



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Análise de Desempenho de Redes de Satélites de Órbita Geoestacionária e Órbita Baixa para uso em Aplicações de IoT com os Protocolos MQTT e CoAP

Dissertação de Mestrado

Rodrigo Cavalcante Faria



São Cristóvão – Sergipe

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Rodrigo Cavalcante Faria

**Análise de Desempenho de Redes de Satélites de Órbita
Geoestacionária e Órbita Baixa para uso em Aplicações de IoT
com os Protocolos MQTT e CoAP**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Sergipe como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Ciência da Computação.

Orientador(a): Prof. Dr. Rafael Oliveira Vasconcelos
Coorientador(a): Prof. Dr. Admilson de Ribamar Lima
Ribeiro

São Cristóvão – Sergipe

2024

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

F224a Faria, Rodrigo Cavalcante
Análise de desempenho de redes de satélites de órbita geoestacionária e órbita baixa para uso em aplicações de IoT com os protocolos MQTT e CoAP / Rodrigo Cavalcante Faria ; orientador Rafael Oliveira Vasconcelos. - São Cristóvão, 2024.
68 f.; il.

Dissertação (mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Sergipe, 2024.

1. Satélites artificiais - Órbitas. 2. Benchmarking (Administração) 3. Internet das coisas. 4. Rede de computador – Protocolos. I. Vasconcelos, Rafael Oliveira orient. II. Título.

CDU 004.73



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Ata da Sessão Solene de Defesa da Dissertação do
Curso de Mestrado em Ciência da Computação-UFS.
Candidato: Rodrigo Cavalcante Faria

Em 28 dias do mês de agosto do ano de dois mil e vinte quatro, com início às 9hs e 30 minutos, realizou-se na Sala de Seminários do PROCC da Universidade Federal de Sergipe, na Cidade Universitária Prof. José Aloísio de Campos, a Sessão Pública de Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato **Rodrigo Cavalcante Faria**, que desenvolveu o trabalho intitulado: **“Análise de Desempenho de Redes de Satélites de Órbita Geoestacionária e Órbita Baixa para uso em Aplicações de IoT com os Protocolos MQTT e CoAP”**, sob a orientação do Prof. Dr. **Rafael Oliveira Vasconcelos** e coorientação do prof. Dr. **Admilson de Ribamar Lima Ribeiro**. A Sessão foi presidida pelo Prof. Dr. **Rafael Oliveira Vasconcelos** (PROCC/UFS), que após a apresentação da dissertação passou a palavra aos outros membros da Banca Examinadora, o Dr. **Igor Oliveira Vasconcelos** (CGTI/IFS), posteriormente o Prof. Dr. **Edward David Moreno Ordonez** (Procc/UFS) e, em seguida, Dr. **Admilson de Ribamar Lima Ribeiro** (PROCC/UFS). Após as discussões, a Banca Examinadora reuniu-se e considerou o mestrando (a) Aprovado “(aprovado/reprovado)”. Atendidas as exigências da Instrução Normativa 05/2019/PROCC, do Regimento Interno do PROCC (Resolução 67/2014/CONEPE), e da Resolução nº 04/2021/CONEPE que regulamentam a Apresentação e Defesa de Dissertação, e nada mais havendo a tratar, a Banca Examinadora elaborou esta Ata que será assinada pelos seus membros e pelo mestrando.

Cidade Universitária “Prof. José Aloísio de Campos”, 28 de agosto de 2024.

Documento assinado digitalmente
gov.br RAFAEL OLIVEIRA VASCONCELOS
Data: 02/09/2024 11:28:35-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

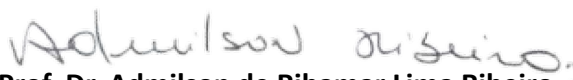
Prof. Dr. Rafael Oliveira Vasconcelos
(PROCC/UFS)
Presidente

Documento assinado digitalmente
gov.br IGOR OLIVEIRA VASCONCELOS
Data: 29/08/2024 08:37:11-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Igor Oliveira Vasconcelos
(CGTI/IFS)
Examinador Externo

Documento assinado digitalmente
gov.br EDWARD DAVID MORENO ORDONEZ
Data: 28/08/2024 21:26:24-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Edward David Moreno Ordonez
(PROCC/UFS)
Examinador Interno


Prof. Dr. Admilson de Ribamar Lima Ribeiro
(PROCC/UFS)
Examinador Interno

Documento assinado digitalmente
gov.br RODRIGO CAVALCANTE FARIA
Data: 29/01/2025 10:17:08-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Rodrigo Cavalcante Faria
Candidato

Agradecimentos

À minha família, minha mãe Maria Cristina, meu pai Francisco Faria, meu irmão Rodolfo Faria e minha esposa Lays Feitosa, por todo suporte nessa jornada.

Ao meu orientador Prof. Dr. Rafael Oliveira e coorientador Prof. Dr. Admilson de Ribamar, por toda paciência e parceria durante todo período do mestrado. À secretária do PROCC Elaine, pelo suporte referente às atividades, créditos e prazos.

Aos meus amigos Marcelo e Cristiano pelo apoio em diversos momentos durante essa caminhada.

A todos que contribuíram direta e indiretamente para que eu pudesse concluir essa fase tão importante da minha vida.

Obrigado!

Resumo

Atualmente existe uma grande adoção do uso de dispositivos IoT, seja através de interruptores inteligentes em uma residência ou sensores coletando dados para auxiliar na agricultura de precisão. Com isso, surge a necessidade de prover infraestrutura de rede e internet para atender a demanda crescente por conexão desses dispositivos. Uma das maiores iniciativas é o 5G, porém temos um problema de cobertura para essa tecnologia. Além disso, diversas aplicações de IoT tem a necessidade do uso de internet em ambientes inóspitos, que não são servidos pela infraestrutura de rede terrestre. Nesses casos, a conexão por satélite torna-se de suma importância para garantir cobertura onipresente e contínua para os dispositivos. Recentemente estamos passando por uma popularização do acesso a conexões de satélite de baixa órbita (LEO), tecnologia essa que proporciona uma conexão de baixa latência e com boa largura de banda. Desta forma, este trabalho realizou uma análise de desempenho das redes de satélite com o uso do protocolo de aplicação IoT MQTT e CoAP. Os experimentos foram aplicados em links de satélite para órbita geoestacionária (GEO) com a HughesNet e para órbita baixa (LEO) com a Starlink. O experimento avaliou a viabilidade de uso das redes GEO e LEO para uso de aplicações IoT com os protocolos MQTT e CoAP.

Palavras-chave: Satélite, LEO, GEO, *Benchmark*, IoT, MQTT, CoAP.

Abstract

Currently, there is significant adoption of IoT devices, whether it be through smart switches in homes or sensors collecting data to assist in precision agriculture. As a result, there is a need to provide network infrastructure and internet access to meet the growing demand for connecting these devices. One of the most significant initiatives is the 5G network; however, there is a coverage problem for this technology. Additionally, many IoT applications require internet access in remote and inhospitable environments that are not served by terrestrial network infrastructure. In such cases, satellite connectivity becomes essential to ensure ubiquitous and continuous coverage for the devices. Recently, there has been a popularization of access to low Earth orbit (LEO) satellite connections. Therefore, this work conducted a performance analysis of satellite networks using the IoT application protocols MQTT and CoAP. The experiments were carried out on satellite links for geostationary orbit (GEO) with HughesNet and for low Earth orbit (LEO) with Starlink. The experiment assessed the feasibility of using GEO and LEO networks for IoT applications with the MQTT and CoAP protocols.

Keywords: Satellite, LEO, GEO, Benchmark, IoT, MQTT, CoAP.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Órbitas de Satélites - Kayan Albertin (G1 (2024))	17
Figura 2 – Satélites GEO - Orbitron(Stoff, 2023)	18
Figura 3 – Satélites MEO - Orbitron(Stoff, 2023)	18
Figura 4 – Satélites LEO - Orbitron(Stoff, 2023)	18
Figura 5 – Órbita de satélites GEO	19
Figura 6 – Órbita de satélites LEO	20
Figura 7 – Formato do pacote MQTT (MISHRA, 2018)	23
Figura 8 – Formato do pacote CoAP (GUNNARSSON et al., 2022)	24
Figura 9 – <i>String</i> de Busca	26
Figura 10 – Processo de Seleção dos Artigos	27
Figura 11 – Arquitetura do experimento	32
Figura 12 – Rack de Equipamentos	33
Figura 13 – Conexões entre dispositivos	33
Figura 14 – Antenas LEO e GEO	34
Figura 15 – Arquitetura ComBench (HERRNLEBEN et al., 2021)	35
Figura 16 – Conceito de Área de Cobertura - LEO (CAKAJ, 2021)	36
Figura 17 – Latência MinasTelecom (Fibra Ótica)	41
Figura 18 – Latência Starlink (LEO)	41
Figura 19 – Taxa de Transferência Starlink (LEO)	42
Figura 20 – Latência HughesNet (GEO)	42
Figura 21 – Taxa de Transferência HughesNet (GEO)	43
Figura 22 – Latência MQTT sobre Starlink (LEO)	44
Figura 23 – Quantidade de mensagens entregues MQTT sobre Starlink (LEO)	45
Figura 24 – Quantidade de pacotes MQTT sobre Starlink (LEO)	46
Figura 25 – Latência MQTT sobre HughesNet (GEO)	47
Figura 26 – Quantidade de mensagens MQTT sobre HughesNet (GEO)	48
Figura 27 – Quantidade de pacotes MQTT sobre HughesNet (GEO)	49
Figura 28 – Latência CoAP sobre Starlink (LEO)	50
Figura 29 – Quantidade de mensagens CoAP entregues sobre Starlink (LEO)	51
Figura 30 – Quantidade total de pacotes CoAP sobre Starlink (LEO)	52
Figura 31 – Latência CoAP sobre HughesNet (GEO)	53
Figura 32 – Quantidade de mensagens CoAP entregues sobre HughesNet (GEO)	54
Figura 33 – Quantidade total de pacotes CoAP sobre HughesNet (GEO)	55
Figura 34 – Latência média do MQTT e CoAP sobre a Starlink (LEO) e a HughesNet (GEO)	56
Figura 35 – Mensagens entregues no MQTT e CoAP sobre a Starlink (LEO) e a HughesNet (GEO)	57

Figura 36 – Pacotes enviados no MQTT e CoAP sobre a Starlink (LEO) e a HughesNet (GEO)	58
--	----

Lista de tabelas

Tabela 1 – Simuladores utilizados	30
Tabela 2 – <i>Hardware</i>	34
Tabela 3 – Métricas	36
Tabela 4 – Taxa máxima de transferência durante o experimento	59

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
abnTeX	ABsurdas Normas para TeX
ACK	<i>Acknowledgement</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
CE	Critérios de Exclusão
CI	Critérios de Inclusão
CoAP	<i>Constrained Application Protocol</i>
DCOMP	Departamento de Computação
GEO	<i>Geostationary Earth Orbit</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
LEO	<i>Low Earth Orbit</i>
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
Pub	<i>Publish</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
REST	<i>Representational State Transfer</i>
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
Sub	<i>Subscribe</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TI	Tecnologia da Informação
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UFS	Universidade Federal de Sergipe

Sumário

1	Introdução	13
1.1	Contextualização	13
1.2	Justificativa	14
1.3	Objetivos	14
1.3.1	Objetivo Geral	14
1.3.2	Objetivos Específicos	14
1.4	Organização do Trabalho	15
2	Fundamentação Teórica	16
2.1	Redes de Satélite	16
2.1.1	Comunicação por Satélite	17
2.2	IoT - Internet das coisas	20
2.2.1	Contexto Histórico da IoT	20
2.3	Protocolo MQTT (<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>)	22
2.4	Protocolo CoAP (<i>Constrained Application Protocol</i>)	23
3	Revisão Sistemática da Literatura	25
3.1	Metodologia	25
3.1.1	Objetivo e Questões de Pesquisa (QP)	25
3.1.2	Bases de Dados	26
3.1.3	Termos de Busca	26
3.1.4	Critérios de Inclusão e Exclusão	26
3.1.5	Condução da Revisão	26
3.1.6	Relatório da Revisão	27
3.2	Estado da Arte	27
3.3	Resultados	30
3.3.1	QP1: Quais os principais desafios da utilização de protocolos <i>MQTT</i> e <i>CoAP</i> em Redes de Satélite?	30
3.3.2	QP2: Foram usadas ferramentas de simulação?	30
3.4	Consideração sobre trabalhos relacionados	31
4	Materiais e Métodos	32
4.1	Arquitetura	32
4.2	Metodologia	36
4.2.1	Métricas	36
4.2.2	Setup	37

4.2.3	Execução	37
5	Resultados	40
5.1	Avaliação de Latência e Taxa de Transferência	40
5.1.1	Conexão terrestre por fibra ótica	40
5.1.2	Satélite LEO	41
5.1.3	Satélite GEO	42
5.2	Avaliação de Desempenho do Uso do MQTT em Rede de Satélite de Órbita Baixa (LEO)	43
5.3	Avaliação de Desempenho do Uso do MQTT em Rede de Satélite de Órbita Geoestacionária (GEO)	47
5.4	Avaliação de Desempenho do Uso do CoAP em Rede de Satélite de Órbita Baixa (LEO)	50
5.5	Avaliação de Desempenho do Uso do CoAP em Rede de Satélite de Órbita Geoestacionária (GEO)	52
5.6	Análise dos Resultados	56
5.6.1	Análise Comparativa	56
5.6.2	Cenário Hipotético	59
6	Considerações Finais	61
6.1	Conclusão	61
6.2	Ameaças a validade	62
6.3	Trabalhos futuros	62
	Referências	63

1

Introdução

Este capítulo tem como objetivo introduzir o presente trabalho no contexto da avaliação de desempenho de redes de satélite de órbita geoestacionária e satélites de órbita baixa com o uso dos protocolos MQTT e CoAP.

1.1 Contextualização

O impacto da IoT em diversos aspectos da vida, incluindo indústria, logística e uso diário, está crescendo rapidamente ([CENTENARO et al., 2021](#)). Constantemente, novos casos de uso promissores estão sendo adicionados, impulsionados por tecnologias cada vez mais inteligentes e dispositivos mais eficientes em termos de energia e avanços nas tecnologias de comunicação ([CENTENARO et al., 2021](#)).

Projeções apontam que o número de dispositivos IoT conectados alcançará 75 bilhões até 2025. ([SCHILLER et al., 2022](#)). O setor de IoT Industrial (IIoT - *Industrial Internet of Things*), que inclui manufatura, varejo e agricultura, tem previsão de representar mais de 70% de todas as conexões IoT até 2024, com um crescimento de 180% no número de unidades IIoT nos próximos quatro anos ([NATIVI et al., 2020](#)).

No Brasil, o acesso à internet e infraestrutura de rede tem sido um desafio para adoção da agricultura de precisão com o uso de IoT ([PIVOTO et al., 2018](#)). Na maioria desses casos, existe a necessidade de conexão em ambientes que não são atendidos por redes de acesso terrestre e, consequentemente, os satélites se tornam de extrema importância para garantir cobertura ubíqua e contínua ([GIOTTI et al., 2018](#)).

A internet por meio de satélites geoestacionários (GEO) começa a se estabelecer a partir dos anos 2000, proporcionando uma alternativa de conexão ([DEUTSCHMANN; HIELSCHER; GERMAN, 2022](#)). Mais recentemente, as mega constelações de satélites em órbita terrestre baixa (LEO) estão ganhando destaque por meio de conexões poderosas e com baixa latência

([DEUTSCHMANN; HIELSCHER; GERMAN, 2022](#)).

De acordo com [Soua, Palattella e Engel \(2018\)](#), apesar de ser amplamente reconhecido o potencial dos satélites para IoT, ainda são necessários significativos ajustes e otimizações para permitir uma integração suave entre as redes de Máquina para Máquina (M2M) e os satélites.

1.2 Justificativa

A fim de garantir conectividade para aplicações IoT que necessitam de rede onde as conexões terrestres não atendem, as redes de satélite são muitas vezes a única opção. Os protocolos de IoT como o MQTT ([OASIS, 2023](#)) e CoAP ([IETF, 2023](#)), na sua concepção, foram projetados para tratar fatores como alta latência e baixa largura de banda. Entretanto, para operar em redes de satélite, estes protocolos precisam de ajustes e otimizações.

O mercado de satélites está em crescimento acelerado, com investimentos significativos por parte de empresas como SpaceX, Amazon (Projeto Kuiper) e OneWeb [G1 \(2024\)](#). Estes projetos buscam proporcionar conectividade global através de constelações de satélites LEO.

Com base no cenário identificado, foi elaborada uma revisão sistemática para avaliar as pesquisas acadêmicas a respeito do tema. Verificou-se com o RSL que existia a lacuna de execução de experimentos reais, pois os encontrados na literatura foram todos simulados. Com o intuito de avaliar o comportamento real das tecnologias de rede de satélite LEO e GEO, foi realizado um experimento de análise de desempenho com o uso dos protocolos MQTT e CoAP, analisando o uso destas redes para aplicações de IoT, contribuindo assim com a comunidade acadêmica.

1.3 Objetivos

Essa seção descreve o objetivo geral e os objetivos específicos desta pesquisa.

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar o desempenho de redes de satélite LEO e GEO utilizando os protocolos de aplicação o MQTT e CoAP e métricas como vazão, latência e entrega de mensagens. Serão avaliados os parâmetros de desempenho, constatando as diferenças entre as tecnologias.

1.3.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos:

- Avaliar o desempenho do uso do protocolo MQTT em rede de satélite de órbita baixa (LEO);
- Avaliar o desempenho do uso do protocolo MQTT em rede de satélite de órbita geoestacionária (GEO);
- Avaliar o desempenho do uso do protocolo CoAP em rede de satélite de órbita baixa (LEO);
- Avaliar o desempenho do uso do protocolo CoAP em rede de satélite de órbita geoestacionária (GEO);
- Comparar e discutir os resultados;

1.4 Organização do Trabalho

A estrutura deste trabalho está organizada da seguinte forma:

- Capítulo 2 - Fundamentação Teórica, aborda aspectos teóricos desta pesquisa, enfatizando conceitos básicos sobre os temas abordados neste trabalho, como por exemplo: redes de satélite, protocolos MQTT e CoAP;
- Capítulo 3 - Revisão Sistemática da Literatura (RSL), trabalhos selecionados com a intenção de identificar o estado da arte no uso de protocolos de IoT em redes de satélite;
- Capítulo 4 - Materiais e Métodos, descreve a arquitetura, metodologia e métricas utilizadas no experimento;
- Capítulo 5 - Resultados, descreve os experimentos executados e seus resultados;
- Capítulo 6 - Considerações finais, ameaças a validade e trabalhos futuros.

2

Fundamentação Teórica

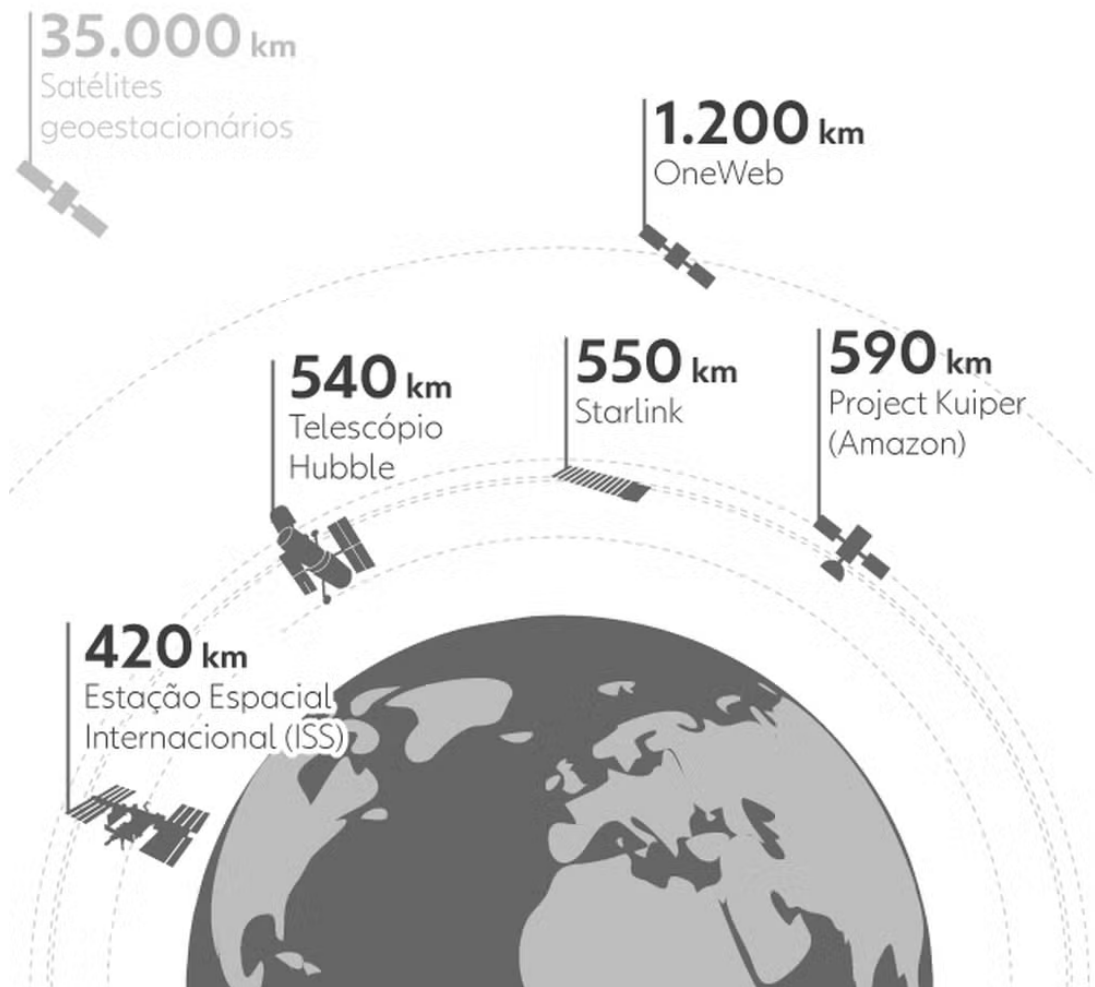
Esse capítulo apresenta os conceitos mais importantes para o entendimento deste trabalho.

2.1 Redes de Satélite

Redes de satélite são sistemas de comunicação que utilizam satélites em órbita da Terra para transmitir e receber dados. Esses sistemas podem ser classificados de acordo com a altitude da órbita do satélite: órbitas baixas (LEO), médias (MEO) e geoestacionárias (GEO). As redes de satélite são essenciais para fornecer conectividade em áreas remotas onde as infraestruturas terrestres são limitadas ou inexistentes ([MARTNEZ et al., 2020](#)).

Os satélites em órbita baixa (LEO) estão entre 500 e 2.000 km acima da Terra e são utilizados para serviços como observação da Terra, comunicação global e Internet das Coisas (IoT). Eles têm a vantagem de menor latência devido à proximidade com a superfície terrestre, mas requerem constelações de múltiplos satélites para garantir cobertura contínua. Os satélites em órbita média (MEO), entre 2.000 e 35.786 km, são utilizados principalmente para sistemas de navegação, como o GPS. Eles cobrem áreas maiores com menos satélites comparado aos LEO. Os satélites em órbita geoestacionária (GEO) estão posicionados a cerca de 35.786 km e permanecem fixos em um ponto específico acima do equador, proporcionando cobertura constante para grandes áreas. Eles são ideais para transmissões de televisão, rádio e comunicações de dados em larga escala ([Symmetry, 2018](#)).

Figura 1 – Órbitas de Satélites - Kayan Albertin (G1 (2024))



2.1.1 Comunicação por Satélite

As órbitas de satélite GEO (*geostationary earth orbit*), MEO (*medium earth orbit*), LEO (*low earth orbit*) influenciam diretamente a maneira como a comunicação de rede se comporta. Nesse contexto, os satélites GEO são os mais afetados com o aumento da latência, devido a sua maior distância em relação a antena na terra de $\approx 35.786\text{km}$. Entretanto, esse tipo de conexão pode ser mais estável, pois é provida por um único satélite que acompanha movimento de rotação da terra (BISIO; MARCHESI, 2008).

Em órbita existem mais de 5.000 satélites operacionais em LEO, cerca de 150 em MEO e 550 em GEO. A seguir as imagens ilustram a distribuição e localização desses satélites nas diferentes altitudes orbitais: LEO, MEO e GEO (Stoff, 2023).

Figura 2 – Satélites GEO - Orbitron(Stoff, 2023)

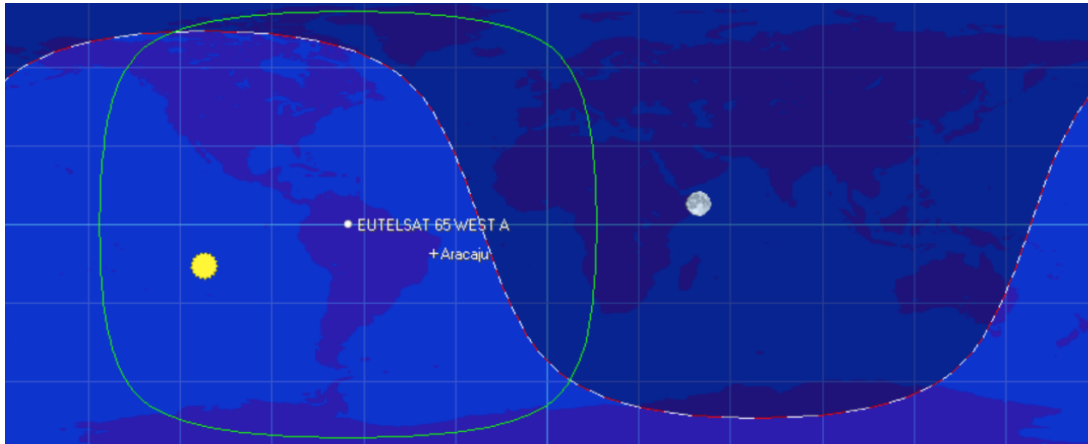


Figura 3 – Satélites MEO - Orbitron(Stoff, 2023)

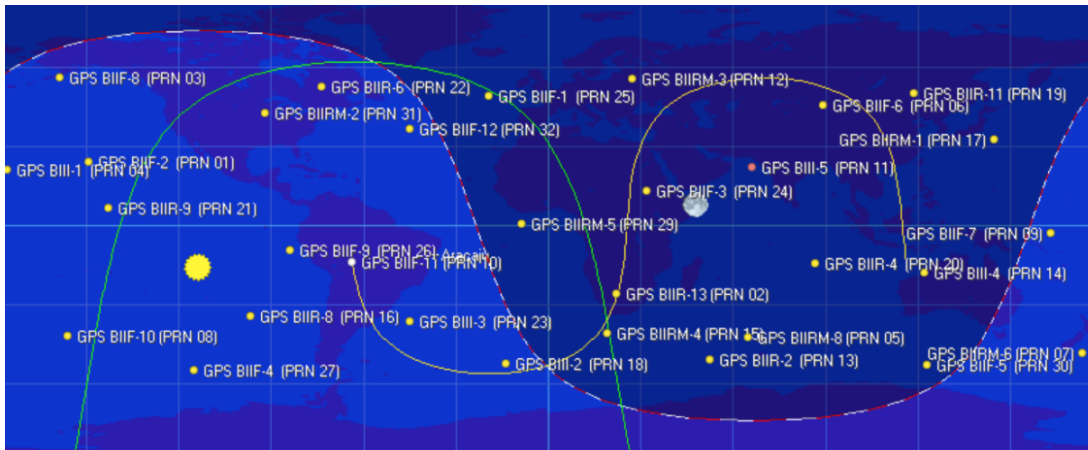
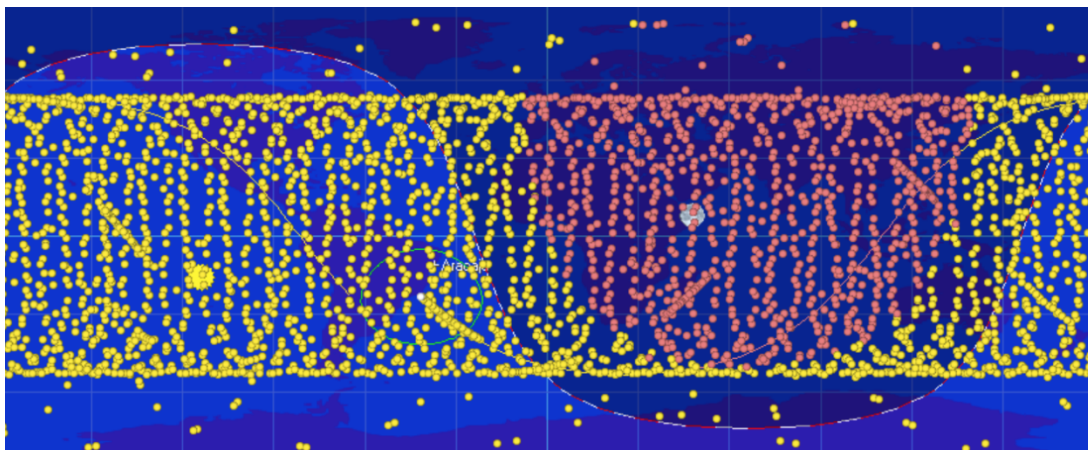
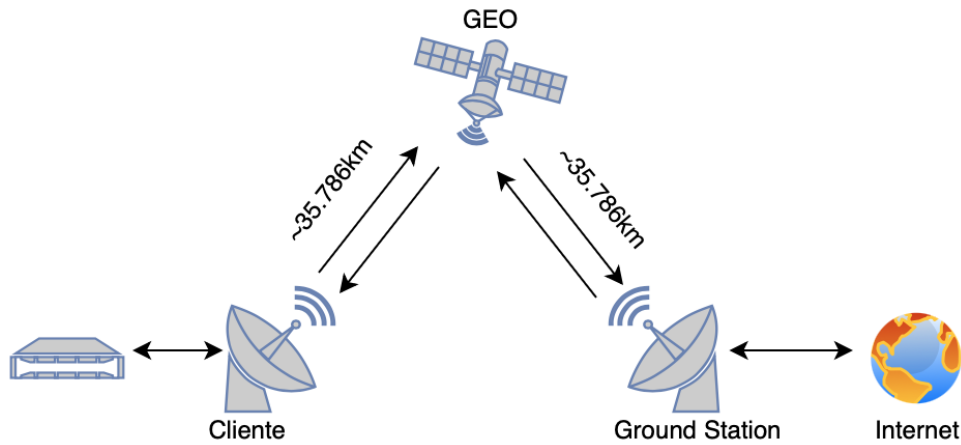


Figura 4 – Satélites LEO - Orbitron(Stoff, 2023)



A [Figura 5](#) descreve os satélites com órbita GEO.

Figura 5 – Órbita de satélites GEO



A distância para um satélite geoestacionário é de aproximadamente 35.786 km. A velocidade da luz no vácuo é de aproximadamente 299.792 km/s. Assim, o tempo que uma onda de rádio leva para viajar até o satélite pode ser calculado usando a fórmula:

$$\text{Tempo} = \frac{\text{Distância}}{\text{Velocidade da luz}} \quad (2.1)$$

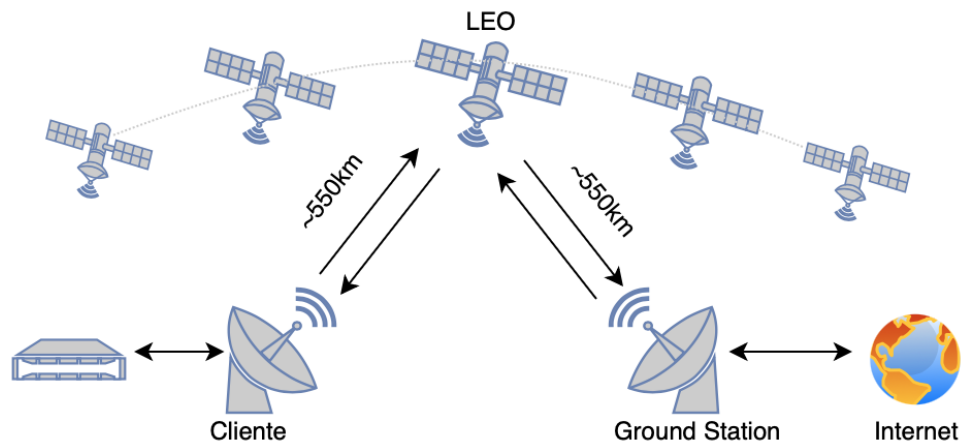
Substituindo os valores:

$$\text{Tempo} = \frac{35.786 \text{ km}}{299.792 \text{ km/s}} \quad (2.2)$$

Portanto, considerando apenas os saltos da conexão por satélite GEO, a latência teórica é de aproximadamente $\approx 119,4$ milissegundos por salto.

Cenário oposto ao proposto com o uso da órbita LEO. Com a proximidade dos satélites com as antenas na terra de $\approx 550\text{km}$, existe um ganho substancial, alcançando 1.8 milissegundos de latência teórica por salto. Entretanto, devido ao *footprint* (área de cobertura) ser menor quando os satélites estão mais próximos da terra, existe a necessidade de utilização de constelações, o que pode causar eventuais desconexões quando a antena migra de uma satélite para o outro (WANG et al., 2022). A [Figura 6](#) descreve os satélites com órbita LEO.

Figura 6 – Órbita de satélites LEO



Fazendo analogia com o funcionamento de redes de celular, o cliente móvel migra entre as estações de rádio base enquanto trafega pela cidade. No caso das aplicações com satélites de órbita LEO, o cliente está parado e os satélites se movimentando.

2.2 IoT - Internet das coisas

A IoT representa uma revolução tecnológica que vem transformando a forma como as pessoas interagem com o mundo ao nosso redor (SHARMA; SHAMKUWAR; SINGH, 2019). Desde sua concepção, ela tem evoluído de uma simples ideia para um ecossistema complexo de dispositivos interconectados que compartilham dados em tempo real (VERMESAN; FRIESS, 2013).

2.2.1 Contexto Histórico da IoT

O termo Internet das Coisas (*Internet of Things*, IoT) foi introduzido pela primeira vez por Kevin Ashton, do MIT (Massachusetts Institute of Technology), durante uma apresentação sobre RFID (*Radio-Frequency Identification*) (ASHTON et al., 2009). Em 1999, o termo "Internet das Coisas" foi especificamente introduzido, sinalizando o início de uma nova era na comunicação máquina-a-máquina (M2M) (GUPTA; QUAMARA, 2020). Nesse mesmo ano, foi desenvolvido o primeiro protocolo M2M, o MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*), projetado para fornecer uma comunicação leve e eficiente entre dispositivos com recursos limitados. Nos anos 2000, a LG introduziu a primeira geladeira conectada à Internet (OSISANWO; KUYORO; AWODELE, 2015), sinalizando o potencial da IoT para transformar eletrodomésticos comuns em dispositivos inteligentes. Em 2001, a National Science Foundation dos EUA estabeleceu o Industry-University Cooperative Research Center (IUCRC), focado no uso de tecnologias de análise preditiva baseadas em IoT (ADAMS; CHIANG; STARKEY, 2001).

Em 2002, as empresas Sony e Philips anunciaram o desenvolvimento da tecnologia Near

Field Communication (NFC), um passo importante para a comunicação sem fio de curto alcance (NOGUEIRA, 2011). Em 2004, *hotspots* Wi-Fi começaram a ser oferecidos por operadoras como a AT&T, facilitando a conectividade móvel (BAR; GALPERIN, 2004). Em 2005, a União Internacional de Telecomunicações (ITU) publicou seu primeiro relatório sobre IoT, reconhecendo oficialmente sua importância (GUPTA; QUAMARA, 2020). No ano seguinte, a Nokia introduziu a tecnologia Bluetooth Smart, sob o nome "Wibree", promovendo comunicações eficientes em termos de energia (PEI et al., 2008). Em 2007, foi fundado o European Research Cluster on IoT (IERC), uma organização europeia dedicada à pesquisa e desenvolvimento de tecnologias IoT (SÁ; PEREIRA; CACHO, 2019).

Um marco significativo ocorreu em 2008, quando o número de dispositivos conectados à Internet superou o número de pessoas no mundo (SWEDAN et al., 2018). No ano seguinte, a Google lançou a primeira aplicação em nuvem baseada em navegador, Google Apps, demonstrando o potencial da computação em nuvem. Em 2010, a ioBridge lançou o primeiro sistema online de monitoramento de marés, evidenciando a aplicação prática da IoT em monitoramento ambiental. Em 2011, foi criada a Iniciativa Global de Padrões para IoT (GSI) com o propósito de harmonizar os padrões globais da tecnologia (GUPTA; QUAMARA, 2020).

O lançamento mundial do IPv6 em 2012 foi um passo crucial para suportar o número crescente de dispositivos conectados (BRITO, 2018). Em 2013, a iniciativa Internet.org foi lançada, visando expandir o acesso à Internet em todo o mundo (ALARCON, 2018). Em 2015, a segurança tornou-se uma preocupação central com o lançamento da Internet of Things Security Foundation (IoTSF) (CHEN; ERFANI, 2017). Em 2016, o malware "Mirai" foi usado para conduzir um ataque DDoS, destacando a vulnerabilidade dos dispositivos IoT e em 2017 a IoT One criou um banco de dados de termos de IoT, facilitando o entendimento e a padronização da terminologia (TANG et al., 2019).

Em 2018, o conceito de IoT foi ampliado com a integração crescente de tecnologias emergentes, como a inteligência artificial (IA) e o aprendizado de máquina (RATH; SATPATHY; OREKU, 2021). Em 2019, houve um aumento significativo na adoção de redes de baixa potência e longa distância, como o LoRaWAN e o NB-IoT, que proporcionaram soluções eficientes para a comunicação de dispositivos IoT em larga escala, especialmente em áreas remotas e urbanas (UGWUANYI; PAUL; IRVINE, 2021). Em 2020, a pandemia de COVID-19 acelerou a adoção de soluções IoT em setores como saúde, logística e trabalho remoto. Dispositivos de monitoramento de saúde e soluções de rastreamento de cadeia de suprimentos tornaram-se ainda mais importantes, destacando a capacidade da IoT de responder a desafios globais (UMAIR et al., 2021).

Em 2022, o foco esteve voltado para a segurança cibernética, com o desenvolvimento de novas normas e práticas para proteger dispositivos IoT contra ameaças e vulnerabilidades. Organizações como a Internet of Things Security Foundation (IoTSF) continuaram a promover melhores práticas para garantir a segurança e a privacidade dos dados (TechWorks Hub Ltd, 2023).

Em 2023, a interoperabilidade entre dispositivos e plataformas tornou-se um objetivo central, com o surgimento de iniciativas para desenvolver padrões comuns e interfaces que permitem uma integração mais fluida entre diferentes sistemas e fabricantes (ALLIOUI; MOURDI, 2023).

Finalmente, em 2024, a IoT continua a se expandir com a integração de tecnologias como o edge computing (ROMERO et al., 2024), inteligência artificial (IA) (ALAHY et al., 2023) e redes de satélite (CHAI et al., 2023). Estas tecnologias permitem o processamento de dados mais próximo da origem, reduzindo a latência e aumentando a eficiência. Além disso, garantem conectividade global, especialmente em áreas remotas e subatendidas, facilitando a comunicação de dispositivos.

2.3 Protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*)

O MQTT é um protocolo de mensagens (ANDY; RAHARDJO; HANINDHITO, 2017) desenvolvido em 1999 por Andy Stanford-Clark, pesquisador da IBM, e Arlen Nipper, engenheiro da Cirrus Link. O MQTT foi inicialmente criado para monitorar oleodutos e gasodutos em redes de satélite (BRYCE; SRIVASTAVA, 2018). Na década seguinte, o protocolo começou a ganhar tração comercial nas áreas de automação e previsão do tempo. No entanto, foi no âmbito das aplicações de mensagens do Facebook e da Apple que o MQTT realmente demonstrou seu potencial, destacando-se por sua eficiência e confiabilidade (GOODRICH, 2022). Uma das principais vantagens do MQTT é o suporte à Qualidade de Serviço (QoS), que garante a entrega de mensagens aos clientes, mesmo em condições de rede instáveis ou não confiáveis. (Schultz, David, 2022).

No MQTT (NAIK, 2017), os níveis de Qualidade de Serviço (QoS) determinam a garantia de entrega das mensagens:

- QoS 0 (Entrega no máximo uma vez): A mensagem é enviada uma vez, sem confirmação de entrega. Não há garantias de que a mensagem será recebida. É o nível mais rápido e leve, mas menos confiável.
- QoS 1 (Entrega pelo menos uma vez): A mensagem é enviada repetidamente até que o emissor receba uma confirmação do receptor. Pode haver duplicatas, mas garante que a mensagem será recebida pelo menos uma vez.
- QoS 2 (Entrega exatamente uma vez): O nível mais confiável, garantindo que a mensagem será entregue exatamente uma vez, sem duplicidade. No entanto, envolve mais trocas de mensagens, o que aumenta a latência e o custo computacional.

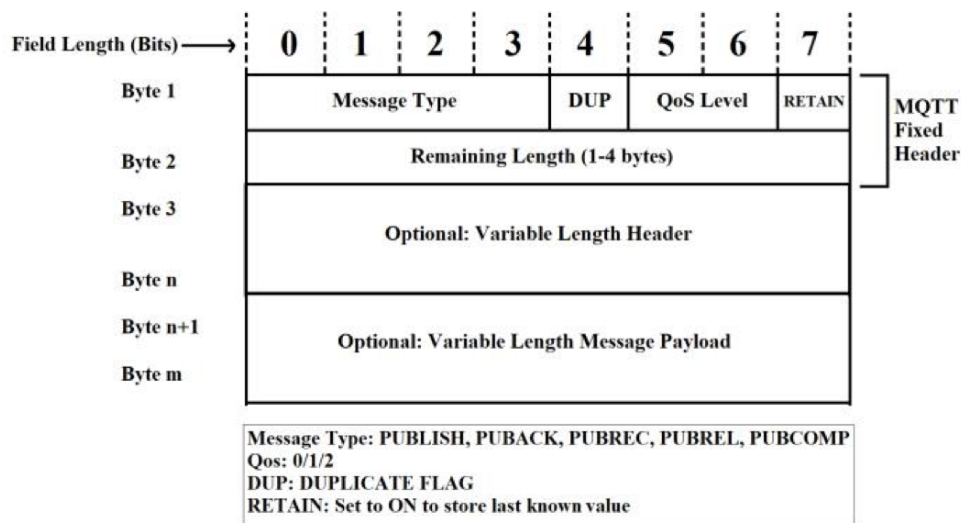
O MQTT funciona sobre o TCP e utiliza o modelo *publish-subscribe*. Esse mecanismo permite a comunicação M2M (máquina-a-máquina), operando de maneira eficiente com dispositivos restritos e facilitando a comunicação entre diversos dispositivos. Projetado para funcionar em

situações de baixa largura de banda, como sensores e dispositivos móveis em redes não confiáveis, o MQTT minimiza a largura de banda da rede e os requisitos de recursos dos dispositivos, garantindo a entrega confiável dos dados (ANSARI; REHMAN; ALI, 2018).

O MQTT opera nas portas TCP registradas pela IANA, 8883 e 1883. A porta 8883 é usada para MQTT com SSL/TLS, enquanto a porta 1883 é utilizada para comunicações sem TLS (OASIS, 2023). A comunicação funciona com dois tipos de cliente, um chamado de *publisher*, que envia suas mensagens para um *broker* usando diferentes tópicos, e os consumidores, também conhecidos como *subscriber*, inscrevem-se nesses tópicos para receber as mensagens (MISHRA, 2018).

Uma mensagem MQTT em texto simples possui um cabeçalho de comprimento fixo de 2 *bytes*, um cabeçalho opcional de comprimento da mensagem e um cabeçalho de carga útil. Os primeiros oito bits do formato do pacote TCP MQTT são usados como cabeçalho fixo MQTT, onde os primeiros quatro bits representam o Tipo de Mensagem, o quinto bit é usado para a *flag* de duplicação (DUP), os sexto e sétimo bits são usados para o nível de QoS (Qualidade de Serviço), e o oitavo *bit* é utilizado para o serviço de mensagem de retenção (MISHRA, 2018). A Figura 7 detalha o pacote do MQTT.

Figura 7 – Formato do pacote MQTT (MISHRA, 2018)



2.4 Protocolo CoAP (Constrained Application Protocol)

O CoAP é um protocolo de aplicação desenvolvido para redes de dispositivos com recursos limitados. Para se adaptar melhor a ambientes com conexões de baixa largura de banda e dispositivos com poder computacional restrito, o CoAP utiliza o protocolo *User Datagram Protocol* (UDP). O UDP é um protocolo de transporte mais simples, com baixa latência e sem conexão, em contraste com o *Transmission Control Protocol* (TCP) (LIN; BERGMANN, 2016).

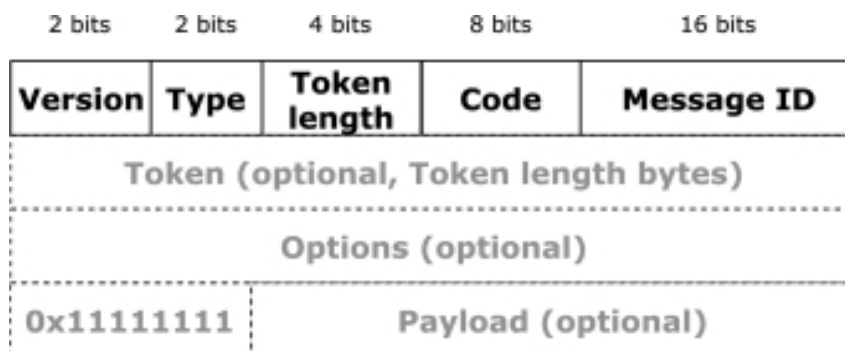
O CoAP é um protocolo sem estado, baseado no modelo de arquitetura cliente-servidor, que realiza operações de requisição/resposta para a troca de mensagens entre cliente e servidor. Assim como o HTTP, o CoAP segue o modelo de transferência REST, onde cada recurso no servidor é identificado por um *Uniform Resource Identifier* (URI) (JOSHI; KAUR, 2015).

No CoAP (JOSHI; KAUR, 2015) as mensagens enviadas podem ser Confirmáveis ou Não Confirmáveis :

- Confirmável (CON): Esse tipo de mensagem requer uma resposta, uma vez que a mensagem é enviada, o receptor deve confirmar o recebimento da mensagem.
- Não Confirmável (NON): Esse tipo de mensagem não requer uma resposta, uma vez que a mensagem é enviada, o receptor não precisa confirmar o recebimento da mensagem.

A estrutura de uma mensagem CoAP é composta por um cabeçalho fixo de 4 *bytes*, seguido por campos como *token* e *payload*. O cabeçalho inclui informações essenciais como versão do protocolo, tipo de mensagem, comprimento do token, código de requisição/resposta e um identificador de mensagem (VANDANA; CHIKKAMANNUR, 2020). A Figura 7 detalha o pacote do CoAP.

Figura 8 – Formato do pacote CoAP (GUNNARSSON et al., 2022)



3

Revisão Sistemática da Literatura

Este capítulo apresenta a Revisão Sistemática da Literatura (RSL) que serviu como base para o desenvolvimento deste trabalho.

3.1 Metodologia

Uma revisão sistemática é uma abordagem metodológica de pesquisa secundária, fundamentada em evidências, que tem como objetivo a busca, identificação, avaliação e síntese criteriosa da literatura disponível para responder questões específicas de pesquisa ([KITCHENHAM, 2004](#)). Neste contexto, o protocolo adotado neste estudo segue as orientações de revisão descritas por Kitchenham ([KITCHENHAM, 2004](#)).

Esta revisão foi conduzida em três etapas: Planejamento, Condução e Relatório Final da Revisão.

O planejamento começou com a definição clara do objetivo e das perguntas de pesquisa. Posteriormente, foi desenvolvida a estratégia de busca, onde foram estabelecidas as bases de dados a serem utilizadas, os termos de busca relevantes e os critérios para a inclusão e exclusão de artigos na seleção final.

3.1.1 Objetivo e Questões de Pesquisa (QP)

Este estudo tem o objetivo de levantar e avaliar o uso dos protocolos MQTT e CoAP em redes de satélite. Para alcançar esse objetivo foram definidas as seguintes questões de pesquisa:

- QP1: Quais os principais desafios da utilização de protocolos MQTT e CoAP em Redes de Satélite?
- QP2: Foram usadas ferramentas para simulação?

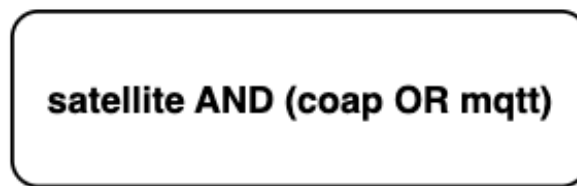
3.1.2 Bases de Dados

As bases de dados utilizadas nesse estudo foram a *Scopus* e *Web of Science*.

3.1.3 Termos de Busca

Após a definição das bases de dados, foi definida a *string* de busca com o objetivo de identificar e classificar os estudos, como pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 – *String* de Busca



3.1.4 Critérios de Inclusão e Exclusão

Os critérios de inclusão e exclusão são utilizados para identificar os estudos mais relevantes que tratam das questões de pesquisa com maior precisão. Os seguintes critérios de inclusão (CI) foram estabelecidos:

- CI1: Publicações focadas no uso de redes de satélite;
- CI2: Publicações que contribuam para responder pelo menos uma das QPs;
- CI3: Trabalhos publicados entre os anos de 2018 e 2023;
- CI4: Trabalhos escritos nos idiomas Português ou Inglês.

E os critérios de exclusão (CE):

- CE1: Publicações inconsistentes com o tópico de pesquisa;
- CE2: Publicações duplicadas;
- CE3: Publicações indisponíveis para *download* através da plataforma CAFE.

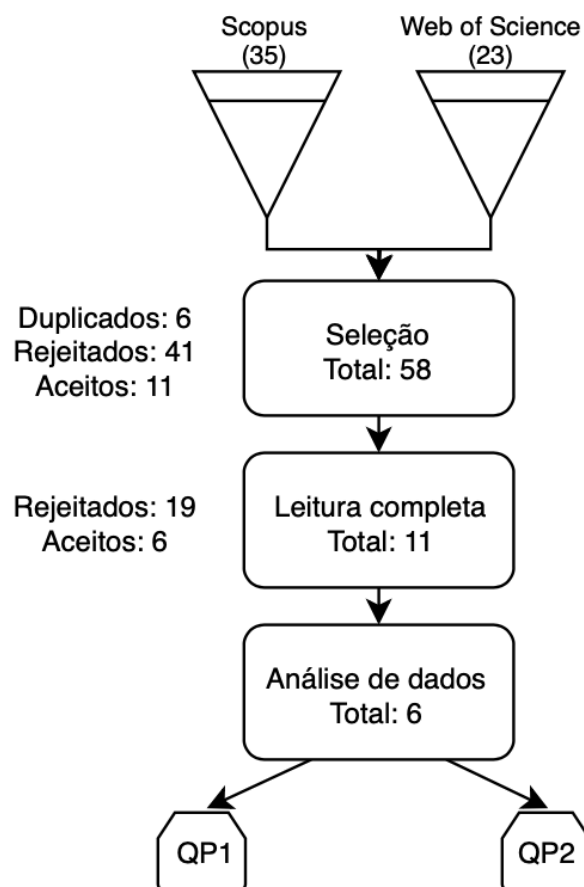
3.1.5 Condução da Revisão

A busca dos trabalhos foi realizada no final do primeiro semestre de 2023. A seguir são detalhados a quantidade de artigos identificados, o método de filtragem e a abordagem para a extração dos dados.

A busca resultou em 58 artigos, que foram submetidos a uma análise inicial, verificando-se o título e o resumo desses estudos, considerando o objetivo do trabalho e sua conclusão, alinhado com o escopo da revisão, resultando em 6 artigos.

Em seguida, os 6 artigos foram totalmente analisados, avaliando sua capacidade de responder ao objetivo dessa revisão. Entre todos os trabalhos, apenas 1 deles não atendeu aos requisitos. Todo esse processo pode ser visualizado por meio da [Figura 10](#).

Figura 10 – Processo de Seleção dos Artigos



3.1.6 Relatório da Revisão

Ao concluir todo o processo metodológico da revisão, identificaram-se 6 artigos relevantes. Na [seção 3.2](#), é fornecida uma síntese de cada um dos trabalhos selecionados.

3.2 Estado da Arte

Performance Evaluation of a Satellite Communication-Based MEC Architecture for IoT Applications - LUGLIO, Michele et al. ([LUGLIO et al., 2022](#))

Nesse trabalho, os autores realizaram a análise do desempenho de uma arquitetura de satélite para aplicações IoT, enfatizando as vantagens proporcionadas pelo MEC (*Multi-Access*

Edge Computing), incluindo agregação de dados e técnicas de compressão. Os autores comparam as possibilidades de uso de satélite como *direct-access(fronthaul)* ou *backhaul*. No primeiro caso, os sensores estão diretamente conectados aos satélites, os quais representam o primeiro salto no caminho de comunicação entre dispositivos IoT e usuários. Existe uma maior complexidade nesse modelo e as abordagens mais promissora foram com satélites de baixa órbita (LEO), além disso, desafios ainda precisam ser superados como a heterogeneidade das soluções de IoT e o alto consumo de energia dos dispositivos. No segundo caso, os satélites podem ser utilizados como *backhaul* para a Internet. Nesse contexto, os dados dos sensores são coletados em uma nuvem de borda na infraestrutura terrestre, permitindo o acesso à rede local, e posteriormente, são disponibilizados através de um satélite como *backhaul* utilizando protocolos baseados em IP. A solução acaba se tornando viável por entregar maior quantidade de banda e um custo menor.

Os autores realizaram uma série de testes utilizando o protocolo MQTT. A avaliação de desempenho foi feita por meio de um *testbed* projetado ad hoc, comparando o desempenho obtido com três configurações de rede diferentes em termos da quantidade de dados que precisam atravessar o satélite link e tempo de entrega de dados.

Por fim, os mesmos concluíram que a arquitetura MEC permite obter uma redução significativa de a utilização da largura de banda do link de satélite e do alcance tempo de entrega de dados na maioria dos casos considerados.

IoT Application Protocols Optimisation for Future Integrated M2M-Satellite Networks
- SOUA, Ridha et al (SOUA; PALATTELLA; ENGEL, 2018)

Neste trabalho os autores propõe configurações mais eficientes, otimizações, agregação de tópicos de IoT, prioridade de recuperação de mensagens e cancelamento de mensagens. Este último tem como objetivo reduzir a quantidade de tráfego no canal de retorno via satélite e entregar dados críticos no tempo devido.

Para esse fim, foi montado um laboratório de testes, utilizando o emulador OpenSAND, MQTT Mosquitto e CoAPthon.

Enhancing CoAP Group Communication to Support mMTC over Satellite Networks
- SOUA, Ridha et al (SOUA et al., 2020)

Neste artigo, os autores apresentam uma nova abordagem para a agregação de respostas CoAP unicast para solicitações de comunicação em redes IoT-Satélite, onde por padrão *observer* quanto o serviço de enfileiramento está habilitado.

Os autores entendem que o principal problema da comunicação em grupo baseada em multicast é o uso do Token, que vincula a resposta à solicitação. Portanto, para vários servidores, não é possível distinguir de qual servidor o pacote veio sem usar endereços IP.

Os teste compararam a comunicação em grupo padrão do CoAP (com respostas *unicast*) e o procedimento de agregação proposto. Foi utilizada simulação de link satélite geoestacionário

e o simulador utilizado foi o OpenSAND.

Os resultados mostraram que o esquema proposto reduz a sobrecarga de tráfego no link de retorno do satélite sem aumentar drasticamente o atraso de entrega. A redução da sobrecarga é significativa quando um alto número de pacotes gerados em uma janela de tempo curta por vários servidores CoAP é agregado em um único pacote.

MQTT-MFA: A Message Filter Aggregator to Support Massive IoT Traffic over Satellite - SOUA, Ridha et al. (SOUA et al., 2021)

Neste artigo, os autores sugerem uma arquitetura de rede híbrida IoT-Satélite para coletar o tráfego de transporte de telemetria de filas de mensagens (MQTT). Foi projetado um filtro avançado, chamado MQTT *message filter aggregator* (MQTT-MFA), que realiza a agregação de tópicos MQTT próximo dos publicadores antes que os dados sejam enviados pelo link de satélite.

Para avaliar o desempenho do MQTT-MFA proposto, foi montado um ambiente de testes com componentes de rede simulados e emulados. O segmento de satélite foi emulado usando o OpenSAND.

Foi concluído que o MQTT-MFA reduz drasticamente o quantidade de sobrecarga no link de retorno do satélite. Porém, a latência de inicialização da conexão é altamente afetada pelo *handshake* TCP e o impacto dessa latência de inicialização é ainda maior em redes satélite, onde interrupções nos links podem causar quedas frequentes na conexão.

Reliable M2M/IoT data delivery from FANETs via satellite - BACCO, Manlio et al. (BACCO et al., 2019)

Neste artigo, os autores discutem a entrega confiável de dados de FANETs (Redes de Aeronaves Autônomas) para estações terrestres remotas via satélite.

Uma das métricas mais significativas para o cenário M2M/IoT considerada neste artigo é o tempo de conclusão, ou seja, o tempo necessário para entregar com sucesso os dados ao destino. Para alcançar esse objetivo, foi comparado o desempenho ao usar o *Message Queue Telemetry Transport* (MQTT) e o *Constrained Application Protocol* (CoAP).

Os autores implementaram um simulador baseado no S-NS3, proporam também um modelo de canal e usaram satellite geoestacionário.

Após os testes utilizando o modelo de canal proposto, foi avaliado o tempo de conclusão e o rendimento alcançado ao usar os dois *stacks* de protocolos, destacando como o CoAP supera o MQTT nas condições operacionais consideradas.

Performance Analysis of CoAP under Satellite Link Disruption - GIOTTI, Domenico et al. (GIOTTI et al., 2018)

Esta artigo, analisou o comportamento do protocolo CoAP em casos de problemas com um link de satélite geoestacionário. Foi utilizado o simulador OpenSAND, para avaliar o atraso

de ponta a ponta, a taxa de perda de pacotes e, por fim, a eficiência do protocolo em links de satélite interrompidos. Foram testadas diferentes configurações do CoAP e as simulações foram realizadas levando em consideração diferentes qualidades de link de satélite.

Os principais resultados obtidos por meio do estudo conduzido utilizando o simulador OpenSAND, destacam que a redução dos parâmetros de controle de congestionamento proposto, principalmente *ACK_TIMEOUT* e *ACK_RANDOM_FACTOR*, é essencial para alcançar a diminuição dos atrasos de ponta a ponta e aumentar a taxa de entrega de pacotes.

3.3 Resultados

Nesta seção, apresentamos os resultados da revisão. Os dados extraídos são expostos, analisados e discutidos. Para uma melhor compreensão e visualização, esta seção foi subdividida de acordo com as Questões de Pesquisa.

3.3.1 QP1: Quais os principais desafios da utilização de protocolos *MQTT* e *CoAP* em Redes de Satélite?

Identificamos como maiores desafios a adequação dos protocolos IoT para o bom funcionamento em redes de satélite, que devido as suas características, por vezes podem apresentar alta latência e pequenas interrupções.

Como estratégia para lidar com os desafios, a maioria dos trabalhos descrevem e/ou implementam técnicas de agrupamento dos dados para que os mesmos sejam enviados em grupos. É uma das formas de adequar os protocolos às adversidades da conexão via satélite.

Além disso, de acordo com SOUA, Ridha et al. (SOUA; PALATTELLA; ENGEL, 2018), existe um projeto chamado M2MSAT, financiado pela Agência Espacial Europeia (ESA), que está contribuindo para preencher essa lacuna, investigando otimizações para o Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) e o Constrained Application Protocol (CoAP), identificados como Protocolos de Aplicação IoT adequados para a coleta de dados de IoT via satélite.

3.3.2 QP2: Foram usadas ferramentas de simulação?

Todos os trabalhos utilizaram simulação e foram identificados 2 simuladores, sendo o *OpenSAND* o mais utilizado e o *S-NS3*.

A distribuição de uso dos simuladores entre os trabalhos pode ser observada na Tabela 1

Tabela 1 – Simuladores utilizados

Ferramenta	Referência
<i>OpenSAND</i>	(LUGLIO et al., 2022; SOUA; PALATTELLA; ENGEL, 2018; SOUA et al., 2020; SOUA et al., 2021; GIOTTI et al., 2018)
<i>S-NS3</i>	(BACCO et al., 2019)

3.4 Consideração sobre trabalhos relacionados

A presente revisão destacou que, embora os protocolos MQTT e CoAP tenham sido avaliados para aplicação em redes de satélites, todos os estudos encontrados se limitam a simulações. Além disso, observa-se que esses estudos só utilizam como base satélites GEO, sem explorar adequadamente a viabilidade em outras arquiteturas de satélites, como as redes LEO.

Como contribuição significativa, propomos a realização de experimento utilizando redes de satélites GEO e LEO, visando avaliar de forma mais precisa o desempenho dos protocolos de IoT. Esse esforço contribuirá para preencher a lacuna existente na literatura e fornecer dados mais concretos para a aplicação desses protocolos em ambientes satelitais.

4

Materiais e Métodos

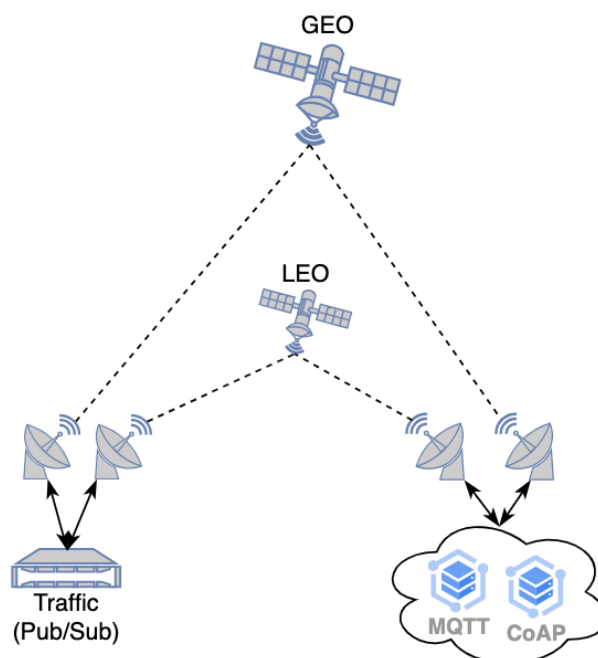
Este Capítulo descreve a arquitetura, metodologia, setup e execução do experimento para a análise de desempenho de redes de satélite GEO e LEO com uso dos protocolos MQTT e CoAP.

4.1 Arquitetura

- Descrição

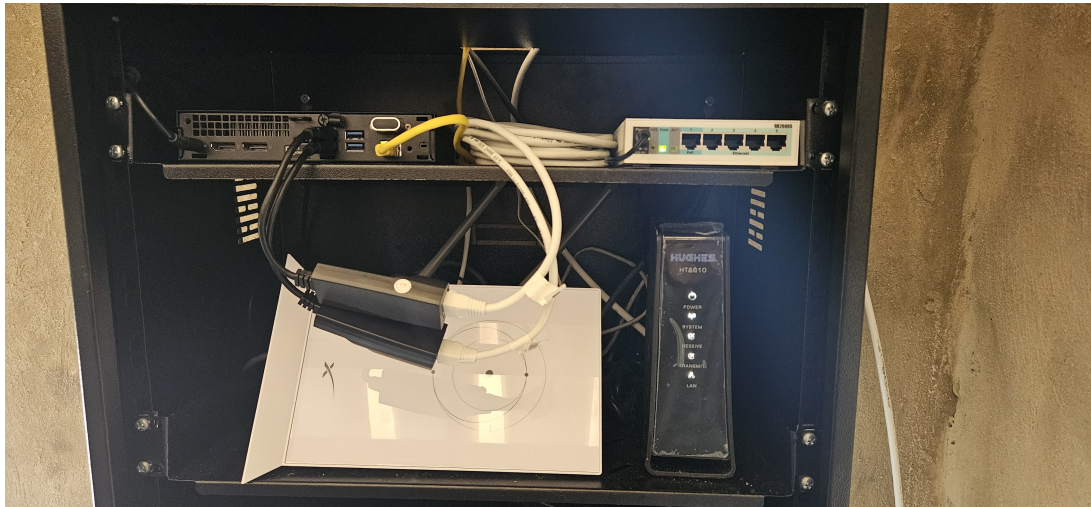
A arquitetura utilizada conta com componentes de *hardware* conectados diretamente nas antenas, e instância de *broker* MQTT ou CoAP na nuvem como mostra a [Figura 11](#).

Figura 11 – Arquitetura do experimento



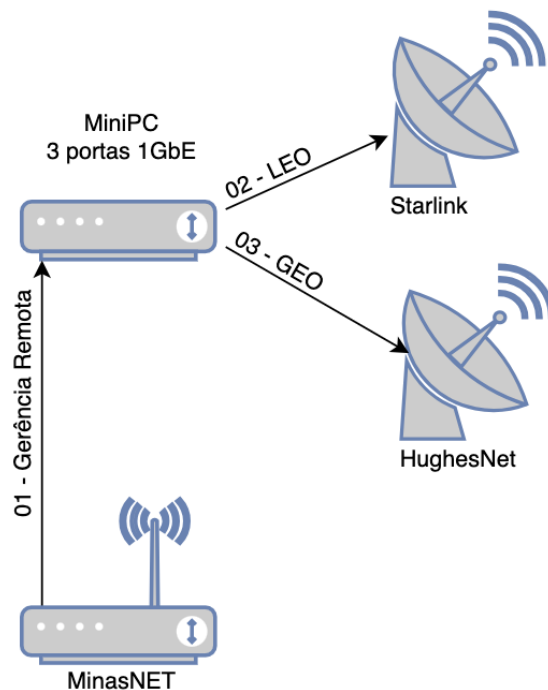
Os equipamentos foram organizados em um rack de parede, conforme ilustrado na [Figura 12](#).

Figura 12 – Rack de Equipamentos



Para garantir que a banda do satélite fosse utilizada apenas para fins da análise proposta, foram utilizadas 3 conexões de rede sendo elas: fibra ótica para gerência remota, satélite GEO, satélite LEO como mostra a [Figura 13](#).

Figura 13 – Conexões entre dispositivos



- **Hardware**

Como *hardware* para gerar o tráfego Pub/Sub do experimento, foi utilizado um MiniPC Dell Optiplex 7060. A configuração do dispositivo pode ser observada na Tabela 2.

Tabela 2 – *Hardware*

Função	Hardware
Armazenamento	256GB Nvme
CPU	Intel Core i5-13500T @ 3 GHz
Memória RAM	8GB
Rede	1 x Ethernet 1GbE + 2 x USB to Ethernet 1GbE
SO	1 x Xubuntu 24.04 LTS

- **Cloud**

Foram utilizada 2 (duas) instâncias virtuais, uma para o *broker* MQTT outra para o *broker* CoAP, que foram hospedadas na Google Cloud na região de São Paulo (southamerica-east1). A configuração de *hardware* utilizada na instância foi e2-small (1vCPU + 2GB RAM), com sistema operacional GNU/Linux Debian 12.

- **Antenas**

Foram utilizadas 2 (duas) antenas visando atender os tipos de órbita LEO e GEO. Para a órbita LEO, um kit da empresa Starlink, para a órbita GEO, assinatura do serviço da HughesNet. Foram escolhidas por estarem disponíveis em nossa região, Nordeste do Brasil. A Starlink (LEO) foi contratada com velocidades de até 220 Mbps para *download* e 25 Mbps de *upload*, a HughesNet (GEO), o plano garante até 15 Mbps de *download* e 2 Mbps de *upload*.

Figura 14 – Antenas LEO e GEO



- **MQTT broker**

De acordo com a avaliação de desempenho, (MISHRA, 2018) relata que a diferença entre os *brokers* de MQTT em relação a performance é desprezível. Com base nisso, foi selecionado o *broker* Eclipse Mosquitto por ser o mais popular, amplamente documentado, demandando pouco esforço para implementação.

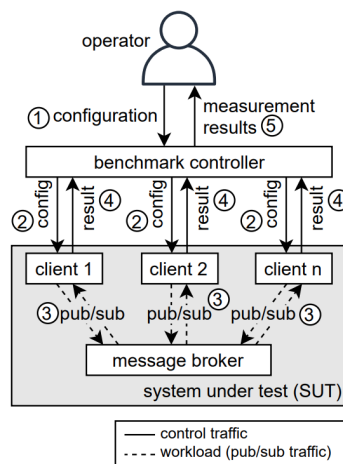
- **CoAP broker**

Como para o MQTT foi selecionado um *broker* implementado pela Eclipse Foundation, com o objetivo de manter o padrão nos testes, foi utilizado também para o CoAP uma versão da Eclipse Foundation o Eclipse Californium em sua implementação Pub/Sub.

- **Benchmarking Framework**

Como plataforma de *benchmark*, para geração de tráfego Pub/Sub, para atender os requisitos de suporte ao protocolo MQTT, medição de desempenho do cliente, medição do desempenho de rede e geração de relatórios, foi utilizada a ferramenta ComBench (HERRNLEBEN et al., 2021). O ComBench funciona com uma arquitetura de controlador/cliente de acordo com a Figura 15. Permite que os testes realizados sejam salvos para reprodução futura, gera resultados em formato de tabela CSV e gráficos em formato PDF.

Figura 15 – Arquitetura ComBench (HERRNLEBEN et al., 2021)



- **Clima e Localização**

Os experimentos foram realizados em dias ensolarados, com a intenção de minimizar o efeito das variações atmosféricas que afetam as comunicações por satélite, principalmente no caso das redes GEO. A localização escolhida foi uma área de praia, no povoado Caueira, Itaporanga - Sergipe - Nordeste do Brasil. Coordenadas aproximadas:

Latitude: 11° 12' 18.0"S

Longitude: 37° 12' 38.1"W

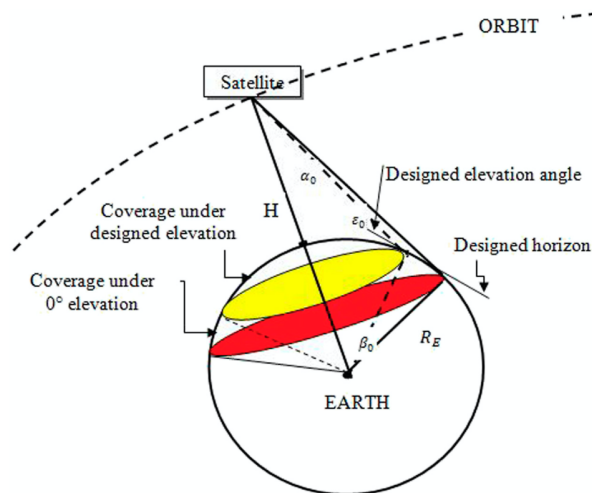
4.2 Metodologia

Esta seção descreve a metodologia utilizada no experimento.

4.2.1 Métricas

Para definir as métricas para utilização no experimento foi utilizado como base o artigo (EBLEME; BAYILMIS; CAVUSOGLU, 2018) que descreve uma análise de performance do protocolo MQTT. No artigo é utilizado como métrica o número de mensagens e o tamanho do *payload*. Foi feita uma adaptação para utilizar como métrica o tempo e o tamanho do *payload*, justificada pelo padrão de funcionamento dos satélites de baixa órbita (LEO). De acordo com (CAKAJ, 2021), a área de cobertura de cada satélite da Starlink, Figura 16, pela característica da órbita baixa, é de 5 minutos até que seja feito o *handover* e a antena conecte no próximo satélite. Como esse processo pode levar a variações no nosso experimento, foi utilizado o tempo de 5 minutos para cada execução de teste. Com o objetivo de garantir a consistência e a comparabilidade dos testes realizados, as mesmas métricas que foram definidas para o MQTT para o CoAP.

Figura 16 – Conceito de Área de Cobertura - LEO (CAKAJ, 2021)



A Tabela 3 descreve as métricas usadas no experimento.

Tabela 3 – Métricas

Métrica	Valor
Tempo de execução	5 minutos
Intervalo	100 ms
Payload	64, 128, 256, 512, 1.024, 2.048, 4.096, 8.192 bytes

De acordo com as métricas adotadas, deve ser enviada uma mensagem a cada 100 ms durante 5 minutos (300 segundos) totalizando 3.000 mensagens.

4.2.2 Setup

Para configurar o ambiente do ComBench, primeiro deve-se instalar o docker e o docker-compose na máquina cliente, em seguida criar o arquivo **docker-compose.yaml** e executar o comando **docker-compose up -d**. No bloco de código a seguir, segue a configuração do ambiente utilizado nesse trabalho:

Listing 4.1 – docker-compose.yaml

```
1 version: "3.7"
2 services:
3   controller:
4     image:
5       "descartesresearch/iot-pubsub-benchmark-controller:latest"
6     ports:
7       - "5000:5000"
8   client1:
9     image:
10      "descartesresearch/iot-pubsub-benchmark-client:latest"
11     ports:
12       - "5001:5000"
```

4.2.3 Execução

O experimento foi executado em 3 passos:

1 - Alterar rota para o satélite desejado

Conferir na máquina cliente se o roteamento para o *broker* MQTT ou CoAP está configurado para a rede de Satélite que deseja testar.

2 - Executar experimento no ComBench

O controlador do ComBench funciona através de comunicação API/REST. Para executar o experimento, envia-se um PUT para o endereço do controlador <http://x.x.x.x:5000/startBenchmark> com o *payload* de acordo com a métrica do teste. O JSON a seguir descreve a primeira métrica do teste com MQTT: 5 minutos, 64 bytes de *payload* e Qos 0.

Listing 4.2 – mqtt-300-64-0.json

```
1 {
2   "protocol": "MQTT",
3   "delay": 5,
4   "run_time": 300,
5   "broker_address": "x.x.x.x",
```

```
6
7 "quality_classes": [
8   {
9     "id": 0
10  },
11 ],
12
13 "roles" : [
14   {
15     "id": 0,
16     "subscriptions" : [
17       { "topic" : "data"}
18     ],
19     "publishings" : [
20       {
21         "topic" : "data",
22         "payload_size" : 64,
23         "trigger" : {
24           "type" : "interval",
25           "timed_variable" : {
26             "type" : "rate",
27             "delay" : "100"
28           }
29         }
30       }
31     ]
32   }
33 ],
34
35 "clients": [
36   {
37     "ip_address": "x.x.x.x",
38     "begin_port": 5001,
39     "role": 0,
40     "quality_class": 0,
41     "amount": 1,
42     "settings": {
43       "qos": 0,
44       "tls": false
```

```
45     }  
46   }  
47 ]
```

Para uso com o CoAP foi apenas alterado o protocolo no *payload*.

3 - Coletar resultados

Para coletar todos os resultados referente ao teste executado, envia-se para a API do controlador o seguinte GET http://x.x.x.x:5000/results/all_results.

5

Resultados

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da experimentação, visando demonstrar o comportamento das redes de satélite de órbita geoestacionária (GEO) e órbita baixa (LEO) com o uso dos protocolos MQTT e CoAP. O objetivo é oferecer uma análise abrangente do desempenho individual de cada cenário, destacando métricas essenciais de comunicação e eficiência, tais como latência, total de mensagens entregues, total de pacotes, e a confiabilidade da transmissão. Essa abordagem considera um cenário real de utilização de redes de satélite LEO e GEO.

5.1 Avaliação de Latência e Taxa de Transferência

Antes do início do experimento, foi realizada uma avaliação da latência da conexão utilizando a ferramenta *Ping* com pacotes de 64 *bytes* a fim de determinar o tempo de resposta entre os pontos de comunicação. Em paralelo, foi analisada a taxa de transferência da rede usando a ferramenta *Iperf*, medindo a capacidade de transferência de dados em um dado período de tempo. Os testes foram executados entre a máquina cliente e o servidor virtual na Google Cloud. Essas avaliações preliminares foram cruciais para estabelecer uma linha de base de desempenho da rede, permitindo uma comparação precisa dos resultados obtidos durante os testes dos protocolos MQTT e CoAP nas redes de satélite GEO e LEO.

5.1.1 Conexão terrestre por fibra ótica

A título de comparação entre as tecnologias, foi realizada a medição de latência a partir da rede terrestre de fibra ótica do provedor Minas Telecom, que foi utilizada na conexão de gerência. Foram observados os seguintes resultados no que se refere a latência demonstrados na [Figura 17](#).

Figura 17 – Latência MinasTelecom (Fibra Ótica)

```
PING 34.151.235.148 (34.151.235.148) 56(84) bytes of data.  
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=1 ttl=56 time=49.0 ms  
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=2 ttl=56 time=60.1 ms  
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=3 ttl=56 time=52.5 ms  
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=4 ttl=56 time=53.7 ms  
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=5 ttl=56 time=52.7 ms  
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=6 ttl=56 time=51.4 ms  
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=7 ttl=56 time=54.3 ms  
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=8 ttl=56 time=55.2 ms  
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=9 ttl=56 time=52.2 ms  
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=10 ttl=56 time=53.5 ms  
  
--- 34.151.235.148 ping statistics ---  
10 packets transmitted, 10 received, 0% packet loss, time 9014ms  
rtt min/avg/max/mdev = 49.035/53.483/60.147/2.745 ms
```

Na conexão por fibra ótica, a latência média foi de **53 ms**.

5.1.2 Satélite LEO

Na rede de satélite Starlink (LEO) observa-se os seguintes resultados no que se refere a latência demonstrados na [Figura 18](#).

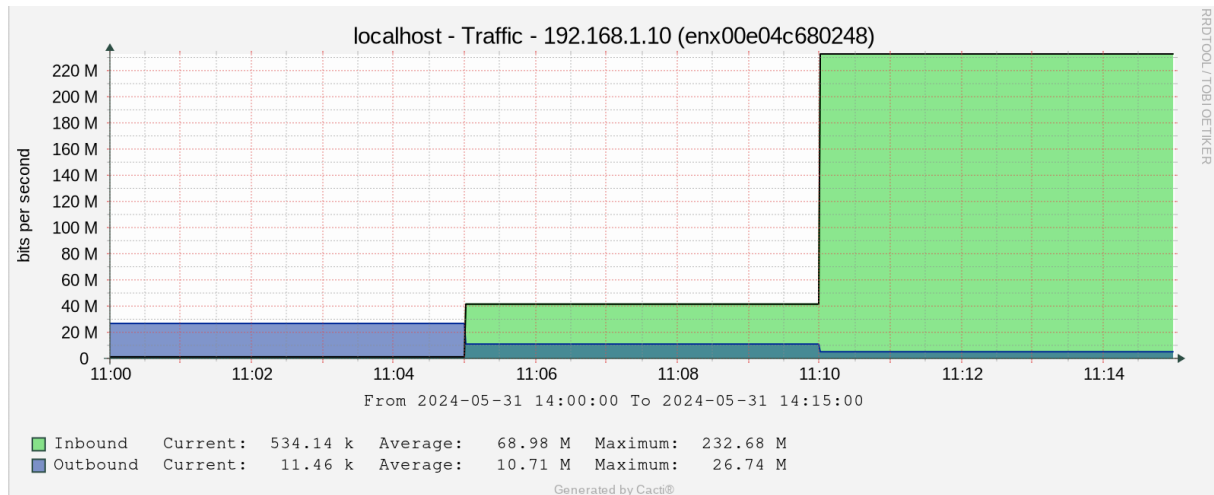
Figura 18 – Latência Starlink (LEO)

```
PING 34.151.235.148 (34.151.235.148) 56(84) bytes of data.  
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=1 ttl=57 time=73.2 ms  
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=2 ttl=57 time=69.1 ms  
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=3 ttl=57 time=72.4 ms  
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=4 ttl=57 time=72.0 ms  
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=5 ttl=57 time=75.5 ms  
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=6 ttl=57 time=71.0 ms  
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=7 ttl=57 time=70.4 ms  
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=8 ttl=57 time=69.8 ms  
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=9 ttl=57 time=69.7 ms  
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=10 ttl=57 time=72.8 ms  
  
--- 34.151.235.148 ping statistics ---  
10 packets transmitted, 10 received, 0% packet loss, time 9004ms  
rtt min/avg/max/mdev = 69.064/71.587/75.462/1.862 ms
```

A medição na rede LEO mostrou uma latência média de **71 ms**, resultado 34% maior ao que foi detectado em uma rede terrestre por fibra ótica.

Para o teste de taxa de transferência, foi utilizada a ferramenta iperf3 entre a máquina cliente e o servidor virtual na Google Cloud e coletado o gráfico da interface gerado pelo Cacti. Os dados coletados foram apresentados na [Figura 19](#).

Figura 19 – Taxa de Transferência Starlink (LEO)



Nas medições com a conexão Starlink (LEO), foi encontrada uma taxa máxima de *download* **232 Mbps** e uma taxa de máxima de *upload* **26 Mbps**.

5.1.3 Satélite GEO

Na rede de satélite HughesNet (GEO) observa-se os seguintes resultados no que se refere a latência demonstrados na [Figura 20](#).

Figura 20 – Latência HughesNet (GEO)

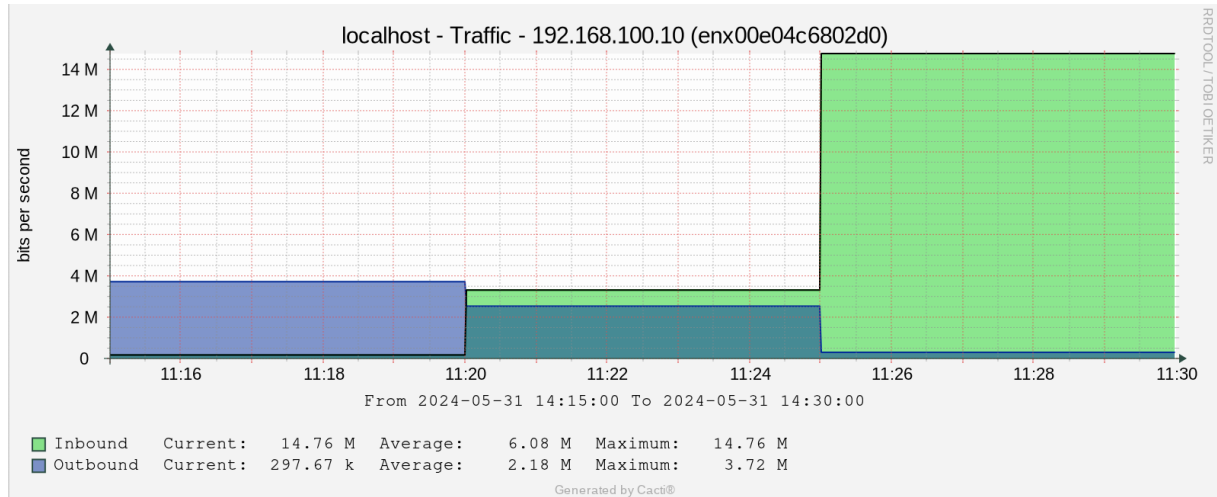
```
PING 34.151.235.148 (34.151.235.148) 56(84) bytes of data.
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=1 ttl=55 time=857 ms
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=2 ttl=55 time=814 ms
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=3 ttl=55 time=781 ms
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=4 ttl=55 time=793 ms
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=5 ttl=55 time=815 ms
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=6 ttl=55 time=816 ms
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=7 ttl=55 time=794 ms
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=8 ttl=55 time=795 ms
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=9 ttl=55 time=817 ms
64 bytes from 34.151.235.148: icmp_seq=10 ttl=55 time=829 ms

--- 34.151.235.148 ping statistics ---
10 packets transmitted, 10 received, 0% packet loss, time 9005ms
rtt min/avg/max/mdev = 781.019/811.061/857.383/20.761 ms
```

Observou-se na rede GEO uma latência média de **811 ms**, aproximadamente 1.042% maior que a latência média da rede LEO. Latência elevada é uma característica em satélites de órbita geoestacionária.

No teste de taxa de transferência da rede GEO, foi utilizada a ferramenta *iperf3* entre a máquina cliente e o servidor virtual na Google Cloud e coletado o gráfico da interface gerado pelo Cacti. Os dados coletados foram apresentados na Figura 21.

Figura 21 – Taxa de Transferência HughesNet (GEO)



Nas medições com a conexão HughesNet (GEO), foi encontrada uma taxa máxima de *download* **14 Mbps** e uma taxa de máxima de *upload* **3 Mbps**.

5.2 Avaliação de Desempenho do Uso do MQTT em Rede de Satélite de Órbita Baixa (LEO)

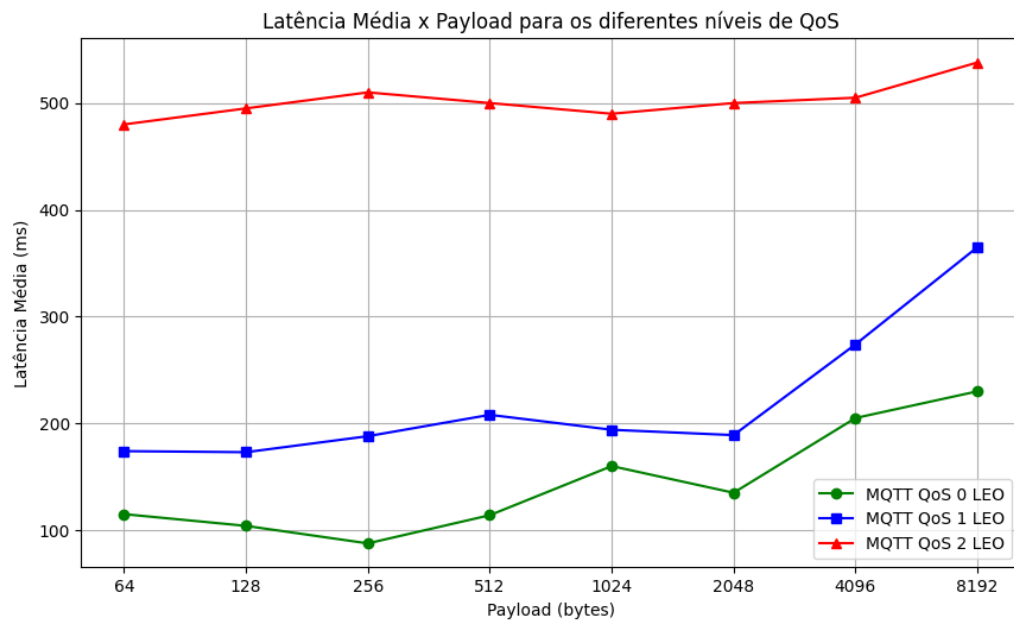
O experimento com o uso do MQTT sobre a rede de satélite LEO com o provedor Starlink, iniciou avaliando de latência de entrega das mensagens. O gráfico da Figura 22 mostra a latência média em função do tamanho do *payload* para três níveis de QoS no protocolo MQTT em uma rede de satélite de baixa órbita (LEO): QoS 0 (verde), QoS 1 (azul) e QoS 2 (vermelho). O eixo vertical representa a latência média em milissegundos (ms) e o eixo horizontal mostra o tamanho do *payload* em *bytes*.

Para o MQTT com o QoS 0 em rede LEO, a latência média começa baixa e permanece constante, com um ligeiro aumento em *payloads* maiores. Este nível de QoS apresenta a menor latência devido à ausência de confirmações de entrega, tornando-o mais eficiente em termos de tempo.

Para o QoS 1, a latência é maior que QoS 0, inicia em 174 ms e mantendo-se estável até 2.048 *bytes*, após segue aumentando e alcança 365 ms em 8.192 *bytes*. Isso reflete o *overhead* adicional das confirmações de entrega pelo menos uma vez, especialmente para *payloads* maiores.

Para o QoS 2, observou-se a maior latência média, começando em 480 ms e permanecendo com pequenas variações. A latência inicial mais elevada se deve às confirmações mais rigorosas

Figura 22 – Latência MQTT sobre Starlink (LEO)

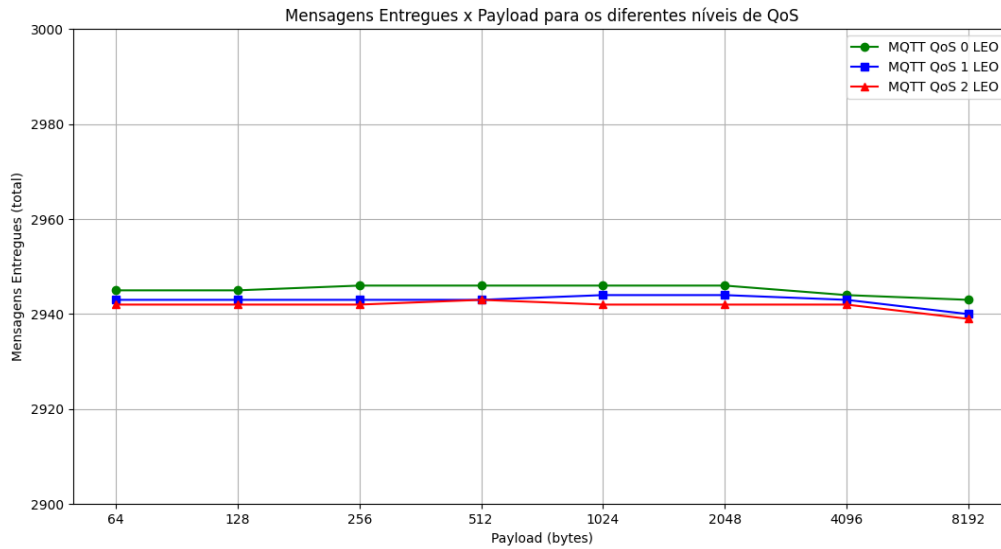


que garantem a entrega exata uma vez, o que aumenta o tempo de processamento e comunicação.

Em uma rede LEO, embora a latência seja menor, o impacto do tamanho do *payload* e do nível de QoS ainda é significativo. A escolha do nível de QoS deve considerar a necessidade de baixa latência versus a confiabilidade da entrega, balanceando eficiência e robustez conforme os requisitos da aplicação.

Em seguida, foi avaliada a total de mensagens entregues usando MQTT na rede LEO.

Figura 23 – Quantidade de mensagens entregues MQTT sobre Starlink (LEO)

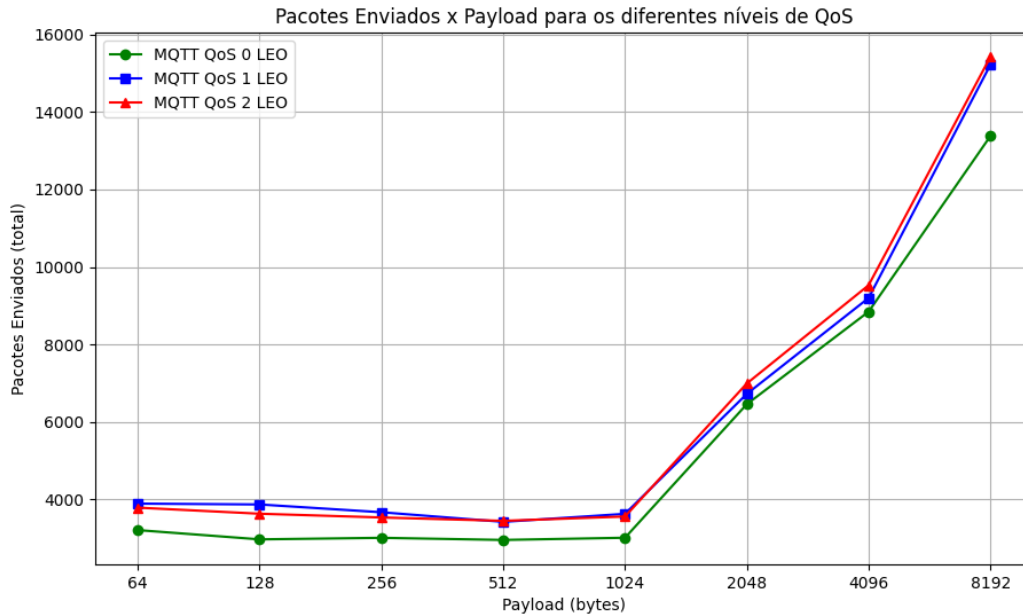


O gráfico da [Figura 23](#) mostra o número total de mensagens entregues em função do tamanho do *payload* para três níveis de QoS no protocolo MQTT em uma rede de satélite LEO: QoS 0 (verde), QoS 1 (azul) e QoS 2 (vermelho). O eixo vertical representa o número de mensagens entregues, enquanto o eixo horizontal mostra o tamanho do *payload* em *bytes*.

Para o MQTT com QoS 0, 1 e 2 em rede LEO, não foi identificada diferença significativa ficando a média de mensagens entregues em 2.940. Em uma rede LEO, a menor latência global permite um desempenho geral melhor em termos de mensagens entregues.

De maneira complementar, foi avaliada a quantidade de pacotes transmitidos usando MQTT sobre a rede LEO.

Figura 24 – Quantidade de pacotes MQTT sobre Starlink (LEO)



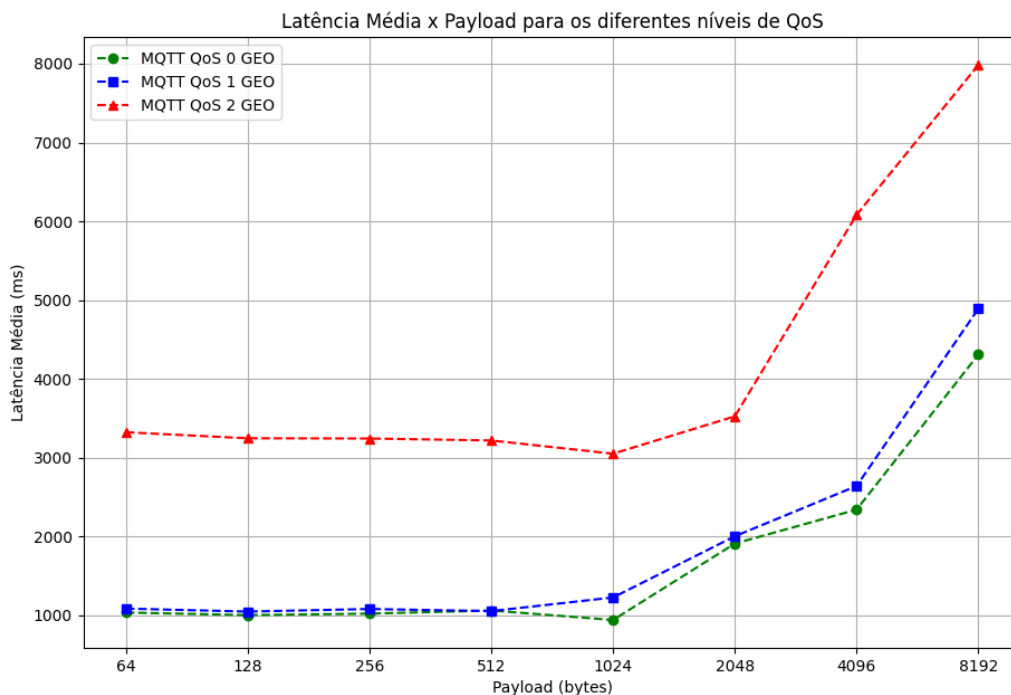
O gráfico da [Figura 24](#) mostra o número total de pacotes enviados em função do tamanho do *payload* para três níveis de QoS no protocolo MQTT em uma rede LEO: QoS 0 (verde), QoS 1 (azul) e QoS 2 (vermelho).

Para *payloads* menores, o número de pacotes enviados é estável. A partir de 1024 *bytes*, o número de pacotes aumenta até atingir o pico em 8.192 *bytes*. Todos os níveis de QoS apresentaram aumento no número de pacotes enviados. Esse comportamento sugere o aumento no número de retransmissões.

5.3 Avaliação de Desempenho do Uso do MQTT em Rede de Satélite de Órbita Geoestacionária (GEO)

O experimento com o uso do MQTT sobre a rede de satélite GEO com o provedor HughesNet, iniciou avaliando de latência de entrega das mensagens.

Figura 25 – Latência MQTT sobre HughesNet (GEO)



O gráfico da [Figura 25](#) ilustra a latência média em milissegundos (ms) em função do tamanho do *payload* em *bytes* para três diferentes níveis de Qualidade de Serviço (QoS) no protocolo MQTT em uma rede de satélite geoestacionária. As três séries de dados representam os níveis QoS 0, QoS 1 e QoS 2, identificados pelas cores verde, azul e vermelho, respectivamente.

Observa-se que a latência média aumenta conforme o tamanho do *payload* cresce para todos os níveis de QoS. Em todos os níveis de QoS 0, 1 e 2 para o protocolo MQTT em rede GEO, a latência começa baixa e permanece constante, até aumentar de forma gradual a partir do *payload* de 1.024 *bytes*. Porém no QoS 2, a latência média é mais alta do que para os outros níveis de QoS, começando em cerca de 3.000 ms e atingindo valores próximos de 8.000 ms para *payloads* de 8.192 *bytes*.

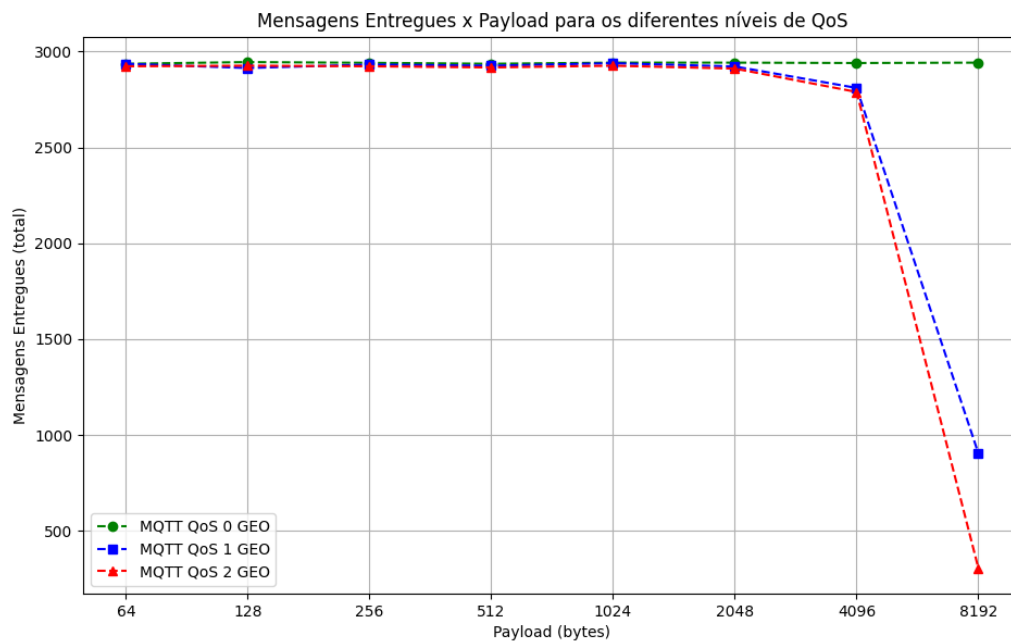
Este comportamento pode ser explicado pela natureza dos níveis de QoS: QoS 2 garante a entrega exatamente uma vez, exigindo mais confirmações e, portanto, introduzindo maior latência, especialmente para grandes volumes de dados. Por outro lado, QoS 0 e QoS 1, que têm

requisitos de confirmação menos rigorosos, apresentam menor latência, mas ainda são afetados pelo aumento do tamanho do *payload*.

O resultado destaca a importância de escolher o nível de QoS adequado com base nas necessidades e limitações de latência e confiabilidade para diferentes tamanhos de *payload* para protocolo MQTT em redes GEO.

Em seguida, foi avaliada a quantidade de mensagens entregues usando MQTT na rede GEO.

Figura 26 – Quantidade de mensagens MQTT sobre HughesNet (GEO)



O gráfico da [Figura 26](#) mostra a relação entre o número total de mensagens entregues e o tamanho do *payload* para três níveis de QoS no protocolo MQTT em uma rede de satélite de órbita geoestacionária(GEO): QoS 0 (verde), QoS 1 (azul) e QoS 2 (vermelho). O eixo vertical representa o número total de mensagens entregues, enquanto o eixo horizontal mostra o tamanho do *payload* em *bytes*.

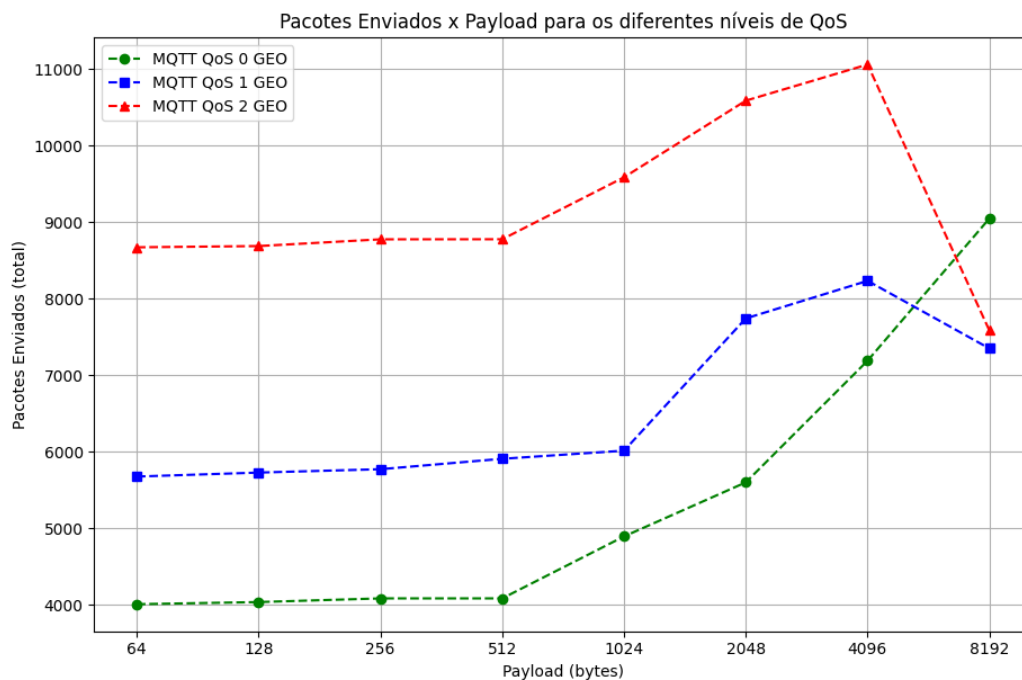
Para *payloads* de até 2.048 *bytes*, o número de mensagens entregues permanece próximo de 2.900 para todos os níveis de QoS. Isso indica uma consistência na entrega de mensagens quando o tamanho do *payloads* é pequeno, independentemente do nível de QoS utilizado.

No entanto, para os QoS 1 e 2 à medida que o tamanho do *payload* aumenta além dos 2.048 *bytes*, observa-se uma queda significativa no número de mensagens entregues. Com o *payload* de 8.192 *bytes*, o uso de redes GEO com MQTT se mostrou inviável pela baixa entrega de mensagens.

Esse comportamento pode ser atribuído aos diferentes requisitos de confirmação e garantias de entrega de cada nível de QoS. O resultado destaca a importância de considerar o nível de QoS em relação ao o tamanho do *payload* na escolha do protocolo MQTT para uso em redes GEO, que tem como característica alta latência.

Ademais foi avaliada a quantidade de pacotes transmitidos apresentado na [Figura 27](#)

Figura 27 – Quantidade de pacotes MQTT sobre HughesNet (GEO)

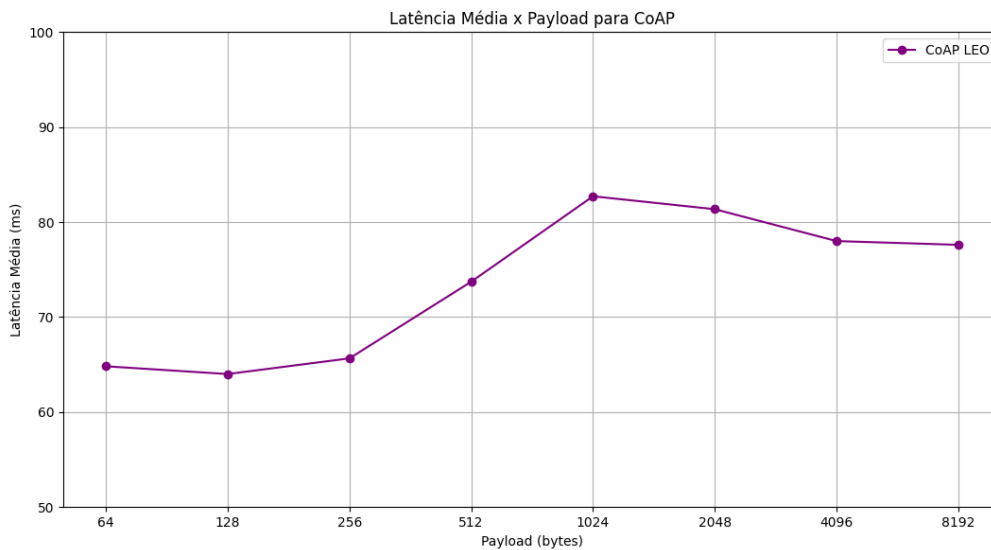


O gráfico da [Figura 27](#) mostra o número total de pacotes enviados em função do tamanho do *payload* para três níveis de QoS no MQTT em uma rede de satélite GEO: QoS 0 (verde), QoS 1 (azul) e QoS 2 (vermelho). Observa-se que QoS 2 envia mais pacotes, aumentando de forma constante até 4096 *bytes* antes de cair em 8.192 *bytes*, o QoS 1 tem um comportamento similar e o QoS 0 mantém uma taxa inicial menor de pacotes enviados. O resultado reflete a sobrecarga adicional dos níveis mais altos de QoS e com o aumento do *payload* acaba gerando retransmissões.

5.4 Avaliação de Desempenho do Uso do CoAP em Rede de Satélite de Órbita Baixa (LEO)

O experimento com o uso do CoAP com confirmação de mensagens (CON) sobre a rede de satélite LEO com o provedor Starlink, iniciou avaliando de latência de entrega das mensagens.

Figura 28 – Latência CoAP sobre Starlink (LEO)

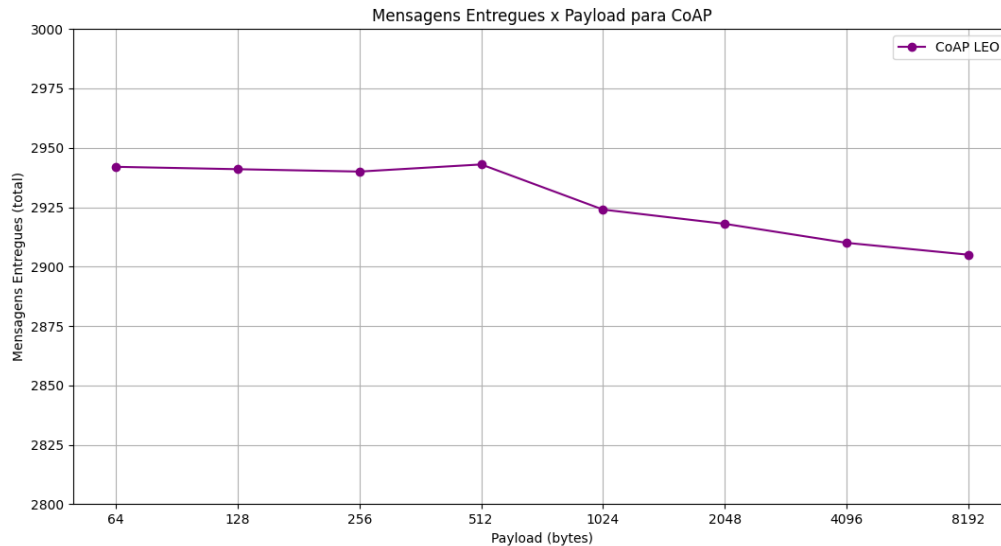


O gráfico da [Figura 28](#) mostra a latência média em função do tamanho do *payload* para CoAP em uma rede LEO. A latência média começa em 65 ms para 64 *bytes*, a partir de 256 *bytes* aumenta atingindo o pico em 82,5 ms para um payload de 1.024 *bytes*. Após esse ponto, a latência começa a diminuir, estabilizando em 78 ms, mesmo com *payloads* maiores.

Esse comportamento indica que, em redes LEO, CoAP com confirmação de mensagens (CON), lida bem com todos os tamanhos de *payloads* experimentados. A latência aumenta à medida que o tamanho do *payload* cresce.

Em seguida, foi avaliada a quantidade de mensagens entregues usando CoAP na rede LEO.

Figura 29 – Quantidade de mensagens CoAP entregues sobre Starlink (LEO)

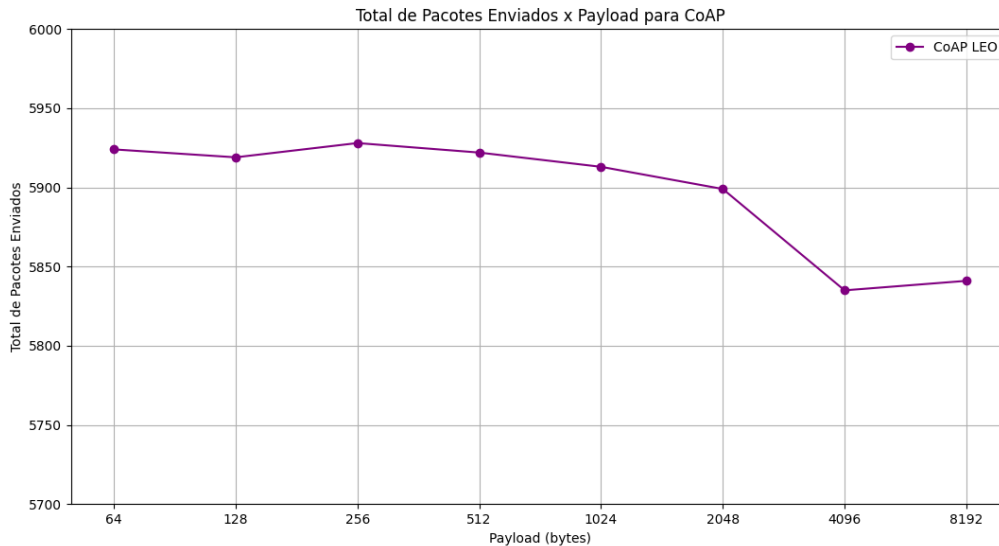


O gráfico da [Figura 29](#) mostra o total de mensagens entregues em função do tamanho do *payload* para CoAP em uma rede LEO. Observa-se que, o número de mensagens entregues se mantém com pequenas variações.

Esse comportamento sugere que o CoAP com confirmação de mensagens (CON) em redes LEO lida bem com todos os tamanhos de *payload* experimentados, apresentando uma queda de apenas 1% na entrega total de mensagens.

De maneira complementar, foi avaliada a quantidade de pacotes transmitidos usando CoAP sobre a rede LEO.

Figura 30 – Quantidade total de pacotes CoAP sobre Starlink (LEO)



O gráfico da [Figura 30](#) mostra o total de pacotes enviados em função do tamanho do *payload* para CoAP com confirmação de mensagens (CON) em uma rede LEO. Observa-se que, para *payloads* menores (até 512 *bytes*), o número de pacotes enviados se mantém próximo de 5.920, com pequenas oscilações. A partir de 1.024 *bytes*, há uma leve queda no número de pacotes enviados, em 8.192 *bytes*, o número de pacotes enviados atinge seu menor valor.

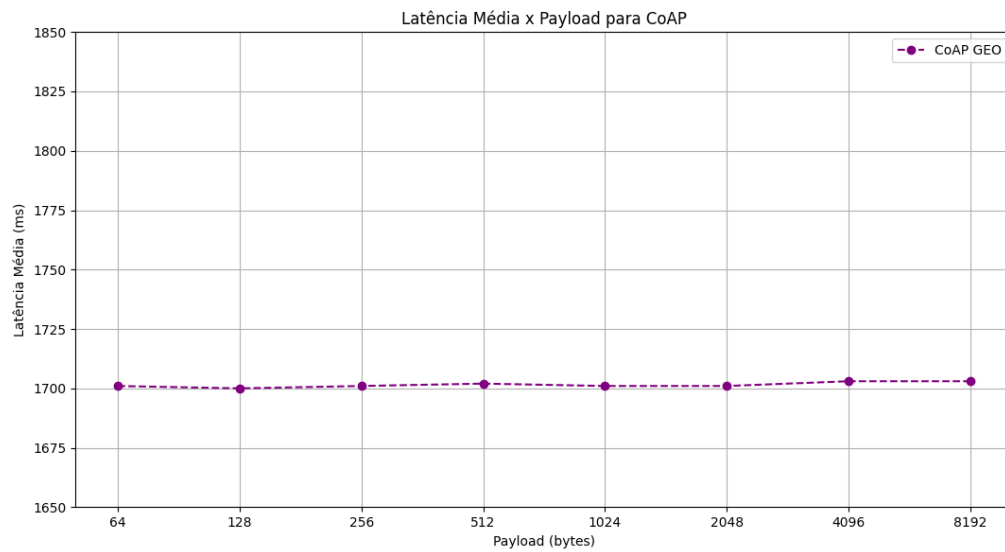
Esse comportamento sugere que, o CoAP com confirmação de mensagens (CON) em redes LEO, a medida que o tamanho do *payload* aumenta, diminui o número de pacotes enviados, uma variação de apenas 1,4%.

Os resultados indicam que o CoAP com confirmação de mensagens (CON) em redes LEO apresenta uma latência e eficiência de entrega estáveis para diferentes tamanhos de *payload*. A variação observada na latência e no número de pacotes enviados é mínima, demonstrando a viabilidade do uso de redes LEO com o CoAP com confirmação de mensagens (CON).

5.5 Avaliação de Desempenho do Uso do CoAP em Rede de Satélite de Órbita Geoestacionária (GEO)

O experimento com o uso do CoAP com confirmação de mensagens (CON) sobre a rede de satélite GEO com o provedor HughesNet iniciou avaliando de latência de entrega das mensagens.

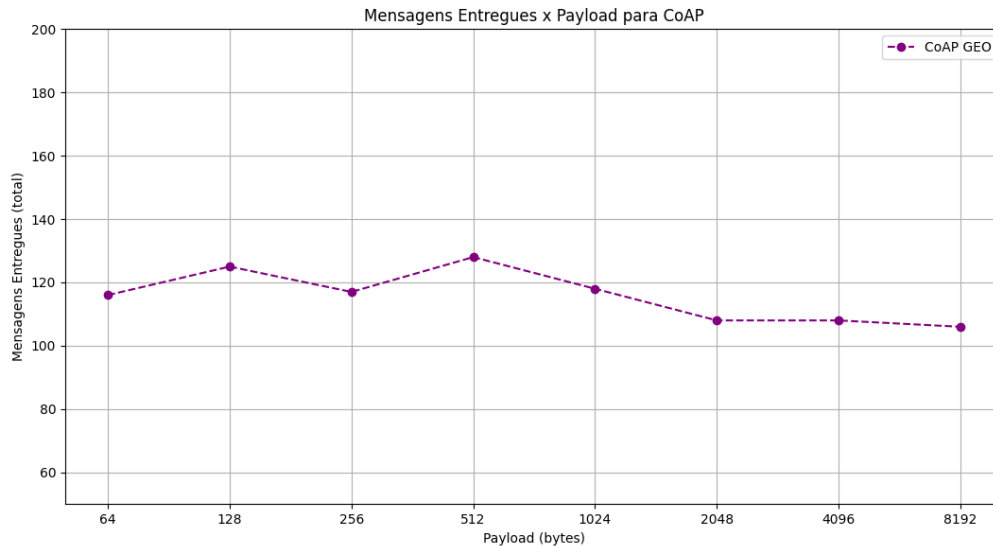
Figura 31 – Latência CoAP sobre HughesNet (GEO)



O gráfico da [Figura 31](#) apresenta a latência média em função do tamanho do *payload* para CoAP com confirmação de mensagens (CON) em uma rede GEO. Observa-se uma latência média de 1.700 ms para todos os *payloads* utilizados no experimento. Esse comportamento demonstra que o CoAP com confirmação de mensagens (CON) manteve a latência estável durante todo o experimento com a rede GEO.

Em seguida, foi avaliada a quantidade de mensagens entregues usando CoAP na rede GEO.

Figura 32 – Quantidade de mensagens CoAP entregues sobre HughesNet (GEO)

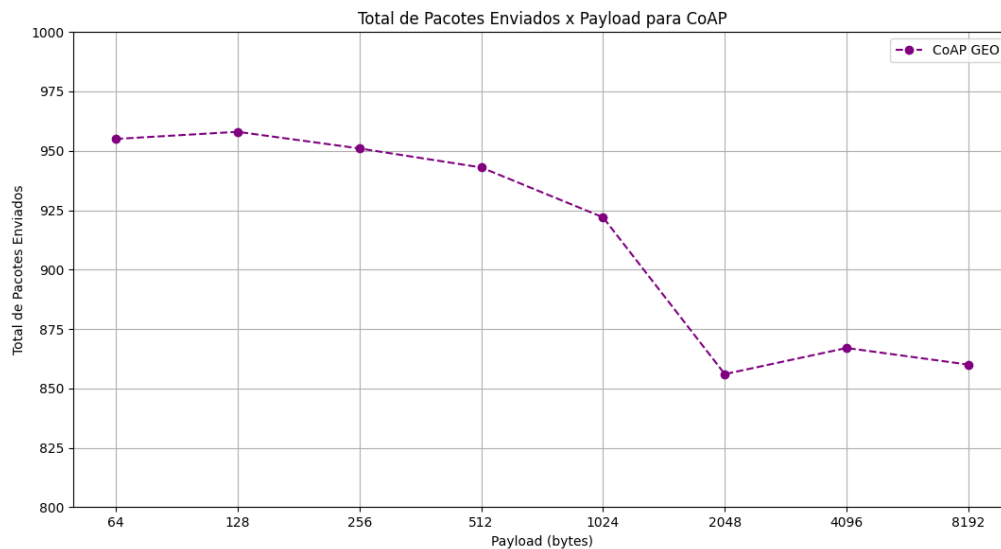


O gráfico da [Figura 32](#) apresenta o total de mensagens entregues em função do tamanho do *payload* para CoAP com confirmação de mensagens (CON) em uma rede GEO mostra uma pequena variação na quantidade de mensagens conforme o *payload* aumenta.

A análise com referência ao experimento executado, onde deveria ser enviada uma mensagem a cada 100 ms por um período de 300 segundos, totalizando o envio de 3.000 mensagens, mostra a baixa eficiência de entrega de mensagens do CoAP com confirmação de mensagens (CON) em redes GEO, onde apenas 4% das mensagens foram entregues. O que indica essa baixa eficiência é a alta latência das redes GEO, a característica de confirmação no CoAP que aguarda o ACK para enviar a mensagem seguinte e a existência de retransmissões.

De maneira complementar, foi avaliada a quantidade de pacotes transmitidos usando CoAP sobre a rede GEO.

Figura 33 – Quantidade total de pacotes CoAP sobre HughesNet (GEO)



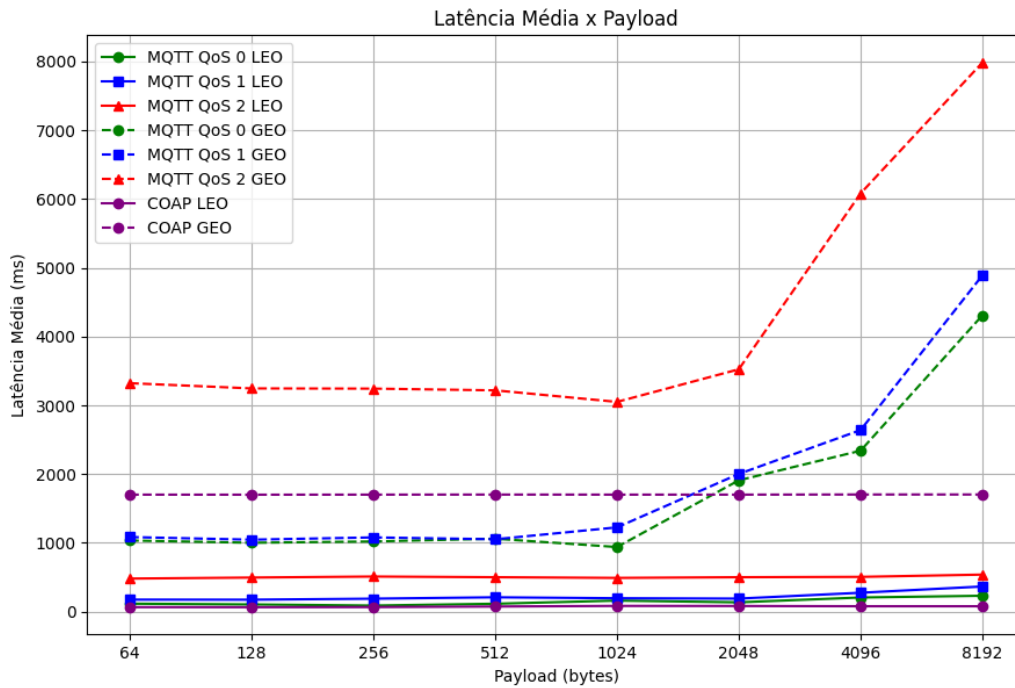
O gráfico da [Figura 33](#) revela que o número total de pacotes enviados em uma rede GEO usando CoAP com confirmação de mensagens (CON) diminui conforme o tamanho do *payload* aumenta. Para *payloads* menores (64 a 512 *bytes*), o número de pacotes enviados permanece estável, a partir de 1.024 *bytes* ocorre uma queda, e estabiliza após os 2.048 *bytes* seguir. Essa tendência sugere que a eficiência do CoAP em redes GEO diminui com *payloads* maiores, devido à maior latência e sobrecarga da rede.

Os resultados indicam que o CoAP com confirmação de mensagens em redes GEO apresenta latência alta, porém estável, baixa eficiência na entrega de mensagens, devido à espera por ACK e retransmissões, demonstrando a inviabilidade do uso de redes GEO com o CoAP com confirmação de mensagens (CON).

5.6 Análise dos Resultados

5.6.1 Análise Comparativa

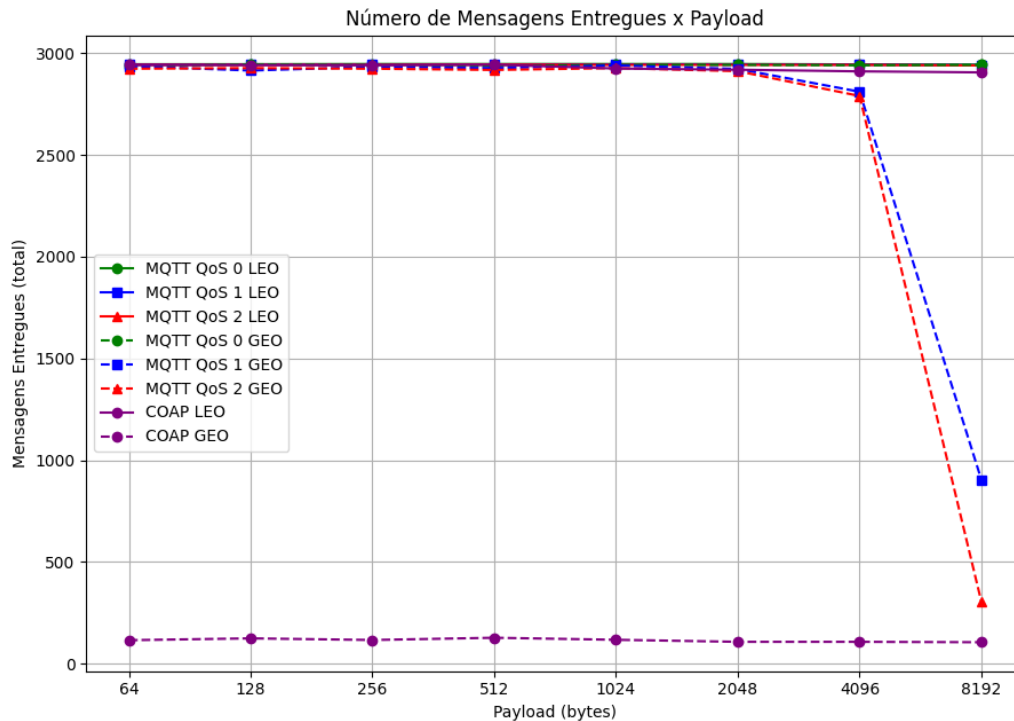
Figura 34 – Latência média do MQTT e CoAP sobre a Starlink (LEO) e a HughesNet (GEO)



O gráfico da [Figura 34](#) apresenta a latência média em função do tamanho do *payload* para os protocolos MQTT e CoAP em redes LEO e GEO. Observa-se que o protocolo CoAP com confirmação de mensagens (CON), tanto em LEO quanto em GEO, mantém uma latência constante, abaixo de 2.000 ms, independentemente do tamanho do *payload*.

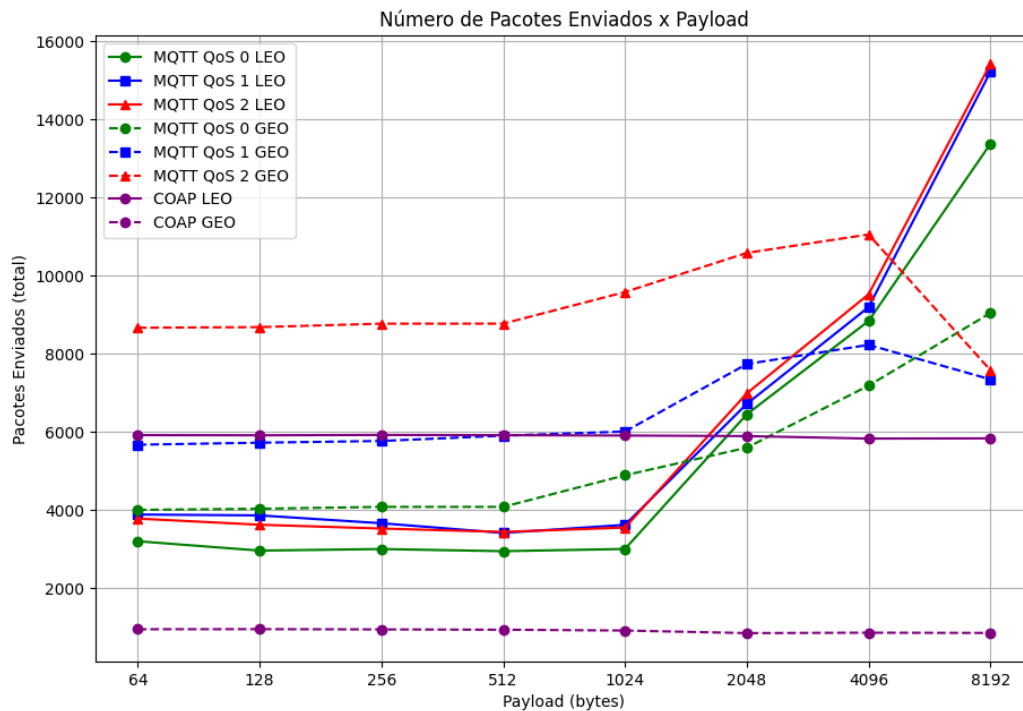
Em contraste, o MQTT, apresenta um aumento na latência à medida que o tamanho do *payload* cresce, especialmente em redes GEO. A latência para MQTT QoS 2 em GEO atinge valores próximos de 8.000 ms para *payloads* maiores. Analisando o gráfico de forma isolada, observa-se que o comportamento evidencia que o CoAP é mais estável em termos de latência, enquanto o MQTT é sensível ao aumento do *payload*, especialmente em QoS mais altos e em redes GEO.

Figura 35 – Mensagens entregues no MQTT e CoAP sobre a Starlink (LEO) e a HughesNet (GEO)



O gráfico da [Figura 35](#) mostra o número de mensagens entregues em função do tamanho do *payload* para os protocolos MQTT e CoAP em redes LEO e GEO. Nota-se que o protocolo CoAP com confirmação de mensagens (CON), se torna inviável quando utilizado em redes GEO, devido a alta latência a entrega de mensagens é drasticamente afetada. O MQTT, em todas as variações de QoS e tipos de rede, mantém uma boa entrega quase total de mensagens, com exceção do uso do QoS 1 e 2 em redes GEO que a partir do *payload* de 8.192 bytes, que devido a ao *overhead* afeta a entrega de mensagens inviabilizando seu uso.

Figura 36 – Pacotes enviados no MQTT e CoAP sobre a Starlink (LEO) e a HughesNet (GEO)



O gráfico da [Figura 36](#) apresenta o número de pacotes enviados em função do tamanho do *payload* para os protocolos MQTT e CoAP em redes LEO e GEO. Observa-se uma maior variação de envio de pacotes enviados conforme o *payload* com o uso do MQTT em rede LEO. A partir do *payload* de 1.024 bytes, há um aumento notável atingindo cerca de 16.000 pacotes para um *payload* de 8.192 bytes, evidenciando uma maior taxa de retransmissão.

Como observação geral, para o protocolo MQTT alertamos que uma análise criteriosa deve ser feita quanto ao uso do QoS em redes com alta latência, como a GEO. Para atender aos requisitos do QoS, são adicionadas várias confirmações que degradam e inviabilizam o uso eficiente da rede devido à alta latência. Em aplicações de sensores, onde os dados são reenviados periodicamente, nossos experimentos indicam que é mais adequado manter o MQTT sem o uso de QoS em redes de satélite GEO. Isso assegura uma comunicação mais eficiente, sem sobrecarregar a rede com confirmações adicionais que não são críticas para o desempenho desses tipos de aplicação.

Para o protocolo CoAP com confirmação de mensagens (CON), é importante destacar a inviabilidade de uso em redes GEO, que devido a alta latência gera atraso nas confirmações e consequentemente a entrega de menos mensagens. Das 3.000 mensagens que deveriam ter sido enviadas, apenas 4%, cerca de 120 mensagens, foram efetivamente enviadas e entregues com sucesso.

De maneira complementar, foi avaliada a taxa máxima de transferência do uso dos protocolos MQTT e CoAP em redes de satélite GEO e LEO durante os experimentos. Os resultados obtidos podem ser visualizados na [Tabela 4](#), destacando o desempenho entre as duas configurações de rede.

Tabela 4 – Taxa máxima de transferência durante o experimento

Rede	Protocolo	Operação	Vazão máxima
LEO (Starlink)	MQTT	<i>upload</i>	626 Kbps
LEO (Starlink)	MQTT	<i>download</i>	615 Kbps
LEO (Starlink)	CoAP	<i>upload</i>	406 Kbps
LEO (Starlink)	CoAP	<i>download</i>	399 Kbps
GEO (HughesNet)	MQTT	<i>upload</i>	649 Kbps
GEO (HughesNet)	MQTT	<i>download</i>	611 Kbps
GEO (HughesNet)	CoAP	<i>upload</i>	16 Kbps
GEO (HughesNet)	CoAP	<i>download</i>	15 Kbps

5.6.2 Cenário Hipotético

Considerando um cenário hipotético composto por uma rede com 100 sensores, a quantidade de *bytes* que cada sensor vai consumir ao enviar 1 mensagem por minuto, é preciso considerar os seguintes componentes de uma mensagem MQTT:

- *Header MQTT*: Para mensaegens simples, o header MQTT é pequeno, média de 2 *bytes*.
- *Payload*: Isso depende do conteúdo da mensagem enviada pelo sensor. Será assumido que cada mensagem contém uma leitura de temperatura e umidade, que podem ser representadas, por exemplo, em 4 *bytes* cada (*float*). Portanto, o *payload* seria de 8 *bytes*.
- *Tópico*: O nome do tópico pode variar em tamanho. Assumindo um tópico de 10 caracteres (10 *bytes*), mais 2 *bytes* de *overhead* do protocolo.

Portanto, cada sensor usando MQTT enviará 22 *bytes* por mensagem. Como cada sensor envia 1 mensagem por minuto, cada sensor consumirá 22 *bytes* por minuto. Com 100 sensores, o consumo total será:

$$\text{Total de bytes por minuto} = 100 \text{ sensores} \times 22 \text{ bytes/sensor} = 2.200 \text{ bytes/minuto}$$

Para o protocolo CoAP com confirmação de mensagens (CON):

- *Header CoAP*: O header CoAP é de 4 *bytes*.
- *Payload*: Assim como no MQTT, o *payload* depende do conteúdo da mensagem. Se for assumido que cada mensagem contém uma leitura de temperatura e umidade representadas em 4 *bytes* cada (*float*), o *payload* seria de 8 *bytes*.

- *URI Path* (equivalente ao Tópico no MQTT): O *URI Path* pode variar em tamanho. Assumindo que o *URI Path* tenha 10 caracteres (10 *bytes*).
- *Overhead* de Protocolo: Adicionalmente, pode haver alguns bytes adicionais de *overhead* para o CoAP, incluindo possíveis opções, identificação de mensagem, etc. Será assumido 4 *bytes* extras para essas opções.

Portanto, cada sensor usando CoAP enviará 26 *bytes* por mensagem. Como cada sensor envia 1 mensagem por minuto, cada sensor consumirá 26 *bytes* por minuto. Com 100 sensores, o consumo total será:

$$\text{Total de bytes por minuto} = 100 \text{ sensores} \times 26 \text{ bytes/sensor} = 2600 \text{ bytes/minuto}$$

Para atender ao cenário hipotético de 100 sensores de temperatura e umidade, pode-se considerar o nosso menor *payload* utilizado nos testes, 64 *bytes*. Tendo em vista que em nosso experimento enviamos uma mensagem a cada 100 ms, o que nos garante um total de 38.400 *bytes* por minuto, valor 15 vezes superior ao necessário para atender a demanda de 100 sensores.

Observamos também que para o experimento proposto, as taxas máximas de transferência ficaram em cerca de 600 Kbps tanto para *download* quanto para *upload*, sem saturar nem a tecnologia GEO ou LEO.

Esses achados contribuem para afirmarmos que, para o cenário descrito de 100 sensores, tanto a rede de satélite LEO quanto a rede GEO podem suportar a comunicação eficiente e confiável com protocolo MQTT ou CoAP. Com ressalva para a utilização do CoAP com confirmação de mensagens (CON) em redes GEO, que foi se mostrou inviável desde o menor *payload* experimentado de 64 *bytes*.

6

Considerações Finais

Este capítulo apresenta, em 3 seções, as considerações finais desta dissertação. Na Seção 6.1, a conclusão do trabalho. 6.2 as ameaças a validade e na seção seguinte 6.3 é apresentado quais os possíveis trabalhos futuros.

6.1 Conclusão

O presente trabalho avaliou o desempenho das redes de satélite GEO e LEO com o uso dos protocolos MQTT e CoAP. O estudo analisou a latência, taxa de transferência de mensagens e a confiabilidade da comunicação, utilizando diferentes configurações de QoS para o MQTT e o CoAP com o tipo de mensagem CON (confirmável).

Foi observado que o uso de QoS no MQTT, especialmente em redes de alta latência como a GEO, pode degradar significativamente o desempenho, devido às confirmações adicionais necessárias. Portanto, para aplicações de sensores que enviam dados periodicamente, recomenda-se utilizar o MQTT sem QoS em redes GEO, garantindo uma comunicação mais eficiente sem sobrecarregar a rede.

Para o CoAP foi observada a inviabilidade de uso deste protocolo com a opção de confirmação de mensagens (CON) habilitada em redes GEO. Não foi possível avaliar neste trabalho uso do protocolo com o tipo de mensagem NON (sem confirmação), pois o *framework* utilizado ComBench não possui essa opção implementada.

Em contrapartida, a rede LEO manteve um desempenho consistente e estável em todos os casos de teste executados nesse trabalho.

6.2 Ameaças a validade

- O experimento foi executado 1 (uma) vez por 300 segundos para cada *payload* definido nas métricas, podendo comprometer a validade dos resultados devido à falta de replicação, aumentando o risco de variabilidade não capturada.

6.3 Trabalhos futuros

- Outros parâmetros para benchmark: a utilização de outros formatos de teste, não só os baseado em variação do *payload*, como exemplo a utilização de vários clientes de pub/sub simultâneos, pode incrementar ainda mais a relevância desta pesquisa;
- Implementar mensagens NON (não confirmáveis) para o CoAP no ComBench: para viabilizar o uso de mensagens sem confirmação com o CoAP em experimentos futuros, se faz necessária a implementação dessa *feature* no *framework* ComBench;
- Analisar detalhadamente o *handover* das redes LEO.

Referências

- ADAMS, J. D.; CHIANG, E. P.; STARKEY, K. Industry-university cooperative research centers. *The Journal of Technology Transfer*, Springer, v. 26, p. 73–86, 2001. Citado na página 20.
- ALAH, M. E. E. et al. Integration of iot-enabled technologies and artificial intelligence (ai) for smart city scenario: recent advancements and future trends. *Sensors*, MDPI, v. 23, n. 11, p. 5206, 2023. Citado na página 22.
- ALARCON, A. Legitimizing internet. org through development discourse. *AoIR Selected Papers of Internet Research*, 2018. Citado na página 21.
- ALLIOUI, H.; MOURDI, Y. Exploring the full potentials of iot for better financial growth and stability: A comprehensive survey. *Sensors*, v. 23, n. 19, 2023. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/23/19/8015>>. Citado na página 22.
- ANDY, S.; RAHARDJO, B.; HANINDHITO, B. Attack scenarios and security analysis of mqtt communication protocol in iot system. In: IEEE. *2017 4th International conference on electrical engineering, computer science and informatics (EECSI)*. [S.l.], 2017. p. 1–6. Citado na página 22.
- ANSARI, D. B.; REHMAN, A.-U.; ALI, R. Internet of things (iot) protocols: a brief exploration of mqtt and coap. *International Journal of Computer Applications*, v. 179, n. 27, p. 9–14, 2018. Citado na página 23.
- ASHTON, K. et al. That ‘internet of things’ thing. *RFID journal*, Hauppauge, New York, v. 22, n. 7, p. 97–114, 2009. Citado na página 20.
- BACCO, M. et al. Reliable m2m/iot data delivery from fanets via satellite. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, Wiley Online Library, v. 37, n. 4, p. 331–342, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.
- BAR, F.; GALPERIN, H. Building the wireless internet infrastructure: From cordless ethernet archipelagos to wireless grids. *COMMUNICATIONS AND STRATEGIES*, ITS Communications and Strategies, p. 45–70, 2004. Citado na página 21.
- BISIO, I.; MARCHESE, M. Performance evaluation of bandwidth allocation methods in a geostationary satellite channel in the presence of internet traffic. *Computer Networks*, Elsevier, v. 52, n. 1, p. 275–291, 2008. Citado na página 17.
- BRITO, S. H. B. *IPv6-O novo protocolo da Internet*. [S.l.]: Novatec Editora, 2018. Citado na página 21.
- BRYCE, R.; SRIVASTAVA, G. The addition of geolocation to sensor networks. In: *ICSOF*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 796–802. Citado na página 22.
- CAKAJ, S. The parameters comparison of the “starlink” leo satellites constellation for different orbital shells. *Frontiers in Communications and Networks*, Frontiers Media SA, v. 2, p. 643095, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 36.

- CENTENARO, M. et al. A survey on technologies, standards and open challenges in satellite iot. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 23, n. 3, p. 1693–1720, 2021. Citado na página 13.
- CHAI, F. et al. Joint multi-task offloading and resource allocation for mobile edge computing systems in satellite iot. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, IEEE, v. 72, n. 6, p. 7783–7795, 2023. Citado na página 22.
- CHEN, L.; ERFANI, S. A note on security management of the internet of things. In: IEEE. *2017 IEEE 30th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*. [S.l.], 2017. p. 1–4. Citado na página 21.
- DEUTSCHMANN, J.; HIELSCHER, K.-S.; GERMAN, R. Broadband internet access via satellite: Performance measurements with different operators and applications. In: VDE. *Broadband Coverage in Germany; 16th ITG-Symposium*. [S.l.], 2022. p. 1–7. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.
- EBLEME, M. A.; BAYILMIS, C.; CAVUSOGLU, U. Examination and performance evaluation of mqtt. In: *3rd International Conference on Computer Science and Engineering*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 246–250. Citado na página 36.
- G1. *Amazon vai lançar internet via satélite no Brasil e concorrer com empresa de Elon Musk*. 2024. Disponível em: <<https://g1.globo.com/inovacao/noticia/2024/06/13/amazon-vai-lancar-internet-via-satelite-no-brasil-e-concorrer-com-empresa-de-elon-musk.ghtml>>. Acesso em: 16 de julho 2024. Citado 3 vezes nas páginas 7, 14 e 17.
- GIOTTI, D. et al. Performance analysis of coap under satellite link disruption. In: IEEE. *2018 25th International Conference on Telecommunications (ICT)*. [S.l.], 2018. p. 623–628. Citado 3 vezes nas páginas 13, 29 e 30.
- GOODRICH, R. S. Mqtt—how it works. *InSight: Rivier Academic Journal*, rivier.edu, v. 17, n. 1, 2022. Citado na página 22.
- GUNNARSSON, M. et al. Performance evaluation of group oscore for secure group communication in the internet of things. *ACM Transactions on Internet of Things*, ACM New York, NY, v. 3, n. 3, p. 1–31, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 24.
- GUPTA, B. B.; QUAMARA, M. An overview of internet of things (iot): Architectural aspects, challenges, and protocols. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, Wiley Online Library, v. 32, n. 21, p. e4946, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.
- HERRNLEBEN, S. et al. Combench: A benchmarking framework for publish/subscribe communication protocols under network limitations. In: SPRINGER. *Performance Evaluation Methodologies and Tools: 14th EAI International Conference, VALUETOOLS 2021, Virtual Event, October 30–31, 2021, Proceedings*. [S.l.], 2021. p. 72–92. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 35.
- IETF. *CoAP Specs*. 2023. Disponível em: <<https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7252>>. Acesso em: 15 de julho 2023. Citado na página 14.
- JOSHI, M.; KAUR, B. P. Coap protocol for constrained networks. *International journal of wireless and microwave technologies*, v. 5, n. 6, p. 1–10, 2015. Citado na página 24.

- KITCHENHAM, B. Procedures for performing systematic reviews. *Keele University Technical Report TR/SE-0401*, v. 33, 08 2004. ISSN 1353-7776. Citado na página 25.
- LIN, H.; BERGMANN, N. W. Iot privacy and security challenges for smart home environments. *Information*, MDPI, v. 7, n. 3, p. 44, 2016. Citado na página 23.
- LUGLIO, M. et al. Performance evaluation of a satellite communication-based mec architecture for iot applications. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, IEEE, v. 58, n. 5, p. 3775–3785, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 30.
- MARTNEZ, J. V. Y. et al. Iot-based data management for smart agriculture. In: IEEE. *2020 Second International Conference on Embedded & Distributed Systems (EDiS)*. [S.l.], 2020. p. 41–46. Citado na página 16.
- MISHRA, B. Performance evaluation of mqtt broker servers. In: SPRINGER. *International Conference on Computational Science and Its Applications*. [S.l.], 2018. p. 599–609. Citado 3 vezes nas páginas 7, 23 e 35.
- NAIK, N. Choice of effective messaging protocols for iot systems: Mqtt, coap, amqp and http. In: IEEE. *2017 IEEE international systems engineering symposium (ISSE)*. [S.l.], 2017. p. 1–7. Citado na página 22.
- NATIVI, S. et al. Iot 2.0 and the internet of transformation. *Publications Office Eur. Union, Luxembourg, Tech. Rep. JRC120372*, 2020. Citado na página 13.
- NOGUEIRA, P. L. G. *Integração da tecnologia Near Field Communications nas Telecomunicações Móveis*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Politecnico do Porto (Portugal), 2011. Citado na página 21.
- OASIS. *MQTT Specs*. 2023. Disponível em: <<https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html>>. Acesso em: 15 de julho 2023. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 23.
- OSISANWO, F.; KUYORO, S.; AWODELE, O. Internet refrigerator—a typical internet of things (iot). In: *3rd International Conference on Advances in Engineering Sciences & Applied Mathematics (ICAESAM'2015), London (UK)*. http://ieng.org/images/proceedings_pdf/2602E0315051.pdf. [S.l.: s.n.], 2015. Citado na página 20.
- PEI, Z. et al. Application-oriented wireless sensor network communication protocols and hardware platforms: A survey. In: IEEE. *2008 IEEE international conference on industrial technology*. [S.l.], 2008. p. 1–6. Citado na página 21.
- PIVOTO, D. et al. Scientific development of smart farming technologies and their application in brazil. *Information processing in agriculture*, Elsevier, v. 5, n. 1, p. 21–32, 2018. Citado na página 13.
- RATH, M.; SATPATHY, J.; OREKU, G. S. Artificial intelligence and machine learning applications in cloud computing and internet of things. In: *Artificial intelligence to solve pervasive internet of things issues*. [S.l.]: Elsevier, 2021. p. 103–123. Citado na página 21.
- ROMERO, D. A. V. et al. An open source iot edge-computing system for monitoring energy consumption in buildings. *Results in Engineering*, Elsevier, v. 21, p. 101875, 2024. Citado na página 22.

SÁ, J. Oliveira e; PEREIRA, J. L.; CACHO, J. Internet of things evolution: A european perspective. Belgrade University. Faculty of Mechanical Engineering, 2019. Citado na página 21.

SCHILLER, E. et al. Landscape of iot security. *Computer Science Review*, v. 44, p. 100467, 2022. ISSN 1574-0137. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574013722000120>>. Citado na página 13.

Schultz, David. *What Is MQTT, and How Can Industrial Automation Companies Use It?* 2022. Disponível em: <<https://blog.isa.org/what-is-mqtt-and-how-can-industrial-automation-companies-use-it>>. Acesso em: 11 de julho 2024. Citado na página 22.

SHARMA, N.; SHAMKUWAR, M.; SINGH, I. The history, present and future with iot. *Internet of things and big data analytics for smart generation*, Springer, p. 27–51, 2019. Citado na página 20.

SOUA, R.; PALATTELLA, M. R.; ENGEL, T. Iot application protocols optimisation for future integrated m2m-satellite networks. In: IEEE. *2018 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS)*. [S.l.], 2018. p. 1–5. Citado 3 vezes nas páginas 14, 28 e 30.

SOUA, R. et al. Enhancing coap group communication to support mmhc over satellite networks. In: IEEE. *ICC 2020-2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.], 2020. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 30.

SOUA, R. et al. Mqtt-mfa: a message filter aggregator to support massive iot traffic over satellite. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 9, n. 16, p. 14928–14937, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.

Stoff. *Orbitron Satellite Tracking System*. 2023. Disponível em: <<https://www.stoff.pl/>>. Acesso em 10 de março de 2023. Citado 3 vezes nas páginas 7, 17 e 18.

SWEDAN, A. et al. Detection and prevention of malicious cryptocurrency mining on internet-connected devices. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Future Networks and Distributed Systems*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–10. Citado na página 21.

Symmetry. *LEO vs. MEO vs. Satélites GEO*. 2018. Disponível em: <<https://www.symmetryelectronics.com/blog/leo-vs-meo-vs-geo-satellites-what-s-the-difference-symmetry-blog/>>. Acesso em: 10 de julho 2023. Citado na página 16.

TANG, S. et al. A review of building information modeling (bim) and the internet of things (iot) devices integration: Present status and future trends. *Automation in construction*, Elsevier, v. 101, p. 127–139, 2019. Citado na página 21.

TechWorks Hub Ltd. <https://iotsecurityfoundation.org/>. 2023. Disponível em: <<https://iotsecurityfoundation.org/>>. Acesso em: 11 de julho 2023. Citado na página 21.

UGWUANYI, S.; PAUL, G.; IRVINE, J. Survey of iot for developing countries: Performance analysis of lorawan and cellular nb-iot networks. *Electronics*, MDPI, v. 10, n. 18, p. 2224, 2021. Citado na página 21.

UMAIR, M. et al. Impact of covid-19 on iot adoption in healthcare, smart homes, smart buildings, smart cities, transportation and industrial iot. *Sensors*, MDPI, v. 21, n. 11, p. 3838, 2021. Citado na página [21](#).

VANDANA, C.; CHIKKAMANNUR, A. A. S-coap: Semantic enrichment of coap for resource discovery. *SN Computer Science*, Springer, v. 1, n. 2, p. 88, 2020. Citado na página [24](#).

VERMESAN, O.; FRIESS, P. *Internet of things: converging technologies for smart environments and integrated ecosystems*. [S.l.]: River publishers, 2013. Citado na página [20](#).

WANG, B. et al. An efficient and privacy-preserving blockchain-based authentication scheme for low earth orbit satellite-assisted internet of things. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, IEEE, v. 58, n. 6, p. 5153–5164, 2022. Citado na página [19](#).