



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO AMAPÁ  
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM REDES DE COMPUTADORES  
CAMPUS MACAPÁ

DOUGLAS ANDRADE VALADARES  
GABRIEL LUÍS DE ABREU GONÇALVES

**MONITORAMENTO DE FROTA EM MINA VIA REDES ATRAVÉS DO SISTEMA  
CAT MINESTAR**

MACAPÁ - AP  
2026

DOUGLAS ANDRADE VALADARES  
GABRIEL LUÍS DE ABREU GONÇALVES

**MONITORAMENTO DE FROTA EM MINA VIA REDES ATRAVÉS DO SISTEMA  
CAT MINESTAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a coordenação do curso de tecnologia em redes de computadores, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amapá - IFAP como requisito avaliativo para obtenção do título de tecnólogo em redes de computadores.  
Orientador: Me. Klessis Lopes Dias.

MACAPÁ - AP

2026

Biblioteca Institucional - IFAP  
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---


- V136m Valadares, Douglas Andrade  
Monitoramento de frota em mina via redes através do sistema cat  
minestar  
/ Douglas Andrade Valadares, Gabriel Luis de Abreu Gonçalves. -  
Macapá, 2026.  
31 f.: il.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Instituto Federal de  
Educação, Ciência e Tecnologia do Amapá, Campus Macapá, Tecnologia  
em Redes de Computadores, 2026.
- Orientador: Me. Klessis Dias Lopes.
1. Minestar. 2. Mineral. 3. Tecnologias. I. Gonçalves, Gabriel Luis de  
Abreu. I. Lopes, Me. Klessis Dias, orient. II. Título.

DOUGLAS ANDRADE VALADARES  
GABRIEL LUÍS DE ABREU GONÇALVES

## MONITORAMENTO DE FROTA EM MINA VIA REDES ATRAVÉS DO SISTEMA CAT MINESTAR


Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a coordenação do curso de tecnologia em redes de computadores, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amapá - IFAP como requisito avaliativo para obtenção do título de tecnólogo em redes de computadores.

### BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente  
 KLESSIS LOPES DIAS  
Data: 02/07/2026 12:32:01-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

---

Prof. Me. Klessis Dias Lopes (Orientador)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amapá

Documento assinado digitalmente  
 CELIO DO NASCIMENTO RODRIGUES  
Data: 02/07/2026 14:41:49-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

---

Prof. Me. Célio Nascimento Rodrigues  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amapá

Documento assinado digitalmente  
 ALLAN MEIRA DE MEDEIROS  
Data: 02/07/2026 12:46:36-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

---

Prof. Me. Allan Meira de Medeiros  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amapá

Apresentado em: 11 / 05 /2026.

Conceito/Nota: 100

Eu, Douglas Andrade dedico a minha mãe: Elissandra Andrade, minha esposa: Kryslane Ferreira e ao meu filho: Matteo Ferreira que não desistiram em nenhum momento de mim nessa caminhada e não mediram esforços para tudo em prol da minha formação.

Eu, Gabriel Gonçalves dedico este trabalho à minha família, que mesmo distante fisicamente sempre esteve presente em meu coração, apoiando-me, incentivando-me, e jamais permitindo que eu desistisse dos meus sonhos. Agradeço também a Deus e a Nossa Senhora, que me concederam força, sabedoria e perseverança para superar cada desafio ao longo desta caminhada. Sem essa base de fé e amor, esta conquista não seria possível.

“A educação é o grande motor do desenvolvimento pessoal. É através dela que a filha de um camponês se torna médica, que o filho de um mineiro pode chegar a chefe de mina, que um filho de trabalhadores rurais pode chegar a presidente de uma grande nação.”

Nelson Mandela.

## RESUMO

A transformação digital e tecnológica dentro do setor mineral impulsionou o conceito e consolidez da Mineração 4.0, buscando sempre a excelência em produção e extração de materiais minerais, a indústria mineral se viu necessitada em buscar formas de acelerar e aprimorar esse processo: Extrair, Transportar, Processar e Escoar. E nisso o surgimento de tecnologias voltadas para a área de exploração mineral teve papel fundamental para melhorar esse processo fazendo monitoramento em tempo real de onde está sendo extraído dentro da mina, novos locais para perfuração e preparação desse local para ser explorado, quanto está sendo transportado pelo caminhão até o britador móvel ou fixo, quanto tempo para ser processado e transportado para os vagões dos trens de carregamento de minério. Com tudo isso se viu necessário criar ferramentas e tecnologias para rastrear e monitorar todo esse projeto, a Caterpillar sendo a maior empresa de equipamentos para a indústria mineral do mundo criou uma suíte completa que monitora, rastreia e consegue até mesmo controlar toda uma mina através da automação da mesma através da sua suíte completa chamada Cat MineStar System.

Palavras-chave: Minestar; Mineral; Tecnologias; Digital.

## **ABSTRACT**

Digital and technological transformation within the mining sector drove the concept and consolidation of Mining 4.0. Constantly seeking excellence in the production and extraction of mineral materials, the mining industry found itself needing ways to accelerate and improve this process: Extracting, Transporting, Processing, and Shipping. In this context, the emergence of technologies focused on mineral exploration played a fundamental role in improving these processes by enabling real-time monitoring of where extraction is taking place within the mine, identifying new drilling locations and preparing these areas for exploitation, tracking how much material is being transported by trucks to mobile or fixed crushers, and monitoring the time required for processing and transportation to ore-loading train wagons. As a result, it became necessary to create tools and technologies capable of tracking and monitoring the entire operation. Caterpillar, the world's largest equipment company for the mining industry, developed a complete suite that monitors, tracks, and can even control an entire mine through automation, known as the Cat MineStar System.

Keywords: MineStar; Mineral; Technologies; Digital.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cat Minestar System	17
Figura 2 – Tela de Display Terrain em um equipamento	18
Figura 3 - Tela do Cat ET na parte do horímetro.	19
Figura 4 - Caminhão Caterpillar Autônomo mais carro leve 4x4.	23
Figura 5 - Função TMAC realizando envios de pacotes.	23
Figura 6 - Conexão Via Cabo entre módulo e computador.	25
Figura 7 - Configuração de Internet via Web.	26

## LISTA DE SIGLAS

- AHS – Autonomous Haulage Systems (Sistemas de Transporte Autônomo)
- CAN – Controller Area Network (Rede de Área de Controlador)
- CSMA/CA – Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
- ECM – Electronic Control Module (Módulo de Controle Eletrônico)
- EPC – Evolved Packet Core
- ERB – Estação Rádio Base
- IoT – Internet of Things (Internet das Coisas)
- IP – Internet Protocol (Protocolo de Internet)
- KPI – Key Performance Indicator (Indicador-Chave de Desempenho)
- LiDAR – Light Detection and Ranging
- LTE – Long Term Evolution
- MAC – Medium Access Control (Controle de Acesso ao Meio)
- OFDMA – Orthogonal Frequency Division Multiple Access
- OT – Operational Technology (Tecnologia Operacional)
- QoS – Quality of Service (Qualidade de Serviço)
- RAN – Radio Access Network (Rede de Acesso de Rádio)
- RSRP – Reference Signal Received Power (Potência Recebida do Sinal de Referência)
- RSRQ – Reference Signal Received Quality (Qualidade Recebida do Sinal de Referência)
- RTT – Round-Trip Time (Tempo de Ida e Volta)
- TI – Tecnologia da Informação
- VIMS – Vital Information Management System (Sistema de Gerenciamento de Informações Vitais)
- 5GC – 5G Core (Core da Rede 5G)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b>	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVO</b>	<b>15</b>
<b>3.1</b>	<b>Objetivo geral</b>	<b>15</b>
<b>3.2</b>	<b>Objetivos específicos</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>CONTEXTO DO MINESTAR E CONEXÕES EM REDE</b>	<b>16</b>
<b>4.1</b>	<b>O sistema cat minestar system e suas demandas de dados</b>	<b>16</b>
<b>4.2</b>	<b>Fleet</b>	<b>16</b>
<b>4.3</b>	<b>Terrain</b>	<b>16</b>
<b>4.4</b>	<b>Detect</b>	<b>17</b>
<b>4.5</b>	<b>Health</b>	<b>18</b>
<b>4.6</b>	<b>Command</b>	<b>18</b>
<b>5</b>	<b>EVOLUÇÃO DAS REDES SEM FIO NA MINERAÇÃO</b>	<b>19</b>
<b>5.1</b>	<b>Limitações das redes wi-fi mesh tradicionais</b>	<b>19</b>
5.1.1	Perda de Largura de Banda por Salto (Efeito Metade)	19
5.1.2	Latência Cumulativa (Atraso)	19
5.1.3	Sobrecarga de Tráfego de Controle (Overhead)	19
5.1.4	Topologia em Linha Ineficiente	20
5.1.5	Saturação do Espectro em Áreas Densas	20
<b>5.2</b>	<b>Arquitetura de redes celulares privadas (private LTE)</b>	<b>20</b>
<b>5.3</b>	<b>A inserção do 5g e fatiamento de rede (network slicing) em ambientes industriais</b>	<b>20</b>
<b>5.4</b>	<b>Latência (round-trip time - rtt) e jitter</b>	<b>21</b>
<b>5.5</b>	<b>Perda de pacotes (packet loss) e vazão (throughput)</b>	<b>22</b>
<b>5.6</b>	<b>Aplicações que exigem alta vazão:</b>	<b>23</b>
<b>6</b>	<b>FLUXO DE DADOS NO MINESTAR</b>	<b>24</b>
<b>7</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>26</b>
<b>7.1</b>	<b>Participantes da pesquisa</b>	<b>26</b>
<b>7.2</b>	<b>Cenário da pesquisa</b>	<b>26</b>
<b>7.3</b>	<b>Etapas da pesquisa</b>	<b>27</b>
<b>8</b>	<b>RESULTADOS ESPERADOS</b>	<b>28</b>
<b>9</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>29</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>30</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A inserção dos conceitos da Indústria 4.0 no setor mineral impulsionou o surgimento da chamada Mineração 4.0, um modelo produtivo caracterizado pela integração entre automação, sistemas inteligentes, Internet das Coisas (IoT), análise de dados em tempo real e conectividade avançada. Essa transformação tecnológica tem permitido que as operações de mineração se tornem mais eficientes, seguras e sustentáveis, promovendo ganhos significativos de produtividade e redução de custos operacionais (IBRAM, 2023; MINERALI EXPLORE, 2023).

A Mineração 4.0 representa a aplicação dos princípios da Quarta Revolução Industrial ao contexto mineral, incorporando tecnologias digitais capazes de otimizar todas as etapas do processo produtivo, desde a extração do minério até seu beneficiamento e transporte. Nesse cenário, a utilização de sistemas integrados de monitoramento e controle tornou-se fundamental para garantir a tomada de decisões baseada em dados e a melhoria contínua dos processos operacionais (IBRAM, 2023).

Entre as soluções tecnológicas desenvolvidas para esse contexto destaca-se o Cat MineStar System, plataforma criada pela Caterpillar para o gerenciamento integrado de operações de mineração. O sistema reúne ferramentas voltadas ao monitoramento de frotas, controle operacional, gerenciamento de ativos, telemetria, segurança operacional e automação de equipamentos, permitindo que gestores acompanhem em tempo real o desempenho da operação e realizem intervenções rápidas sempre que necessário (CATERPILLAR, 2026a; CATERPILLAR, 2026b).

O MineStar é composto por diferentes módulos especializados, como Fleet, Terrain, Detect, Health e Command, que atuam de forma integrada para otimizar as atividades da mina. Essas soluções possibilitam desde o acompanhamento da localização e produtividade dos equipamentos até a operação remota e autônoma de caminhões e perfuratrizes, consolidando-se como uma das principais plataformas tecnológicas da mineração moderna (CATERPILLAR, 2026a; CATERPILLAR, 2026c).

Entretanto, a eficiência desses sistemas depende diretamente da infraestrutura de telecomunicações responsável pelo transporte das informações geradas pelos equipamentos em campo. O funcionamento adequado de aplicações de missão crítica exige uma rede de comunicação capaz de fornecer alta disponibilidade, baixa latência, reduzida perda de pacotes e elevada confiabilidade, garantindo que os dados trafeguem continuamente entre os equipamentos móveis e os centros de controle operacional (TOP DIGITAL, 2023; HUAWEI

ENTERPRISE, 2026).

Historicamente, muitas operações industriais utilizaram redes Wi-Fi Mesh para prover conectividade em áreas operacionais extensas. Contudo, limitações relacionadas à largura de banda, latência acumulada, sobrecarga de tráfego e instabilidade em ambientes altamente dinâmicos motivaram a busca por alternativas mais robustas. Nesse contexto, as redes celulares privadas baseadas em tecnologia LTE e, mais recentemente, em 5G, passaram a ser consideradas soluções mais adequadas para aplicações industriais críticas, especialmente em operações de mineração de grande porte (YAN, [20--]; TOP DIGITAL, 2023).

O Complexo S11D Eliezer Batista, localizado em Canaã dos Carajás, no estado do Pará, constitui um dos mais avançados empreendimentos de mineração do mundo em termos de automação e conectividade. A operação utiliza sistemas integrados de monitoramento e equipamentos altamente tecnologicados que dependem de comunicação contínua para manter a segurança e a eficiência operacional. Entretanto, características inerentes ao ambiente de mineração a céu aberto, como alterações constantes da topografia, presença de grandes estruturas rochosas e longas distâncias de cobertura, representam desafios significativos para a propagação dos sinais de rádio e para a manutenção da qualidade dos serviços de rede (HUAWEI ENTERPRISE, 2026).

Nesse contexto, parâmetros como latência, jitter, perda de pacotes e intensidade do sinal tornam-se fatores críticos para o funcionamento dos sistemas de automação e monitoramento. Falhas na comunicação podem comprometer a transmissão de dados de telemetria, afetar o rastreamento dos equipamentos e, em situações mais severas, ocasionar a interrupção de operações automatizadas, impactando diretamente a produtividade e a segurança da mina (FORTINET, 2026; RED HAT, 2021).

Diante desse cenário, este trabalho busca responder à seguinte questão de pesquisa: de que maneira a infraestrutura de rede celular privada (LTE/5G) implantada no Complexo S11D Eliezer Batista atende aos requisitos de desempenho, disponibilidade e confiabilidade exigidos pelo ecossistema Cat MineStar System? A relevância desta pesquisa está na necessidade de compreender como as tecnologias de telecomunicações industriais contribuem para o funcionamento de sistemas críticos em ambientes de mineração moderna, fornecendo subsídios para futuras implementações e aprimoramentos de redes voltadas à Mineração 4.0.

## 2 JUSTIFICATIVA

A crescente incorporação de tecnologias digitais nos processos produtivos tem promovido profundas transformações no setor mineral, consolidando o conceito de Mineração 4.0. Nesse contexto, a conectividade passou a desempenhar papel estratégico nas operações de mineração, uma vez que sistemas de automação, monitoramento em tempo real, telemetria e controle remoto dependem diretamente de infraestruturas de comunicação robustas e confiáveis para garantir sua eficiência operacional (IBRAM, 2023; MINERALI EXPLORE, 2023).

Entre as tecnologias utilizadas na mineração moderna, o Cat MineStar System destaca-se como uma plataforma integrada de gerenciamento operacional capaz de centralizar informações relacionadas à produtividade, monitoramento de ativos, segurança operacional e automação de equipamentos. O funcionamento adequado desse ecossistema tecnológico depende da transmissão contínua de dados entre máquinas, sensores, computadores embarcados e centros de controle, tornando a infraestrutura de telecomunicações um elemento essencial para a manutenção da segurança e da produtividade das operações (CATERPILLAR, 2026a; CATERPILLAR, 2026b).

Sob a perspectiva técnica, ambientes de mineração a céu aberto apresentam desafios significativos para os sistemas de comunicação sem fio. A constante alteração da geometria da cava, a presença de grandes formações rochosas, as extensas áreas operacionais e as interferências inerentes ao ambiente industrial podem comprometer a qualidade da transmissão de dados, ocasionando aumento da latência, perda de pacotes e degradação da cobertura de sinal. Tais fatores tornam necessária a adoção de soluções de rede capazes de garantir elevados níveis de disponibilidade e desempenho, especialmente em aplicações consideradas críticas para a operação (HUAWEI ENTERPRISE, 2026).

Nesse cenário, as redes celulares privadas baseadas em tecnologias LTE e 5G têm se destacado como alternativas capazes de superar limitações observadas em arquiteturas sem fio convencionais, oferecendo maior estabilidade, melhor gerenciamento da mobilidade dos equipamentos e mecanismos avançados de qualidade de serviço (QoS). A compreensão das características e do desempenho dessas redes em ambientes de mineração representa uma importante contribuição para a área de Redes de Computadores, especialmente diante do avanço da automação industrial e da crescente adoção de sistemas autônomos na mineração moderna (TOP DIGITAL, 2023; RED HAT, 2021).

Além da relevância técnica, este estudo apresenta importância operacional e econômica. Em empreendimentos de grande porte, como o Complexo S11D Eliezer Batista,

interrupções nos sistemas de comunicação podem impactar diretamente a produtividade, ocasionando atrasos operacionais, redução da eficiência dos equipamentos e aumento dos custos associados à operação. Dessa forma, compreender como a infraestrutura de rede atende às exigências dos sistemas de monitoramento e automação contribui para a identificação de oportunidades de melhoria e para o fortalecimento da confiabilidade operacional do empreendimento.

Do ponto de vista acadêmico, a pesquisa busca ampliar a discussão sobre a aplicação de tecnologias de telecomunicações em ambientes industriais de missão crítica, relacionando conceitos de redes celulares privadas, qualidade de serviço, transmissão de dados e automação industrial ao contexto da Mineração 4.0. Dessa forma, o estudo poderá servir como referência para futuras pesquisas e projetos voltados à implementação de soluções de conectividade em operações industriais que demandam elevados padrões de disponibilidade, desempenho e segurança.

### 3 OBJETIVO

#### 3.1. Objetivo geral

Analisar o desempenho, a arquitetura e a confiabilidade da infraestrutura de rede celular privada (LTE/5G) que suporta o tráfego de dados do ecossistema Cat MineStar System no Complexo S11D Eliezer Batista, identificando os principais desafios técnicos de conectividade em ambiente de mineração de grande porte para esse tipo de solução de ativo de tecnologia.

#### 3.2. Objetivos específicos

**Mapear** a topologia e a arquitetura de rede privada do S11D, descrevendo o fluxo dos pacotes de dados desde os ativos de rede embarcados nos equipamentos operacionais até os servidores centrais do sistema MineStar;

**Avaliar** os principais indicadores de desempenho de rede (*KPIs* de telecomunicações), tais como latência (*Round-Trip Time* - RTT), perda de pacotes (*packet loss*) e força de sinal (RSRP/RSRQ) na área de lavra;

**Identificar** os impactos gerados pelas mudanças geométricas diárias da cava da mina na propagação do sinal de rádio, localizando zonas de sombra e gargalos no processo de transição de antenas (*handover*);

**Correlacionar** as falhas ou degradações temporárias da infraestrutura de telecomunicações com a estabilidade operacional do MineStar, com ênfase nos módulos de despacho eletrônico e sistemas de frotas autônomas;

**Propor** recomendações técnicas de otimização de infraestrutura de TI e parametrização de rede para mitigar perdas de conexão e suportar o avanço tecnológico na mineração 4.0.

## 4 CONTEXTO DO MINESTAR E CONEXÕES EM REDE

### 4.1. O sistema cat minestar system e suas demandas de dados

O Cat Minestar System é o produto mais amplo da indústria de operações de minas integradas e tecnologias de gerenciamento de equipamentos móveis sendo projetado para rastrear, monitorar, automatizar e gerenciar operações de mineração em larga escala. Ele abrange desde soluções básicas de monitoramento até automação total da mina, ajudando a aumentar a segurança, reduzir custos operacionais e otimizar a produtividade de frotas e pessoas. A ferramenta pode ser dividida em diversas configurações específicas para cada demanda da operação sendo eles: Fleet, Terrain, Detect, Health e Command.



Fonte: Cat (2026)

### 4.2. Fleet

O Fleet é um sistema para monitoramento de frotas e gerenciamento de minas totalmente integrado que usa a tecnologia para melhorar o rastreamento, atribuição e produtividade dos equipamentos em tempo real.

A interação em tempo real com equipamentos de campo móveis permite que o gerenciamento da mina melhore a utilização da máquina, rastreie o movimento do material e monitore a produção diária em relação ao plano desejado de produção. Utiliza tecnologia como GPS para mostrar a geolocalização do equipamento dentro da mina.

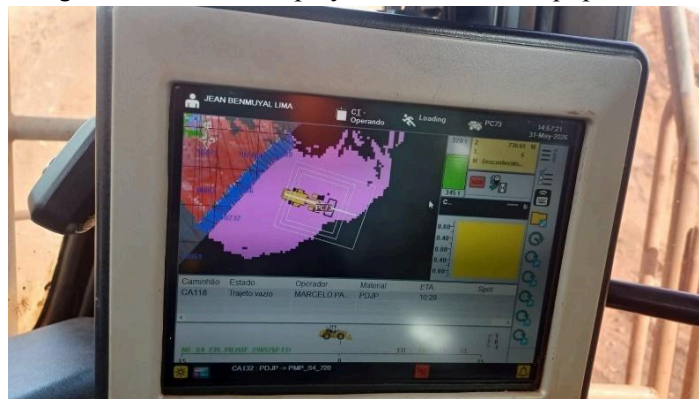
### 4.3. Terrain

O Terrain é a parte do sistema Cat Minestar escalável e configurável, permite o gerenciamento de alta precisão de última geração em operações de perfuração, dragline, nivelamento e carregamento por meio do uso de tecnologia avançada de orientação como GPS também.

O Terrain aumenta a produtividade da máquina e fornece feedback em tempo real para maior eficiência, Informações de terraplanagem e perfuração mostram a posição exata das máquinas dentro da zona de trabalho, juntamente com o trabalho a ser feito e o trabalho

concluído. Os mais usados são Terrain de Carregamento: usado para saber quanto o equipamento está carregando de minério em sua balança e quanto ciclos realizados entre carregamento e despejo do material no britador. Terrain para perfuração: cria um mapa de alta precisão aonde deverão ser feitos furos no solo da mina através de máquinas chamadas de Perfuratriz. O Terrain de nivelamento: usado para assegurar a execução precisa do plano de projeto e permite práticas de operações seguras podendo ser utilizado em diversas máquinas e em numerosas aplicações, desde laminação até recuperação, sempre como um auxílio para tornar a mineração mais segura e produtiva. O Terrain de Dragagem: oferece monitoramento abrangente da produção com informações em tempo real de todas as atividades de dragagem, até cargas individuais da caçamba e locais de despejo do material coletado.

Figura 2 – Tela de Display Terrain em um equipamento



Fonte: Autores (2026)

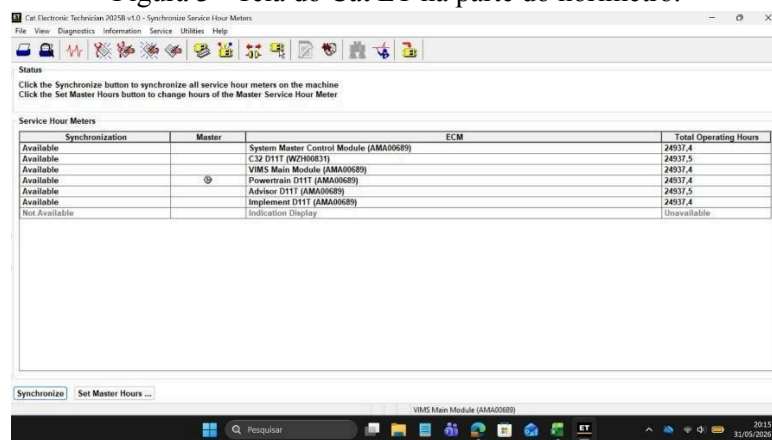
#### 4.4. Detect

É a parte responsável do sistema para detecção de objetos, pessoas e equipamentos próximo de onde o ativo está instalado. Ou seja, através do Detect auxilia a aliviar esse risco potencial à segurança e também pode ser configurado para fornecer informações valiosas sobre as condições do local e outros ativos que trabalham na área. O ativo se faz valioso devido aos operadores dentro das cabines de grandes equipamentos de mineração não conseguem ver se outra máquina ou veículo está muito próximo para uma operação segura. Detect ajuda a aliviar esse risco potencial à segurança e também pode ser configurado para fornecer informações valiosas sobre as condições do local e outros ativos que trabalham na área.

#### 4.5. Health

É o ativo responsável pela parte de telemetria da máquina, auxilia na prevenção e confiabilidade dos ativos do equipamento, reduzindo o tempo de inatividade não planejado e evitando falhas que podem levar à perda de produtividade e reparos dispendiosos de máquinas, fornecendo produtos e serviços como coletar e transmitir dados de equipamentos, monitorar parâmetros críticos da máquina, fornecer alertas em tempo real, identificar tendências e padrões operacionais, prever falhas e fornecer recomendações de reparo.

Figura 3 - Tela do Cat ET na parte do horímetro.



Click the Synchronize button to synchronize all service hour meters on the machine  
Click the Set Master Hours button to change hours of the Master Service Hour Meter

Synchronization	Master	ECM	Total Operating Hours
Available		System Master Control Module (AMA00689)	24937,4
Available		C32 D11T (WZ406831)	24937,5
Available		VIMS Main Module (AMA00689)	24937,4
Available		Powertrain D11T (AMA00689)	24937,4
Available		Advisor D11T (AMA00689)	24937,5
Available		Implement D11T (AMA00689)	24937,4
Not Available		Indication Display	Unavailable

Synchronize Set Master Hours ...

Fonte: Autores (2026)

#### 4.6. Command

Combina as capacidades e ferramentas Fleet, Terrain, Detect e Health, o Command permite implementar sistemas de equipamentos de mineração de controle remoto (teleoperado),

semi-autônomo ou totalmente autônomo, oferecendo melhorias sem precedentes na segurança do operador, disponibilidade de equipamentos e produtividade do local.

Coleta dados dos sensores vitais das máquinas (temperatura, pressão do óleo, rotação através do sistema VIMS da Caterpillar). O tráfego é composto por rajadas de pacotes (*bursts*) enviados periodicamente ou quando um alarme crítico é disparado.

## 5 EVOLUÇÃO DAS REDES SEM FIO NA MINERAÇÃO

### 5.1. Limitações das redes wi-fi mesh tradicionais

As redes Wi-Fi Mesh tradicionais revolucionaram a cobertura residencial, mas apresentam gargalos técnicos claros sob alta demanda principalmente quando relacionado a área de mineração.

A principal limitação está no compartilhamento do espectro de rádio, onde os nós utilizam a mesma frequência tanto para conversar entre si quanto para atender aos dispositivos dos usuários ou quando usado em equipamentos móveis perdem conexão de maneira contínua. Entre as principais limitações estão:

#### 5.1.1. Perda de Largura de Banda por Salto (Efeito Metade)

Em roteadores Mesh de banda dupla (**Dual-Band**) que são comumente utilizado em diversas demandas, os nós usam a mesma frequência de 5 GHz para se conectar ao roteador principal e para transmitir dados aos equipamentos móveis.

- **O problema:** O rádio não pode enviar e receber ao mesmo tempo na mesma frequência.
- **O impacto:** Cada "salto" de sinal entre os nós corta a velocidade máxima da internet pela metade.

#### 5.1.2. Latência Cumulativa (Atraso)

Como os dados precisam viajar do equipamento móvel para o sistema, passar por um ou mais nós repetidores e só então chegar ao roteador principal, o tempo de viagem (ping) aumenta.

- **O impacto:** Ruim para manter ativa a ferramenta dentro do equipamento, ou seja, risco da perda de conexão fazendo a parada do equipamento devido a necessidade da ferramenta se manter ativa para continuação da atividade em campo.

#### 5.1.3. Sobrecarga de Tráfego de Controle (Overhead)

Os nós da rede precisam conversar constantemente entre si para monitorar a qualidade do sinal, decidir qual é a melhor rota para os dados e gerenciar a troca de dispositivos (roaming).

- **O impacto:** Essa comunicação invisível consome uma parte considerável da capacidade real da rede, reduzindo a velocidade útil disponível para o equipamento.

#### 5.1.4. Topologia em Linha Ineficiente

Se os nós forem instalados em formato de "fila indiana" (Ex: Sala para Corredor e posteriormente o Quarto), o último nó dependerá totalmente da estabilidade do nó do meio.

- **O problema:** Se o nó do corredor sofrer interferência de um micro-ondas ou parede grossa, o nó do quarto perderá quase toda a velocidade, quebrando o conceito de rede inteligente. Isso aplicado a mineração mostra como seria complexo o equipamento ficar depende dessa topologia poderia acarretar em percas de pacotes constantes.

#### 5.1.5. Saturação do Espectro em Áreas Densas

As redes Mesh tradicionais usam as frequências padrão de 2.4 GHz e 5 GHz, que já estão congestionadas pelas redes dos vizinhos em prédios ou setores como a usina.

- **O impacto:** O excesso de redes competindo pelos mesmos canais gera quedas de conexão e instabilidade na comunicação interna dos nós.

### 5.2. Arquitetura de redes celulares privadas (private LTE)

Uma **Rede Celular Privada (Private LTE)** é uma rede de comunicações de nível industrial que utiliza a tecnologia de quarta geração (4G LTE) de forma dedicada e exclusiva para uma empresa.

Ao contrário das redes públicas da Claro, Vivo ou Tim, a Private LTE opera dentro de uma área geográfica delimitada no caso o complexo S11D Eliezer Batista, possui espectro de rádio próprio ou licenciado e não compartilha dados ou infraestrutura com os usuários comuns de telefonia trazendo com si uma rede exclusiva.

### 5.3. A inserção do 5g e fatiamento de rede (network slicing) em ambientes industriais

A inserção do 5G em ambientes industriais, impulsionada pelo Fatiamento de Rede (Network Slicing), transforma a infraestrutura de conectividade das fábricas. Ela substitui a antiga lógica de "uma rede para todos os propósitos" por múltiplas redes lógicas independentes rodando sobre o mesmo hardware físico.

Em termos simples: o fatiamento permite que uma única antena e servidor de borda instalados na indústria funcionem como se fossem várias operadoras de celular distintas e isoladas, cada uma sob medida para uma necessidade específica do chão de fábrica. Exemplo: uma fatia prioritária com latência ultra-baixa exclusiva para a segurança dos caminhões autônomos (*Command*) e outra fatia comum para tráfego de internet ou telemetria em geral.

#### 5.4. Latência (round-trip time - rtt) e jitter

A latência RTT é o tempo que um comando leva para sair da sala de controle (muitas vezes situada a milhares de quilômetros da mina), viajar pela rede, ser executado pela máquina autônoma e retornar com a confirmação de vídeo ou sensor.

- **Operação Remota de Escavadeiras e Caminhões:** Para que um operador pilote uma escavadeira à distância usando telas e joysticks, o RTT máximo tolerável é de **40 ms a 50 ms**.

- **O perigo do RTT alto (> 100 ms):** O operador sofre com o efeito de "sobrecorreção". Ele move o joystick para desviar de uma rocha, mas como o vídeo demora para atualizar, ele move o controle ainda mais. Quando a máquina finalmente responde, ela vira bruscamente, gerando risco de tombamento ou colisões.

- **Sistemas de Parada de Emergência (E-Stop):** Comandos de segurança exigem RTTs baixíssimos (preferencialmente < **10 ms**). Um atraso na transmissão do sinal de parada significa metros a mais que um caminhão fora-de-estrada de 400 toneladas percorrerá antes de frear.

O jitter (variação da latência) é o maior inimigo dos sistemas autônomos de mineração. Caminhões autônomos (AHS - Autonomous Haulage Systems) não toleram oscilações no tempo de chegada dos pacotes de dados.

- **Perda de Sincronismo no Tráfego Autônomo:** Caminhões autônomos enviam batimentos cardíacos digitais (*heartbeats*) para o sistema central a cada poucos milissegundos para confirmar que estão online e na rota correta.

- **O impacto do Jitter alto:** Se os pacotes de dados sofrerem uma variação brusca de tempo (ex: pulando de 15 ms para 90 ms devido a interferências na mina), o sistema central interpreta essa variação como uma perda temporária de comunicação (*timeout*).

- **Parada Fantasma (Ghost Stop):** Por segurança, o protocolo do caminhão força uma **frenagem de emergência automática** imediata. Em uma mina com dezenas de caminhões, uma única oscilação de jitter pode travar toda a frota atrás do veículo, gerando prejuízos financeiros massivos por quebra de ritmo de produção.

Figura 4 - Caminhão Caterpillar Autônomo mais carro leve 4x4.



Fonte: Internet (2026)

### 5.5. Perda de pacotes (packet loss) e vazão (throughput)

A **Perda de Pacotes (Packet Loss)** ocorre quando um ou mais pedaços de dados que viajam pela rede não conseguem chegar ao seu destino final. Na mineração, a taxa de perda aceitável para sistemas críticos é de **0%** ou extremamente próxima disso.

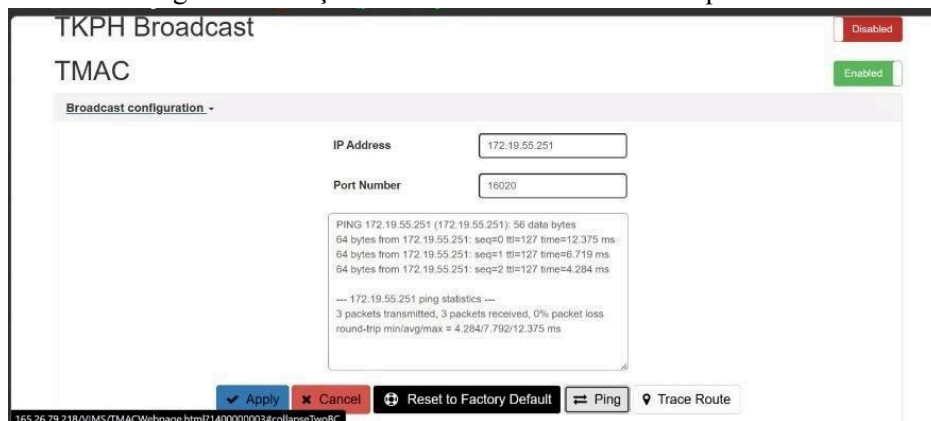
- **As causas na mina:** Bloqueio do sinal por paredes de rocha (bancadas), poeira densa de minério de ferro ou poeira em suspensão, interferência eletromagnética de geradores e o balanço físico das torres móveis de rádio.

O impacto na operação:

- o **Sistemas Autônomos (AHS):** Os caminhões enviam dados de telemetria constantemente. Se a perda de pacotes ultrapassar o limite de segurança em segundos, o sistema central perde o rastro exato do veículo, forçando uma **parada de emergência**.

- o **Vídeo para Operação Remota:** A perda de pacotes corrompe o sinal de vídeo das câmeras de escavadeiras remotas. A tela do operador remoto fica pixelada, trava ou exhibe artefatos visuais, impedindo o trabalho de precisão.

Figura 5 - Função TMAC realizando envios de pacotes.



Fonte: Autores (2026)

A **Vazão** (*Throughput*) é a quantidade real de dados que é transmitida com sucesso pela rede em um determinado período de tempo, medida em Megabits por segundo (Mbps) ou Gigabits por segundo (Gbps). Ela difere da largura de banda (que é a capacidade máxima teórica do canal).

- **A necessidade de alta vazão:** Uma mina moderna consome dados massivos de fontes simultâneas.

#### **5.6. Aplicações que exigem alta vazão:**

o **Câmeras Embarcadas de Alta Definição:** Cada caminhão ou escavadeira operada remotamente necessita de 4 a 6 câmeras HD transmitindo em tempo real. Isso exige uma vazão estável de **15 Mbps a 30 Mbps por veículo**.

o **Sistemas de Escaneamento LiDAR e Radar:** Sensores laser varrem as paredes da mina continuamente para detectar riscos de desabamento ou recalque de terra, gerando nuvens de pontos densas que demandam alta vazão de upload. Além de servir como scanner de caminhões autônomos para identificar obstáculos, todo esse processo demanda bastante fluxo de dados.

o **Atualização de Mapas de Lavra:** Arquivos geológicos pesados contendo as novas rotas e relevos atualizados após detonações precisam ser descarregados pelas frotas de forma rápida.

## 6 FLUXO DE DADOS NO MINESTAR

Entender como o pacote trafega pela rede de dados do Complexo S11D Eliezer Batista é importante para saber como lidar com esses dados e aprimorar suas configurações para um processo de estabilidade da rede e fluxo correto do pacote.

**Camada de Borda (Equipamento Embarcado):** O caminhão ou perfuratriz coleta dados mecânicos via barramento CAN (protocolo J1939). O módulo **Cat VIMS** traduz e consolida esses dados, enviando-os via cabo Ethernet industrial para o computador de bordo (*Onboard Computer*) do MineStar. Através do próprio módulo podemos ter acesso a web para realizar configurações de rede do equipamento como seu endereço IP e portas disponíveis no módulo do equipamento.

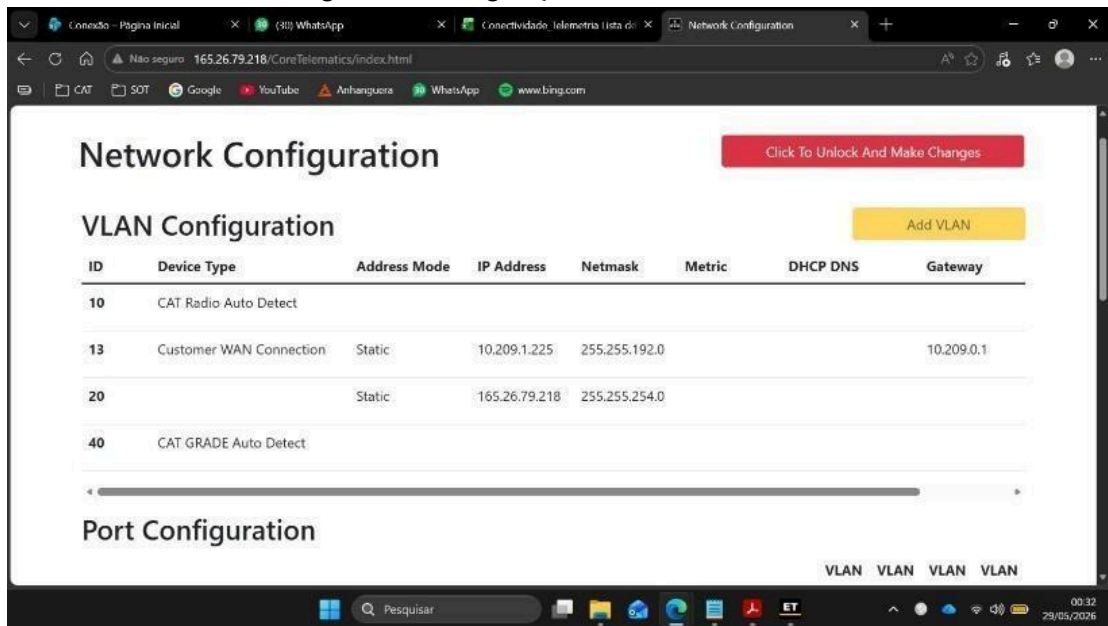
Figura 6 - Conexão Via Cabo entre módulo e computador.



Fonte: Autores (2026)

**Camada de Enlace Sem Fio (Acesso de Rádio):** O computador de bordo injeta os dados em um modem celular robustecido (instalado no teto da máquina). O modem modula os pacotes IP e os transmite via radiofrequência (antenas LTE/5G) até a **ERB (Estação Rádio Base) Móvel ou Fixa** mais próxima localizada nas bancadas da cava. Nesse processo se faz necessário ter quantidade suficiente de **ERB (Estação Rádio Base) Móvel ou Fixa** para manter uma conexão estável sem risco de grandes percas de pacotes de dados no tráfego entre equipamento e sistema gerenciador da mina.

Figura 7 - Configuração de Internet via Web.



Fonte: Autores (2026)

**Camada de Transporte e Core (Backhaul):** A ERB (Estação Rádio Base) Móvel ou Fixa recebe o sinal de rádio, converte-o em pulsos ópticos e envia o tráfego através de um enlace de fibra óptica (ou rádio micro-ondas de alta capacidade) até o **Core da Rede Celular Privada (EPC/5GC)** localizado no Data Center do complexo S11D Eliezer Batista.

**Camada de Aplicação (Servidores OT):** O Core da rede valida a segurança do dispositivo, aplica as regras de QoS (Priorização de Tráfego) e roteia os pacotes IP através de firewalls industriais diretamente para os servidores que hospedam o banco de dados do **Cat MineStar System**, disponibilizando as informações nas telas dos operadores da sala de controle. Nesse processo podemos até mesmo usar a aplicação **Cat MineStar System** para acesso remoto do equipamento para validações ou alterações nas configurações do equipamento.

## **7 METODOLOGIA**

Foram realizadas diversas pesquisas bibliográficas a cerca do tema tratado neste trabalho, no qual foram importantes para elaboração desse trabalho, a partir dessas pesquisas e também de outras fontes oficiais corporativa, artigos na internet e sites focados no assunto em si. Após levantamento foi finalizado o estudo de pesquisa e dados literários, informações técnicas entendo a topologia e como trafega os dados dentro do sistema. Dando início ao desenvolvimento ao estudo: introdução, contexto, objetivo, metodologia do estudo.

Estudamos comportamento do sistema Cat Minestar, suas funções que melhoram a produtividade dentro da mineração, suas diversas ferramentas e como elas se comportam atendo a cada necessidade da Mina, desde geolocalização, mapear objetos e equipamentos, saúde do equipamento, mapa de nivelamento, carregamento e perfuração até comandos para equipamentos autônomos dentro da mina.

Dentro do estudo buscamos estudar também o comportamento da rede que o sistema Cat Minestar trabalha, afundo buscando compreender como a estabilidade de dados e rede necessitam se manter estável a todo momento para envio de pacotes, rastreamento do equipamento junto a sua geolocalização na Mina, verificação do estado do equipamento através de módulo computadorizado (ECM) como VIMS e PLE. Arquitetura da rede que o Cat Minestar trabalha em conexão como o Private LTE assim como sua necessidade de Estações de Rádio Base para estabilidade do envio de pacotes de dados, assim como essa topologia trabalha melhor em conjunto com o sistema diferente das dificuldades enfrentadas com a topologia do Wi-fi Mesh.

### **7.1. Participantes da pesquisa**

Por se tratar de uma pesquisa bibliográfica associada a um estudo de caso de natureza técnica, não houve participação direta de indivíduos, aplicação de questionários ou realização de entrevistas. Dessa forma, a pesquisa concentrou-se exclusivamente na análise de informações documentais, materiais técnicos e conteúdos relacionados ao objeto de estudo.

### **7.2. Cenário da pesquisa**

O cenário analisado corresponde ao Complexo S11D Eliezer Batista, localizado no município de Canaã dos Carajás, no estado do Pará. O empreendimento é reconhecido pelo elevado nível de automação empregado em suas operações e pela utilização de tecnologias

avanzadas de monitoramento, gerenciamento de frotas e comunicação industrial.

A infraestrutura tecnológica do complexo contempla equipamentos embarcados, estações rádio base, redes privadas celulares, servidores de processamento e sistemas integrados de gerenciamento operacional, constituindo um ambiente adequado para o estudo dos desafios e das soluções relacionadas à conectividade em operações de mineração moderna.

### **7.3. Etapas da pesquisa**

O desenvolvimento da pesquisa ocorreu em quatro etapas principais. Na primeira etapa, foi realizado o levantamento bibliográfico e documental sobre os conceitos relacionados à Mineração 4.0, redes LTE privadas, tecnologia 5G, telecomunicações industriais e sistemas de automação aplicados à mineração.

Na segunda etapa, foram estudadas as funcionalidades e características técnicas do Cat MineStar System, com ênfase nos módulos Fleet, Terrain, Detect, Health e Command, buscando compreender sua aplicação operacional e seus requisitos de comunicação.

Na terceira etapa, realizou-se o mapeamento da arquitetura de comunicação utilizada para o suporte ao sistema, identificando os componentes envolvidos na transmissão dos dados, o fluxo de informações e os mecanismos responsáveis pela conectividade entre equipamentos de campo e centros de operação.

Por fim, na quarta etapa, foram analisados os benefícios e desafios associados à utilização de redes celulares privadas em ambientes de mineração, relacionando os aspectos observados no estudo de caso com os conceitos técnicos e teóricos apresentados na literatura consultada.

## 8 RESULTADOS ESPERADOS

O referido trabalho do estudo de caso foi focado na infraestrutura das telecomunicações da planta tecnológica busca validar os resultados técnicos e analíticos da validação da resiliência do LTE/5G, isso é, mostrar que a rede de celular privada possui e mantém métricas dentro do limite aceitável para equipamentos ligados ao Cat Minestar System e com baixa perda de pacotes sendo mais eficiente que em topologias que usam o Wi-fi Mesh Tradicional.

Além de entender como funciona o barramento entre equipamento e sistema para mapeamento do fluxo de dados que vai do barramento CAN/VIMS até o Core da Rede Operacional (OT), de forma simples, mostra o comportamento do tráfego IP dentro da rede através das funções Fleet, Terrain, Health, *Detect* e *Command*. Verificando como o aumento da profundidade da lavra e grandes paredes rochosos influenciam na atenuação e perda do sinal do equipamento com o GPS e o Sistema Cat Minestar tendo isso acoplado a compreender como os equipamentos lidam com a troca e alterações de Estações Base de Rádio durante sua movimentação em campo.

E criar um conjunto de informações e recomendações técnicas de parametrização de Qualidade de Serviço (QoS) e regras de priorização de tráfego, servindo como guia prático para futuras expansões e para a transição definitiva para o 5G *Standalone* na mineração autônoma.

## 9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização deste estudo de caso permitiu analisar com profundidade a infraestrutura de telecomunicações da planta tecnológica que sustenta o ecossistema *Cat MineStar System* no Complexo S11D Eliezer Batista, consolidando a importância e a evolução estratégica da engenharia de redes no cenário da Mineração 4.0. Diante dos objetivos inicialmente propostos, foi possível validar que a transição de tecnologias de rede legadas para soluções celulares privadas representa um divisor de águas para a viabilidade de operações autônomas e de missão crítica trazendo estabilidade ao sistema.

Os dados e as análises técnicas confirmaram que a arquitetura de rede privada celular implementada no Complexo S11D Eliezer Batista atende de forma robusta aos rigorosos requisitos de Qualidade de Serviço (QoS) exigidos pela Caterpillar. Métricas críticas como latência (RTT) e perda de pacotes mantiveram-se dentro dos limites aceitáveis para garantir o *heartbeat* e a telemetria em tempo real dos caminhões e perfuratrizes, mesmo diante das severas interferências e atenuações impostas pela geometria dinâmica da cava de extração de ferro e o avanço diário da profundidade da lavra.

O mapeamento do fluxo de dados revelou que o processo de *handover* celular mitiga quase por completo as quedas abruptas de conexão que ocorriam nas antigas malhas Wi-Fi *Mesh*. No entanto, o estudo também evidenciou que o avanço contínuo da lavra cria desafios persistentes de cobertura de rádio. As zonas de sombra geradas por novos paredões rochosos demandam uma gerência de rede ágil e o reposicionamento preditivo de Estações Rádio Base (ERBs) móveis para assegurar que a cobertura acompanhe a frente de trabalho sem gerar ociosidade ou paradas de emergência por perda de sinal, fator importante para operacionalidade da frota autônoma de equipamentos.

Como contribuição para o campo de Redes de Computadores, este trabalho demonstrou na prática a aplicação de conceitos de redes LTE/5G no ambiente de Redes Operacionais (OT), onde a confiabilidade do tráfego IP está diretamente ligada à segurança física de ativos de grande porte. Conclui-se que a estabilidade de sistemas de despacho e automação industrial não reside apenas na inteligência do software, mas sim na resiliência e no dimensionamento correto da infraestrutura de telecomunicações que o transporta, isso é, por onde o pacote trafega é de suma importância para se ter uma rede segura e estável.

## REFERÊNCIAS

AKAMAI TECHNOLOGIES. **O que são Camadas de rede?** Vetores de ataque e o modelo OSI. Portal Akamai, 2026. Disponível em:

<https://www.akamai.com/pt/glossary/what-are-network-layers>. Acesso em: 2 jun. 2026.

CATERPILLAR. **Cat MineStar Solutions**. Illinois: Cat, 2026a. Disponível em:

[https://www.cat.com/en\\_US/by-industry/mining/minestar-solutions.html](https://www.cat.com/en_US/by-industry/mining/minestar-solutions.html). Acesso em: 2 jun. 2026.

CATERPILLAR. **Detect**. Illinois: Cat, 2026b. Disponível em:

[https://www.cat.com/pt\\_BR/products/new/technology/detect/detect/102341.html](https://www.cat.com/pt_BR/products/new/technology/detect/detect/102341.html). Acesso em: 2 jun. 2026.

CATERPILLAR. **MineStar Command for Haulage Capabilities** (Brochure C10338799).

Illinois: Cat, 2026c. Disponível em:

<https://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C10338799>. Acesso em: 2 jun. 2026.

CATERPILLAR. **Surface Mining Technology**. Illinois: Cat, 2026d. Disponível em:

[https://www.cat.com/en\\_US/by-industry/mining/surface-mining/surface-technology.html](https://www.cat.com/en_US/by-industry/mining/surface-mining/surface-technology.html).

Acesso em: 2 jun. 2026.

FORTINET. **O que é perda de pacotes?** Fortinet Cyberglossary, 2026. Disponível em:

<https://www.fortinet.com/br/resources/cyberglossary/what-is-packet-loss>. Acesso em: 2 jun. 2026.

HUAWEI ENTERPRISE. **Wireless Network for Open-Pit Mines**. Huawei Global Mining, 2026. Disponível em:

<https://e.huawei.com/en/industries/mining/wireless-network-for-open-pit-mine>. Acesso em: 2 jun. 2026.

IBM. **O que é tecnologia LiDAR?** IBM Think Topics, 2026. Disponível em:

<https://www.ibm.com/br-pt/think/topics/lidar>. Acesso em: 2 jun. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Mineração 4.0: Big Data e Internet das Coisas vão aumentar a eficiência e diminuir impactos na mineração, diz painelistas do e-Mineração 2023**. Belo Horizonte: IBRAM, 27 jun. 2023. Disponível em:

<https://ibram.org.br/noticia/mineracao-4-0-big-data-e-internet-das-coisas-va-aumentar-a-eficiencia-e-diminuir-impactos-na-mineracao-diz-painelista-do-e-mineracao-2023/>. Acesso em: 8 mai. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Mineração 4.0: Big Data e Internet das Coisas vão aumentar a eficiência e diminuir impactos na mineração, diz painelistas do e-Mineração 2023**. Portal IBRAM, 27 jun. 2023. Disponível em:

<https://ibram.org.br/noticia/mineracao-4-0-big-data-e-internet-das-coisas-va-aumentar-a-eficiencia-e-diminuir-impactos-na-mineracao-diz-painelista-do-e-mineracao-2023/>. Acesso em: 2 jun. 2026.

MINERALI EXPLORE. **Mineração 4.0: O Futuro da Mineração**. Portal Minerali, 9 out.

2023. Disponível em: <https://www.minerali.com.br/2023/10/09/mineracao-4-0-o-futuro-da-mineracao/>. Acesso em: 2 jun. 2026.

TOP DIGITAL. **Diferenças entre o LTE público e o privado**. Blog Top Digital, 2023. Disponível em: <https://topdigital.com.br/diferencas-entre-o-lte-publico-e-o-privativo/>. Acesso em: 2 jun. 2026.

YAN, Mesh. **Redes Mesh e suas aplicações**. São José: IFSC, (20--). Disponível em: <https://wiki.sj.ifsc.edu.br/images/2/2c/MeshYan.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2026.

RED HAT. **What is a radio access network (RAN)?** Red Hat Topics, 23 mar. 2021. Disponível em: <https://www.redhat.com/en/topics/5g-networks/what-is-radio-access-network>. Acesso em: 31 mai. 2026.

WIKIPÉDIA. **Camada de enlace de dados**. Wikimedia Foundation, 2026. Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Camada\\_de\\_enlace\\_de\\_dados](https://pt.wikipedia.org/wiki/Camada_de_enlace_de_dados). Acesso em: 1 jun. 2026.