

# AVALIAÇÃO DE TOPOLOGIAS DE REDE PARA A AUTOMAÇÃO DE SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS BASEADAS NO PADRÃO IEC61850

**David Leonardo Acosta Molano**

Orientador:  
Carlos Alberto Malcher

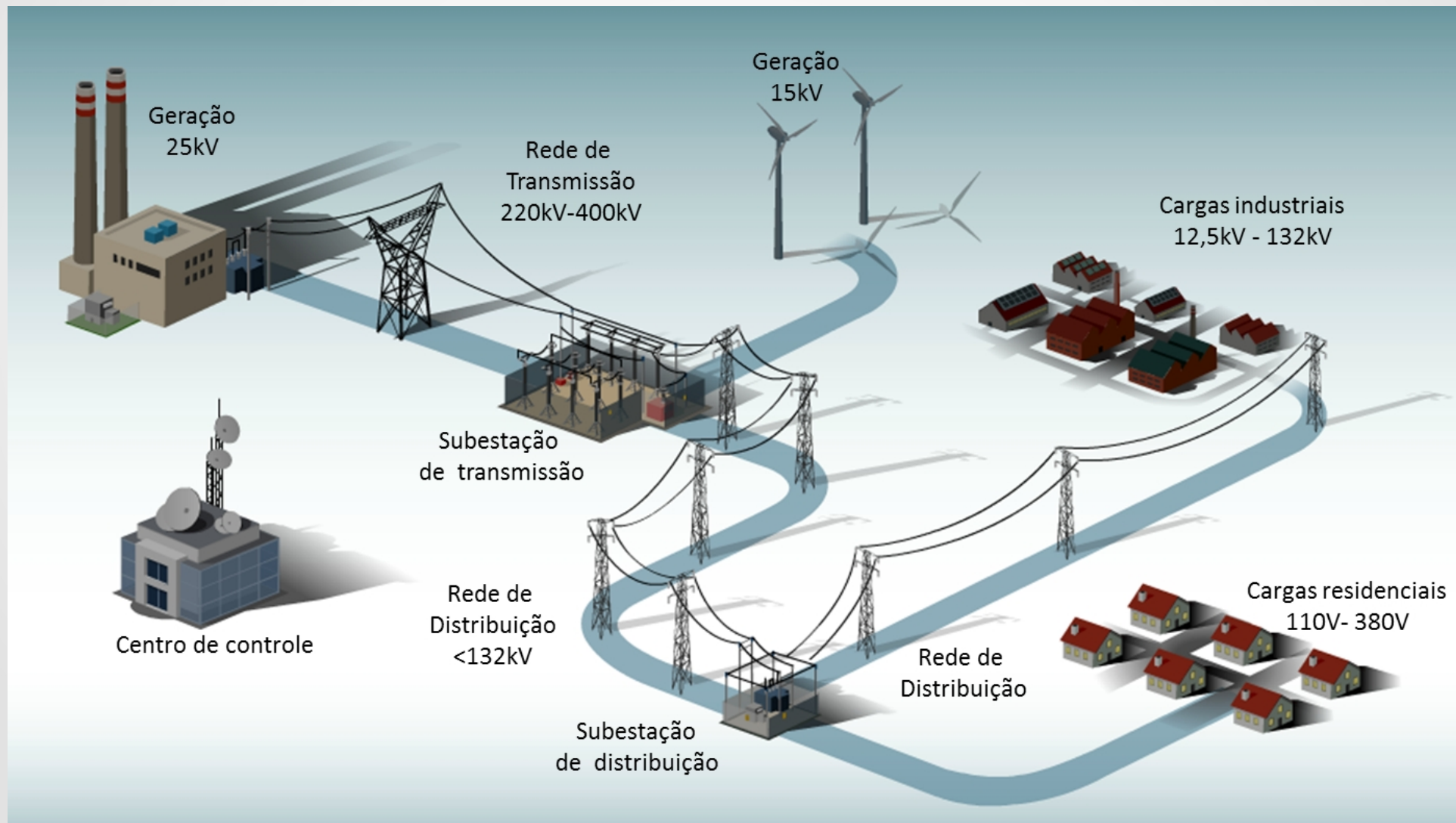
Co-orientadora:  
Natalia Fernandes

Janeiro 2014

# Sumário

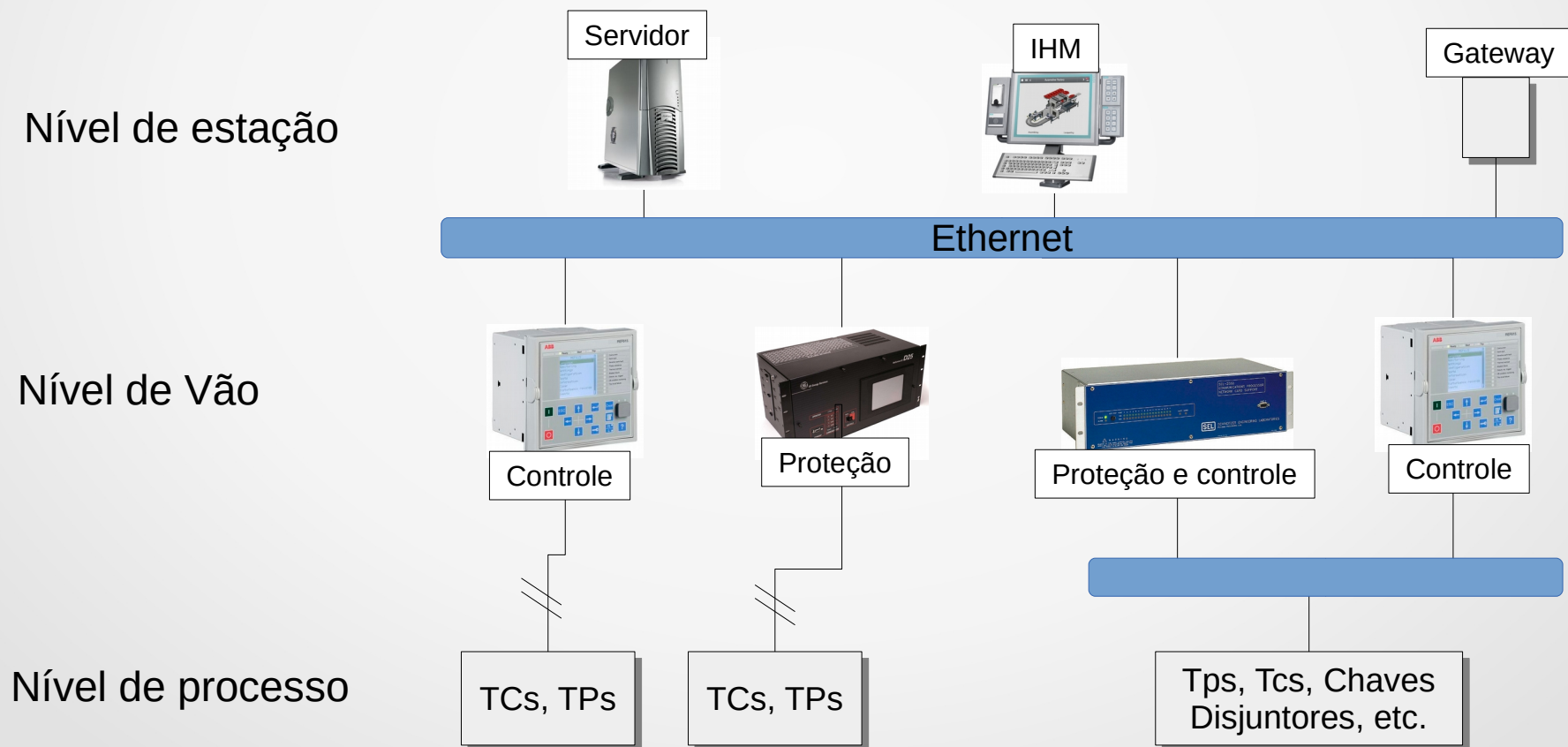
- Introdução
- Norma IEC 61850
- Redes de comunicação em SAS
- Modelagem
- Cenários de simulação
- Resultados
- Observações finais

# Introdução



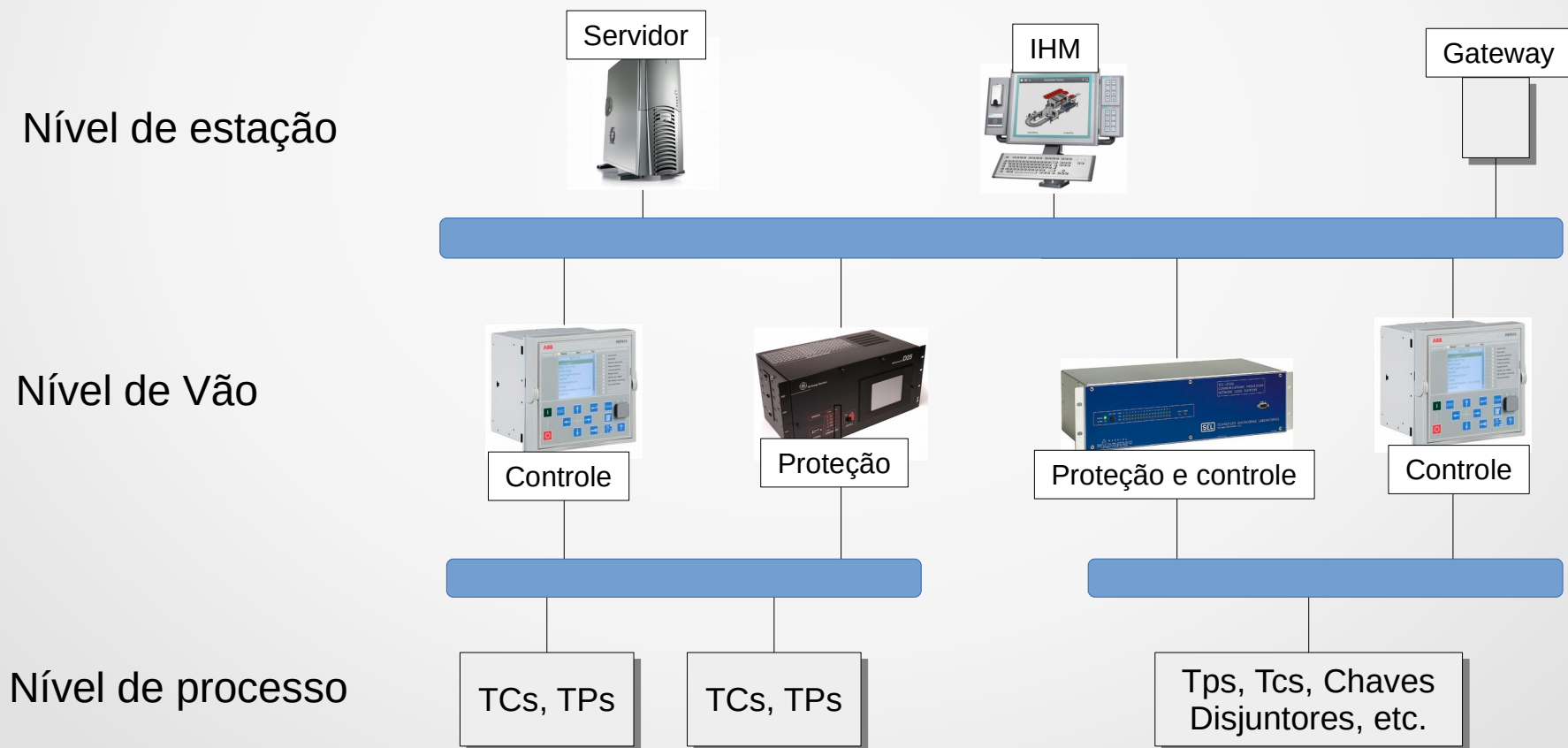
# Introdução

- SAS: Conjunto de dispositivos interligados que monitoram, protegem e operam a rede elétrica.



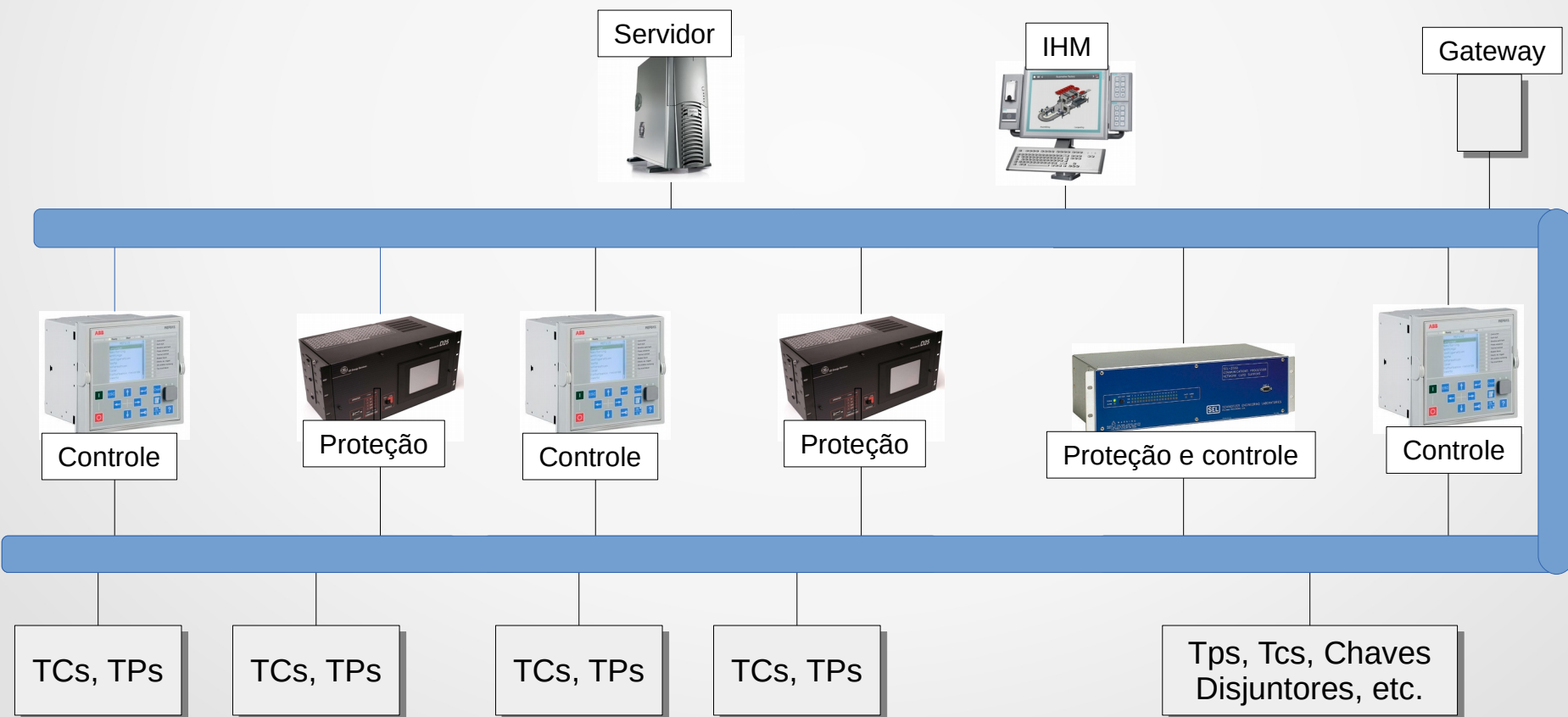
# Introdução

- SAS: Conjunto de dispositivos interligados que monitoram, protegem e operam a rede elétrica.



# Introdução

- SAS: Conjunto de dispositivos interligados que monitoram, protegem e operam a rede elétrica.



# Introdução

## Objetivo Geral

- Avaliar os atrasos nas topologias de rede de comunicação em subestações
  - IEC61850
    - GOOSE, *Sampled Value*, MMS
    - PRP (*Parallel Redundancy Protocol*)

# Introdução

## Objetivos específicos

- Desenvolver os módulos de simulação que permitam avaliar redes de dados em SAS.
- Avaliar o impacto na rede de dados do tráfego de *Intelligent Electronic Devices* (IEDs) e *Merging Units* (MUs)
  - Considerando topologias típicas de subestações:
    - Anel, Estrela, Híbrida
  - Analisar a latência na transmissão de mensagens GOOSE e *Sampled Values*



# Norma IEC 61850

- Garantir interoperabilidade entre dispositivos
- Suportar a evolução de tecnologias
- Possibilitar a comunicação com alta velocidade e confiabilidade

# Norma IEC 61850

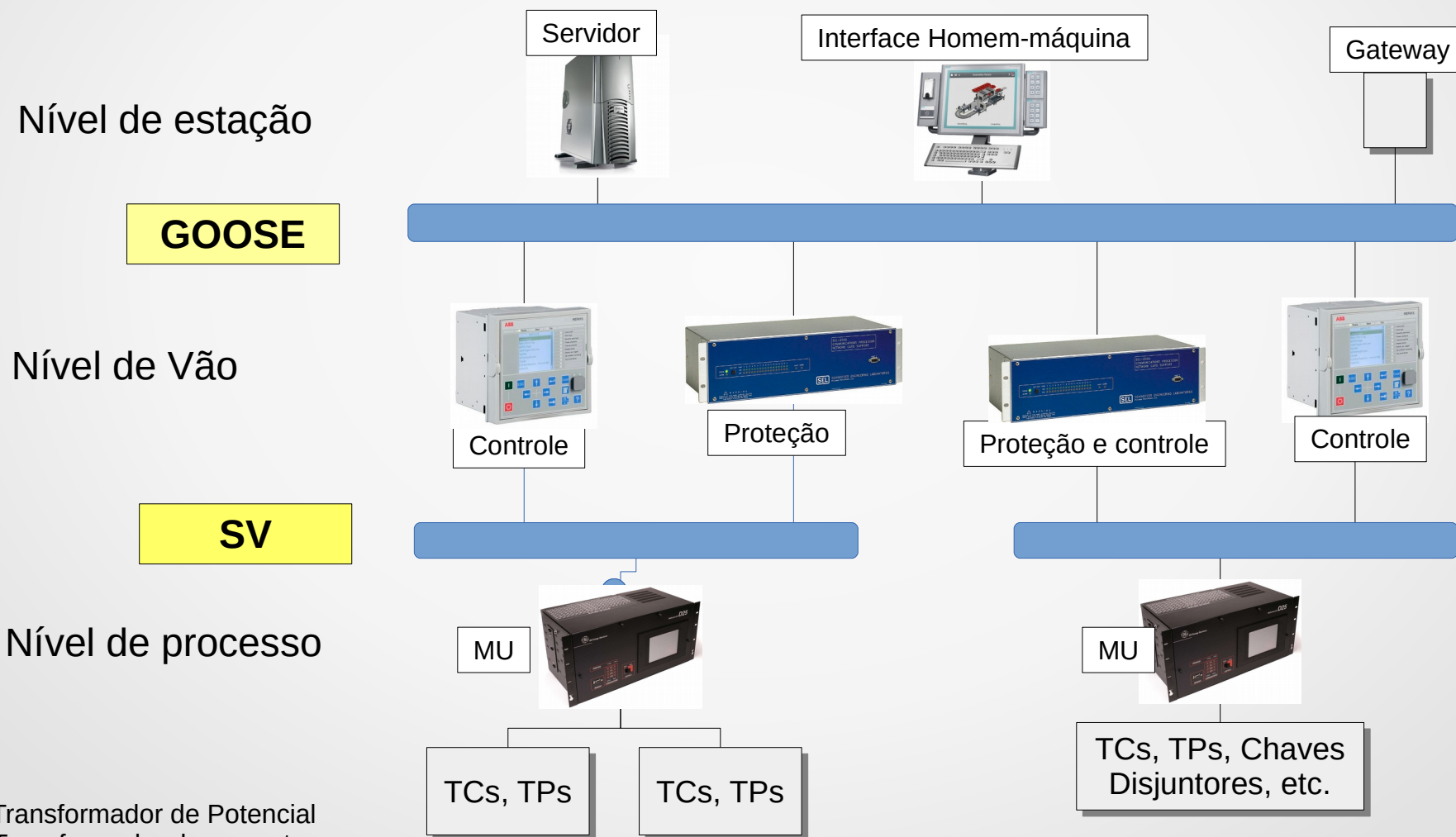
## Mensagens de restrição crítica

- GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Event*)
- *Sampled Values (SV)*

## Mensagens de restrição menos crítica

- MMS (*Manufacturing Message Specification*)
  - Mensagens de supervisão e controle

# Norma IEC 61850



TP: Transformador de Potencial  
TC: Transformador de corrente

# Norma IEC 61850

## Tipos de mensagens

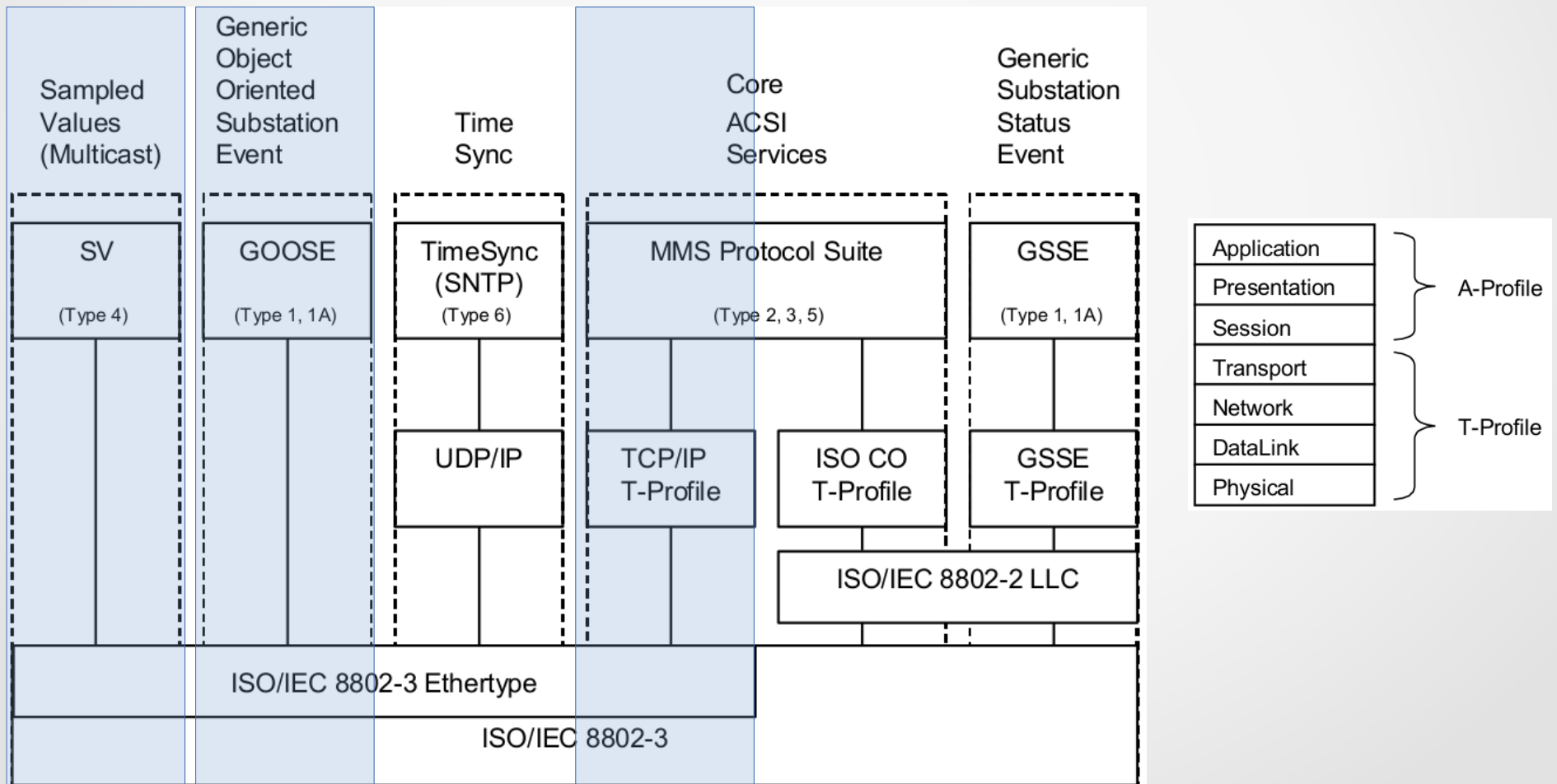
Tipo	Mensagem	Exemplos	Classe	Latência máxima
<b>1A</b>	<b>GOOSE</b>	<b><i>Trips</i></b>	P1 P2 e P3	<b>10 ms</b> <b>3 ms</b>
1B	GOOSE	Comando, mensagens simples	P1 P2 e P3	100 ms 20 ms
2	MMS	Medições	-	100 ms
3	MMS	Parâmetros	-	500 ms
<b>4</b>	<b>SV</b>	<b>Dados de transdutores e transformadores de instrumentação</b>	P1 P2 e P3	<b>10 ms</b> <b>3 ms</b>
5	MMS	Arquivos grandes	-	~1000 ms
6A 6B	TimeSync	Barramento de estação Barramento de processo	-	+/- 1 ms +/- 4 us e +/- 25 us
7	MMS	Comando da estação HMI	-	~500 ms

Classe P1: Vão de distribuição

Classe P2 e P3: Vão de transmissão

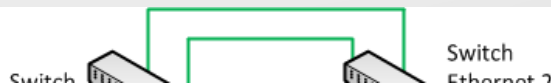
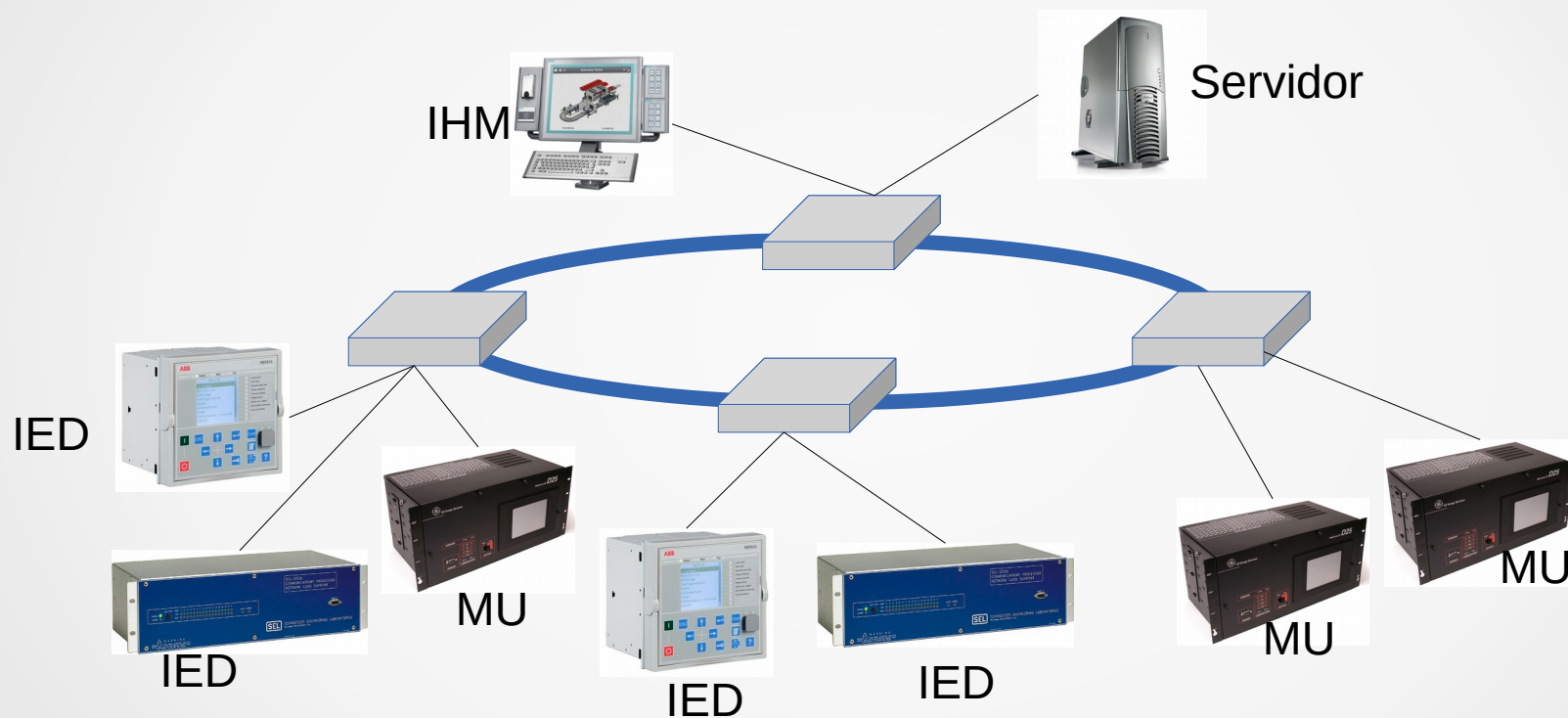
# Norma IEC 61850

## Pilha de protocolos usada pela norma



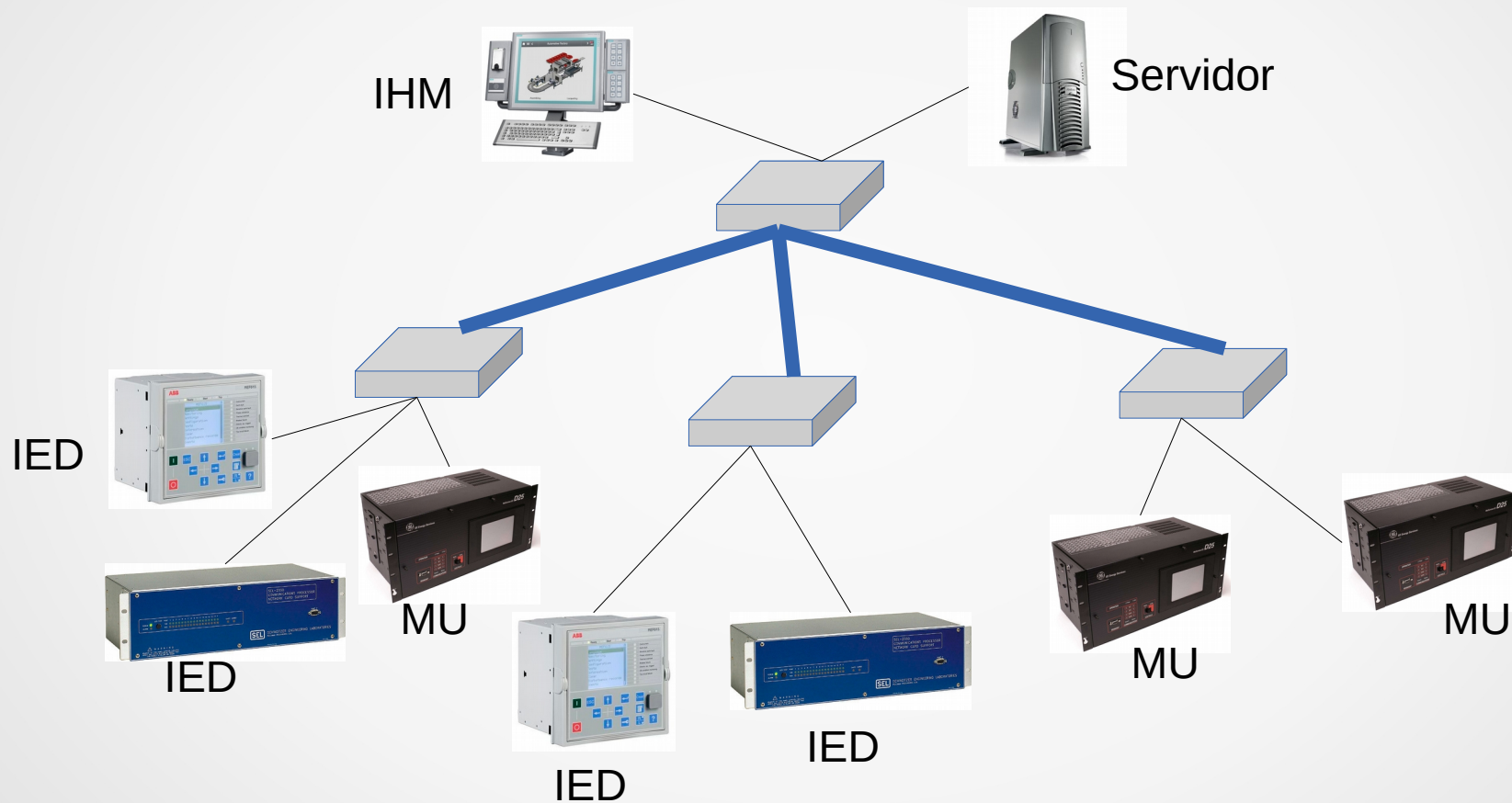
# Topologias de rede de comunicação em SAS

## Anel



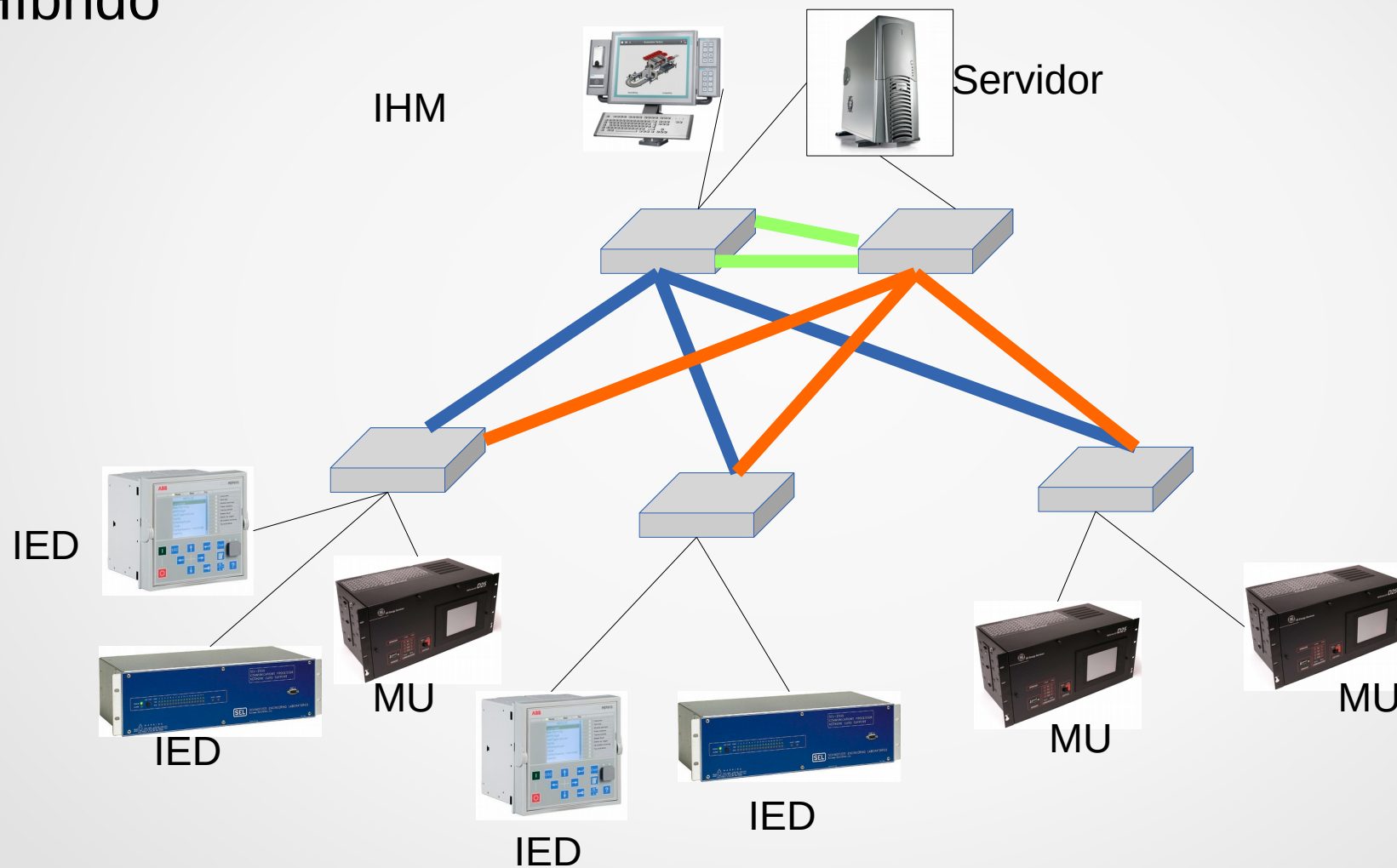
# Topologias de rede de comunicação em SAS

## Estrela



# Topologias de rede de comunicação em SAS

## Híbrido



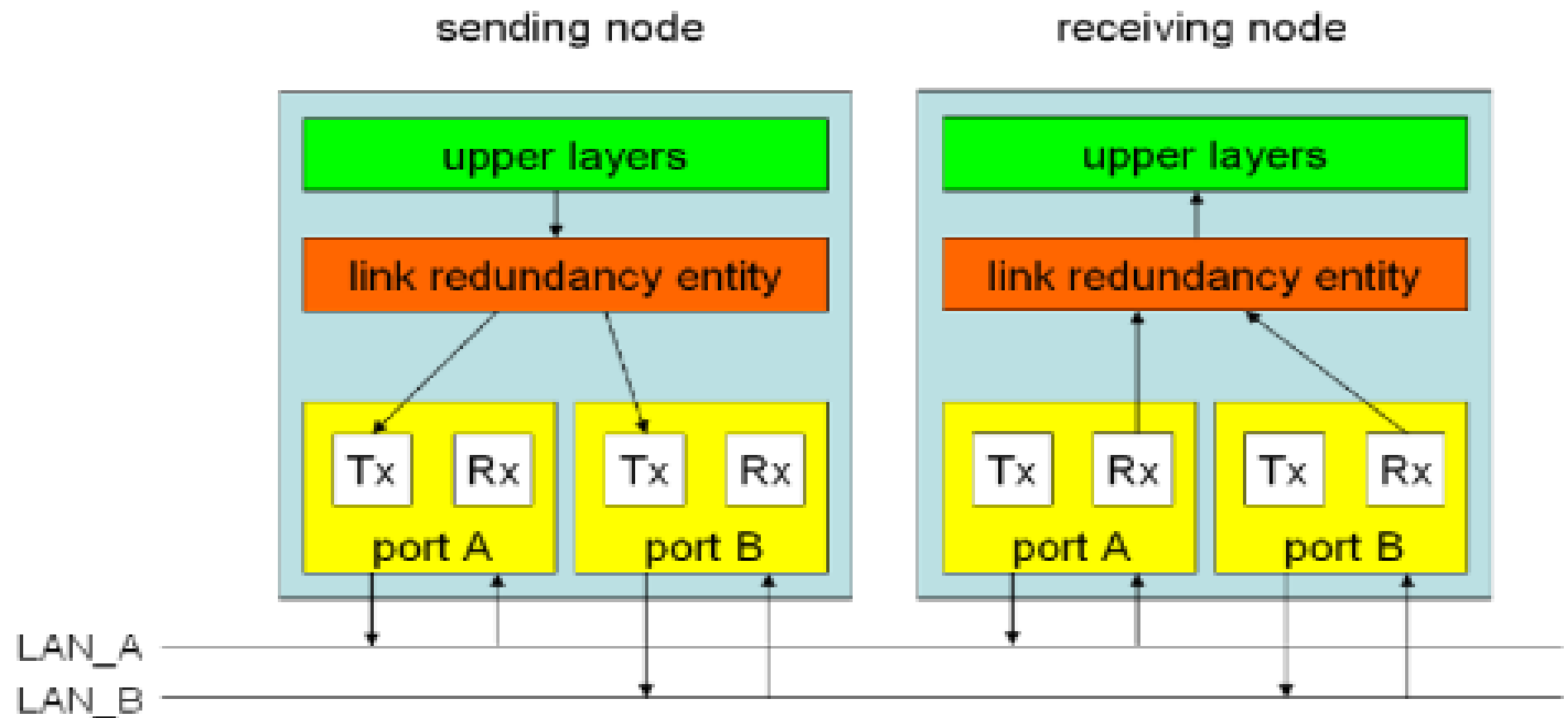


# Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP)

- Evitar *Loops* na rede
- Reestabelecimento da árvore de cobertura após falha no enlace
- Comumente usadas em topologias de subestações
  - Anel
  - Híbridas
  - Malha

# Parallel Redundancy Protocol (PRP)

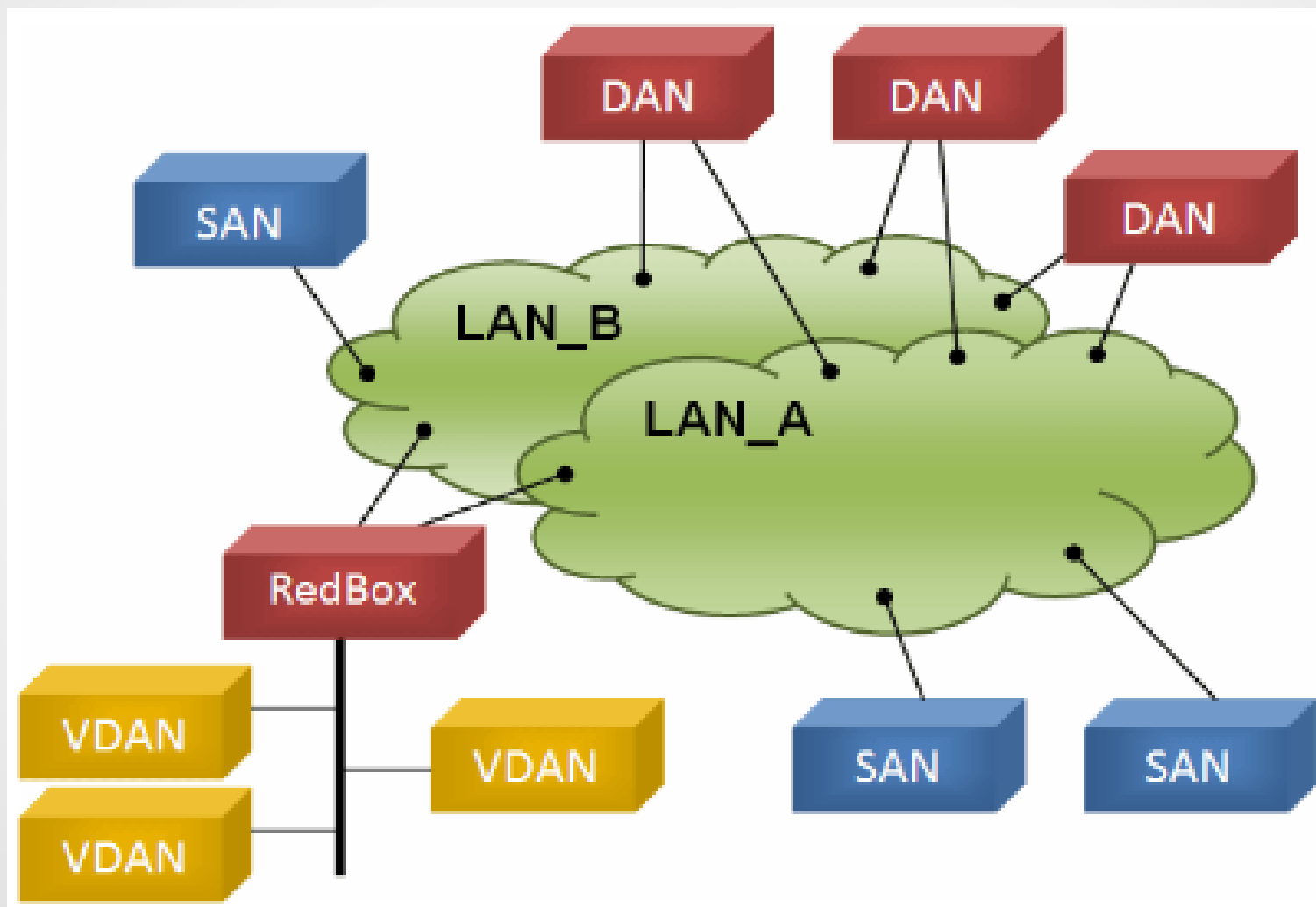
- Implementa redundância nos nós finais na camada de enlace.



# Parallel Redundancy Protocol (PRP)

- Componentes do PRP
  - DANP (*Dual Attached Node PRP*)
  - SAN (*Single Attached Node*)
  - RedBox (*Redundant Box*)
  - VDAN (*Virtual DANP*)

# Parallel Redundancy Protocol (PRP)



# Trabalhos relacionados

- Sidhu et al. 2006, 2007

- Thomas et al. 2010

Modelagem de IED e MU para a análise de desempenho com estudo de caso. OPNET

- Juarez et al. 2012

Modelagem de IED. Análise de desempenho de uma subestação.  
OMNET++

- Yang 2012

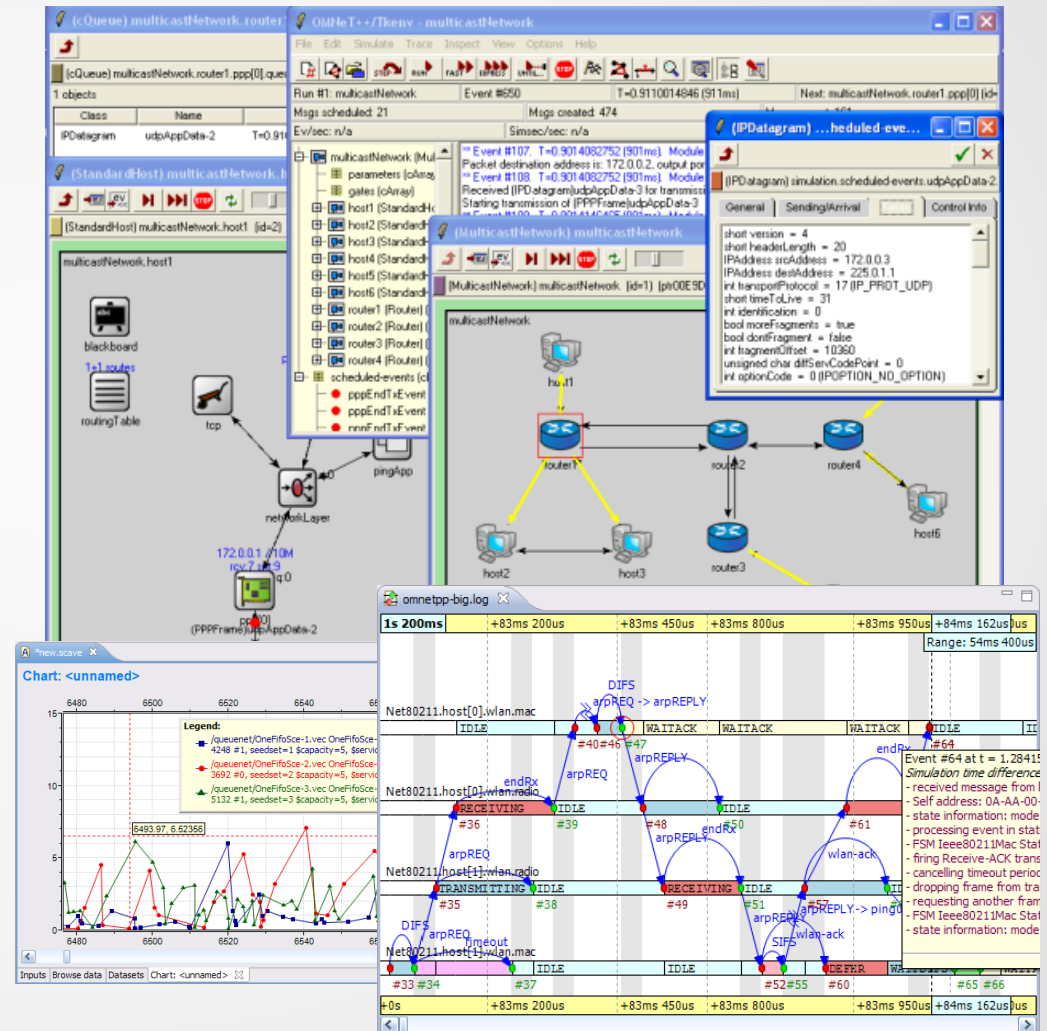
Modelagem de IEDs diferentes fabricantes.  
NS-2

- **Presente trabalho**

Modelagem de IEDs, MU, DANP.  
**IEEE802.1Q**  
OMNET++

# OMNET++

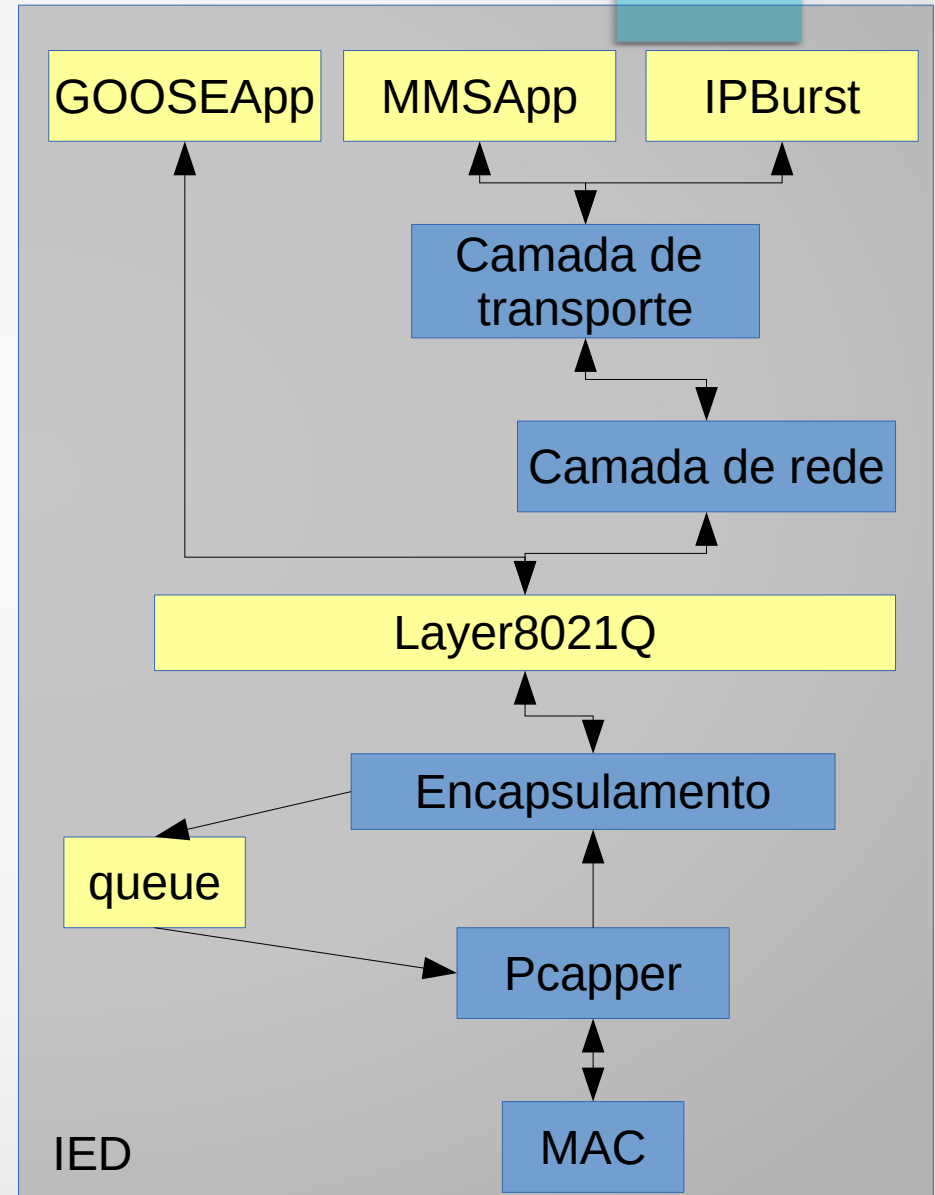
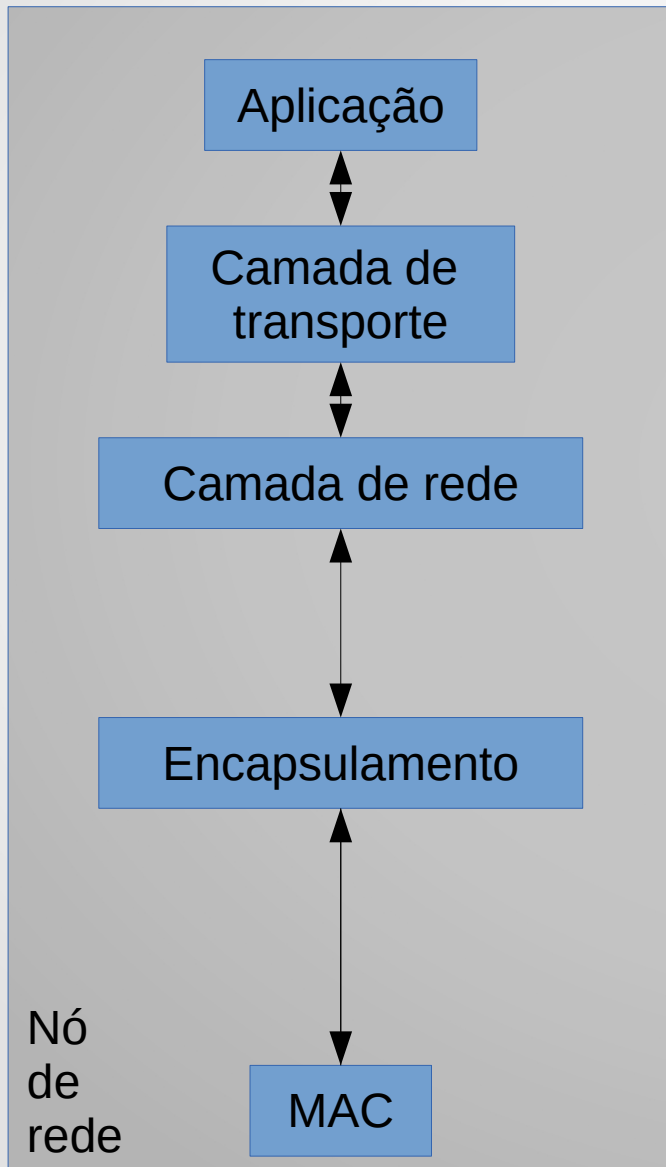
- Plataforma de simulação de eventos discretos.
- Windows, Linux, Mac OS X e outros sistemas Unix.
- Modular: Blocos programados em C++ montados e agrupados usando uma linguagem de alto nível (NED).
- Reusabilidade.



# Modelagem proposta

- Usando o framework INET/INETMANET, foram modelados elementos da norma IEC61850:
  - Intelligent Electronic Device
  - Merging Unit
  - Ethernet Switch
  - IEEE 802.1Q (Funções básicas)
  - Multicast (L2)
  - Capturador PCAP (L2)
  - Dual Attached Node PRP (DANP)

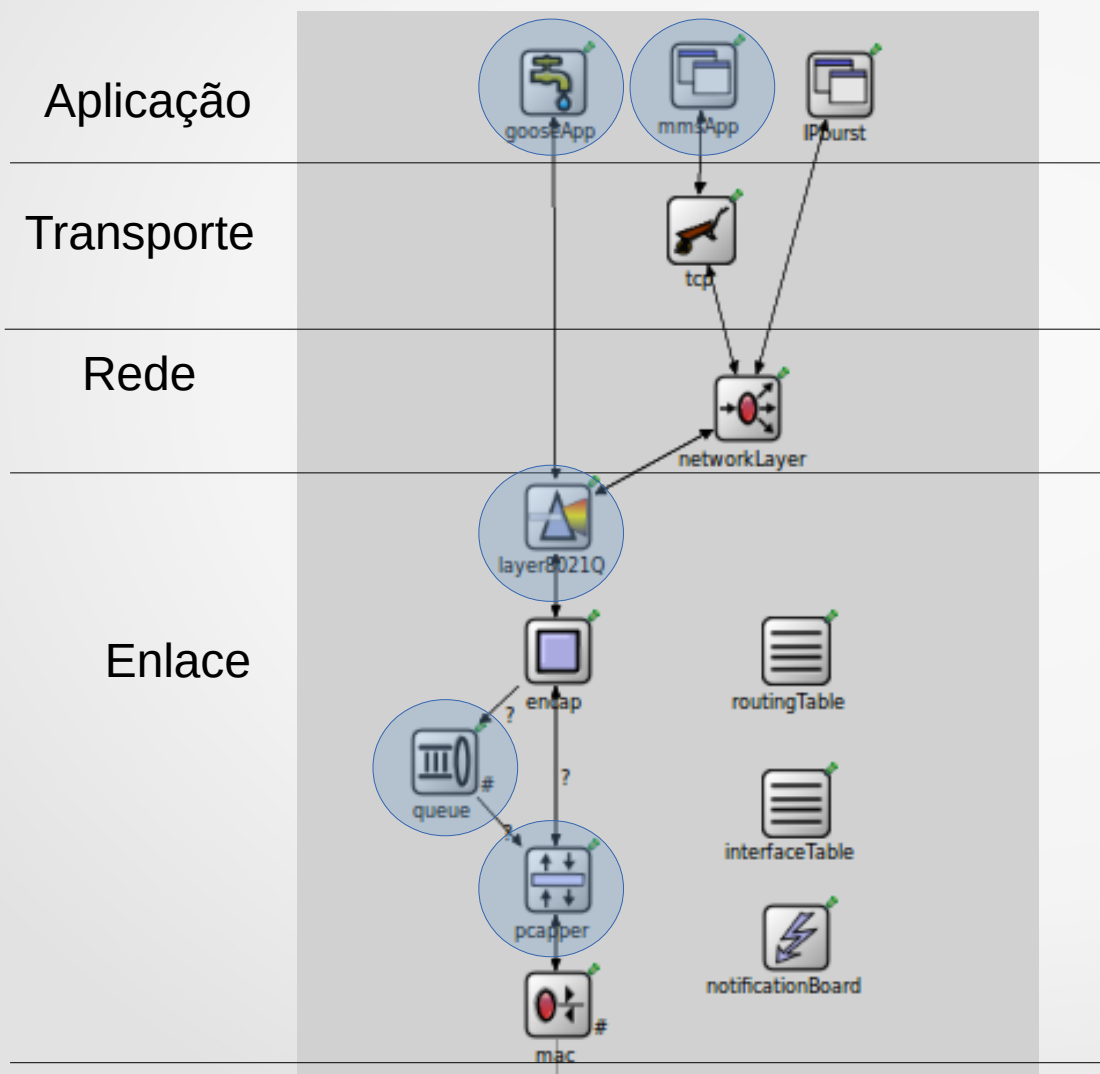
# Modelagem proposta





# Modelagem proposta

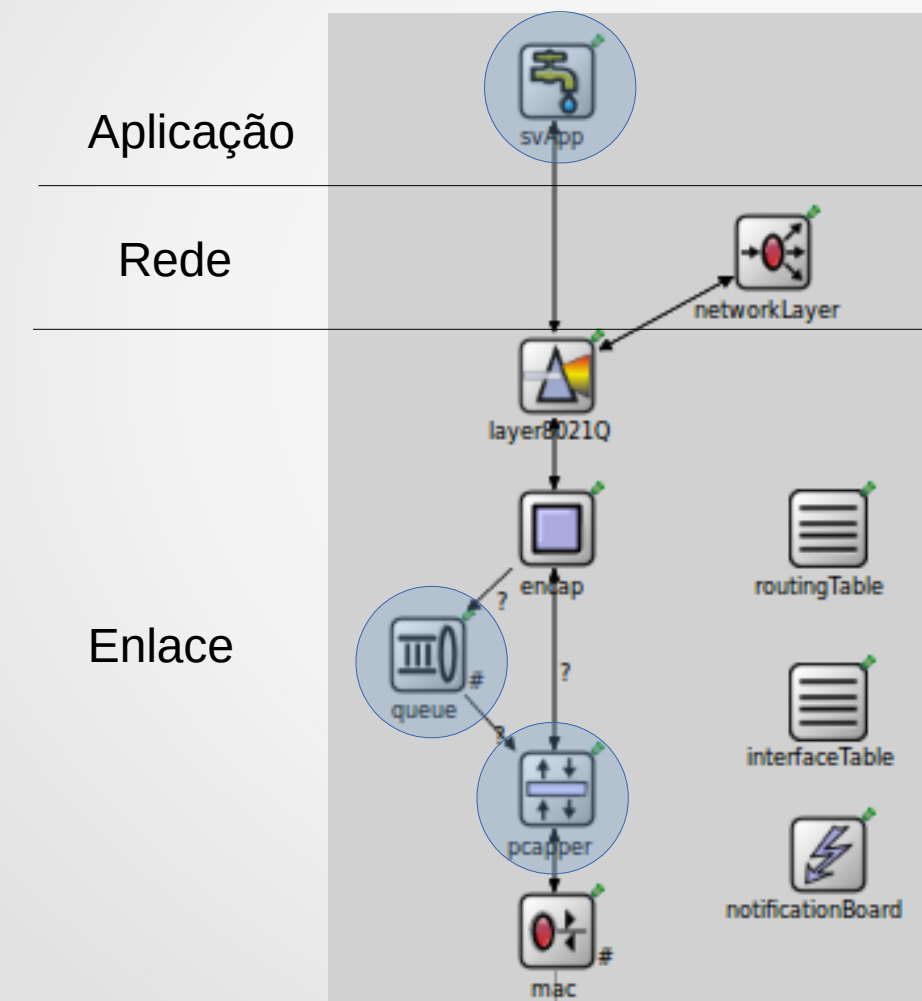
## Electronic Intelligent Device (IED)



Submódulo	Descrição
gooseApp	Gerador de GOOSE. Parâmetros: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempo Início</li> <li>• Tamanho pacote</li> <li>• Endereço destino</li> <li>• Ethertype=0x88B9</li> <li>• Prioridade=4</li> <li>• VID</li> </ul>
mmsApp	Cliente/Servidor simulando solicitações e respostas MMS
IPburst	Gerador aleatório de tráfego (50KB)
layer8021Q	Tag de prioridade, VLAN segundo IEEE8021Q
queue	Fila de saída configurável com módulos existentes em OMNET++
pcapper	Criador de arquivo PCAP com quadros enviados e recebidos

# Modelagem proposta

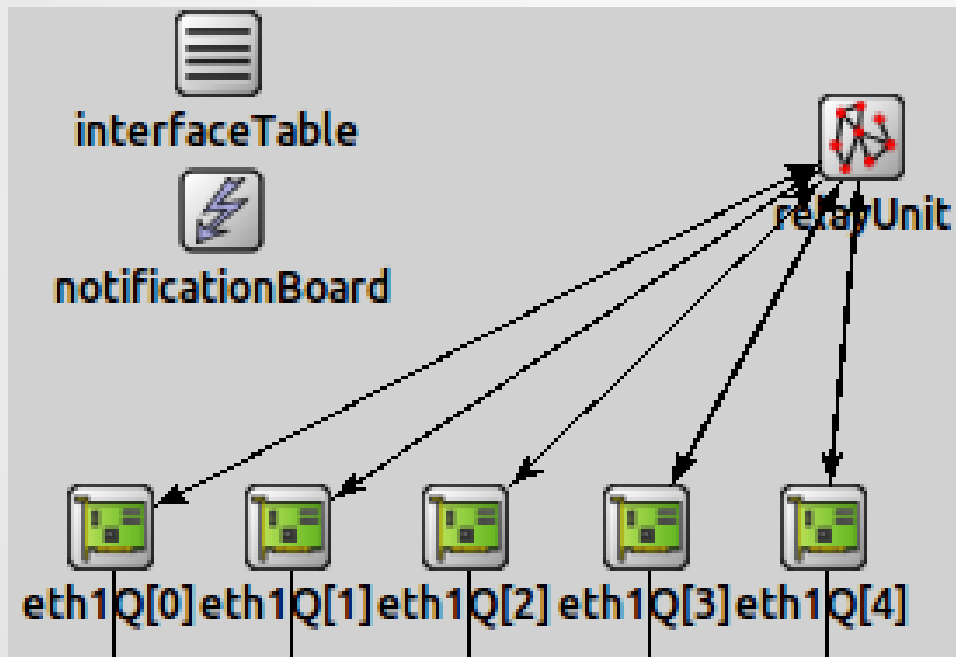
## Merging Unit (MU)



Submódulo	Descrição
svApp	Gerador Sampled Values. Parâmetros: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempo inicio</li> <li>• Tamanho pacote</li> <li>• Endereço destino</li> <li>• Ethertype=0x88BA</li> <li>• Prioridade=4</li> <li>• VID</li> </ul>
layer8021Q	Tag de prioridade, VLAN segundo IEEE8021Q
queue	Fila de saída configurável com módulos existentes em OMNET++
pcapper	Criador de arquivo PCAP com quadros enviados e recebidos

# Modelagem proposta

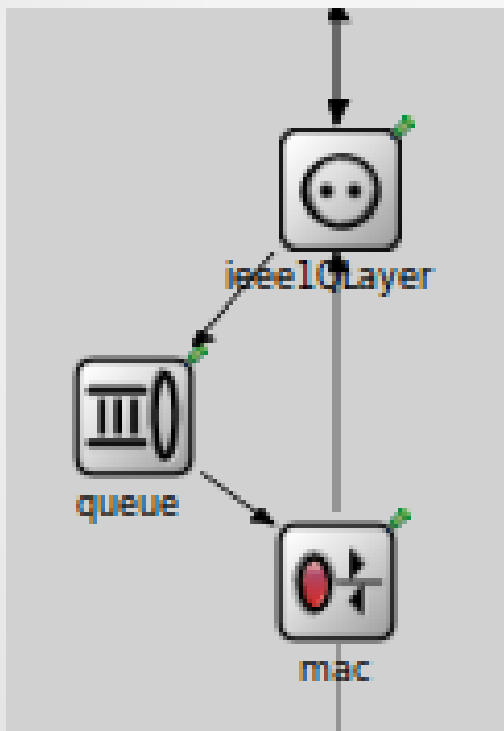
## Ethernet Switch



Submódulo	Descrição
relayUnit	Implementa a funções de encaminhamento. Suporte RSTP, IEEE802.1Q e <i>Multicast</i>
ieee1QLayer	Tag de prioridade, VLAN. Filtragem de entrada e saída segundo IEEE8021Q.
queue	Fila de saída configurável com módulos existentes em OMNET++
frameClassifier	Classificador de quadros segundo Tag de prioridade 802.1Q

# Modelagem proposta

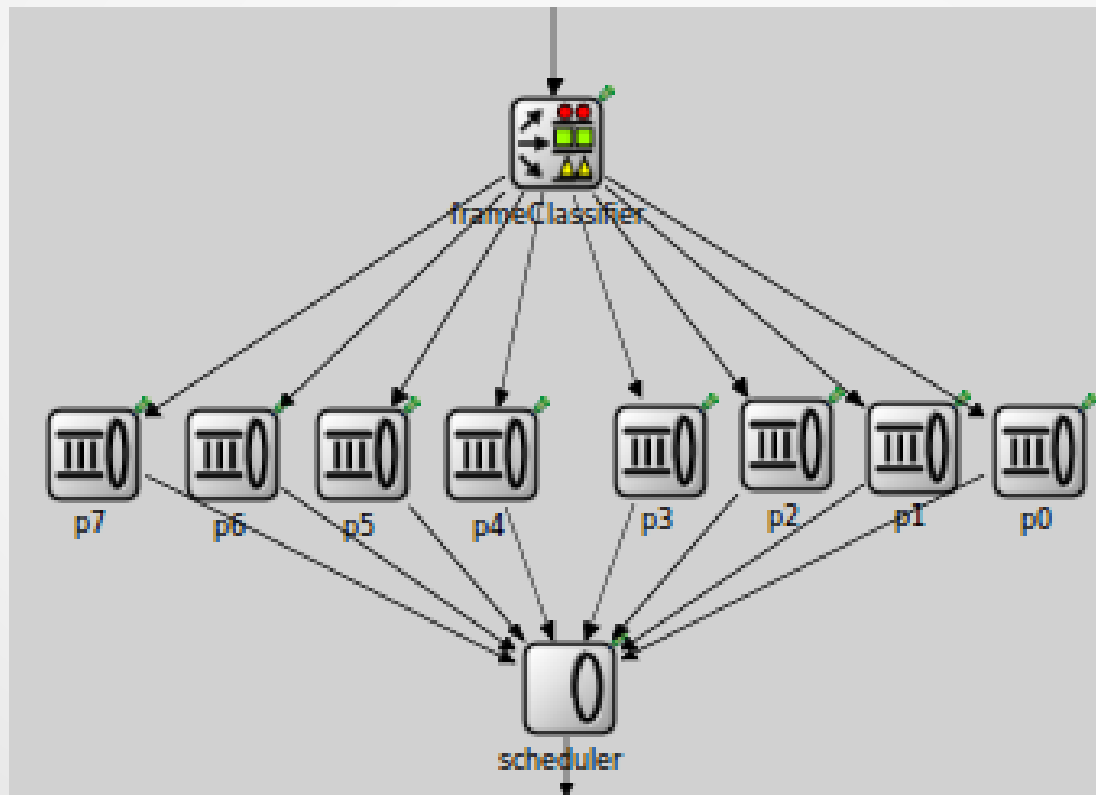
## Interface Ethernet



Submódulo	Descrição
<b>ieee1QLayer</b>	Tag de prioridade, VLAN. Filtragem de entrada e saída segundo IEEE8021Q.
<b>queue</b>	Fila de saída configurável com módulos existentes em OMNET++
<b>frameClassifier</b>	Classificador de quadros segundo Tag de prioridade 802.1Q

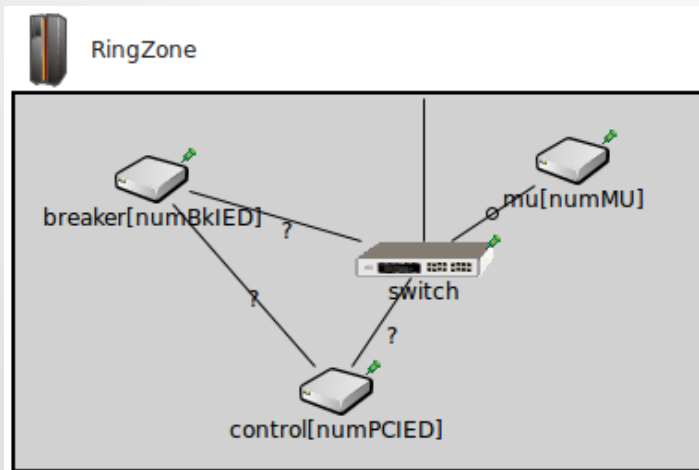
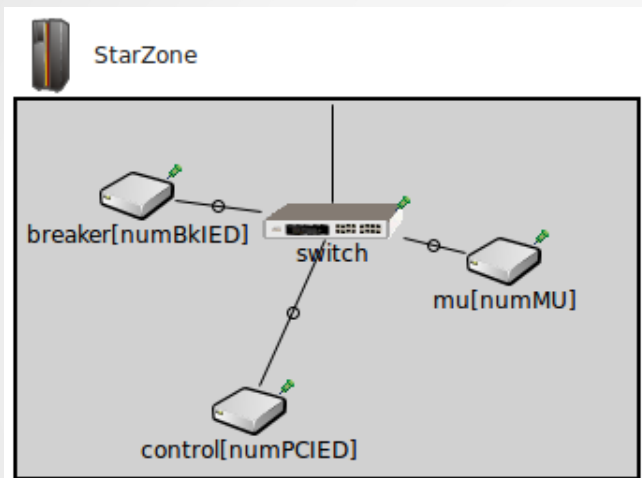
# Modelagem proposta

Módulo de enfileiramento (*Queue*)



# Modelagem proposta

**Zona:** Agrupação de IEDs de controle, disjuntores e MUs conectados mediante um switch à rede principal



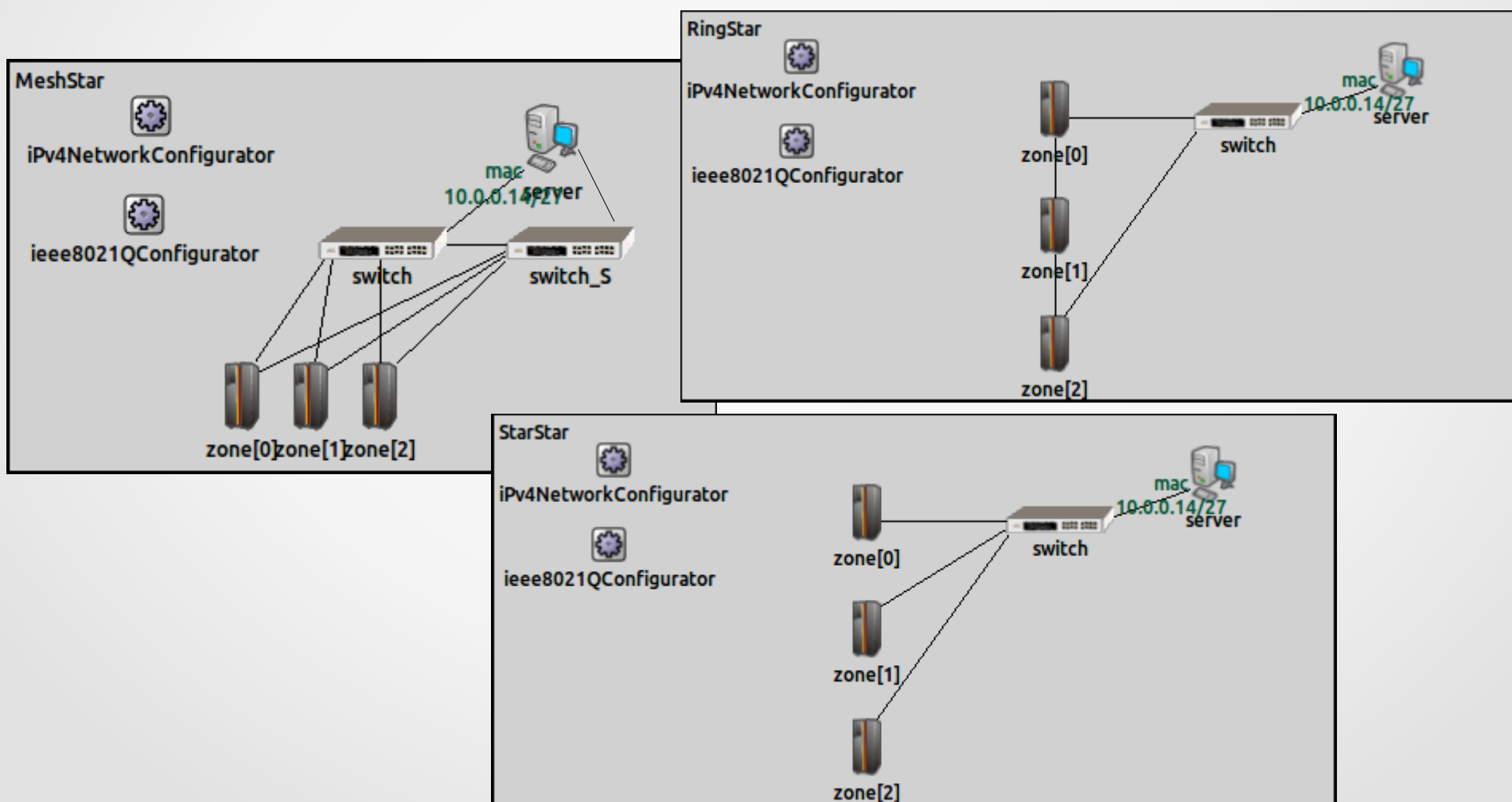
Os parâmetros:

- Número de IEDs de controle
- Número de IEDs disjuntores
- Número de MUs

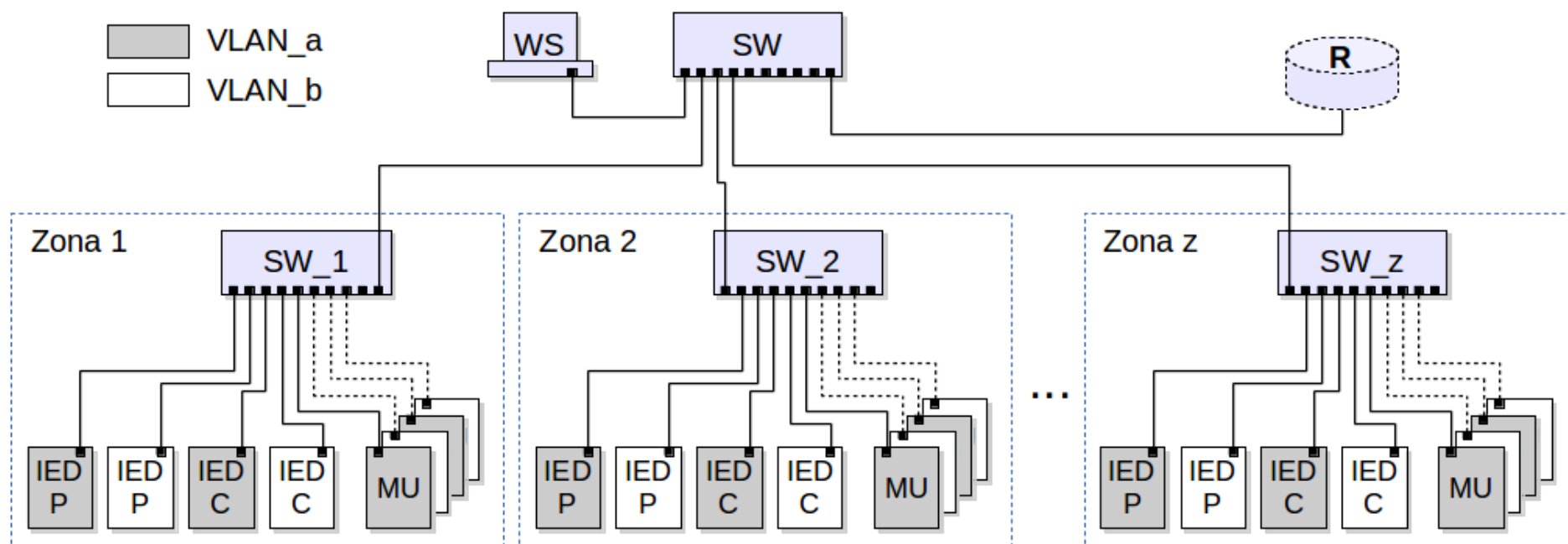
Um switch é usado por zona.

# Modelagem proposta

Subestação: Topologias Anel, Estrela e Híbrida



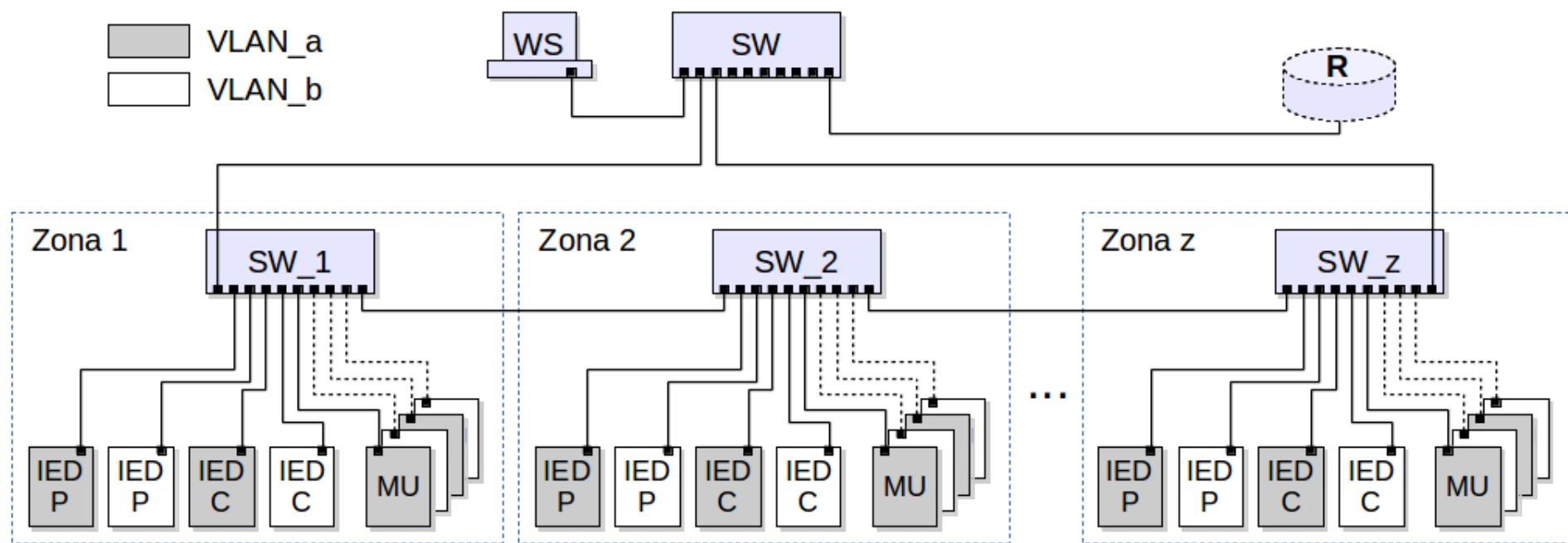
# Topologias das simulações



ESTRELA

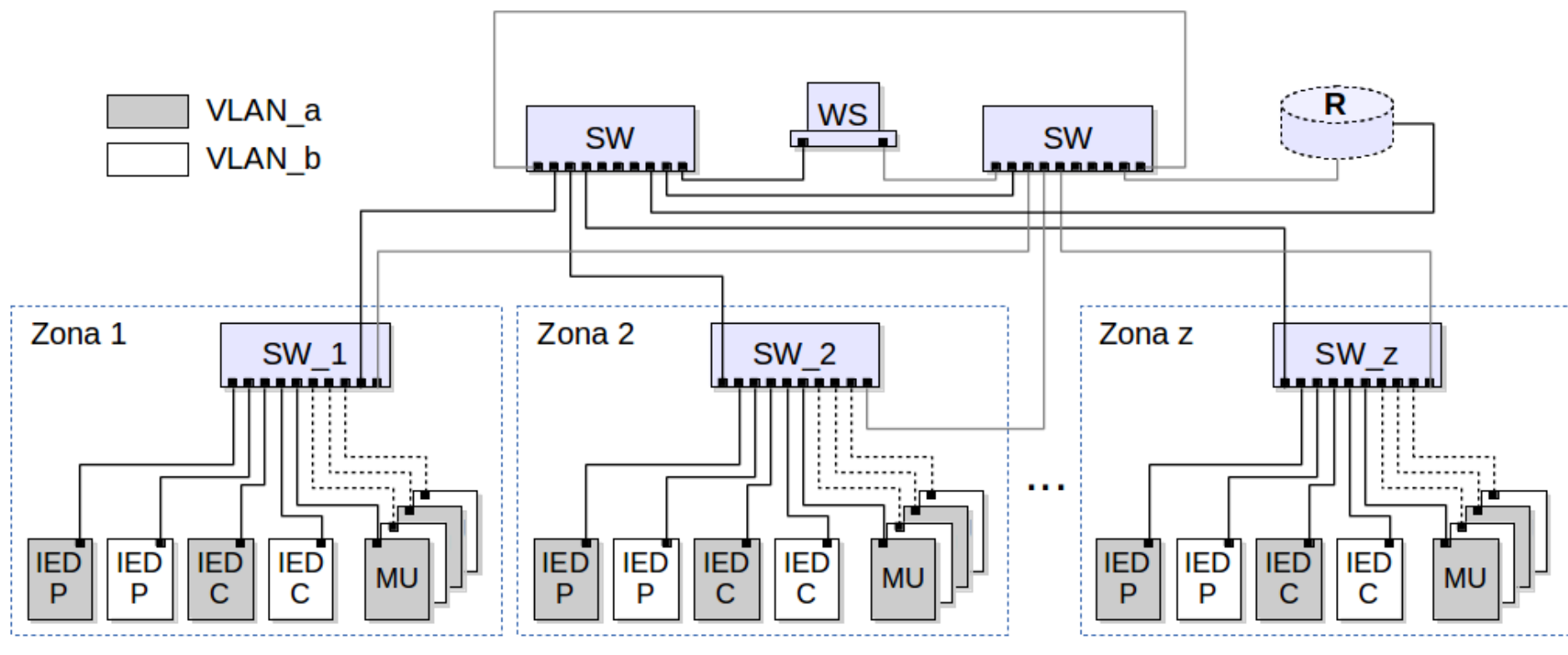


# Topologias das simulações



ANEL

# Topologias das simulações



HÍBRIDA (ANEL-ESTRELA)

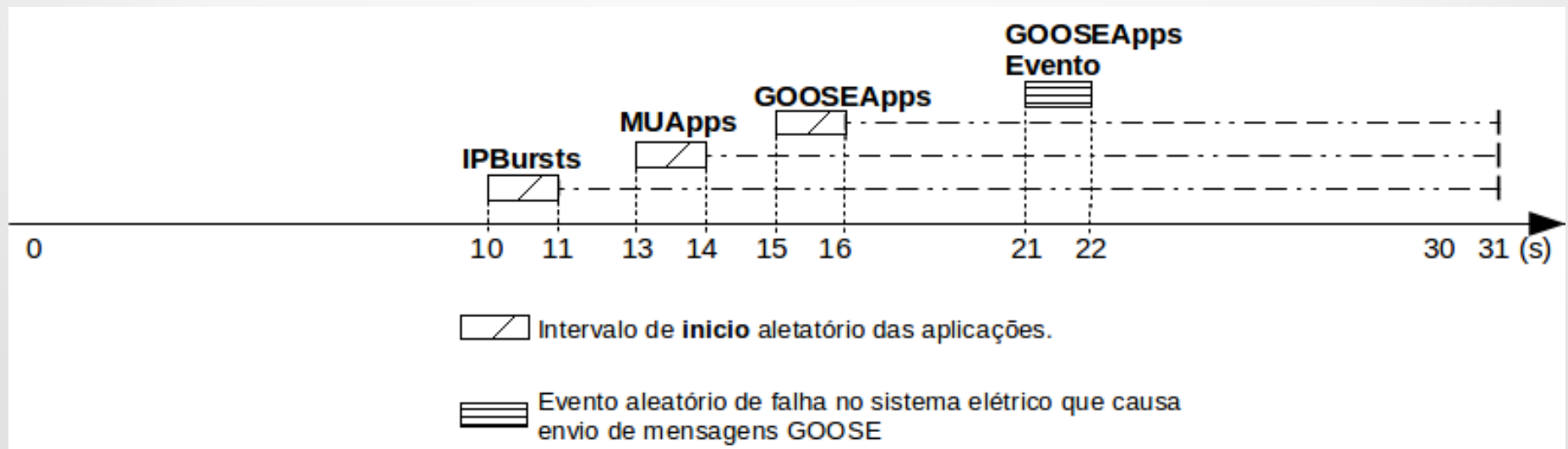
# Simulações

- Merging Units enviam SV aos IEDs de controle constantemente.
- IEDs de controle enviam GOOSE aos respectivos IEDs disjuntores ante uma falha.
- IEDs enviam mensagens MMS ao servidor da subestação.
- **Simulação de evento de falha no sistema elétrico:**
  - IED de controle envie GOOSE aos IEDs disjuntores de todas as zonas.
- Para cada configuração foram rodadas as combinações dos parâmetros:
  - Num Zonas: 2 até 5
  - Num IEDs Disjuntor: 2
  - Num IEDs Controle: 2
  - Num MUs: 1 até 4
  - Taxa de amostragem de MUs: 960, 1920 e 4800 samples/s
  - Envio aleatório de 50KB ao servidor.
  - Tempo de execução: 31s
  - Largura de banda: 10 e 100Mbps

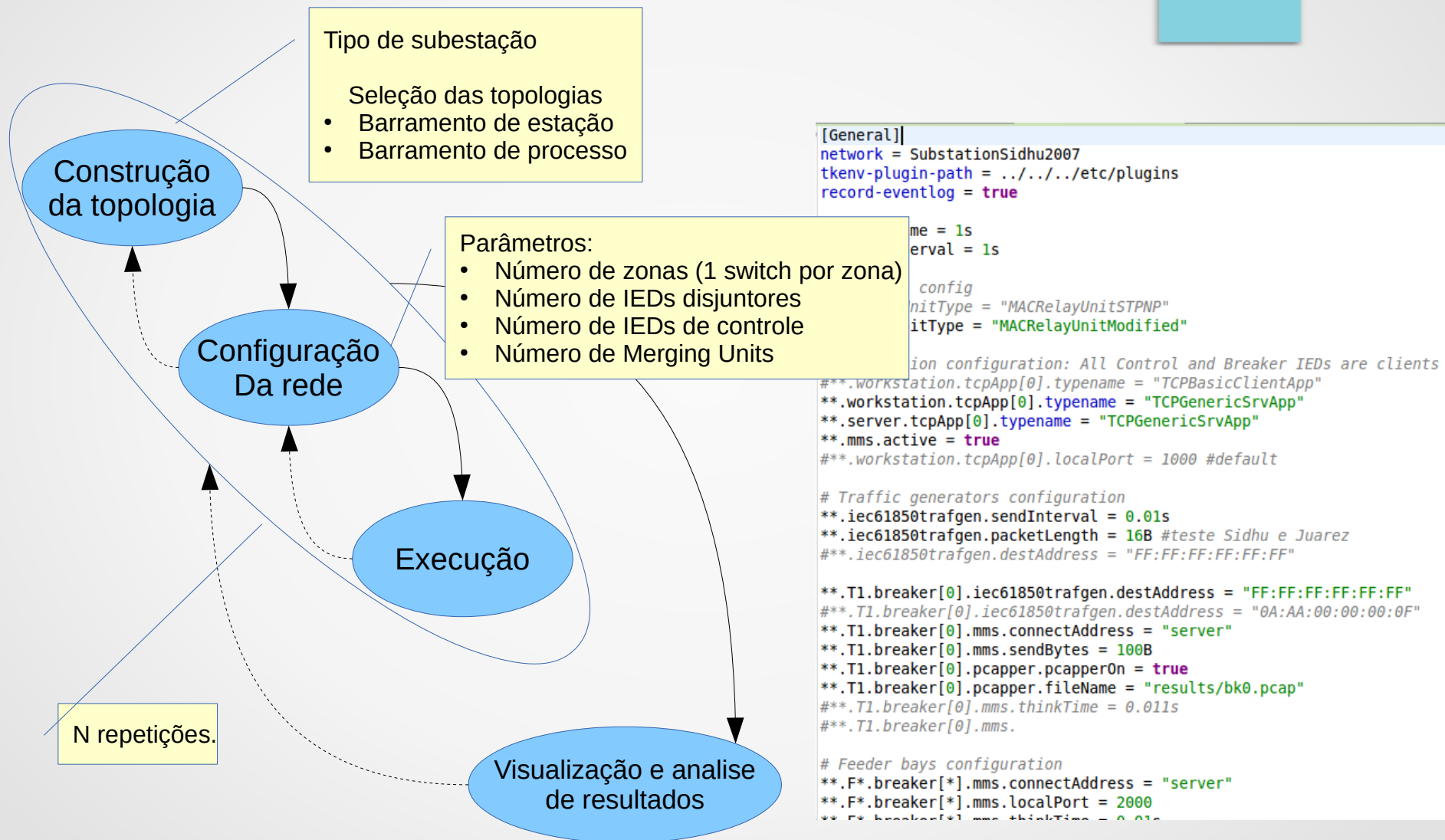
# Simulações

Para os cenários de simulação:

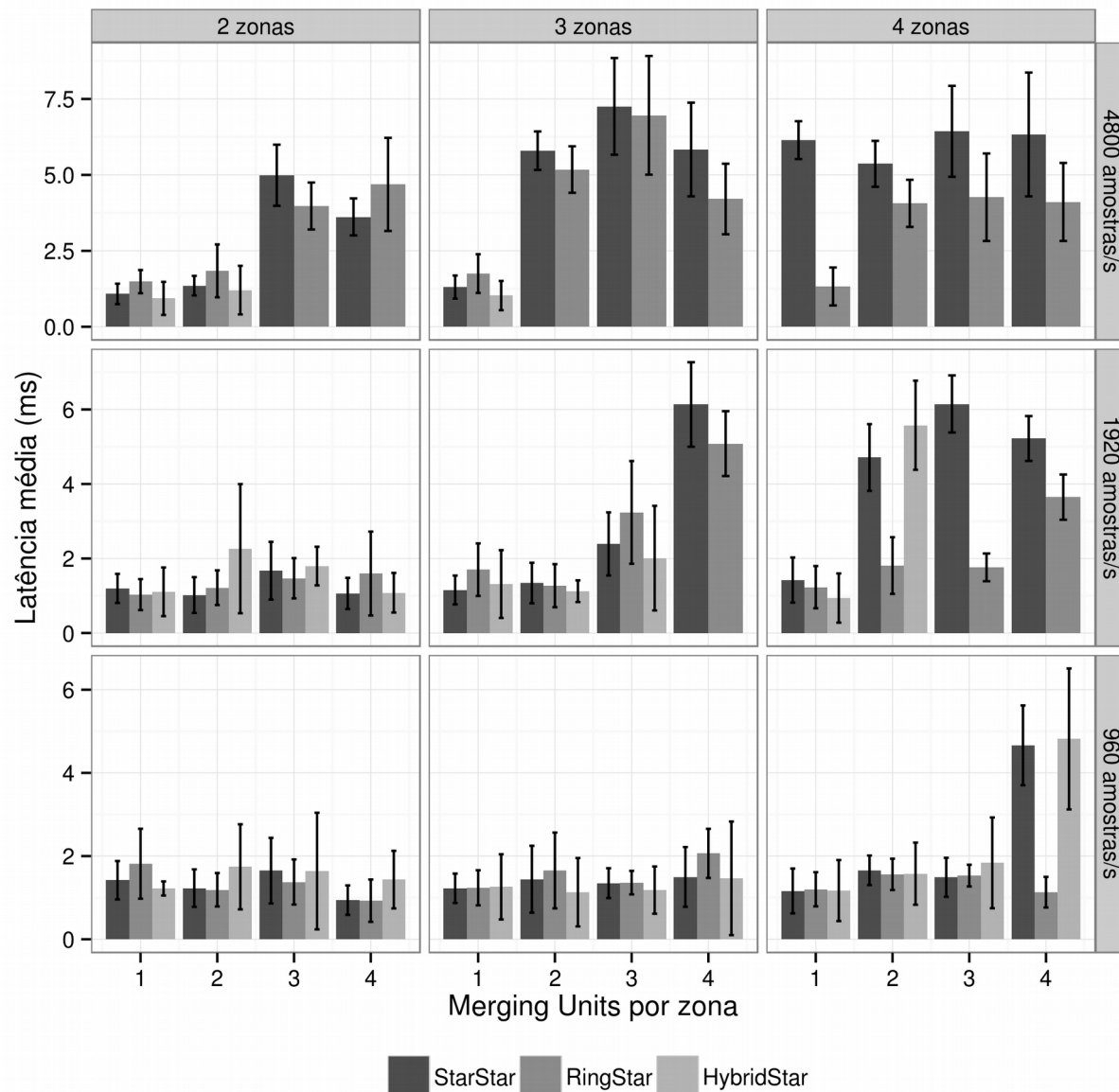
- Precisa-se saber a latência das mensagens GOOSE e SV para vários dispositivos conectados a um switch mantendo situações equivalentes durante as simulações.



# Simulações

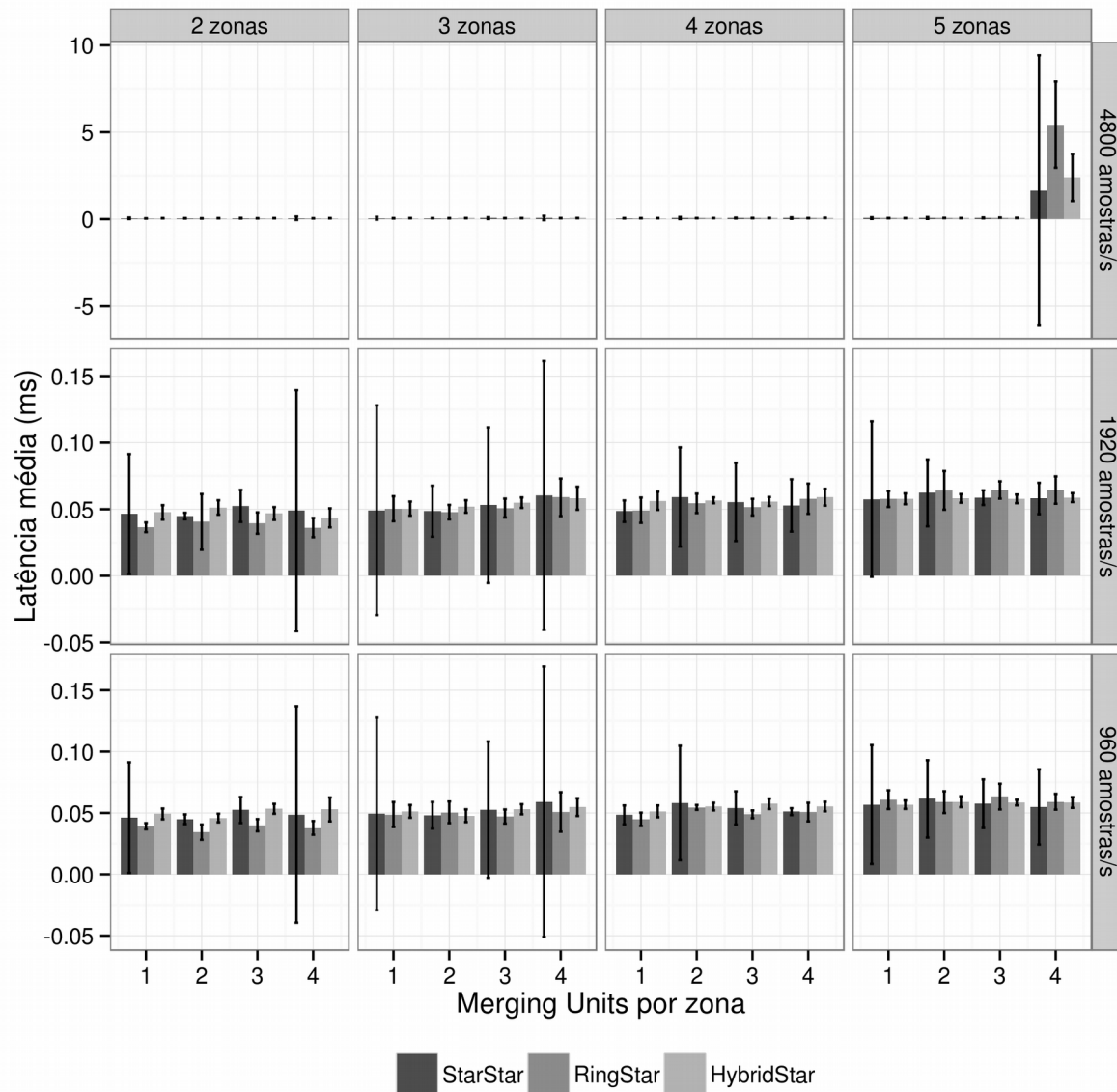


# Resultados (Enlaces 10Mbps)



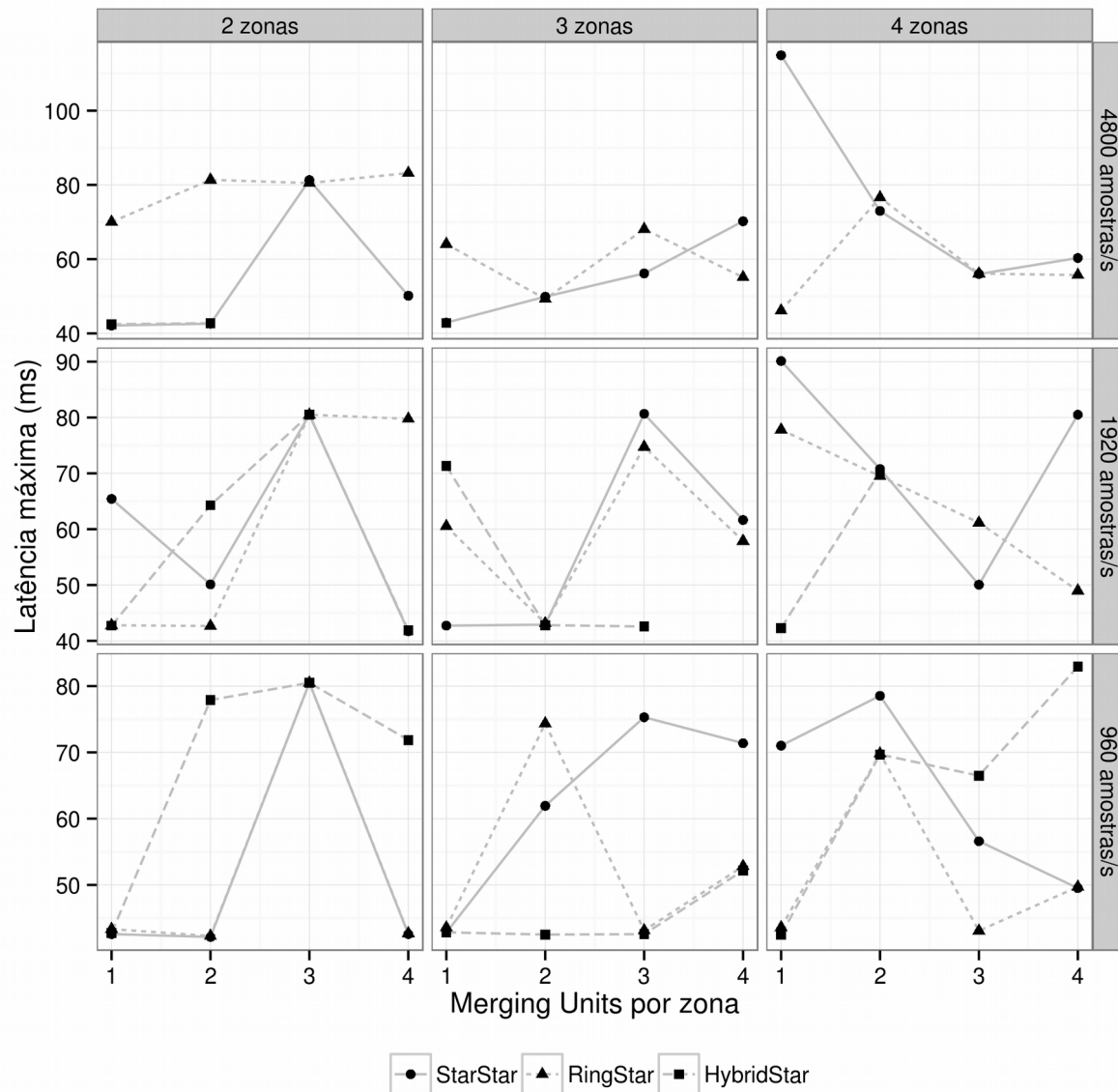
- Latência média GOOSE
- IEDs disjuntores
- Num Zonas: 2 até 4
- Num MUs: 1 até 4
- Sample Rate de MUs: 960, 1920 e 4800 amostras/s

# Resultados (Enlaces 100Mbps)



- **Latência média GOOSE**
- **IEDs disjuntores**
- Num Zonas: 2 até 5
- Num MUs: 1 até 4
- Sample Rate de MUs: 960, 1920 e 4800 amostras/s

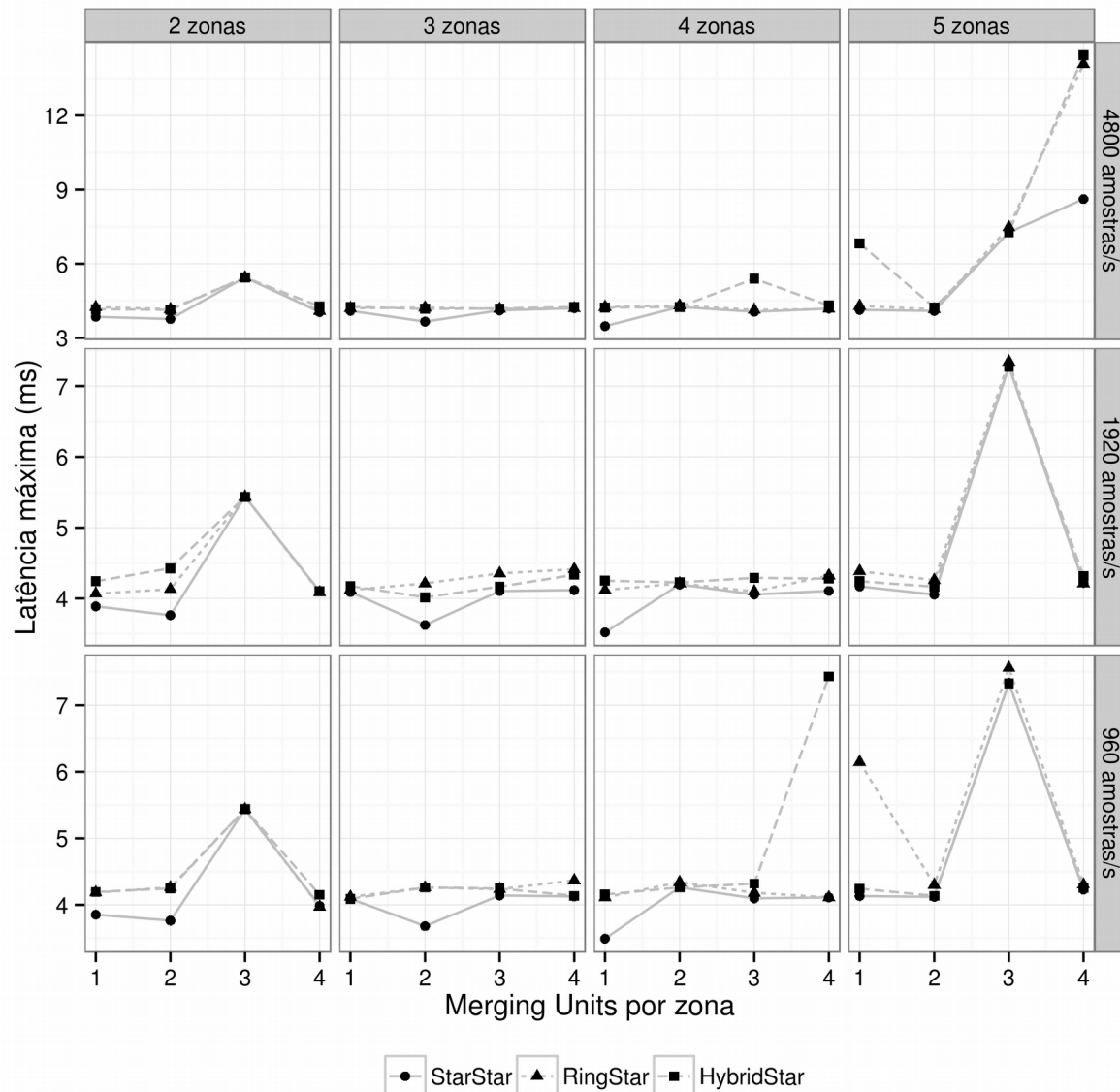
# Resultados (Enlaces 10Mbps)



- Latência máx GOOSE
- IEDs disjuntores
- Num Zonas: 2 até 4
- Num MUs: 1 até 4
- Sample Rate de MUs: 960, 1920 e 4800 amostras/s

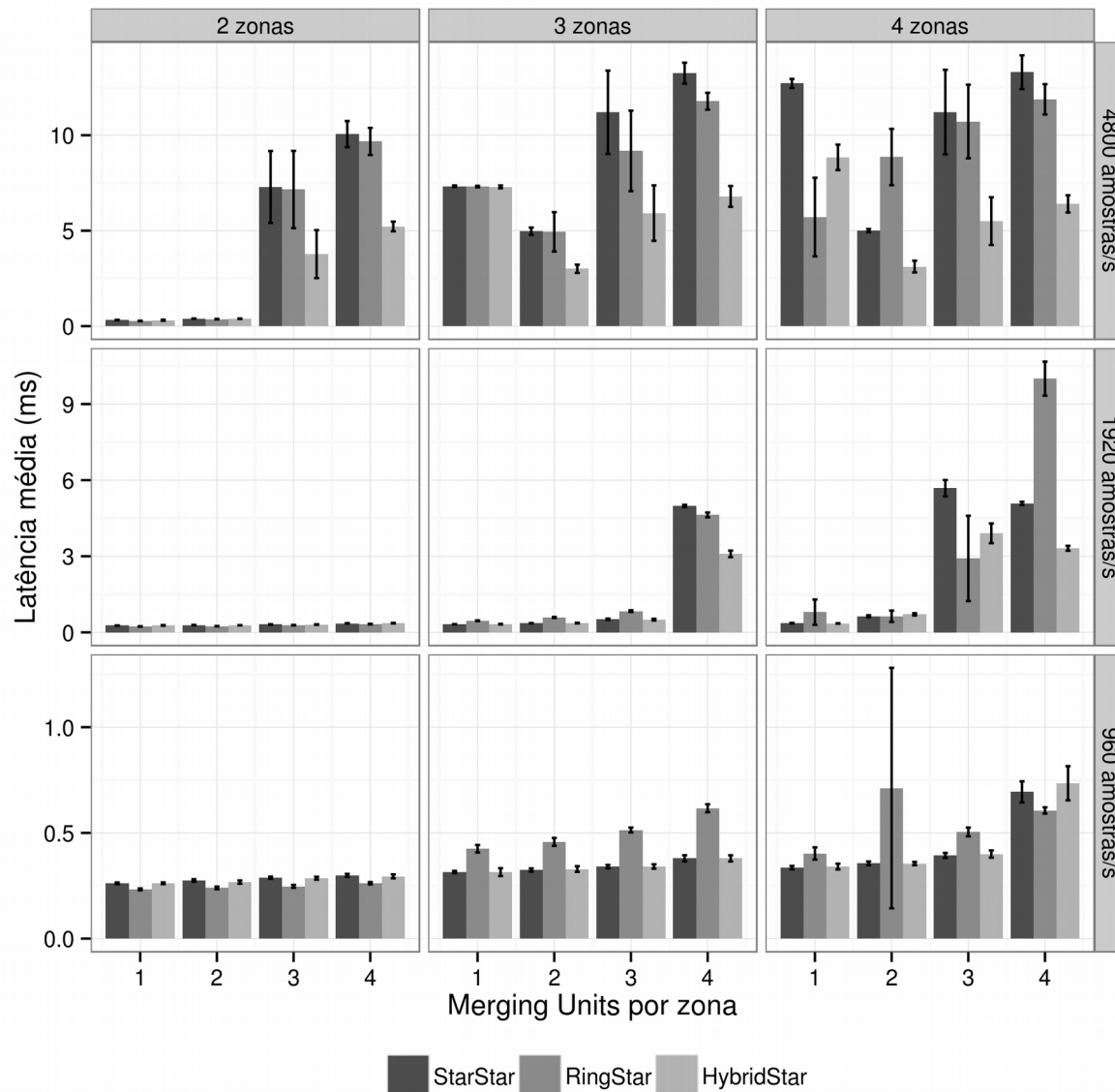


# Resultados (Enlaces 100Mbps)



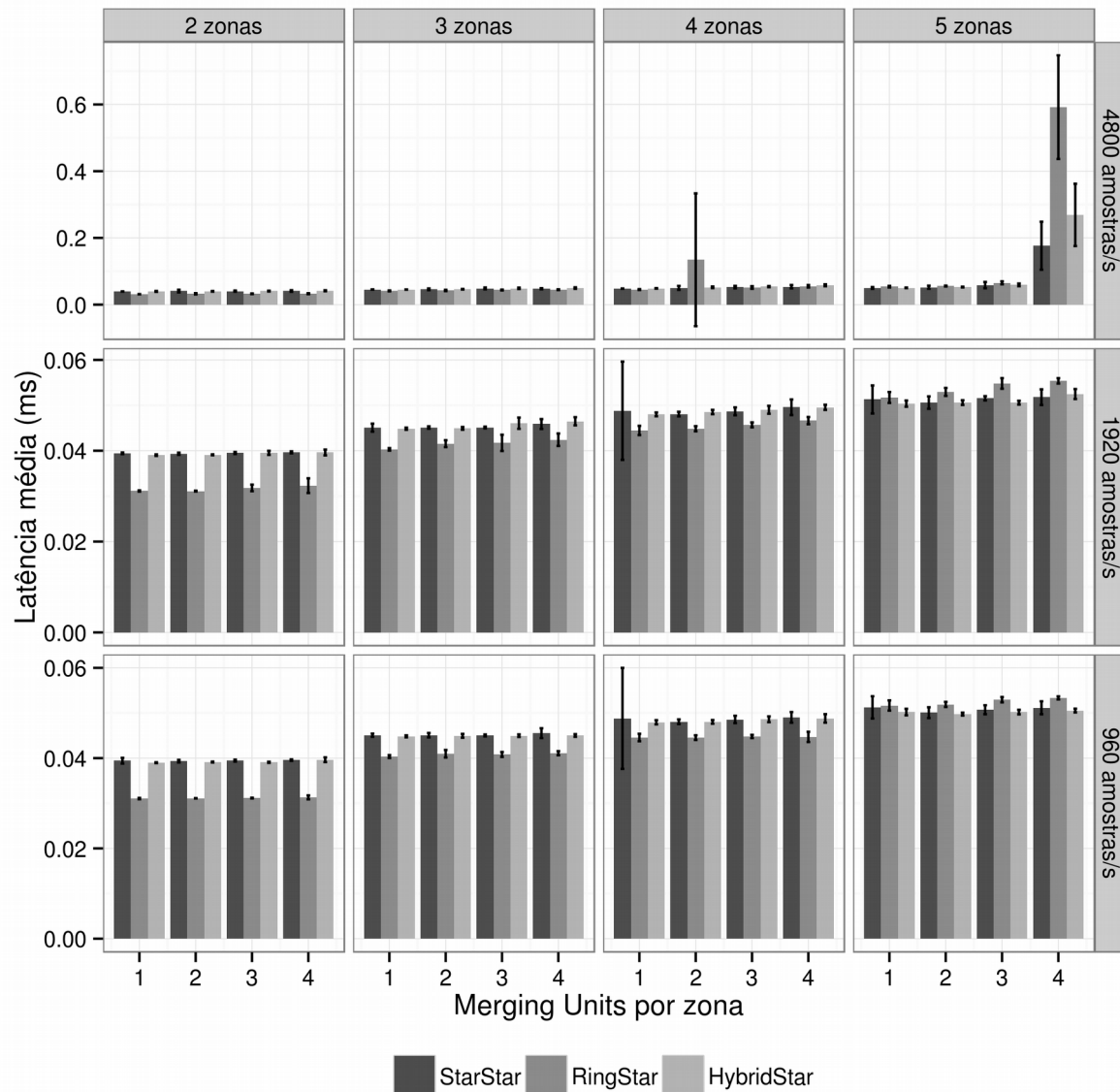
- Latência máx GOOSE
- IEDs disjuntores
- Num Zonas: 2 até 5
- Num MUs: 1 até 4
- Sample Rate de MUs: 960, 1920 e 4800 amostras/s

# Resultados (Enlaces 10Mbps)



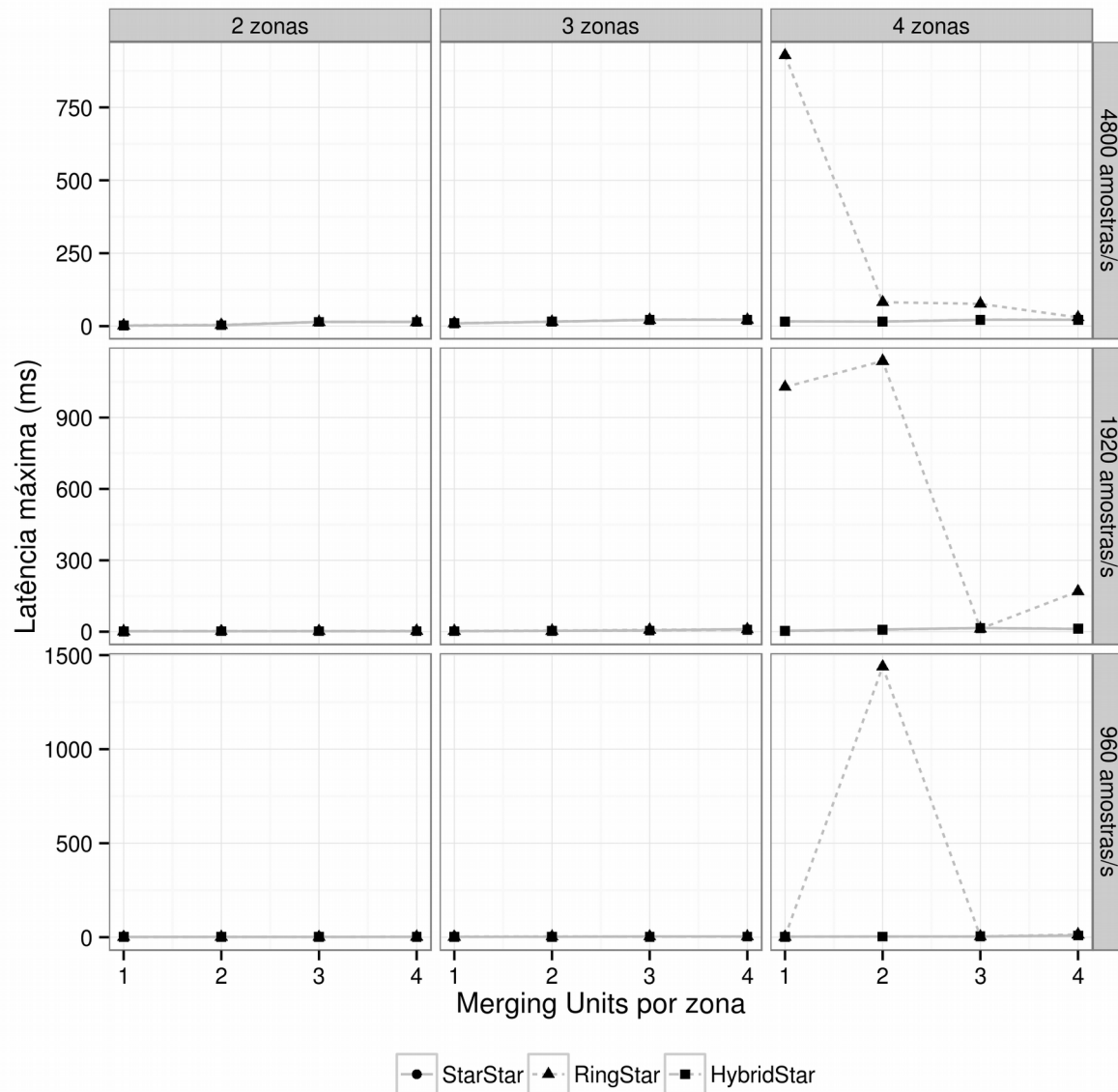
- Latência média SV
- IEDs controle
- Num Zonas: 2 até 4
- Num MUs: 1 até 4
- Sample Rate de MUs: 960, 1920 e 4800 amostras/s

# Resultados (Enlaces 100Mbps)



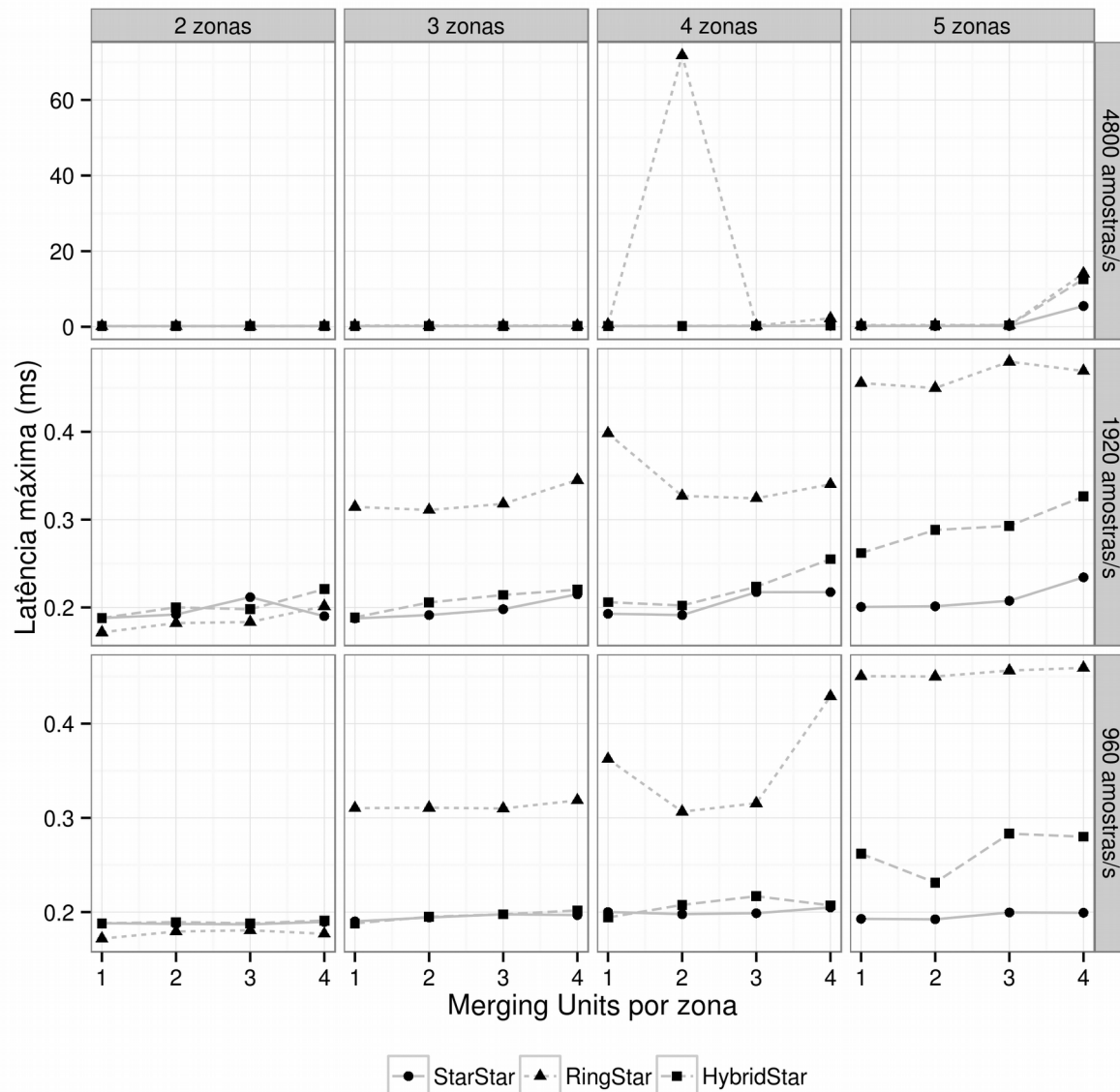
- Latência média SV
- IEDs controle
- Num Zonas: 2 até 5
- Num MUs: 1 até 4
- Sample Rate de MUs: 960, 1920 e 4800 amostras/s

# Resultados (Enlaces 10Mbps)



- Latência máx SV
- IEDs controle
- Num Zonas: 2 até 4
- Num MUs: 1 até 4
- Sample Rate de MUs: 960, 1920 e 4800 amostras/s

# Resultados (Enlaces 100Mbps)



- **Latência máx SV**
- **IEDs controle**
- Num Zonas: 2 até 5
- Num MUs: 1 até 4
- Sample Rate de MUs: 960, 1920 e 4800 amostras/s

# Conclusão

- Enlaces de 10Mbps devem ser evitados em redes de automação de subestações.
- Enlaces de 100Mbps ofereceram desempenho suficiente para as três topologias simuladas.
- Em geral, para 100Mbps, as topologias mostraram comportamentos melhores para ambientes com poucas MUs. Para ambientes de 4 e 5 zonas, o impacto de 3 e 4 MUs é significativo podendo causar que as latências ultrapassem os limites de tempo estabelecidos pela Norma.

# Conclusão

- Os maiores geradores de tráfego dentro da subestação são as Merging Units. A inundação dessas mensagens deve ser limitada usando VLANs e Multicast se as redes dos barramentos de processo e de estação são fisicamente a mesma. No entanto, mesmo com limitação desse tráfego podem existir latências maiores das permitidas.
- A ferramenta OMNET++ atingiu as expectativas na simulação de ambientes de rede, assim como permitiu a incorporação de novos módulos para aumentar suas funcionalidades.

# Contribuições

- Desenvolvida e disponibilizada uma modelagem que permite, através de simulações:
  - Medir os tempos de latência em mensagens IEC61850
  - Estudar o comportamento de filas nas portas de saída em dispositivos IEC61850.
  - Avaliar cenários de diferentes topologias de rede para ambientes de automação IEC61850.
  - Usar protocolos como IEEE802.1Q

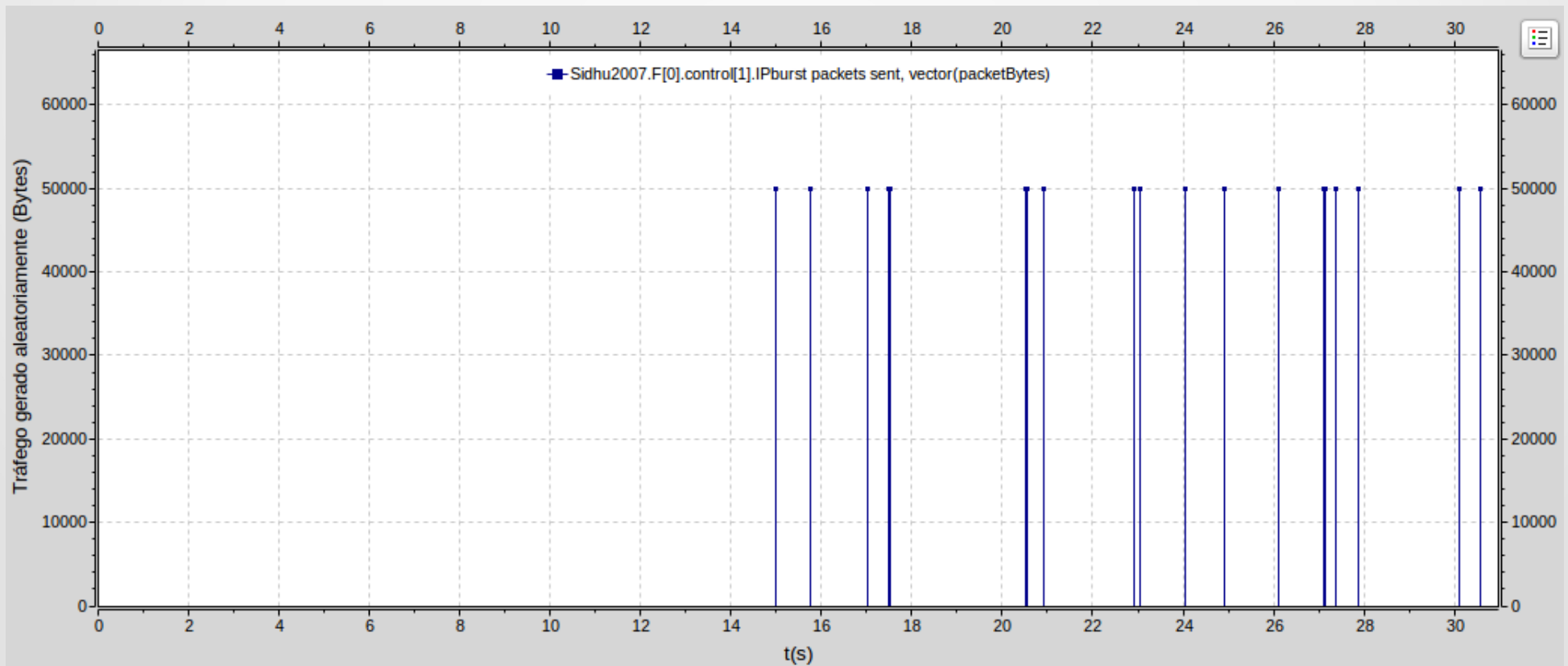




FIM

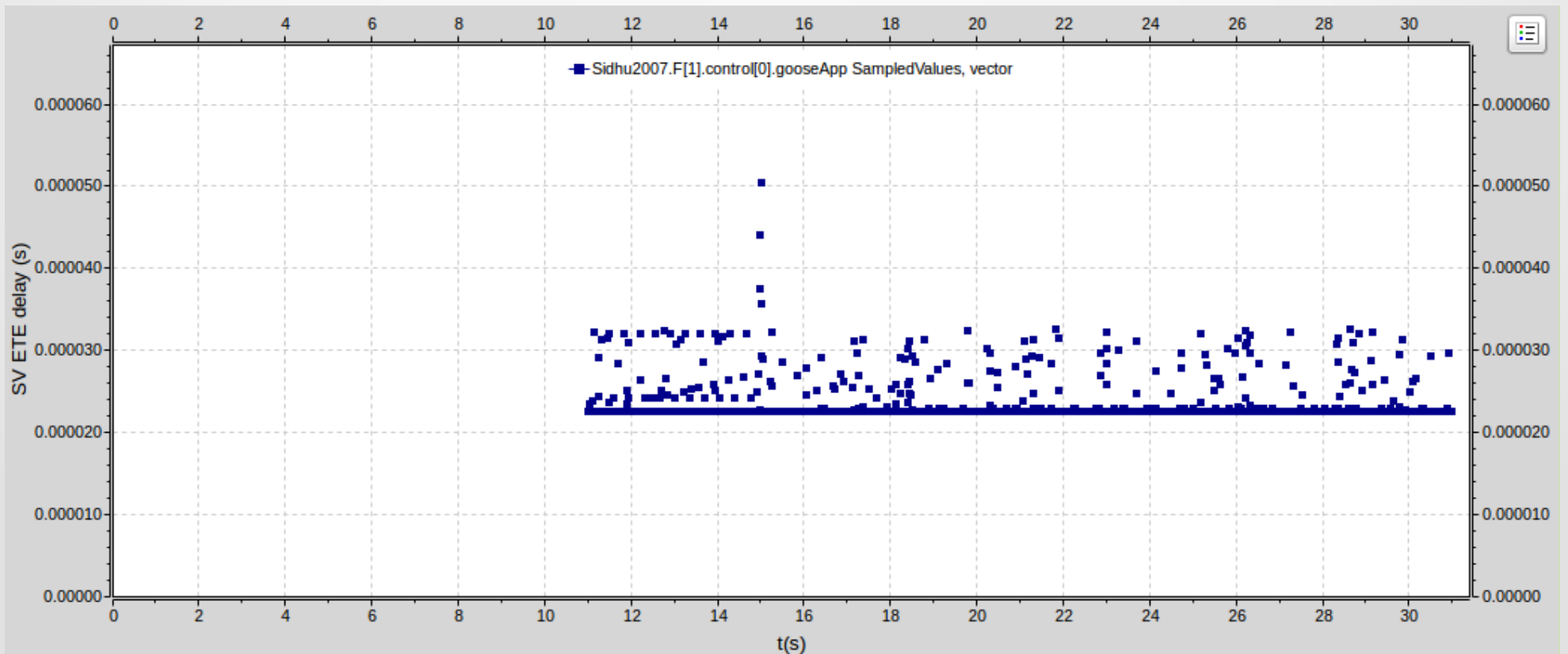
# Outros gráficos

- Exemplo: Gerador aleatório de dados pelo Ipburst durante a simulação. Cada IED tem um de comportamento similar mas com tempos diferentes.



# Outros gráficos

- Exemplo: End-to-Sampled Values em um IED de controle durante uma rodada



# Outros gráficos

- Exemplo: Histograma do atraso das Sampled Values recebidas em um IED de controle.

