

**RICARDO SERRA SIMÕES JUNIOR**

**AVALIAÇÃO DO PROTOCOLO GOOSE EM REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE  
ENERGIA UTILIZANDO TECNOLOGIA DE RADIO DE 4ª GERAÇÃO COMO MEIO  
DE COMUNICAÇÃO**

**São Paulo  
2022**

**RICARDO SERRA SIMÕES JUNIOR**

**AVALIAÇÃO DO PROTOCOLO GOOSE EM REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE  
ENERGIA UTILIZANDO TECNOLOGIA DE RADIO DE 4ª GERAÇÃO COMO MEIO  
DE COMUNICAÇÃO**

**Versão Corrigida**

**Dissertação apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção do título  
de Mestre em Ciências**

**Área de Concentração:  
Sistemas de Potência**

**Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Milana L. Santos**

**São Paulo  
2022**

Este exemplar foi revisado e alterado em relação a versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 21 de janeiro de 2022.

Assinatura do autor \_\_\_\_\_

Assinatura da orientadora \_\_\_\_\_

Simões Junior, Ricardo Serra

AVALIAÇÃO DO PROTOCOLO GOOSE EM REDE DE  
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA UTILIZANDO TECNOLOGIA DE RADIO  
DE 4ª GERAÇÃO COMO MEIO DE COMUNICAÇÃO / R.S Simões –  
Versão Corrigida - São Paulo, 2022

89 p.

Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1. Engenharia Elétrica 2. Mensagens IEC 61850. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

Simões Junior, Ricardo Serra **Avaliação do protocolo GOOSE em redes de distribuição de energia utilizando tecnologia de rádio de 4ª geração como meio de comunicação.** São Paulo. 2022. 1v. (Mestrado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

#### ERRATA

FOLHA/PÁGINA	LINHA	ONDE SE LÊ	LEIA-SE

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha mãe Rita de Cassia Canova Simões, minha esposa Suelem Fernanda Neves Simões e à minha filha Maria Flor Neves Simões, por seu amor, companheirismo e pelo apoio irrestrito durante a realização deste trabalho.

Agradeço à Professora Doutora Milana Lima dos Santos, por me orientar com excelência.

## RESUMO

Este trabalho discute como obter alta velocidade de detecção, isolamento e restauração de falhas em redes de distribuição utilizando, como meio, uma rede de comunicação multisserviços sem fio de 4ª geração como WiMAX ou LTE. Todas as sequências de troca de mensagens, priorização de pacotes e isolamento de serviços são abordados no intuito de atender ao máximo os requisitos de desempenho da Norma IEC 61850 *The international Electrotechnical Commission*. Foram utilizados dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs) simulando pontos de comutação ao longo de uma linha de distribuição, com o objetivo de determinar os tempos de transmissão e recebimento das mensagens *peer-to-peer* orientadas a objeto GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Events*) via rede sem fio para a tomada de decisão de restauração. São investigados os recursos de rádio e a classificação e priorização dos serviços para o tráfego de comunicação máquina a máquina (M2M), através de uma rede rádio de multisserviço. É proposta uma configuração de agendamento QoS para atendimento a outros serviços da rede, como medição inteligente e mobilidade dos carros de serviço. As simulações foram conduzidas utilizando equipamentos reais em um ambiente controlado. Os resultados indicam que é possível transmitir as informações de isolamento e restauração dentro de um limite aceitável de atraso, menor que 100 ms, requisito definido pela norma IEC 61850-5 para troca de mensagens GOOSE entre dispositivos inteligentes.

**Palavras-chave:** IEC61850, WiMAX, LTE, 4G, Protocolo GOOSE

## **ABSTRACT**

This research discusses how to obtain high-speed detection, isolation and fault healing in distribution networks using, as the communication media, a wireless multi-service 4G network. All message exchanges, packet prioritization, and service isolation sequences are addressed in order to meet the maximum performance requirements of IEC 61850. Intelligent electronic devices (IEDs) are used to simulate switching points along a distribution line, with the objective of determining the transmission and reception delays of the object-oriented peer-to-peer (GOOSE) messages, via wireless network for the restoration decision. This work investigates radio resources and the classification and prioritization of services for machine-to-machine (M2M) traffic through a multi-service network. It also proposes scheduling configuration of QoS to meet other network services such as smart metering and mobility of service cars. Simulations were carried out using real equipment in a controlled environment. The results indicate that it is possible to transmit isolation and restoration information within an acceptable delay limit, within the 100 ms, which is the limit defined in IEC 61850-5 for GOOSE messages between intelligent devices.

**Keywords:** IEC61850, WiMAX, LTE, 4G, GOOSE

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema radial simples.....	17
Figura 2 - Sistema em Anel. ....	18
Figura 3- Esquema de proteção.....	20
Figura 4 - Montagem no poste de um religador. ....	23
Figura 5 - Esquema de transferência permissiva de disparo por sobrealcançe. ....	24
Figura 6 - Tempo de envio e processamento lógico.....	29
Figura 7 - Esquema de retransmissão Mensagens Goose. ....	31
Figura 8 - Ethernet VLAN e priorização de pacotes. ....	32
Figura 9 - Modulação adaptativa. ....	34
Figura 10 - Multiplexação de antenas para ganho de velocidade. ....	35
Figura 11 - Relé Shweitzer SEL 451. ....	43
Figura 12 - Switch Ruggedcom RX1501. ....	44
Figura 13 - WiMAX Ruggedcom Win7258. ....	44
Figura 14 - Sincronismo de tempo NTP. ....	45
Figura 15 - Diagrama de montagem inicial. ....	45
Figura 16 - Simulação do Ambiente em uma subestação de energia. ....	46
Figura 17 - Laboratório Relé de proteção SEL451. ....	47
Figura 18 - Antena Base sem atenuadores. ....	47
Figura 19 - Tela de configuração rádio Win7258. ....	48
Figura 20 - Proporção de envio e recebimento. ....	49
Figura 21 - Priorização de pacotes UGS. ....	49
Figura 22 - Classificador de Pacotes. ....	50
Figura 23 - Fluxo de serviços. ....	50
Figura 24 - Software Jperf Gerador de perturbação de rede. ....	51
Figura 25 - Painel de monitoramento 1 Megabit. ....	52
Figura 26- Software Jperf Gerador de perturbação 50 Megabits. ....	52
Figura 27 - Painel de monitoramento 15 Megabyte.....	53
Figura 28- Software Jperf Gerador de perturbação 100 Megabits. ....	54
Figura 29 - Painel de monitoramento 100 Megabyte.....	54
Figura 30 - Tela de captura de pacotes Wireshark. ....	55
Figura 31 – Captura da mensagem Goose.....	56
Figura 32 - Amostras de pacotes capturados. ....	57
Figura 33 - Grafico de Atraso das mensagens Goose. ....	58
Figura 34 - Diagrama otimizado.....	59
Figura 35 - Simulação do Ambiente otimizado em uma subestação de energia. ....	60
Figura 36 - LPROT Escola Politécnica. ....	60
Figura 37 - GPS Reason.....	61
Figura 38 - Painel de Proteção GE.....	62
Figura 39 - Montagem do rádio Base.....	62

Figura 40 - Atenuadores de potência.....	63
Figura 41 - Cálculo de perda em espaço livre.....	64
Figura 42 - Montagem do Atenuadores.....	64
Figura 43 - Proporção de envio e recebimento otimizada.....	65
Figura 44 - Verificação da priorização de pacotes otimizada.....	65
Figura 45 - Tela de eventos Relé GE.....	66
Figura 46 - Análise de Oscilógrafia.....	69
Figura 47 - Análise de oscilógrafia do segundo caso.....	70
Figura 48 - Detalhamento analise grafica.....	71
Figura 49 - Topologia proposta para o LTE.....	72
Figura 50- Laboratório de desenvolvimento GE Reason.....	73
Figura 51 - GPS Sincronismo de tempo Reason RT434.....	73
Figura 52 - Radio Base EnodB Airspan.....	74
Figura 53 - Proporção de envio e recebimento otimizada.....	75
Figura 54 - Transporte de GOOSE dentro do LTE.....	76
Figura 55 - Ponto de transporte de camada 2.....	76
Figura 56 – Ensaio de Integração.....	77
Figura 57 - Conexão física com as portas digitais.....	77
Figura 58 - Tela de configuração RT434.....	78
Figura 59 - Tela de configuração MU320.....	79
Figura 60 - Tele de configuração GE Reason DR60.....	80
Figura 61 - Captura do pacote de informação GOOSE.....	81
Figura 62 - Captura do pacote de informação PTP IEEE 1588.....	81
Figura 63 - Software Jperf Gerador de perturbação de rede.....	82
Figura 64 - Análise dos registros.....	83
Figura 65 - Comparação de atraso do disparo x recebimento.....	84
Figura 66 - Comparação disparo GOOSE x Recebimento.....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos de tempo para cada tipo de mensagem. ....	28
Tabela 2 - Tabela de agendamento de Serviços do WiMAX. ....	37
Tabela 3 - Tabela de tempo de atraso x perturbação. ....	57
Tabela 4 - Resultado medição fibra ótica. ....	67
Tabela 5 - Medição configuração inicial. ....	68
Tabela 6 - Tabela resultado configuração otimizada. ....	68
Tabela 7 – Evento para análise oscilografica. ....	69
Tabela 8 - Segundo evento oscilógrafia. ....	70
Tabela 9 - Quadro Resumo dos eventos. ....	85

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DNP3	<i>Distributed Network Protocol</i>
GOOSE	Generic Object Oriented Substation Events
GPS	Sistema de Posicionamento Global ( <i>Global Positioning System</i> )
IEC	International Electrotechnical Commission
IED	Dispositivo eletrônico inteligente ( <i>Intelligent Electronic Device</i> )
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IRIG	Inter-Range Instrumentation Group
LAN	Rede local ( <i>Local Area Network</i> )
MAC	Controle de acesso ao meio ( <i>Media Access Control</i> )
OSI	Open Systems Interconnection
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SNTP	Simple Network Time Protocol
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
VLAN	Rede local virtual ( <i>Virtual Local Area Network</i> )
4G	4ª Geração de tecnologia Wireless
LTE	Long Term Evolution
M2M	Máquina-a-máquina ( <i>Machine to Machine</i> )
MMS	Manufacturing Message Specification
QOS	Qualidade de Serviço ( <i>Quality of Service</i> )
PTP	Precision Time Protocol

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	13
1.1.	Objetivos .....	14
1.2.	Estrutura do Texto .....	14
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.	EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO PROTOCOLO GOOSE .....	17
3.1.	Introdução ao conceito de recomposição automática .....	17
3.2.	Requisitos de operação .....	19
3.3.	Recuperação da Rede.....	20
3.4.	Redes de Telefonia Pública em soluções de missão crítica .....	22
3.5.	Modelo de aplicação e requisitos de tráfego.....	24
4.	PADRÃO IEC 61850.....	26
4.1.	Sincronismo de tempo .....	27
4.2.	Mensagens GOOSE .....	28
4.3.	IEEE 801.2Q – Priorização e classificação de pacotes VLAN.....	31
5.	IEEE 802.16 REDE SEM FIO WiMAX.....	33
5.1.	Transportando proteção sobre WiMAX.....	36
5.2.	Utilização das frequências em caráter Limitado Privado .....	39
6.	ENSAIOS REALIZADOS.....	42
6.1.	Equipamentos utilizados.....	43
6.2.	Cenário de referência .....	44
6.3.	Configuração do Relé .....	46
6.4.	Configuração das mensagens GOOSE .....	46
6.5.	Montagem das Antenas e Atenuadores.....	47
6.6.	Configuração do Rádio WiMAX.....	47
6.7.	Configuração da proporção de envio e recebimento dos dados .....	48
6.8.	Configuração da priorização do serviço de mensagens GOOSE em UGS .....	49
6.9.	Classificador do pacote Goose dentro da priorização.....	50
6.10.	Verificação da classificação dos fluxos de serviço.....	50
6.11.	Injeção de uma perturbação de 1 Megabit por segundo simulando tráfego de multisserviço.....	51

6.12.	Injeção de uma perturbação de 50 Megabits por segundo simulando tráfego de multisserviços.....	52
6.13.	Injeção de uma perturbação de 100 Megabits por segundo simulando tráfego de multisserviços.....	53
6.14.	Utilizando a análise de pacotes para a medição do atraso .....	55
6.15.	Resultado parcial.....	57
7.	ESQUEMA OTIMIZADO.....	59
7.1.	Sincronismo de tempo via IRIGB.....	61
7.2.	Montagem Rádio WiMAX.....	62
7.3.	Configuração da proporção de envio e recebimento de dados .....	64
8.	RESULTADOS OBTIDOS.....	66
8.1.	Relatório do tempo apurado nos testes.....	66
8.2.	Análise das oscilografias.....	69
9.	LTE OTIMIZADO.....	72
9.1.	Sincronismo de tempo via PTP (Precision Time Protocol IEEE-1588).....	73
9.2.	Montagem Rádio LTE.....	74
9.3.	Configuração da radio BASE.....	74
9.4.	Transportando mensagens GOOSE dentro de uma rede LTE .....	75
9.5.	Registro dos pacotes GOOSE.....	77
10.	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS .....	83
10.1.	Relatório do tempo apurado nos testes.....	83
10.2.	Quadro resumo .....	85
11.	CONCLUSÃO .....	86
12.	TRABALHOS FUTUROS.....	87
13.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	88

## 1. INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência, em especial os sistemas de distribuição, estão passando por uma mudança radical em seu projeto (Bandeira, 2012). O conceito de *smart grids* (redes elétricas inteligentes), termo desenvolvido por Amin e Wollenberg (2005), apresenta uma mudança no paradigma do setor elétrico, levando em conta a necessidade de tornar o sistema de entrega de energia mais interativo por razões que diferem em cada país ou região (Ricardo, Esposito, & Teixeira, 2013).

Atualmente, na rede distribuição as tomadas de decisões de manobra e proteção são realizadas de forma centralizada com base apenas nas informações recebidas pelo sistema SCADA (sistema de supervisão do sistema elétrico) através de protocolos verticais, como o DNP3 (protocolo de comunicação para o transporte dos dados de automação e proteção). Com a modernização dos IEDs utilizados na comutação das chaves religadoras ou comutadoras troncais, mais dados foram disponibilizados e novos protocolos de comunicação de rede foram adicionados, abrindo a possibilidade de comunicação horizontal, máquina a máquina, onde os equipamentos de proteção, espalhados ao longo da rede elétrica, podem hoje se comunicar entre si e, com isso, tomar decisões descentralizadas e mais rápidas.

De toda forma, esta comunicação descentralizada depende de uma rede rápida o suficiente para suportar o tráfego de mensagens de comunicação em um tempo adequado para cada tipo de proteção (Pothamsetty & Malik, 2009). Considerando que uma linha de distribuição está sujeita a diversos tipos de interferências e que pode percorrer longas distâncias, a utilização de fibra ótica seria a solução ideal para este tipo de transporte de informação. Porém, os altos custos de implantação e de manutenção, não justificam o investimento, em especial no modelo de negócio atual das distribuidoras de energia, onde não podem explorar sua infraestrutura para a prestação de outros serviços que não a distribuição de energia. Dessa forma, o rádio, como meio de propagação destas informações, começa a ser adotado como alternativa (ALCÂNTARA, 2012).

## 1.1. Objetivos

O objetivo desta pesquisa é investigar o comportamento e os limites da aplicação do rádio das tecnologias WiMAX e LTE como meio de comunicação para os protocolos de comunicação em uma *smart grid*, considerando os tempos necessários para atender ao protocolo GOOSE em seus diversos modelos de operação. O estudo também sugere uma configuração de classificação e priorização de pacotes através de QoS (*Quality of Service* ou Qualidade de Serviço), com o objetivo de melhorar o tempo de envio e recepção da informação, priorizando os pacotes do protocolo GOOSE de comunicação dos relés, em relação aos outros dados trafegados na mesma rede, justificando assim o investimento em redes de multisserviço.

## 1.2. Estrutura do Texto

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o tema.

O Capítulo 3 aborda os desafios da operação de uma rede de distribuição e as soluções de recomposição, seus princípios de operação e requisitos de telecomunicação e operacionais para uma solução de recuperação automática.

O Capítulo 4 contém a norma IEC 61850, sua estrutura, suas funcionalidades, necessidades de sincronismo e o protocolo de mensagens GOOSE.

O Capítulo 5 discute o padrão IEEE 802.16 (IEEE, 2009) de comunicação de rádio, denominado WiMAX, descreve seus diferenciais e sua funcionalidade em uma aplicação de distribuição de energia.

Os Capítulos 6 e 7 descrevem os ensaios realizados, os equipamentos utilizados e os dois ensaios executados para a obtenção dos dados.

No Capítulo 8 é dedicado aos resultados dos ensaios, tabelas de comparações de tempo e gráficos com os tempos de disparo.

O Capítulo 9 apresenta o padrão de rádio comunicação LTE (3GPP, 2013), as mesmas parametrizações adotadas para a tecnologia WiMAX são replicadas o a

solução é submetida aos mesmos testes anteriores, mas agora com um sincronismo de tempo mais preciso, utilizando como meio o protocolo PTP (*Precision Time Protocol*).

Finalmente, o Capítulo 10 concentra os resultados e apresenta as conclusões, propondo futuros trabalhos sobre o tema.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Existem vários trabalhos na literatura que abordam o tema da utilização do rádio como meio de comunicação para transporte de dados de proteção de redes de distribuição. Aqui serão discutidos os principais trabalhos que embasaram a pesquisa.

O trabalho desenvolvido por Reduan H. Khan, Jason Brown, Jamil Y. Khan da Universidade de Newcastle, na Austrália, aborda o tema da análise do disparo do sinal de proteção entre relés de uma rede de distribuição, através de uma rede WiMAX de multisserviços (*“Pilot Protection Schemes over a Multi-service WiMAX Network in the Smart Grid”*) (Khan, Brown, & Khan, 2013).

Neste artigo foi apresentada uma melhoria no sistema de comunicação via rádio, utilizando uma classificação de pacotes GOOSE e posterior priorização no intuito de atender aos requisitos mínimos para o funcionamento do protocolo, utilizando o esquema de priorização existente no padrão IEEE 802.16 (IEEE, 2009) e no LTE.

A pesquisa de Marcos Rosa dos Santos sobre “Metodologias para execução de manobras de paralelismo em redes aéreas de distribuição na operação de tempo real”, que aborda o conceito de manobras de paralelismo entre alimentadores aéreos primários de distribuição oferecendo algumas vantagens como o restabelecimento de cargas interrompidas, o isolamento de trechos defeituosos na rede de distribuição aérea, bem como o atendimento de serviços programados no sistema elétrico de potência, base para o estudo da necessidade real de um sistema de proteção (dos Santos, 2013).

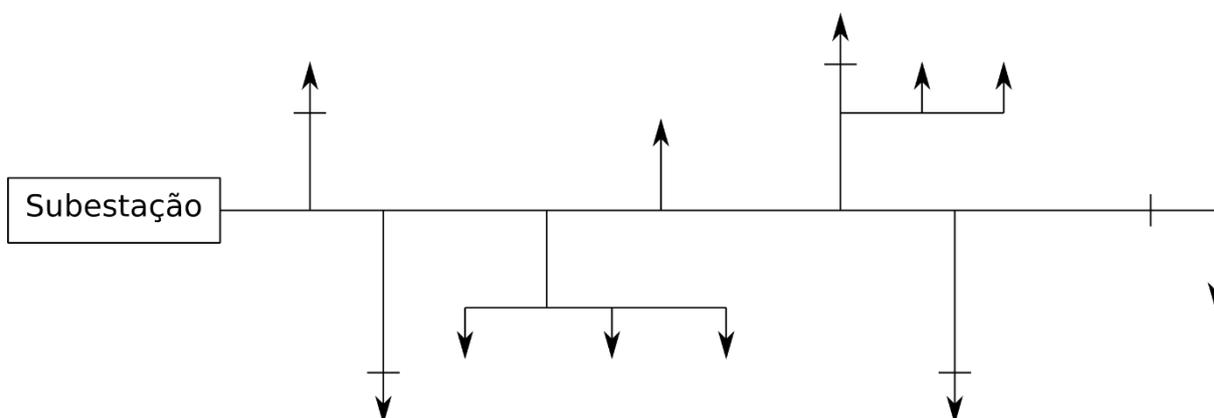
### 3. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO PROTOCOLO GOOSE

A proposta do estudo não se restringe a aplicação de recomposição de redes de distribuição, podendo ser replicado em sistemas de automação que exijam a resiliência, alta disponibilidade e baixa latência, como no caso de automação de esteiras de produção, dosagens em plantas químicas, controle de tratores autônomos em área de mineração ou irrigação de fazendas.

#### 3.1. Introdução ao conceito de recomposição automática

A maioria das interrupções de fornecimento de energia ocorre devido a falhas na rede de distribuição de média tensão. Como essas redes costumam ter topologia radial, a ocorrência de qualquer evento ou falha leva necessariamente a uma interrupção do serviço. Por isso, os sistemas radiais simples, conforme disposto na Figura 1 são utilizados em áreas de baixa densidade de carga nas quais os circuitos tomam direções distintas e sem pontos de interligação (Heldwein, 2006).

Figura 1 - Sistema radial simples.

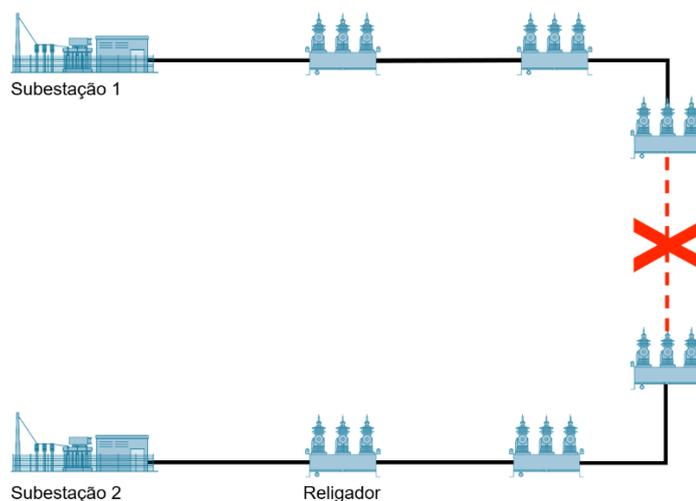


Fonte: Adaptado de (Heldwein, 2006)

Apesar disso, em muitos casos é possível transferir pelo menos uma parte da carga afetada, até que os elementos da rede sejam reparados. Esta operação pode ser realizada através da manobra de chaves e disjuntores, religando os disjuntores abertos por falhas momentâneas ou manobrando parte da carga para outros alimentadores ou subestações vizinhas. Este sistema denominado de Sistema em

Anel, tende a ser mais confiável do que os sistemas radiais simples, pois permite a alimentação dos consumidores através de duas fontes, provenientes de duas subestações ou em redundância através da mesma subestação, conforme pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 - Sistema em Anel.



Fonte: Autoria Própria

Atualmente, essa manobra de fonte de energia é feita manualmente pelo operador do sistema das distribuidoras de energia a partir do centro de operação ou, em casos mais extremos, uma equipe deve se deslocar à subestação para manobrar localmente o equipamento, o que pode prolongar o tempo de interrupção. A automação desses procedimentos permite uma diminuição substancial do tempo de restauração do serviço, conduzindo a uma melhor qualidade de serviço.

Existem formas alternativas para a recuperação da rede utilizando protocolos de comunicação serial ou intertravamento através do compartilhamento de portas analógicas e digitais, mas a dificuldade de implementação de um sistema cabeado em um ambiente metropolitano de distribuição de energia, limita a utilização destas alternativas em pontos próximos a subestação.

A norma IEC 61850, que propôs protocolos padronizados de comunicação, bem como a evolução da infraestrutura de comunicação permitiu o desenvolvimento de esquemas e algoritmos para que a rede de distribuição se torne “inteligente”, ou

seja, tenha a capacidade de se auto recuperação de forma autônoma (Gungor, et al., 2011) (Paulino, Siqueira, & A., 2010).

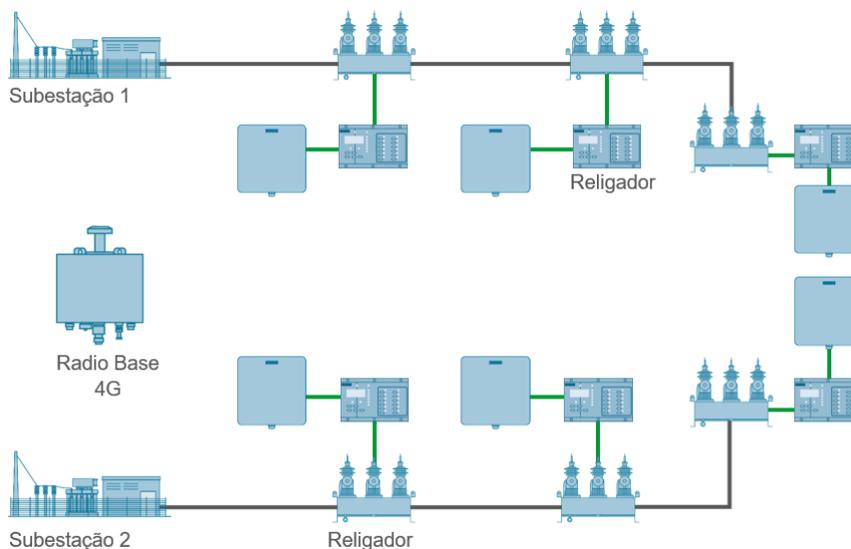
### 3.2. Requisitos de operação

A operação de auto recuperação consiste em restaurar o serviço de toda uma área afetada ou o máximo possível de seções afetadas da rede, por meio de fontes alternativas ou isolamento de áreas. Essas fontes podem incluir um barramento vizinho, um transformador ou até mesmo outra subestação, por meio de uma linha de interligação normalmente aberta. Essa operação requer, implicitamente, uma alteração da topologia da rede e, portanto, condições e requisitos especiais devem ser verificados:

- 1)A seção da rede sem serviço deve ser “limpa” de quaisquer falhas de isolamento.
- 2)A fonte alternativa também deve estar operacional e em condições de atender a nova demanda.
- 3)A interrupção do serviço não deve ter sido causada pela ação do operador do sistema.
- 4)É necessário garantir que qualquer ação realizada pela automação não crie *loops* dentro da rede, o que compromete sua topologia radial.
- 5)Em garantia do requisito anterior, é necessário garantir que cada um dos setores esteja conectado a apenas uma fonte. Se mais de uma fonte de *backup* estiver conectada a topologia radial é prejudicada.
- 6)Dentro da subestação existem vários automatismos trabalhando simultaneamente, e os eventos que os acionam podem ser considerados aleatórios. Portanto, a fim manter a segurança da operação, é necessário garantir que qualquer manobra de equipamento, só ocorra se todos os automatismos operando naquele equipamento concordarem entre si e que a operação final só inicie após todos os automatismos concluírem sua ação.

A Figura 3, a seguir, ilustra um sistema de recuperação e a comunicação entre os equipamentos envolvidos.

Figura 3- Esquema de proteção.



Fonte: Autoria própria

Os três primeiros requisitos são atendidos através da análise dos eventos que levaram à queda de energia.

Para os requisitos 4 e 5, a solução requer o conhecimento da topologia de rede atual, ou seja, após a falta de energia. Embora a topologia estática seja conhecida (dado pelo diagrama unifilar), a topologia dinâmica precisa levar em conta a transferência da carga para outro ramal e a adequação que este ramal precisa fazer em sua proteção para receber esta manobra.

### 3.3. Recuperação da Rede

Após a ocorrência de um incidente na rede, o trecho defeituoso é permanentemente isolado pelas respectivas funções de proteção do religador. Em redes radiais, isso implica que uma parte da rede é deixada desenergizada. Se tal situação é detectada e se os outros pontos da rede estão sem falhas (ou seja, se todas as funções de proteção que supervisionam esse elemento concordarem), o automatismo de restauração inicia sua ação, que inclui as seguintes etapas:

- 1) Avaliação dos nós sem tensão;
- 2) Análise de topologia de rede - como os nós não energizados estão conectados;

- 3) Seleção da fonte alternativa para manobra;
- 4) Fechamento da chave *vis-à-vis*;
- 5) Alteração dos grupos de proteção do circuito usado como *backup*.

Um dos principais objetivos da próxima geração de *smart grid* é fornecer energia confiável aos seus clientes usando mecanismos avançados de proteção e controle na rede de distribuição. A futura rede elétrica precisa suportar um grande número de geradores de energia renovável, que requerem uma rede de distribuição totalmente em anel, para lidar com o fluxo de energia bidirecional que varia com o tempo ou demanda.

Tais esquemas de proteção requerem um canal de comunicação que possa suportar a transmissão destes dados de forma confiável e dentro de um limite de atraso restrito (Hunt, 2008). Assim, um dos principais desafios na implantação de esquemas de proteção auto recuperável está em garantir um meio de comunicação que seja rápido, confiável e que atenda a determinadas métricas de desempenho.

Nos últimos anos, a comunicação entre dispositivos inteligentes dentro de subestações foi padronizada através do padrão GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Event*) baseado na IEC 61850, que pode operar sobre as redes Ethernet comercialmente disponíveis. Mais recentemente, a funcionalidade de roteamento IP (Internet Protocol) foi incorporada ao padrão GOOSE com base no relatório técnico IEC 61850-90-5 para facilitar a troca de informações entre diferentes sub-redes IP usando técnicas *unicast* e *multicast*. Este documento é focado na transmissão de dados de sincrofasores, mas pode ser aplicado nas mensagens GOOSE em geral.

Este avanço, importante na comunicação entre subestações, abre o caminho para o uso de uma rede de comunicações inteligente e integrada baseada em IP, para funções avançadas de proteção e controle em redes de distribuição.

Enquanto as redes de telecomunicações convencionais são otimizadas para suportar multisserviços de multimídia, como voz sobre IP (VoIP), *streaming* de mídia e navegação na *web*, os requisitos de tráfego para aplicações *Machine to Machine*

(M2M), como os equipamentos de proteção da distribuição de energia, são bem diferentes. No caso de aplicações multimídia, embora seja importante garantir o QoS adequado, a comunicação entre máquinas ou computadores, exigem entrega confiável da mensagem dentro de um limite de atraso restrito, pois atuam como pontos de acionamento dos sistemas de proteção e controle subjacentes. Estes limites de latência e confiabilidade determinística da entrega dos pacotes, poderão também ser explorado na tecnologia 5G, levando em conta que com o ganho de velocidade teremos o ônus da perda de distância de cobertura da célula de rádio.

Estas mensagens críticas contêm um campo Tempo de vida (*Time to Live = TTL*) que implica que a mensagem perderá sua relevância se não for entregue dentro do tempo especificado. Assim, o seu desempenho tem de ser medido em termos objetivos (por exemplo, taxa de sucesso de entrega de mensagens) contra um conjunto de atributos de QoS pré-definidos, tais como atraso e perda de pacotes. Para tais aplicações, o principal desafio para a rede de comunicação sem fio é alocar recursos de rádio de maneira eficiente entre diferentes classes de tráfego, de modo que seus requisitos de QoS de ponta a ponta sejam atendidos (Sanders, 2010).

### **3.4. Redes de Telefonia Pública em soluções de missão crítica**

Soluções compartilhadas de operadoras de telefonia em 2G/3G/4G, seriam a opção mais econômica e de rápida implementação para as concessionárias. Entretanto, a rede se mostra inadequada para a aplicação e necessidade, visto que as redes de dados das operadoras não garantem disponibilidade de sinal ou mesmo de latência para a aplicação em larga escala das redes inteligentes. A disponibilidade da rede 3G/4G não atende aos quesitos mínimos para uma aplicação em massa e deve se restringir a uma rede complementar, na qual outras tecnologias se demonstrarem inviáveis economicamente (Markkula & Haapola, 2013).

Por conta das características das aplicações de *smart energy* necessitarem de uma quantidade de dados massivos para controle dos equipamentos e o recebimento das informações de medição e relatórios, há uma tendência para que todas as

concessionárias de distribuição de energia elétrica tenham suas redes próprias de telecomunicação, desenhadas para atender equipamentos de campo, como religadores, chaves automatizadas, controles de bancos de capacitores e *gateways* de medição (Markkula & Haapola, 2013).

Outro fator importante é a necessidade de comunicação direta entre as máquinas e a utilização de protocolos de camada 2 do modelo OSI (*Open Systems Interconnection*), como o caso do IEC 61850, que não são propagados por redes públicas ou rádios de banda estreita. Na Figura 4 tem-se um exemplo de instalação do rádio acoplado ao painel de controle de um religador.

*Figura 4 - Montagem no poste de um religador.*



Fonte: Autoria Própria

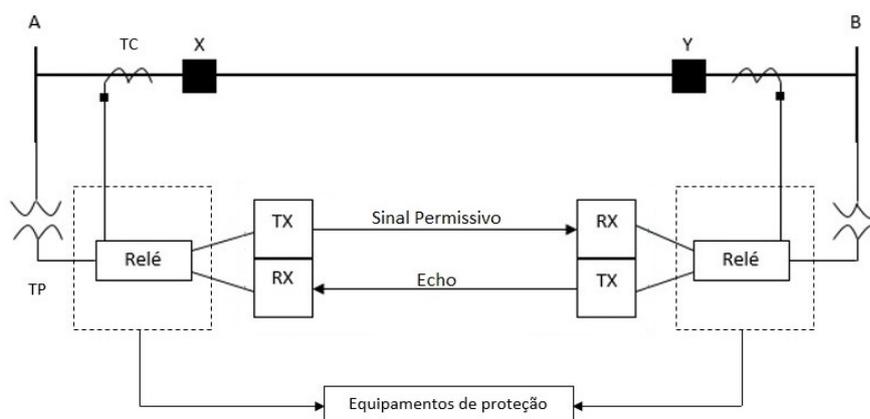
Apesar de existirem aplicações muito bem-sucedidas com a utilização de modems em redes públicas de telefonia no monitoramento de equipamentos de rede de distribuição, o sistema de proteção de autocorreção tem características exclusivas, que notoriamente devem ser levadas em conta na adoção de uma nova infraestrutura em larga escala. A adoção de rádios em banda estreita certamente atendeu uma demanda inicial das concessionárias, que era o acesso aos religadores e a necessidades de integrá-los ao sistema SCADA. Porém, trata-se de um investimento limitado a essa aplicação, sendo que o grande custo de um projeto dessa monta está ligado à instalação em campo dos equipamentos. Ou seja, a adoção de uma tecnologia que possibilite outras aplicações em um futuro breve,

mesmo com um custo superior, se comparado a rádios de banda estreita, demonstra ser a melhor opção pois sua longevidade e flexibilidade de crescimento se justificam.

### 3.5. Modelo de aplicação e requisitos de tráfego

Sob um esquema de proteção da distribuição, o relé interno ao religador mede a tensão e a corrente nos seus próprios terminais para calcular a impedância de uma falta a jusante, montante ou reversa, causada pela geração de energia distribuídos em seus consumidores (International Energy Agency, 2002). Esta informação é então trocada entre os relés na forma de uma mensagem GOOSE. Todos os equipamentos da rede recebem a mesma informação, mas somente os relés envolvidos na proteção daquele trecho tomarão ações a partir dela. Quando ocorre uma falha, cada relé envia um sinal ao seu interlocutor remoto com base no tipo de esquema de proteção utilizado, permitindo o disparo permissivo em ambos os relés. O disparo permissivo é descrito em (Santos, et al., 2019) e pode ser exemplificado no esquema de coordenação de relés da Figura 5, onde um dos relés localizados em um dos terminais irá detectar a falta com sua função de sobrealcance e transmitir o disparo para o outro terminal. Feito isso, o outro relé que recebe o sinal, ao detectar a falta, abre o seu disjuntor e devolve o sinal de abertura para o terminal inicial, que irá igualmente operar.

Figura 5 - Esquema de transferência permissiva de disparo por sobrealcance.



Fonte: (Santos, et al., 2019)

De acordo com (Santos, et al., 2019, p.3)

“Nesse cenário, onde ambos relés precisam ser sensibilizados pela falta e se comunicarem, é de suma importância a garantia de integridade do canal de comunicação. Caso o canal de comunicação esteja inoperante esse esquema não funcionará corretamente.”

Assumindo que esta troca de informação ocorre sobre uma rede IP através de mensagens GOOSE, o principal requisito é que a mensagem seja enviada o mais rápido possível. Isso é importante porque a operação dos interruptores ou disjuntores participantes da rede de auto recuperação é diretamente afetada pelo atraso na rede. Assim, quanto menor o atraso de comunicação, mais rápido o esquema de proteção irá operar. De acordo com a pesquisa de (Hunt, 2008) considerando o tempo de operação dos relés digitais de alta velocidade (menor que 5 ms), uma mensagem GOOSE de proteção deve sofrer atraso na ordem de 25-30 ms para trafegar em uma rede de telecomunicação, onde uma rede de telecomunicação não pode incrementar este atraso para números superiores a 100 ms, ao custo de tornar descartável o pacote enviado.

#### 4. PADRÃO IEC 61850

O padrão de comunicação internacional para dispositivos dentro de um ambiente de subestação conhecido como a norma IEC 61850 da Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC) contribuiu imensamente à forma como a comunicação e troca de informações são implementadas dentro de uma subestação elétrica. Este novo padrão de comunicação visa assegurar, entre outras coisas, interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fornecedores.

Os relés microprocessados modernos não são mais meramente dispositivos de proteção do sistema de potência, mas evoluíram para realizar muitas outras funções que facilitam a efetiva operação de sistema. Eles incluem rotineiramente a medição, proteção, automação, controle, registro digital de falhas e relatórios. Por causa disso, agora é mais correto se referir a esses dispositivos microprocessados como dispositivos eletrônicos inteligentes (*intelligent electronic devices* ou IEDs). Como os IEDs substituem relés eletromecânicos, a quantidade de dados gerada e disponíveis nas subestações aumentou exponencialmente.

Algumas décadas atrás, os sistemas de controle de supervisão e aquisição de dados (SCADA) integravam informações de estações de geração e subestações por meio de unidades terminais remotas (UTRs) para fornecer aos operadores as informações de todo o sistema, para assim planejar e operar o sistema de energia. Esses sistemas de UTRs e SCADA normalmente usavam transdutores e acopladores que eram separados dos sistemas de proteção para adquirir informações do sistema.

Nos sistemas baseados em UTRs, a atualização de informações pode ser bastante lenta, na ordem de vários segundos. Atualmente, os IEDs da subestação executam mais funções de automação e controle, em um tempo muito menor. Quase todas as informações exigidas pelos operadores do sistema estão disponíveis a partir desses dispositivos, que hoje estão interconectados. Essas redes IED de subestações reduzem ou eliminam transdutores adicionais, contatos de entrada e saída e até RTUs.

Para acomodar estas novas funções dos IEDs, a infraestrutura atual de comunicações de subestações também teve que se adaptar. As comunicações de rede dos relés da subestação tiveram que migrar para interfaces Ethernet. Os sistemas de integração de subestação anteriores eram frequentemente baseados em comunicação ponto-a-ponto RS232 ou multiponto RS485. Essas portas se comunicam a uma velocidade igual ou inferior a 100 kilobits por segundo (kbps) e os protocolos de comunicação, como o DNP3 ou Modbus, eram baseados em registros e endereços. Com o padrão IEC61850 aplicado nas redes Ethernet, todo o modelo de comunicação foi mudado.

Além de muitas funções de integração cliente-servidor, automação e controle, o padrão IEC 61850 inclui dois métodos de comunicação ponto a ponto em tempo real que são particularmente úteis para engenheiros de proteção: mensagens *Generic Substation Event* (GSE) e *Sampled Values* (SV). Os dois tipos de mensagens GSE, evento de subestação orientado a objeto (*Generic Object-Oriented Substation Event*, GOOSE) e evento de estado (*Generic Substation State Event*, GSSE), podem coexistir, mas não são compatíveis. O GSSE é um tipo de mensagem com dados binários, já a mensagem GOOSE é mais flexível, pois transmite dados binários e analógicos. Esses mecanismos de comunicação *peer-to-peer* permitem que haja uma revolução nos esquemas tradicionais de proteção e controle, reduzindo os custos de projeto, instalação, comissionamento, operação e manutenção do sistema e, ao mesmo tempo, aumentando sua confiabilidade.

#### **4.1. Sincronismo de tempo**

O sincronismo de tempo entre os equipamentos é um problema importante enfrentado nos sistemas de proteção e controle. Embora o sincronismo de tempo baseado GPS seja amplamente utilizado, a utilização via rede Ethernet com o protocolo SNTP (*Simple Network Time Protocol*) não fornece precisão suficiente para os sistemas de proteção, pois tem uma precisão de 1 milissegundo somente.

Em sua maioria, a precisão de tempo de uma subestação é baseada em GPS com barramento dedicado IRIG-B. Uma rede IRIG-B dedicada tem a vantagem de manter o sincronismo de tempo durante uma falha de rede Ethernet, por outro lado sua

construção física, baseada em cabo coaxial, limita sua utilização à sistemas internos da subestação, não podendo ser estendida a proteções externas como no caso da distribuição de energia. Já o perfil IEEE 1588 de sincronismo de tempo pode ser estendido em grandes redes, fornecendo maior precisão mesmo utilizando redes Ethernet, pois possibilita aos equipamentos de rede envolvidos na transmissão da informação, uma recalibração do tempo perdido para a transmissão do dado ao passar pelos meios físicos do caminho, chegando à precisão de microssegundos.

## 4.2. Mensagens GOOSE

A troca de mensagens GOOSE pode servir para várias aplicações diferentes, cada uma com diferentes requisitos de desempenho.

A IEC 61850 classifica os tipos de mensagens com base na rapidez com que elas precisam ser transmitidas entre os IEDs em rede, conforme Tabela 1 (International Electrotechnical Commission, 2005). Como o GOOSE não opera na camada de transporte do modelo OSI, não há requisição de confirmação de recebimento ou verificação de erro. Por esta característica, conseguem apresentar desempenho equivalente à transmissão elétrica da informação.

Tabela 1 - Requisitos de tempo para cada tipo de mensagem.

TIPO	CLASSE	ORIGEM	DESTINO	TEMPO (ms)	DESCRIÇÃO
1A	P1	IED	IED	10	Trip, bloqueios e seletividade
1B	P2	IED	IED	100	Outras mensagens rápidas
2		IED	IHM	100	Eventos, alarmes e status
3		IED	IHM	500	Parâmetros MMS
4		IED	IHM	3	Sample Values Instrumentos TP / TC
5		IHM	IED	1000	Arquivos de configuração
6	T1	STIM	IED	1	Mensagens de sincronização
7		IHM	IED	500	Comandos do sistema SCADA

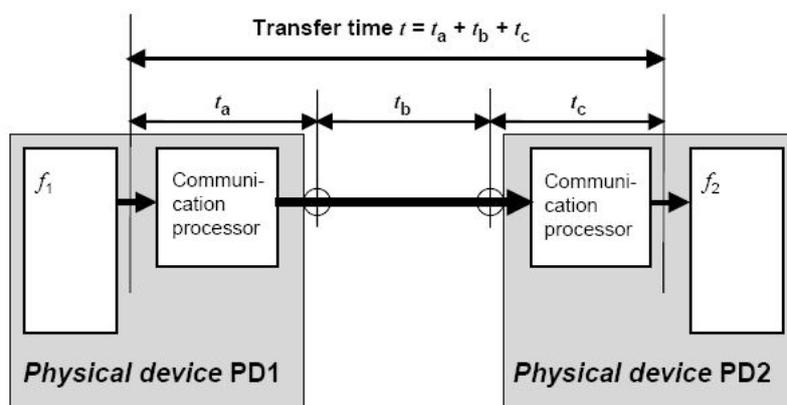
Fonte: IEC 61850 (International Electrotechnical Commission, 2005)

De acordo com a norma IEC 61850, as mensagens rápidas 1A e 1B são as mais importantes, pois precisam ser entregues o mais rápido possível, momento em que os equipamentos avisam aos outros que o disjuntor foi aberto. As mensagens de medição de transformadores de corrente e tensão são enviadas em formato *Sample*

*Value* (SV) com classificação de tempo tipo 4, pois precisam ser entregues em no máximo 3 milissegundos. O padrão de comunicação IEC 61850 exige que a precisão da sincronização de tempo seja dez vezes mais rápida do que a precisão necessária para proteção, por isso o sincronismo de tempo através entre os equipamentos, precisa respeitar o requisito de desempenho da mensagem Tipo 6, que determina uma latência máxima de 1. No presente estudo foram levados em consideração os limites impostos pelas mensagens de TIPO 2 e 7, que tratam da troca de mensagens e dos comandos enviados pelo sistema SCADA, limitados respectivamente em 100 e 500 milissegundos.

O tempo de transmissão especificado na coluna de requisitos da Tabela 1 é o tempo máximo permitido para intercâmbio de cada tipo de mensagem. Este tempo é determinado como o intervalo de tempo entre a ação do processamento lógico no IED fonte e o processamento da informação dentro do IED receptor. Como ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Tempo de envio e processamento lógico.



Fonte: IEC61850, Communication networks and systems in substations (International Electrotechnical Commission, 2005)

As mensagens GOOSE são mensagens rápidas que geralmente informam dados binários simples e duplos destinados para proteção e controle e em alguns casos, valores analógicos. Essas mensagens GOOSE são mapeadas dentro da transmissão Ethernet usando classificadores *Ethertypes*, com isso pode-se identificar estes pacotes em meio aos outros e assim classificar e priorizar a

transmissão a recepção, reduzindo sua latência. Devido à natureza *multicast* do *Ethertype* e o design Ethernet, as mensagens não recebem confirmação de entrega do IED de destino, fazendo que os dispositivos que compõem a rede sejam responsáveis pela retransmissão do pacote em caso de perda. Devido à falta de uma camada de endereçamento (que foi removida para simplificar e ser gerenciada em uma camada OSI menor), a mensagem GOOSE também não pode ser roteada por meio de uma WAN, apenas dentro de uma LAN porque o endereço de rede é um endereço de grupo de mensagens e não um endereço IED específico. Isso cria desafios de arquitetura de rede quando as mensagens de proteção precisam ser transferidas entre subestações. Esse comportamento caracteriza que cada IED é responsável por sobreviver à perda de mensagens, atraso, entrega fora de ordem e perda de conectividade, portanto a lógica de cada IED deve ser capaz de prever e contornar estas circunstâncias.

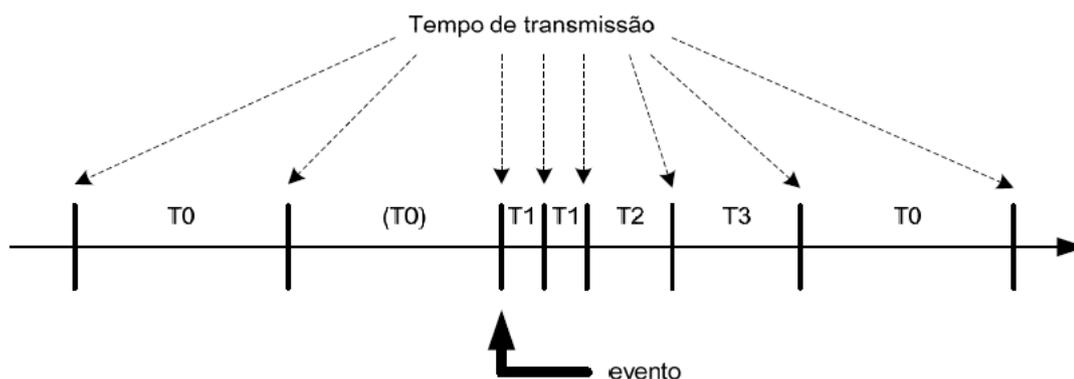
A IEC 61850-8-1 também especifica um esquema de retransmissão para atingir um nível confiável de entrega de mensagens. A Figura 7 mostra este mecanismo de retransmissão de mensagens GOOSE.

Uma vez iniciadas, as mensagens GOOSE são publicadas constantemente, contendo uma coleção de dados, binários ou analógicos, denominada *dataset* (conjunto de dados). Durante a configuração, cada mensagem GOOSE recebe um parâmetro de tempo máximo *mt* (*maintenance time* ou tempo de manutenção) para aguardar entre as publicações da mensagem, bem como o nome do conjunto de dados a ser incluído na mensagem. As mensagens são publicadas sempre que um dos elementos do conjunto de dados é alterado ou quando o *mt* expira. Depois que um elemento do conjunto de dados é alterado, o tempo de transmissão (*tot*) entre as mensagens é muito curto (4 milissegundos), ou seja, as mensagens são enviadas com muita frequência para aumentar a probabilidade de que todos os assinantes as recebam em toda a Ethernet não determinística. Após as primeiras publicações rápidas, o *tot* cresce mais até atingir o *mt*.

Quando um novo evento de *dataset* ocorre (nesse caso, uma mudança binária de estado ou um analógico ultrapassando uma banda morta), uma nova mensagem é criada e publicada. A nova informação de evento é transmitida e repetida no menor

$tot$  ( $T1$ ), como mostrado na Figura 7. O tempo de retransmissão aumenta gradualmente de  $T2$  para  $T3$  e eventualmente se estabiliza em um tempo de retransmissão estável,  $tot = T0 = mt$ . Esse tempo de retransmissão estável é reduzido quando o próximo novo evento ocorre.

Figura 7 - Esquema de retransmissão Mensagens Goose.



Fonte: IEC61850, Communication networks and systems in substations (International Electrotechnical Commission, 2005)

#### 4.3. IEEE 801.2Q – Priorização e classificação de pacotes VLAN

As mensagens GOOSE do IEC 61850 são especificadas como mensagens *multicast*. Quando um IED recebe uma mensagem GOOSE, ele precisa decodificar a mensagem e verificar se o pacote o tem como destinatário. Mensagens *multicast* em uma rede Ethernet aumentam o tráfego da rede, pois quando um *switch* recebe tal mensagem, ele a encaminha para todas as portas, exceto aquela da qual recebeu a mensagem; com isso, um grande número de mensagens preenche rapidamente toda a largura de banda de rede disponível. Uma das tecnologias adotadas para aliviar a carga da rede é a segregação de redes virtuais (VLAN).

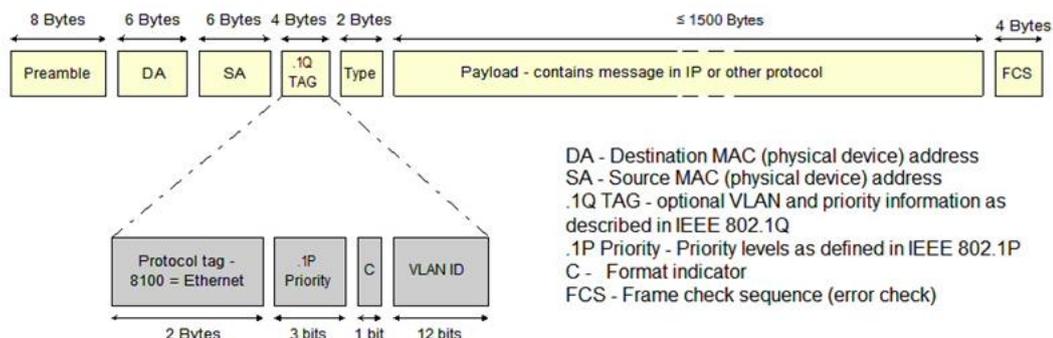
O IEEE estendeu o padrão Ethernet 802.1 com o designador Q para qualidade de mensagem, que inclui extensões para VLAN e priorização de mensagens. A IEEE 802.1Q (IEEE, 2006) VLAN divide uma rede fisicamente conectada em várias LANs virtuais. As VLANs se originaram da necessidade de segregar o tráfego de rede de diferentes departamentos dentro de uma empresa. Mantendo as informações confidenciais privadas, as técnicas de VLAN restringem o fluxo de tráfego de

mensagens *multicast* / *broadcast* para uma única VLAN individual e, portanto, aos dispositivos dentro dela.

Outra técnica utilizada para reduzir o congestionamento de rede causada por mensagens *multicast* / *broadcast* é usar a marcação de prioridade por IEEE 802.1P. A Figura 8 mostra a *tag* VLAN / prioridade em um *frame* Ethernet. Quando há um pacote de transmissão em um *switch*, ele examina a prioridade dos pacotes através da verificação do *tag* e transmite primeiro os *frames* com prioridade mais alta. Isso garante maior segurança e confiabilidade no recebimento das mensagens críticas em relação ao resto das mensagens de prioridade baixa.

O padrão IEC 61850-8-1 especifica que as mensagens GOOSE padrão devem ter um nível de prioridade igual a 4. Podendo ser escolhido pelos projetistas de redes e engenheiros de proteção, qualquer valor entre 0 e 7, para separar as mensagens GOOSE por ordem de importância.

Figura 8 - Ethernet VLAN e priorização de pacotes.



Fonte: IEEE 802.1Q, Prioridade emu na rede Ethernet VLAN (IEEE, 2006)

## 5. IEEE 802.16 REDE SEM FIO WiMAX

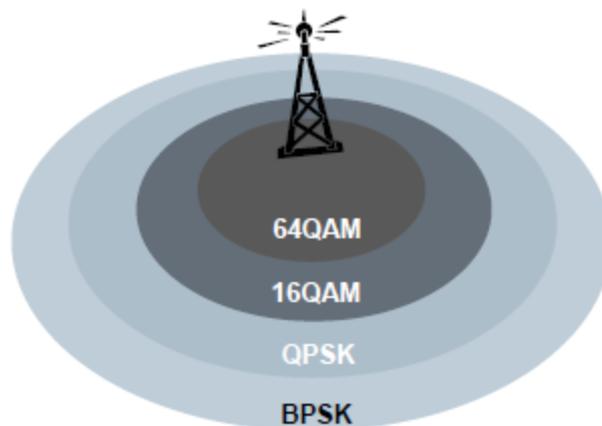
Descrito pelo padrão IEEE 802.16, o WiMAX (IEEE, 2009) é conhecido como uma solução sem fio para o acesso de *broadband wireless* e também como um padrão a ser utilizado em regiões metropolitanas com tecnologia sem fio (WMAN – *Wireless Metropolitan Area Network*). Porém, sua utilização não se restringe às áreas metropolitanas, podendo ser utilizada como WLAN (como *hotspot*), WWAN (como interconexão em uma cidade ou até mesmo *backbone*). A proposta inicial do padrão é a disponibilização de acesso à banda larga em maiores distâncias, visando ser uma forma mais econômica em relação ao uso de tecnologias com fio. Além disso, desde o início pensou-se em tornar global este padrão, para ser interoperável com os padrões ITU (International Telecommunication Union) e ETSI (European Telecommunication Standard Institute).

Da mesma forma que surgiu o Wi-fi Alliance para o padrão 802.11, surgiu uma organização sem fins lucrativos chamada de WiMAX FORUM (Forum, 2021), que é formada por fabricantes de equipamentos e componentes que promovem o padrão pelo mundo. As empresas Siemens Mobile, Hitachi, Samsung, Panasonic são alguns membros do fórum além do representante brasileiro CPqD (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações).

Um das grandes inovações que a tecnologia WiMAX trouxe ao mercado foi a modulação adaptativa, conforme a Figura 9. O sistema WiMAX pode se adaptar de acordo com a distância entre a estação base e o cliente, velocidade ou a condição do canal. Quando a condição do canal é boa perto da estação base, ela se adapta reservando, para o cliente em questão, uma modulação de maior ordem e, portanto, uma maior velocidade de transmissão, podendo em alguns casos baixar a potência de transmissão ou recepção dos pares. Os clientes com baixa qualidade de sinal podem trabalhar com modulações de menor ordem, garantindo uma maior qualidade de sinal em troca de uma baixa velocidade. Nos casos de mobilidade, onde o cliente está em movimento e se afastando da estação radiobase (ERB), esta função verifica a qualidade do sinal a cada troca de mensagens e reavalia a modulação pertinente e

mais segura para cada situação, levando em consideração a qualidade de transmissão e recepção.

Figura 9 - Modulação adaptativa.



Fonte: IEEE 802.16, Modulação (IEEE, 2009)

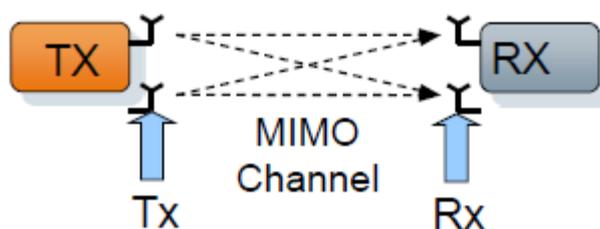
As estações base se conectam ao *backbone* das distribuidoras e, na maioria dos casos, estão instaladas em torres nas subestações. Uma estação base pode prover cobertura para mais de 100 rádios clientes ou assinantes CPE (*Customer Premise Equipment*), com boa qualidade de sinal. Para aplicação em proteção, são previstas de 20 a 30 CPEs para cada estação base. O estudo de planejamento de rádio determina os pontos ideais para se instalar a estação base, visando a cobertura do maior número possível de CPEs.

Como a rede WIMAX atende a “clientes” diferentes, cada qual tem sua necessidade de velocidade e prioridade na rede. As estações base WiMAX são roteadores de dados e, portanto, possuem QoS (*Quality of Service*), o que permite configurar quais serviços serão prioritários dentro da banda disponível. Religadores e indicadores de falta, por exemplo, demandam bandas estreitas, cerca de 100 kbps (Kuzlu, Pipattanasomporn, & Rahman, 2014). Contudo, nesses casos, o mais importante realmente é a disponibilidade da rede, pois esses equipamentos precisam reportar falhas na rede para o centro de operação, através de mensagens não solicitadas. Essas informações devem ser prioritárias em relação aos dados de medição, por exemplo. Comandos remotos a chaves e disjuntores também devem ser prioritários e a rede deve ser estruturada e pensada para tal.

Para melhorar a qualidade do sinal e permitir um melhor alcance e taxas de transmissão em pontos sem visada ou em redes metropolitanas, o padrão WiMAX usa a tecnologia MIMO. MIMO significa *multiple input / multiple output* e refere-se à tecnologia em que há várias antenas na estação base e várias antenas no dispositivo móvel, conforme a Figura 10. A implementação do MIMO também dá ao WiMAX um aumento significativo na eficiência espectral.

A configuração MIMO 802.16 é negociada dinamicamente entre cada estação base e estação móvel, sendo classificada em MIMO A, quando as informações são transmitidas em duplicidade por duas antenas, aumentando a recepção da informação para a estação remota que está muito distante e o MIMO B, quando mais de uma informação é transmitida por cada antena, duplicando a velocidade de recepção da estação remota que está muito próxima. A especificação 802.16 suporta múltiplas estações móveis com diferentes capacidades MIMO, cada estação remota pode negociar informação com a rádio base, de acordo com a qualidade do sinal recebido ou a necessidade de velocidade da informação. Isso ajuda a maximizar o rendimento do setor, aproveitando os diferentes recursos de um conjunto diversificado de estações móveis.

Figura 10 - Multiplexação de antenas para ganho de velocidade.



Fonte: IEEE 802.16, Multiplexação (IEEE, 2009)

O perfil otimizado do padrão WiMAX inclui novos recursos, permitindo a priorização de *uplink*, dando menor latência aos serviços de automação em novas faixas de frequência compatíveis com as faixas utilizadas por concessionárias, sendo elas 1.5 GHz, 2.3 GHz, 3.5 GHz e 5.8 GHz.

## 5.1. Transportando proteção sobre WiMAX

Embora um esquema de proteção exija a troca de mensagens *peer-to-peer* entre dois ou mais relés, em um ambiente sem fio celular como o WiMAX, todos os pacotes de dados precisam transitar pela estação base (BS). No entanto, a BS só agirá como um retransmissor transparente para os pacotes de dados de entrada e os roteará para os destinos pretendidos sem qualquer processamento de camada de aplicação. Como a radiobase precisa tratar os pacotes de mensagens que são enviadas para os equipamentos de campo de forma diferente de como recebe dos mesmos, pois cada rádio remoto pode ter uma qualidade de sinal diferente para a recepção e transmissão, cada mensagem GOOSE é canalizada a uma interface de recebimento *uplink* (UL) do relé de origem à BS e a uma interface de *downlink* (DL) da BS ao relé de destino.

Para comportar os múltiplos serviços com diferentes necessidades e importância, dentro de uma rede de rádio que varia sua cobertura e velocidade ao longo do dia, por conta de perturbações como temperatura, umidade do ar e interferência do espectro, precisa-se criar um sistema de classificação de pacotes para priorizar os serviços de proteção da rede e liberar recursos para os serviços que não demandam latência, mas transportam grandes pacotes. Os rádios WiMAX são capazes de atuar na rede como *switches* gerenciáveis, respeitando a classificação de pacotes oriundos da rede central, e devolver estes pacotes classificados para a rede de roteadores. Assim, a separação e a prioridade são respeitadas por todo o caminho.

Conforme especificado no padrão IEEE 802.16, a classificação de pacotes da BS fornece alocação de recursos de rádio para as conexões UL e DL. De acordo com (IEEE, 2009), diferentemente das conexões DL, as informações de requisitos de largura de banda são distribuídas nas estações de assinantes (CPE) para as conexões UL. Portanto, um mecanismo de solicitação é requerido pelas CPE para indicar à BS suas necessidades de largura de banda. Para alocação de largura de banda UL, o classificador de pacotes da BS separa cada conexão com base em um conjunto particular de atributos de QoS (por exemplo, taxa de transferência, latência e variação) usando um ID de fluxo de serviço (SFID) exclusivo. Para facilitar o compartilhamento de recursos de rádio entre diferentes usuários, o padrão IEEE

802.16 define cinco serviços de agendamento ou classes de QoS, descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Tabela de agendamento de Serviços do WiMAX.

Classe de Serviço	Detalhes	Características
<b>Unsolicited Grant Service (UGS)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicações em tempo real</li> <li>• Taxa de transmissão fixa</li> <li>• Banda sempre alocada mesmo sem demanda</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Banda sempre disponível para aplicações em tempo real</li> <li>• Voice over IP (VoIP) ou Linha Dedicada</li> </ul>
<b>Real time Polling Services (rtPS)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicações em tempo real</li> <li>• A banda precisa ser solicitada</li> <li>• Banda mínima e duração podem ser garantidos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicações em tempo real com banda variável</li> <li>• Vídeo</li> </ul>
<b>Extended real time Polling Services (ertPS)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Banda reservada como o UGS</li> <li>• A Banda pode ser liberada e novamente alocada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Serviços de tempo real com banda variável</li> <li>• Voice over IP (VoIP) com supressão de silêncio</li> </ul>
<b>Non real time Polling Services (nrtPS)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alocação de banda sob demanda</li> <li>• Sem banda mínima e tempo de resposta garantidos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Serviços não-críticos</li> <li>• FTP</li> </ul>
<b>Best Effort (BE)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sem garantia de qualidade</li> <li>• A transmissão é feita quando há recursos disponíveis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• E-Mail</li> </ul>

Fonte: IEEE 802.16, Agendamento de Serviços (IEEE, 2009)

#### • UGS - Unsolicited Grand Service

Utilizado em aplicações com taxa de bits constante, garante a banda para os pacotes mantendo a latência baixa e alta confiabilidade de entrega. Assim, foi selecionado este modo de prioridade para o controle dos pacotes gerados e direcionados para a aplicação de monitoramento dos indicadores de falta, visto que o sistema precisa de uma baixa latência e seus pacotes são pequenos e constantes. Este classificador é o mais indicado para a proteção da rede de distribuição, pois prioriza seus pacotes em relação ao sistema de controle, visto que seus dados enviados sem solicitação precisam da maior prioridade e são muito sensíveis a latência, sendo que alguns sistemas de proteção precisam tomar decisões rápidas no caso de uma falta de energia ou curto-circuito. Também aloca um espaço fixo para o recebimento de mensagens não solicitadas, com isso mantém um tempo

constante entre as mensagens e uma priorização uniforme em relação aos outros classificadores.

- **rtPS - Real Time Poling Service**

É utilizado em aplicações de taxa de bits variável que necessitam de baixa latência e confiabilidade de entrega, mantendo uma média de 100ms de latência. Este tipo de prioridade foi configurado para os pacotes da aplicação de Controle da Automação das câmeras subterrâneas e banco de capacitores, visto que são gerenciados por sistemas distintos que possuem taxa de bits diferente, mas são sensíveis a latências e seus sistemas aguardam a resposta dos comandos.

- **ertPS - Extended rsPS**

Quando se faz necessária uma priorização de pacotes para manter uma latência menor que 100ms e ao mesmo tempo uma alta confiabilidade, utiliza-se o Extended Real Time Polling Service como classificador do pacote, pois assim é possível garantir a melhor prioridade possível em relação aos outros serviços, associando aos pacotes uma banda fixa.

- **nrtPS - Non-real time polling Service**

O nrstPS foi desenvolvido para aplicações que não precisam da informação em tempo real e são mais flexíveis quanto a latência, mas precisam de prioridade em relação aos outros serviços que necessitam de muita banda, sem se preocupar com o atraso na entrega. Na configuração da radiobase, esta classificação foi utilizada para os pacotes não definidos, como no caso dos controles e gerência da rede, os pacotes de requisição de informação e para os sistemas proprietários que não necessitam prioridade em relação aos controles da proteção, mas que mesmo assim precisam de uma latência menor do que utilização para a medição inteligente.

- **B E - Best Effort**

Serviço com mínima prioridade, sem a preocupação com latência e com guarda de velocidade é utilizado para o transporte de grandes arquivos ou informações que não precisem de confirmação de recebimento. Neste, foi classificado com BE as aplicações de Automação de frota ou viaturas e a medição inteligente nesta priorização, visto que não são sensíveis ao atraso de entrega de pacotes e que a latência não é impactante.

Tradicionalmente, essas classes de QoS foram projetadas para suportar várias aplicações de multimídia. No entanto, as mensagens GOOSE são acionadas aleatoriamente ou após um evento de falha, tendo como base que a ocorrência da falta na rede de distribuição é um fenômeno aleatório causado por vários fatores externos, como tempestades, incêndios florestais, raios queda de árvores sobre linhas de distribuição.

Uma linha de distribuição pode ficar sem falhas por dias e até semanas, mas quando ocorre a falha, precisa de uma alocação dedicada para o envio prioritário do pacote de mensagem de proteção. Portanto, estratégias de escalonamento não persistentes, como rtPS, ertPS e nrtPS, que não alocam subsídios de dados periódicos para os clientes, não são adequadas. Isso deixa ao gerente da rede duas opções de configuração - o esquema BE, que usa mecanismo de solicitação de largura de banda com base em acesso aleatório (BW-REQ) para suportar transferência de dados em rajadas e o esquema UGS. Esta classificação foi utilizada na configuração da radiobase, para a classificação dos pacotes grandes que não são sensíveis ao atraso de entrega, como no caso de transporte de vídeo ou pacotes de internet.

Sob o agendamento de pacotes BE, sempre que uma CPE pretende transmitir um pacote, ele espera por um número aleatório de quadros uniformemente escolhidos de um intervalo de tempo, e então transmite um frame CDMA (*Code Division Multiple Access*). A contenção por concorrência de prioridades ocorre quando dois ou mais CPEs selecionam o mesmo código de intervalo no mesmo canal de variação. Para resolver a contenção, a tecnologia WiMAX usa o algoritmo exponencial binário, que considera o melhor esforço possível para que informação chegue do outro lado, incrementando em latência pacotes concorrentes que tiveram a mesma prioridade. O processo se repete até que todos os pacotes sejam transmitidos (IEEE, 2009).

## **5.2. Utilização das frequências em caráter Limitado Privado**

- Revisão da Resolução nº 537, de 17 de fevereiro de 2010 (Anatel, Resolução nº 537, 2010)

O sistema WiMAX proposto para o laboratório opera na faixa de 3400MHz a 3600MHz, conhecida como 3,5GHz, regida pela Resolução nº 537/2010, resolução esta que já foi revisada e alocada para a utilização do 5G em 2021.

Regulação anterior

*Art. 1º Atribuir a Faixa de Radiofrequências de 3.400 MHz a 3.600 MHz adicionalmente ao Serviço Móvel, em caráter primário.*

*Art. 2º Manter a destinação da Faixa de Radiofrequências de 3.400 MHz a 3.600 MHz, em caráter primário, para prestação do Serviço de Comunicação Multimídia - SCM e do Serviço Telefônico Fixo Comutado – STFC.*

*Art. 3º Destinar, adicionalmente, a Faixa de Radiofrequências de 3.400 MHz a 3.600 MHz, em caráter primário, para prestação do Serviço Móvel Pessoal - SMP.*

*Art. 4º Destinar, adicionalmente, a Subfaixa de Radiofrequências de 3.400 MHz a 3.410 MHz, em caráter primário, para prestação do Serviço Limitado Privado - SLP, para utilização direta ou indiretamente por órgãos ou entidades da Administração Pública direta ou indireta do Governo Federal, Estadual ou Municipal, com a finalidade de promover a inclusão digital, mediante autorização do SLP, não aberto à correspondência pública, de forma gratuita.*

Com a alocação 3.5 GHz para o leilão do 5G, a Anatel reservou uma parte do espectro de 2.3 GHz para a utilização do Serviço Limitado Privado (SLP), compreendido por empresas privadas que queiram prestar o serviço de conexão entre os próprios equipamentos ou prédios de serviço, sem comercializar o link de conexão com cliente finais.

Nesta nova resolução, 10 MHz foram alocados para qualquer empresa SLP, onde as empresas de energia podem solicitar este espectro em uma outorga de 10 anos de exploração. Descrito na resolução abaixo:

- Resolução nº 710, de 28 de maio de 2019

*“Aprova a Destinação da Faixa de Radiofrequências de 2,3 GHz ao Serviço Limitado Privado – SLP e o Regulamento sobre Condições de Uso da Faixa de Radiofrequências de 2,3 GHz.*

**RESOLVE:**

*Art. 1º Destinar a faixa de radiofrequências de 2.300 MHz a 2.400 MHz para a prestação do Serviço Limitado Privado – SLP, em caráter primário e sem exclusividade.*

*Art. 2º A faixa de radiofrequências de 2.300 MHz a 2.400 MHz deve ser utilizada por sistemas que empreguem duplexação por divisão de tempo (TDD).*

- *Serviço Limitado Privado*

*Serviço limitado, telefônico, telegráfico, de transmissão de dados ou qualquer outra forma de telecomunicações, destinado ao uso próprio do executante, seja este uma pessoa natural ou jurídica, regulamentado pela Norma nº 13/1997, aprovada pela Portaria nº 455, de 18/09/1997.*

*Submodalidades Serviço de Rede Privado:*

*Serviço de Rede Privado: serviço não aberto à correspondência pública, destinado a prover telecomunicação a uma mesma entidade, entre pontos distribuídos, de forma a estabelecer uma rede de telecomunicações privada(...)*”

## 6. ENSAIOS REALIZADOS

Para avaliar o desempenho da utilização do protocolo IEC 61850 em uma rede WiMAX, foi desenvolvido um modelo de simulação de célula única usando o rádio Siemens WIN7258. Os ensaios iniciais foram focados nos aspectos de programação de recursos no rádio da rede WiMAX, o modelo de propagação e as perdas do sinal simulados através de atenuadores, projetando uma distância de 1 km.

A primeira simulação executada demonstra uma linha de distribuição de 1 km dentro de uma célula de cobertura WiMAX. Um relé dispara mensagens GOOSE compartilhando suas variáveis de corrente e status de proteção. Presume-se que cada zona protegida sofra uma única falha durante o tempo de execução da simulação de 1 hora. Os tempos de geração de falhas e atuação da proteção serão medidos através de sistemas de monitoramento de rede.

Para simular um ambiente multisserviço, foi injetado um tráfego de classificação BE (Best Effort) de valor fixo de 1Mbps em disparos contínuos. O tráfego representa aplicações de medição inteligente, voz sobre IP, controle de iluminação pública e navegação de internet. Para análise de desempenho foi usada como base o atraso de recebimento das mensagens em relação ao relé cliente.

Para este estudo, foi definido o tempo de expiração da mensagem em 100 ms.

Para validar algumas características da norma IEC 61850, foram realizados três experimentos:

- Verificação da característica das mensagens GOOSE;
- Verificação da troca de mensagens GOOSE entre o IED SEL e um sistema de auditoria GOOSE passando pela rede WiMAX;
- Comparação entre o tempo de atuação de um disparo de proteção GOOSE via fibra ótica e via Rádio utilizando a tecnologia WiMAX.

Espera-se comprovar a adequação da rede de rádio WiMAX ou LTE ao tráfego de mensagens GOOSE com os resultados dos ensaios realizados. A seguir são

apresentados os equipamentos nos experimentos e o diagrama de montagem da rede nos dois testes.

## 6.1. Equipamentos utilizados

- **Relé de proteção SEL 451**

Utilizou-se um relé Schweitzer modelo SEL 451 com multifunção para proteção, controle, monitoramento e automação de alimentadores, bancos de capacitores, reatores, transformadores, geradores e interligação concessionária / consumidor com ou sem co-geração com sistema de detecção de arco voltaico em painéis de baixa e média tensão, ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Relé Shweitzer SEL 451.



Fonte: Datasheet Schweitzer Engineering SEL 451

- **Switch RuggedCom RX1501**

O RuggedSwitch RX1501, ilustrado na Figura 12, é um *switch* Ethernet gerenciável, modular e projetado para operar de forma confiável em ambientes agressivos como os de uma subestação de energia elétrica. Junto com isto, seu sistema operacional proprietário aumenta a confiabilidade e segurança cibernética, sendo ideal para redes com informações críticas, em tempo real.

Figura 12 - Switch Ruggedcom RX1501.



Fonte: Datasheet Siemens Ruggedcom (Siemens Ruggedcom Produtos, 2018)

- **Radio WiMAX RuggedCom WIN7258**

O Radio WiMAX WIN7258, ilustrado na Figura 13, é um rádio gerenciável que opera na faixa de 5.8Ghz, frequência não licenciada, proteção IP67, adequado para ambientes agressivos como os de uma subestação de energia elétrica. Junto com isto, seu sistema operacional aumenta a confiabilidade e segurança cibernética, sendo ideal para redes com informações críticas, em tempo real.

Figura 13 - WiMAX Ruggedcom Win7258.

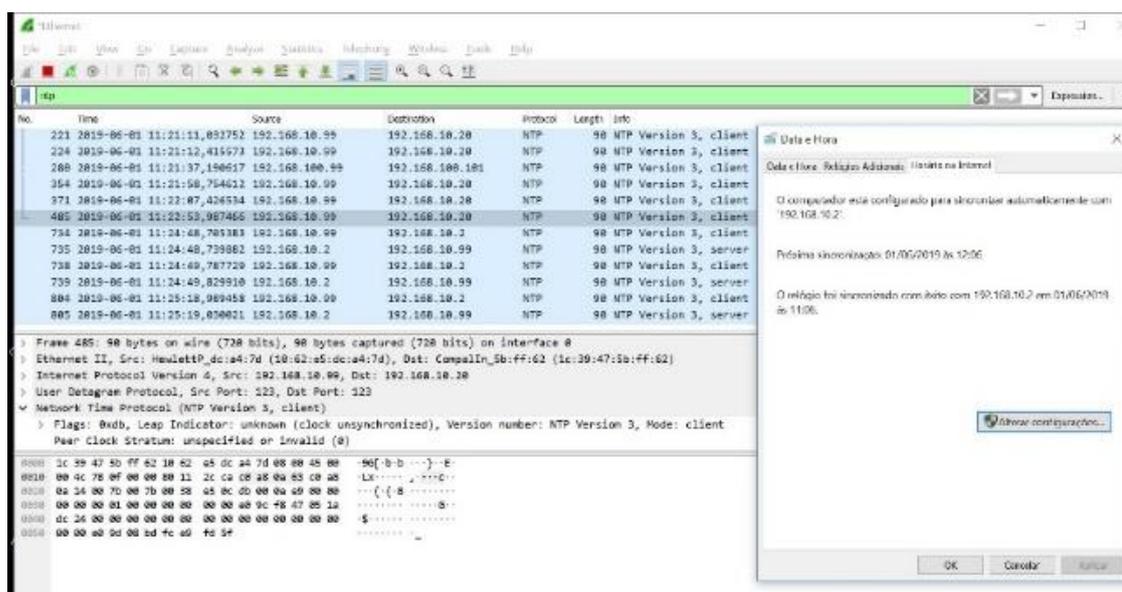


Fonte: Datasheet Siemens Ruggedcom (Siemens Ruggedcom Produtos, 2018)

## 6.2. Cenário de referência

Primeiro, analisamos o desempenho do tráfego das mensagens GOOSE de proteção sob o serviço BE convencional. Para a medição do atraso das mensagens, precisamos sincronizar o tempo entre os equipamentos do experimento. Para tanto foi utilizado o sincronismo de tempo NTP disponível no switch RX1501 na Figura 14.

Figura 14 - Sincronismo de tempo NTP.

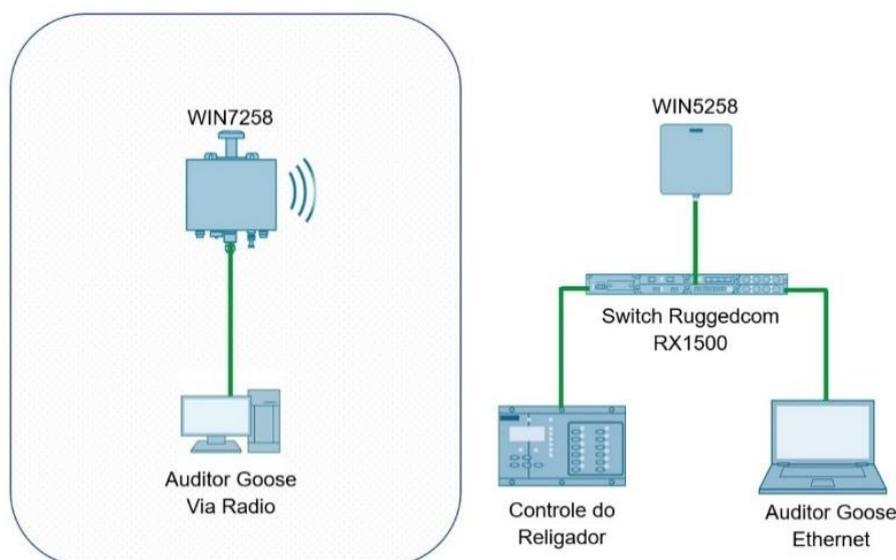


Fonte: Foto de autoria própria

### • Diagrama inicial

Uma série de experimentos foi realizada para se verificar os benefícios do uso comunicação via rádio para o transporte das mensagens GOOSE. Os equipamentos utilizados e descritos na Seção 6.1 foram conectados de acordo com o seguinte diagrama da Figura 15.

Figura 15 - Diagrama de montagem inicial.

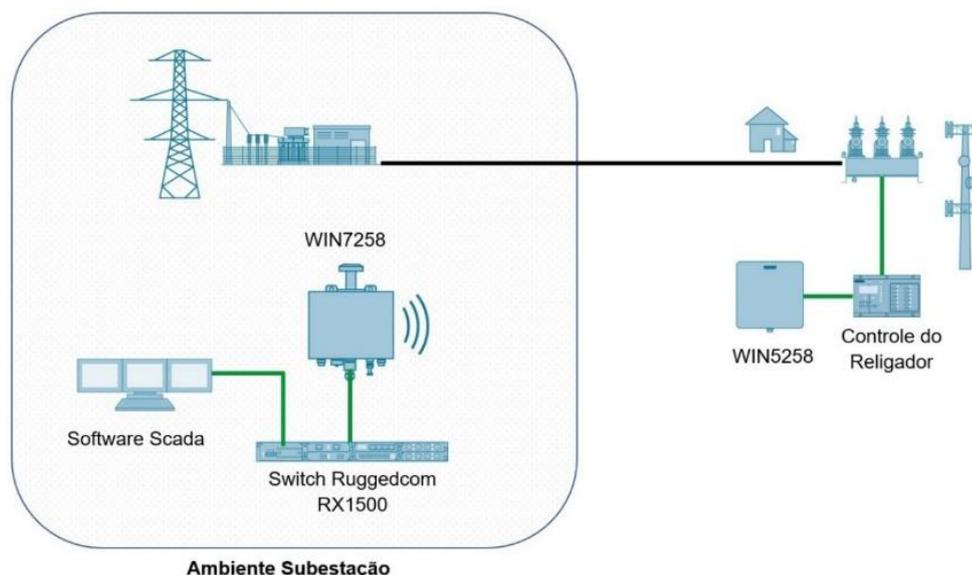


Fonte: Diagrama Autoria Própria

- **Diagrama simulado em uma Subestação de Energia**

O esquema da Figura 16 simula um sistema de proteção onde o religador está distante da subestação e transmite suas informações de forma remota, utilizando como meio o rádio WiMAX, apresentado na Figura 16.

Figura 16 - Simulação do Ambiente em uma subestação de energia.



Fonte: Diagrama Autoria Própria

### 6.3. Configuração do Relé

A configuração dos IEDs é feita através do *software* do fabricante do relé. No *software*, é definido o IP para comunicação com a rede Ethernet e os parâmetros de proteção que darão origem as mensagens GOOSE de disparo, que posteriormente serão recebidas pelos outros dispositivos da rede.

### 6.4. Configuração das mensagens GOOSE

Para a realização dos testes de velocidade, foi configurada uma mensagem GOOSE partindo de cada IED, de modo que os outros equipamentos da rede somente recebem esta informação, para assim contabilizar o tempo de atraso em uma rede sem perturbações. Para verificar a característica e o tempo de atraso nas mensagens GOOSE, descrita na Seção 4.2, foi elaborado um procedimento de

disparo de mensagens GOOSE pelo relé de proteção SEL-451, ilustrado na Figura 17, utilizando como gatilho o pressionamento de um botão.

Figura 17 - Laboratório Relé de proteção SEL451.



Fonte: Foto Autoria Própria

### 6.5. Montagem das Antenas e Atenuadores

Os rádios base e cliente foram montados em bancada sem atenuadores Figura 18, com a potência mínima de 9 dBm e com as configurações de frequência, de banda e priorização descritas nos itens seguintes.

Figura 18 - Antena Base sem atenuadores.



Fonte: Foto Autoria Própria

### 6.6. Configuração do Rádio WiMAX

Para os testes em laboratório, foi utilizada uma faixa frequência não licenciada e de uso livre de 5.800 MHz, a sensibilidade em relação ao ruído foi fixada em alta (-124 dBm). Os parâmetros foram configurados diretamente no rádio Win7258 através de sua interface, exibida na Figura 19.

Figura 19 - Tela de configuração rádio Win7258.

## Radio Settings

This page contains radio parameters settings.

Current Frequency [kHz]	5800000
Configured Frequency [kHz]*	5800000
Min Supported Frequency [kHz]	5730000
Max Supported Frequency [kHz]	5845000
Tx power [dBm]	9.00
Min Supported Transmit Power [dBm]	9.00
Max Supported Transmit Power [dBm]	21.00
Initial Ranging Power (-100..-60) [dBm]	-90.00
Noise Interference Level [dBm]	-124.00

RF Channels Table

RF Channel	Active	Tx Power [dBm]	Analog RSSI [mV]	Temperature	Antenna
1	True	9.20	0.00	51	Connected
2	True	8.39	0.00	51	Connected

Fonte: Imagem Autoria Própria tela de configuração do equipamento Win7258

### 6.7. Configuração da proporção de envio e recebimento dos dados

Como soluções de automação necessitam mais de envio de dados do que recebimento (Al-Omar, Landolsi, & Al-Ali, 2015), o estudo aproveita a tecnologia de adaptação de proporção disponível no WiMAX, para simular uma aplicação de campo onde os equipamentos seriam interrogados e, por conseguinte enviariam uma grande quantidade de dados. No diagrama inicial a simulação utiliza a proporção padrão para aplicações de internet, onde o recebimento de dados é priorizado em detrimento do envio. Para simular esta configuração de proporção entre *uplink* e *downlink*, selecionamos, conforme a Figura 20, a maior banda possível (10MHz) e fixamos uma proporção de 60% para o *downlink* e 40% para o *uplink*.

Figura 20 - Proporção de envio e recebimento.

**Frame Settings**  
Radio frame parameter settings

Current Bandwidth [MHz]	10MHz
Configured Bandwidth [MHz]**	10MHz ▼
Current Cell ID	0
Configured Cell ID (0..31)*	0
Current Preamble Index	0
Current TDD Split [%]	60
Configured TDD Split*	60
Current Extended Cell Range Support	Off
Configured Extended Cell Range Support*	Off ▼
Current Subchannel Bitmap	All Subchannels
Configured Subchannel Bitmap*	All Subchannels ▼
DCD Count	3
UCD Count	11

Fonte: Imagem Autoria Própria tela de configuração do equipamento Win7258

### 6.8. Configuração da priorização do serviço de mensagens GOOSE em UGS

A prioridade nos pacotes GOOSE foi configurada de forma a atender o envio e o recebimento, dando a eles uma segregação em relação aos outros serviços em uma prioridade UGS, onde os pacotes terão uma atenção diferenciada e uma reserva de 50 Kbits/seg na banda total (Kuzlu, Pipattanasomporn, & Rahman, 2014), apresentados na Figura 21.

Figura 21 - Priorização de pacotes UGS.

	CID	SF ID	SF Name	Direction	Scheduling Service	Min Rate [Kbits/sec]	Max Rate [Kbits/sec]	SF Type	Jitter [ms]
<input type="radio"/>	1064	3222907144	ISF DL	DL	BE	0	0	Data	0
<input type="radio"/>	1068	3222907145	ISF UL	UL	BE	0	0	Data	0
<input type="radio"/>	1072	3222907146	Goose DL	DL	UGS	50	50	Data	0
<input type="radio"/>	1076	3222907147	Goose UL	UL	UGS	50	50	Data	0
<input type="radio"/>	1024	65535	Broadcast	DL	BE	0	100	Broadcast	0

Fonte: Imagem Autoria Própria tela de configuração do equipamento Win7258

### 6.9. Classificador do pacote Goose dentro da priorização

Para a classificação dos pacotes, foi configurado o valor de EtherType (classificador ethernet) 0x88b8. Este valor hexadecimal corresponde ao indicador das mensagens GOOSE dentro do pacote Ethernet. No sistema de configuração da radio base, é possível configurar diversos modelos de classificadores. Na Figura 22 é apresentada a classificação montada para os testes.

Figura 22 - Classificador de Pacotes.

USF Classifiers Table			
	Index	Classifier Type 1	Classifier Value 1
<input type="radio"/>	1	EtherType	0x88b8
+ -			

Fonte: Imagem Autoria Própria tela de configuração do equipamento Win7258

### 6.10. Verificação da classificação dos fluxos de serviço

Para assegurar que os pacotes estão sendo classificados corretamente, acompanhou-se e evolução do incremento de mensagens enviadas e recebidas pelo Relé e pelos equipamentos envolvidos no teste. Na Figura 23 temos o isolamento das mensagens recebidas e enviadas pelo protocolo GOOSE dentro da classificação de prioridade UGS, onde as mensagens partiam exclusivamente do relé e, portanto, o valor de recebimento de mensagens é nulo e se demonstra com a valor 0. Na figura também é possível observar a classificação funcionando para o envio de 689 pacotes do relé para o software de monitoramento.

Figura 23 - Fluxo de serviços.

Service Flow							
Service flow statistics							
	SF Name	Service flow ID	CID	Direction	Scheduling Service	Packets	Bytes
<input type="radio"/>	Broadcast	65535	1024	DL	BE	7819	2004772
<input type="radio"/>	ISF UL	3222907149	1084	UL	BE	3450	762243
<input type="radio"/>	ISF DL	3222907148	1080	DL	BE	1640	635817
<input type="radio"/>	Goose DL	3222907150	1088	DL	UGS	0	0
<input type="radio"/>	Goose UL	3222907151	1092	UL	UGS	689	97838

Fonte: Imagem Autoria Própria tela de configuração do equipamento Win7258

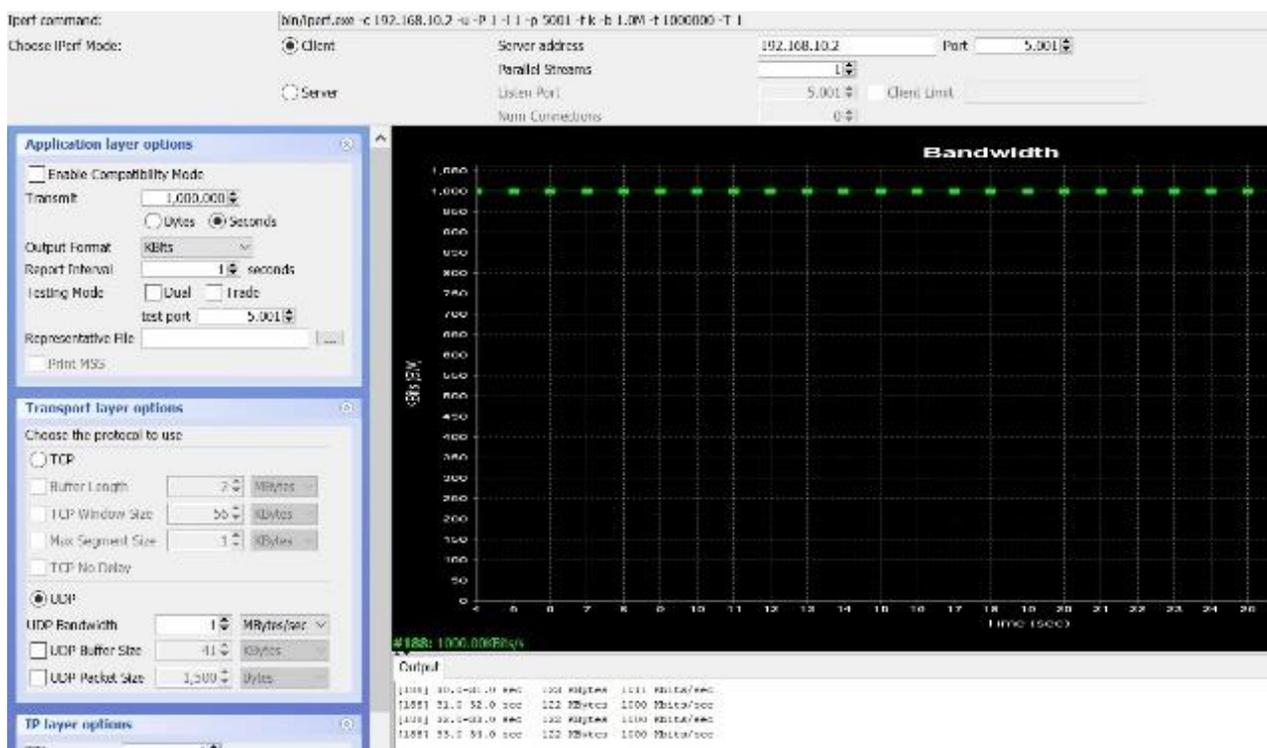
### 6.11. Injeção de uma perturbação de 1 Megabit por segundo simulando tráfego de multiserviço

O *software* de licença livre Jperf foi usado para gerar uma perturbação de rede, simulando tráfego de rede gerador por outros serviços. Este tráfego UDP, com prioridade baixa, foi utilizado para estressar a priorização utilizada no experimento e verificar o atraso provocado por cada nível de intervenção.

A ideia é simular a utilização da mesma rede em uma aplicação de multiserviços, onde câmeras de segurança ou outras aplicações de grande demanda e baixa prioridade, podem interferir na comunicação prioritária de proteção.

Na Figura 24, o demonstrativo de simulação de 1 Megabit por segundo, trafegando junto aos mesmos pacotes de mensagem GOOSE.

Figura 24 - Software Jperf Gerador de perturbação de rede.

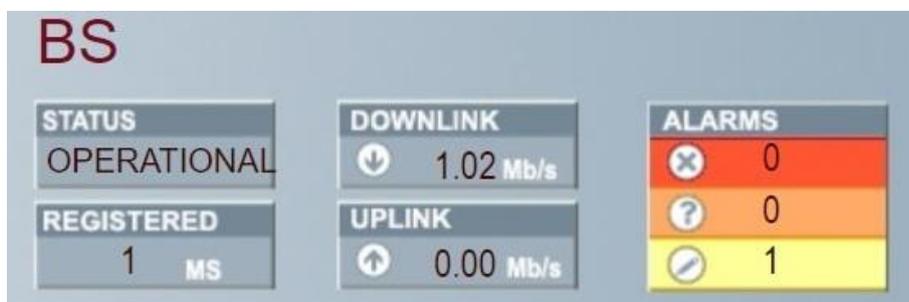


Fonte: Imagem Autoria Própria software gerador de dados Jperf

Para comprovar que o fluxo gerado como perturbação passava pelo mesmo caminho utilizado pelos dados de proteção, utilizamos o demonstrador de banda consumida, disponível na radiobase. Através do painel de informações da Figura 25,

consegue-se verificar o aumento no tráfego em direção a rede, em paralelo aos dados gerados pelo relé.

Figura 25 - Painel de monitoramento 1 Megabit.



Fonte: Imagem Autoria Própria tela de Status Equipamento Win7258

## 6.12. Injeção de uma perturbação de 50 Megabits por segundo simulando tráfego de multiserviços

O software Jperf foi usado para gerar uma perturbação de rede, simulando um tráfego excessivo gerado por câmera de vigilância ou aplicações de internet. Este tráfego, com prioridade baixa, foi utilizado para estressar a priorização utilizada no experimento e verificar o atraso provocado no pacote GOOSE durante a intervenção. A seguir, na Figura 26, há o demonstrativo de simulação de 50 Megabits por segundo, trafegando junto aos mesmos pacotes de mensagem GOOSE.

Figura 26- Software Jperf Gerador de perturbação 50 Megabits.

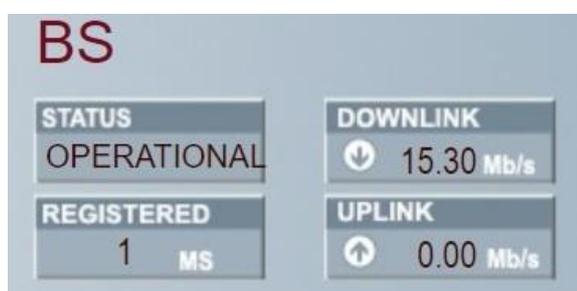


Fonte: Imagem Autoria Própria software gerador de dados Jperf

Para comprovar que o fluxo gerado como perturbação passava pelo mesmo caminho utilizado pelos dados de proteção, utilizamos o demonstrador de banda consumida, disponível na rádio base.

Apesar da injeção de 50 Megabits por segundo, o sistema de WiMAX não tem capacidade para transferir mais do que 15 Megabits por segundo para apenas um cliente, conforme a Figura 27. Com isso estamos estressando o sistema, forçando com que ele comece a dispensar pacotes de baixa prioridade e tente ao máximo manter a latência dos pacotes com prioridade GOOSE.

Figura 27 - Painel de monitoramento 15 Megabyte.

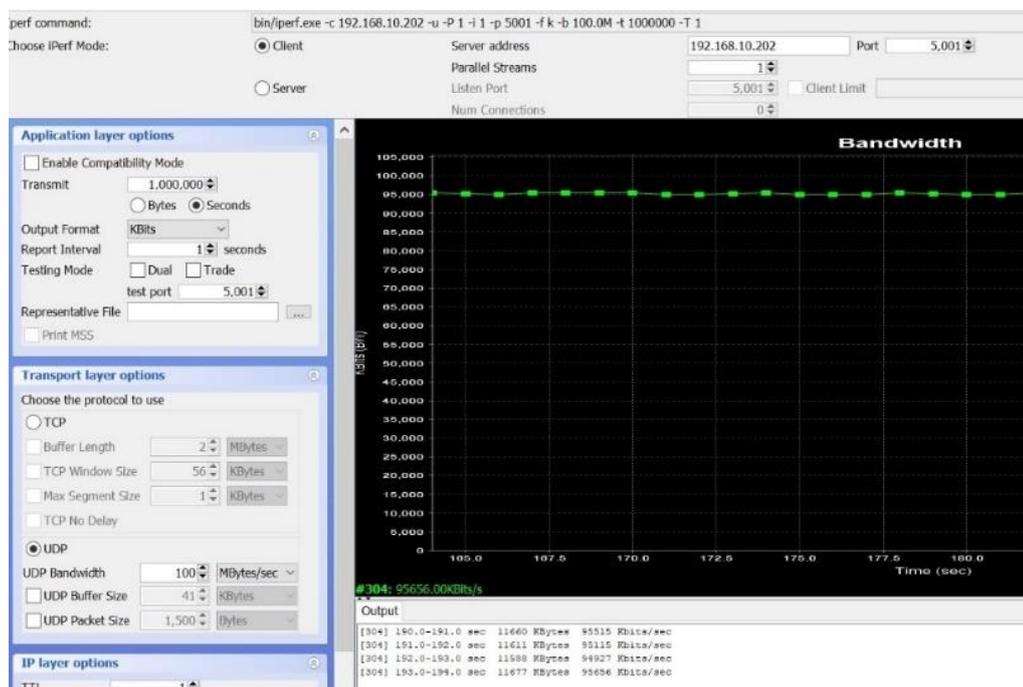


Fonte: Imagem Autoria Própria tela de Status Equipamento Win7258

### 6.13. Injeção de uma perturbação de 100 Megabits por segundo simulando tráfego de multisserviços

A seguir, o *software* Jperf foi usado para gerar uma perturbação de rede, simulando um tráfego excessivo gerado por um sistema de transferência de dados, como aplicações de vídeo de internet. Este tráfego com prioridade baixa, foi utilizado para estressar a priorização utilizada no experimento e verificar o atraso provocado no pacote GOOSE durante a intervenção. Na Figura 28 há o demonstrativo de simulação de 100 Megabits por segundo, trafegando junto aos mesmos pacotes de mensagem GOOSE.

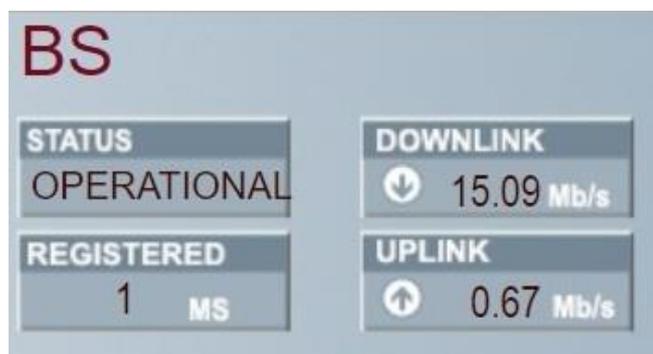
Figura 28- Software Jperf Gerador de perturbação 100 Megabits.



Fonte: Imagem Autoria Própria software gerador de dados Jperf

Para comprovar que o fluxo gerado como perturbação, passava pelo mesmo caminho utilizado pelos dados de proteção, utilizamos o demonstrador de banda consumida, disponível na rádio base. Apesar da injeção de 100 Megabits por segundo, o sistema de WiMAX não tem capacidade para transferir mais do que 15 Megabytes por segundo para apenas um cliente, conforme a Figura 29. Com isso estamos estressando o sistema, forçando com que ele comece a dispensar pacotes de baixa prioridade e tente ao máximo manter a latência dos pacotes com prioridade GOOSE.

Figura 29 - Painel de monitoramento 100 Megabyte.



Fonte: Imagem Autoria Própria tela de Status Equipamento Win7258

## 6.14. Utilizando a análise de pacotes para a medição do atraso

Para atestar o recebimento das mensagens enviadas pelo relé e seus tempos de atraso, foi utilizado o software Wireshark, um analisador de rede, como meio de captura e análise das informações. Esse software funciona como um *sniffer* (analisador de pacotes da rede) que captura todos os pacotes que trafegam na rede. Ele pode ser configurado para identificar o tipo específico de pacote, como no caso das mensagens GOOSE, e, com isso filtrar este pacote para análise. Com a informação do início de disparo do pacote partindo do relé, e o tempo até a chegada deste mesmo pacote no microcomputador de destino, foi possível comprovar os tempos de atraso de recebimento da mensagem em meio as perturbações da rede.

A Figura 30 mostra o Wireshark capturando uma mensagem GOOSE na rede.

Figura 30 - Tela de captura de pacotes Wireshark.

```

Wireshark · Packet 6145 · Ethernet
> Frame 6145: 142 bytes on wire (1136 bits), 142 bytes captured (1136 bits) on interface 0
> Ethernet II, Src: Schweitz_04:e7:3e (00:30:a7:04:e7:3e), Dst: Iec-Tc57_01:00:03 (01:0c:cd:01:00:03)
  GOOSE
    APPID: 0x0003 (3)
    Length: 128
    Reserved 1: 0x0000 (0)
    Reserved 2: 0x0000 (0)
    goosePdu
      gocbRef: SEL451CFG/LLN0$GO$GooseSEL451
      timeAllowedtoLive: 2000
      datSet: SEL451CFG/LLN0$DSet15
      goID: SEL451
      t: Apr 30, 2009 16:04:31.662597656 UTC
      stNum: 1
      sqNum: 3613
      test: False
      confRev: 1
      ndsCom: False
      numDatSetEntries: 3
    allData: 3 items
      Data: floating-point (7)
0000  01 0c cd 01 00 03 00 30 a7 04 e7 3e 88 b8 00 03  .....@..-.->....
0010  00 80 00 00 00 00 61 76 80 1d 53 45 4c 34 35 31  .....av...SEL451
0020  43 46 47 2f 4c 4c 4e 30 24 47 4f 24 47 6f 6f 73  CFG/LLN0 $GO$Goos
0030  65 53 45 4c 34 35 31 81 02 07 d0 82 15 53 45 4c  eSEL451...SEL
0040  34 35 31 43 46 47 2f 4c 4c 4e 30 24 44 53 65 74  451CFG/L LN0$DSet
0050  31 35 83 06 53 45 4c 34 35 31 84 08 49 f9 cc 0f  15..SEL4 51..I...
0060  a9 a0 00 bf 85 01 01 86 02 0e 1d 87 01 00 88 01  .....
0070  01 89 01 00 8a 01 03 ab 15 87 05 08 00 00 00 00  .....
0080  87 05 08 00 00 00 00 87 05 08 00 00 00 00
  
```

Fonte: Imagem Autoria Própria software analisador de pacotes Wireshark

A mensagem GOOSE está associada a três camadas do modelo OSI (Open Systems Interconnection): a camada física, camada de enlace de dados e a camada de aplicação. A norma IEC 61850-8-1 (International Electrotechnical Commission,

2005) apresenta a estrutura da mensagem GOOSE e este é o ponto para a investigação e análise dos tempos de atraso das mensagens. Como pode ser visto na Figura 31, foi possível isolar a mensagem enviada pelo relé e verificar as informações de tempo de geração e recepção.

Figura 31 – Captura da mensagem Goose.

Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1 2019-06-01 14:26:18,101688	Schweitz_04:e7:3e	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE	142	
3 2019-06-01 14:26:19,102528	Schweitz_04:e7:3e	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE	142	
4 2019-06-01 14:26:20,103434	Schweitz_04:e7:3e	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE	142	
5 2019-06-01 14:26:21,104624	Schweitz_04:e7:3e	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE	142	
6 2019-06-01 14:26:22,105524	Schweitz_04:e7:3e	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE	142	

Fonte: Imagem Autoria Própria software analisador de pacotes Wireshark

Cada mensagem foi analisada em relação ao tempo de sua geração pelo relé de origem, e o tempo de atraso para o seu recebimento. Para cada intervenção gerada, foram analisadas 10 amostras (Figura 32) para o cálculo do atraso médio.

Estes resultados foram comentados em uma conclusão parcial descrita no próximo tópico.

Figura 32 - Amostras de pacotes capturados.

63	2019-06-01 14:26:15,113194	Schweitz_04:e7:3e	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE	142
67	2019-06-01 14:26:16,113443	Schweitz_04:e7:3e	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE	142
70	2019-06-01 14:26:17,113123	Schweitz_04:e7:3e	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE	142
76	2019-06-01 14:26:18,113176	Schweitz_04:e7:3e	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE	142
80	2019-06-01 14:26:19,123158	Schweitz_04:e7:3e	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE	142
84	2019-06-01 14:26:20,123683	Schweitz_04:e7:3e	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE	142
89	2019-06-01 14:26:21,123127	Schweitz_04:e7:3e	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE	142
93	2019-06-01 14:26:22,123393	Schweitz_04:e7:3e	Iec-Tc57_01:00:03	GOOSE	142

---

```

datSet: SEL451CFG/LLN0$DSet15
goID: SEL451
t: Jun 1, 2019 14:26:22.071598052 UTC
stNum: 1
sqNum: 866
test: False
confRev: 1

```

Fonte: Imagem Autoria Própria software analisador de pacotes Wireshark

### 6.15. Resultado parcial

Apesar da baixa precisão no sincronismo de tempo adotado e o atraso provocados pelos equipamentos e interfaces de rede complementares, que, por serem compostos por conversores de meio ótico e processamento externo, incrementam o tempo de entrega das mensagens, o resultado dos tempos de atraso (Tabela 3), mostrou que a tecnologia foi capaz de priorizar o pacote GOOSE em relação aos demais pacotes, se mantendo dentro dos 100 milissegundos, máximo para as funções secundárias da proteção.

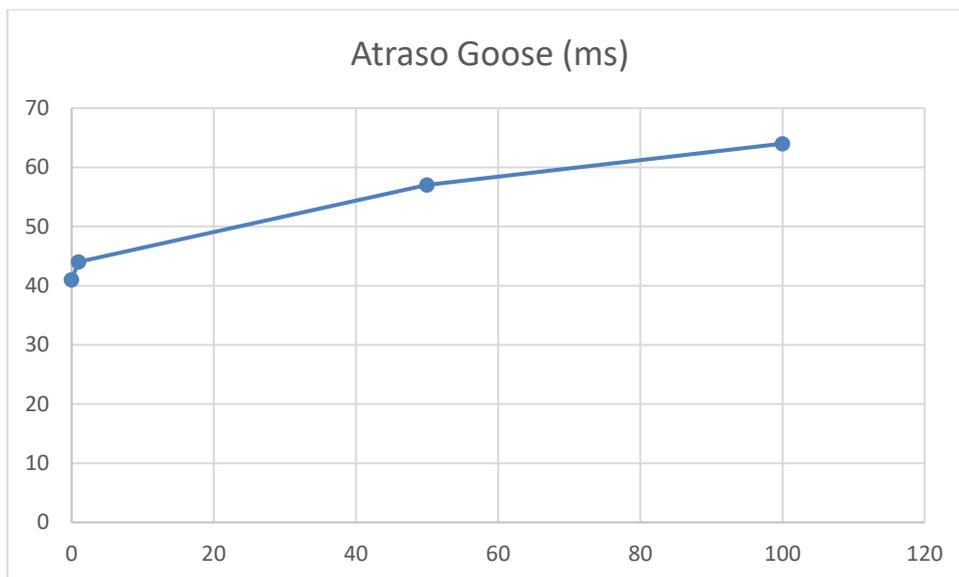
Tabela 3 - Tabela de tempo de atraso x perturbação.

Perturbação Injeção Megabite BE	Atraso Goose (ms)
0	41
1	44
50	57
100	64

Fonte: Foto Autoria Própria Microsoft Excel

O gráfico da Figura 33 demonstra o incremento no atraso das mensagens GOOSE, sofrido pela intervenção da simulação dos outros serviços.

Figura 33 - Grafico de Atraso das mensagens Goose.



Fonte: Foto Autoria Própria Microsoft Excel

## 7. ESQUEMA OTIMIZADO

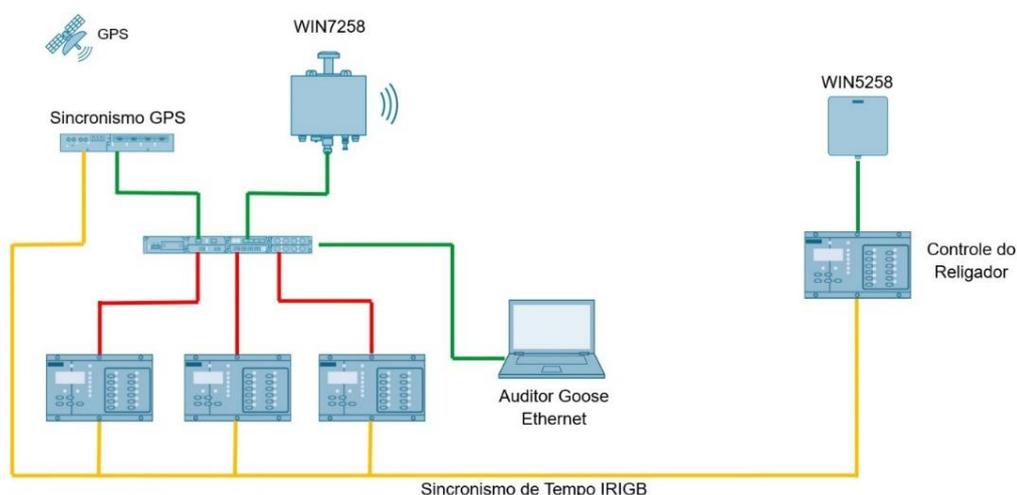
A partir dos resultados da seção anterior, fica claro que o serviço convencional de agendamento utilizados por outras tecnologias ou a padrão utilizada pelo WIMAX não atende aos requisitos exigidos para o tráfego de mensagens de proteção. Para contornar este atraso, é proposto um novo serviço de agendamento de QOS UGS para priorizar ainda mais os pacotes GOOSE em relação aos demais serviços. Também utilizamos um laboratório com mais relés para a simulação e sincronizamos estes relés em uma infraestrutura com sincronismo mais preciso. Para o esquema otimizado reservamos um espaço de 100 kbps em cada frame de transmissão do rádio e forçamos a priorização de recebimento destes pacotes para garantir a entrega em uma média de 5 milissegundos, assim melhorando o tempo de transmissão e recebimento das mensagens em todos os equipamentos da rede.

- **Esquema de rede otimizado**

Para o diagrama otimizado da Figura 34, foram utilizados 4 relés de proteção do fabricante GE, conectados em fibra ótica a um switch gerenciável e sincronizados através de IRIG-B.

A radiobase e o cliente foram montados respeitando a simulação de distância e um microcomputador foi disposto na rede para monitorar o fluxo de pacotes.

Figura 34 - Diagrama otimizado.

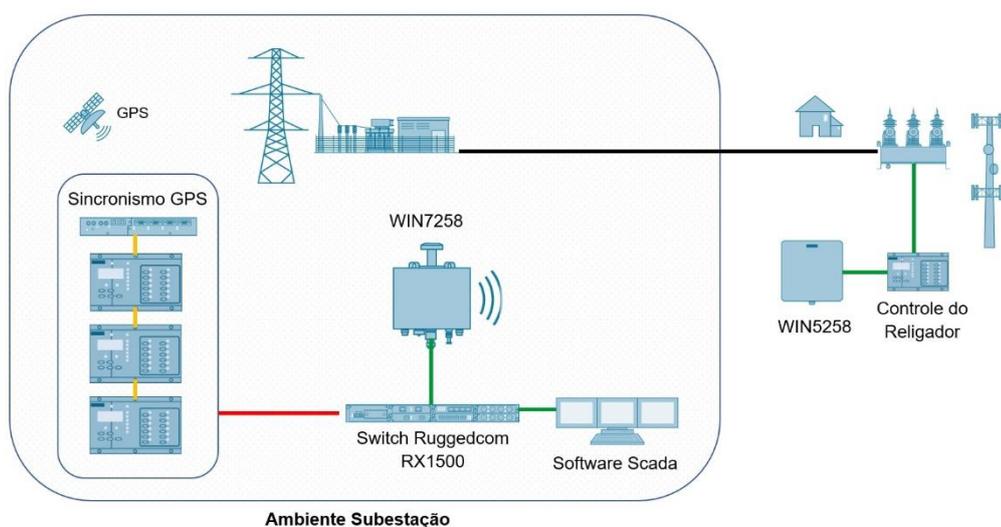


Fonte: Diagrama Autoria Própria Microsoft Power Point.

- **Diagrama otimizado simulado a comunicação entre um religador e Subestação de Energia**

O diagrama da Figura 34 representa um sistema de proteção onde o religador está distante da subestação e transmite suas informações de forma remota, utilizando como meio o rádio WiMAX, como na Figura 35.

Figura 35 - Simulação do Ambiente otimizado em uma subestação de energia.



- **Laboratório LPROT**

Para a realização do ensaio, foi utilizado o laboratório LPROT da Escola Politécnica da USP (Figura 36). Os dados também foram capturados e analisados utilizando a infraestrutura existente, que simula o centro de controle de uma central de distribuição de energia.

Figura 36 - LPROT Escola Politécnica.



Fonte: Foto Autoria Própria

### 7.1. Sincronismo de tempo via IRIGB

O ensaio inicial apresentou atraso de sincronismo, por conta do protocolo NTP, nativo no Microsoft Windows, que não oferece precisão suficiente para o cálculo de atraso em uma situação sensível ao milissegundo. Foi adotado, no segundo experimento, o sincronismo via IRIG-B, que por ser mais preciso e por não utilizar a rede Ethernet como meio, melhora a precisão de tempo para a avaliação dos resultados do ensaio (Hou & Dolezilek, 2008).

Para o laboratório foi utilizando o GPS da marca Reason, conectado por cabo coaxial diretamente aos relés de proteção como mostrado na Figura 37.

Figura 37 - GPS Reason.



Fonte: Foto Autoria Própria

Os 4 relés GE UR (Figura 38) foram dispostos em um painel rack 19", onde foram interconectados por fibra ótica ao *switch* gerenciável. Para simular o diagrama proposto, um dos relés foi destacado da rede de fibra e conectado ao rádio cliente WiMAX para simular sua integração via o sistema de rádio.

Figura 38 - Painel de Proteção GE.



Fonte: Foto Autoria Própria

## 7.2. Montagem Rádio WiMAX

O rádio base foi montado no painel, conectado diretamente no *switch* através de uma conexão ethernet via cabo de cobre. A Figura 39 a disposição das antenas e a conexão com a rede elétrica.

Figura 39 - Montagem do rádio Base.



Fonte: Foto Autoria Própria

- **Simulação de distância**

Para a simulação de distância, foram utilizados atenuadores de potência de 20 dB (Figura 40). Como eles foram montados na saída dos rádios, podemos simular a perda de potência em relação a distância percorrida pelo sinal.

*Figura 40 - Atenuadores de potência.*



Fonte: Foto Autoria Própria

- **Cálculo de atenuação para 1 km**

Para a simulação de distância em uma situação de distribuição, foi usado o cálculo de perda em um espaço livre. Para este cálculo são consideradas as perdas nos cabos e conectores, propagação da frequência selecionada e os ganhos com a potência de saída e montagem das antenas.

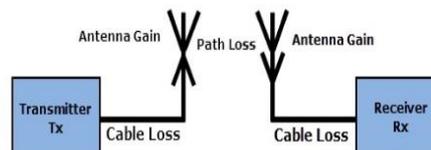
Para o cálculo de distância de 1km foi adotado o valor de perda 80 dB para o espaço aberto de acordo com a simulação abaixo da frequência de 5800 MHz (Figura 41).

Figura 41 - Cálculo de perda em espaço livre.

Bookmark or "Favorite" this page by pressing CTRL + D.

Distance:	1	Kilometers
Frequency:	5.8	GHz
Transmitter Gain (dB):	3	
Receiver Gain (dB):	17	

Calculate



Result:

Free Space Path Loss: 87.71 dB

Fonte: Website <https://www.pasternack.com/t-calculator-fspl.aspx>

- **Montagem dos atuadores na rádio base**

Os atenuadores foram montados em serie na rádio base como, mostrado na Figura 42, a fim de simular a atenuação sofrida por uma transmissão em uma distância de 1 km com a perda de 80dB como calculado no item anterior.

Figura 42 - Montagem do Atenuadores.



Fonte: Foto Autoria Própria

### 7.3. Configuração da proporção de envio e recebimento de dados

Para otimizar a configuração de rádio, simulando uma operação normal de transmissão entre dois sistemas síncronos, foi alterada a configuração de proporção definindo a transmissão de envio das mensagens do relé em 60% e deixando o recebimento em 40%, demonstrado na Figura 43. Como soluções de automação

necessitam de mais envio de dados do que recebimento, o estudo aproveita a tecnologia de adaptação de proporção disponível na tecnologia WiMAX para simular uma aplicação de campo onde os equipamentos seriam interrogados e por conseguinte enviariam uma grande quantidade de dados. No diagrama inicial a simulação utiliza a proporção padrão para aplicações de internet, onde o recebimento de dados é priorizado em detrimento do envio.

Figura 43 - Proporção de envio e recebimento otimizada.

Current Bandwidth [MHz]	10MHz
Configured Bandwidth [MHz]**	10MHz ▼
Current Cell ID	0
Configured Cell ID (0..31)*	0
Current Preamble Index	0
Current TDD Split [%]	60
Configured TDD Split*	40
Current Extended Cell Range Support	Off
Configured Extended Cell Range Support*	Off ▼
Current Subchannel Bitmap	All Subchannels
Configured Subchannel Bitmap*	All Subchannels ▼
DCD Count	3
UCD Count	11

Fonte: Imagem Autoria Própria tela de configuração equipamento Win7258

- **Configuração da Priorização do serviço GOOSE como UGS 100 kpbs e 5 ms**

Para priorizar ainda mais as mensagens GOOSE e aproximar os tempos ao padrão, não só no envio como também no recebimento, foram alterados os tempos desejáveis de recebimento e transmissão para a média de 5 ms e alterada a reserva de banda para no mínimo 100 kbits por segundo, para os pacotes de envio e recebimento Figura 44.

Figura 44 - Verificação da priorização de pacotes otimizada.

SF Name	Direction	Scheduling Service	Min Rate [Kbits/sec]	Max Rate [Kbits/sec]	SF Type	Jitter [ms]	Latency [ms]	CS Type	HARQ Max Retries
ISF DL	DL	BE	0	0	Data	0	0	802.3	3
ISF UL	UL	BE	0	0	Data	0	0	802.3	3
Goose DL	DL	UGS	100	100	Data	0	5	802.3	0
Goose UL	UL	UGS	100	100	Data	0	5	802.3	0
Broadcast	DL	BE	0	100	Broadcast	0	0	802.3	0

Fonte: Imagem Autoria Própria tela de Status Equipamento Win7258

## 8. RESULTADOS OBTIDOS

Como foi adotado o pressionamento de um botão no relé cliente como base para o disparo da mensagem, foram feitas medições de tempo para o envio e o recebimento da mensagem, para assim certificar que os dois parâmetros se enquadravam nos limites estabelecidos pela norma IEC 61850, referentes aos tempos para as mensagens GOOSE.

### 8.1. Relatório do tempo apurado nos testes

Para comparação de atraso, os relatórios de evento do relé gerador dos disparos e do relé receptor foram confrontados (Figura 45). Como os relés estavam no mesmo sincronismo de tempo, a diferença entre o tempo de envio e o recebimento foi adotado como o atraso provocado pelo sistema de rádio. O tempo para o transporte desta informação dentro do *switch* ou o atraso no processamento pelo relé cliente, não pôde ser distinguido dentro do tempo de atraso do rádio.

Figura 45 - Tela de eventos Relé GE.

Event Number	Date/Time	Cause
4243	Jun 07 2019 12:27:15.026787	Botão 1 VO Off
4242	Jun 07 2019 12:27:15.026787	PUSHBUTTON 1 OFF
4241	Jun 07 2019 12:24:13.431473	Botão 1 VO On
4240	Jun 07 2019 12:24:13.431473	PUSHBUTTON 1 ON
4239	Jun 07 2019 12:24:11.864840	Botão 1 VO Off
4238	Jun 07 2019 12:24:11.864840	PUSHBUTTON 1 OFF
4237	Jun 07 2019 12:24:09.998219	Botão 1 VO On
4236	Jun 07 2019 12:24:09.998219	PUSHBUTTON 1 ON
4235	Jun 07 2019 12:20:28.803953	Botão 1 VO Off
4234	Jun 07 2019 12:20:28.803953	PUSHBUTTON 1 OFF
4233	Jun 07 2019 12:16:02.810842	Botão 1 VO On
4232	Jun 07 2019 12:16:02.810842	PUSHBUTTON 1 ON

Event Number	Date/Time	Cause	Data
3075	Jun 07 2019 12:27:15.032443	Botao Rem RI Off	
3074	Jun 07 2019 12:24:13.439203	Botao Rem RI On	
3073	Jun 07 2019 12:24:11.874653	Botao Rem RI Off	
3072	Jun 07 2019 12:24:10.008053	Botao Rem RI On	
3071	Jun 07 2019 12:22:53.172525	REMOTE DEVICE OFF	
3070	Jun 07 2019 12:22:26.139889	REMOTE DEVICE OFF	
3069	Jun 07 2019 12:20:28.815826	Botao Rem RI Off	
3068	Jun 07 2019 12:16:02.824761	Botao Rem RI On	
3067	Jun 07 2019 12:16:01.224810	Botao Rem RI Off	
3066	Jun 07 2019 12:14:41.085212	Botao Rem RI On	
3065	Jun 07 2019 12:09:49.161488	REMOTE DEVICE OFF	
3064	Jun 07 2019 12:09:49.128071	Botao Rem RI Off	

Fonte: Imagem Autoria Própria tela de configuração equipamento Win7258

Na Tabela 4 são apresentados os tempos médios de troca de mensagens GOOSE entre os IEDs, utilizando como meio de comunicação a fibra ótica. Esta é a prática

comum para aplicações internas da subestação, por isso seus tempos precisam se adequar aos limites para os dados de proteção.

Nos testes realizados, este tempo teve uma média de 0,8 milissegundos.

*Tabela 4 - Resultado medição fibra ótica.*

Evento A	Relé A	Evento B	Relé B	Latencia ms
4076	Jun 07 2019 10:51:40.775285	2974	Jun 07 2019 10:51:40.776071	0,786
4078	Jun 07 2019 10:51:42.741902	2975	Jun 07 2019 10:51:42.742688	0,786
4080	Jun 07 2019 10:51:43.875203	2976	Jun 07 2019 10:51:43.875990	0,787
4082	Jun 07 2019 10:51:45.208511	2977	Jun 07 2019 10:51:45.209299	0,788
4084	Jun 07 2019 10:51:46.275149	2978	Jun 07 2019 10:51:46.275936	0,787
4086	Jun 07 2019 10:51:47.341789	2979	Jun 07 2019 10:51:47.342575	0,786
4088	Jun 07 2019 10:51:53.841612	2980	Jun 07 2019 10:51:53.842400	0,788
4090	Jun 07 2019 10:51:55.208253	2981	Jun 07 2019 10:51:55.209042	0,789
4092	Jun 07 2019 10:55:52.602100	2982	Jun 07 2019 10:55:52.602918	0,818
4094	Jun 07 2019 10:55:53.302085	2983	Jun 07 2019 10:55:53.302903	0,818
4096	Jun 07 2019 10:55:53.935393	2984	Jun 07 2019 10:55:53.936215	0,822
4098	Jun 07 2019 10:55:56.135348	2985	Jun 07 2019 10:55:56.136166	0,818
4100	Jun 07 2019 10:55:56.735324	2986	Jun 07 2019 10:55:56.736141	0,817

Na Tabela 5 são apresentados os tempos médios de troca de mensagens GOOSE entre os IEDs, utilizando o rádio na configuração inicial como meio de comunicação.

Nos testes realizados, este tempo teve uma média de 26 milissegundos.

Tabela 5 - Medição configuração inicial.

Evento A	Relé A	Evento B	Relé B	Latencia ms
4102	Jun 07 2019 11:03:45.123201	2990	Jun 07 2019 11:03:45.146993	23,792
4104	Jun 07 2019 11:03:46.556491	2991	Jun 07 2019 11:03:46.586535	30,044
4106	Jun 07 2019 11:03:49.123096	2992	Jun 07 2019 11:03:49.146892	23,796
4108	Jun 07 2019 11:03:50.323063	2993	Jun 07 2019 11:03:50.346859	23,796
4110	Jun 07 2019 11:04:48.688226	2994	Jun 07 2019 11:04:48.716183	27,957
4112	Jun 07 2019 11:04:54.521398	2995	Jun 07 2019 11:04:54.547283	25,885
4114	Jun 07 2019 11:06:38.118721	2996	Jun 07 2019 11:06:38.146703	27,982
4116	Jun 07 2019 11:08:46.582053	2997	Jun 07 2019 11:08:46.605884	23,831
4118	Jun 07 2019 11:08:48.348677	2998	Jun 07 2019 11:08:48.376675	27,998
4120	Jun 07 2019 11:08:49.981960	2999	Jun 07 2019 11:08:50.005807	23,847
4122	Jun 07 2019 11:08:51.548592	3000	Jun 07 2019 11:08:51.576592	28

Na Tabela 6 são apresentados os tempos médios de troca de mensagens GOOSE entre os IEDs, utilizando o rádio na configuração otimizada como meio de comunicação. Nos testes realizados, este tempo teve uma média de 8 milissegundos.

Tabela 6 - Tabela resultado configuração otimizada.

Evento A	Relé A	Evento B	Relé B	Latencia ms
4190	Jun 07 2019 11:57:14.373409	3042	Jun 07 2019 11:57:14.383020	9,611
4192	Jun 07 2019 11:57:15.406718	3043	Jun 07 2019 11:57:15.412161	5,443
4194	Jun 07 2019 11:57:16.440022	3044	Jun 07 2019 11:57:16.447551	7,529
4196	Jun 07 2019 11:57:17.206674	3045	Jun 07 2019 11:57:17.212117	5,443
4198	Jun 07 2019 12:00:57.267638	3046	Jun 07 2019 12:00:57.279361	11,723
4200	Jun 07 2019 12:00:59.600906	3047	Jun 07 2019 12:00:59.608464	7,558
4202	Jun 07 2019 12:01:01.600856	3048	Jun 07 2019 12:01:01.608412	7,556
4204	Jun 07 2019 12:01:02.900827	3049	Jun 07 2019 12:01:02.908373	7,546
4206	Jun 07 2019 12:01:04.467452	3050	Jun 07 2019 12:01:04.479172	11,72
4208	Jun 07 2019 12:01:05.700746	3051	Jun 07 2019 12:01:05.708305	7,559
4210	Jun 07 2019 12:01:08.000697	3052	Jun 07 2019 12:01:08.008254	7,557
4212	Jun 07 2019 12:01:08.933994	3053	Jun 07 2019 12:01:08.943635	9,641
4214	Jun 07 2019 12:01:10.000645	3054	Jun 07 2019 12:01:10.008203	7,558
4216	Jun 07 2019 12:01:11.033951	3055	Jun 07 2019 12:01:11.043591	9,64
4218	Jun 07 2019 12:03:40.196753	3056	Jun 07 2019 12:03:40.202246	5,493

## 8.2. Análise das oscilografias

Tendo como base que cada relé foi configurado para gerar uma oscilografia do evento de disparo e recebimento das mensagens GOOSE, foi possível comparar estes tempos através da análise gráfica. Para tanto foi utilizado o software SynchroWave Event Comtrade, do fabricante de relés Schweitzer.

Para a análise das oscilografias, foram extraídos os arquivos COMTRADE gerados por cada evento e o software SynchroWave foi usado para sobrepor as duas informações no mesmo gráfico como nas figuras a seguir.

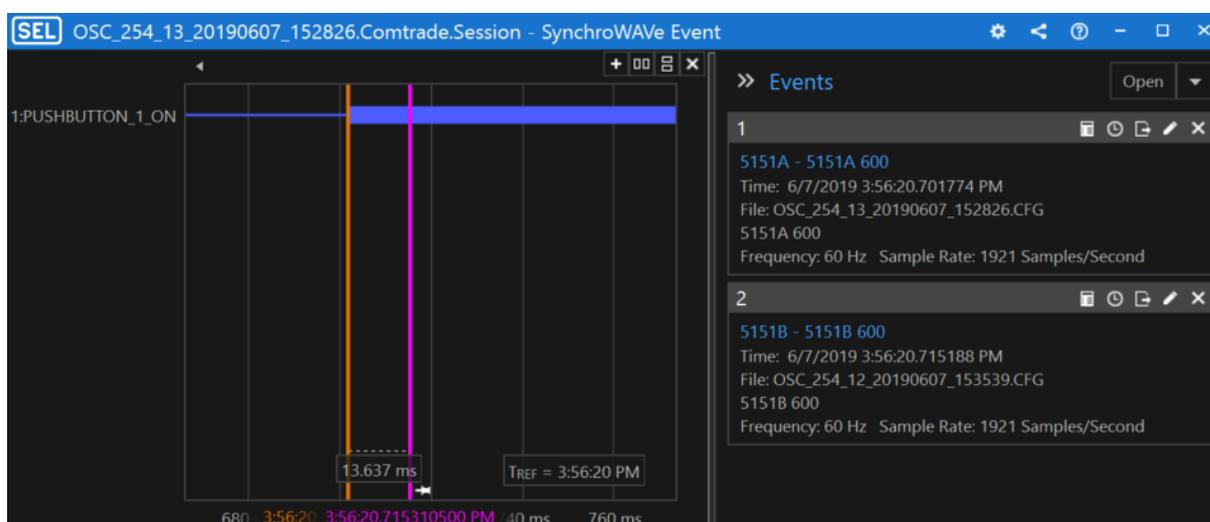
Tomamos como base o evento 3123 disposto na Tabela 7, com atraso medido de 11,32 milissegundos.

Tabela 7 – Evento para análise oscilografica.

Evento A	Relé A	Evento B	Relé B	Latencia ms
4330	Jun 07 2019 15:56:20.701774	3123	Jun 07 2019 15:56:20.713103	11,329

Seus dados foram comparados graficamente, através da sobreposição dos disparos e recebimento, medindo a diferença do tempo. Apesar dos registros representarem um tempo menor de 11,32 milissegundos, o tempo representado no gráfico da Figura 46 ficou em 13,63 milissegundos. Esta diferença se dá pelo tempo de processamento para a geração do arquivo de oscilografia no relé cliente.

Figura 46 - Análise de Oscilógrafia.



Fonte: Imagem Autoria Própria software SynchroWave Event Comtrade

O segundo evento analisado, 3120, disposto na Tabela 8, teve atraso medido de 11,318 milissegundos.

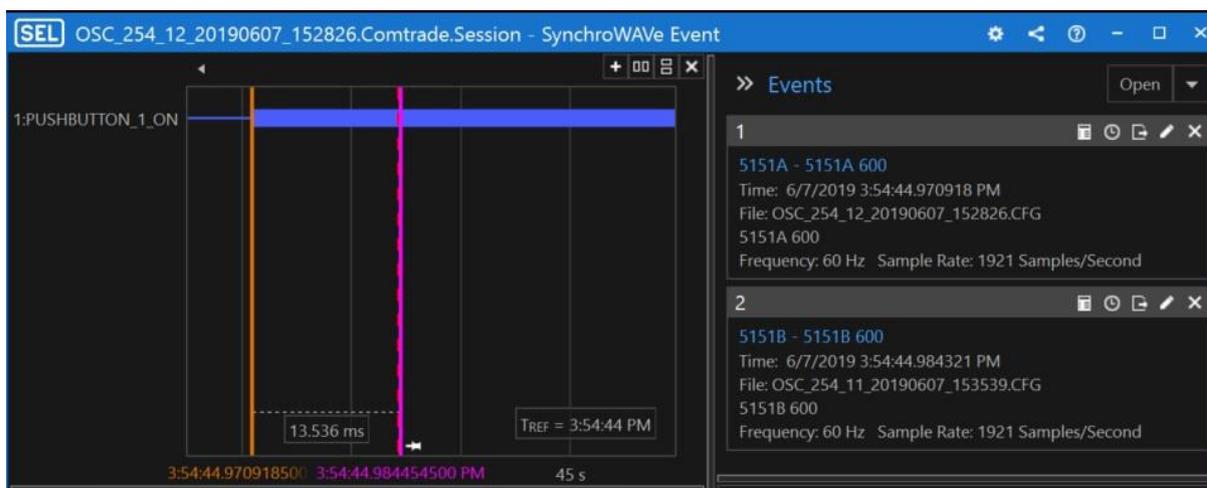
*Tabela 8 - Segundo evento oscilógrafia.*

Evento A	Relé A	Evento B	Relé B	Latencia ms
4325	Jun 07 2019 15:54:44.970918	3120	Jun 07 2019 15:54:44.982236	11,318

Fonte: Resultado medição de tempo Microsoft Excel

No segundo caso analisado graficamente, medimos também a diferença do tempo. Apesar dos registros também representarem um tempo menor de 11,318 milissegundos, o tempo representado no gráfico da Figura 47 ficou em 13,536 milissegundos. Esta diferença se confirma pelo tempo de processamento para a geração do arquivo de oscilógrafa no relé cliente.

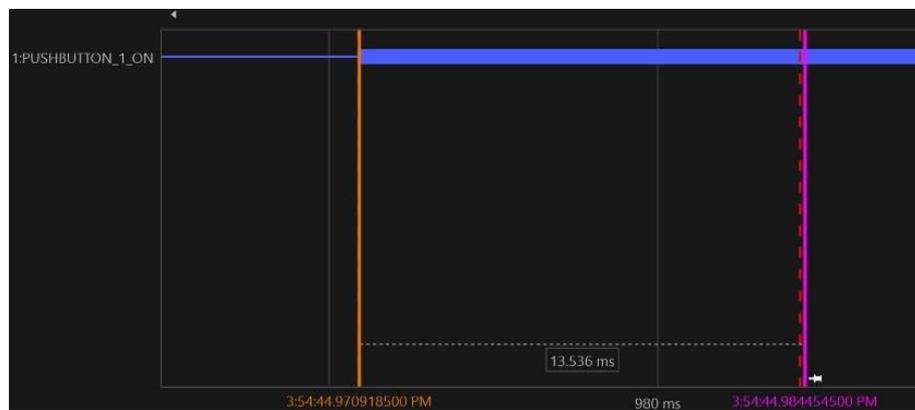
*Figura 47 - Análise de oscilógrafia do segundo caso.*



Fonte: Imagem Autoria Própria software SynchroWave Event Comtrade

Na Figura 48 temos o detalhamento da oscilografia obtida através da análise gráfica dos disparos.

*Figura 48 - Detalhamento análise grafica.*



Fonte: Imagem Autoria Própria software SynchroWave Event Comtrade

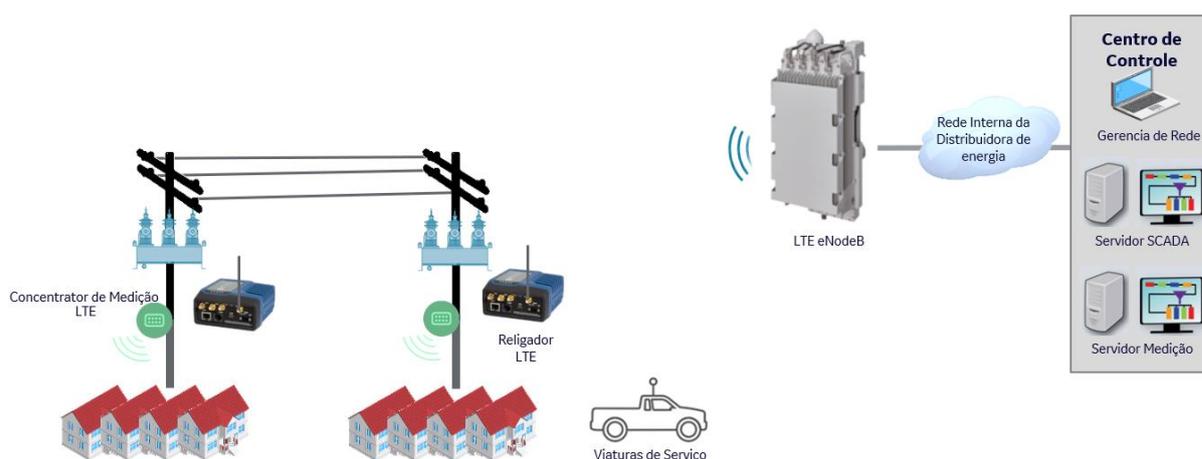
## 9. LTE OTIMIZADO

A partir dos resultados da utilização do rádio WiMAX para o transporte da informação, foi implementada a mesma configuração de classificação e agendamento de pacotes QoS UGS em uma rede LTE (3GPP, 2013).

### • Esquema LTE

Para simularmos o tráfego de rede entre dois equipamentos de proteção de uma rede de distribuição, foi criada uma topologia de rede que integra um sistema de gerência, um switch gerenciável, GPS para sincronismo de tempo, computadores para gerar o tráfego da medição inteligente e os dois equipamentos que transmitem e recebem as mensagens GOOSE, como na Figura 49.

Figura 49 - Topologia proposta para o LTE.



Fonte: Diagrama Autoria Própria

### • Laboratório GE REASON

Para a realização do ensaio, foi utilizado o laboratório da empresa GE REASON na cidade de Florianópolis, em Santa Catarina. Os dados foram capturados e analisados utilizando a infraestrutura existente, que simula o centro de controle de uma central de distribuição de energia. Este laboratório (Figura 50) faz parte do centro de desenvolvimento de novas soluções da GE Brasil.

Figura 50- Laboratório de desenvolvimento GE Reason.



Fonte: Imagem Autoria Própria Laboratório GE Reason

### 9.1. Sincronismo de tempo via PTP (Precision Time Protocol IEEE-1588)

O ensaio inicial apresentou atraso de sincronismo, por conta do protocolo NTP, nativo no Microsoft Windows, que não oferece precisão suficiente para o cálculo de atraso em uma situação sensível ao milissegundo. No segundo experimento o sincronismo adotado foi o IRIG-B, cabo físico coaxial que transportava o sincronismo com uma boa precisão, mas dependia de uma conexão física ótica ou coaxial, já no último experimento utilizando a rede LTE, implementamos o sincronismo através do protocolo PTP, que pode ser transportado através de uma rede ethernet ou de fibra ótica e tem precisão na casa de microssegundos.

Para o laboratório foi utilizando o GPS da marca Reason, que configurado como Master Clock, gerou sincronismo para todos os equipamentos da rede Figura 51.

Figura 51 - GPS Sincronismo de tempo Reason RT434.



Fonte: Imagem Autoria Própria laboratório equipamento remoto.

## 9.2. Montagem Rádio LTE

O rádio base foi montado em uma bancada, conectado diretamente no *switch* através de uma conexão ethernet via cabo de cobre. A Figura 52 apresenta a disposição das antenas e a conexão com a rede elétrica.

Figura 52 - Radio Base EnoB Airspan.



Fonte: Imagem Autoria Própria laboratório radio base e sistema de gerência

## 9.3. Configuração da radio BASE

Como nos testes utilizando a tecnologia WiMAX, foram replicadas as mesmas configurações de priorização e proporcionalidade de recebimento e transmissão, simulando uma operação normal de transmissão entre dois sistemas síncronos. Foi alterada a configuração de proporção priorizando a transmissão de envio das mensagens do relé para 40% e deixando o recebimento em 40%. Como soluções de automação necessitam de mais envio de dados do que recebimento (Cheng, Wang, Zhen, & Wang, 2011), o estudo aproveita a tecnologia de adaptação de proporção disponível na tecnologia LTE, para simular uma aplicação de campo onde os equipamentos seriam interrogados e por conseguinte enviariam uma grande quantidade de dados. Na Figura 53 pode-se observar esta proporção aplicada na configuração do sistema.

Figura 53 - Proporção de envio e recebimento otimizada.

Edit Cell Radio Profile	
<b>General</b>	
Name	AH4200-3405MHz TDD 1
Profile Type	User defined profile
Hardware Category	AirHarmony
<b>RF Properties</b>	
CBRS	<input type="checkbox"/>
	<a href="#">Configure Frequency and Band</a>
EARFCN	41640
Downlink Frequency (MHz)	3405
Uplink Frequency (MHz)	3405
Band	42
Additional Spectrum Emission	NS 01
Duplex Mode	TDD
Bandwidth (MHz)	10
MFB	<input type="checkbox"/>
TDD Frame Configuration	1: DL 40%, UL 40%, SP ...
Special SubFrame (SSF) Configuration	SSF 7
Tx Power (dBm)	20

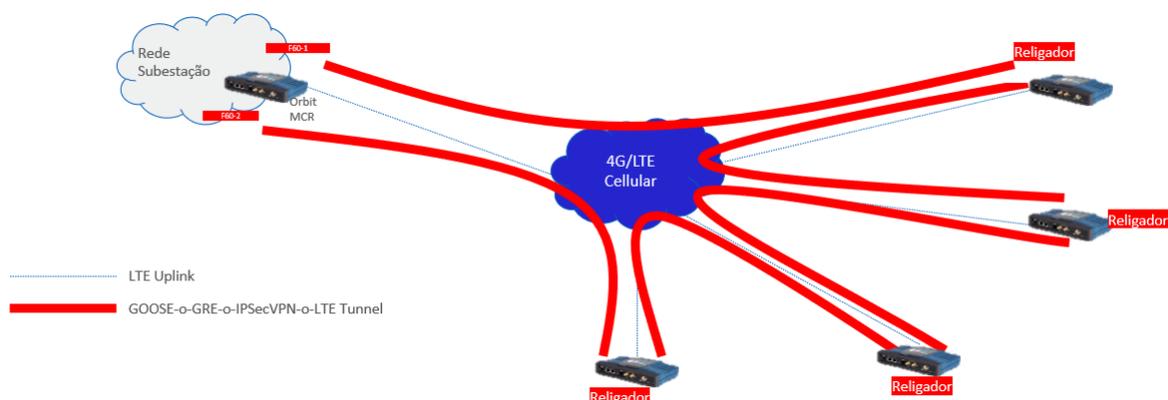
Fonte: Imagem Autoria Própria tela de configuração equipamento Airspan

#### 9.4. Transportando mensagens GOOSE dentro de uma rede LTE

Como a tecnologia LTE foi desenvolvida para comunicação celular de topologia estrela e direcionada para a aplicação de transporte de informação para internet, seus clientes podem se comunicar entre eles usando camada 3 TCP/IP, mas a tecnologia não tem suporte para a comunicação em camada 2 (MAC para MAC).

Para que estes pacotes pudessem ser transportados entre os modems remotos, foi preciso encapsular o protocolo dentro de um túnel GRE, que cria uma ponte de camada 2 lógica dentro de um link de camada 3. O projeto desenvolvido por (Ferrari, et al., 2015) foi usado como base para a construção da topologia de rede e com isso cada quadro IEC61850 GOOSE ou pacote de sincronismo de tempo IEEE 1588 pode ser transportado dentro de uma rede celular, como na Figura 54.

Figura 54 - Transporte de GOOSE dentro do LTE.

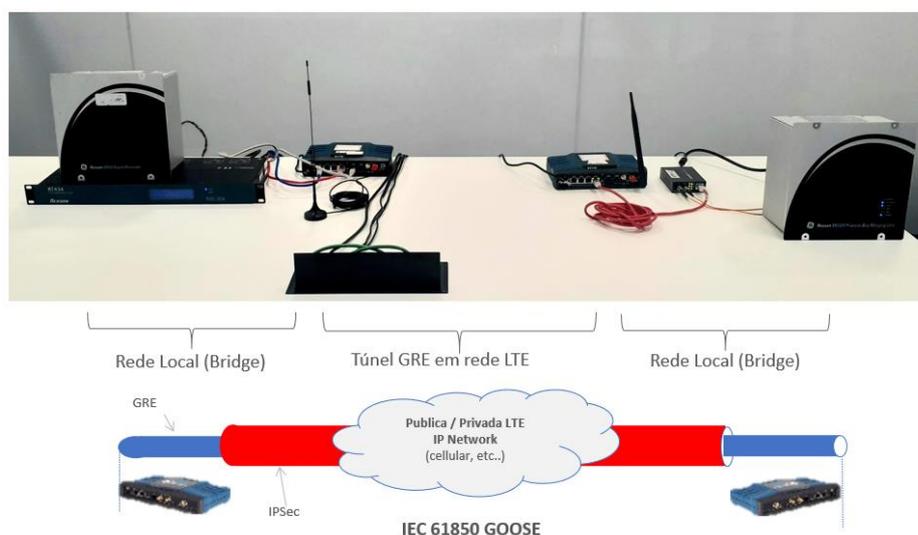


Fonte: Diagrama Autoria Própria Microsoft Power Point

- **Laboratório IEC em rede LTE**

A Figura 55 apresenta a “ponte” criada para transportar a informação de Camada 2. Apesar dos testes terem sido executados em uma rede privada, a mesma configuração pode ser replicada em um sistema LTE de rede pública de operadora, onde seus recursos seriam compartilhados com outros usuários, fazendo com que a rede tenha suas variações de tempo de entrega dos pacotes por conta do volume. Mesmo assim, informações de Camada 2 poderiam ser transportadas entre os equipamentos e os pacotes em atrasos poderiam ser descartados de acordo com a aplicação.

Figura 55 - Ponto de transporte de camada 2.

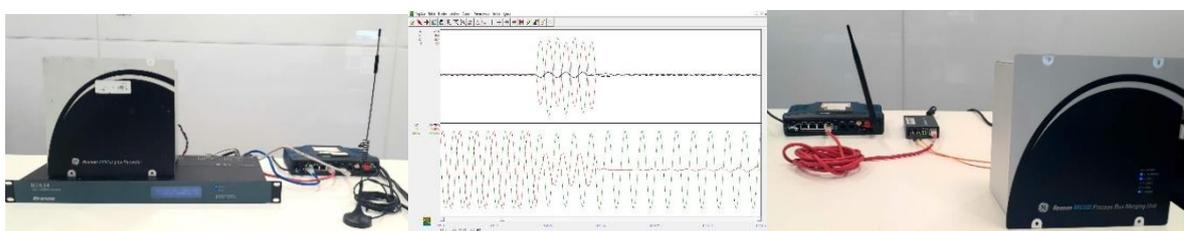


Fonte: Imagem Autoria Própria Laboratório GE Reason

### 9.5.Registro dos pacotes GOOSE

Para registrarmos o tempo entre a geração e o recebimento dos pacotes GOOSE, no ensaio, apresentado na Figura 56, foi montado utilizando uma Process Bus Merging Unit GE Reason MU320 que simulou o recebimento físico de uma perturbação. Do outro lado foi utilizado um Digital Recorder GE Reason DR60 para receber a informação da perturbação via mensagem GOOSE e alterar o estado de um dos seus interruptores digitais.

Figura 56 – Ensaio de Integração.

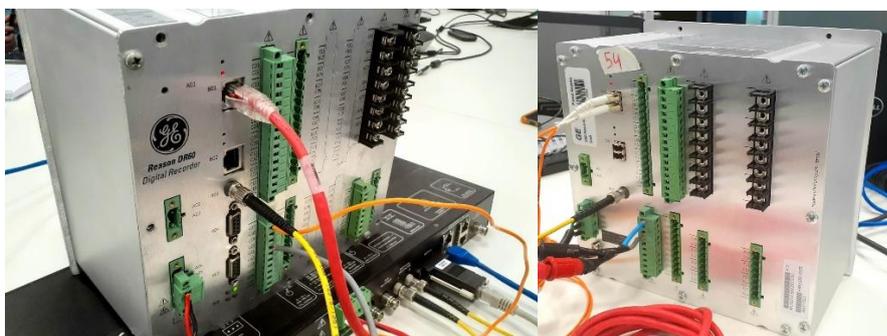


Fonte: Imagem Autoria Própria Laboratório GE Reason

- **Conexão física dos registradores**

Para simular uma perturbação constante com tempo definido, foi utilizada a saída pulsada de tempo do GPS configurada para um pulso por segundo, conectada diretamente a um Merging Unit, que cria o disparo da mensagem GOOSE. No lado Oscilógrafo DR60 é extraída esta informação de forma física utilizando sua saída digital que replicava a mesma informação recebida pela mensagem GOOSE. Na Figura 57 é mostra a conexão de entrada digital e a saída no registrador de perturbações.

Figura 57 - Conexão física com as portas digitais.



Fonte: Imagem Autoria Própria Laboratório GE Reason

- **Sincronismo de Tempo PTP Reason RT434**

Para tornar o ensaio o mais preciso possível, foi utilizado o protocolo PTP (IEEE 1588) gerado pelo GPS Reason RT434. Baseado em rede Ethernet, o protocolo PTP é capaz de ajustar o tempo de atraso sofrido ao passar pelas diversas conexões de rede entre o gerador e o receptor da informação do tempo (Hou & Dolezilek, 2008).

Esta informação foi propagada dentro da rede e foi usada como base de sincronismo para a medição correta do atraso entre os pacotes. O RT434 suporta saídas NTP, 1588v2, PPS, PPM e IRIG-B, configuradas através da interface WEB (Figura 58). Três perfis PTP estão disponíveis: Perfil de energia PTP C37.238-2011, 2017 e perfil PTP para Power Utility Automation (IEC 61850-9-3: 2016), IEEE 1588 | PrecisionTime Protocol(PTP), com precisão de nanosegundos e com a possibilidade de trabalho com múltiplos Master Clocks.

O IEEE 1588 e IEC / IEEE 61850-9-3 são protocolos de camada 2 totalmente compatíveis e podem funcionar juntos sem restrições na mesma rede, por isso foi utilizado para simular uma rede completa com sincronismo.

Figura 58 - Tela de configuração RT434.

RT434 GNSSE Grandmaster Clock <small>powered by GE Grid Solutions</small>	
<b>Status</b>	Status
<b>General Information</b>	Equipment
<b>Ethernet</b>	Locked 7 satellites
<b>Time Settings</b>	Antenna Ok
<b>Time Signals</b>	Alarm None
<b>PTP</b>	Time
<b>Setup</b>	Local time 2020 Oct 21 14:50:16
<b>Event Log</b>	UTC time 2020 Oct 21 17:50:16
	Time offset -03:00
	Timezone -03:00
	Standard time
	Position
	Latitude S 27° 32' 26.02"
	Longitude W 048° 30' 17.58"
	Altitude 18 m
	PTP
	Time Traceable Yes
	UTC Offset / is valid 37 s / Yes
	GM Time Inaccuracy 80 ns
	GM Clock Identity 00:50:c2:ff:fe:15:66:80
	Port State 1 PTP_MASTER
	Port State 2 PTP_MASTER
	Port State 3 PTP_MASTER
	Channels
	Sat # C.No (db-Hz) Az (degrees) Elev (degrees)
	34 0 140.0 44.0
	23 0 71.0 21.0
	32 0 112.0 66.0
	32 0 324.0 18.0
	34 0 203.0 56.0
	31 0 243.0 43.0
	30 0 220.0 9.0

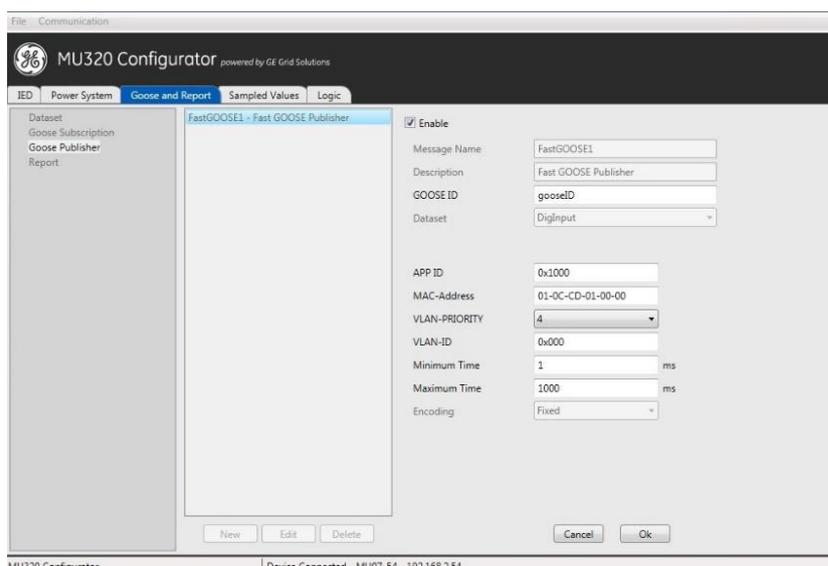
Fonte: Imagem Autoria Própria tela de configuração do equipamento RT434

- **Registro IEC 61850 GE Reason MU320 Process Bus Merging Unit**

MU320 é uma interface de “sampled value” IEC 61850-9-2LE com transformadores convencionais de corrente e tensão, que gera pacotes GOOSE para integração com sistemas de proteção.

As novas tecnologias para redes inteligentes trouxeram muitos benefícios no campo das redes de transmissão e distribuição. A tecnologia digital Station Bus está amplamente difundida para fornecer um sistema de baixo custo para atender às demandas crescentes por padrões mais elevados em automação de energia. O equipamento Reason MU320 complementa a solução de subestação digital, facilitando a conexão de transformadores de corrente e tensão convencionais a soluções de automação de subestação modernas através da IEC 61850-9-2LE. As soluções de Process BUS também eliminam a necessidade de cabos cobre para trazer a medição de um TC, pois o sinal é transmitido através de mensagens na rede Ethernet com alta precisão, reduzindo drasticamente os custos com obras civis para a passagem de cabeamento e as conexões físicas. A Figura 59 apresenta a configuração do equipamento com os parâmetros de envio das mensagens GOOSE e o tempo máximo para o recebimento da confirmação dos pacotes.

Figura 59 - Tela de configuração MU320.



Fonte: Imagem Autoria Própria tela de configuração do equipamento MU320

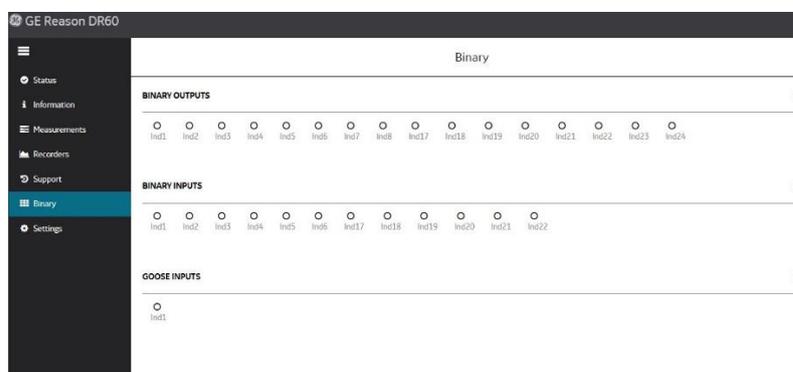
- **GE Reason DR60 Digital Recorder**

O Reason DR60 é um registrador de falhas (Oscilógrafo) compactado em um só gabinete. Conta com diversas entradas digitais e analógicas, com comunicação através do protocolo IEC61850 Edição 2 e protocolos de sincronização como MMS (Manufacturing Message Specification), GOOSE e PTP.

Uma de suas funções é fazer o registro de perturbações e mudanças de estado em uma rede de distribuição. Estas informações ficam gravadas em forma de oscilografias com o alinhamento e precisão do relógio IEEE 1588 fornecido pelo GPS da rede.

Na Figura 60 é exibida a tela que mostra o estado das saídas digitais do registrador de falhas. Com ela foi possível monitorar a alteração do estado da porta digital de entrada 1, que foi usada como réplica da informação recebida pela mensagem GOOSE.

Figura 60 - Tela de configuração GE Reason DR60.



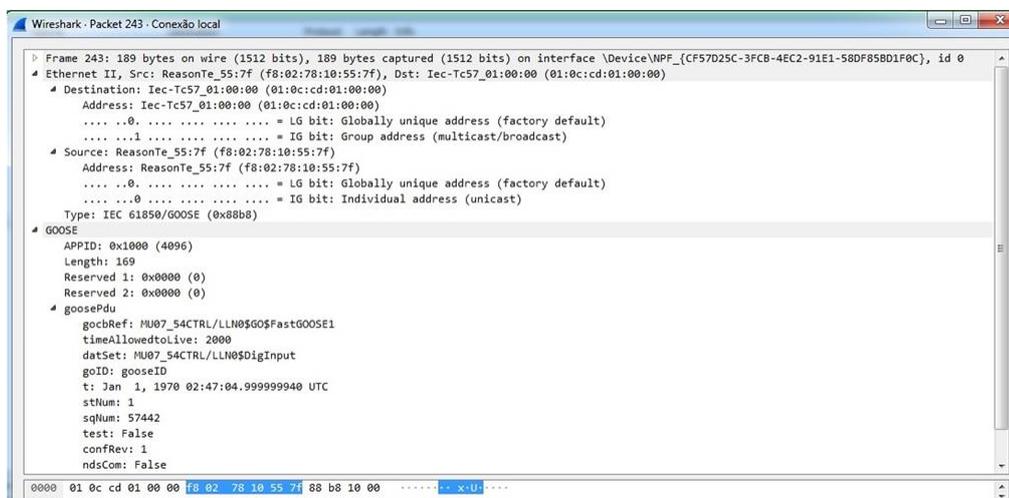
Fonte: Imagem Autoria Própria tela de configuração do equipamento DR60

- **Recebimento de mensagens IEC 61850 GOOSE através de rede LTE**

Para atestar o recebimento das mensagens enviadas pela Merging Unit e seus tempos de atraso, foi utilizado o software Wireshark, um analisador de rede, como meio de captura e análise das informações. O software foi configurado para identificar o tipo específico de pacote, como no caso das mensagens GOOSE, e, com isso filtrar este pacote para análise. Com essa informação foi possível comprovar que a rede estava transportando os pacotes GOOSE por dentro do túnel

GRE da rede LTE. A Figura 61 mostra o Wireshark capturando uma mensagem GOOSE na rede.

Figura 61 - Captura do pacote de informação GOOSE.

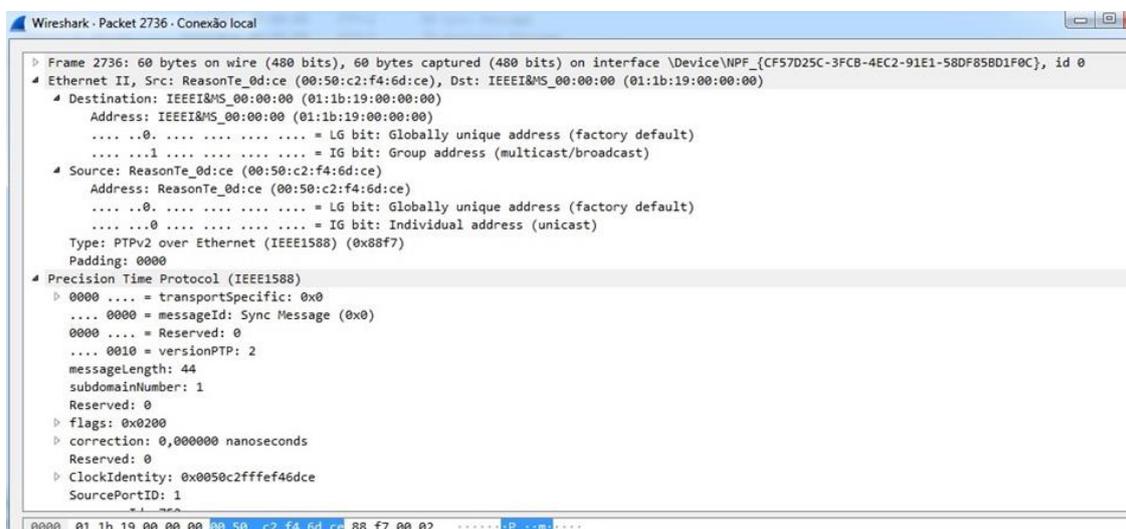


Fonte: Imagem Autoria Própria software analisador de pacotes Wireshark

- **Recebimento do sincronismo de tempo PTP IEEE1588 através da rede LTE**

Utilizando o mesmo princípio do teste anterior, que isolava as mensagens GOOSE trocadas entre os dispositivos utilizando o software Wireshark, foram refeitos os testes aplicando o filtro para mensagens do protocolo PTP, assim foi possível comprovar que os pacotes de sincronismo de tempo IEEE 1588 estavam sendo transportados por dentro do túnel GRE da rede LTE. A Figura 62 mostra o Wireshark capturando uma mensagem PTP 1588 na rede.

Figura 62 - Captura do pacote de informação PTP IEEE 1588.



Fonte: Imagem Autoria Própria software analisador de pacotes Wireshark

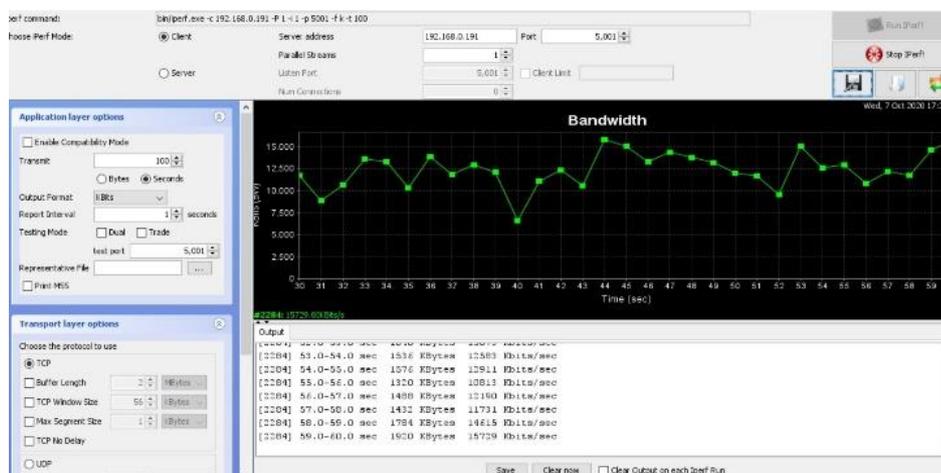
- **Análise da Velocidade**

O *software* de licença livre Jperf foi usado novamente para gerar uma perturbação de rede, simulando tráfego de rede gerador por todos os serviços. Este tráfego, com prioridade baixa, foi utilizado para estressar a priorização utilizada no experimento e verificar o atraso provocado por cada nível de intervenção.

A ideia foi simular a utilização da mesma rede em uma aplicação de multisserviços, onde religadores e medidores inteligentes com prioridades distintas estressavam os limites de velocidade do sistema.

A seguir, na Figura 63, segue o demonstrativo de simulação do limite de envio de informações partindo do cliente em sentido ao centro de controle, utilizando um túnel GRE como meio de tunelamento.

Figura 63 - Software Jperf Gerador de perturbação de rede.



Fonte: Imagem Autoria Própria software gerador de dados Jperf

A medição de velocidade alcançada foi de 12 Mega bits por segundo, tendo em vista as limitações causadas pelo túnel GRE. Esta velocidade ainda é alta o suficiente para transportar os pacotes de medição e controle dos equipamentos de automação, que demandam em média 1 Mega bit por segundo.

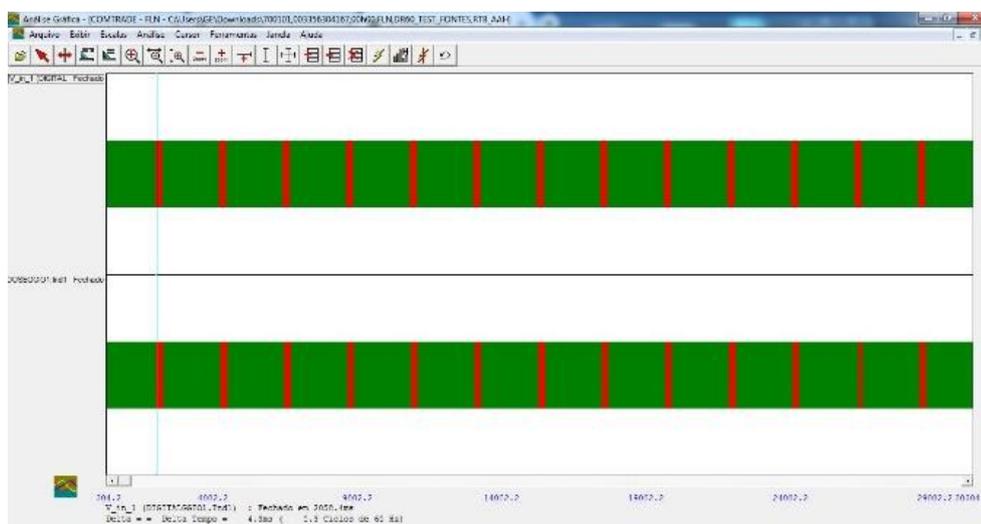
## 10. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Como foi adotado o sinal digital de segundo (sinal PPS, pulso por segundo) do equipamento GPS, como base para o disparo da mensagem GOOSE, foram feitas medições de tempo para o envio e o recebimento da mensagem, para assim certificar que os dois parâmetros se enquadravam nos limites estabelecidos pela norma IEC 61850, referentes aos tempos para as mensagens GOOSE.

### 10.1. Relatório do tempo apurado nos testes

Para comparação de atraso, os relatórios de evento do gerador dos disparos e do registrador de falhas receptor foram confrontados na Figura 64. Como os equipamentos estavam em sincronismo de tempo preciso, a diferença entre o tempo de envio e o recebimento foi adotado como o atraso provocado pelo sistema de rádio LTE. Não foram levados em consideração o tempo para o transporte desta informação dentro do *switch* ou o atraso no processamento para o transporte desta informação dentro de um túnel GRE.

Figura 64 - Análise dos registros.



Fonte: Imagem Autoria Própria software analisador de oscilografia Análise Reason

No disparo inicial o sistema tenta acomodar o primeiro pacote GOOSE junto a próxima transmissão de informação, aproveitando a pré-reserva feita na configuração inicial. Com isso consegue-se garantir de forma determinística uma latência de menos de 30 milissegundos, apresentado na Figura 65.

Figura 65 - Comparação de atraso do disparo x recebimento.



Fonte: Imagem Autoria Própria software analisador de oscilografia Análise Reason

Após a estabilidade do sistema com a constância dos recebimentos dos pacotes, o sistema se adapta e começa a classificar os pacotes com mais precisão, reservando uma entrega constante para as mensagens GOOSE, estabilizando em 25 milissegundos, como apresentado na Figura 66.

Figura 66 - Comparação disparo GOOSE x Recebimento.



Fonte: Imagem Autoria Própria software analisador de oscilografia Análise Reason

## 10.2. Quadro resumo

Os relatórios de eventos e suas medias resultantes foram compilados no quadro resumo da Tabela 9, onde cada cenário foi discriminado e a respectiva configuração ensaiada foi especificada. Cada latência representa a média aritmética dos valores obtidos durante os ensaios.

Tabela 9 - Quadro Resumo dos eventos

Cenário de teste	Configuração	Ensaio	Latência Milissegundos
<b>Cenário WiMAX inicial sincronismo NTP</b> Radio Base Siemens Ruggedcom WIN7258 Radio Cliente Siemens Ruggedcom WIN5258	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Frequência 5.8 GHz, Banda 10 MHz</li> <li>• Proporção TDD 60% downlink e 40% uplink</li> <li>• Disparo mensagem GOOSE Shweitzer modelo SEL 451</li> <li>• Injeção de Perturbação Classificação BE</li> <li>• Sincronismo de Tempo NTP Microsoft Windows</li> </ul>	Sem Perturbação BE	41
		Perturbação Injeção 1 Megabite BE	44
		Perturbação Injeção 50 Megabites BE	57
		Perturbação Injeção 100 Megabites BE	64
<b>Cenário WiMAX Esquema otimizado</b> Radio Base Siemens Ruggedcom WIN7258 Radio Cliente Siemens Ruggedcom WIN5258	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Frequência 5.8 GHz, Banda 10 MHz</li> <li>• Proporção TDD 60% downlink e 40% uplink</li> <li>• Reserva de espaço de 100 kbits por segundo e 5 ms</li> <li>• Disparo mensagem GOOSE GE modelo IED 5142 A</li> <li>• Classificação Agendamento GOOSE UGS</li> <li>• Multiserviço Classificação BE</li> <li>• Sincronismo de Tempo IRIG-B via fibra ótica</li> </ul>	Conexão Fibra	0,8
		Sem classificação de pacotes	26
		Classificação UGS	8
		Registro Oscilografia	11,32
<b>Cenário LTE 3GPP</b> Radio Base Airspan AH 4200 Modem Cliente GE MDS Orbit LTE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Frequência 3.5 GHz, Banda 10 MHz</li> <li>• Proporção TDD 40% downlink e 40% uplink</li> <li>• Disparo mensagem GOOSE GE Reason modelo MU320</li> <li>• Classificação Agendamento GOOSE UGS</li> <li>• Multiserviço Classificação BE</li> <li>• Sincronismo de Tempo PTP IEEE-1588</li> </ul>	Túnel VPN GRE Camada 2 Comunicação M2M Registro Oscilografia	25.8

## 11. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram executamos diversos cenários de simulação para identificar os requisitos técnicos, impactos e limites da utilização de comunicação via rádio para o transporte dos protocolos de automação e proteção. Para obter resultados mais realistas, simulou-se com o máximo de realidade um ambiente de subestação, que se comunicava com equipamentos em uma rede de distribuição a distância, incluindo perturbações de sincronismo de tempo e outros serviços que pudessem impactar ou atrasar a entrega de pacotes, na mesma rede de comunicação.

Os testes de desempenho das mensagens GOOSE tiveram como objetivo medir o tempo gasto por esta mensagem do IED origem até o IED destino. Com o sincronismo dos IEDs foi possível utilizar o log de eventos de cada IED para calcular o intervalo de tempo gasto e gerar as análises gráficas de oscilografia.

Os valores apresentados nos relatórios não representam o tempo total gasto só pelo sistema de comunicação via rádio (WiMAX e LTE), visto que considera o tempo de processamento dos dois equipamentos, mas comprova que o equipamento receptor foi capaz de trabalhar com a informação dentro do tempo previsto para as funções de automação.

A norma IEC 61850 define que o limite para as mensagens de Trip, bloqueio e seletividade (Tipo 1A) estão restritas a uma latência máxima de 10 ms, o que limita sua utilização a uma rede cabeada ou conectada por fibra ótica, visto os resultados obtidos em nosso estudo. Mas podemos considerar que mensagens do TIPO 2 e 7, que tratam da troca de mensagens (Eventos, alarmes e status) e dos comandos enviados pelo sistema SCADA, limitados respectivamente em 100 e 500 milissegundos, podem ser consideradas na comunicação via rádio, visto que atendem aos limites de requisito do protocolo. Tais mensagens do TIPO 2 e 7, podem ser usadas para a interoperabilidade entre os equipamentos de proteção de um sistema de distribuição, indicando mudanças de grupo de proteção, avisos de disparo de proteção ou manobra de fonte, como no caso do *Self Healing* (auto recuperação).

## 12. TRABALHOS FUTUROS

O modelo de configuração proposto para as duas tecnologias e o modo de avaliação, podem ser estendidos à tecnologia 5G, visto que a nova geração do LTE tende a aumentar a velocidade do link entre os equipamentos e diminuir a latência entre os pacotes, para números próximos aos de um link cabeado. Com isso, um novo estudo pode explorar a utilização destas tecnologias para a transmissão de informação de proteção do Tipo 1 (Trip, bloqueios e seletividade) ou Tipo 4 (*Sample Value*), mais sensíveis aos sistemas de telecomunicação via rádio, podendo se aprofundar na interoperação total entre os equipamentos que compõem uma rede inteligente de distribuição de energia.

### 13. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 3GPP. (2013). *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Physical layer procedures (Release 8)*. 3GPP ORG.
- ALCÂNTARA, M. V. (2012). Microrredes inteligentes: Um novo modelo de negócio para a distribuição de energia elétrica. *Osetoreletrico*.
- Al-Omar, B. A., Landolsi, T., & Al-Ali, A. R. (2015). *Evaluation of WiMAX Technology in Smart Grid Communications*. American University of Sharjah, UAE.
- Anatel. (17 de Fevereiro de 2010). *Resolução nº 537*. Acesso em 10 de Maio de 2019, disponível em <http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2010/71-resolucao-537>
- Anatel. (28 de maio de 2019). *Resolução nº 711*. Acesso em 1 de Junho de 2019, disponível em <http://www.anatel.gov.br/legislacao/es/resolucoes/2019/1285-resolucao-711>
- Bandeira, F. (2012). Rede de energia elétrica inteligente (Smart Grids). São Paulo: Bandeira.
- Cheng, P., Wang, L., Zhen, B., & Wang, S. (2011). *Feasibility study of applying LTE to Smart Grid*. 2011 IEEE First International Workshop on Smart Grid Modeling and Simulation (SGMS).
- dos Santos, M. R. (2013). *Metodologias para execução de manobras de paralelismo em redes aéreas de distribuição na operação de tempo real*. São Paulo: Escola Politécnica.
- Ferrari, P., Flammini, A., Loda, M., Rinaldi, S., Pagnoncelli, D., & Ragaini, E. (2015). *First experimental characterization of LTE for automation of Smart Grid*. 2015 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS).
- Forum, W. (15 de Dezembro de 2021). *WIMAX Forum Organization*. Fonte: <https://wimaxforum.org/>
- Gungor, V., Sahin, D., Kocak, T., Ergut, S., Buccela, C., Cecati, C., & Hancke, G. (2011). *Smart grid technologies: Communication technologies and standards*. IEEE Transactions on Industrial Informatics.
- Heldwein, M. L. (2006). *Introdução às redes de distribuição*. UFSC Eletrônica de Potência para Redes Ativas de Distribuição.
- Hou, D., & Dolezilek, D. (2008). *IEEE 61850 - What it can and cannot Offer to Traditional Protection Schemes*. Western Protective Relay Conference.
- Hunt, R. (2008). *Application of digital radio for distribution pilot protection*. IEEE Rural Electric Power Conference.
- IEEE. (2006). *IEEE 802.1Q Standard for Local and metropolitan area networks Virtual Bridged Local Area Networks*. NEW YORK.
- IEEE. (2009). *IEEE 802.16-2009 Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems*.

- International Electrotechnical Commission. (2005). *IEC61850 Communication Networks and systems in substations*. IEC.
- International Energy Agency. (2002). *Distributed generation in liberalised electricity markets*. OECD/IEA.
- Khan, R. H., Brown, J., & Khan, Y. K. (2013). *Pilot Protection Schemes over a Multi-service WiMAX Network in the Smart Grid*. Newcastle, Australia: School of Electrical Engineering & Computer Science.
- Kuzlu, M., Pipattanasomporn, M., & Rahman, S. (2014). *Communication network requirements for major smart grid applications in HAN, NAN and WAN*. Computer Networks.
- Markkula, J., & Haapola, J. (2013). *Impact of Smart Grid Traffic Peak Loads on Shared LTE Network Performance*. IEEE ICC 2013.
- Paulino, M., Siqueira, I., & A., C. U. (2010). *Requisitos para interoperabilidade de IED's e sistemas baseados na norma IEC 61850*. Recife: X STPC - Seminário Técnico de Proteção e Controle.
- Pothamsetty, V., & Malik, S. (2009). *Smart grid leveraging intelligent communications to transform the power infrastructure*. Cisco.
- Ricardo, R., Esposito, A. S., & Teixeira, I. (2013). *Redes Elétricas Inteligentes (Smart Grid): oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico*. São Paulo.
- Sanders, M. (2010). *Object modeling for pilot channel equipment in IEC61850 based devices*. Annual Conference for Protective Relay Engineers.
- Santos, M. H., Ayello, M. F., Pinheiro, P., Pinho, A., Colombini, A. C., & Lopes, Y. (2019). Transferência de Disparo Permissivo por Sobrealcance (POTT) : Avaliação de Desempenho na Comunicação. *Anais Do Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos 2020. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE2020*, (pp. 1-7). doi:10.48011/sbse.v1i1.2219
- Siemens Ruggedcom Produtos. (01 de Maio de 2018). (Siemens) Acesso em 1 de Julho de 2019, disponível em [www.siemens.com.br/ruggedcom](http://www.siemens.com.br/ruggedcom)