

DIÓGENES SUSSEKIND DE SOUSA E SILVA

**REDE 5G PRIVADO APLICADO AO CENÁRIO CRÍTICO FERROVIÁRIO:
LEVANTAMENTO E ANÁLISE DE REQUISITOS**

Ouro Preto, MG

2022

DIÓGENES SUSSEKIND DE SOUSA E SILVA

**REDE 5G PRIVADO APLICADO AO CENÁRIO CRÍTICO FERROVIÁRIO:
LEVANTAMENTO E ANÁLISE DE REQUISITOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Especialização em Automação para Processos de Mineração, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Especialista *latu sensu* em Automação para Processos de Mineração.

Área de concentração: Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. D. Sc.: Pedro Henrique Gomes da Silva

Ouro Preto, MG

2022

Título: Rede 5G privado aplicado ao cenário crítico ferroviário: levantamento e análise de requisitos.

Classificação: () Confidencial () Restrita () Uso Interno (x) Pública

Informações Confidenciais - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

Informações Restritas - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

Informações de Uso Interno - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço.

Informações Públicas - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S58r

Silva, Diogenes Sussekind de Sousa e
Rede 5G privado aplicado ao cenário crítico ferroviário: levantamento e análise de requisitos. Diogenes Sussekind de Sousa e Silva... [et al.] - Ouro Preto, MG: ITV, 2022.

61 p.: il.

Monografia (Especialização latu sensu) - Instituto Tecnológico Vale, 2022.
Orientador: Pedro Henrique Gomes da Silva

1. Comunicação sem Fio. 2. LTE. 3. 5G. 4. Ambiente Ferroviário. I. Silva, Pedro Henrique Gomes da. II. Título.

CDD.23. ed. 629.82

Diógenes Sussekind de Sousa e Silva

**REDE 5G PRIVADO APLICADO AO CENÁRIO CRÍTICO FERROVIÁRIO:
LEVANTAMENTO E ANÁLISE DE REQUISITOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista *lato sensu* em [Automação para Processos de Mineração].

Orientador: Prof. D.Sc. Pedro Henrique da Silva Gomes

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em 14 de dezembro de 2022 pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. D.Sc. Pedro Henrique Gomes da Silva
Orientador – Ericsson Telecomunicações

Prof. D.Sc. Gustavo Pessin
Membro interno – Instituto Tecnológico Vale (ITV)

Prof. D.Sc. José Manuel Gonzalez Tubio Perez
Membro interno – Instituto Tecnológico Vale (ITV)

Os Signatários declaram e concordam que a assinatura será efetuada em formato eletrônico. Os Signatários reconhecem a veracidade, autenticidade, integridade, validade e eficácia deste Documento e seus termos, nos termos do art. 219 do Código Civil, em formato eletrônico e/ou assinado pelas Partes por meio de certificados eletrônicos, ainda que sejam certificados eletrônicos não emitidos pela ICP-Brasil, nos termos do art. 10, § 2º, da Medida Provisória nº 2.200-2, de 24 de agosto de 2001 (“MP nº 2.200-2”).



PROTOCOLO DE ASSINATURA(S)

O documento acima foi proposto para assinatura digital na plataforma Portal de Assinaturas Vale. Para verificar as assinaturas clique no link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/9BD1-6013-78CE-F3A8> ou vá até o site <https://vale.portaldeassinaturas.com.br:443> e utilize o código abaixo para verificar se este documento é válido. The above document was proposed for digital signature on the platform Portal de Assinaturas Vale . To check the signatures click on the link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/9BD1-6013-78CE-F3A8> or go to the Website <https://vale.portaldeassinaturas.com.br:443> and use the code below to verify that this document is valid.

Código para verificação: 9BD1-6013-78CE-F3A8



Hash do Documento

F22FEC6C1DF0FA1CCB50622A31BC09F5FDE7A60ED76EBD50A404F5C1CDF56C49

O(s) nome(s) indicado(s) para assinatura, bem como seu(s) status em 05/01/2023 é(são) :

- Pedro Henrique Gomes da Silva (Signatário) - em 05/01/2023 12:02 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: pedrohenriquegomes@gmail.com

Evidências

Client Timestamp Thu Jan 05 2023 12:02:02 GMT-0300 (Brasilia Standard Time)

Geolocation Latitude: -23.4886414 Longitude: -46.7313999 Accuracy: 16.000999450683594

IP 177.189.36.200

Hash Evidências:

A10A379AA515D93EB9EBED98CB935C2FA1DD4D1CBD950679814F21C3CECD0B0E

- José Manuel Gonzalez Tubio Perez (Signatário) - em 05/01/2023 09:59 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: Jose.Perez@itv.org

Evidências

Client Timestamp Thu Jan 05 2023 09:54:49 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

Geolocation Latitude: -22.9068467 Longitude: -43.1728965 Accuracy: 33301.721568807734

IP 177.27.15.81

Hash Evidências:

8E36FAD18BFB8715330FD22E0D50A5B5C8D376BB859C682EDADB272D37300494

- Gustavo Pessin (Signatário) - 939.084.900-49 em 04/01/2023 17:11 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: gustavo.pessin@itv.org

Evidências

Client Timestamp Wed Jan 04 2023 17:11:19 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

Geolocation Latitude: -19.9425127 Longitude: -43.9309641 Accuracy: 2730.1703972726614

IP 179.178.166.78

Hash Evidências:

21CA7AE781355F94F531632C94F67C2E3AEE43ADA6B358612E12D9A9B77FE36F



Aos meus Pais, Marcene Marques da Silva (*In Memoriam*) e Maria do Carmo de Sousa e Silva, tão dedicados e responsáveis diretos pela formação de meu caráter e valores.

À minha esposa, Vanda Lúcia C G e Silva, e aos meus Filhos (Felipe e Guilherme) e Filhas (Bruna, Clarice e Sofia Valentina), que sempre me motivam a buscar desafios.

À minha inesquecível avó materna, Josefa de Sousa Lima (*In Memoriam*), a quem sempre tenho como inspiração de bondade e alicerce familiar.

À minha Tia, Isméria Marques da Silva, que com sua experiência, importância no ensino e magnífica memória, moldou minha visão na forma de repassar o conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho de conclusão de curso é fruto de muita dedicação e comprometimento do tempo dividido pelo lado profissional, com sua carga horária e responsabilidades profissionais; do estudante que requer muita dedicação nos estudos, mas sempre mantendo uma chama de “curiosidade estudantil”; e do lado familiar, onde foi necessário conciliar aos estudos, a convivência com minha paciente esposa focando na formação de vida dos nossos filhos e filhas.

Chegando ao final deste trabalho, posso mencionar que, mesmo tendo passado por momentos em que os esforços mental e físico foram excessivos, sua conclusão é deveras prazeroso.

Portanto, venho expressar meu reconhecimento a todos que diretamente, e em apoio, enveredaram esforços na busca de um motivo comum que foi propiciar um ambiente de conforto e condições para seguir nesta jornada.

Aos meus familiares, paterno e materno, que sempre me incentivaram buscar e vencer desafios.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Pedro Henrique Gomes, pela sua paciência, tranquilidade, valioso conhecimento repassado, cujas contribuições possuem valor que vão além deste trabalho.

Aos meus colegas de turma do Curso de Especialização do ITV, onde juntos estabelecemos um forte vínculo de colaboração não só nas aulas, reforçado nas diversas conversas e troca de experiências profissionais estabelecidas ao longo do curso, cujo valor é único.

Aos professores do curso de Especialização do ITV, que lecionaram as suas respectivas disciplinas de forma plena, buscando facilitar nossa formação acadêmica, mantendo uma preocupação de aliar às nossas experiências profissionais.

Aos meus companheiros no ambiente de trabalho contribuíram fortemente para os momentos de tranquilidade que a mente e corpo precisavam.

E agradeço a Deus, a força suprema que impulsiona tudo e todos.

“Quase todos os homens são capazes de suportar adversidades, mas se quiser pôr à prova o caráter de um homem, dê-lhe poder.”

(Abraham Lincoln)

RESUMO

O avanço tecnológico vem cada vez mais viabilizando soluções de infraestrutura e equipamentos utilizados em plataforma de comunicações sem fio, permitindo que tenhamos um maior tráfego de serviços de dados em banda larga com confiabilidade, segurança e mobilidade ampliada.

E dentro do setor industrial, especificamente em ambiente ferroviários, que utiliza cenário de operação crítica, a mobilidade com adequada cobertura para os dispositivos são essenciais, e a solução sem fio torna-se necessária.

Este trabalho apresenta um breve estudo de como devemos tratar alguns aspectos e requisitos da plataforma de comunicação sem fio, especificamente utilizando tecnologia celular do tipo LTE – Long Terminal Evolution, buscando indicar algumas orientações na evolução para a 5ª Geração (5G).

Basicamente foi utilizado, neste trabalho, informações e documentações técnicas, bem como resultados de um estudo de caso em ferrovia de carga pesada que está utilizando o LTE como meio de comunicação em suas operações, mas ainda de forma pontual.

Como resultados, foram elencadas avaliações dos requisitos da comunicação sem fio, que podem ser consideradas quando do uso de plataforma LTE e/ou 5G, principalmente os fornecidos por operadoras de telefonia pública, para ambiente ferroviário crítico.

Os resultados nos permitem considerar que os requisitos comentados, funcionais e não-funcionais, são pertinentes e abrangem vários aspectos aplicáveis não só no ambiente ferroviário, mas em planta industrial seguindo, logicamente, as premissas que os sistemas embarcados da planta requeiram desta plataforma de comunicação sem fio, os quais devem ser tratados junto as operadoras fornecedoras da solução.

Palavras-chave: Comunicação sem fio. LTE. 5G. Ambiente Ferroviário.

Fase da Cadeia: Ferrovia.

ABSTRACT

Technological advances are increasingly enabling infrastructure solutions and equipment used in a wireless communications platform, allowing us to have greater traffic of broadband data services with reliability, security and increased mobility.

And within the industrial sector, specifically in the railway environment, which uses critical operation scenario, mobility with adequate coverage for the devices is essential, and the wireless solution becomes necessary.

This work presents a brief study of how we should deal with some aspects and requirements of the wireless communication platform, specifically using LTE - Long Terminal Evolution cellular technology, seeking to indicate some guidelines in the evolution to the 5th Generation (5G).

Basically, it was used, in this work, information and technical documentation, as well as results of a case study in a heavy load railway that is using LTE as a means of communication in its operations, but still in a punctual way.

As a result, evaluations of wireless communication requirements were listed, which can be considered when using LTE and/or 5G platform, especially those provided by public telephone operators, for critical rail environment.

The results allow us to consider that the commented requirements, functional and non-functional, are relevant and cover several aspects applicable not only in the railway environment, but in an industrial plant, logically following the premises that the embedded systems of the plant require from this communication platform. wireless, which must be dealt with by the operators providing the solution.

Keywords: Wireless Communication. LTE. 5G. Railway Environment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução das Tecnologias de Telefonia Celular.	20
Figura 2 – Diagrama de abrangência da EFC e RFSP.	22
Figura 3 – Exemplos de cenários para uso de comunicação via LTE e 5G.	23
Figura 4 – Topologia simplificada de um sistema móvel celular.	31
Figura 5 – Grupo de Aplicações para 5G.	33
Figura 6 – Arquitetura de Redes LTE e 5G.	37
Figura 7 – Diretrizes Gerais requeridos a um sistema 5G Privado.	38
Figura 8 – Arranjo de Antenas em sistemas LTE e 5G.	41
Figura 9 – Definições do 5G.	43
Figura 10 – Caminhões Fora de Estrada - Mina de Carajá.	44
Figura 11 – Topologia Básica LTE Caminhões Fora de Estrada - Mina CJ . . .	45
Figura 12 – Caminhões fora de estrada - Operação Autônoma.	45
Figura 13 – Estação Rádio Base LTE na Mina de Carajás.	46
Figura 14 – Rede LTE Privada em ambiente crítico - Vale-EFC.	47
Figura 15 – Integração de aplicações na Rede LTE-4G da Vale-EFC.	47
Figura 16 – Arquitetura de evolução LTE para 5G.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplo de parâmetros utilizados em 5G..	32
Tabela 2 – Informações resumidas do Leilão 5G no Brasil.	35
Tabela 3 – Requisitos da Estação Rádio Base	48
Tabela 4 – Largura de Banda downstream	48
Tabela 5 – Largura de Banda upstream.	49
Tabela 6 – Requisitos gerais do Sistema sem fio em uso na ferrovia.	53
Tabela 7 – Aspectos de Desempenho e Capacidade	54
Tabela 8 – Aspectos de Recursos.	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Backbone	Termo que indica a principal rede de transporte de dados.
Bauds	Unidade de medida de velocidade de um sinal de dados.
Beamforming	Técnica de processamento de sinal que melhora a transmissão de um sinal.
Big Data	Termo de Tecnologia da Informação, que se refere a grande volume de dados que precisam ser processados e armazenados.
CORE	Núcleo de Rede.
Cibersegurança	Conjunto de ações e técnicas, suportadas por hardware e software, para proteger ativos contra invasões indevidas.
DSS	Dynamic Spectrum Sharing (Compartilhamento Dinâmico de Espectro). Técnica de compartilhamento de espectros entre Redes LTE-4G e 5G.
Downlink	Termo utilizado para indicar o sentido de conexão de dados do servidor para o terminal.
EDGE	Enhanced Data Rates For GSM Evolution (Taxas de Dados Aprimoradas para a Evolução do GSM). Padrão utilizado em redes celulares.
Features	Funcionalidades desenvolvidas para atender determinada condição técnica.
Firmware	Conjunto de instruções operacionais que controla hardware de dispositivos.
GPRS	General Packet Radio Service (Serviço Geral de Radiocomunicação por Pacote). Padrão utilizado em redes celulares.
GSM	Global System for Mobile Communications (Sistema Global para Comunicações Móveis). Padrão utilizado em redes celulares.

Handoff	Técnica de redes sem fio onde ocorre a transição de terminal entre células.
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicas). Organização internacional formada por profissionais responsáveis por desenvolver padrões em telecomunicações.
IMT	International Mobile Telecommunications (Telecomunicações Móveis Internacional).
IP	Internet Protocol (Protocolo Internet). Comtempla um conjunto de requisitos de endereçamento e roteamento de dados na rede.
ITU-T	International Telecommunications Union (União Internacional de Telecomunicações). Setor de elaboração de recomendações para Telecomunicações.
Indústria 4.0	Conhecida como a 4ª Revolução Industrial, utiliza diversas tecnologias digitais tais como Inteligência Artificial, software especialista, robótica, computação em nuvem, resultando em soluções inovadores com eficiência e customização adequadas ao processo produtivo.
IoT	Internet of Things (Internet das Coisas). Baseia-se no conceito de permitir a conexão de qualquer dispositivo em rede, privada e/ou pública.
Jitter	Parâmetro que indica o atraso no envio de pacotes de dados.
KPI	Key Performance Indicator (Indicador Chave de Desempenho). Indicadores que representa o desempenho de um processo.
LTE-4G	Long Term Evolution - Rede Celular LTE em 4a. Geração.
Latência	Refere-se ao tempo necessário para que um pacote de dados seja transmitido de um ponto a outro.
MIMO	Multiple Input Multiple Output (Múltiplas Entradas Múltiplas Saídas). Estrutura de sensores (antenas) utilizados para transmissão e recepção de sinais, com melhor aproveitamento do sinal e redução de interferências.

MMS	Multimedia Messaging Service (Serviço de Mensagem Multimídia). Evolução do serviço SMS onde é possível enviar junto ao texto, imagens, áudios e vídeos.
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access (Acesso Múltiplo Não Ortogonal). Técnica de acesso digital, em redes celulares, que permite alocar diversos usuários por alocação de recursos não ortogonais.
NR-NSA	New Radio - Non Standalone - Reutilização da Rede 4G para uso do 5G.
Network Slicing	Fatiamento de Rede. Permite que em uma infraestrutura de rede física se compartilhe múltiplas redes lógicas.
Ping	Método para medir o tempo mínimo de envio e recebimento de dados.
QoS	Quality Of Service (Qualidade de Serviço). Parâmetro de avaliação de desempenho de serviços ofertados, podendo definir, por exemplo, a prioridade de tráfego.
RAN	Radio Access Network (Rede de Acesso via Rádio). Composta de infraestrutura de rádio e sistema irradiante onde os usuários serão conectados à rede por interface aérea.
RTK	Real time Kinematic (Posicionamento Cinemático em Tempo Real). Técnica de posicionamento relativo, em tempo real, com transmissão de dados de correção instantânea de sinais.
RTT	Round Time Trip (Tempo de Ida e Volta). Parâmetro que quantifica o tempo total de ida e volta de um sinal ao percorrer determinado trajeto.
Rede Multiserviços	Rede que permite o tráfego de vários tipos de serviços que utilizam a mesma infraestrutura.
SDH	Synchronous Digital Hierarchy (Hierarquia Digital Síncrona). Padrão de transmissão digital em altas taxas de bits, utilizam, preferencialmente, infraestrutura óptica, requer sinal de sincronismo.

SMS	Short Message Service (Serviço de Mensagens Curtas). Plataforma de envio de mensagens de texto com tamanho limitado.
SSA	Service and System Aspects (Aspectos de Sistemas e Serviços). Associado a projetos de arquitetura e tráfego de redes em sistemas celulares.
Throughput	Taxa associada a quantidade de dados transferidos em uma rede.
URLLC	Ultra-Reliable and Low-Latency Communications (Comunicação ultra confiável de baixa latência).
Uplink	Termo utilizado para indicar o sentido de conexão de dados do terminal para o servidor.
WI-FI	Protocolo de comunicação internet sem fio.
Wireless	Tecnologia de comunicação sem fio, como por exemplo bluetooth, infravermelho, wi-fi.
eMBB	enhanced Mobile Broadband (Banda larga móvel extra veloz). Serviço que permite altas taxas de download.
mMTC	massive Machine Type Communications (Comunicação massiva do tipo máquina). Serviço de conectividade para milhares de dispositivos.
mmWave	Millimeter Wave (Ondas Milimétricas). Faixa de frequências entre 24GHz - 60 GHz a serem utilizadas pelo 5G.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Contextualização e motivação.	21
1.2	Justificativa	23
1.3	Objetivo	24
2	CONCEITOS RELACIONADOS.	26
2.1	Conceitos e parâmetros de desempenho	28
2.2	A tecnologia 5g ..	30
2.3	Aspectos da rede privada	35
2.3.1	Aspectos considerados na tecnologia 5g privada. . .	39
2.3.2	Arranjos de antenas	40
2.4	Requisitos e parâmetros funcionais do 5g . . .	42
3	ESTUDO DE CASO - FERROVIA DE CARGA PESADA	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1	Desafios na implantação do 5g – cenário de migração	50
4.2	Requisitos a serem suportados pelo sistema de comunicação sem fio	51
4.2.1	Requisitos funcionais.	52
4.2.2	Requisitos não-funcionais para uso de tecnologia e sistemas críticos . . .	54
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	58
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico e desenvolvimento fabril, impulsionado pela definição de parâmetros e requisitos de desempenho, bem como a implementação de novas topologias em redes de telecomunicações, permitiu que se tornasse viável proporcionar meios de comunicação requerido pelos variados ambientes tecnológico, visando atender as especificidades dos ambientes industriais.

Alavancar a Indústria 4.0, suportada pela Internet das Coisas (IoT), requer adequar as redes de comunicação operacionais e corporativas, sendo fundamental no novo contexto o uso das plataformas de comunicação sem fio (wireless) que apresentam características vantajosas de flexibilidade, facilidade e tempo de implementação, mobilidade dos terminais.

Mas os conceitos de convergência para ambientes críticos de automação devem ser tratados de forma diferenciada em seus aspectos de segurança (hardware e software), padronizações, parâmetros específicos de desempenhos.

Considera-se o sistema de Telecomunicações como uma plataforma essencial a ser considerado para suportar a nova exigência de requisitos operacionais, estando associado ao projeto e fabricação de equipamentos especialistas que disponibilizam funcionalidades específicas, interfaces físicas e protocolos de comunicação bem definidos.

As comunicações sem fio, especificamente tecnologias empregadas em sistemas celulares, evoluíram ao longo dos anos em seus padrões de transmissão. O que antes se tratava apenas como serviço de voz, passou a atender a necessidade de transporte de dados com a premissa de mobilidade, segurança e largura de banda.

A evolução da tecnologia e da indústria de componentes e materiais, contribuiu na melhoria de métricas de qualidade da comunicação, tais como: latência, confiabilidade, taxa de dados e largura de banda, considerando o ambiente e a mobilidade dos dispositivos.

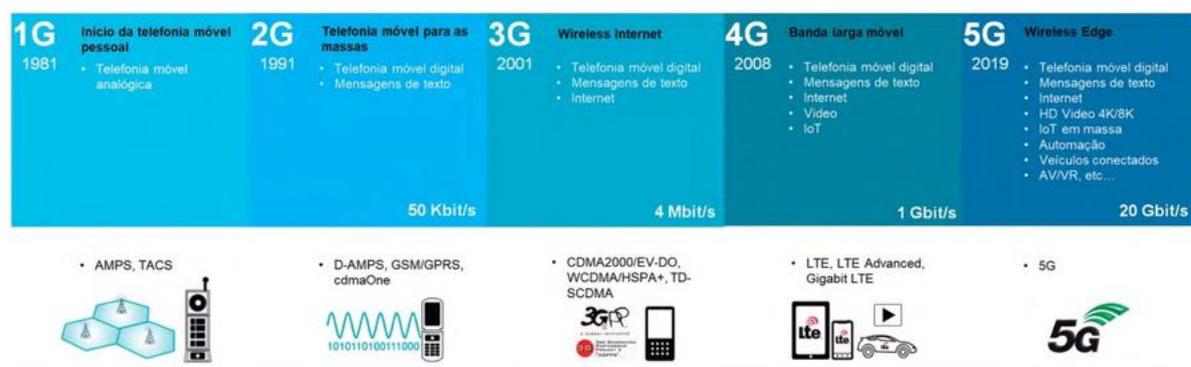
Mas é importante tratar as vantagens, desvantagens, robustez, requisitos técnicos exigidos pela convergência, disponibilidade, maturidade tecnológica, dentre outras características requeridas pelo ambiente onde a tecnologia móvel seja empregada.

Também é importante comentar, e aplicável a este trabalho, que os maiores fornecedores de solução com mobilidade, utilizando plataformas de comunicação celular, são as operadoras de telefonia pública, que buscam atender aos requisitos de plantas privadas, incluindo ambientes industriais críticos.

Surgiram diversos padrões de comunicação celular, conhecidos como geração (G - Generation), que evoluiu conforme as diversas épocas, cenários industriais e demanda de uso.

A Figura 1 mostra um resumo da evolução das redes de telefonia celular, desde a Tecnologia 1G (1a. geração) até a 5G (5a geração) (ROBERT SPADINGER, 2021).

Figura 1 – Evolução das Tecnologias de Telefonia Celular.



Fonte: Robert Spadinger - Nota Técnica 79 – IPEA.

Para este trabalho, busca-se tratar do uso do sistema de comunicações móveis celular de quinta geração, 5G, o mais recente padrão tecnológico para serviços móveis, que atende aos requisitos necessários para suportar o cenário industrial dentro dos novos conceitos como Internet das Coisas e aprendizagem de máquina em tempo real, mas voltados para ambiente crítico de ferrovia.

Face às especificidades do ambiente crítico, aqui direcionado ao ferroviário, considera-se como referência o uso de uma tecnologia por um tempo médio de 15 a 20 anos, considerado como maturidade operacional.

Não diferente de outros campos de aplicação, o ambiente ferroviário de carga pesada, cenário deste estudo, estará sendo contemplado com essa plataforma de comunicação em 5G, mas tem em seu requisito de criticidade a necessidade de ser suportado por um ambiente tecnológico robusto e com alta disponibilidade, onde a plataforma de telecomunicações é fundamental nesse processo crítico.

Especificamente neste trabalho será abordado no ambiente da ferrovia de carga pesada da Estrada de Ferro Carajás, que possui um sistema robusto de telecomunicações, baseado em tecnologia digital SDH (Synchronous Digital Hierarchy), que suporta toda a operacionalidade da ferrovia, integrando vários sistemas operacionais e administrativos. Está sendo tratado a inclusão de várias soluções integradoras dentro de conceito de Indústria 4.0, mas que deverá permitir o novo contexto de comunicação no padrão 5G convivendo em uma mesma plataforma de comunicação.

Vale ressaltar que este trabalho pretende colaborar com conceitos teóricos dentro desse atual e tão debatido assunto, o de comunicação sem fio em ambientes críticos, já possuindo várias bibliografias, trabalhos acadêmicos, industriais e em pesquisa, mas colaborando seu emprego em um contexto mais técnico e voltado para ambientes ferroviários que merece ser mais bem explorado.

1.1 Contextualização e motivação

A Estrada de Ferro Carajás (EFC), é uma ferrovia de carga pesada que possui 892 quilômetros de extensão, ligando a maior mina de minério de ferro a céu aberto do mundo, em Carajás, no sudeste do Pará, ao Porto de Ponta da Madeira, em São Luís (MA).

Por seus trilhos, são transportados minério de ferro, soja e grande parte do combustível que abastece o Sudoeste do Maranhão e sudeste do

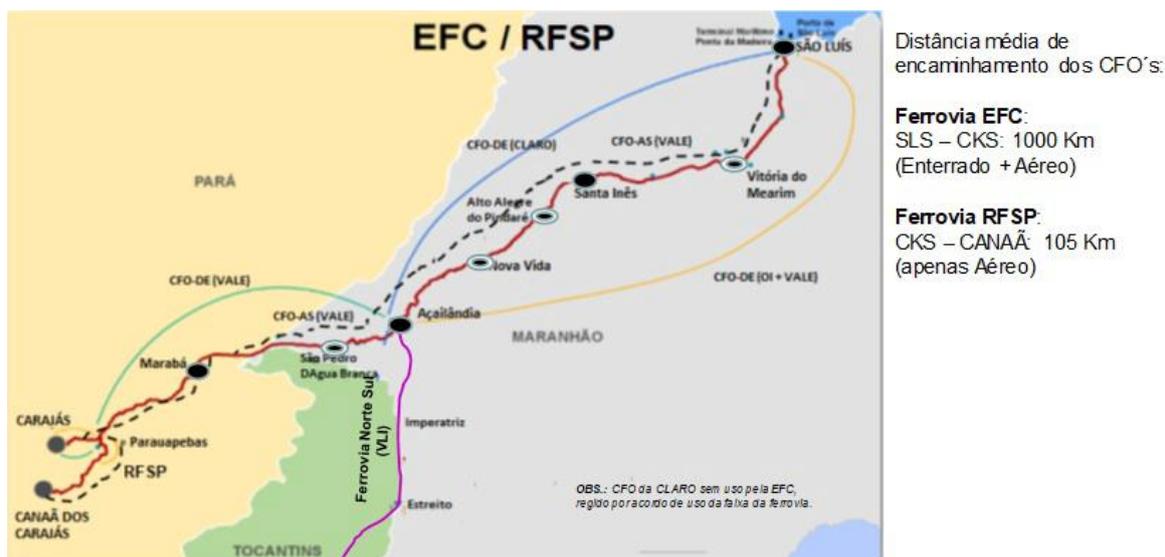
Pará, também circula um trem de passageiros que transporta em torno de 320 mil passageiros (2019) entre os estados do Maranhão e Pará.

Com relação ao trem de minério de ferro, circulam cerca de 35 composições, simultaneamente, cada uma composta de 4 Locomotivas e 330 vagões (104 toneladas, cada), com comprimento total em torno de 3,3 quilômetros de extensão.

O RFSP constitui um complemento à Linha Tronco (LT) da EFC, com uma extensão de aproximadamente 100 Km, entroncada com a linha principal da EFC, possuindo 4 túneis ferroviários em seu percurso.

Na Figura 2 apresentamos um diagrama resumido em que se representa a localização da ferrovia EFC e o RFSP, como orientação da abrangência da ferrovia, onde utilizamos as informações do “Case” com LTE-4G considerado neste trabalho.

Figura 2 – Diagrama de abrangência da EFC e RFSP.



Fonte: Eletroeletrônica da VALE S.A. - EFC.

Este trabalho mesmo sendo direcionado ao ambiente de ferrovia, utilizando como exemplo o “Case” de sucesso em operação na Mina de Ferro, certamente pode ser utilizado como referência a outras plantas com cenário operacional similar.

A motivação deste trabalho é buscar ampliar a solução de comunicação LTE-4G utilizada na operação de caminhões autônomos da Mina de Ferro, que possui a característica de ambiente crítico concentrado em uma

cobertura restrita, tratando dos requisitos voltados à ferrovia, que possui uma demanda operacional em larga extensão geográfica e com variados equipamentos fixos e móveis que requerem comunicação constante.

Além do uso do LTE-4G, este trabalho busca levantar as informações de requisitos tecnológicos voltados para avançar para uso futuro da plataforma de comunicação para 5G, permitindo avanços relevantes no sensoriamento de acessórios, dispositivos, equipamentos e terminais diversos, de forma mais integrada.

Como exemplo de cenários em ambientes críticos que estão sendo considerados, além dos já tradicionais na forma de vídeo e sensoriamento remoto, mostramos alguns outros exemplos na Figura 3.

Figura 3 – Exemplos de cenários para uso de comunicação via LTE e 5G.



Fonte: Eletroeletrônica da VALE S.A. - EFC.

1.2 Justificativa

É notório que os assuntos, Indústria 4.0, Internet das Coisas, tecnologias emergentes (óptica e sem fio), cibersegurança, tecnologia 5G, Software especialista, Inteligência Artificial, mobilidade e gestão de dados operacionais e corporativos em tempo real, estão atrelados à disponibilidade e confiabilidade das informações aos usuários.

Ao mesmo tempo, em plantas industriais com processos críticos, aqui definido como o cenário de ferrovia, requerem atentar para requisitos operacionais atrelados a segurança ferroviária: segurança física, disponibilidade, tolerância a falhas e manutenção preditiva eficiente.

Mas a evolução tecnológica veio permitir que se disponibilize dados em tempo real e que possam ser analisados de forma analítica ou integrados a tomadores de decisão, fortalecendo os controles de processos e as manutenções preditivas, bem como a evolução tecnológica no processo industrial envolvido.

A evolução tecnológica no cenário em ferrovias de cargas pesadas, onde a mobilidade e necessidade do tráfego de dados, vídeo e voz, é crescente, tem nos requisitos de cobertura e baixa latência a necessidade de se possuir uma infraestrutura adequada, e apresenta-se como um ambiente onde a tecnologia 5G surge como uma solução viável na comunicação de dados.

Para tal deve se estabelecer a análise e estudos de integração tecnológica nas seguintes fases: Arquitetura, Metodologia, Projetos, Infraestrutura, Manutenção e Ativos, observando os riscos e o quanto de integração será necessária, na busca de ganhos ao processo produtivo e de gestão.

O estudo buscou levantar aspectos importantes a serem considerados para viabilizar o 5G no cenário aqui mencionado, considerando aspectos técnicos, operacionais, tecnológicos e de processo, sendo necessário estabelecer requisitos que permitam conceber a evolução gradual de uma planta industrial ou ferroviária, de forma completa ou parcial, tratando cenários de investimentos e recursos necessários.

1.3 Objetivo

O trabalho tem a intenção de tratar os aspectos técnicos aplicados a tecnologia móvel 5G com os requisitos técnicos considerados no ambiente ferroviário, cujo licenciamento de trens utiliza aspectos de criticidade, mas

focando nos pontos de atenção dos cenários desta solução de comunicação voltada para plantas industriais que o requeiram.

O trabalho está inserido dentro da disciplina de telecomunicações, com soluções aplicáveis a esses ambientes na ferrovia da Estrada de Ferro Carajás, caracterizada como ferrovia de carga pesada, onde a implementação da comunicação de dados em 5G deverá estar sendo considerado nas fases de: Arquitetura, Metodologia, Projetos, Infraestrutura, Manutenção de Ativos.

O objetivo geral deste trabalho é elaborar um guia orientativo com alguns métodos necessários a serem considerados por uma equipe técnica quando da necessidade de atualização tecnológica do meio de comunicação de uma planta, utilizando a comunicação móvel 5G, no seu todo ou em sua parte, a ser utilizada em ambiente ferroviário.

Neste trabalho, foram tratados os seguintes objetivos específicos:

- Analisar migração de arquitetura do LTE-4G para o uso de 5G privado no cumprimento dos requisitos.
- Especificar requisitos necessários para a aplicação do 5G na ferrovia e como eles podem ser cumpridos pelas redes públicas e privadas.

2 CONCEITOS RELACIONADOS

Este trabalho tem como cenário o ambiente ferroviário, mas entende-se que poderão ser tratados aspectos utilizados na indústria de uma forma geral.

As ferrovias, não diferente da indústria, precisam incluir em seus projetos de infraestrutura de comunicação de dados, os aspectos de digitalização que influenciam nos aspectos de tratamento de dados, uso de sistemas analíticos, novos parâmetros de manutenção, inteligência artificial, dentre outros aspectos propiciados pela digitalização.

Para a implementação destas redes no ambiente ferroviário, onde coexistem com os aspectos de segurança no tratamento de dados, busca-se utilizar tecnologias e equipamentos com padrões mais rígidos, alguns customizados, para atender aos requisitos da tecnologia em favor do ambiente aqui mencionado:

- a) Elevado *throughput* (com características de adaptabilidade).¹
- b) Altíssima densidade de conexões e interconexões de dispositivos.
- c) Baixíssima latência na conectividade, focando o tráfego em “tempo real”.
- d) Flexibilidade no tráfego de serviços diversos.
- e) Otimização da relação cobertura x quantidade de acessos simultâneos.

A tecnologia de comunicação celular já está em uso nas plantas industriais, incluindo o ambiente ferroviário, com a disponibilização de tecnologia específica de transmissão de dados em redes celulares, além da evolução das técnicas de tratamento de dados e equipamentos digitais sofisticados, aliados aos softwares especialistas, verifica-se a busca de ampliar a utilização de tecnologia celular para otimização da infraestrutura.

O uso do LTE – Long Term Evolution, na forma da quarta geração (4G), resultaram na elaboração de arquiteturas de redes robustas desta plataforma, espectro de frequências, antenas inteligentes (MIMO - Multiple Input Multiple Output), padronização de interfaces, solução de redes e

¹ Com relação a unidade de medida de transferência, pode ser: dados (bps, Kbps, Mbps, Gbps); pacotes (“pps” - pacotes por segundo)

aplicações, sendo uma evolução das redes celulares anteriores (onde o foco era serviços de voz e dados em baixa velocidade).

As tecnologias celulares, a partir da 3G até a 4,5G já utilizadas em ambientes industriais, incluindo o ferroviário, implementaram algumas melhorias na rede de comunicação, sendo que o 5G permitirá atender a requisitos mais avançados e necessários para a segurança de redes críticas em atendimento aos serviços atuais e futuros (dispositivos diversos móveis se comunicando em “tempo real”), adaptando-se aos processos de transformação digital.

É importante mencionar que para a implantação do 5G é possível realizar aproveitando-se da infraestrutura da tecnologia LTE-4G com as devidas adequações em equipamentos, infraestrutura de RF e plano de frequências definido, sendo vantajoso nos custos associados à sua implementação.

Os principais aspectos no ambiente ferroviário buscam permitir:

- a) Uniformizar a digitalização e integração da plataforma de comunicação ferroviária;
- b) Diversificar os serviços ferroviários ampliando o atendimento fim-a-fim;
- c) Flexibilizar a capacidade de transmissão, permitindo a variedade de serviços (dinâmicos);
- d) Ampliar a interconectividade entre plataformas de processamento de dados;
- e) Gerir, fim-a-fim, a capacidade de tráfego de dados, com uma infraestrutura adaptável e compatível com as novas funcionalidades das redes de comunicação.

Novas tecnologias desenvolvidas focam a conexão imediata e volumosa de dispositivos, que se interconectam das mais diversas formas, propiciando o uso na Internet das Coisas (IoT), Computação em Nuvem, acesso a Big Data, dentre outras plataformas de dados.

Tais aspectos passaram a ser considerados nos projetos de redes de comunicação das ferrovias, bem como na evolução das redes de dados mediante a necessidade de compatibilidade e evolução, onde desafios como

a tecnologia de veículos autônomos no ambiente ferroviário é uma realidade a ser dominada.

2.1 Conceitos e parâmetros de desempenho

Aqui vamos mencionar alguns conceitos relacionados ao tema, para reforço na compreensão de algumas terminologias de parâmetros e unidades de medidas.

O Bit que é a menor unidade de dados no formato binário, pois assume valor de 1 ou 0.²

O Byte é uma unidade de medida utilizada para representar o tamanho de um arquivo de dados.³

A taxa de dados, em bits por segundo (bps), indica a quantidade de dados enviados por unidade de tempo, tendo algumas de suas variações como: kilobit (kb), Megabit (Mb), Terabit (Tb), etc.

A taxa de sinal, em bauds por segundo, indica o número de elementos do sinal enviados por unidade de tempo.

Em sistemas de comunicação o objetivo é sempre ter uma alta taxa de dados e uma baixa taxa de sinal, resultando em alta velocidade de transmissão utilizando a menor largura de banda possível.

O termo largura de banda é um parâmetro que indica a quantidade de dados que é transferida de um ponto a outro, em um determinado período contínuo, normalmente quantificada em taxa de dados na forma de bytes/segundo.

Com o advento do serviço de streaming a largura de banda é um dos principais parâmetros na definição da capacidade de armazenamento do “buffer”, bem como na infraestrutura de processamento.

A largura de banda está associada a capacidade do canal de transmissão cuja forma de utilizar um meio físico definem:

² Usualmente representa-se o Bit com a letra “b” minúscula

³ Usualmente representa-se o Byte com a letra “B” maiúscula.

- Banda Base: onde um único canal é utilizado para transportar toda a largura de banda, onde o sinal ocupa frequência de zero até uma frequência máxima definida.
- Banda Passante: o sinal ocupa uma faixa de frequências em torno de um sinal de portadora, utilizado em canais óptico e sem fio (wi-fi).
- Banda Larga: onde a largura de banda a ser transmitida é dividida em múltiplos sinais por canais distintos, simultaneamente.

Teoricamente a largura de banda efetiva de um sinal é finita, mesmo considerando que um sinal não periódico apresenta sua largura de banda contínua dentro de um intervalo infinito. Ou seja, de forma prática e real a largura de banda é limitada.

A quantidade de dados real que podemos transmitir dentro de uma largura de banda, é definido como throughput, medido em bits por segundo (bps), ou pacotes por segundos (pps), que tem sua relação com a largura de banda disponível. Quanto maior a capacidade de transmitir dados em uma largura de banda mínima, define-se o desempenho deste canal de comunicação.

A Latência, algumas vezes chamado de “retardo”, é um dos principais parâmetros que define o desempenho da rede de dados, onde sua composição é definida pela união de alguns componentes relacionados ao tempo que somados vão compor a latência da rede. Os principais componentes que formam o parâmetro Latência, são: tempo de propagação do sinal (t_p), tempo de transmissão (t_t), tempo de enfileiramento (t_f) e o retardo de processamento (r_p), ou seja:

$$L = t_p + t_t + t_f + r_p$$

O Round Time Trip (RTT) é a latência bidirecional, que define o ping em testes de comunicação de máquinas de dados.

O Jitter, indicador importante de desempenho de uma rede de comunicação, está associado a variação na latência em uma rede indicando o atraso nos pacotes recebidos, e resultando em atraso na entrega, verificado em testes de “ping”.

Quando da verificação dos jitter deve-se avaliar a ocorrência de interrupção no tráfego de dados, dentro da conexão estabelecida indicando a qualidade da rede. Então a partir da variação constante em resultados dos testes de ping's pode-se verificar as variações ocorridas na rede indicando ter problemas de jitter. Essa variação de tempo provocará alterações de dados conforme o tipo de serviço e sua sensibilidade a esse tipo de atraso.

Em sistemas 5G onde ocorre o transporte de sinais de áudio, vídeo e dados em alta velocidade, os pacotes serão afetados pelo jitter, sendo que o impacto será definido conforme as aplicações.

O Jitter acima de 30ms impacta o serviço de forma relevante, percebido pelo usuário. Ou seja, quanto menor o jitter, mais robusto e eficiente é o tráfego de dados.

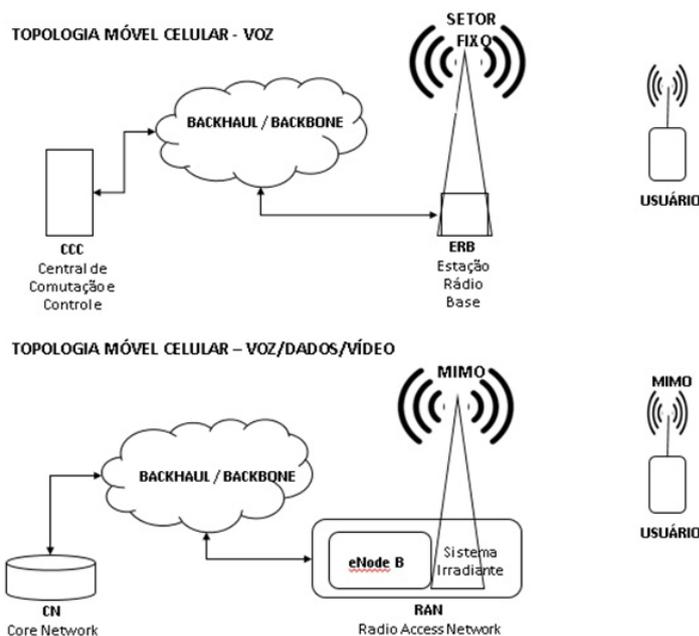
O OFDM (Multiplexação por Divisão Ortogonal de Frequência), permite otimizar o espectro de frequência melhorando a condição de degradação de sinal devido às atenuações por multicaminhos.

2.2 A tecnologia 5G

De uma forma simplificada a arquitetura de uma rede móvel de comunicação celular, que evoluiu de um conceito de comunicação de voz móvel para uma comunicação de dados móvel (voz - dados e vídeo), mantém uma topologia similar, mesmo tendo evoluído nos conceitos e implementações mais avançadas, principalmente na parte de sistema irradiante.

Na Figura 4 mostra-se um diagrama simplificado da evolução da topologia de comunicação celular.

Figura 4 – Topologia simplificada de um sistema móvel celular.



Fonte: Eletroeletrônica da EFC.

Com a primeira geração de rede móveis (padrão analógico AMPS - Advanced Mobile Phone System), Redes 1G, o atendimento focava em serviços de voz. Com a evolução da rede celular para a segunda geração (2G), migrou-se da tecnologia analógica para digital, permitindo mais estabilidade e imunidade a ruídos, mas ainda tendo como principal serviço, a VOZ.

As Redes evoluíram para 2,5G(GPRS), 2,75G(EDGE), 3G (GSM), onde as tecnologias envolvidas de multiplexação, técnicas de múltiplo acesso, padronizações, espectro de frequências, antenas, etc, facilitaram a transmissão de dados por interface aérea com maior taxa de transmissão.

Com as evoluções posteriores das Redes Celulares, 3G, 4G e 5G, viabilizou-se ainda mais o acesso de imagens, áudio, vídeo, multimídia, em alta velocidade, melhorando a cobertura e maior quantidade de usuários por conexão.

O 5G teve seus requisitos iniciais definidos em 2017 através do International Mobile Telecommunications (IMT), do ITU, com criação do

padrão IMT-2020 tratando dos aspectos de rede, interface de rádio, circuitos e serviços.⁴

Como os outros sistemas de comunicação sem fio, o 5G também possui requisitos de desempenho e indicadores de desempenho, KPI, definidos dentro dos cenários aplicáveis de operação, manutenção e administração.

Os requisitos básicos para o acesso de rádio definidos pelo IMT-2020, estão definidos pelos parâmetros descritos na Tabela 1:

Tabela 1 – Exemplo de parâmetros utilizados em 5G - IMT-2020.

CAPACIDADE	DESCRIÇÃO	REQUISITOS 5G	CENÁRIO DE USO
Pico de <i>downlink</i> Taxa de Dados	Taxa de dados máxima que a tecnologia pode suportar.	20 Gbit/s	eMBB
Pico de <i>uplink</i> Taxa de Dados	Taxa de dados máxima que a tecnologia pode suportar.	10 Gbit/s	eMBB
Taxa de dados de <i>downlink</i> do usuário	Taxa de dados em ambiente de teste urbano denso 95% do tempo.	100 Mbit/s	eMBB
Taxa de dados de <i>uplink</i> do usuário	Taxa de dados em ambiente de teste urbano denso 95% do tempo.	50 Mbit/s	eMBB
Latência	Contribuição da rede de rádio para o tempo de viagem de pacote.	4 ms	eMBB
Latência	Contribuição da rede de rádio para o tempo de viagem de pacote.	1 ms	URLLC
Mobilidade	Velocidade máxima para requisitos de handoff e QoS.	500 km/h	eMBB/URLLC
Densidade de conexão	Número total de dispositivos por unidade de área.	10 ⁶ /km ²	mMTC
Eficiência energética	Dados enviados/recebidos por unidade de consumo de energia (por dispositivo ou rede).	Igual ao 4G	eMBB
Capacidade de tráfego na área	Tráfego total na área de cobertura	10 Mbps/m ²	eMBB
Eficiência de espectro de <i>downlink</i> de pico	Taxa de transferência por unidade de largura de banda sem fio e por célula de rede.	30 bit/s/Hz	eMBB

Fonte: <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2410-2017>

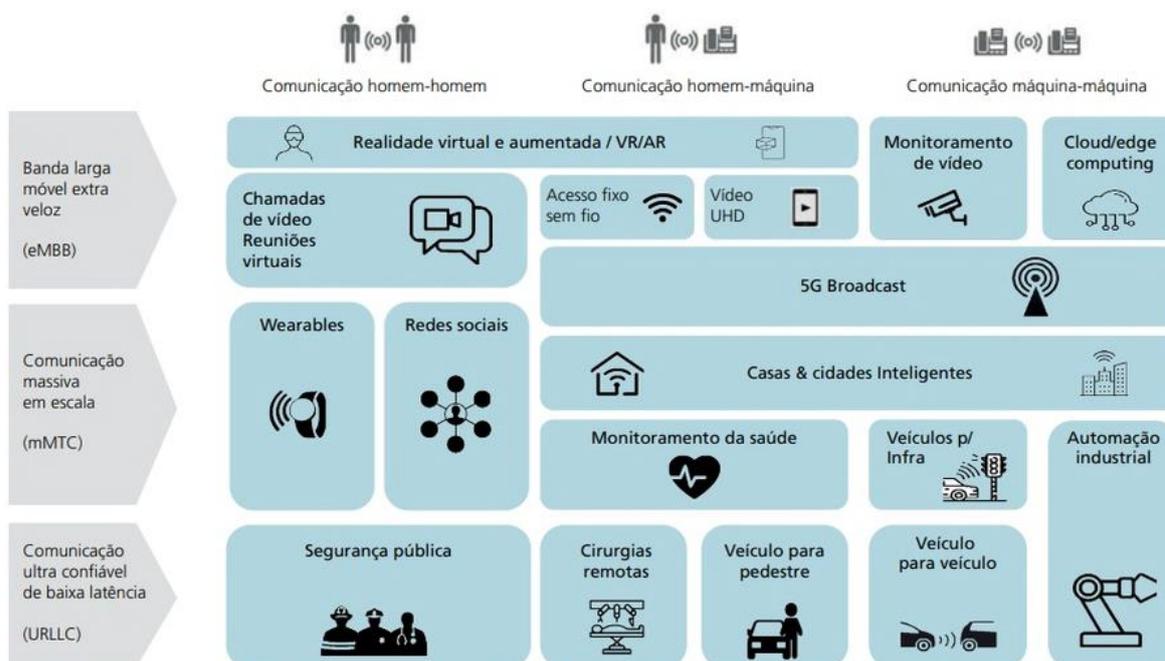
⁴ <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2410-2017>

Na coluna CENÁRIO DE USO, definem-se tipos de aplicações padronizadas (ROBERT SPADINGER, 2021):

- Banda larga móvel extra veloz (eMBB - enhanced Mobile BroadBand): utiliza da eficiência espectral para melhoria no tráfego de dados, cuja cobertura adequada é necessária.
- Comunicação ultra confiável de baixa latência (URLLC - Ultra-Reliable Low-Latency Communications): propicia latência muito baixa e alta confiabilidade.
- Comunicação massiva do tipo máquina (mMTC - massive Machine Type Communications): comunicação massiva indoor, suportando alta densidade de terminais em larga cobertura, usual para IoT.

Na Figura 5 mostram-se aplicações relacionadas aos cenários de uso padronizados mencionados na Tabela 1.

Figura 5 – Grupo de Aplicações para 5G.



Fonte: Robert Spadinger - Nota Técnica 79 – IPEA.

A tecnologia de 5G possui sua abrangência nos aspectos de rede envolvendo: CORE IP, circuitos de transporte, interface aérea de acesso via

rádio (RAN – Radio Access Network) e a infraestrutura envolvendo rede de fibras óptica (*backbone* e meios de transmissão digital).

No que se refere à interface aérea de acesso, em que o 5G permite alto throughput, pode ser considerada a evolução da infraestrutura de transmissão, aproveitando o parque de funcionamento das plataformas LTE-4G, incluindo as interfaces aéreas, quando compatíveis.

As redes de comunicação, basicamente, envolvem dois tipos de arquiteturas: com fio e sem fio. As condições de suas infraestruturas definem sua eficiência com relação a dois dos principais parâmetros de desempenho: alta taxa de dados e a baixa latência.

Estabelecer uma topologia de rede e diagrama de situação é importante para definição do quanto uma solução de comunicação deve atender os requisitos de “sistema” e não apenas de interligar um conjunto de equipamentos. Além disso, permite demonstrar a forma de atendimento da plataforma de comunicação com os equipamentos de campo e de centro, sendo importante para definição da solução no contexto de “plataforma” e não apenas ter a função de interligar um conjunto de equipamentos.

O 5G por permitir o uso de uma larga faixa de frequências, incluindo acima de 24GHz, possui a vantagem de trafegar altas taxas de dados, permitindo flexibilizar bandas de transmissão, o que não ocorre com o LTE que é uma solução com algumas outras vantagens, mas com atuação de frequências até 6 GHz.

No Brasil o 5G foi leilado para uso nas seguintes faixas:

- 700 MHz e 2,3 GHz: distribuir 5G e melhoria na cobertura 4G;
- 3,5 GHz: distribuir 5G com capacidade máxima de banda.
- 26 GHz: distribuir 5G em banda fixa em locais densos com pouca área de cobertura.

A Agência Nacional de Telecomunicações - Anatel, enveredou esforços antecipados para realizar a limpeza do espectro de frequências, principalmente com relação ao utilizado por TV's via satélite, faixa de 3,5 GHz, para evitar interferências por conta da entrada do sistema 5G.

Na Tabela 2 mostra-se o resumo das faixas, velocidade, cobertura e aplicações consideradas pela Anatel com relação ao leilão de 5G no Brasil.

Tabela 2 – Informações resumidas do Leilão 5G no Brasil (Ofertas da 1.ª rodada de licitação).

FAIXAS	OFERTA (MHz)	LOTES	VELOCIDADE	COBERTURA	APLICAÇÕES
700 MHz	20	1 Nacional (10+10MHz)	100 Mbps	Até 20 Km	Lançado para o 4G, mas compatível com 5G e aplicações IoT. Possui sinal de amplo alcance.
2,3 GHz	90	16 Regionais	500 Mbps	Até 1 Km	Utilizado no 4G, mas tende a atender demanda por 5G em áreas urbanas.
3,5 GHz	400	4 Nacionais e Regionais	1 Gbps	Até 500 m	Oferta de 5G para usuários finais smartphones e para a Indústria IoT.
26 GHz	3200	5 Nacionais e 21 Regionais	1 Gbps	Até 1 Km (sem mobilidade)	Alta velocidade, mas com mobilidade restrita. Potencial para cliente residencial e corporativo.

Fonte: Conexis Brasil e Anatel.

2.3 Aspectos da rede privada

Com a evolução das redes LTE (LTE Advanced), favorecidas por uso de recursos de eficiência espectral, resultando em melhoria no desempenho de tráfego e dos parâmetros de throughput e latência, passaram a ser utilizadas como meio de comunicação sem fio de ampla cobertura em redes do tipo privadas (5G AMERICAS, 2020).

As redes privadas em transporte ferroviário têm que cumprir requisitos bem elaborados e específicos, tendo valores de referência definidos pela criticidade definida na plataforma a ser suportada pela rede. Pode-se citar alguns parâmetros tais como: Latência, throughput, QoS, Disponibilidade, dentre outros, algumas vezes obtidos pela composição de resultados.

Os aspectos de privacidade, resiliência e cibersegurança da rede, bem como o uso de tecnologia consolidada também são importantes. Tudo isso, associado a um ambiente de mobilidade contínua dos equipamentos.

É importante definir e estabelecer os requisitos de uma plataforma de transmissão. Muitas perguntas surgem, mediante o uso de uma tecnologia não tão usual em um processo que requeira atender os novos indicadores de desempenho, mas que suporte os indicadores “legados”.

Algumas perguntas ajudam no processo de decisão da robustez, disponibilidade, flexibilidade e tempo de operação dentro da linha de criticidade estabelecida e necessária ao processo ferroviário.

Dentre algumas questões mais específicas, temos:

- Requisitos definidos considerando os aspectos de confiabilidade da rede.
- Tecnologia segura e robusta com relação à infraestrutura e equipamentos diversificados.
- Gerenciamento completo da plataforma, incluindo a disciplina de manutenção com diagnósticos antecipados.
- Estabelecimento da sistemática de atuação junto à Anatel.
- Definição de licenciamento ou compartilhamento de espectro de frequências.
- Esclarecer requisitos técnicos e operacionais de referência que definem a caracterização de “alto desempenho” da rede.
- A caracterização do ambiente crítico, bem como atender a “mobilidade” sem comprometimento da disponibilidade e confiabilidade da rede.
- Espectro licenciado, compartilhado ou próprio.
- Imunidade a interferência, haja visto a densidade de conexões por radiofrequências envolvidas em regiões urbanas.

Utilizar equipamentos e infraestrutura diversificada, buscando a interoperabilidade entre fabricantes distintos, incluindo tratar os aspectos de intervenção quando da necessidade de manutenção preventiva, corretiva e/ou preditiva ou mesmo algum outro processo específico.

As redes sem fio LTE / 5G privadas, permitem que se defina uma conexão de rede contínua e confiável, sendo que o 5G amplia a condição de tráfego e segurança da rede.

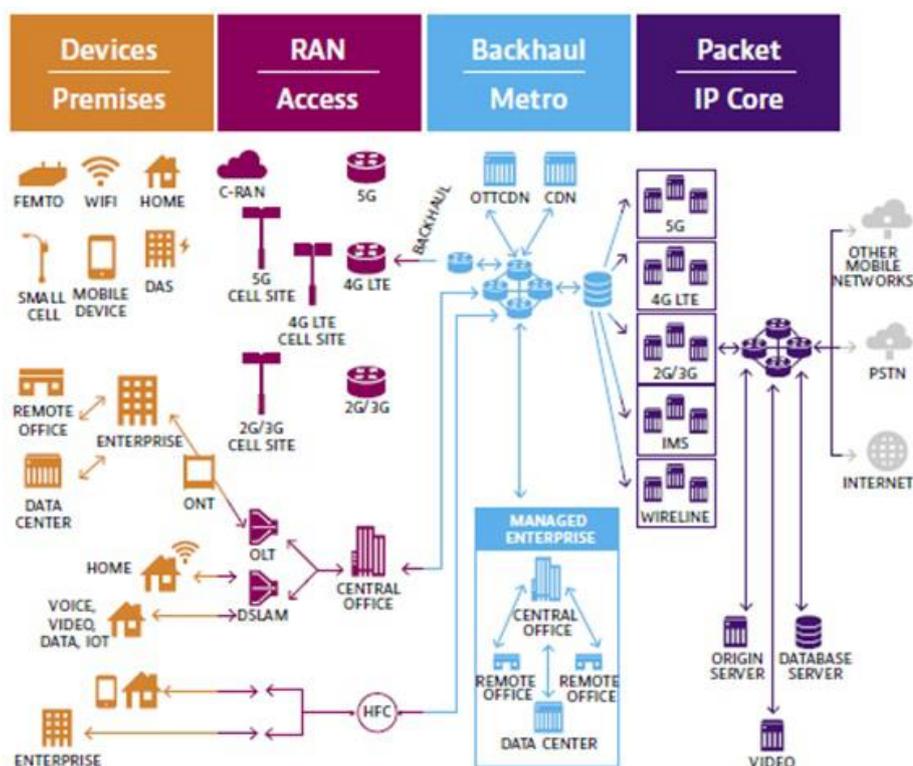
O 5G e o LTE ainda conviverão por alguns anos, face os aspectos tecnológicos e financeiros envolvidos, quando se considera o aspecto de

escalabilidade e infraestrutura envolvida para o caso do 5G substituir o LTE por completo.

Considerando os requisitos de disponibilidade de espectro de frequências adequado e latência mais baixa, com relação às outras soluções, o 5G permite facilitar uma conectividade mais segura para dispositivos IoT, veículos autônomos (rodoviários e ferroviários) e cidades inteligentes interconectadas de maneira que, atualmente, não atendido por meio da solução LTE.

Na Figura 6, retirada de um estudo de avaliação de infraestrutura de operação LTE para 5G, mostra-se uma forma de evolução de arquitetura.

Figura 6 – Arquitetura de Redes LTE e 5G.



Fonte: Understanding 5G: A Pratical Guide to Deploying and Operating 5G Networks.

Para uma rede privada, na Figura 7, exemplificam-se as diretrizes gerais e necessidade de atendimento a legislação, requerimentos, planos de frequências, padrões e regulamentações, tecnologias pertinentes acesso, backbone, conexões, interoperabilidade, integração, diversidade de serviços, dentre outras, na forma de diagrama simplificado a relação entre a plataforma

de comunicação, no caso 5G, e algumas das interfaces necessárias para sua implementação.

Figura 7 – Diretrizes Gerais requeridos a um sistema 5G Privado.



Fonte: Private 5G Networks – Technology, Architecture, and Deployment.

As Redes Privadas possuem características específicas, que a diferenciam de uma Rede Pública, onde podemos destacar (5G AMERICAS, 2020):

- Assegurar uma Cobertura Indoor e Outdoor, conforme os serviços empregados.
- Controle total da Rede, inclusive com uso de equipamentos próprios instalados em sua estrutura física e com total controle de todas as aplicações.
- Desempenho e Confiabilidade, com uso de métricas específicas e QoS diferenciado.
- Políticas de Segurança e Privacidade, considerando todos dos aspectos de cibersegurança da plataforma, das aplicações e dos terminais.
- Ferramentas de Gerenciamento, Configuração e Manutenção completa tanto da plataforma, como dos terminais.

2.3.1 Aspectos considerados na tecnologia 5G Privada

Dentre diversos aspectos que devem ser considerados na avaliação de uma tecnologia, citamos alguns destes aspectos voltados para a tecnologia 5G, considerando o contexto aqui tratado (BO AI et al., 2020):

- Uso de antenas MIMO (Multiple In, Multiple Out): Antenas de múltiplas entradas e saídas, que utilizam a diversidade espacial com uso de antenas de transmissão e recepção onde a propagação de multicaminhos permite que o sinal seja recebido pelo usuário por caminhos distintos.
- Ondas Milimétricas (mmWave): para atender largura de banda apropriadas ao 5G, faz-se necessário utilizar frequências altas, explorando as ondas milimétricas dentro do espectro, permitindo maior densidade de tráfego em pequenas células. A cobertura das células é reduzida, devido às acentuadas perdas no espaço livre e obstáculos das ondas milimétricas.
- Uso de Beamforming: Técnica de transmissão direcional de dados de forma homogênea em várias direções, favorecido pelo uso de antenas MIMO e Massive MIMO, possibilitando uma distribuição do sinal mais eficiente, melhorando a largura de banda das conexões e desempenho, incluindo na redução de interferências.
- Massivo MIMO: composta de antenas orientáveis, que em conjunto com multiplexação adequada permite que se utilize terminais de alta potência, bem como em bandas de frequências mais baixas.
- Definição de cobertura Indoor e Outdoor:
- Fatiamento de Rede (Network Slicing): devido aos diversos tipos de serviços de dados, que possuem requisitos e parâmetros de desempenho distintos, a utilização da solução de comunicação 5G permite tratar cada serviço na forma de “fatias”, flexibilizando seu uso, onde são criadas redes virtuais dentro da mesma infraestrutura física, inclusive permitindo diferentes requisitos.
- Baixa latência e Alta Confiabilidade, permitindo atendimento a aplicações especialistas. Para tal o 3GPP incorporou no 5G o serviço URLLC (Comunicações de Baixa Latência Ultraconfiáveis / Ultra-Reliable Low Latency Communications).
- Uplink e Downlink de Radiofrequência, na interface aérea, deve permitir ser dinâmico em sua configuração.
- Tráfego de dados na Borda das células devem ser consideradas, pois em sistemas móveis ferroviários há muita necessidade de se manter o tráfego de dados constante na transição entre células.

- Uso de tecnologia de acesso múltiplo que permita múltiplos acessos, atuando em conjunto com ferramentas de controle de interferências, tendo como exemplo o Acesso Múltiplo Não-Ortogonal (NOMA - Non-Orthogonal Multiple Access).

2.3.2 Arranjos de Antenas

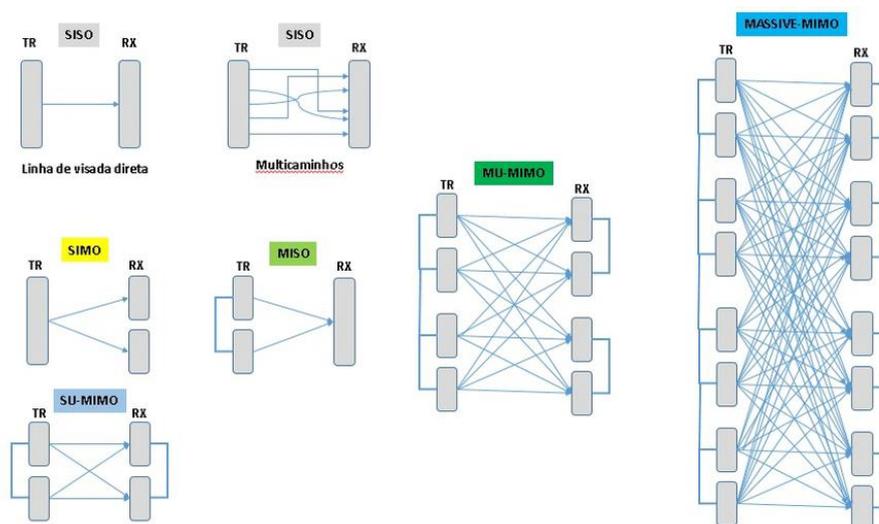
A escolha do arranjo de antenas é uma fase importante no projeto da solução, buscando desempenho, cobertura eficiente e qualidade do sinal, flexibilizando o downlink e uplink da interface aérea, beneficiando o tráfego de dados.

Para tal, utilizam-se alguns formatos de arranjo de antenas (JONATHAN BROOKSBY et al., 2021):

- SISO (Single Input, Single Output) - baseiam-se em possuir um único ponto de irradiação e recepção do sinal.
- SIMO (Single Input, Multiple Output) - baseiam-se em possuir um ponto de irradiação para dois pontos de recepção do sinal.
- MISO (Multiple Input, Single Output) - utilizam-se um conjunto de duas antenas por ponto de irradiação para um ponto de recepção do sinal.
- SU-MIMO (Single User, Multiple Input, Multiple Output) - utilizam-se um conjunto de duas antenas por ponto de irradiação de sinal e um conjunto de duas antenas por ponto de recepção do sinal, mas interligadas entre si.
- MU-MIMO (MultiUser, Multiple Input, Multiple Output) - utilizam-se um conjunto de quatro antenas interligadas por ponto de irradiação de sinal e dois conjuntos de duas antenas interligadas por ponto de recepção do sinal.
- MASSIVE-MIMO (Massive, Multiple Input, Multiple Output) - utilizam-se um conjunto de oito antenas interligadas por ponto de irradiação de sinal e quatro conjuntos de duas antenas interligadas por ponto de recepção do sinal.

Na Figura 8 mostram-se os arranjos das antenas utilizados em LTE-4G e 5G.

Figura 8 – Arranjo de Antenas em sistemas LTE e 5G.



Fonte: Understanding 5G: A Practical Guide to Deploying and Operating 5G Networks.

As Redes celulares LTE utilizam, usualmente, os arranjos de antenas MIMO (SU- MIMO e MU-MIMO), onde se beneficiam da diversidade e multiplexação espacial, com redução de desvanecimento do canal de comunicação. Mas é necessário utilizar ferramentas e técnicas especiais que minimizem as interferências na borda da célula onde a relação sinal-ruído é baixa.

Para o 5G o arranjo tecnológico de antenas é o MASSIVE-MIMO que possui um grande número de antenas para cada estação rádio base, mas permite melhorias significativas na eficiência espectral e energética aos terminais, bem como ser mais robusta com relação à interferência no canal, com uso da técnica de “beamforming”.

As estruturas MIMO mais utilizadas são do tipo 2 x 2 e 4 x 4, que propiciam um desempenho satisfatório para a solução LTE-4G empregada na solução da Mina de Ferro.

2.4 Requisitos e parâmetros funcionais do 5G

O uso de técnicas de antenas MIMO, Massive MIMO e beamforming (técnica utilizada para melhorar largura de banda das conexões e aumentar o

alcance direcional), permitem viabilizar os aspectos de otimizar a cobertura de redes LTE inserindo rádio em 5G, dentro de uma grade de células existente, permitindo aproveitamento da infraestrutura.

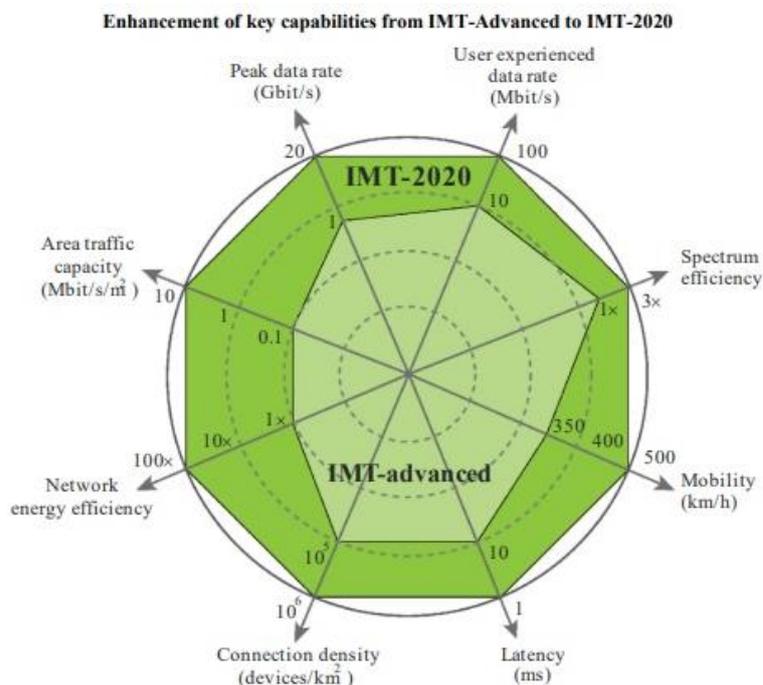
Alguns requisitos principais do 5G, são:

- Latência muito baixa, de até 10 milissegundos.
- Taxa de Picos de Dados de até 10 Gbps.
- Alta disponibilidade, em torno de 99.999%.
- Baixo consumo de dispositivos, devido à eficiência energética dos equipamentos.
- Elevada autonomia de baterias para dispositivos IoT.
- Suporte alta densidade de dispositivos e sensores, com uso de pequenas células.
- Permite uma alta densidade de tráfego em cobertura contínua por toda uma área de interesse específica.
- Permite o uso para sistemas de dados e vídeo em tempo real, bem como em aplicações de processos críticos que requerem alta precisão e mínimo de tempo de resposta.
- Tecnologia de comunicação para viabilizar a interconexão de veículos autônomos e cidades inteligentes.

Um fator importante a ser mencionado para a cobertura do 5G em regiões com grande densidade de conexões em pequenas áreas de cobertura (p.ex. arena de shows), é o uso de ondas milimétricas (mmWave) na faixa de 26 GHz.

Na Figura 9 mostram-se as definições do 5G conforme a Recomendação ITU-T M.2083-0:

Figura 9 – Definições do 5G.



Fonte: Recomendação ITU-T M.2083-0

De uma forma geral a Recomendação ITU-T M.2083-0 define os objetivos e estrutura de telecomunicações da rede móvel 5G, incluindo uma ampla variedade de recursos aplicáveis a cenários diversos, tais como parâmetros de desempenho, requisitos de tráfego (densidade), tendências de aplicações com tecnologia sem fio, eficiência espectral, convergência móvel, buscando padronizar valores de referência otimizados.

3 ESTUDO DE CASO - FERROVIA DE CARGA PESADA

A coleta e aquisição de dados foram obtidas e realizadas por literatura já descrita em documentações técnicas publicadas, tratadas como teóricas, mas também por documentações de projeto com emprego de tecnologia sem fio implantadas e a implantar, dentre outras pertinentes ao processo ferroviário, associadas ao tema do trabalho.

Os dados e informações técnicas obtidos de situações práticas, foram organizados e avaliados, estando consolidados e formatados como informações complementares aos dados teóricos acima utilizados, além de especificação de equipamentos e requisitos operacionais.

Os principais recursos utilizados na elaboração deste trabalho, foram obtidos por conversas com responsáveis técnicos de projetos implantados e a implantar, bem como com fabricantes e fornecedores de tecnologia sem fio, além dos dados de equipamentos, especificações de equipamentos, informações de relatórios técnicos, estudo de engenharia e de projetos.

Para exemplificar o uso de uma plataforma de comunicação sem fio, no caso com cobertura celular, buscamos comentar sobre o uso de alguns requisitos funcionais e não funcionais empregados em solução com uso do meio de transmissão com LTE em ambiente crítico.

Os caminhões fora de estrada, exemplificado na Figura 10, possuem sistemas inteligentes que permitem detectar riscos, objetos e pessoas, executando controle seguro que interrompe seu movimento até que seu trajeto esteja liberado de “obstáculos”.

Figura 10 – Caminhões Fora de Estrada - Mina de Carajás.



Fonte: Eletroeletrônica da VALE S.A. - EFC.

Utilizamos aqui um exemplo de um “Case”, Figura 11, funcionando em um processo de Mina de carga pesada, que poderá ser aplicado no atendimento da ferrovia, mas deve-se levantar e tratar dados práticos suficientes para adequar ajustes de parâmetros para quaisquer cenários críticos em outros setores ferroviário.

Figura 11 – Topologia Básica LTE Caminhões Fora de Estrada - Mina Carajás.



Fonte: Eletroeletrônica da VALE S.A. - EFC.

O “Case” dos caminhões fora de estrada, mostrado na Figura 12, cuja operação autônoma baseia-se no controle por sistemas de computador, GPS, radares e inteligência artificial, são monitorados por operadores em salas de comando remotas, utilizando meio de transmissão LTE-4G implementando mais segurança para a atividade.

Figura 12 – Caminhões fora de estrada - Operação Autônoma.



Fonte: Eletroeletrônica da VALE S.A. - EFC.

Foi considerado o uso de um plano de frequência privado adequado, definido para cobertura na região, mantendo o sistema robusto e escalável, atendendo demandas futuras, tudo isso na gestão privada.

Para este estudo de Caso, dentro da ferrovia, utiliza-se uma solução de operadora com equipamentos e frequências compartilhados, sendo utilizado o espectro de 2,1GHz com estudo para as faixas de 700MHz e 2,1 GHz (PROMON, 2022).

As Estações Rádio Base LTE, exemplificada na Figura 13, foram posicionados em locais estratégicos dentro da Mina, considerando a região de cobertura do tráfego dos caminhões fora de estrada.

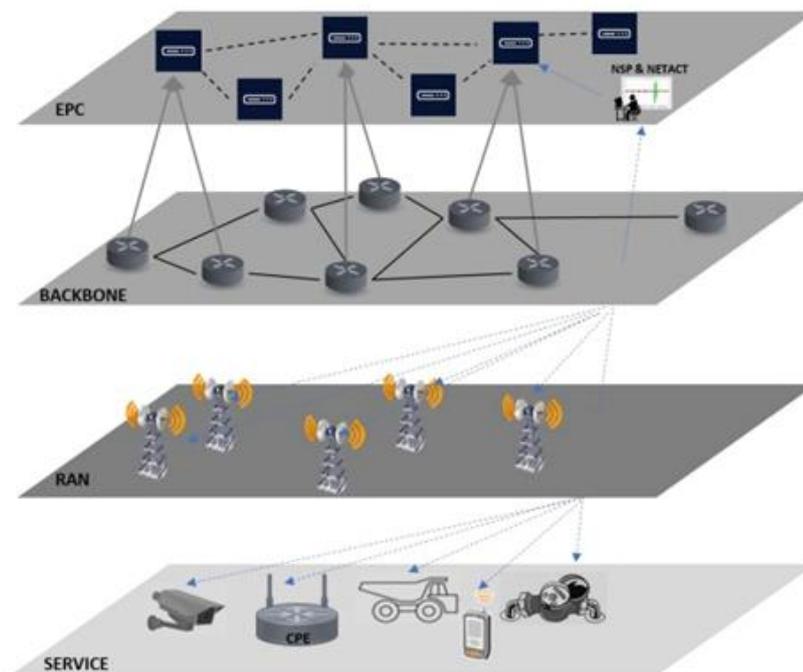
Figura 13 – Estação Rádio Base LTE na Mina de Carajás.



Fonte: Eletroeletrônica da VALE S.A. - EFC.

Na Figura 14 mostra-se as camadas empregadas na solução LTE-4G privada na forma de implementação para uso com aplicações em veículos autônomos, mas em formato restrito.

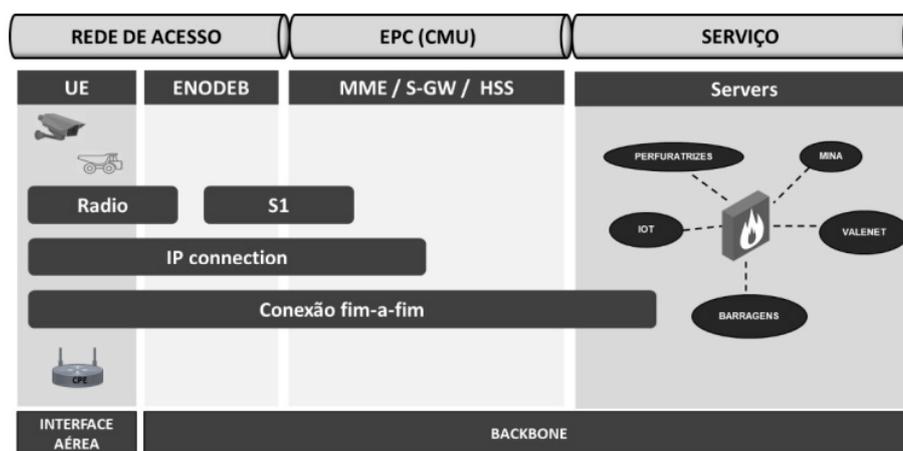
Figura 14 – Rede LTE Privada em ambiente crítico - Vale-EFC.



Fonte: Programa LTE Vale - PROMON

Já na Figura 15 mostra-se o diagrama de integração dos serviços a serem transportados via a solução LTE-4G.

Figura 15 – Integração de aplicações na Rede LTE-4G da Vale-EFC.



Fonte: Programa LTE Vale – PROMON.

Descreve-se, adiante, algumas informações que ajudam a realizar uma avaliação de desempenho e posterior verificação com os parâmetros com a solução de transmissão sem fio, podendo ser empregada no uso do 5G.

No que refere aos requisitos de transporte, os critérios de projeto da rede sem fio buscam cumprir os critérios de desempenho sem comprometer outras aplicações, conforme Tabela 3 (CATERPILLAR, 2020).

Tabela 3 – Requisitos da Estação Rádio Base

Velocidade de conexão mínima do Rádio (por máquina)	Capacidade Mínima de <i>throughput</i> (por máquina)	Utilização de largura de banda (por máquina)	Latência média	Latência máxima	Jitter	Perda de Pacote médio	Perda máxima de pacotes	Tempo máximo de holdover entre células	Tempo máximo de perda de conectividade
6 Mbps	6 Mbps	200 kbps	< 50 ms	< 150 ms	< 50 ms	< 1%	< 2%	250 ms	2 seg

Fonte: Caterpillar - Site Communication Requirements.

Com relação aos requisitos de terminais LTE-4G para veículos (AHS GLOBAL SUPPOR, 2020), os critérios de projeto considerados, são:

- A largura de banda em downstream, foi considerada as informações do fabricante conforme Tabela 4:

Tabela 4 – Largura de Banda downstream.

Tamanho da Frota (unidades móveis)	Falha do Sistema (kb/sec)	Desempenho degradado (kb/sec)	Desempenho completo (kb/sec)
1 a 33	<= 50	51 a 99	>= 100
34 a 75	<= 110	111 a 149	>= 150
76 a 115	<= 150	151 a 209	>= 210
116 a 185	<= 225	226 a 279	>= 280

Fonte: Caterpillar - Site Communication Requirements

- Para a largura de banda em upstream, foi considerada as informações do fabricante conforme Tabela 5:

Tabela 5 – Largura de Banda upstream

Tamanho da Frota (unidades móveis)	Falha do Sistema (kb/sec)	Desempenho degradado (kb/sec)	Desempenho completo (kb/sec)
1 a 33	<= 25	26 a 29	>= 100
34 a 75	<= 25	26 a 29	>= 100
76 a 115	<= 25	26 a 29	>= 100
116 a 185	<= 25	26 a 29	>= 100

Fonte: Caterpillar - Site Communication Requirements.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Desafios na implantação do 5G – cenário de migração

Alguns dos principais desafios do 5G a serem tratados, tendo em vista as plataformas de comunicação sem fio, fornecidos na sua maioria pelas operadoras públicas, mas dentro de ambiente privado, são:

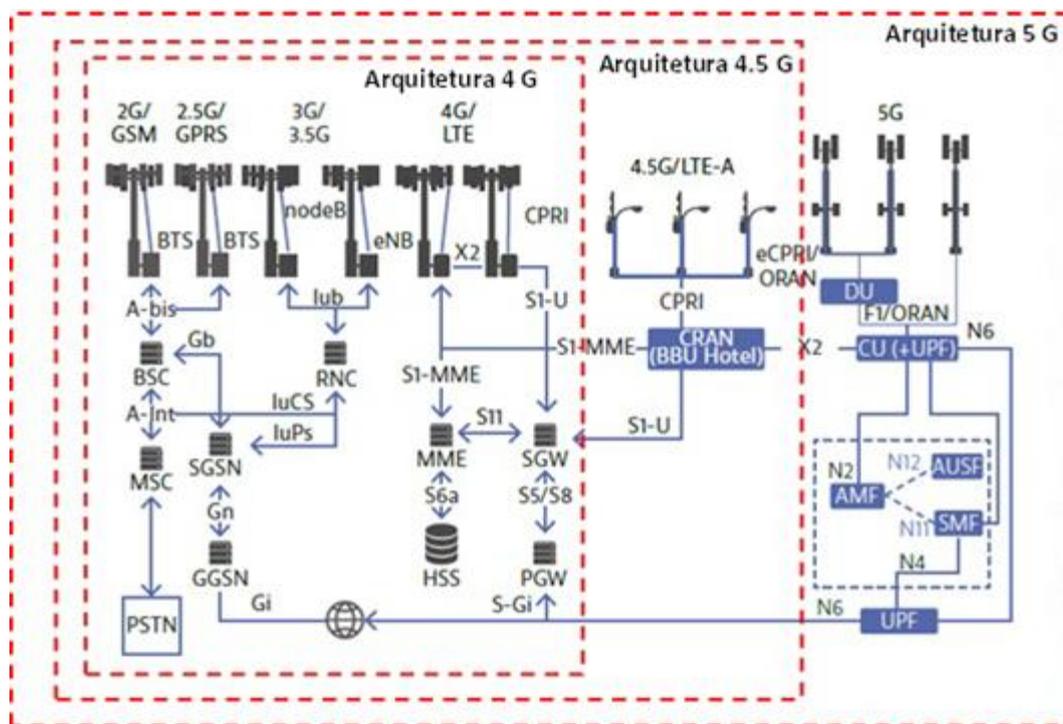
- a) Abranger as novas tecnologias que estão por vir, face à dinâmica de soluções industriais, mantendo o contexto crítico.
- b) Ampliar o uso das vantagens dos sistemas de antena adaptativos, principalmente na questão de minimizar espaço em estrutura em altura.
- c) Avançar na virtualização de toda a plataforma, com redundância plena dos servidores e das aplicações.
- d) Suporte de redes, com interfaceamento óptico completo.
- e) Otimizar a estrutura de células em ambientes que requeiram precisão de cobertura.
- f) Possuir um gerenciamento completo ao nível de radiofrequência (RF), Tráfego, Segurança de Dados e total controle do usuário.
- g) Permitir a interoperabilidade tecnológica, ou seja, ser transparente em sua integração de equipamentos, infraestrutura e serviços.

Os dados de vídeo e áudio são sensíveis à condição do canal de comunicação, bem como ao processamento nos dispositivos, requerendo uso de técnicas de tratamento de sinais mais robustos para otimizar a ocupação da largura de banda.

No processo de implantação do 5G as operadoras consideraram o uso, inicialmente, do 5G DSS (Compartilhamento Dinâmico de Espectro) que utiliza a infraestrutura da rede LTE-4G e interface aérea no padrão 5G NR-NSA (New Radio - Non Standalone) que amplia a velocidade de transmissão de dados com relação ao LTE, mas não permite utilizar a capacidade máxima de banda ofertada pelo 5G quando utiliza uma infraestrutura específica.

Na Figura 16 mostra-se uma topologia de uso adequado para se evoluir a infraestrutura LTE-4G para 5G, onde se destaca, dentro do diagrama, a arquitetura pertinente a cada fase de evolução.

Figura 16 – Arquitetura de evolução LTE para 5G.



Fonte: Understanding 5G: A Practical Guide to Deploying and Operating 5G Networks.

De uma forma geral a transição do LTE-4G para o 5G, pode ser realizada em duas fases básicas:

- Estações Rádio Base 5G utilizando o mesmo CORE do LTE-G, operando nas suas respectivas frequências permitindo operação dos terminais de ambas as tecnologias (simultaneidade de conexão), sendo que ocorrerá a formação de nichos por tecnologia.
- Estações Rádio Base 5G utiliza o compartilhamento de espectro do LTE-4G, de forma dinâmica, permitindo que ocorra a migração da plataforma para o 5G, denominado 5G DSS (Dynamic Spectrum Sharing), onde apesar de possibilitar congestionamento de tráfego, pelo uso das duas tecnologias, o processo de transição é mais organizado.

4.2 Requisitos a serem suportados pelo sistema de comunicação sem fio

Abaixo descrevemos alguns requisitos funcionais e não funcionais aplicáveis a uma plataforma de comunicação sem fio a ser utilizado por equipamentos embarcados, permitindo o atendimento de parâmetros operacionais ao qual estes equipamentos sejam utilizados, em um cenário de viabilizar condições técnicas para executar tarefas, inclusive na condição de “autônomo”.

4.2.1 Requisitos funcionais

Os requisitos definidos nas Figuras e Tabelas adiante, foram organizadas a partir de um documento de requisitos de avaliação se sistema estabelecida para o “Case” Ferrovia de Carga Pesada, aqui mencionado, no cenário de caminhões em ambiente de Mina.

Na Tabela 6 descrevem-se requisitos gerais do sistema de comunicação LTE-4G, para suportar o transporte das aplicações dos veículos ferroviários (CATERPILLAR, 2020).

Requisitos como: Velocidade mínima de conexão do germinal em campo, capacidade de throughput mínimo, Latência média e Perda de conectividade, são importantes para caracterizar qualidade da solução dentro de uma cobertura de acesso contínuo para os terminais, principalmente considerando a mobilidade dos terminais.

O parâmetro “Detecção com proximidade de reconhecimento” permite que os terminais compartilhem as informações de tráfego durante o tráfego na região de cobertura.

Tabela 6 – Requisitos gerais do Sistema sem fio em uso na ferrovia.

REQUISITOS	FROTA (*)	PERFURAÇÃO SEMI-AUTÔNOMA	POSICIONAMENTO DE FROTA (*)	DETECÇÃO COM RECONHECIMENTO DE PROXIMIDADE
Velocidade mínima de conexão do terminal de campo	1 Mbps (no terminal)	1 Mbps (no terminal)	2 Mbps (no terminal)	2 Mbps (no terminal)
Capacidade de <i>throughput</i> mínimo	250 kbps / terminal	450kbps / terminal	500kbps / terminal	500kbps / terminal
Média Utilização de largura de banda	2 kbps / terminal	200kbps / terminal	20 kbps / terminal	20 kbps / terminal
Latência média	< 50ms	< 50ms	< 50 ms	< 50 ms
Latência máxima	< 150 ms	< 150 ms	< 150 ms	< 150 ms
Máxima Perdas de Pacotes	< 10 %	< 10 %	< 3%	< 3%
Máximo tempo de Handover (célula para célula, AP para AP)	250 ms	250 ms	250 ms	250 ms
Perda de Conectividade	3 seg	3 seg	3 seg	3 seg
Protocolos de Rede IP	UDP, TCP, ICMP, ARP, PIM	UDP, TCP, ICMP, ARP, PIM, IGMP4	UDP, TCP, ICMP, ARP, PIM, IGMP4	UDP, TCP, ICMP, ARP, PIM, IGMP4
(*) exemplo para CAMINHÕES FORA E ESTRADA				

Fonte: Caterpillar - Site Communication Requirements.

Com relação aos aspectos de Desempenho e Capacidade, deve-se atentar para requisitos funcionais que permitem avaliar a eficiência da solução sem fio, empregada ao ambiente requerido, conforme mostra a Tabela 7:

Tabela 7 – Aspectos de Desempenho e Capacidade.

REQUISITO	DEFINIÇÃO
Velocidade de conexão mínima/terminal	5 x velocidade de tráfego
Capacidade de throughput mínimo/terminal	Considerar a taxa de transferência média utilizada pelo aplicativo, sem causar congestionamento na rede.
Utilização média da largura de banda	Considera-se em tráfego na rede das mensagens mais simples (administrativas), excluindo as rajadas de transferências.
Latência Média	Consolidação dos tempos necessários para que uma mensagem de <i>ping</i> (ida e volta do servidor para o cliente e vice-versa) trafegue na rede.
Latência Máxima	Tempo que define a instabilidade da rede.
Jitter	Afeta o desempenho das mensagens de comando e controle,
Perda Média de Pacotes	Consolidação dos tempos com as perdas de pacotes, onde a partir do qual a aplicação tem seu desempenho afetado.
Perda Máxima de Pacotes	Consolidação dos tempos com as perdas de pacotes, onde a partir do qual a aplicação tem seu desempenho afetado.
Perda Máxima de Pacotes	Tempo máximo permitido para o terminal se conectar a Base, durante o movimento do terminal.
Perda de Conectividade	Tempo máximo sem conexão em que não ocorra a indisponibilidade da aplicação.
Disponibilidade	Considerando a mobilidade dos terminais, uma disponibilidade de 99,95% é uma recomendação mínima proposta.

Fonte: Caterpillar - Site Communication Requirements.

4.2.2 Requisitos não-funcionais para uso de tecnologia e sistemas críticos

Alguns fabricantes limitam seus equipamentos para o uso de tecnologias consolidadas, onde seus requisitos de rede para comunicação são rígidos e limitados a certas condições, pois é necessário que se tenha uma tecnologia que atenda os aspectos funcionais dos equipamentos, bem como ter seus modos de falha conhecidos e dominados.

Para consolidar tais requisitos são definidos aspectos de hardware, software, firmware, features, etc., que devem ser estressados em campo.

É importante considerar que em uma plataforma de comunicação, soluções de ambientes críticos requerem que se tenha o link de Upload (sentido máquina – servidor) como satisfatório, de preferência com banda flexível aos aspectos de tráfego.

Outro fator importante para a rede de comunicação aérea, é ter uma banda assegurada, com estabilidade, disponibilidade e link de upload bem estabelecidos na região de fronteira das células de comunicação (região de borda).

Como a tendência das tecnologias de rede em ser suportada pela infraestrutura de comunicação, é trafegar multisserviços na forma de dados (áudio, vídeo e dados), certamente deve-se considerar a evolução dos elementos de rede para serem compatíveis e interoperáveis o que, ao final, se busca no conceito de Internet das Coisas (IoT), onde a interação é direta entre elementos de campo e rede de comunicação.

Em plataformas de ambientes críticos onde se utiliza uma plataforma de voz e outra de dados, por questões de segurança dos processos, sendo ambos críticos, certamente a evolução para uma rede Multisserviços deverá agregar os serviços de áudio (PTT - Push To Talk) e Dados, sem impactos ao processo e à sua criticidade, mas mantendo as questões envolvidas de segurança dos dados (cibersegurança) e do processo operacional na totalidade.

Com relação à plataforma de comunicação aérea, deve-se atentar aos aspectos de cobertura, topografia, dinâmica devido ao movimento dos equipamentos, vegetação, condições atmosféricas que influenciam propagação de radiofrequências, regiões físicas de atuação, e também do cenário do ambiente aplicado (p.ex.: Mina, Barragens, Ferrovia, Porto, Terminais de carga, transporte de passageiros, etc).

Outro ponto importante que deve ser tratado pela tecnologia e pelo equipamento a ser utilizada, tanto em Centro, Base e Campo, é com relação à resposta do equipamento na sua inicialização e processamento.

Não é aceitável que um equipamento tenha sua reinicialização em um tempo que comprometa os aspectos de interoperabilidade e gere interrupção do processo por um longo tempo. Portanto deve-se assegurar que quanto mais rápido um equipamento tenha sua reinicialização e/ou processamento, minimizam-se os impactos operacionais.

Usualmente equipamentos de campo possuem uma necessidade de mobilidade, onde o controle de posicionamento é extremamente crítico, definindo que o parâmetro posicionamento geo-referenciado tenha a máxima precisão e um mínimo de erro (p.ex.: sinal RTK- Posicionamento Cinemático em Tempo Real, permite erro < 5cm).

Em soluções que se utilize sistemas via satélite, por exemplo, deve-se atentar aos aspectos inerentes de propagação e processamento, onde um dos principais parâmetros é o atraso de transmissão compensados por técnicas, corretores de sinal e algoritmos embarcados dentro do equipamento de campo e do Satélite.

Também os aspectos de propagação do sinal que possui comportamentos adversos em algumas regiões da Ionosfera, principalmente na região da linha do Equador, onde em determinados meses do ano e sob condições atmosféricas específicas contribuem para “degradar” os sinais de uplink e downlink e o tempo de atraso torna-se bem prejudicial, dificultando as compensações de correção.

Imagina-se a dificuldade a ser avaliada no uso de tecnologias não consolidadas a ambientes críticos e que requerem precisão, disponibilidade de banda satisfatória, pois deve-se evitar que durante o tráfego de um veículo autônomo que esteja realizando uma tarefa (p.ex.: escavação, transporte pesado, descarga, etc) pare bruscamente gerando condição de risco em vários níveis ao processo na totalidade.

Os equipamentos embarcados em veículos ferroviários devem atender, obrigatoriamente, aos requisitos de especificação ferroviária, face à necessidade da solução atender as funcionalidades de forma integral, sendo duradoura, robusta e com o mínimo de manutenção, pois não é aceitável que um equipamento de alta disponibilidade, seja mantido constantemente.

Com relação aos aspectos de recursos, se define algumas premissas estruturais da rede, que devem ser consideradas nas formulações de parâmetros de desempenho, cita-se alguns destes requisitos na Tabela 8:

Tabela 8 – Aspectos de Recursos.

REQUISITO	DEFINIÇÃO
Endereço de Protocolo Internet	Estabelecer planejamento de numeração IP, com uso de IP estático para os elementos de rede.
QoS - Qualidade de Serviço	Priorizar tráfego de dados fundamentais
Segurança	Utilizar regras de segurança de rede, com proteção dos dados
Regulatório	Manter em conformidade aos aspectos regulatórios aplicáveis aos sistemas sem fio (wireless).

Fonte: Caterpillar - Site Communication Requirements.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Dentro do contexto de aplicação de solução de comunicação celular, especificamente o 5G para migração de uma plataforma de comunicação com uso de Rede LTE-4G utilizada em ambiente ferroviário, que requer atendimento a requisitos específicos e necessários face à condição de criticidade existente no setor de carga pesada, principalmente para os equipamentos embarcados em veículos ferroviários.

Neste breve estudo que não tem como tratar todos os cenários requeridos dentro do setor ferroviário e no ambiente industrial, buscou-se avaliar os principais parâmetros da tecnologia LTE-4G e 5G que possam ser avaliados conforme a situação a ser empregada na planta requerida.

É fato que a tecnologia de comunicação sem fio está em evolução e a atual 5G permitirá suprir o atendimento aos requisitos exigidos pelos equipamentos ferroviários, bem como embutir soluções de IoT (Internet das Coisas) nesse cenário que possui demandas reprimidas pelas dificuldades de implementação, até então.

Certamente o uso de Rede LTE-4G demonstra ser um importante momento, face poder coletar dados de desempenho e atendimento, para planejar a evolução da plataforma de comunicação para o 5G reduzindo riscos de impacto no processo operacional, quando da migração.

Portanto, estabelecer os requisitos que devem ser avaliados, a partir da massa de dados técnicos obtidos pelo sistema de comunicação sem fio em uso, deve ser contemplado no Projeto de evolução de uma rede sem fio, aqui mencionado como sendo do LTE-4G para o 5G.

Também é importante considerar se deve-se migrar para o 5G a partir da infraestrutura da Rede LTE-4G existente ou se é melhor implantar uma infraestrutura própria para o 5G o que permitirá obter a capacidade completa do 5G.

Neste trabalho foi possível esclarecer que os requisitos funcionais são importantes para se compor o projeto de viabilidade, mas deve ser observado o atendimento aos requisitos não funcionais, onde destacamos:

- Faixa de frequência adequada ao 5G, de preferência uso privado.
- parâmetros de throughput, latência, banda de transmissão, jitter, handover entre células, disponibilidade das interfaces aéreas, upload e download dinâmico, etc.
- aspectos de hardware, software, firmware, features, etc.
- banda assegurada, com estabilidade, na região de fronteira das células de comunicação (região de borda).
- rapidez no tempo de resposta do equipamento, quando da inicialização e processamento.
- Evolução de uma arquitetura existente LTE para 5G, deve ser considerada nos aspectos de recursos disponíveis, viabilidade técnica-financeira e médio-longo prazo.

Como trabalhos futuros, sugere-se:

- Realizar levantamento de campo dos dados dos parâmetros e requisitos mencionados neste trabalho, na atual plataforma LTE-4G utilizada na Mina de Ferro, criando uma massa de dados a ser analisada por alguma metodologia e software especialista que permita elaborar alguma sistemática de avaliação prática na forma de ambiente de simulação como ferramenta de planejamento de desempenho da plataforma de comunicação 5G como evolução de uma planta LTE.
- Buscar a implementação da tecnologia 5G para comunicação com dispositivos de sensoriamento e coleta de dados especialistas em ambientes indoor de acesso restrito, que possa ser utilizado para modelagem de ferramentas de simulação operacional.

REFERÊNCIAS

- 5G USE cases and requirements.** Product code C401-0120031-WP-201608-1-EM, 2016. Disponível em: www.nokia.com.
- Al, B. et al. **Future Railway Services-Oriented Mobile Communications Network.** In: MAGAZINE, I. C. (Ed.). IEEE Communications Magazine. IEEE, 2015. p. 78 – 85. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/282845116_Future_Railway_Service_sOriented_Mobile_Communications_Network. Acesso em: 03/02/2022.
- Al, B. et al. **5G Key Technologies for Smart Railways.** IEEE, IEEE, p. 856 – 893, May 2020/28. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9103348>. Acesso em: 03/02/2022.
- AMERICAS, G. **5G Technologies for Private Networks.** [S.l.]: 5G Americas, 2020.
- AMERICAS, G. **Private & Enterprise Networks.** 2021.
- AMERICAS, G. **The 5G Evolution: 3GPP Releases 16-17.** 5G Americas, January 2020.
- BROOKSBY, J. et al. **Understanding 5G - A Pratical Guide to Deploying and Operating 5G Networks.** Second. United States of America: VIAVI Solutions Inc., 2021. 172 p.
- CATERPILLAR. **Site Communication Requirements Command for Hauling.** Mossville, 2020.
- CATERPILLAR. **Site Communication Requirements Operator Station Remote Control Semi-Autonomous-v2-0.** [S.l.]: Caterpillar, 2020a.
- CATERPILLAR. **Site Wireless Communications: Basic Requirements.** [S.l.]: Caterpillar, 2020b.
- HÖYHTYÄ, M. et al. **Critical communications over mobile operators' networks: 5G use cases enabled by licensed spectrum sharing, network slicing and QoS control.** IEEE Access, IEEE, Finland, v.06, November 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/329196064>. Acesso em: 25/08/2022.
- ITU-T, E. P. **Recommendation ITU-R M.2083-0: IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and**

beyond. Geneva: ITU-R, 2015. Disponível em:
https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M:2083-0-201509-!!!PDF-E.pdf.

JAIN, R. **Introduction to 5G.** Saint Louis: Washington University, 2018. Disponível em: file:///D:/P%C3%B3s-Gradua%C3%A7%C3%A3o_ITV_%20Diogenes_2021/AULAS_ITV/Redes%20Industriais_Pedro%20H%20Gomes/Material%20TCC/Bibliografia%20Raj%20Jain.pdf. Acesso em: 25/08/2022.

OLIVEIRA, F. C. de; NUNES, D. A. **Técnicas de múltiplas antenas para 4G e 5G.** In: INATEL, I. N. D. T. (Ed.). VII SRST – SEMINÁRIO DE REDES E SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES. [s.n.], 2017. ISSN ISSN 2358-1913. Disponível em:
<file:///C:/Users/dsssi/Downloads/T%C3%A9cnicas%20de%20m%C3%BAltiplas%20antenas%20para%204G%20e%205G.pdf>. Acesso em: 25/01/2023.

ONDRUSOVA, S. **5G Implementation Guidelines.** CK Hutchison, 2019. Disponível em: www.gsma.com/futurenetworks.

PIERRE, T.; CASSIDIAN, C. G. **Railway Network Evolution Why it is urgent to wait for 5G?** In: Conference: 2019 IEEE 2nd 5g world forum (5gwf). [s.n.], 2019. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/337625149_Railway_Network_Evolution_Why_it_is_urgent_to_wait. Acesso em: 03/02/2022.

PROMON. **Programa LTE-VALE: Documentação Lógica - Adequação do Backbone para o Projeto Lte.** São Luis: [s.n.], 2022.

SEZIA, S.; BAKER, M.; TOUFIK, I. **LTE – The UMTS Long Term Evolution.** [S.l.]: John Wiley and Sons, Ltd, 2009. 626 p.

SPADINGER, R. **Implementação da tecnologia 5g no contexto da transformação digital e indústria 4.0.** In: INFRAESTRUTURA, D. D. de Estudos e Políticas Setoriais de Inovação e (ed.). Brasília: Livraria IPEA, 2021. Disponível em: [http:// dx:doi.org/10.38116/ntdiset79](http://dx.doi.org/10.38116/ntdiset79). Acesso em: 25/08/2022.

STALLINGS, D. W. **5G Wireless A Comprehensive Introduction.** In: STALLINGS, D. W. (Ed.). 5G Wireless A Comprehensive Introduction. [S.l.]: Addison-Wesley, 2021. cap. 9, p. 273 – 321.

SUPPORT, A. G. **PERFORMANCEBASED OPERATION ON LTE NETWORKS (FrontRunner 3.2.3 and 3.3.0).** KOMATSU, 2020. Disponível em:
<https://modularmining.sharepoint.com/engineeringdocuments/Released/HardwareDocumentLibrary/PDFs/250397.pdf>. Acesso em: 07/07/2022.