

## Avaliação do Desempenho da Proteção de Distância Utilizando o Barramento de Processos

Paulo Henrique Pinheiro \* Bruno W. França \* Yona Lopes \*

\* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, RJ, (e-mail: paulopinheiro, bufranca, yonalopes@id.uff.br).

**Abstract:** The presence of telecommunications and intelligent devices is increasing in electrical systems. With the IEC 61850 standard, the topology of electrical substations is being modified to the known digital substations. These substations are divided into process, bay, and station levels. With this new topology, there is a need for detailed studies about the behavior of protection, control, and supervising functions to analyze if these functions will not lose performance. Protection functions impose significant challenges with the implementation of the process bus. Important evaluation points are the correct operation of these functions, acting time and fault clearing times, and behavior during process bus contingencies. This paper analyzes the dynamic performance of distance protection using the process bus. The main evaluated points are its acting time, fault clearing times, and performance during process bus contingencies. The results show that the use of the process bus presents an error of 1,96 % compared to the conventional topology in the fault clearing time. In the cases considering concurrent traffic in the process bus, the maximum error is 2,38 %, thus concluding that the process bus does not significantly influence the protection performance.

**Resumo:** A presença das telecomunicações e de dispositivos inteligentes vem se tornando cada vez maior dentro dos sistemas elétricos. Com o surgimento da norma IEC 61850, a topologia das subestações elétricas vem sendo modificada para as conhecidas subestações digitais. Essas subestações são divididas em três níveis: nível de processo, de vão e de estação. Com essa nova topologia, são necessários estudos detalhados sobre o comportamento de funções de proteção, controle e supervisão para analisar se o desempenho dessas funções não será degradado. As funções de proteção impõem um desafio grande com a implementação do barramento de processos. Pontos necessários de avaliação incluem a correta atuação das funções de proteção, tempo de atuação e de eliminação dos defeitos, comportamento durante contingências na rede de comunicação, entre outros. Esse artigo faz uma análise do desempenho dinâmico da função de proteção de distância utilizando o barramento de processos. Os principais pontos avaliados são: tempo de atuação da proteção, tempo de eliminação do defeito e análise do desempenho da proteção sobre contingências no barramento de processos. Os resultados mostram que a utilização do barramento de processos apresenta um erro de 1,96 % em relação a topologia convencional no tempo de eliminação de falta. Nos casos considerando tráfego concorrente no barramento de processos, o erro máximo encontrado foi de 2,38 %, assim conclui-se que o barramento de processos não influencia significativamente o desempenho da proteção.

**Keywords:** Electrical systems; digital substations; distance protection; IEC 61850; process bus.

**Palavras-chaves:** Barramento de processos; IEC 61850; proteção de distância; sistemas elétricos; subestações digitais.

### 1. INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos estão em constante evolução. Com a atual transição de um cenário tradicional para um cenário de redes inteligentes, uma das principais evoluções é o uso das telecomunicações nos sistemas de energia elétrica. Uma aplicação que vem se destacando é a digitalização das subestações. Desde o surgimento da norma IEC 61850 International Electrotechnical Commission (2003a), a implementação de protocolos de comunicação para determi-

nadas tarefas vem sendo considerada em novos projetos e também em processos de *retrofit* de subestações. Os protocolos que são previstos por essa norma são: *Manufacturing Message Specification* (MMS), *Generic Object Oriented Substation Event* (GOOSE) e *Sampled Values* (SV). O MMS é proposto pela ISO 9506 ISO / TC 184 / SC 5 (2003a,b), e a norma IEC 61850 mapeia os seus serviços para aplicações de controle e supervisão. O GOOSE é previsto na parte 8-1 da norma International Electrotechnical Commission (2004a) e é utilizado para troca de informações binárias entre *Intelligent Electronic Devices* (IEDs). O SV é previsto na parte 9-2 da norma International

\* Os autores agradem à CAPES pelo suporte financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

Electrotechnical Commission (2004b) e é utilizado para o envio de sinais analógicos amostrados para dispositivos de proteção e medição.

As subestações são divididas em três níveis funcionais: processo, vão e estação. Esquemas de proteção em subestações convencionais possuem a comunicação entre o nível de processo e de vão através de cabos elétricos, onde são transmitidos sinais de tensão e corrente de forma analógica e também sinais binários através de nível de tensão em Corrente Contínua (CC). A comunicação entre dispositivos no nível de vão e entre dispositivos dos níveis de vão e de estação ocorriam no barramento de estação, porém com soluções específicas de fabricantes.

Com o surgimento da norma IEC 61850, está ocorrendo uma migração de soluções de comunicação em subestações dependentes de fabricantes para soluções padronizadas de acordo com uma norma internacional, Hossenlopp et al. (2008). A estrutura de redes das subestações digitais se dividem nos barramentos de processo e de estação. O barramento de processo realiza a comunicação entre dispositivos localizados nos níveis de processo e de vão, Kanabar et al. (2011). O barramento de estação realiza a comunicação horizontal entre dispositivos no nível de vão e a comunicação vertical entre dispositivos dos níveis de vão e de estação, Yang et al. (2011).

O funcionamento das funções de proteção deve ser avaliado cautelosamente para evitar atuações incorretas, desligamentos indevidos e blecautes generalizados. Esses incidentes acarretam em inestimáveis prejuízos financeiros. A implementação do barramento de processos apresenta uma grande mudança de paradigma no setor elétrico. Assim, antes da implementação efetiva dessa tecnologia, estudos aprofundados devem ser executados.

Estudos presentes na literatura analisam o desempenho da utilização do barramento de processo para esquemas de proteção de sistemas elétricos e avaliam os requisitos para o correto funcionamento de cada esquema de proteção, Yang et al. (2011); Kanabar et al. (2011); Soares et al. (2021); Leite et al. (2020); Pereira et al. (2021). Isso implica no estudo do protocolo SV para entender o seu comportamento para diferentes esquemas de proteção, analisar impactos da sua utilização, e também para investigar outras possíveis aplicações desse protocolo de comunicação.

Estudos específicos sobre o desempenho da função de proteção de distância utilizando o barramento de processos ainda carecem de alguns detalhes importantes. Pontos em aberto incluem a análise do efeito de contingências no barramento de processos no desempenho dessa função de proteção e a análise do comportamento dos protocolos de comunicação do barramento de processo com configurações padrões (e.g., sem *tag* de prioridade e sem configuração de *Virtual Local Area Networks* (VLANs)). Além disso, poucos artigos fazem estudos considerando o desempenho dinâmico dessa função de proteção Ali et al. (2013); Kanabar et al. (2011).

Este artigo analisa o desempenho da função de proteção de distância utilizando o barramento de processos. O desempenho é avaliado em um cenário de uma linha de transmissão real do sistema elétrico brasileiro. Os cenários estudados envolvem o barramento de processos

em condições ideais e em condições de contingências. Como um fator comparativo, também é analisado o desempenho da proteção em uma topologia convencional de subestação.

O artigo é estruturado da seguinte forma: a Seção 2 traz uma revisão de literatura sobre a utilização do barramento de processos em aplicações de proteção de sistemas elétricos. A Seção 3 descreve a estrutura do barramento de processos e dos protocolos de comunicação utilizados nele. A Seção 4 apresenta o cenário de estudo e as contribuições desse trabalho. A Seção 5 apresenta os testes e os seus resultados. Por fim, a Seção 6 traz as conclusões do estudo.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

A implementação do barramento de estação seguindo as orientações da norma IEC 61850 é bem consolidado. Pesquisas recentes vêm avaliando a implementação do barramento de processos para aplicações de proteção e controle. Pontos importantes de avaliação em aplicações de proteção incluem: medição de latência, corrente funcionamento da função de proteção, efeitos de tráfegos concorrentes, efeitos das perdas de pacotes na atuação da proteção.

### 2.1 Funções de proteção estudadas

Diversas funções de proteção vêm sendo investigadas para implementação com barramento de processos. Em Yang et al. (2011) duas funções de proteção, i.e. diferencial de linha (87L) e de distância (21), são avaliadas. O desempenho da operação dessas funções de proteção foi avaliado em termos de segurança, dependabilidade e velocidade de operação. O referido artigo analisa o desempenho da proteção de distância em quatro cenários:

- (1) Entradas analógicas e *trip* binário;
- (2) Entradas analógicas e *trip* via GOOSE;
- (3) Entradas via SV e *trip* binário;
- (4) Entradas via SV e *trip* via GOOSE.

Através de uma análise estatística foram obtidos os tempos de operação médio e os desvios padrões para as funções avaliadas. Os resultados provaram que o uso do barramento de processos não reduz o desempenho das funções de proteção em comparação com esquemas convencionais. Pontos não avaliados incluem a análise dinâmica da proteção, tendo sido realizados apenas testes estáticos. Além disso, não foi avaliado o efeito de tráfego concorrente na atuação das funções de proteção.

Em Jesus and Varghese (2017) foi avaliado um esquema híbrido de proteção diferencial de linha. Esse esquema híbrido consiste da implementação de uma topologia convencional em um terminal da linha de transmissão, e no outro terminal é feito a implementação do barramento de processos. Um diferencial desse trabalho é que o barramento de processos é avaliado em condições de baixo carregamento e com carregamento normal da rede. No caso do carregamento normal, a largura de banda utilizada corresponde a metade da capacidade da rede. Em ambos cenários, foi provada a viabilidade técnica da utilização do esquema híbrido e da implementação do barramento de processos.

Os autores em Crossley et al. (2011) analisam um esquema de proteção de linha de transmissão utilizando a função de

proteção de distância. Os resultados são comparados para os dois terminais da linha de transmissão. Um terminal utiliza a topologia convencional de uma subestação, e o outro terminal utiliza o barramento de processos. Os resultados provam a viabilidade técnica da implementação do barramento de processos para esse esquema. Os tempos de operação são similares entre ambos os cenários. Apesar dos benefícios destacados nesse trabalho, resultados mais detalhados seriam possíveis através de testes dinâmicos e com a avaliação do efeito de tráfego concorrente na atuação da proteção.

Em Ingram et al. (2014), testes com um simulador digital em tempo real avaliam um esquema de proteção diferencial de transformador utilizando o barramento de processos. Nesse artigo foram avaliados o efeito de erros de sincronização temporal e tráfego concorrente no desempenho da proteção. Os resultados apresentados provam que o IED de proteção em análise operou corretamente até mesmo para casos extremos de tráfego de rede atingindo 100% da sua capacidade. Os erros de sincronização além do permitido pela norma IEC 61850 não afetaram de forma significativa o desempenho da proteção. Isso prova que os IEDs podem atingir desempenhos requeridos mesmo em condições extremas.

Dois trabalhos que investigam o desempenho da proteção de distância simulando perdas de pacotes SV no barramento de processo são Kanabar et al. (2011) e Ali et al. (2013). Os resultados em ambos os trabalhos demonstram que a perda de pacotes SV impactam a atuação da proteção, gerando atrasos na atuação da mesma. Entretanto, o primeiro trabalho realiza testes com dispositivos emulados e não apresenta muitos detalhes sobre sincronização temporal e configuração da rede. O foco principal é o desenvolvimento de uma medida corretiva para estimar os valores dos sinais de tensão e corrente em caso de perdas dos pacotes. O segundo trabalho (i.e., Ali et al. (2013)) realiza essa análise através de simulações usando o *software* MATLAB. Sendo assim, é possível notar a carência por testes utilizando dispositivos comerciais de proteção, relógios de rede e dispositivos de testes para validar efetivamente esses impactos de perdas de pacotes e a probabilidade de ocorrência desse evento.

Uma metodologia adequada para avaliar o desempenho de funções de proteção é através de testes dinâmicos envolvendo a interação dos dispositivos de proteção. Esses testes podem ser realizados através de simuladores digital em tempo real ou mala de testes, onde é possível a realização de testes em malha fechada. Os autores em Pereira et al. (2021) avaliam uma comparação do desempenho dinâmico da função de proteção diferencial de linha (87L) com testes em malha fechada com uma mala de testes de um fabricante brasileiro. Os testes comparam o desempenho entre a topologia convencional de uma subestação com a utilização do barramento de processos. Os resultados apresentados validam a utilização dos testes em malha fechada para avaliação do desempenho de funções de proteção. Além disso, a comparação entre os dois casos avaliados não apresentou diferenças significativas, provando que o barramento de processos pode ser implementado sem degradar o desempenho da função 87L.

Através dessa revisão de literatura é possível perceber que em alguns trabalhos (e.g., Jesus and Varghese (2017); Ingram et al. (2014)) a validação das funções de proteção são feitas considerando o barramento de processos em situações ideais, e com determinados carregamentos de redes. Entretanto, os únicos trabalhos que avaliam os efeitos de perdas de pacotes SV no desempenho da atuação da proteção de distância utilizam dispositivos emulados ou fazem sua análise em softwares de simulação. Isso prova a carência de um trabalho que faça a análise do desempenho dessa função de proteção com dispositivos comerciais. Além disso, a utilização de testes dinâmicos em malha fechada permite uma avaliação mais detalhada da atuação da função de proteção.

### 3. O BARRAMENTO DE PROCESSOS

O barramento de processos é a interface de comunicação entre dispositivos localizados no nível de processo (e.g., transformadores de instrumento, disjuntores, seccionadoras) e os dispositivos localizados no nível de vão (e.g., IEDs de proteção, IEDs de medição, dispositivos de controle, etc.). A Figura 1 mostra a topologia da subestação digital.

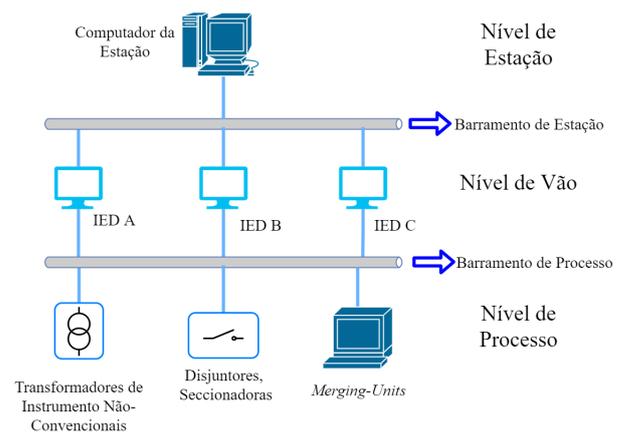


Figura 1. Topologia de uma subestação digital.

Como é possível ver na Figura 1, o barramento de estação interconecta os dispositivos do nível de vão e os dispositivos no nível de estação. As principais informações que trafegam nesse barramento envolvem medições, intertravamentos e operação Yang et al. (2011).

De acordo com a norma IEC 61850-5 International Electrotechnical Commission (2003c), o barramento de processos possui duas interfaces lógicas, interfaces 4 e 5, que servem para comunicação entre os dispositivos do nível de processo e de vão. A interface 4 é utilizada para troca de informações instantâneas entre os transformadores de instrumento e o nível de vão. A interface 5 é utilizada para troca de dados de controle entre os níveis de processo e de vão. Os protocolos de comunicação utilizados no barramento de processos são:

- GOOSE: Utilizado para troca de informações de comando e controle;
- SV: Envio de amostras digitalizadas de tensão e corrente para o nível de vão;

### 3.1 GOOSE - Generic Object Oriented Substation Event

O protocolo GOOSE é desenvolvido para o envio de mensagens de comando e controle entre dispositivos no nível de vão e entre dispositivos do nível de processo e de vão através de uma rede ethernet. Esse protocolo utiliza do modelo publicador/assinante para envio dos *frames* ethernet. Esses *frames* trafegam na camada de enlace do modelo *Open Systems Interconnection* (OSI) e são enviados utilizando um endereço *Media Access Control* (MAC) multicast Soares et al. (2021).

A estrutura do protocolo possui um campo *ethertype* para identificação do tipo do protocolo (i.e, 0x88B8 em hexadecimal para protocolo GOOSE). A IEC 61850 ainda define uma faixa de endereços multicast entre 01-0C-CD-01-00-00 e 01-0C-CD-01-01-FF. Os primeiros quatro octetos são fixos, e os dois últimos são utilizados para identificar os grupos *multicast*.

Os *frames* ethernet são enviados periodicamente em curtos períodos de tempo e possuem um mecanismo de retransmissão das mensagens para garantir a efetiva entrega da mensagem do IED publicador para o IED ou grupo de IEDs assinante International Electrotechnical Commission (2004a). O mecanismo de retransmissão, mostrado na Figura 2, reenvia a mesma informação aumentando gradualmente o campo *SqNum* e o tempo de retransmissão até que um novo evento ocorra ou o limite de retransmissão seja atingido. O IED calcula os intervalos de tempo da retransmissão das mensagens de acordo com uma equação definida pelo fabricante. Na ocorrência de algum evento o tempo de retransmissão vai para o seu valor mínimo, e esse valor é aumentado gradualmente no tempo.

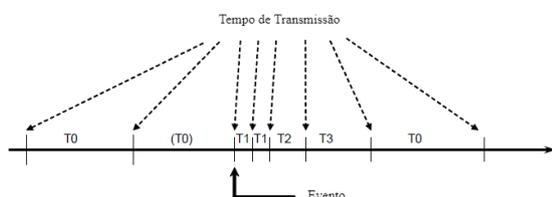


Figura 2. Mecanismo de retransmissão das mensagens GOOSE, modificado de International Electrotechnical Commission (2004a).

### 3.2 SV - Sampled Values

O protocolo SV, previsto em International Electrotechnical Commission (2004b); International Electrotechnical Commission (IEC) (2011), envia amostras digitalizadas de tensão e corrente dos transformadores de instrumento para os IEDs. A comunicação com esse protocolo ocorre de forma unilateral e pode ser feita de duas formas. A primeira é utilizando as *Merging Units* (MUs), que funcionam como conversores de sinais analógicos para sinais digitais e formatam as mensagens seguindo as orientações da norma. A segunda maneira é com os transformadores de instrumento não convencionais (e.g, transformadores de instrumento ópticos) que já enviam os sinais digitalizados para os IEDs.

Esse protocolo possui restrições temporais críticas para geração e envio das mensagens. Assim, a comunicação

também é feita através da camada de enlace do modelo OSI. As mensagens SV trafegam de forma unidirecional, ou seja, do dispositivo que está gerando as mensagens para o dispositivo que está recebendo as mensagens. Uma desvantagem é que esse protocolo não possui mecanismo contra falhas na rede de comunicação. Ou seja, na ocorrência de algum erro, a mensagem não será recebida pelo dispositivo que a está assinando.

Esse protocolo especifica diferentes taxas de envio de pacotes a depender da aplicação em que esse será utilizado. As possíveis aplicações envolvem proteção e medição. Cada *frame* ethernet contém quatro amostras de tensão e quatro amostras de corrente. Essas quatro amostras consistem nos sinais das três fases do sistema elétrico mais o sinal do neutro. Em aplicações de proteção, cada amostra deve chegar rapidamente ao seu destino. A taxa de envio dos *frames* SV para aplicações de proteção é de 80 amostras/ciclo. Em aplicações de medição, esse requisito temporal é menos crítico em relação as aplicações de proteção. A taxa de envio consiste de 256 amostras por ciclo, sendo essas amostras agrupadas em 8 conjuntos e enviadas a uma taxa de 32 mensagens por ciclo Soares et al. (2021).

As mensagens SV precisam ser configuradas através de endereços de destino *multicast/unicast*, e um único endereço de origem deve ser utilizado International Electrotechnical Commission (IEC) (2011). A faixa de endereços *multicast* recomendada varia de 01-0C-CD-04-00-00 até 01-0C-CD-01-FF. O *ethertype* para as mensagens SV é 0x88BA, opcionalmente esse valor pode ser 0x8100 para definição de VLANs. Através das *tags* de VLAN também é possível definir *tags* de prioridade. As *tags* de VLANs são de acordo com o padrão IEEE 802.1Q Institute of Electrical and Electronic Engineers (2014) e são utilizadas para separar tráfegos de alta prioridade e tempo crítico dos tráfegos de baixa prioridade. A *tag* de VLAN é opcional, caso seja utilizado é necessário configurar o campo *VLAN Identifier* (VID). Se não for utilizado, o valor padrão do VID é zero. O campo *Application Identifier* (APPID) é utilizado para selecionar *frames* contendo mensagens SV e distinguir a associação da aplicação. A faixa de valores reservadas para o APPID varia de 0x4000 até 0x7FFF. O valor padrão é 0x4000.

### 3.3 Sincronismo Temporal

O guia de implementação para interface digital para transformadores de instrumento, conhecida como IEC 61850-9-2 *Light Edition* (LE) UCA International Users Group (2004), especifica que a sincronização temporal deve ser através de um sinal de 1 pulso por segundo e a fonte de sincronização temporal deve ter uma precisão de  $\pm 1 \mu s$ . As amostras de uma MU devem possuir estampa de tempo com uma precisão de classe 4 seguindo a norma IEC 61850-5 International Electrotechnical Commission (2003c) (i.e.,  $\pm 4 \mu s$ ).

Para atingir esses requisitos, o protocolo *Precision Time Protocol* (PTP)v2, previsto na norma IEEE 1588 Institute of Electrical and Electronics Engineers (2019), fornece a melhor precisão, com erros temporais menores que 100 ns Ingram et al. (2012).

A norma IEC 61850-1 International Electrotechnical Commission (2003b) define dois tipos de mensagem de sincronização temporal através da rede ethernet: tipo 6a e 6b, referente a sincronização temporal no barramento de estação e barramento de processos, respectivamente. Porém não é clara sobre onde deve ser implementada o tráfego de comunicação dessas mensagens. IEDs comerciais (e.g., SEL 421-7 Schweitzer Engineering Laboratories Inc. (2018)) implementam a sincronização temporal com o protocolo PTP através do barramento de estação. Após a descrição do barramento de processos e dos protocolos de comunicação utilizados, a Seção 4 descrevem o cenário de estudo.

#### 4. CENÁRIO DE ESTUDO

Conforme visto em algumas literaturas, a maioria dos testes realizados se baseiam em testes estáticos. O estudo feito nesse artigo considera o modelo de uma linha de transmissão do sistema elétrico brasileiro. Esse sistema é mostrado na Figura 3. Ele foi modelado no *software* RelaySimTest OMICRON electronics GmbH (2020) para permitir o uso do recurso *Iterative Closed-Loop* (teste em malha fechada), permitindo uma análise criteriosa da correta atuação da proteção e do tempo de eliminação de falta.

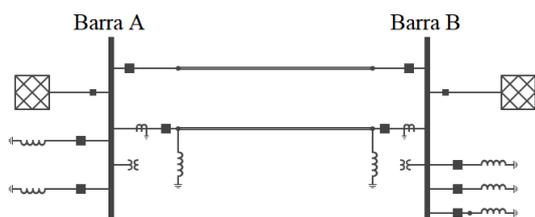


Figura 3. Cenário Base para Estudo.

Para avaliar o desempenho da proteção de distância e ter um fator de comparação para um caso ideal, serão avaliados três casos distintos, detalhados a seguir:

- (1) Caso 1 (referência): Sinais de tensão e corrente analógicos e sinal de *trip* binário;
- (2) Caso 2: Sinais de tensão e corrente analógicos e *trip* via GOOSE;
- (3) Caso 3: Sinais de tensão e corrente via SV e *trip* via GOOSE.

Os três casos são mostrados na Figura 4. O caso 1 é o caso de referência, com a topologia convencional de uma subestação. O caso 2 compara o desempenho da atuação da proteção com o protocolo GOOSE para envio do sinal de *trip* do disjuntor. Por fim, o caso 3 analisa o desempenho de uma subestação digital. Após a avaliação dos casos ideais, o caso 3 é avaliado isoladamente considerando tráfego concorrente no barramento de processos. O intuito é avaliar possíveis impactos desses tráfegos na atuação da proteção de distância.

Um ponto importante a se ressaltar é que será avaliado a eliminação da falta em apenas de um terminal da linha de transmissão. Sendo assim, não será considerado nenhum esquema de teleproteção nesses testes. Portanto apenas faltas em zona 1 da proteção de distância serão simuladas.

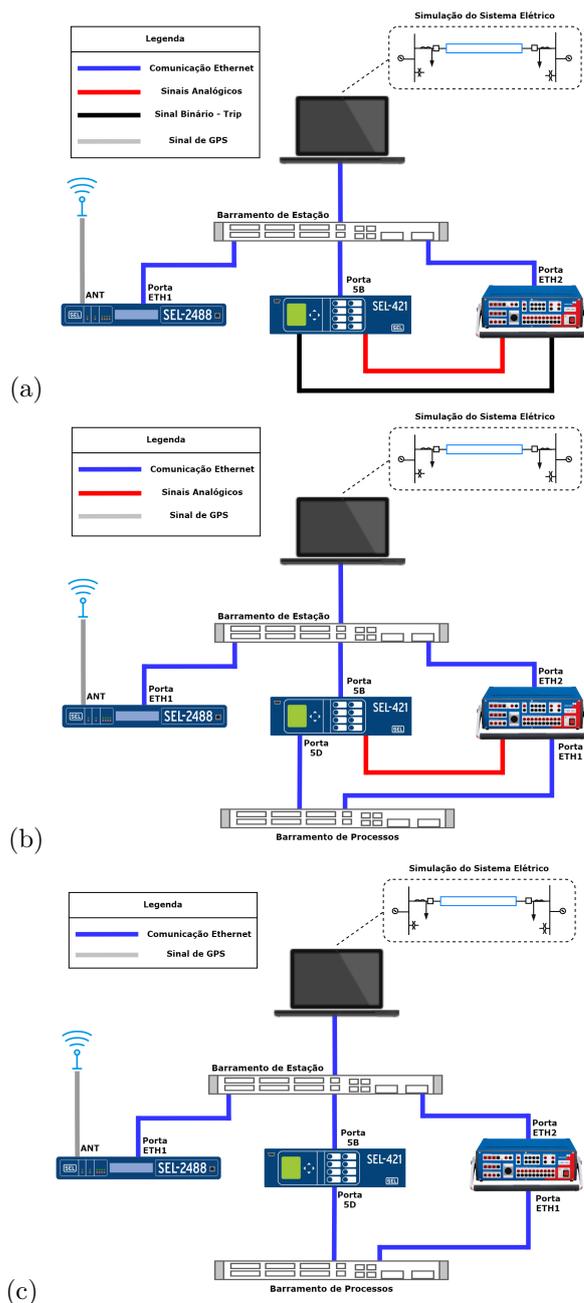


Figura 4. (a) Cenário convencional; (b) Cenário com *trip* via GOOSE; (c) Cenário com implementação completa do barramento de processos.

Os equipamentos utilizados, conforme mostrados na Figura 4, serão: uma mala de testes Omicron CMC 356, um IED de proteção SEL 421-7, um relógio de rede SEL 2488 para sincronismo temporal, e dois switches TP-Link TL-SG108E Gigabit Ethernet para comunicação entre os dispositivos. Um dos switches será utilizado para fazer as comunicações no nível de barramento de estação e o segundo switch será utilizado para permitir as comunicações a nível de barramento de processos.

A geração de tráfego concorrente será feita utilizando o *software* Iperf, onde dois computadores se comunicam entre si no barramento de processos utilizando o protocolo *User Datagram Protocol* (UDP). Através desse protocolo de comunicação, é possível garantir uma taxa de envio

constantes de pacotes na rede de comunicação. Um dos computadores se comportou como cliente e o outro como servidor. A topologia dos testes considerando tráfego concorrente é mostrada na Figura 5.

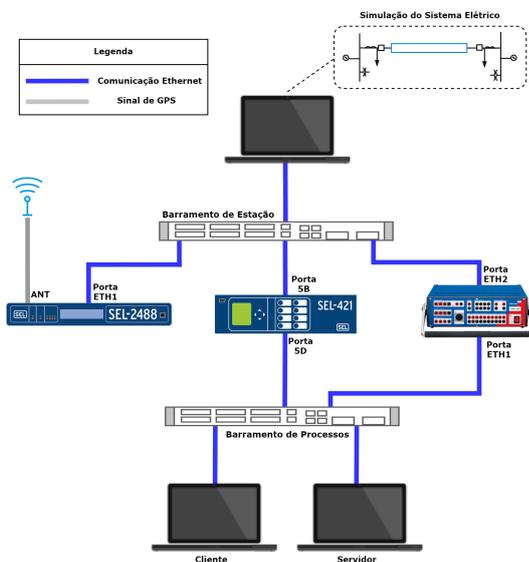


Figura 5. Cenário de testes com tráfego concorrente no barramento de processos.

#### 4.1 Dados do Sistema Elétrico

O sistema elétrico foi modelado a partir de informações reais do sistema elétrico brasileiro. Essas informações foram extraídas da base de dados do Operador Nacional do Sistema (ONS) e a Tabela 1 apresenta essas informações. Os dados de ajuste das fontes de tensão são fornecidos na Tabela 2.

Tabela 1. Dados do sistema elétrico equivalente

Dados	R1 ( $\Omega$ )	X1 ( $\Omega$ )	B1 (mS)	R0 ( $\Omega$ )	X0 ( $\Omega$ )	B0 (mS)
Linha de transmissão	5,8604	86,264	1,9725	140,01	498,01	1,139
Linha de transferência	12,295	109,69	-	7,0072	9,5849	-
Reator de linha terminal A	-	1250	-	-	1250	-
Reator de linha terminal B	-	1666,7	-	-	1666,7	-
Reator de barra terminal A	-	2500	-	-	2500	-
Reator de barra terminal B	-	1666,8	-	-	1666,8	-
Fonte de tensão A	2,0126	18,181	-	12,141	60,401	-
Fonte de tensão B	2,0635	33,168	-	4,4118	35,995	-

Tabela 2. Ajuste das tensões das fontes equivalentes

Barra	Tensão (kV)	Ângulo ( $^{\circ}$ )
Fonte A	545	19
Fonte B	550	41

#### 4.2 Configurações IEC 61850

O cenário de teste com *trip* via mensagens GOOSE e o cenário de subestação digital demandam a utilização de nós lógicos específicos de acordo com a norma IEC 61850. A Tabela 3 demonstra os nós lógicos utilizados e a função de cada um.

O funcionamento da estrutura de comunicação utilizando os nós lógicos da Tabela 3 é da seguinte forma: a mala de testes está representando o sistema elétrico, logo o sinal

Tabela 3. Nós lógicos utilizados nos testes.

Função	Nó Lógico
Trip de disjuntor	SEL_421_L1/CFG/LLN0/GPub01.PRO.TRIPPTCRC1.Tr.general
Estado do disjuntor	CMC356/CFG/LLN0/CBRK.PRO.BK1AXCBR1.Pos.stVal
Corrente fase A	CMC356/CFG/LLN0/MSVCB01.MU01.IAWTCTR1.Amp.instMag.i
Corrente fase B	CMC356/CFG/LLN0/MSVCB01.MU01.IBWTCTR2.Amp.instMag.i
Corrente fase C	CMC356/CFG/LLN0/MSVCB01.MU01.ICWTCTR2.Amp.instMag.i
Tensão fase A	CMC356/CFG/LLN0.MSVCB01.MU01.VAYTVTR1.Vol.instMag.i
Tensão fase B	CMC356/CFG/LLN0.MSVCB01.MU01.VBYTVTR2.Vol.instMag.i
Tensão fase C	CMC356/CFG/LLN0.MSVCB01.MU01.VCYTVTR3.Vol.instMag.i

de trip é transmitido do IED SEL 421-7 para a mala de testes. O nó lógico de estado de disjuntor é transmitido da mala de testes para o IED SEL 421-7 para indicar a abertura desse equipamento para o IED de proteção. Os nós lógicos referentes as mensagens SV são transmitidos da mala de testes para o IED SEL 421-7. Após a descrição dos cenários de testes, a Seção 5 apresenta os resultados.

## 5. TESTES E RESULTADOS

Todos os resultados apresentados nessa seção são referentes ao terminal A do sistema elétrico estudado.

### 5.1 Comparação entre casos avaliados

Os primeiros resultados apresentados são referentes ao tempo de eliminação de falta comparando os cenários 1, 2 e 3 mostrados na Figura 4, sem considerar contingências no barramento de processos e levando em conta o tempo de abertura do disjuntor. Para avaliar os tempos de eliminação do curto-circuito, as simulações foram repetidas 100 vezes para cada caso considerado. Os resultados são avaliados em termos dos tempos médio de eliminação de falta e um intervalo de confiança de 95% para cada caso. Assim é possível obter uma faixa de valores plausíveis dos tempos de eliminação do curto-circuito. Todos esses resultados são mostrados na Figura 6.

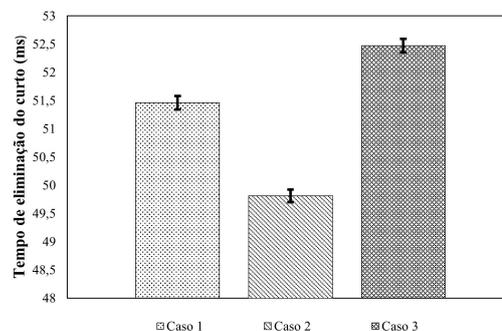


Figura 6. Comparação entre os três casos estudados sem contingências no barramento de processos.

Para complementar a análise dos resultados, a Figura 7 mostra dois registros de oscilografias para efeito de comparação de um cenário convencional e um cenário utilizando o barramento de processos. Analisando as Figuras 6 e 7, é possível perceber que o tempo de eliminação de falta não sofre grandes impactos ao utilizar o barramento de processos. O cenário com o menor tempo médio de eliminação de falta foi o cenário 2, com um erro de 3,21 % em relação ao caso 1. O cenário 3 que é o cenário a ser considerado para implementações futuras é o cenário com maior tempo médio de eliminação de falta, com um erro de 1,96 % em relação ao cenário de referência. Apesar dessa diferença, o

caso 3 é totalmente possível de ser implementado considerando condições ideais do barramento de processos.

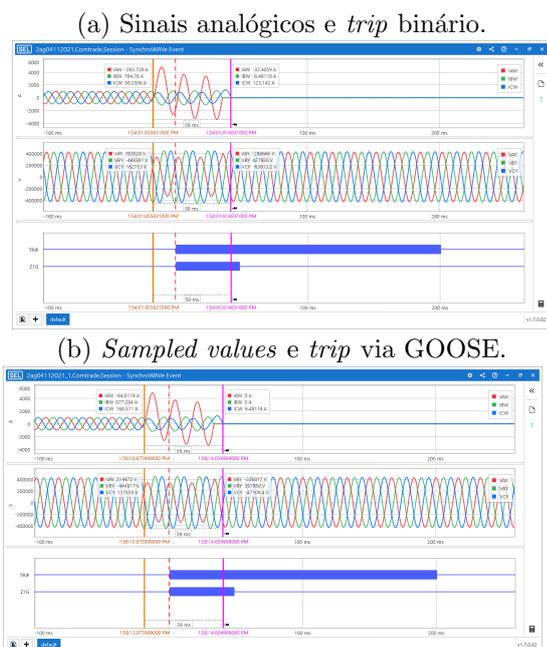


Figura 7. Comparação entre cenário convencional e cenário de subestação digital.

Após a apresentação dos resultados comparando os 3 casos estudados, os próximos resultados são em relação ao efeito do tráfego concorrente no barramento de processos.

### 5.2 Análise do efeito de tráfego concorrente no barramento de processos

O tráfego concorrente foi implementado com a utilização do protocolo UDP entre dois computadores conectados através do barramento de processos. A capacidade máxima de tráfego de comunicação da rede em questão é de 100 Mbits/s. O tráfego UDP foi aumentado gradativamente de 10 em 10 Mbits/s. Para cada intervalo analisado os testes de proteção foram repetidos 100 vezes. Como resultado dessa análise, também foram calculados o valor médio do tempo de eliminação do curto-circuito e o intervalo de confiança de 95% para cada cenário com tráfego concorrente analisado. Os resultados são apresentados na Figura 8.

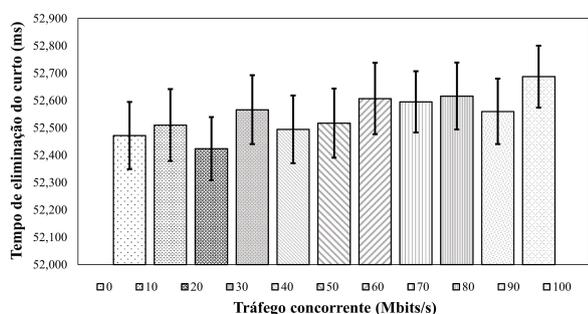


Figura 8. Análise do efeito de tráfego concorrente no barramento de processos.

Através dos resultados apresentados na Figura 8, o erro máximo do tempo de eliminação de falta comparado com

o caso 1 da Seção 5.1 foi de 2,38 %, ou seja, mesmo em situações de sobrecarga total da rede de comunicação, o tempo de eliminação do curto-circuito não é afetado significativamente. Através do cálculo do intervalo de confiança é possível perceber que esse tempo também não sofre grandes variações.

Para dar mais suporte aos resultados apresentados, a Figura 9 apresenta a variação da impedância do *loop* de falta responsável pela eliminação da falta fase-terra que foi considerada para essa análise considerando os cenários ideal e com carregamento total da rede de comunicação.

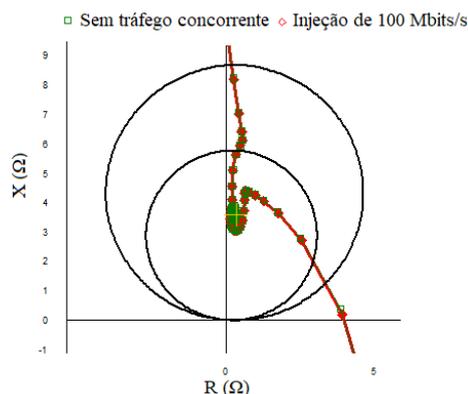


Figura 9. Comparação da variação da impedância com cenário ideal e com carregamento da rede de comunicação.

Com os resultados apresentados verifica-se que a função de proteção de distância utilizando barramento de processos funciona corretamente mesmo em situações extremas de contingências da rede de comunicação. Após a apresentação dos resultados, a Seção 6 apresenta as conclusões do trabalho.

## 6. CONCLUSÃO

Este trabalho descreveu o funcionamento de esquemas de proteção em subestações convencionais e abordou a migração para o cenário das subestações digitais implementando o barramento de processos e o barramento de estação com protocolos de comunicação padronizados pela IEC 61850.

Foi apresentada uma avaliação sobre o desempenho dinâmico da proteção de distância comparando o tempo de eliminação de curto circuito em uma linha de transmissão modelada no *software* RelaySimTest considerando três diferentes cenários, desde uma topologia convencional de subestação até a topologia de uma subestação digital. Através dos testes realizados foi verificado a viabilidade da implementação do barramento de processos. Uma análise posterior avalia o impacto de tráfegos concorrentes no barramento de processos na atuação da função de proteção de distância. Foi verificado que mesmo em situações de carregamento total da rede de comunicação, o tempo de eliminação da falta não é afetado significativamente.

Dois trabalhos apresentados na Seção 2 avaliam impactos das perdas de pacotes SV na atuação da proteção de distância. Entretanto, os testes com equipamentos comerciais apresentados nesse trabalho comprovam que o tráfego de

mensagens SV não é afetado por situações de carregamento total da rede de comunicação.

As principais contribuições desse trabalho são: apresentação da implementação das subestações *full* digitais, análise de possíveis impactos na atuação de funções de proteção e a avaliação da viabilidade técnica da implementação do barramento de processos. Pontos importantes em aberto para futuras discussões incluem impacto da perda de *frames* SV durante falhas na rede de comunicação, análise do desempenho de protocolos de recuperação de rede e de diferentes prioridades para os protocolos de comunicação utilizados no barramento de processos.

## REFERÊNCIAS

- Ali, I., Thomas, M.S., and Gupta, S. (2013). Sampled values packet loss impact on IEC 61850 distance relay performance. *2013 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia, ISGT Asia 2013*, 1–6. doi:10.1109/ISGT-Asia.2013.6698767.
- Crossley, P., Yang, L., Wen, A., Chatfield, R., Redfern, M., and Sun, X. (2011). Design and performance evaluation for a protection system utilising IEC 61850-9-2 process bus. *APAP 2011 - Proceedings: 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*, 1, 534–538. doi:10.1109/APAP.2011.6180459.
- Hossenlopp, L., Chatrefou, D., Tholomier, D., and Bui, D.P. (2008). Process Bus: Experience and Impact on Future System Architectures. *Cigre Bienal*, 5–104.
- Ingram, D.M., Schaub, P., and Campbell, D.A. (2012). Use of precision time protocol to synchronize sampled-value process buses. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 61(5), 1173–1180. doi:10.1109/TIM.2011.2178676.
- Ingram, D.M., Schaub, P., Taylor, R.R., and Campbell, D.A. (2014). System-level tests of transformer differential protection using an IEC 61850 process bus. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29(3), 1382–1389. doi:10.1109/TPWRD.2013.2291789.
- Institute of Electrical and Electronic Engineers (2014). IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Bridges and Bridged Networks. *IEEE Std 802.1Q-2014 (Revision of IEEE Std 802.1Q-2011)*, 1–1832. doi:10.1109/IEEESTD.2014.6991462.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (2019). *IEEE Standard for a Precision Time Protocol v2.1*, volume v2.1. doi:10.1109/IEEESTD.2020.9120376.
- International Electrotechnical Commission (2003a). *IEC 61850-1 Communication networks and systems in substations – Part 1: Introduction and overview*. 1 edition.
- International Electrotechnical Commission (2003b). *IEC 61850-1 Network and Systems in Substations - Introduction and Overview*. Technical report, IEC.
- International Electrotechnical Commission (2003c). *IEC 61850-5: Communication requirements for functions and device models*. Technical report, IEC.
- International Electrotechnical Commission (2004a). *IEC 61850-8-1 Communication networks and systems in substations – Part 8-1: Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3 Reference*. IEC, 1 edition.
- International Electrotechnical Commission (2004b). *IEC 61850-9-2 Communication networks and systems in substations – Part 9-2: Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Sampled values over ISO/IEC 8802-3*. 1 edition.
- International Electrotechnical Commission (IEC) (2011). *IEC 61850-9-2 Communication Networks and Systems for Power Utility Automation - Part 9-2: Specific Communication Service Mapping (SCSM) - Sampled Values over ISO/IEC 8802-3*. 2 edition.
- ISO / TC 184 / SC 5 (2003a). *ISO 9506-1:2003 Industrial Automation Systems - Manufacturing Message Specification (MMS) Part 1: Service Definition*. ISO, 2 edition.
- ISO / TC 184 / SC 5 (2003b). *ISO 9506-2:2003 Industrial Automation Systems - Manufacturing Message Specification - Part 2: Protocol Specification*. ISO, 2 edition.
- Jesus, J. and Varghese, A. (2017). Feeder differential protection in hybrid mode: Scheme performance with mix of 9-2le sampled values and analogue inputs. In *2017 International Conference on Modern Power Systems (MPS)*, 1–5. IEEE. doi:10.1109/MPS.2017.7974399. URL <http://ieeexplore.ieee.org/document/7974399/>.
- Kanabar, M.G., Sidhu, T.S., and Zadeh, M.R. (2011). Laboratory investigation of IEC 61850-9-2-based busbar and distance relaying with corrective measure for sampled value loss/delay. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26(4), 2587–2595. doi:10.1109/TPWRD.2011.2159033.
- Leite, M.F.A., Cruz, A.A.P., Terrola, T., and Lopes, Y. (2020). Sampled Values em Proteção Diferencial de Linhas - Desafios de Implementação. In *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 1–8. SBA, Santo André. doi:10.48011/sbse.v1i1.2423.
- OMICRON electronics GmbH (2020). *OMICRON Relay-SimTest*.
- Pereira, P.S., Bernardino, R.C., Salge, G.S., Martins, C.M., Pereira, P.S., and Lourenço, G.E. (2021). Performance assessment of a line protection implemented with process bus and GOOSE through transient closed loop tests. *Electric Power Systems Research*, 197(April), 107221. doi:10.1016/j.epsr.2021.107221. URL <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107221>.
- Schweitzer Engineering Laboratories Inc. (2018). *SEL-421-7 Protection, Automation, and Control System With Sampled Values Instruction Manual*.
- Soares, A.A.Z., Soares, L.F., Mattos, D.P., Pinheiro, P.H.B.S., Quincozes, S.E., Ferreira, V.C., Apostolo, G.H., Carrara, G.R., Moraes, I.M., Albuquerque, C., Lopes, Y., Fernandes, N.C., and Muchaluat-Saade, D.C. (2021). Enabling Emulation and Evaluation of IEC 61850 Networks With TITAN. *IEEE Access*, 9, 49788–49805. doi:10.1109/ACCESS.2021.3068366. URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/9385090/>.
- UCA International Users Group (2004). *Implementation Guideline for Digital Interface to Instrument Transformers Using IEC 61850-9-2*. Technical report, Raleigh.
- Yang, L., Crossley, P.A., Wen, A., Chatfield, R., and Wright, J. (2011). Performance assessment of a IEC 61850-9-2 based protection scheme for a transmission substation. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe*, 13–17. doi:10.1109/ISGTEurope.2011.6162769.