específicas. Ele utiliza infraestrutura de rede dedicada, como torres de transmissão e estações base, para garantir a qualidade e a confiabilidade das comunicações. Esses sistemas operam em frequências designadas pelas autoridades reguladoras, garantindo um uso ordenado e eficiente do espectro eletromagnético. Por outro lado, os sistemas PMR, com normas abertas e com capacidade de interoperabilidade, têm a vantagem de permitir que os utilizadores, em diferentes sistemas PMR, comuniquem uns com os outros diretamente. Uma das principais aplicações do PAMR é na área de segurança pública. Ele permite que as forças policiais, bombeiros e outros agentes de proteção civil se comuniquem de forma eficaz e instantânea em situações críticas.

Os utilizadores do sistema PAMR, como agentes de segurança, podem comunicar-se dentro de uma determinada área geográfica, coordenar as suas ações e receber atualizações em tempo real, aumentando assim a eficiência das operações de segurança. Embora esta interoperabilidade possa ser organizada por encaminhamento de chamadas do sistema PMR

⁵ PMR446 - <https://www.pmr446.org/>

chamador, através de uma rede fixa para o sistema chamado, não deixa de adicionar atrasos e significa a não existência de operação em modo direto, onde os equipamentos comunicam diretamente, sem usar estações base. Esses requisitos de interoperabilidade, assim como a vantagem de escala mostrada pela norma do rádio celular *Global System for Mobile Communications* (GSM), tem feito com que as organizações privadas ou públicas adotem padrões abertos no campo PMR.

Surge desta forma uma questão importante aos potenciais utilizadores do PMR: **“qual a opção que irá fornecer-lhes o serviço mais eficiente: implementação do serviço de PMR por conta própria, uso de um PAMR fornecedor, ou utilização de um provedor de serviço celular”**.

Tradicionalmente, os utilizadores têm sido levados a utilizar sistemas PMR por motivos de garantia de cobertura adequada, para reduzir custos ou para prestar serviços complementares.

Com o desenvolvimento das redes rádio celulares públicas, a situação está a mudar, em particular, no que respeita à cobertura dos sistemas, que têm melhorado, até ao ponto em que podem igualar ou, para muitos utilizadores, até ultrapassarem a cobertura fornecida pelo utilizador PMR. No que respeita ao custo da operação, as redes celulares públicas têm vindo a diminuir o seu custo, sendo que os sistemas PMR são baratos para um grande número de utilizadores ou para operações em áreas limitadas. No passado, os aparelhos PMR operavam num número limitado gama de frequências, com seleção manual de frequência e com chamada muito simples, o que os tornava muito menos complexos do que os equipamentos celulares. Esta vantagem foi sendo perdida à medida que os aparelhos PMR se tornam mais complexos com a mudança para o digital e a necessidade de aumentar a flexibilidade, capacidade e segurança.

Na área dos serviços, o celular público ainda não se tornou um sério concorrente ao PMR, pois os seus utilizadores ainda operam com requisitos simples de voz e transmissão de dados, havendo, no entanto, já discussões públicas sobre a implementação de serviços que não são comportáveis no PMR.

2.3 Digital Mobile Radio

Digital Mobile Radio (DMR) é um padrão europeu, produzido pela ETSI, definindo um substituto digital direto para PMR analógico. Os mercados PMR/DMR podem ser divididos em três grandes categorias, tendo o DMR capacidade de atender a todos eles:

- Público e industrial de curto alcance;
- Aplicativos profissionais/críticos para os negócios;
- Aplicações de Segurança Pública / Missão Crítica.

O DMR é um sistema escalável que pode ser usado no modo não licenciado (na banda de 446,1 a 446,2 MHz) e no modo licenciado, sujeito ao licenciamento de frequência nacional, e desenvolvido em três níveis:

- O nível 1 é o digital PMR446 de baixo custo e isento de licença;
- O nível 2 é para o mercado profissional que oferece modo ponto a ponto e modo repetidor (licenciado);
- O nível 3 é para operação *trunked* (licenciada).

Sendo digital, esta tecnologia promete alcances maiores, taxas de dados mais altas, uso mais eficiente do espectro e bateria mais eficientes. Significativamente, o DMR foi projetado para se adequar às bandas PMR licenciadas existentes, o que significa que não há necessidade de alteração de bandas ou de licenciamento, auxiliando assim na transição do analógico para o digital [11]. Este novo padrão não impõe mudanças fundamentais na arquitetura de sistemas convencionais ou *trunked*, sendo que o foco está na mudança do protocolo *over-the-air* que facilitará o uso de aplicativos que estão além da capacidade dos esquemas analógicos.

Os recursos suportados incluem configuração rápida de chamadas, chamadas para grupos e indivíduos, dados curtos e chamadas de dados por pacote. Os modos de comunicação incluem chamadas individuais, chamadas de grupo, chamadas de transmissão e, claro, um modo de comunicação direta entre os móveis. Existem, contudo, outras funções importantes suportadas, como chamadas de emergência, chamadas prioritárias, comunicações *full duplex*, mensagens curtas de dados e transmissões de dados por pacote *Internet Protocol* (IP).

2.4 Terrestrial Trunked Radio

TETRA, *Terrestrial Trunked Radio*, é um sistema PMR/PAMR desenvolvido pela ETSI para responder aos requisitos de serviços comerciais e de serviços de emergência, possibilitando comunicações entre redes transfronteiriças na Europa. As especificações da tecnologia TETRA, dentro da ETSI, definem o sistema de rádio móvel digital para comunicação de voz e dados na banda de *Ultra High Frequency* (UHF). A principal função do sistema é fornecer serviço de Rádio Móvel Profissional Privado (PMR). Outro dos seus objetivos é ser um sistema altamente estável, confiável e disponível para uso de diferentes tipos de utilizadores que necessitem de ter um sistema de comunicação que forneça transmissão instantânea, de alta fiabilidade e disponibilidade com um conjunto adicional de serviços que são ajustáveis a necessidade, dos utilizadores[1]. O funcionamento desta rede pode ser encontrado na maioria dos países europeus (Alemanha, Áustria, Bélgica, Croácia, Finlândia, Grécia, Holanda, Hungria, Irlanda, Luxemburgo, Noruega, Portugal, Roménia, Suécia e Reino Unido, entre outros) [2].

O modelo *Open System Interconnection* (OSI), foi um modelo desenhado para facilitar a comunicação entre camadas, concebido principalmente para facilitar as comunicações globais entre os computadores, independentemente das características das redes específicas de que fazem parte. É uma representação abstrata que não especifica a implementação de nenhum sistema, mas a forma como eles comunicam. Na Tabela 1, apresenta-se uma ilustração do modelo que não especifica como os sistemas são implementados, mas sim, como eles se comunicam. Isso significa que muitas redes diferentes, usando produtos de diferentes fabricantes, podem ser interligados entre si através do modelo OSI.

Tabela 1 – Arquitetura do modelo OSI e sua correspondência na norma TETRA
 Fonte: elaboração própria

		Principais funções de cada camada	Serviços na norma Tetra
7	Aplicação	Fornecer serviços às aplicações do utilizador (ex: HTTP, FTP, DNS, ...).	Transferência de ficheiros, mail, serviço de voz, ...
6	Apresentação	Encriptação e compressão de dados e assegura a compatibilidade entre camadas de aplicação de sistemas diferentes (ex: XML, PHP, GIF, JPG, ...).	Criptografia, compressão de dados, compatibilidade, formatos, ...
5	Sessão	Controla (estabelece, faz a gestão e termina), as sessões entre aplicações (RCP, SSH, SCP, ...).	Interface dos utilizadores com a rede, estabelece conexão entre estações, mapeia nomes das estações com endereços de rede, ...
4	Transporte	Controlo de fluxo de informação, segmentação e controlo de erros (TCP, UDP, ...)	Troca de informações de estação para estação, ex: <i>acknowledgements</i> , níveis de serviço, ...
3	Rede	Encaminhamento (<i>routing</i>) de pacotes e esquema de endereçamento lógico (IP, IPX, ICMP, ...).	Endereçamento, mobilidade, roteamento, controlo de chamadas, controlo de congestionamento.
2	Ligação de dados	Controla o acesso ao meio físico de transmissão. Controlo de erros da camada física (<i>Ethernet</i> , FDDI, <i>Frame relay</i> , ...).	Meio de acesso, sincronização, controlo de erros.
1	Física	Define as características do meio físico de transmissão da rede, conectores, interfaces, codificação ou modulação de sinais.	Meio de transmissão (rádio), débito binário, níveis de voltagem, métodos de modelação, <i>encoding/decoding</i> do sinal.

A definição do sistema TETRA está essencialmente confinada entre as camadas 1 e 3 do modelo OSI e os principais parâmetros são apresentados na Tabela 2.

O sistema TETRA foi projetado para permitir a migração de sistemas PMR analógicos e, portanto, os parâmetros de rádio foram adotados com isso em mente, sendo por isso diferentes dos parâmetros de rádio adotados para sistemas públicos como o GSM. Por esse facto, a operação do sistema TETRA destina-se às bandas VHF e UHF das PMR existentes. O espaçamento entre as portadoras TETRA é de 25 kHz, o que permite a substituição direta de dois canais FM analógicos de 12,5 kHz ou um único canal FM analógico de 25 kHz [3]. Os principais parâmetros de interface aérea adotados para TETRA são mostrados na Tabela 2 e são

indicativos de que a tecnologia específica adotada para o sistema TETRA foi impulsionada pelas necessidades dos grupos de utilizadores de PMR.

Tabela 2 - Principais parâmetros do TETRA
Fonte: elaboração própria

Espaçamento de canal	25 kHz
Modulação	$\pi/4$ DQPSK
Débito da modulação	36kbps
Bits por símbolo	2
Débito do codificador de voz	ACELP (4.56 kbps net)
Formato de acesso	TDMA com 4 <i>time slots</i> por portadora (TDD/FDD)
Débito binário do utilizador	7.2 kbps por <i>time slot</i>
Débito binário máximo	28.8 kbps
Débito binário protegido	Até 19.2.kbps
MS controlo de potência	Em espaços de 5dB de 15 dBm até 45 dBm

Em particular, o TETRA fornece recursos, como configuração rápida de chamadas e ampla gama de configuração de serviços, arquitetura escalável que permite uma ampla gama de configurações de sistema e um alto nível de controle do utilizador sobre a gestão de recursos. A rede TETRA foi desenhada para operar entre os 150 MHz e os 900 MHz, em que a cada célula é alocada uma ou mais pares de portadoras (ligação ascendente e ligação descendente) [1].

2.4.1 Largura de banda e métodos de acesso

A tecnologia TETRA, é um sistema de transmissão digital que utiliza dois métodos de acesso, *Frequency Division Multiple Access* (FDMA) e *Time Division Multiple Access* (TDMA). A interface aérea deste sistema é dividida em portadoras com frequências distintas (FDMA). O *European Radiocommunications Committee* (ERC) alocou as seguintes bandas de frequência para sistemas TETRA:

- Ligação ascendente faixa de frequências de [380-385] MHz e para a ligação descendente a faixa de frequências de [390-395] MHz, para entidades de emergência;

- Ligação ascendente faixa de frequências de [385-390] MHz e para a ligação descendente a faixa de frequências de [395-400] MHz, para entidades publicas;
- Ligação ascendente faixa de frequências de [410-420] MHz e para a ligação descendente a faixa de frequências de [420-430] MHz, para uso civil.

Conforme declarado, a maioria dos sistemas TETRA na Europa opera na faixa de 380 - 400 MHz e bandas de frequências de 410 - 430 MHz. Além dessas bandas, dependendo da política de gestão de espectro de cada país, 450 MHz - 460 MHz emparelhado com 460 MHz - 470 MHz e 870 MHz - 876 MHz emparelhado com 915 MHz - 921 MHz também são designados para uso civil. No caso de Portugal, a Autoridade Nacional de Comunicações (ANACOM), com a capacidade para atribuir faixas de frequências adicionais às estipuladas, principalmente para uso civil, tais como para ligações ascendentes [450-460] MHz / [870-876] MHz e para ligações descendentes [460-470] MHz / [915-921] MHz respetivamente. São suportados vários requisitos acerca da frequência da portadora. Por exemplo, é possível utilizar diferentes valores de offset, em que cada um destes valores é um múltiplo de 6.25 KHz (-6.25 kHz; 0; 6.25 KHz; 12.5 kHz) [3].

$$\text{Frequência da portadora} - \text{Downlink} = f \text{ nominal} + (N * 25\text{kHz}) + \text{offset} \text{ kHz [1]} \quad (1)$$

Para calcular a frequência de operação das estações base, caso seja necessário, deve-se utilizar a expressão na qual f nominal corresponde a 300 MHz. A *European Conference of Postal and Telecommunications Administrations* (CEPT) definiu que, para a banda de frequências entre [380-400] MHz, o offset será 12.5 kHz e, desta forma, o limite inferior do primeiro canal coincide com o limite inferior desta banda de frequências.

Através do algoritmo *Coded Excited Linear Predictive* (CELP) é garantido a elevada qualidade nas comunicações feitas por voz, e um sistema robusto contra o ruído causado pelo ambiente circundante do utilizador [1].

Cada uma destas portadoras é dividida em quatro *time-slots* (TDMA). Cada *time-slot* é um canal de comunicação, permitindo este fator que, por cada portadora, possa suportar até quatro comunicações distintas a ocorrer no mesmo instante. Cada portadora tem uma largura de banda de 25 kHz, combinando este facto com o facto de haver 4 canais por portadora, resulta em 32 canais de comunicação (com largura de banda total igual a 200 kHz). Se esta tecnologia apenas fosse construída com base em FDMA, apenas existiriam 8 canais disponíveis numa largura de banda com 200 kHz. Como consequência da unificação dos dois métodos de acesso

- Classificação da zona ao redor do recetor;
- Características dos equipamentos.

2.4.2 Modos de Operação

Nas PPDRN é necessário que o sistema utilizado se possa adaptar facilmente e rapidamente às necessidades dos utilizadores. Para responder a esta necessidade, o TETRA possui mecanismos e opções de utilização que mantêm a disponibilidade do sistema, permitindo uma maior flexibilidade nas comunicações, mesmo durante situações de crise, tais como, o *Direct Mode Operation (DMO)*, *Local Site Trunking (LST)*, e o *Trunking Mode Operation (TMO)* [2].

O modo **DMO** permite estabelecer comunicações diretas entre dois terminais móveis que estejam no alcance um do outro, sem que haja a necessidade de recorrer a uma estação de base. A sua utilização pode ser efetuada em vários cenários, como por exemplo, quando a estação de base se encontra inoperacional ou com a capacidade total esgotada ou em espaços confinados, onde não seja possível chegar a uma estação de base. Neste modo, só é possível realizar comunicações no modo simplex.

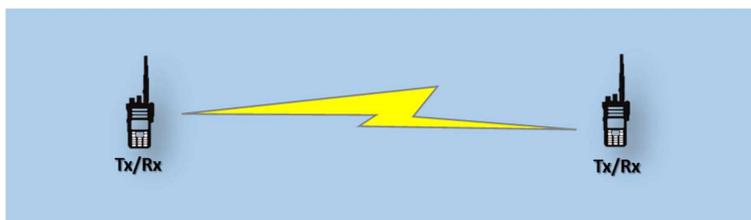


Figura 2 - Modo DMO
Fonte: elaboração própria

Existem ainda outros dois modos diferentes de operação, estes modos são estabelecidos através do DMO. Quando uma estação de base perde a conexão com o comutador diz-se que está em **LST**, pelo que, neste modo os terminais móveis que estavam registados na mesma antes de esta perder a ligação ao comutador, continuam a comunicar entre si, não permitindo comunicações fora do alcance da estação de base.

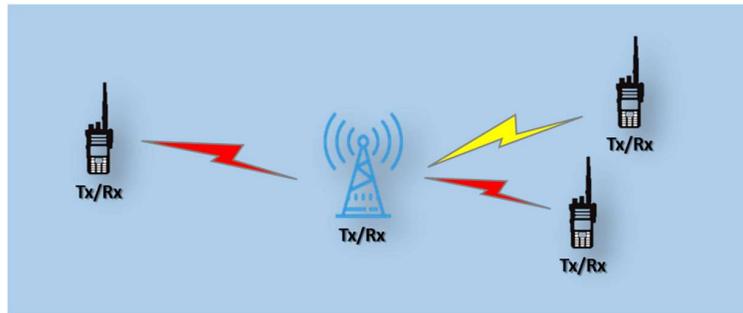


Figura 3 - Modo LST
 Fonte: elaboração própria

No modo TMO, os terminais usam a rede para se comunicarem entre si, possibilitando a realização de chamadas entre terminais que não estão conectados à mesma estação de base. Esse modo oferece uma cobertura abrangente, permitindo um alcance significativo.

Por forma a estender as comunicações em zonas de sombra, existe ainda a possibilidade de se trabalhar em modo *Repeater* e *Gateway*.

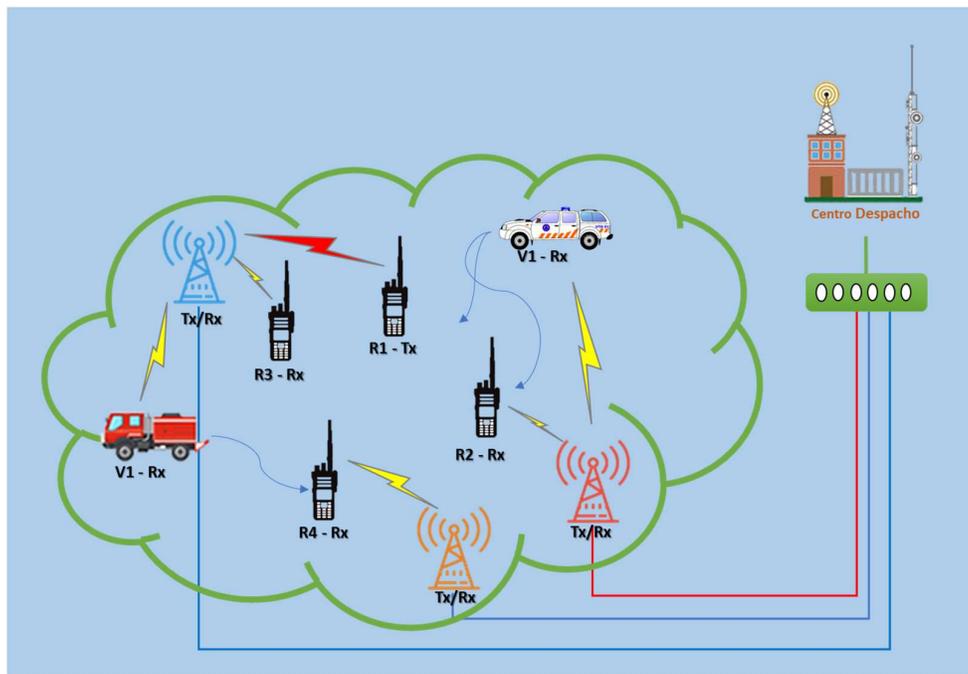


Figura 4 - Modo TMO
 Fonte: elaboração própria

O modo **Repeater** é empregue quando dois terminais moveis estão a uma distância que não permita realizar comunicações em DMO e, desta forma, é possível configurar outro equipamento para servir como repetidor, permitindo assim que haja uma ligação entre os dois terminais moveis.

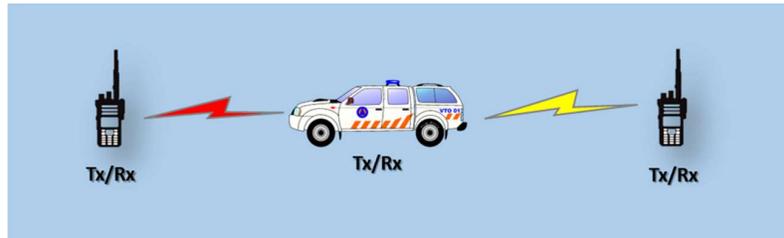


Figura 5 – Modo DMO
Fonte: elaboração própria

No modo **Gateway**, uma estação móvel pode ser configurada como um *gateway*, permitindo que os utilizadores que estão fora do alcance da estação de base se conectem a ela e por inerência á rede. Este modo pode ser empregue em zonas onde não exista cobertura de sinal⁶, devido, por exemplo, a orografia do terreno, a colocação de um equipamento com a função de *gateway* no limite da área de cobertura da estação de base e poderá ser suficiente para conectar os utilizadores que estão fora do alcance da estação de base à rede e, consecutivamente, ao centro de controlo e gestão.

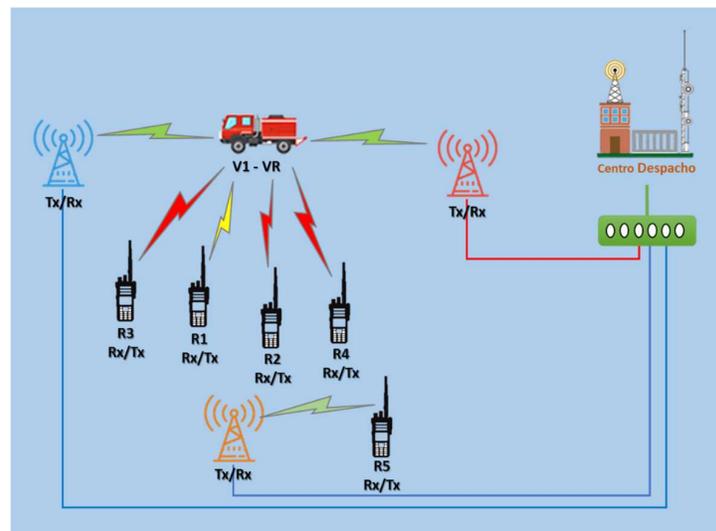


Figura 6 - Modo Gateway.
Fonte: elaboração própria

⁶ Estas zonas são muitas das vezes denominadas de zonas sombra.

2.4.3 Serviços

O sistema TETRA incorpora serviços similares aos que são usados, em geral, pelas tecnologias de comunicações móveis.

Quanto aos serviços de segurança é possível desativar remotamente qualquer terminal que esteja ligado a rede, evitando assim interferência nas comunicações em casos de terminais desaparecidos ou furtados. À semelhança das tecnologias apresentadas anteriormente, os serviços podem ser separados em duas componentes fundamentais, serviços de voz e serviços de dados [1], [3].

Os serviços de voz são praticamente similares aos serviços oferecidos pelas outras tecnologias, tais como:

- Centros de controlo sobre as comunicações;
- Realizar comunicações para múltiplos terminais ao mesmo tempo;
- Chamadas individuais;
- Chamada de emergência;
- Comunicações em grupo, mesmo que realizadas em sistemas externos (aplica-se a todos os serviços mencionados).

Os serviços de dados permitem realizar transferência de informações (com tamanho reduzido), admitindo a permuta de qualquer informação digital. Dependendo do nível de encriptação pode-se atingir valores de débito binário, na ordem dos 9.6 kbit/s [1].

2.5 SIRESP

A rede SIRESP tem a sua génese a Resolução de Conselho de Ministros n.º 88/99, de 22 de julho, que apresentou pela primeira vez o conceito de rede única e partilhada.

Nos anos subseqüentes foi nomeado um grupo de trabalho que, seguindo a Resolução de Conselho de Ministros e inspirando-se em outros projetos europeus, como, Astrid (Bélgica), C2000 (Holanda) e Virve (Finlândia), elaborou um relatório com as várias propostas para que a Tutela pudesse decidir sobre que sistema implementar [4].

Em 2003 é lançado um concurso público, que recebeu somente uma proposta e cujo procedimento culmina, a 4 de julho de 2006, com a assinatura de um contrato entre o Ministério da Administração Interna e a Operadora SIRESP, onde está especificado a conceção, projeto, fornecimento, montagem, construção, gestão e manutenção da Rede de Emergência e Segurança de Portugal. De referir que o caderno de encargos do referido concurso impunha uma arquitetura que garantisse redundância, nomeadamente entre comutadores e estações base,

especificando de igual forma requisitos, tais como, cobertura, capacidade de tráfego, qualidade de serviço e disponibilidade.

No que respeita a tecnologia, várias normas foram apontadas (APCO, EDACS, MPT1327, TETRA e TETRAPOL) tendo recaído a escolha sobre a norma TETRA, pois era a única suportada pela ETSI para o setor das radio comunicações e também a única que respondia aos requisitos Schengen e, ainda, tinha a capacidade de permitir a interoperabilidade entre equipamentos de fabricantes diferentes. Estes factos levaram a que a mesma já estivesse definida na Resolução de Conselho de Ministros (RCM) [4].

Aos dias de hoje a rede é constituída por cerca de 550 estações base, 1166 portadoras, 6 comutadores de tráfego (4 no continente e 2 nas regiões autónomas), 53 salas de despacho e 9 estações móveis, que têm por missão a, reposição de comunicações onde as estações base falhem, o aumento de cobertura e o aumento da capacidade de tráfego e cerca de 53500 terminais móveis (portáteis ou de instalação em viaturas) [5], [6].

2.5.1 Cobertura

A cobertura radioelétrica de uma rede rádio depende, essencialmente, da relação entre potências dos sinais recebidos e emitidos, do ganho das antenas emisoras e recetoras, isto é, o tipo e altura de antenas utilizadas, da frequência de serviço, bem como de outros aspetos como a orientação da antena, a orografia do terreno, a densidade de construção existente, os mecanismos de difração e reflexão e o ruído eletromagnético.

O contrato indica um nível mínimo de sinal radioelétrico (-103 dBm) que é igual à sensibilidade dinâmica dos terminais móveis especificada na norma TETRA, sendo que este valor não garante necessariamente a cobertura em zonas interiores de mato e floresta. Este facto levou o Instituto das Telecomunicações, na avaliação que fez da cobertura nos incêndios de Pedrogão em 2017, a considerar uma margem adicional de cerca de 10-20 dB na verificação da cobertura (nível mínimo de -93 a -83 dBm) [2]. O estudo aponta ainda o facto de o contrato ser omissivo no que respeita à análise de cobertura adicional devido a presença do fogo [8]. Referenciam mesmo a existência de estudos que demonstram que existe atenuação adicional por interposição de uma cortina de fogo (plasma) que pode provocar uma atenuação adicional de 10 a 20 dB.

Existem vários modelos de propagação que podem ser utilizados para análise de cobertura, dos quais se destaca dois: *Okumura-Hata* para distâncias superiores a 5 km (ambientes urbanos e suburbanos) [4], e *Irregular Terrain (Longley-Rice)*, modelo utilizado

pelo Instituto de Telecomunicações na simulação da cobertura rádio da rede SIRESP na zona de Pedrogão Grande, uma vez que apresentava os melhores resultados face á orografia da região [2].

A título de exemplo, a Figura 7 apresenta os resultados da previsão de cobertura da estação de base TETRA do Cabeço do Pião.

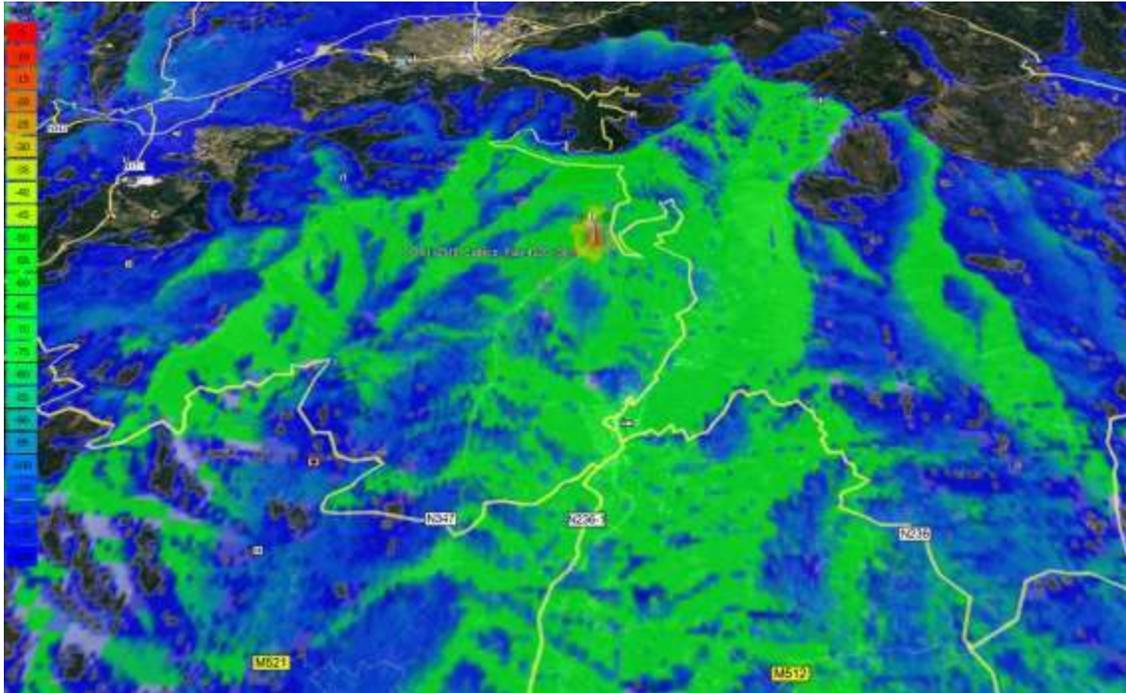


Figura 7 - Simulação de cobertura da estação de base do Cabeço do Pião [2]

2.6 Evolução dos sistemas celulares

Os primeiros sistemas móveis surgiram há algumas décadas, tendo a primeira geração (1G) sido implementada entre 1980 e 1992, e era baseada em tecnologias analógicas que tinham como principal objetivo o fornecimento de voz, sendo sistemas de baixa fiabilidade, baixa capacidade, baixo desempenho e sem capacidade de roaming entre redes e países [7]. Nessa época, muitas empresas em muitos países desenvolveram os seus próprios sistemas, não só para operação comercial, mas também para Redes de Segurança Pública. Desde então, a tecnologia evoluiu muito e cada década testemunhou o surgimento de uma nova geração de sistemas de comunicações móveis, juntamente com sua consolidação e padronização (na 1ª Geração existiam vários sistemas, a 4ª e 5ª Gerações já possuem apenas um).

A segunda geração de redes celulares, como a rede GSM, que foi amplamente utilizado entre 1992 e 2003, já se baseava em tecnologias digitais, permitindo conexões de voz e dados de baixo débito, com maior fiabilidade, maior capacidade, e já com capacidade de *roaming*

entre operadoras devido ao seu alto nível de padronização e avanço tecnológico. A rede GSM utilizava como técnica de acesso múltiplo a divisão do tempo (TDMA⁷). Surgiu por esta altura o sistema CDMA⁸ de banda estreita, adotado na década de 90 pelo padrão IS-95 que era de igual forma um sistema 2G [7].

Surge em 1999 o UMTS, a terceira geração (3G), padronizada pelo 3GPP⁹, utilizando CDMA de banda larga (WCDMA). Esta geração sofreu diferentes evoluções, sendo a sua versão inicial, a versão 99, a que permitiu alcançar maior eficiência espectral em relação à rede GSM e aumentar a capacidade da célula, tendo as taxas de transmissão sido melhoradas nas versões subsequentes.

A crescente exigência de maiores velocidades de transmissão fez com que fosse implementado o LTE, e na Tabela 3 apresentam-se várias versões do 3GPP.

Tabela 3 - Comparação entre as versões do 3GPP [7]

Comparison between Several Different 3GPP Releases					
FDD	WCDMA	HSPA	HSPA+	LTE	
TDD	TD-SCDMA^a	TD-HSDPA	TD-HSUPA	TD-LTE	LTE/IMT Advanced
Deployment	2003	2006/8	2008/9	2010	2014
3GPP Release	99	5/6	7	8/9	10/11/12
Downlink Data Rate	384 kbps	14.4 Mbps ^b	28 Mbps ^b	>160 Mbps ^c	1 Gbps nomadic; 100 Mbps mobile
Uplink Data Rate	128 kbps	5.76 Mbps ^b	11 Mbps ^b	>60 Mbps ^c	500 Mbps nomadic; 50 Mbps mobile
Switching	Circuit + packet switching	Circuit + packet switching	Circuit + packet switching	IP based (packet switching)	IP based (packet switching)
Transmission Technique	WCDMA/ TD-SCDMA	WCDMA/ TD-SCDMA	WCDMA/ TD-SCDMA	Downlink: OFDMA Uplink: SC-FDMA	Downlink: OFDMA Uplink: SC-FDMA
MIMO	No	No	Yes	Yes	Yes
Multihop Relay	No	No	No	No	Yes
Adaptive Modulation and Coding	No	Yes	Yes	Yes	Yes
Cooperative Systems	No	No	No	No	Yes
Carrier Aggregation	No	No	No	No	Yes

^a Synchronous CDMA.

^b Peak data rates.

^c Assuming 20 MHz bandwidth and 2 × 2 MIMO.

⁷ Time Division Multiple Access – os sinais gerados por diferentes utilizadores são transmitidos em diferentes intervalos de tempo.

⁸ Code Division Multiple Access - baseia-se no espalhamento da transmissão, cada uma associada a um utilizador diferente, que possui uma sequência de espalhamento diferente [9].

⁹ 3rd Generation Partnership Project - associação que reúne uma série de órgãos normativos de telecomunicações, formado por um conjunto das associações de telecomunicações os E.U.A., Europa, Japão, Coreia do Sul e China.

Mas esta evolução nos sistemas comerciais não teve paralelo nas Redes de Segurança Pública, embora a evolução para os sistemas 2G tenha sido feita praticamente em paralelo, juntamente com esforços de padronização, alguns deles baseados em redes comerciais (por exemplo, GSM-R para transporte ferroviário de comunicações e TETRA para Redes de Segurança Pública, baseadas em GSM), não tendo sido desenvolvidos mais sistemas de Segurança Pública de geração mais avançada que o 2G.

Como consequência, os avanços tecnológicos dos sistemas celulares comerciais não possuem similitude nas Redes de Segurança Pública que usam sistemas de segunda geração, o que leva a que, numa análise meramente observativa, se verifiquem situações embaraçosas, como por exemplo, os utilizadores desses sistemas precisarem de usar um telefone celular numa rede comercial para enviar dados, pelo facto da rede não possuir capacidade em situações de emergência ou poderem não ter uma cobertura adequada em determinados locais e carecerem de coberturas adicionais de recursos de segurança, entre outros problemas; esta é uma consequência direta do avanço das redes celulares em relação às PMR, no que respeita à transmissão de grandes volumes de dados.

Com o surgimento do 5G, será expectável a transição entre os antigos sistemas 2G e os novos 5G, possibilitando a todos os utilizadores das Redes Segurança Pública experimentarem, neste tipo de redes, as funcionalidades a que estão habituadas nos seus equipamentos celulares.

2.7 5G

A quinta geração de comunicações celulares, 5G, é uma evolução da rede 4G existente aos dias de hoje e, como veremos mais a frente, trata-se de uma evolução disruptiva, pois foi projetada para permitir a transmissão de grande volume de dados, dando resposta as necessidades crescentes de comunicações, quer seja na transmissão de vídeo com mais alta qualidade ou transmissão de dados de IoT, permitindo ainda comunicações sem estações de base, entre outras potencialidades. Ela permitirá, numa primeira fase, ser operada juntamente com a 4G LTE, podendo evoluir-se para ser totalmente independente.

Na Figura 8, está representada a evolução temporal da padronização 5G, realizada pelo *3rd Generation Partnership Project* 3GPP [9]. O primeiro item de estudo do 5G apareceu no 3GPP, versão 14, que ainda se preocupava com o desenvolvimento do 4G-LTE. No entanto, o processo de padronização do 5G só começou a partir da versão 15 do 3GPP.

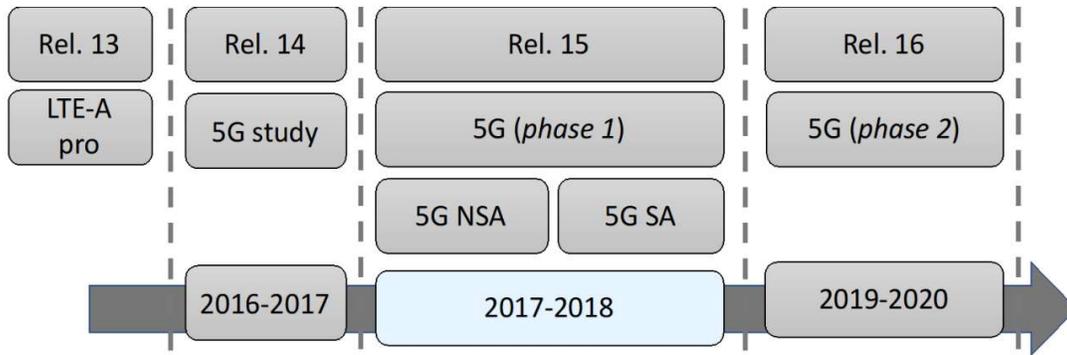


Figura 8 – Algumas Versões do 3GPP [8]

Para acelerar este processo, o 3GPP definiu duas fases distintas. Na primeira fase, o foco foi a melhoria dos serviços celulares sem fios de banda larga (ou seja, o caso de uso eMBB [Enhanced Mobile Broadband]), para que tenham dois modos distintos: o modo *Non-Standalone* (NSA), onde o núcleo ainda é 4G, e o modo *Standalone* (SA), onde o núcleo é 5G. Ambos os modos foram padronizados durante o ano de 2018. A segunda fase, também, conhecida como 3GPP versão 16, terminou em 2020 e preocupa-se com os outros casos de uso do 5G, ou seja, os casos de uso mMTC (*Massive Machine-Type Communications*) e URLLC (*Ultra-reliable Low Latency Communications*) [9].

As versões 15 e 16 também lançaram as bases para serviços avançados de comunicações críticas, como IoT massiva, IoT crítica e MCx¹⁰ sobre NR. Além das versões anteriores, realça-se a versão 17¹¹ (lançada em 2022) que fornece MCx numa rede 5G SA para serviços unicast e na versão 18 para serviços multicast/broadcast.

O 5G (3GPP versões 15-18) contém uma panóplia de novos recursos funcionais que podem ser considerados relevantes para o utilizador de comunicações críticas, destacando-se os seguintes:

- Serviços multicast e broadcast 5G (5MBS): permitem o uso mais eficiente e eficaz do espectro radio elétrico para comunicações baseadas em grupo, consistindo em serviços de voz, dados e vídeo de missão crítica e suporte para altas concentrações de utilizadores que estejam a operar em grandes grupos dentro de uma área de incidente.
- Comunicações dispositivo a dispositivo usando o Sidelink: permitem a capacidade de serviços de proximidade (5G ProSe) e serviços de veículo para X

¹⁰ MCx - padrão definido pelo 3GPP, onde x representa vários serviços de missão crítica (mc), como PTT push to talk., dados, vídeo e outros serviços [12]

¹¹ 3GPP versão 17 - <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-17>

(V2X), abordando casos de uso de comunicação de curto alcance dispositivo a dispositivo (D2D) em ambientes com capacidade limitada ou cobertura de rede inexistente.

- Network Slicing: fornece a capacidade de dividir uma única rede física em múltiplas redes virtuais "privadas" com características de serviço de rede amplamente diferentes efetuando, para esse efeito, reservas de recursos de rede.
- Segurança de rede aperfeiçoada: mecanismos adicionais para proteger a integridade, confidencialidade e disponibilidade dos serviços de rede e dados dos utilizadores, designadamente por 5G estar tipicamente associado ao IPv6, o qual faz uso do protocolo IPSec (IP Security).
- *Isolated operation for public safety* (IOPS): originalmente introduzido no 3GPP versão 13, o IOPS sobre sistemas 5G foi definido na versão 17.
- Gestão avançada de congestionamento: melhorias para oferecer suporte à diferenciação de utilizadores e serviços de missão crítica durante horários de pico de congestionamento.
- *5G non-terrestrial networks* (NTN): soluções de expansão de cobertura para locais sem cobertura terrestre e envolvendo o uso de satélites e redes, ou segmentos de redes, utilizando um veículo aéreo ou espacial para transmissão, como plataformas de alta altitude e sistemas aéreos não tripulados.

Uma das grandes inovações do 5G em relação ao 4G LTE foi a redução da latência entre dispositivos, sendo outros aspetos importantes o facto de permitir conexões mais rápidas e de maior capacidade.

Das várias áreas onde o 5G inovou, podemos destacar três:

- Comunicações *Machine-to-Machine* (M2M¹²) (IoT) – permitirá ligar biliões de dispositivos uns aos outros, podendo estes realizar transmissões massivas de dados, desta forma poder-se-á alterar sectores como a indústria, agricultura, segurança, entre outros. De referir que esta comunicações M2M pode ser feita através de uma estação de base ou sem esta (terminal-a-terminal), diferenciando-se assim de todas as gerações de comunicações celulares anteriores.

¹² Machine-to-Machine - refere-se a tecnologias que permitem tanto sistemas com fio quanto sem fio comunicarem-se com outros dispositivos que possuam a mesma capacidade.

- Baixa Latência – comunicações mais fiáveis e em tempo real que permitirão controlo de dispositivos remotamente, como, condução autónoma, na medicina com intervenções á distância, entre outras.
- Alta Largura de Banda - conexões mais rápidas e de maior capacidade que permitirão aos provedores de serviços ligação a residências sem a limitação do cabo, transmissão de eventos em direto sem necessidade de infraestruturas adicionais de comunicação, entre outras.

2.7.1 Funcionamento

Existem dois componentes principais numa rede móvel:

- Rede de acesso por rádio - consiste em vários tipos de instalações, estações base (células e torres) e sistemas instalados em residências e prédios dedicados a conectar utilizadores móveis e dispositivos sem fio à rede principal:
 - Células – mais pequenas com frequências de ondas milimétricas (mmWave) mais elevadas (menor alcance); estas células são agrupadas em *clusters* por forma a fornecerem uma ligação contínua, o que complementa a rede de células macro que fornece uma área de cobertura mais ampla;
 - Células Macro 5G – usam antenas MIMO (entradas múltiplas, saídas múltiplas) que possuem vários elementos ou conexões para enviar e receber mais dados simultaneamente, podendo mais utilizadores conectarem-se simultaneamente à rede com altos débitos binários.
- Core da rede - é a rede móvel e a rede de dados que faz a gestão de todas as conexões móveis de voz, dados e internet:
 - Recursos avançados - virtualização de funções de rede, divisão de rede para diferentes aplicativos e serviços, que são geridos no núcleo;
 - Segmentação da rede – segmentar para áreas de sectores ou negócios (ex: saúde, emergência);
 - *Network Function Virtualization* (NFV) – criação de funções de rede em tempo real (ex: firewall, criptografia); crucial para permitir a eficiência e velocidade, por forma a suportar novos aplicativos de negócios.

As redes 5G foram projetadas para trabalhar em simultâneo com as redes 4G, através de uma variedade de células macro, células pequenas e sistemas dedicados de construção.

Células pequenas são miniestações de base projetadas para uma cobertura muito localizada, tipicamente de 10 a algumas centenas de metros, fornecendo preenchimento para uma rede macro maior. Células pequenas são essenciais para as redes 5G, pois as frequências *mmWave* têm um alcance de conexão muito curto.

Ao contrário das gerações anteriores, o 5G será muito mais do que apenas comunicações celulares e terão diferentes casos de uso para fornecer diferentes serviços. De facto, uma das características mais interessantes em relação ao design do 5G é sua flexibilidade, que é trazida, pelo chamado, fatiamento de rede “*Network Sliding*”, efetuando reserva de recursos para cada caso de uso, possibilitando diversos serviços que vão muito além do que era oferecido pelos seus antecessores.

As comunicações 5G oferecem recursos avançados para os serviços ao longo de três eixos, conforme Figura 9:

- eMBB (Enhanced Mobile Broadband), ou seja, taxas de dados aumentadas que podem chegar a 10 Gbps (Giga bit por segundo), comunicações massivas do tipo máquina;
- URLLC (Ultra-High Reliability Low Latency), ou seja, latência reduzida para 1 ms e disponibilidade aumentada até 99,999%, que permitirá fornecer aplicações como realidade virtual, veículos autónomos ou cirurgias remotas;
- mMTC (Massive Machine-Type Communications), ou seja, maior conectividade capacidade até 1 000 000 dispositivos/km², com aplicações em cidades inteligentes ou logística inteligente, que são aspetos-chave da Indústria 4.0.

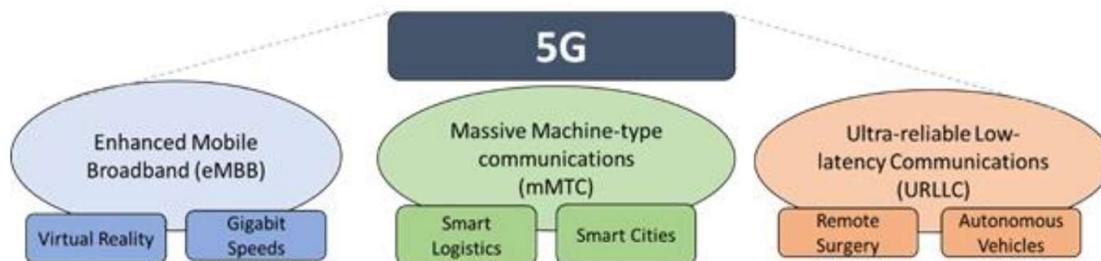


Figura 9 - Casos de uso [7]

2.7.2 Capacidade

Maior capacidade significa mais utilizadores e mais velocidade, para tal as redes 5G aumentaram o espectro. A capacidade é definida com o número de utilizadores suportado em cada quilometro quadrado de área.

Em muitos países, as bandas de frequência iniciais para 5G estão abaixo de 6 GHz (em muitos casos nas bandas de 3,3-3,8 GHz) e frequências semelhantes às redes móveis e Wi-Fi existentes. Espectro móvel adicional acima de 6 GHz, incluindo as bandas de 26 a 28 GHz, frequentemente chamadas de Ondas milimétricas (mm), fornecerá significativamente mais capacidade em comparação com as tecnologias móveis atuais, que resulta da reduzida dimensão destas células. Por outro lado, o espectro adicional e a maior capacidade permitirão mais utilizadores, mais dados e conexões mais rápidas. Também é esperado que haja uma reutilização futura do espectro de banda baixa existente para 5G, pois as redes herdadas diminuam de uso e suportam casos de uso futuros.

O aumento do espectro na banda *mmWave* fornecerá cobertura localizada, pois eles operam apenas em distâncias curtas. Futuras implementações do 5G podem usar frequências de mmW em bandas de até 86 GHz.

Relativamente ao *mMTC*, a *International Telecommunication Union (ITU)*¹³ definiu requisitos rigorosos em termos do número de dispositivos conectados e autonomia. Mais precisamente, o número de dispositivos conectados deve ser um milhão por quilómetro quadrado e cada aparelho deve ter autonomia de até 10 anos ou mais, uma vez que as transmissões são muito esporádicas e de curta duração.

2.7.3 Antenas

O 5G usa antenas MIMO maciças (múltiplas antes de transmissão, múltiplas antenas de receção) que possuem um número muito grande de elementos ou conexões de antena para enviar e receber mais dados simultaneamente. O benefício para os utilizadores é que mais pessoas podem ligar-se, simultaneamente, à rede e manter débitos binários mais altos.

O tamanho físico geral das antenas MIMO massivas 5G será semelhante ao 4G. No entanto, com uma frequência mais alta, o tamanho dos elementos de antena individuais são

¹³Agência da ONU especializada em tecnologias de informação e comunicação, destinada a padronizar e regular as ondas de rádio e telecomunicações internacionais, composta por todos os 193 membros e por mais de 700 entidades do setor privado e académico “https://pt.wikipedia.org/wiki/União_Internacional_de_Telecomunicações”.

menores, permitindo mais elementos (acima de 100) no mesmo caso físico. O equipamento para o utilizador 5G, incluindo telefones celulares e dispositivos, também terá a tecnologia de antena MIMO, embutida no dispositivo para as frequências das ondas milimétricas (*mm-Wave*).

A estação de base do setor 4G e estação de base 5G, com um novo conjunto de antenas MIMO de vários elementos, têm o tamanho físico geral de antena semelhante.

No cenário eMBB, são expectáveis taxas de dados mais elevadas, bem como, os utilizadores esperam experiências que necessitam de grandes débitos de dados.

De facto, o *throughput* de área R_A (medido em bits/s/km²) do 5G será muito maior do que em 4G. Este aumento substancial do R_A será alcançado através da criação de uma rede celular heterogénea, ou seja, haverá diferentes soluções para aumentar o R_A , dependendo das características celulares. Para pequenas células dedicadas a aumentar a capacidade numa pequena área geográfica, serão usadas comunicações de ondas milimétricas.

Nessas circunstâncias, a produtividade da área será aumentada pelo aumento da largura de banda dos canais de comunicação. De referir que frequências portadoras mais elevadas apresentam uma maior largura de banda de coerência de canal¹⁴, o que permite suportar maiores débitos binários. No entanto, o uso de frequências portadoras com dezenas de *gigahertz* representam desafios consideráveis, uma vez que as perdas de propagação nas comunicações com ondas milimétricas é muito alto. O 5G supera esse problema com técnicas m-MIMO, como *beamforming* [13].

Beamforming, é uma técnica utilizada em sistemas de comunicação sem fio, como redes Wi-Fi, telefonia móvel e sistemas de transmissão de dados, com o objetivo de melhorar a qualidade e eficiência do sinal de transmissão. De uma forma geral, os dispositivos de comunicação transmitem e recebem sinais em todas as direções, o que pode resultar em interferências e perda de qualidade de sinal. Com a introdução do *beamforming*, múltiplas antenas, tipicamente afastadas meio comprimento de onda, são usadas para direcionar o sinal de transmissão numa direção específica, criando um "feixe" concentrado de energia. Isso

¹⁴ A largura de banda de coerência de canal refere-se à faixa de frequências em um canal de comunicação em que o sinal transmitido mantém suas características coerentes, i.e., corresponde à faixa de frequências em que as propriedades do sinal se mantêm relativamente estáveis e não sofrem degradação significativa devido a efeitos de propagação. A largura de banda de coerência de canal está relacionada ao fenómeno de desvanecimento seletivo em frequência, no qual diferentes componentes de frequência do sinal são afetados de maneira diferente pelo ambiente de propagação. Isso ocorre devido a reflexões, difrações e interferências causadas pelos obstáculos no caminho do sinal.

permite aumentar a potência do sinal na direção desejada e reduzir a interferência em outras direções, o que melhora a cobertura, a taxa de transferência de dados e a confiabilidade da comunicação sem fio, para além de ganhos em termos de segurança.

O *beamforming* pode ser implementado de duas formas principais: *beamforming* de transmissão (*transmit beamforming*) e *beamforming* de recepção (*receive beamforming*). No *beamforming* de transmissão, várias antenas emissoras trabalham juntas para formar o feixe direcionado, aumentando a potência do sinal na direção do recetor. No *beamforming* de recepção, várias antenas recetoras são usadas para captar o sinal de transmissão de maneira mais eficiente, aumentando a qualidade do sinal recebido.

A tecnologia *beamforming*, utiliza algoritmos avançados de processamento de sinal para determinar o melhor caminho para o sinal de rádio a chegar ao utilizador. Isso aumenta a eficiência, pois reduz a interferência (sinais de rádio indesejados). Leva a grandes ganhos de matriz na recepção, de modo que a relação sinal ruído (Signal to Noise Ratio [SNR]) dos sinais recebidos não seja muito degradada. Ainda assim, deve-se notar que o uso de portadoras com ondas milimétricas é benéfico em termos de densidade celular.

De facto, como uma grande perda de propagação produz níveis de interferência mais baixos. A densidade celular pode ser aumentada reduzindo a distância entre estações de base, aumentando a capacidade do sistema. Para grandes células responsáveis pelas camadas de cobertura e mobilidade, não há largura de banda disponível para aumentar a capacidade. Portanto, são utilizadas técnicas MIMO massivas, pois permitem enormes ganhos na eficiência espectral. Esses ganhos vêm do uso de esquemas de pré-codificação/decodificação apropriados que podem aproveitar o grande número de antenas e produzir ganhos de matriz e multiplexação muito grandes. Essa técnica também é conhecida como *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) e permite que mais utilizadores sejam multiplexados num determinado tempo-recurso de frequência, o que leva a um maior rendimento. De referir que, no caso do MIMO, os elementos de antenas devem estar suficientemente afastados de forma que os canais seja incorrelacionados. Tipicamente, este afastamento é da ordem dos 3 a 4 comprimentos de onda (enquanto no *beamforming*, o afastamento é de meio comprimento de onda).

Resumindo, é evidente que serão alcançados grandes ganhos de capacidade como resultado do uso de diferentes técnicas, sendo consideradas as mais importantes as ondas milimétricas, o *beamforming* e o MIMO [8].

2.7.4 Latência

Para fornecer baixa latência na rede 5G são necessárias alterações significativas na rede principal (core) e *Radio Access Network* (RAN).

No que respeita às alterações no core da rede, os servidores de sinalização e os servidores de distribuição, são movidos para mais perto do utilizador final, por forma a encurtar o caminho entre os dispositivos e os aplicativos críticos. Os serviços de *streaming* de vídeo são disso exemplo. Já na RAN, para se alcançar baixa latência esta precisará de ser reconfigurada de forma altamente flexível e configurável por software para suportar as características dos serviços distintos que o sistema 5G prevê. A baixa latência e a alta fiabilidade na interface aérea requerem novas técnicas de rádio para minimizar os atrasos em alguns *Transmission Time Intervals* (TTIs), além de melhorias de robustez e codificação para obter altos graus de fiabilidade.

A implementação de uma RAN virtual, dinâmica e fiável, permite que a rede funcione com latência muito baixa e alta taxa de transferência, mas também permite que a rede móvel se ajuste às mudanças no tráfego, a falhas na rede e a novos requisitos de topologia.

O eixo URLLC, fruto da baixa latência, permitirá o desenvolvimento de dispositivos onde os nós podem comunicar com interação humana muito baixa, como o caso dos veículos autónomos. A ITU definiu requisitos muito ambiciosos para URLLC em termos de latência. Mais concretamente, a latência da interface de rádio que deve ser de apenas 1 ms, o que envolve uma redução de dez vezes em comparação com os 10 ms alcançados nas comunicações 4G. A Figura 10 resume alguns dos requisitos de desempenho do 5G, mostrando uma comparação com as comunicações 4G.

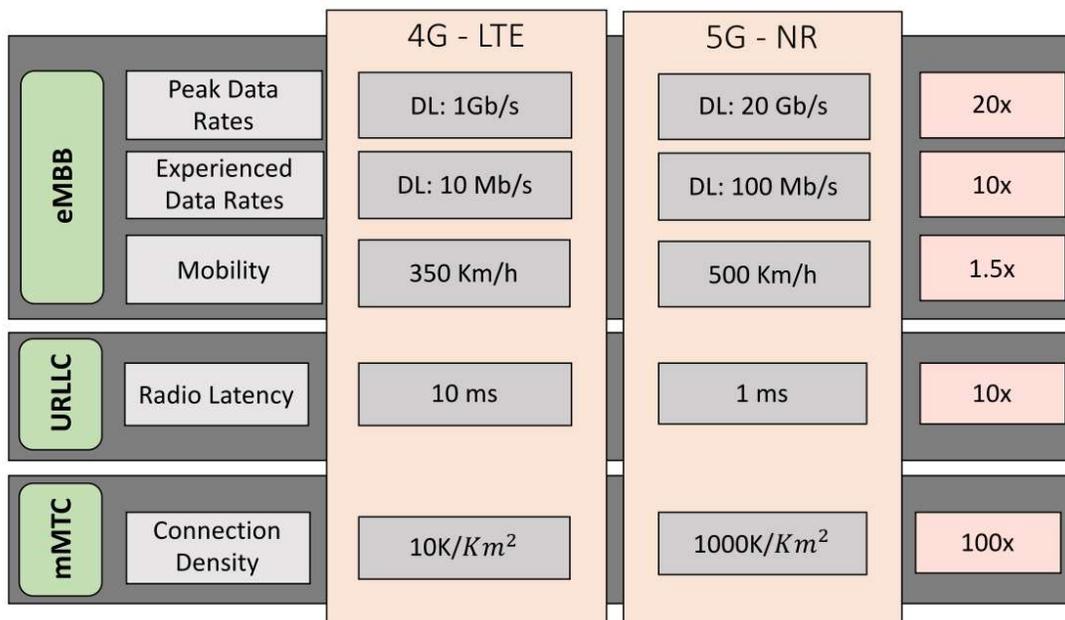


Figura 10 - Requisitos de desempenho do 5G [8]

Tal como o 4G, no 5G, o acesso múltiplo é baseado na *Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)*¹⁵ para ambos, sendo que o *New Radio 5G (5G NR)* utiliza OFDMA na ligação descendente e na ligação ascendente, mas tem como opção para a ligação ascendente o múltiplo acesso por divisão de frequência de operadora única (SC-FDMA).

O 4G (LTE) e o 5G NR utilizam OFDMA. No LTE, o OFDM divide a banda de frequência da portadora em pequenas subportadoras espaçadas de 15kHz, e modela cada uma individualmente. Um dos novos recursos do 5G NR é o espaçamento de frequência escalável das subportadoras OFDM, que permite uma maior flexibilidade na alocação de frequências para diferentes casos de uso e condições de implantação.

No 5G NR, as subportadoras são usadas para transmitir dados numa faixa de frequência específica. O espaçamento de frequência escalável permite que a largura do espectro seja ajustada de forma flexível para atender às necessidades do serviço. Isso significa que o 5G NR pode acomodar diferentes larguras de banda, desde configurações mais estreitas para casos de uso de baixa largura de banda, como IoT (Internet das Coisas), até configurações mais amplas para casos de uso de alta largura de banda, como transmissão de vídeo em alta-definição.

¹⁵ OFDM é uma técnica de modulação em que a banda do sinal é dividida em portadoras paralelas, chamadas subportadoras, e que são matematicamente ortogonais entre si. No OFDMA vários utilizadores partilham a banda ao mesmo tempo.

Com diferentes tamanhos de células e bandas de frequências, o 5G NR suporta uma numerologia OFDM flexível com espaçamentos de subportadoras que variam de 15 kHz a 120 kHz com uma mudança proporcional na duração do prefixo cíclico. São usadas até 3300 subportadoras, resultando em larguras de banda portadoras máximas de 50/100/200/400 MHz para espaçamentos de subportadoras de 15/30/60/120 kHz, respetivamente. No 4G, o espaçamento da subportadora é dado por $\Delta f = 15$ kHz, já no 5G a frequência da subportadora é dada por $\Delta f = 2\mu \cdot 15$ kHz, onde μ pode variar de $\mu = 0$ a $\mu = 5$ (o espaçamento máximo da subportadora é $\Delta f = 480$ kHz). Nestas condições, a forma de onda transmitida pode ser adaptada às condições do canal.

Este novo recurso é conhecido como numerologia 5G e é muito importante no 5G, pois, como a frequência portadora pode variar substancialmente (ou seja, tanto o espectro de micro-ondas quanto o das ondas milimétricas serão usados), as condições do canal também podem variar. Por exemplo, quando o efeito multipercurso é forte, um espaçamento mais baixo da subportadora é desejável. No entanto, quando o ruído de fase é grande (o que acontece frequentemente em comunicações com ondas milimétricas), uma grande Δf é desejável. Uma Δf variável também é importante para suportar comunicações em que a latência é crítica (ou seja, para o cenário URLLC), uma vez que a duração do símbolo OFDM é inversamente proporcional ao espaçamento da subportadora, ou seja, $T_{OFDM} = \frac{1}{\Delta f}$. A duração do Bloco de Recurso Físico (PRB), que é a menor quantidade de tempo que pode ser concedida a um determinado utilizador, são 12 subportadoras e um intervalo de tempo. Quando $\Delta f = 15$ kHz, há apenas um slot por sub-frame (cuja duração é sempre de 1 ms). No entanto, quando a subportadora aumenta o espaçamento, a duração de cada símbolo OFDM diminui, o que permite acomodar *slots* a mais num determinado subquadro. Os PRBs são geridos pela estação de base regularmente para que o sistema tenha capacidade e desempenho equilibrados e a eficiência espectral seja maximizada.

A Tabela 4 - Casos de numerologia 5G mostra alguns dos casos de numerologia 5G. Claramente, T_{OFDM} diminui à medida que Δf aumenta, embora a duração da sub-frame seja constante. Isto significa que o número de PRBs disponíveis numa determinada sub-frame também pode variar, o que explica a própria alta flexibilidade de 5G.

Tabela 4 - Casos de numerologia 5G [8]

Δf	PRB (Frequency)	PRB (Time)	Slots per sub-frame	Sub-frame duration
15 KHz	180 KHz	1 ms (eMBB)	1	1ms
30 KHz	360 KHz	0.5 ms	2	1ms
60 KHz	720 KHz	0.25 ms	4	1ms
120 KHz	1440 KHz	0.125 ms (URLLC)	8	1ms

Atualizações futuras de comunicações 5G exigem eficiências espectrais aperfeiçoadas, mas para alcançar tal desempenho, a inclusão da técnica *Non-Orthogonal Multiple Access* (NOMA)¹⁶ é uma opção altamente previsível [8].

Embora os recursos oferecidos pelo 5G tragam benefícios para a forma como os consumidores se comunicam e vivem, é importante ressaltar que eles não podem ser plenamente aproveitados pelos seres humanos. Na realidade, serão as empresas e organizações que farão uso desses recursos avançados, buscando melhorar a eficácia e a eficiência de seus processos internos, além de desenvolver novos serviços e produtos.

¹⁶ Non-Orthogonal Multiple Access - método de codificação de dados digitais em frequências portadoras múltiplas com intervalos não ortogonais entre frequências de subportadoras.

3 TETRA vs 5G

Até ao aparecimento do 5G, as redes de emergência requeriam serviços que não estavam disponíveis nas redes comerciais, designadamente:

- Chamadas um-para-muitos e muitos-para-muitos;
- Comunicações altamente criptografadas;
- Operação nos modos *trunking* TMO, LST e DMO;
- Capacidade de implementação de funcionalidade de *repeater* e *gateway*;
- Configuração de chamada rápida (menos de 1 s);
- Chamadas de emergência com prioridade.

Com o aparecimento do 5G, este passou a possibilitar a implantação de redes privadas, que podem ser Redes de Segurança Pública. Neste contexto, uma organização pode contratar uma “fatia” de rede a uma operadora e usá-la para seus próprios fins e/ou para a prestação de serviços aos seus utilizadores.

O 5G veio também permitir a criação de redes virtuais, possibilitando a implementação do isolamento, isto é, a mesma infraestrutura física usada para partilhar redes virtuais para fins comerciais e usos de Segurança Pública, e dentro das Redes de Segurança Pública oferecer para ambos diferentes grupos, de forma totalmente isolada e a todos eles de forma totalmente global.

No 5G, o *Edge Computing* ou computação de borda, deve ser usado para hierarquizar as comunicações em cenários operacionais e não operacionais, levando em conta a diferenciação de serviços e possibilitando a integração de estações de base com nós de cache em diferentes níveis da rede.

A segurança é outra questão importante que não pode ser negligenciada. Inclui vários aspetos, desde o acesso à rede e a imitação de nós até ao acesso e troca de informações fluindo na rede. A crescente introdução de mais software na rede cria também novos desafios para a segurança da rede e da informação.

3.1 Análise comparativa

A Tabela 5 apresenta uma comparação do TETRA e do 5G. Para tal, será efetuada uma análise de 6 níveis de serviço considerados estruturais para a resposta das forças de emergência.

Tabela 5 - Análise comparativa de serviços
Fonte: elaboração própria

	TETRA	5G
Qualidade de serviço	Não há bloqueio no sistema TETRA, o que implica que as chamadas podem passar em todos os casos.	A tecnologia móvel 5G habilita a função <i>Network Slicing</i> que pela capacidade de divisão de rede, apresenta melhor qualidade de serviço (QoS) ou capacidade de tráfego sem bloqueio.
DMO	O recurso DMO é um dos benefícios do sistema de rádio TETRA, ele permite que o aparelho se comunique com outro aparelho por uma distância limitada sem envolver a estação de base ou outros elementos da rede. Este é um recurso extremamente útil em caso de um incidente que implique quebra de ligação à estação de base.	A implantação do sistema 5G permite o uso de vários telefones correntemente disponíveis e uma operação híbrida (privada e pública) que permite uma disponibilidade de rede muito maior. Este cenário é bastante útil nas redes 5G SA (autónomas) implementadas pelas empresas de telecomunicações. Uma vez que o 5G pode estabelecer comunicações diretas, sem utilizar uma estação de base, esta funcionalidade é suportada.
Capacidade da rede	A largura de banda no melhor caso é de algumas centenas de kbps, a utilização de um equipamento TETRA para comunicação de dados requer sempre um modem muito maior e requer uma antena maior devido à menor frequência de operação.	Suporta largura de banda de várias centenas de Mbps (teoricamente 20 Gbps), além disso, o 5G pode permitir serviços do tipo uRLCC, mMTC ou eMBB, oferecendo melhor QoS nesses casos e utilização de tecnologias, como automação, AI, Analítica e IoT.
Equipamentos	Possui uma arquitetura simples, mas requer hardware personalizado o que implica equipas de manutenção especializadas e peças sobressalentes.	Devido à virtualização da função de rede, tem a maioria dos requisitos do sistema que são atendidos usando produtos de nuvem ou COTS ¹⁷ que tornam o suporte a uma rede 5G privada uma atividade menos complicada.

¹⁷ Commercial Off-The-Shelf (COTS) - produtos projetados para serem facilmente instalados e para se interligarem com os componentes do sistema existente. Softwares que se enquadram na categoria COTS: sistemas operacionais, suites de produtos de escritório, processadores de texto e programas de e-mail estão entre os inúmeros exemplos. Uma das principais vantagens do software COTS reside no seu baixo custo fruto da sua produção em massa.

Cobertura	<p>Apesar das frequências de trabalho serem mais baixas que as da rede 5G e como tal necessitar de menos estações de base, quando é exigida a cobertura de uma vasta área com níveis de zonas sombra baixos, nesses casos, ter uma rede privada é um desafio.</p>	<p>O <i>Network Slicing</i> da rede, com uma QoS garantida pode dotar os serviços críticos de ampla cobertura geográfica e tornar a sua ampliação mais fácil através da interoperabilidade entre redes privadas e públicas.</p>
Aplicações	<p>Os equipamentos suportam alguns aplicativos. O seu desenvolvimento depende dos fabricantes e é específico para cada equipamento o que torna o custo do software elevado.</p>	<p>Facilidade de desenvolvimento devido aos sistemas operativos que os suportam, oferecendo melhores benefícios de custo do que o aparelho de rádio TETRA devido às economias de escala.</p>

4 Implementação de algoritmos e análise de resultados

Este capítulo trata dos aspetos mais importantes relacionados não só com os resultados das simulações aqui desenvolvidas, mas também dos aspetos técnicos utilizados nas mesmas. Está dividido da seguinte forma: a seção 4.1 descreve os pressupostos da simulação e alguns dos conceitos técnicos utilizados no algoritmo da simulação e a seção 4.2 descreve os resultados e a análise das simulações realizadas.

De salientar que na implementação dos algoritmos e posterior análise de resultados das simulações efetuados, tive o apoio do Professor orientador.

4.1 Pressupostos da simulação

As simulações realizadas foram avaliadas usando o *Método de Monte Carlo* (MMC). No, com modulação *Quaternary Phase Shift Keying* (QPSK), estudando os resultados de desempenho, no que respeita ao *Bit Error Rate* (BER) obtido com m-MIMO (para 5G).

Nas simulações foi assumida uma estimativa de canal ideal e, no caso do 5G, a técnica de transmissão em bloco *Single-Carrier Frequency Domain Equalization* (SC-FDE). O BER é avaliado em função da energia dos bits recebidos E_b e a densidade espectral de potência unilateral do ruído N_0 , ou seja, E_b/N_0 .

No caso do 5G, usou-se um comprimento de blocos de $N = 256$ símbolos (uma vez que os resultados foram semelhantes para outros valores de N , desde que $N \gg 1$).

Foi considerado um canal de desvanecimento Rayleigh com 16 caminhos de potência média igual, não correlacionados. No 5G, considerou-se uma duração da parte útil dos blocos (N símbolos) é $1\mu s$ e o prefixo cíclico tem uma duração de $0,125\mu s$, tendo ainda sido utilizado o recetor *Zero Forcing* (ZF).

No 5G, foi adotado o sistema MIMO, usando multiplexação espacial (transmissão multicamada), e por via deste pressuposto os resultados com TxR (T antenas transmissoras e R antenas recetoras) significa que existem T fluxos paralelos de símbolos (a taxa de símbolos aumenta T vezes). Na Tabela 6, estão expressas as simulações para o 5G e para o TETRA com os valores de TxR.

Tabela 6 - Simulações realizadas
Fonte: elaboração própria

	T	R
5G	4	32
5G	4	128
5G	16	128
TETRA	1	1

De referir que no caso da transmissão multicamada MIMO, R precisa ser igual ou superior a T , para que a deteção seja possível.

4.1.1 Método de Monte Carlo

A Simulação de Monte Carlo, também conhecida como Método de Monte Carlo ou simulação de probabilidade múltipla, é uma técnica matemática usada para estimar os resultados possíveis de um evento incerto. O MMC foi inventado por John von Neumann e Stanislaw Ulam, durante a Segunda Guerra Mundial, para melhorar a tomada de decisões em condições incertas. Recebeu o nome de uma conhecida cidade de casinos, chamada Mônaco, já que o elemento do acaso é fundamental para a abordagem de modelagem, semelhante a um jogo de roleta.

Desde a sua introdução, que a sua utilização tem sido massificada em muitas áreas tais como, inteligência artificial, preços de ações, previsão de vendas, gestão de projetos e precificação de produtos.

Ao contrário de um modelo de previsão normal, o MMC prevê um conjunto de resultados com base numa faixa estimada de valores versus um conjunto de valores de entrada fixos. Por outras palavras, uma Simulação de Monte Carlo constrói um modelo de resultados possíveis alavancando uma distribuição de probabilidade, como uma distribuição uniforme ou normal, para qualquer variável que tenha incerteza inerente. Ele, então, recalcula os resultados repetidamente, cada vez, usando um conjunto diferente de números aleatórios entre os valores mínimo e máximo. Este exercício pode ser repetido milhares de vezes para produzir um grande número de resultados esperados.

O MMC também é utilizado para previsões de longo prazo devido à sua precisão. À medida que o número de entradas aumenta, o número de previsões também cresce, permitindo que sejam projetados resultados mais distantes no tempo com mais precisão. Quando uma

Simulação de Monte Carlo é concluída, ela produz uma gama de resultados possíveis com a probabilidade de cada resultado ocorrer.

A implementação do MMC normalmente envolve três etapas:

1. Configuração do modelo preditivo, identificando a variável dependente a ser prevista e as variáveis independentes (também conhecidas como variáveis de entrada, risco ou preditoras) que conduzirão a previsão;
2. Especificação das distribuições de probabilidade das variáveis independentes. Uso dos dados históricos para definir uma faixa de valores prováveis e atribuir pesos de probabilidade para cada um;
3. Repetição das simulações, por forma a gerar valores aleatórios das variáveis independentes. Estas repetições deverão ocorrer até existirem resultados suficientes que formem uma amostra representativa do número quase infinito de combinações possíveis.

4.1.2 Bit Error Rate

Os sinais recebidos estão sujeitos a imparidades de canal. Estas deficiências originam que o sinal recebido seja diferente do transmitido. No caso de sinais analógicos, os níveis de sinal resultantes não traduzem exatamente a fonte de informação original. No caso de sinais digitais, as imparidades de canal originam bits corrompidos. Em ambos os casos, as referidas deficiências do canal originam uma degradação da relação sinal-ruído mais interferência (SNIR)². Por forma a medir o desempenho de um sistema de comunicação digital, normalmente é medida a taxa de erro de bit (*Bit Error Rate* [BER]), que corresponde ao número de bits corrompidos dividido pelo número total de bits transmitidos num determinado período de tempo [9].

4.1.3 Modulação por múltipla portadora versus única portadora

Apesar do sucesso do OFDM, esta abordagem sofre de problemas bem conhecidos, tais como, um grande Relação entre a Potência de Pico e Média (*Peak-to-Average Power Ratio* [PAPR]), intolerância a não linearidades do amplificador e alta sensibilidade a desvios de frequência portadora. Uma abordagem alternativa de baixa complexidade para mitigar a Interferência Intersimbólica (*Inter-Symbol Interference* [ISI]) é o uso de *Frequency Domain Equalizers* (FDEs) em comunicações *Single Carrier* (SC).

Os sistemas que empregam FDE estão intimamente relacionados aos sistemas OFDM. Na verdade, em ambos os casos, a transmissão digital é realizada em blocos e depende de operações FFT/IFFT (*Fast Fourier Transform / Inverse FFT*). Portanto, os sistemas SC que empregam FDE desfrutam de uma complexidade semelhante à dos Sistemas OFDM com as vantagens de não ter os requisitos rigorosos de sincronização de frequência altamente precisa e amplificação de potência linear como em OFDM, que pode alavancar o uso de componentes mais baratos em terminais dos utilizadores com uma alta eficiência. Vale a pena mencionar também, a complexidade computacional significativamente menor dos FDEs, em comparação com a de equalização Domínio do Tempo (*Time Domine* [TD]) [14].

Como podemos observar na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, SC-FDE é uma modulação onde cada símbolo ocupa a banda total alocada para o canal, de forma que a energia do símbolo é distribuída ao longo da banda de transmissão.

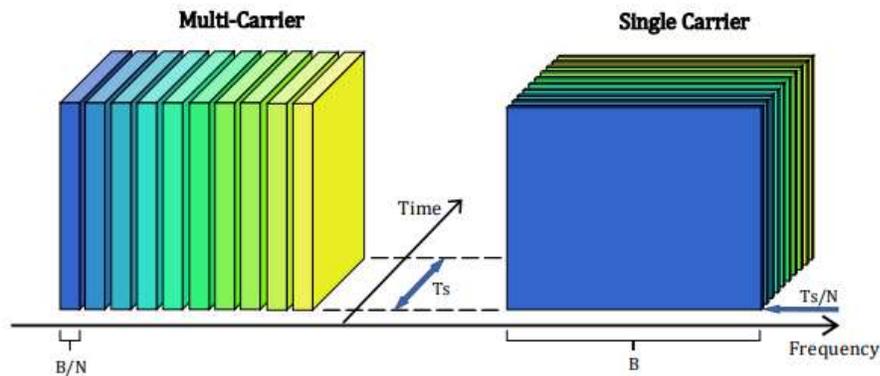


Figura 11- OFDM vs SC-FDE [14]

4.1.4 Low-Density Parity Check (LDPC)

Os Códigos de Verificação de Paridade de Baixa Densidade (*Low-Density Parity Check* [LDPC]) representam uma classe de códigos de correção de erros que podem ser empregues para fornecer correção de erros de transmissão em sistemas de comunicação. Usando códigos LDPC, as capacidades de canal que estão próximas do limite teórico de Shannon podem ser alcançadas.

Originalmente, conhecidos como códigos Gallager, eles foram propostos pela primeira vez por R.G. Gallager em 1962, mas eram muito complexos para a implementação prática das técnicas de decodificação necessárias no momento de sua concepção.

Eles permaneceram praticamente intocados por décadas, até serem redescobertos na década de 1990, quando foram introduzidos em uma ampla gama de padrões de comunicação com e sem fio, incluindo transmissão de vídeo digital, WiFi e 5G-New Radio. (5G-NR).¹⁸

Uma das características da transmissão de informação nos sistemas de comunicação digital é que deve ser realizada de forma confiável, para tal deve possuir mecanismos que lhe permitam realizar a verificação e correção de erros, contribuindo desta forma para o aumento da eficácia da transmissão de dados.

Os códigos LDPC são críticos para muitos sistemas de comunicação atuais devido ao seu desempenho de aproximação de capacidade e decodificação iterativa de baixa complexidade em canais de informação ruidosos, uma vez que são caracterizados por conter uma matriz controle de paridade H esparsa, ou seja, com baixa densidade de elementos não nulos, o que apresentam excelentes desempenhos em uma grande variedade de canais [10].

Os códigos LDPC superam outros códigos de correção de erros em muitos aspectos, dos quais se destacam a forma eficiente como realiza a gestão dos erros e de como a sua codificação e decodificação implicam um custo baixo no sistema. Os códigos *Quasi-Cyclic LDPC* (QC-LDPC), também conhecidos como códigos com reconhecimento de arquitetura, são um tipo particularmente importante de código LDPC construído algebricamente que foi introduzido em 2005. Eles estão incluídos em vários padrões de sistema de comunicação, incluindo IEEE 802.16 e, DVB-S2 e 802.11. Os códigos QC-LDPC são construídos usando geometrias finitas ou matrizes de permutação circulares [10].

4.1.4.1 Estrutura do código LDPC

A matriz de verificação de paridade esparsa pode ser usada no código LDPC para definir conjuntos de verificação de paridade. O termo “Esparsa” em uma matriz com a dimensão $(n - k) \times n$ denota que há menos instâncias de “1” do que de “0”. Existem mais zeros do que uns em $(n - k) \times n$ entradas.

A matriz de verificação de paridade esparsa, (n, wc, wr) , é definida por três variáveis, n significa o comprimento codificado, enquanto wr e wc representam o número de 1s existentes numa linha e numa coluna respectivamente. Os requisitos wc e $wr \ll n \times (n - k)$ devem ser atendidos para que uma matriz seja referida como de baixa densidade ou esparsa.

A Matriz de Verificação de Paridade pode ser classificada em dois tipos: regular e irregular. Além disso, os códigos LDPC podem ser codificados e decodificados usando uma

¹⁸ https://en.wikipedia.org/wiki/Low-density_parity-check_code

variedade de métodos. O objetivo comum de todos os sistemas é simplificar e acelerar o processo de codificação e decodificação. Os Códigos de Bloco Lineares (n, k) são a base para o método de codificação mais usado frequentemente. Os bits de mensagem e os bits de paridade que compõem uma palavra de código de código de bloco linear pode ser descrito da seguinte forma: m é a mensagem e p é o vetor de paridade.

De acordo com as características do Bloco de Código Linear, $C \cdot HT = 0$. Obtemos as equações para $P_{n-k \times 1}$ em termos de bits de mensagem para satisfazer este critério via multiplicação de matrizes. Portanto, após obter os valores de $P_{n-k \times 1}$, podemos obter a palavra-código de N bits.

O algoritmo de troca de bits e o método soma-produto são usados para decodificar códigos LDPC. Existem duas categorias de decodificação: decodificação de decisão difícil e decodificação de decisão suave. A decodificação por inversão de bits corresponde a uma passagem de mensagem de decisão difícil algoritmo.

Mario Marques da Silva em [10], demonstrou que um sistema composto por LIS, associado a códigos LDPC, juntamente com a técnica de transmissão SC-FDE, exibe otimização de desempenho que melhora com o aumento do número de antenas.

4.1.5 Match Filter Bound (MFB)

O *Match Filter Bound* (MFB) representam o melhor desempenho de detecção passível de ser atingido num sistema particular, que pode ou não ser realizado com um sistema prático. É a forma de medir o canal modelado pela soma de raios de desvanecimento de *Rayleigh* atrasados e independentes, que podem ser vistos como o limite inferior de taxa de erros (desempenho máximo) [10].

4.1.6 Zero Forcing (ZF)

Zero Forcing é uma técnica utilizada em comunicações sem fio e em redes de sensores para melhorar a qualidade do sinal recebido pelos dispositivos. O objetivo do ZF é eliminar ou reduzir a interferência entre os dispositivos por forma a melhorar a taxa de transferência de dados e a confiabilidade da comunicação.

Quando múltiplos dispositivos sem fio estão a operar numa área limitada, podem ocorrer interferências causadas pelos mesmos, o que resulta na degradação da qualidade do sinal e da taxa de transferência de dados. A técnica ZF utiliza algoritmos sofisticados para mitigar essa interferência. O Zero Forcing funciona atribuindo pesos adequados aos sinais transmitidos

pelos dispositivos, de forma a anular ou minimizar a interferência. Esses pesos são ajustados de acordo com as características do canal de comunicação e a localização dos dispositivos.

Os sinais de cada antena transmissora são considerados o sinal alvo pela recetor ZF, enquanto as outras saídas são consideradas interferentes. O trabalho principal deste recetor é o de reduzir a interferência a zero invertendo a resposta do canal e ajustando o resultado para a letra mais próxima no alfabeto que está a ser observado. O canal inverso, H^{-1} , é então multiplicado pelo sinal recebido, Y_k , como descrito acima.

O critério ZF aumenta consideravelmente o ruído do canal em sub-canais com profundidade local durante o processo de equalização do canal. Usando o algoritmo ZF, F_k torna-se [10]:

$$F_k = (H_K^H H_k)^{-1} H_K^H \quad (2)$$

Ao aplicar o ZF, os dispositivos são capazes de transmitir sinais de forma mais eficiente e com menor interferência, o que resulta numa melhoria significativa da qualidade do sinal recebido pelos dispositivos de destino. Este facto pode aumentar a taxa de transferência de dados e reduzir a taxa de erros de comunicação.

4.2 Análise e Resultados das Simulações

Esta secção apresenta os resultados de desempenho entre uma rede 5G e uma rede TETRA. Para tal apresenta também a curva MFB, pois é uma boa forma de medir o canal modelado pela soma de raios de desvanecimento de *Rayleigh* atrasadas e independentes, podendo ser vista como um limite inferior.

Na Figura 12, são apresentados os resultados de desempenho do TETRA e do 5G com 4x32 MIMO, com LDPC, e tendo em conta um recetor ZF. De referir que 4x32 MIMO significa que existe 4 fluxos paralelos de dados transmitidos nas 4 antenas de transmissão, existindo 32 antenas de receção que disponibiliza diversidade. Verifica-se pela observação das curvas que o 5G possui melhor desempenho de BER que o TETRA, o aumento da taxa de erros por bit é superior no TETRA que no 5G independentemente da potência aplicada. Note-se, por exemplo, que com um $BER = 10^{-2}$ temos uma $\frac{Eb}{No}$ de aproximadamente 6,5 dB para o 5G e de aproximadamente 9dB para o TETRA. Se verificarmos para um $BER = 10^{-3}$ temos uma $\frac{Eb}{No}$ de aproximadamente 9,5 dB para o 5G e de aproximadamente 11dB para o TETRA.

Pode-se mesmo verificar que, em toda a simulação, o TETRA uma $\Delta \frac{Eb}{No}$ superior ao 5G entre 1,5 a 2,5 dB que o 5G.

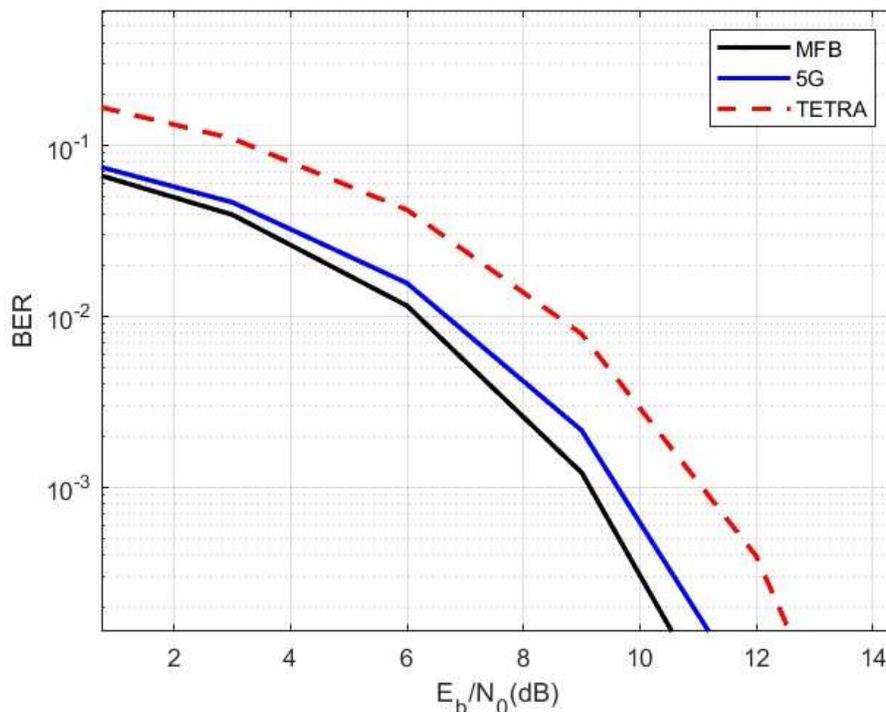


Figura 12 - Desempenho BER para TETRA e 5G para 4x32 MIMO
Fonte: elaboração própria

Na Figura 13, são apresentados os resultados de desempenho do TETRA e do 5G mas para 4x128 MIMO, com LDPC, e tendo em conta um recetor ZF. Verifica-se que o 5G continua a possuir um melhor desempenho de BER que o TETRA, com um BER = 10^{-2} temos uma $\frac{Eb}{No}$ de, aproximadamente, 6 dB para o 5G e de, aproximadamente, 9dB para o TETRA. Se verificarmos para um BER = 10^{-3} , temos uma $\frac{Eb}{No}$ de aproximadamente 9 dB para o 5G e de aproximadamente 11dB para o TETRA.

Pode-se mesmo verificar que, em toda a simulação, o TETRA tem uma $\Delta \frac{Eb}{No}$ superior ao 5G entre 2 a 2,5 dB que o 5G.

De salientar que em relação à simulação anterior, o 5G aumenta o seu desempenho em aproximadamente 0,5dB estreitando consideravelmente a diferença para o MFB, como pode ser observado na **Erro! A origem da referência não foi encontrada..**

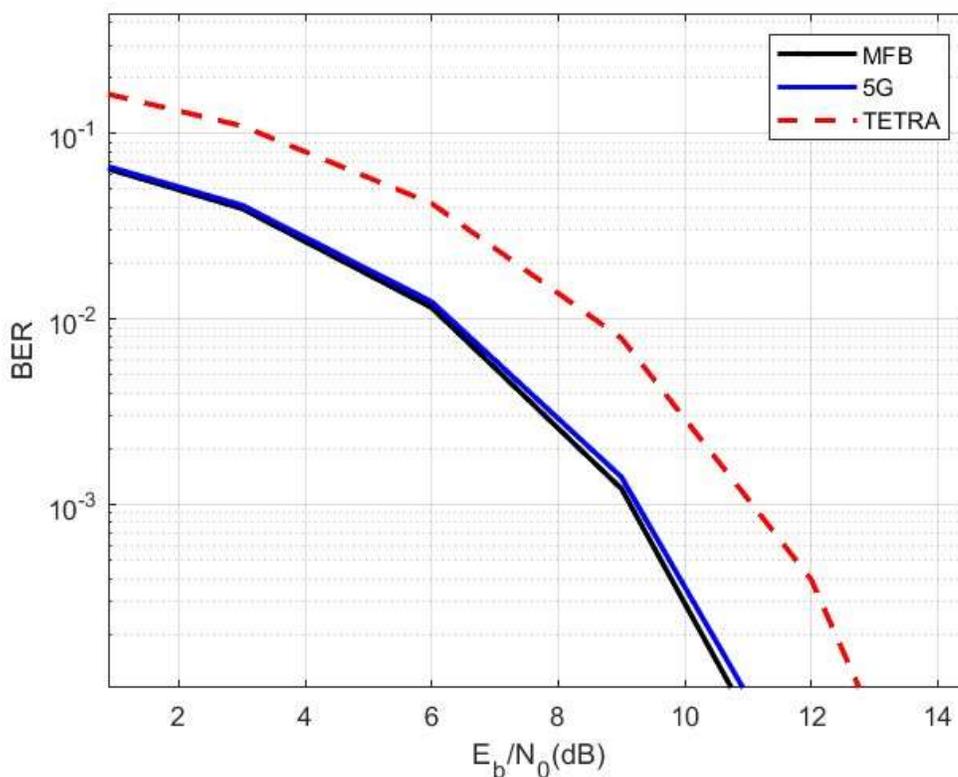


Figura 13 - Desempenho BER para TETRA e 5G para 4x128 MIMO
 Fonte: elaboração própria

Na Figura 14, são apresentados os resultados de desempenho do TETRA e do 5G mas para 32x128 MIMO, com LDPC, e tendo em conta um recetor ZF. Neste contexto, existem 32 fluxos paralelos de dados a serem transmitidos pelas 32 antenas de transmissão, enquanto que a diversidade de receção se mantém em 128, como no gráfico anterior.

Verifica-se que o 5G continua a possuir um melhor desempenho de BER que o TETRA, com um $BER = 10^{-2}$ temos uma $\frac{Eb}{No}$ de, aproximadamente, 6,5 dB para o 5G e de, aproximadamente, 9dB para o TETRA. Se verificarmos para um $BER = 10^{-3}$, temos uma $\frac{Eb}{No}$ de aproximadamente 9,5 dB para o 5G e de aproximadamente 11dB para o TETRA.

A $\Delta \frac{Eb}{No}$ do TETRA em relação ao 5G situou-se entre 1,5 a 2,5 dB que o 5G.

De salientar que em relação à simulação anterior, para o 5G existe, observa-se uma degradação do desempenho, como verificado **Erro! A origem da referência não foi encontrada..**

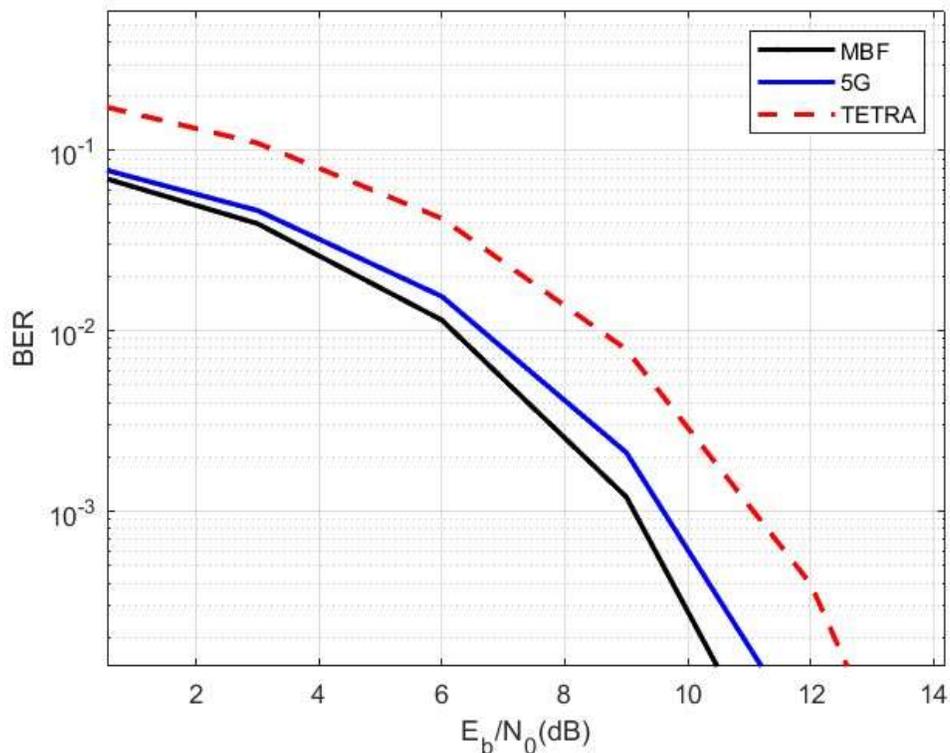


Figura 14 - Desempenho BER para TETRA e 5G para 32x128 MIMO
Fonte: elaboração própria

Apesar de não ser o âmbito deste trabalho, é possível também efetuar uma análise de desempenho do 5G, no que respeita a variação de MIMO TxR apresentada na Tabela 6.

Na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** é possível comparar os resultados entre 4x128 MIMO contra 4x32 MIMO. Verifica-se, como esperado, que devido ao maior grau de diversidade, a configuração 4x128 MIMO tem melhor desempenho que a configuração 4x32 MIMO. Conclui-se, portanto, que a utilização de maior diversidade pode ser vista como um mecanismo de mitigação da degradação do desempenho que resulta de um maior número de utilizadores/fluxos paralelos de dados, ou seja, existe melhoria significativa do desempenho do BER, aumentando o número de antenas de recepção.

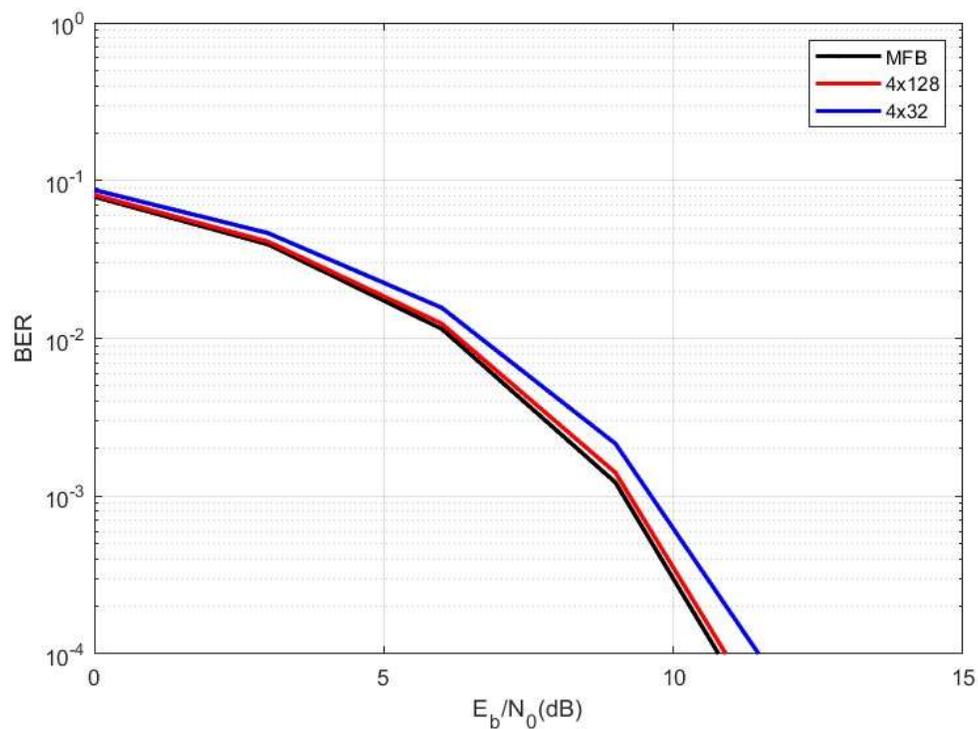


Figura 15 - Desempenho BER para 5G 4x32 MIMO - 4x128 MIMO
Fonte: elaboração própria

Já na Figura 16, e comparando os resultados entre 4x128 MIMO contra 32x128 MIMO, verifica-se que o aumento de antenas de transmissão de 4 para 32 provoca uma degradação do desempenho do BER. Este facto deve-se ao aumento do débito binário, ou seja, do número de fluxos paralelos de dados.

De notar que apesar do aumento do número de antenas recetoras corresponder a um aumento da diversidade, um aumento do número de antenas de transmissão, corresponde em sentido inverso a um aumento da taxa de símbolos e, por isso, tende a degradar o desempenho do BER (devido ao aumento das interferências).

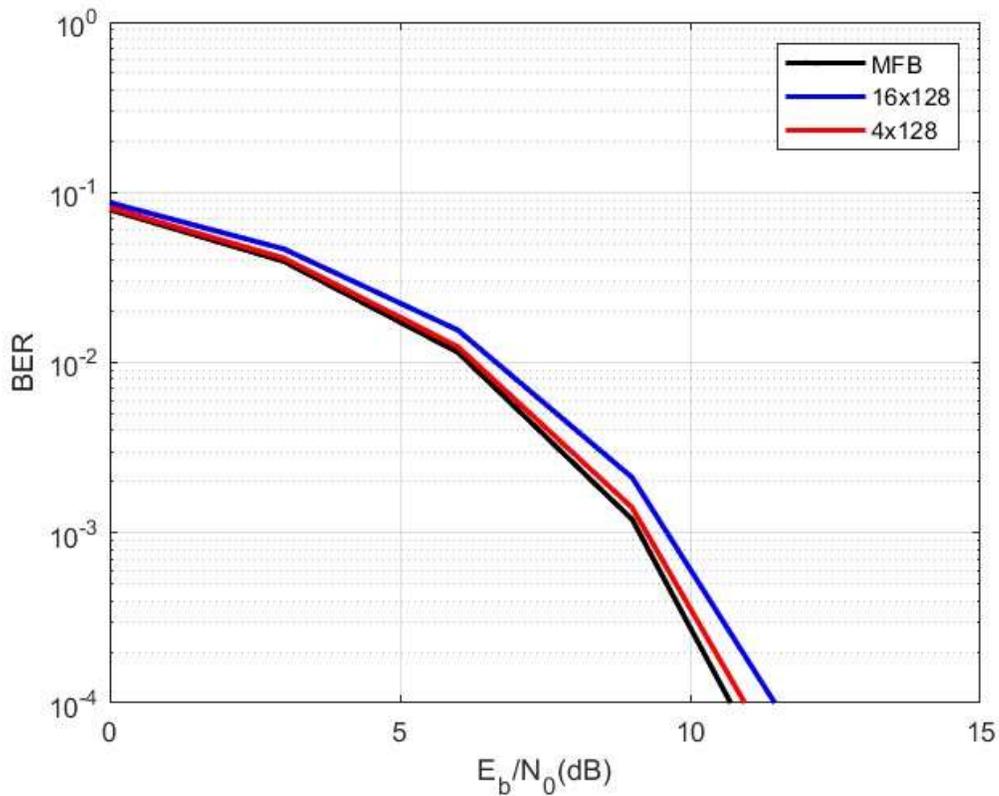


Figura 16 - Desempenho BER para 5G 4x128 MIMO - 32x128 MIMO
Fonte: elaboração própria

5 Conclusões

Um dos maiores mercados de telecomunicações é o da segurança, na medida em que envolve um número muito alargado de entidades e utilizadores. Atualmente, o *Trunking* Radio Digital é o principal método de comando e despacho das forças de segurança, tendo até à presente data cumprido a sua missão principalmente no que toca à transmissão de voz.

Ao comparar a tecnologia de intercomunicação trunking tradicional com o 5G, é possível ter a percepção, com base numa análise empírica não científica, de que a primeira possui certas vantagens, como uma cobertura ampla, a capacidade de resolver problemas de comunicação à distância e uso de frequências dedicadas. No entanto, é importante ressaltar que o 5G traz consigo diversas vantagens significativas, como velocidades de conexão ultrarrápidas, maior capacidade de rede para lidar com uma ampla gama de dispositivos conectados, latência extremamente baixa, permitindo uma resposta rápida em tempo real, e a capacidade de implementar a tecnologia de "*Network Slicing*" que permite a interoperabilidade entre redes, resultando em uma rede mais resiliente e menos propensa a zonas de sombra.

Verifica-se que, com o melhorar da tecnologia, a largura de banda das transmissões sem fios tem aumentando rapidamente, bem como, a diminuição da latência das mesmas. Verifica-se que a capacidade das redes em relação às necessidades dos negócios não se focam só na voz, mas vão muito mais além, uma vez que as exigências dos utilizadores e dos negócios estão em constante mutação, e este tem, aos dias de hoje como principais requisitos a voz, mensagens, localização, imagem, vídeo e dados. Neste pressuposto procurou-se analisar se os requisitos da rede SIRESP e por inerência a norma TETRA são preenchidos pela rede 5G. Procurou-se ainda realizar uma análise de desempenho entre o TETRA e o 5G que permitisse verificar qual dos dois pode responder às necessidades emergentes de resposta a grandes catástrofes, que permita respostas mais eficazes e sustentadas.

No capítulo 3 é realizada uma análise comparativa entre o TETRA e o 5G que verifica que, aos dias de hoje, todos os requisitos da norma TETRA já são supridos pelo 5G. São disso exemplo os requisitos mais críticos como os modos de operação DMO e LST. Além disso, a capacidade da rede 5G é infinitamente superior ao TETRA (suportando um número de utilizadores por quilómetro quadrado muito maior), apresenta latências muito mais reduzidas (essencial para serviços críticos), e dispõe de uma eficiência espectral muito maior (número de bits por segundo em cada hertz de largura de banda). Finalmente, os débitos binários disponibilizados pelo 5G são infinitamente superiores aqueles que são apresentados pelo TETRA.

O 5G, com sua capacidade de "Network Slicing" e interoperabilidade entre redes, contribui para a diminuição das zonas de sombra e para uma ocupação geográfica mais eficiente, superando o TETRA, que, apesar de permitir maior dispersão da rede com menos estações de base, não oferece os mesmos benefícios em termos de resiliência da rede.

No capítulo 4, e através da análise de desempenho do BER entre o TETRA e o 5G, verificou-se que o 5G detêm um melhor desempenho que o TETRA, abrindo neste campo inúmeras possibilidades das quais se destaca: a utilização de IoT; transmissão de vídeo; utilização de inteligência artificial na prevenção, mas também na mitigação dos incidentes; entre outras.

Julgo que a questão que se deverá colocar no futuro, e após esta análise, não será se “No contexto Português pode o 5G ser substituto do TETRA?”, mas sim “Como aproveitar as potencialidades do 5G para salvar vidas”.

6 Sugestões para trabalhos futuros

Com o advento da tecnologia 6G e perspetivando a sua utilização nas redes de emergência, há várias áreas de pesquisa promissoras que podem ser exploradas. Aqui deixo algumas propostas de trabalhos de pesquisa futuros relacionados ao 6G e às redes de emergência.

Resiliência das redes de emergência no contexto do 6G: Desenvolver estratégias para garantir a disponibilidade e a confiabilidade das redes de emergência em ambientes de comunicação 6G altamente dinâmicos e de alta densidade. Desenvolver algoritmos de roteamento adaptativos, mecanismos de auto-organização e abordagens de gestão de recursos que levem em consideração as peculiaridades das redes de emergência.

Redes de sensores sem fio para deteção e resposta a desastres: Explorar a utilização de redes de sensores sem fio no contexto do 6G para deteção precoce de desastres naturais, como terremotos, incêndios florestais e inundações, e para fornecer informações em tempo real as equipas de resposta a emergências. Desenvolvimento de algoritmos de roteamento eficientes, técnicas de agrupamento de sensores e mecanismos de economia de energia para estender a vida útil das baterias dos sensores.

Integração de tecnologias emergentes em redes de emergência: Investigar como as tecnologias emergentes, como inteligência artificial, realidade aumentada e realidade virtual, podem ser integradas às redes de emergência baseadas em 6G.

Privacidade e segurança em redes de emergência 6G: Estudar os desafios de privacidade e segurança específicos enfrentados pelas redes de emergência no contexto do 6G e propor soluções adequadas. Análise de ameaças, e de fragilidades nos protocolos de autenticação e criptografia usados no 6G, e a investigação de técnicas de anonimização de dados que preservem a privacidade dos utilizadores das redes de emergência.

Bibliografia

- [1] BakariC, S.;Borzic, M.; BratkoviC, D.; e Grga, V.; *Tetra (terrestrial trunked radio)-technical features and application of professional communication technologies in mobile digital radio networks for special purpose services*. In 47th International Symposium ELMAR, 2005.
- [2] Aguiar, A.; Navarro, A.; e Salema, C.; *Estudo do funcionamento do SIRESP-Parte I*, Instituto de Telecomunicações 2017.
- [3] T. ETSI. 100 392-15 v1.4.1: *Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Voice plus Data (V+D)*; 2010–03.
- [4] Geraldes, C. J. B.; *Redes de Comunicações de Emergência e Segurança*, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Março de 2018.
- [5] Vitor, P.; SIRESP – Apresentação no 10.º Congresso do Comité Português da URSI "*Comunicações em cenários de segurança e emergência*", 2016.
- [6] SIRESP. Características da rede. Disponível em: <https://www.siresp.pt/rede-siresp/caracteristicas-da-rede/>. Acesso em: 28 de Novembro de 2022.
- [7] Marques da Silva, M.; *Cable and Wireless Networks: Theory & Practice*. 1st ed.; CRC Press: FL, USA, 2016; ISBN 9781498746816.
- [8] Marques da Silva, M.; Guerreiro, J.; *On the 5G and Beyond*. Appl. Sci. 2020, 10, 7091.
- [9] Marques da Silva, M.; *Multimedia Communications and Networking*. CRC Press, 2011.
- [10] Gashtasbi, A.; Da Silva, M. M.; Dinis, R.; e Guerreiro, J.; *On the Performance ofLDPC-Coded Large Intelligent Antenna System*. Appl. 2023, 10, 3390.
- [11] Ulema, M.; *Fundamentals of Public Safety Networks and Critical Communications Systems*, IEEE Press, 2019.
- [12] Commscept. MCx: *A new standard within Critical Communication*. Commscept. Disponível em: <https://www.commscept.com/mcx/>. Acesso em: 10 de dezembro de 2022.
- [13] Marques da Silva, M.; F. A. Monteiro, *MIMO processing for 4G and beyond: fundamentals and evolution*. Accessed: May 25, 2022.
- [14] Borges, D.; Montezuma, P.; Dinis, R.; e Beko, M.; *Massive MIMO Techniques for 5G and Beyond—Opportunities and Challenges, Electronics*. 2021, 10, 1667