

**GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE
POTÊNCIA - GPC****ANÁLISE DE DESEMPENHO DE PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADOR (87T) BASEADO EM
SAMPLED VALUES****GUILHERMME LISBOA(1);MATEUS DUARTE TEIXEIRA(2);ANDRE MARIANO(2)
TS INFRA(1);UFPR(2)****RESUMO**

Este trabalho apresenta os testes de desempenho realizados para uma proteção diferencial de transformador. Foram variados elementos da proteção para avaliar sua performance: quantidade de Merging Units; carregamento de rede, características de amostragem dos Sampled Values (ASDU). Os testes foram realizados utilizando uma mala de testes, e o ambiente completo de um teste em fábrica de uma subestação digital, com todos os dispositivos não do bay de transformador como outros bays, que serviram para gerar o tráfego da rede.
PALAVRAS-CHAVE

IEC 61850, Barramento de Processos, Proteção Diferencial de Transformador, *Sampled Values*

1.0 - INTRODUÇÃO

Sistemas de Proteção e Controle, integrantes do Sistema Elétrico de Potência (SEP), estão passando por uma mudança de paradigma com o uso do Barramento de Processos (*Process Bus*), previsto na norma IEC 61850.

Um dos principais elementos de mudança relacionados ao *Process Bus* é a substituição de medições analógicas nos relés de proteção (IED – *Intelligent Electronic Device*), antes baseadas no lançamento de longos cabos de cobre do pátio da subestação até os relés instalados na casa de controle, por amostragem digitalizada, baseada em *Sampled Values* (SV) [1]. A geração de SVs é realizada através de Transformadores de Medida Não Convencionais (NCITs, *non-conventional instrument transformers*, como TCs e TPs ópticos), ou com o uso de *Merging Units* (MUs). Estes dispositivos possuem a capacidade de transmitir as medições analógicas para os IEDs através de comunicação via rede ethernet até os IEDs de proteção e controle. [2]

As vantagens desta inovação são inúmeras, e entre elas podemos listar: redução de custos de construção (menor quantidade de cabos de cobre, tempo de montagem), maior capacidade de supervisão do sistema com a digitalização dos dados, novos recursos de supervisão e ferramentas de testes. [3]

Esta nova implementação acrescenta novas etapas no processo de aquisição de sinais analógicos, uma vez que a MU, após a conversão do sinal analógico em digital necessita transmitir o SV a um IED através de uma rede ethernet. O IED, por sua vez, após realizar o processamento da função de proteção, transmitirá o sinal de desligamento (*trip*) para a MU pela mesma rede ethernet, desta vez utilizando de um sinal GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Event*). [4]

Já existem estudos para comparação de desempenho de proteções baseadas em *Sampled Values*, tanto para linhas [5] [6], quanto para transformadores [7], porém o principal propósito deste estudo é analisar os resultados encontrados para a atuação de uma falta específica para uma proteção diferencial de transformador (ANSI 87T), considerando variações na composição do sistema.

Foram realizados testes com uma *merging unit* gerando um único *stream* SV com todas as medições do transformador; com medições híbridas (um *stream* com um enrolamento, outro medido de forma convencional); com duas *merging units*. Também foram realizadas variações com relação ao carregamento de rede para comparar o desempenho da proteção nestas condições.

Em todos os casos de teste realizados, além da proteção baseada em SV, foi instalado um IED idêntico ao digital, porém baseado em aquisição de sinais analógicos e trip convencionais (cabeados), para permitir uma comparação entre ambas as soluções.

2.0 - DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A proteção baseada em *Sampled Values* é diferente da estrutura de uma proteção convencional pelo acréscimo de elementos na cadeia de proteção, como comunicação digital, e consequentemente atrasos adicionais na forma de codificação e decodificação de pacotes [8]. Para a atuação de uma proteção, convencional ou com MUs, deve atender a tempos estabelecidos em norma, que como referência aqueles previstos na norma IEC 60834-1 [9], enquanto para a transmissão de GOOSE e SV consideramos o especificado na norma IEC 61850-5 [10]. No caso de proteção diferencial de transformadores, as condições práticas em que elas poderão ser aplicadas são relevantes para a definição da solução de proteção. No caso de proteções baseadas em medições através de *Sampled Values*, a complexidade da solução excede a definição convencional de conexão de TCs, TP e relés de proteção, pois as definições relacionadas ao barramento de processos são necessárias [11]. Entre os critérios de projeto, é necessário considerar arquitetura de redes (RSTP, PRP, HSR), sincronismo de tempo (IRIG-B), composição das *merging units* (quantidade de dispositivos, alocação deles), e norma de transmissão de *Sampled Values* (IEC 61850-9-2LE ou IEC 61869-9) [12].

2.1 Sistema de Proteção

Um sistema de proteção, por definição, é um arranjo de um ou mais equipamentos, e outros dispositivos projetados para desempenhar um ou mais funções de proteção. São compostos por um ou mais equipamentos de proteção, transformadores de instrumentação (corrente e/ou tensão), cablagem, circuitos de desligamento (*trip*) e, onde necessários, sistemas de comunicação [11].

Em virtude da entrada do elemento de digitalização de sinais analógicos e comando de abertura de disjuntores (*trip*), sejam NCITs ou MUs, a proteção baseada no Barramento de Processos demanda transmissões de sinais através de rede ethernet, não previstas em soluções totalmente cabeadas.

IEDs convencionais, com leitura de sinais analógicos, processam diretamente toda a sequência de elementos necessários entre o a medição dos sinais de corrente e tensão, até a operação do contato de saída digital de comando de desligamento, como apresentado na Figura 1:

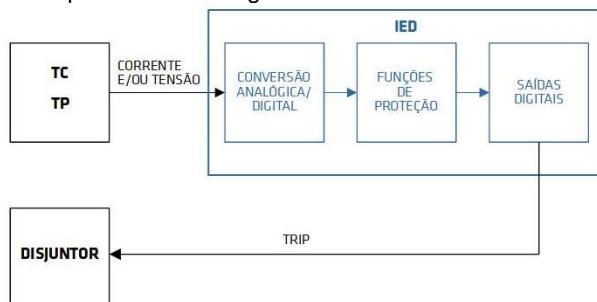


Figura 1 – sequência simplificada de leitura, processamento e atuação de IED de proteção

A aplicação com uso de Barramento de processos, possui etapas adicionais, devido a transmissão de sinais analógicos da *Merging Unit* para o IED, através de *Sampled Values*, e o retorno do comando de desligamento, via GOOSE, como representado na Figura 2:

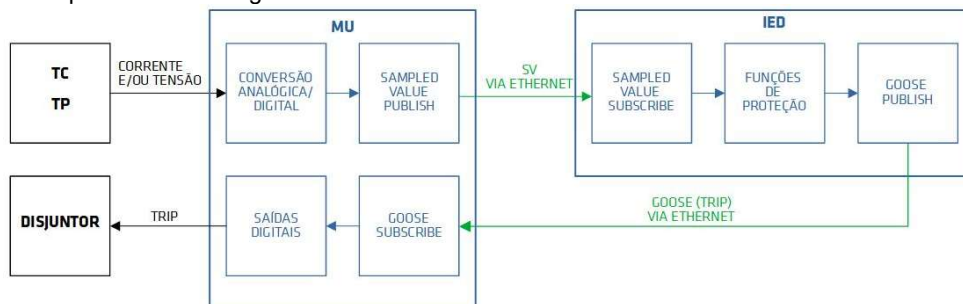


Figura 2 – sequência simplificada de leitura, processamento e atuação do IED de proteção com uso de MU

2.2 Tempos de Atuação

2.2.1 Proteção

Em termos de atuação da proteção, o esquema básico considera o tempo entre a origem da falta até o momento em que ela é fisicamente eliminada. [8]. A norma IEC 60834-1 define janelas de tempo para extinção de faltas, conforme a Tabela 1:

Tabela 1 – Tempo total para eliminação de faltas em sistemas de potência (IEC 60834-1)

Categoria	Tempo (ms)	O que inclui
Tempo de Identificação da Falta	10...30	Estágio de entrada analógica, execução do algoritmo de proteção
Tempo de Operação do Relé	0...30	Decisão do Trip, operação do contato de saída do relé
Relé de Trip	n/a	Tempo de operação do relé de trip
Tempo de Operação do Equip. Primário	30...80	Bobina de trip do disjuntor, movimento mecânico do disjuntor
Total	40...140	

No Sistema de proteção analisado, verificaremos os 2 primeiros elementos da cadeia: do reconhecimento da falta, até a operação do contato de trip.

2.2.2 Transmissão de dados

A norma IEC 61850, prevê classes de tempo de transmissão para dados, classificando de acordo com a aplicação, conforme indicado na Tabela 2:

Tabela 2 – Requerimentos de tempo para transferência de dados (IEC61850-5)

Classe	Tempo	Exemplo
TT0	>1.000ms	Transferência de Arquivos
TT1	1.000ms	Alarmes
TT2	500ms	Comandos
TT3	100ms	Automação lenta
TT4	20ms	Automação rápida
TT5	10ms	Mudanças de estados
TT6	3ms	Trips, bloqueios, SVs

Em termos de transmissão para funções de proteção, tanto as mensagens GOOSE quanto *Sampled Values* são classificadas como TT6.

2.3 Proteção Diferencial de Transformador 87T

Como apresentado anteriormente, o arranjo de uma proteção diferencial pode variar conforme o elemento protegido, e principalmente no caso de soluções baseadas em *Sampled Values*, que poderemos ter variações de soluções, com uma ou mais MUs, ou até mesmo soluções híbridas, onde uma parte da aquisição de sinais será feita de forma convencional e outra digital.

2.3.1 Proteção Convencional

A proteção diferencial do transformador, convencional, é desenhada de forma que o IED de proteção tenha capacidade de supervisionar correntes e do elemento protegido e eliminar suas faltas, conforme a Figura 3

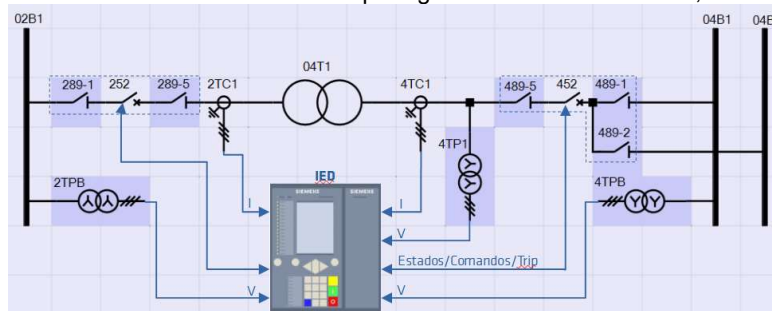


Figura 3 – Proteção Diferencial de Transformador convencional

2.3.2 Proteção Diferencial com duas *Merging Units*

Esta solução, que é a mais encontrada atualmente na literatura, acontece devido ao fato de que as primeiras aplicações de *Sampled Values* foram desenvolvidas considerando uma solução que utiliza IEC 61850-9-2LE [10], que tem a transmissão de sinais analógicos definida, e fixa. São transmitidos sempre 4 sinais de corrente e 4 sinais de tensão, independente do seu uso ou mesmo leitura pela MU. A Figura 4 apresenta esta configuração de sistema.

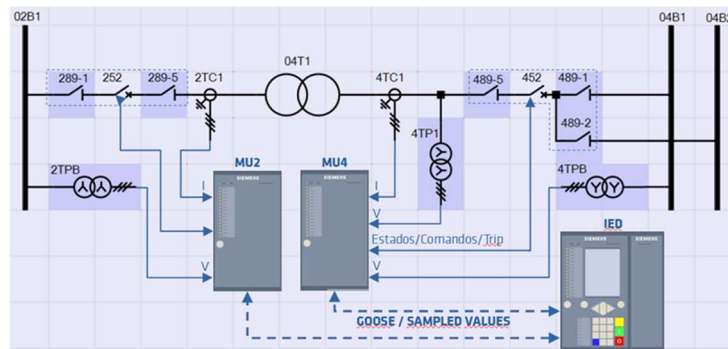


Figura 4 – Proteção Diferencial de Transformador com duas *Merging Units*

2.3.3 Proteção Diferencial com uma *Merging Unit*

Com o desenvolvimento de equipamentos aderentes a norma IEC 61869-9 [14], uma possibilidade de maior flexibilização dos sinais analógicos dentro de um *stream* de *Sampled Values* tornou-se possível, pois suporta transmissão de 1 a 24 sinais analógicos. Este novo formato permite aplicação de uma única MU para toda a proteção diferencial de um transformador.

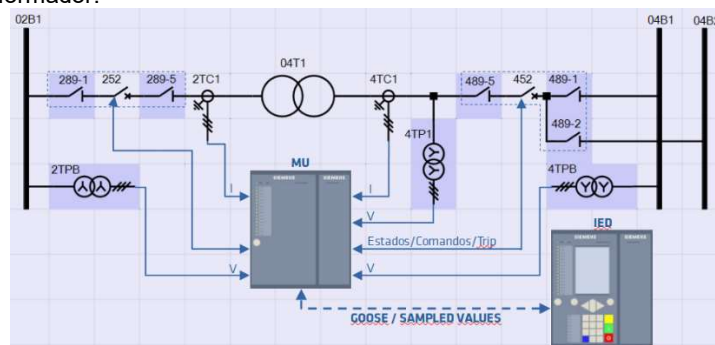


Figura 5 – Proteção Diferencial de Transformador com uma *Merging Unit*

2.3.4 Proteção Diferencial Híbrida

Quando se consideram questões comerciais e físicas, a aplicação de MUs para todos os enrolamentos de um transformador pode se tornar mais cara que outras, como por exemplo no caso da existência de um enrolamento terciário, onde o cubículo de MV está instalado próximo da sala de controle. Nesta situação, o custo dos cabos (relativamente curtos), será muito inferior ao custo de uma MU. Caso o IED tenha capacidade de receber tanto sinais digitalizados quanto sinais através de cabos, uma alternativa híbrida pode se apresentar como a melhor solução. A Figura 6 apresenta esta configuração:

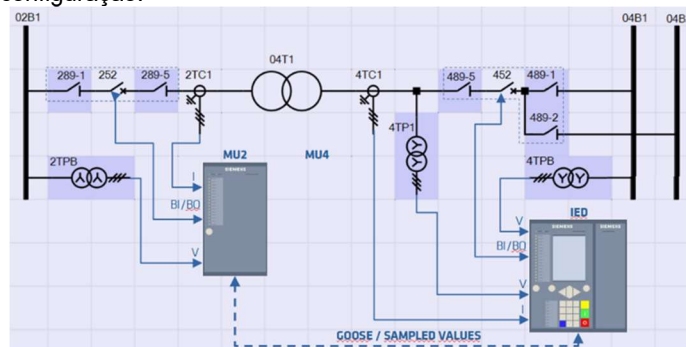


Figura 6 – Proteção Diferencial de Transformador Híbrida

3.0 - SETUP DOS TESTES

Para os testes, foram utilizados IEDs Siemens 7UT86 (e outros da mesma família compondo o resto da subestação), MUs Siemens 6MU85, switches Hirschmann GRS1142, redbox Hirschmann RSP35, servidores de tempo GE RT430 e mala de testes Omicron CMC356.

3.1 Conexões Elétricas

Para os testes realizados, foram montados arranjos diferentes em ambiente de testes, que simularam as três alternativas de conexão identificadas (duas Mus, uma MU, híbrida). Em todas as configurações, foi conectado um IED convencional em série, permitindo a comparação de cada atuação de falta. Os sinais de corrente foram gerados a partir de uma mala testes, que mediu os tempos de atuação dos sinais de trip de cada dispositivo. A conexão elétrica de cada setup está representado na Figura 7:

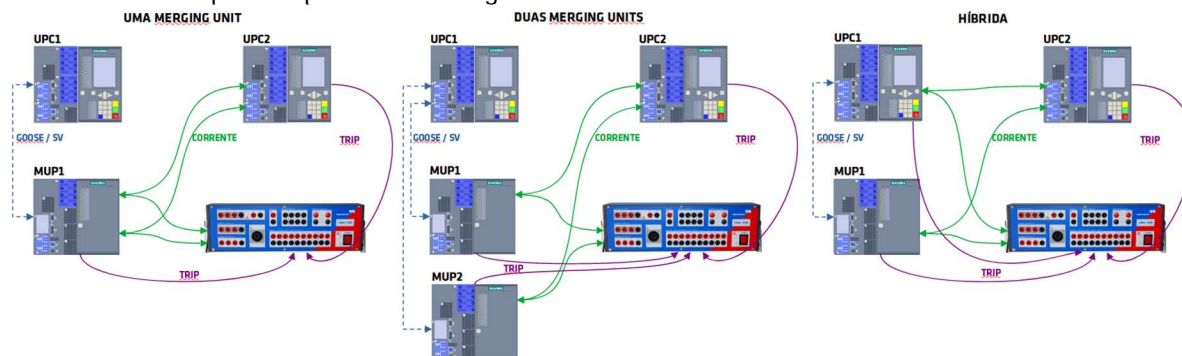


Figura 7 – Arranjos de testes realizados

Todos os contatos de *trip*, tanto nas UPCs quanto nas MUs, possuem a mesma característica de tempos de atuação.

3.2 Sampled Values

Entre as alternativas já apresentadas para a transmissão de *Sampled Values*, devido a flexibilidade gerada, foi adotado o uso da norma IEC 61869-9. Para aplicações de medição e proteção, esta norma define a taxa de amostragem em 4800Hz, independente da frequência do sistema aplicado. Considerando a recomendação da norma de uso de 2 ASDUs (*Application Service Data Unit*, que contém uma amostra de todos os sinais de um SV por unidade) por pacote enviado, chegamos a um total de 2400 pacotes transmitidos por segundo [15].

Em comparação ao previsto na IEC 61850-9-2LE, que indica 1 ASDU por pacote, temos uma redução significativa de pacotes transmitidos, porém com volume de dados muito semelhante. A quantidade de pacotes e *bytes* transmitidos na rede do projeto testado foi medido por analisador de tráfego de redes (Wireshark).

Foram realizadas medições com um ASDU e dois ASDUs por pacote. A Figura 8 abaixo representa estas medições:

1 ASDU						2 ASDU					
Protocol	Percent Packets	Packets	Percent Bytes	Bytes	Bits/s	Percent Packets	Packets	Percent Bytes	Bytes	Bits/s	
Frame	100.0	3578746	100.0	515446532	68M	100.0	1821223	100.0	463791405	61M	
Precision Time Protocol (IEEE1588)	0.0	232	0.0	12174	1614	0.0	237	0.0	12470	1653	
IEC61850 Sampled Values	99.9	3573532	87.3	450154462	59M	99.7	1815611	92.7	430056207	57M	
GOOSE	0.1	4368	0.2	823977	109k	0.3	4747	0.2	887784	117k	

Figura 8 – Medição de pacotes e *bytes* transmitidos com um ASDU e dois ASDUs

Quando comparamos as duas configurações, percebemos que com o uso de ASDU configurado como “2”, a redução em termos de pacotes é representativa (50,5%), porém em termos de volume de *bytes*, a diminuição é muito menor (11%):

Todos os testes foram realizados com ambos os ajustes, tanto um quanto dois ASDU.

3.3 Arquitetura de Rede

Como o sistema de proteção atual possui uma componente de redes de comunicação por onde fluem GOOSE e SV, considerações com relação a rede ethernet de uma proteção precisam ser considerados. Esta mesma rede também é o meio por onde o sincronismo de tempo, necessário para SVs, é operacionalizado. Para o Barramento de Processos, conforme previsto na norma IEC 61850-9-3, o sincronismo de tempo é feito através de PTP (*Precision Time Protocol*).

Um dos objetivos do teste realizado é que os casos sejam os mais próximos possíveis de aplicações reais, e portanto a rede de comunicação ethernet e seu sincronismo de tempo foram conectados considerando redes redundantes, baseadas em PRP (IEC 62439-3), e realizados dentro de uma rede de um projeto de subestação digital [15].

O projeto em questão, possui dentro da rede do barramento de processos um total de 8 IEDs e 13 *Merging Units* [16]. Foram aplicadas recomendações consideradas tanto dentro da norma IEC 61850 quanto em outras publicações

[17]. As mensagens GOOSE e SV foram segregadas em VLANs (*Virtual Local Area Network*), de forma que somente os dispositivos que publicam e recebem cada mensagem receberão as mensagens, gerando um total de 36 VLANs.

Considerando estas circunstâncias, os testes foram realizados em 3 condições diferentes de carregamento de rede, apresentadas a seguir.

3.3.1 Rede Normal

A configuração neste caso era preparada como uma situação normal de projeto em uma subestação digital (VLANs filtrando a circulação de GOOSE/SV somente para os dispositivos que publicam e assinam a estas mensagens. Nesta condição, o carregamento da rede e comportamento se assemelha a condições que as proteções através de *Sampled Values* serão instaladas. A solução de rede é apresentada na Figura 9:

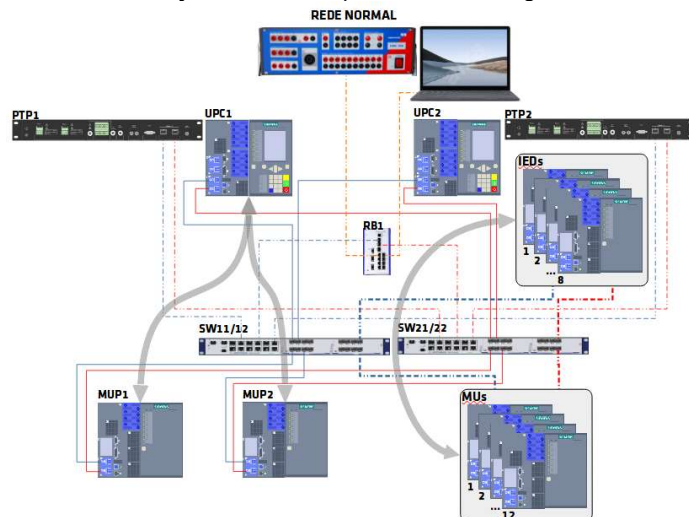


Figura 9 – Arquitetura de Rede Normal

Como indicado, o fluxo de mensagens GOOSE e SV fluem somente entre os IEDs que subscrevem as mensagens, restringindo o tratamento de pacotes aos switches da rede.

3.3.2 Rede Carregada

A diferença neste caso é que estaremos simulando uma rede sem configurações corretas de tratamento de mensagens GOOSE e SV. Neste caso, nenhuma mensagem é filtrada nos switches através de VLANs: as portas conectadas ao IED e as MUs de teste fazem parte de todas as VLANs existentes. Este arranjo é representado na Figura 10:

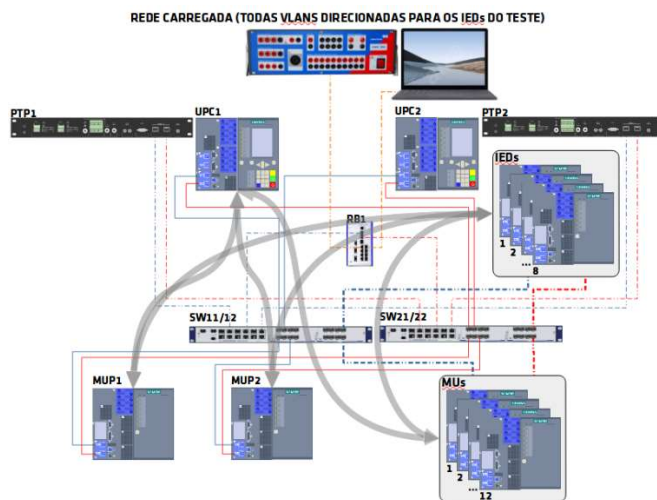


Figura 10 – Arquitetura de Rede Carregada

3.3.3 Rede Leve

Esta condição de teste simula o melhor caso possível para a solução digital: uma rede onde não estão conectados outros dispositivos. No caso dos testes, foram desconectados da rede todos os IEDs e MUs que não fazem parte do teste. A Figura 11 representa este caso de teste:

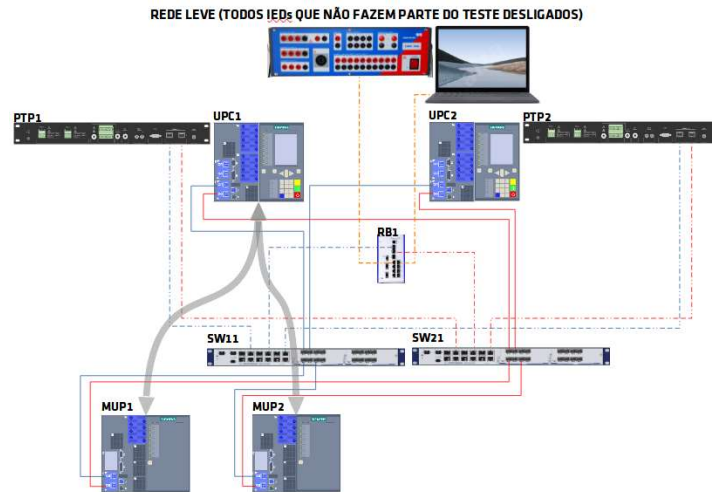


Figura 11 – Arquitetura de Rede Leve

Para a configuração de rede leve, o volume de pacotes e dados transmitidos está registrado na Figura 12:

Protocol	1 ASDU				2 ASDU			
	Percent Packets	Packets	Percent Bytes	Bytes	Percent Packets	Packets	Percent Bytes	Bytes
IEC61850 Sampled Values	100.0	584023	100.0	107077979	100.0	432955	100.0	139407631
GOOSE	98.3	574042	87.4	93568846	98.4	426022	93.4	130219594
	0.5	2713	0.5	482191	0.5	2072	0.3	399009
				64k				53k

Figura 12 – Medição de pacotes em rede leve com 1 ASDU e 2 ASDU

4.0 - TESTES REALIZADOS

Os testes realizados foram centrados na mesma falta, um curto dentro da zona de proteção diferencial, com faltas trifásicas e monofásicas, executado mais de 1100 casos no total, divididos entre as configurações de sistema apresentados. As faltas foram aplicadas simultaneamente a um IED com aquisição de sinais digitalizados (identificado como UPC1), e outro IED com leitura de sinais de forma convencional (UPC2 nos registros).

Para ambos os IEDs, o equipamento de testes monitorou o sinal de atuação da função 87T (através de GOOSE), o sinal de desligamento/*trip* enviado para cada disjuntor (através de GOOSE) e, os contatos de atuação de cada cadeia de proteção para comando real de desligamento/*trip* (através de contato binário, alimentados a 125Vcc).

A Figura 13 abaixo representa os resultados registrados de um dos testes realizados (falta trifásica, uma MU, rede normal):

Time Assessments: 01 in Teste UPC1 Digital 1										
	Name	Ignore before	Start	Stop	Tnom	Tdev-	Tdev+	Tact	Tdev	Assessment
1	UPC1 87T	FALTA 87T	FALTA 87T	UPC1 87T 0>1	30,00 ms	30,00 ms	30,00 ms	27,10 ms	-2,900 ms	✓
2	UPC1 Trip1 G	FALTA 87T	FALTA 87T	UPC1 Trip1 G 0>1	30,00 ms	30,00 ms	30,00 ms	26,10 ms	-3,900 ms	✓
3	UPC1 Trip2 G	FALTA 87T	FALTA 87T	UPC1 Trip2 G 0>1	30,00 ms	30,00 ms	30,00 ms	26,10 ms	-3,900 ms	✓
4	MUP1 Trip1	FALTA 87T	FALTA 87T	MUP1 Trip1 0>1	30,00 ms	30,00 ms	30,00 ms	30,70 ms	700,0 µs	✓
5	MUP1 Trip2	FALTA 87T	FALTA 87T	MUP1 Trip2 0>1	30,00 ms	30,00 ms	30,00 ms	30,50 ms	500,0 µs	✓
6	UPC2 87T	FALTA 87T	FALTA 87T	UPC2 87T 0>1	30,00 ms	30,00 ms	30,00 ms	26,00 ms	-4,000 ms	✓
7	UPC2 Trip1 G	FALTA 87T	FALTA 87T	UPC2 Trip1 G 0>1	30,00 ms	30,00 ms	30,00 ms	25,10 ms	-4,900 ms	✓
8	UPC2 Trip2 G	FALTA 87T	FALTA 87T	UPC2 Trip2 G 0>1	30,00 ms	30,00 ms	30,00 ms	25,10 ms	-4,900 ms	✓
9	UPC2 Trip1	FALTA 87T	FALTA 87T	UPC2 Trip1 0>1	30,00 ms	30,00 ms	30,00 ms	28,00 ms	-2,000 ms	✓
10	UPC2 Trip2	FALTA 87T	FALTA 87T	UPC2 Trip2 0>1	30,00 ms	30,00 ms	30,00 ms	28,30 ms	-1,700 ms	✓

Figura 13 – Registro de caso de Testes

A única variação com relação a tabela acima é relacionada ao Trip da UPC1, onde conforme a configuração das conexões elétricas (quantidade de MUPs, ou conexão híbrida), os sinais dos trips da UPC1 foram modificados.

5.0 - RESULTADOS ENCONTRADOS

Os resultados de todos os testes foram organizados na Tabela 3:

1 ASDU	2 ASDU
--------	--------

		LEVE	NORMAL	CARREG	LEVE	NORMAL	CARREG
1xMUP	UPC1 87T	26,44	27,82	27,61	26,59	28,09	28,06
	UPC2 87T	26,50	27,49	27,75	26,85	28,13	27,97
	MUP1 Trip1	30,10	31,56	31,63	30,19	31,74	31,87
	UPC2 Trip2	28,73	29,80	29,94	29,07	30,34	30,30
2xMUP	UPC1 87T	25,92	26,57	26,47	25,78	26,75	26,74
	UPC2 87T	25,42	26,93	26,57	26,17	26,91	26,96
	MUP2 Trip1	30,29	31,00	30,91	30,42	31,27	31,27
	UPC2 Trip2	28,56	30,10	29,71	29,33	30,08	30,09
HIBRIDA	UPC1 87T	24,81	26,52	26,20	26,09	26,71	26,89
	UPC2 87T	25,48	25,73	25,78	26,42	27,01	27,13
	UPC1 Trip1	27,89	29,63	29,30	29,17	29,79	29,95
	MUP1 Trip2	29,29	30,97	30,68	30,48	31,08	31,41
	UPC2 Trip2	28,68	28,86	28,98	29,62	30,22	30,30

Tabela 3 – Resultados dos Testes (em ms)

A quantidade de sinais apresentados foi reduzida para facilitar interpretação. Foram inseridos apenas os resultados considerando, para cada proteção, a atuação do trip mais lento entre os 2 contatos de cada proteção.

A proteção integralmente convencional (UPC2), apresentou tempos de atuação mais rápidos que a proteção digital (UPC1 e MUPs). A média deste atraso em todos os casos foi de 1,3ms. Podemos entender que o atraso encontrado está dentro do esperado deste que a norma IEC 61850 foi desenvolvida, pois a diferença encontrada está em acordo com o previsto para a transmissão de *Sampled Values* e GOOSE para trip (tipo TT6, com transmissão inferior a 3ms).

A resposta dos IEDs para proteção com uso de *Sampled Values* não apresentou variação significativa quando houve uma sobrecarga de rede nos dispositivos testados, com variações de -0,10ms com 1 ASDU e 0,15ms com 2 ASDU. Isso mostra que o dispositivo já possui capacidade de suportar redes sem segregação de tráfego de rede através de VLANs. Por outro lado, quando a rede teve seu tráfego restrito somente aos IEDs do bay (desligando todos outros dispositivos), houve redução nos tempos de atuação na faixa de 1,15ms.

Com relação a configuração de ASDUs, a configuração com 1 ASDU por pacote teve tempos de trip ligeiramente mais rápidos que quando utilizado o ajuste com 2 ASDUs (na média de todos os testes realizados 0,36ms), com a maior diferença aparecendo na condição de rede carregada (sem as VLANs): 0,44ms.

Por fim, o tempo de trip para proteções com uma *Merging Unit* foi muito próximo ao esquema com duas MUs (0,28ms de diferença). A solução Híbrida teve comportamento equivalente aos outros esquemas testados, com o contato de trip originado na UPC1 atuando em tempos semelhantes que ao contato da UPC2 (-0,13ms).

6.0 - CONCLUSÃO

Diferente de outros estudos mencionados como referência neste estudo, o foco deste trabalho não foi de realizar estudo de diferentes funções de proteção de transformador, e sim o impacto variações relacionadas a proteção 87T baseadas em *Sampled Values*, que são factíveis em casos de aplicação em Sistemas de Proteção e Controle, e o seu desempenho nestes casos.

Foram realizadas variações com relação ao formato de leitura de sinais analógicos (uma ou duas merging units, ou até medição híbrida), variações de carga da rede (rede com várias MUs, porém organizada em VLANs; sem esta organização de VLANs; ou sem este carregamento), e também variamos a forma que as *streams* de SV eram compostas (1 ou 2 ASDUs), e consequentemente o volume de pacotes circulando na rede.

Foi confirmado que a proteção digital, utilizando *Sampled Values*, tem tempos de atuação acima dos tempos da proteção convencional, porém ainda dentro do especificado na norma IEC 61850.

A configuração correta das redes ethernet do sistema de proteção e controle teve sua importância confirmada, dado o impacto nos tempos de trip em razão da sua variação. Os IEDs utilizados em teste estão preparados para operar em redes com volume grande de fluxo de dados, pois seu atraso em redes sobrecarregadas foi pequeno.

Por fim, ficou comprovado que a recomendação da norma IEC 61869-9 em utilizar 2 ASDUs por *stream* é válido, pois a redução de pacotes na rede é significativa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] V. LEITOFF, A. KURTZ, J.-A. LADRIERE, J.-P. CAYUELA e P. BRUN, "Experience Feedback of Testing and Commissioning of a fully Digital IEC 61850 based PACS," em *Cigré Session*, Paris, 2018.
- [2] L. HOSSENLOPP, D. CHATREFOU, D. THOLOMIER e D. P. BUI, "Process Bus: Experience and Impact on Future System Architectures," em *Cigré Bienal*, Paris, 2008.
- [3] J. C. DE OLIVEIRA e A. D. B. ARCON, "Uso do barramento de processo na primeira subestação digital em 500 kV do mundo - Enel São Gonçalo - no estado da arte da norma IEC 61850," em *XXV SNTPEE*, Belo Horizonte, MG, 2019.
- [4] R. CIMADEVILLA e J. R. SANTIAGO, "Nuevos Requisitos para Bus de Proceso," em *XIV STPC*, Foz do Iguaçu, PR, 2018.
- [5] P. S. PEREIRA JUNIOR, R. C. BERNARDINO, G. S. SALGE, M. J. B. B. DAVI, C. M. MARTINS, P. S. PEREIRA e G. E. LOURENÇO, "Avaliação da performance de uma proteção de linha implementada com barramento de processo (IEC 61850-9-2) através de ensaios em malha fechada," em *XIV STPC*, Foz do Iguaçu, PR, 2018.
- [6] A. COELHO e P. LIMA, "Comparação de Desempenho entre relés convencionais e relés baseados em IEC-61850 Sampled Values através de um simulador de tempo real - RTDS," em *XIII SIMPASE*, Recife, PE, 2019.
- [7] M. SHARMA, L. NGUYEN, S. KUBER and D. BARADI, "Testing IEC-61850 Sampled Values-Based Transformer Differential Protection Scheme," in *PAC World Americas*, Raleigh, NC, 2019.
- [8] S. MEIER e T. WERNER, "Performance considerations in digital substation applications," em *13th International Conference on Development in Power System Protection 2016 (DPSP)*, Edinburgh, 2016.
- [9] IEC 60834-1, *Teleprotection equipment of power systems - Performance and testing - Part 1: Command systems*, 1999.
- [10] IEC-61850, *Communication networks and systems for power utility automation (todas as partes)*.
- [11] G. LISBOA, "SE Mata Norte 230kV: Ampliação Baseada em Aplicação de Barramento de Processos, executada por um integrador de sistemas," em *XV STPC*, Rio de Janeiro, RJ, 2020.
- [12] G. LISBOA e R. KENZO, "Subestação Digital com Process Bus - Estudo Comparativo Técnico-Financeiro com Relação a uma Subestação Convencional," em *XIII SIMPASE*, Recife, PE, 2019.
- [13] G. ZIEGLER, *Numerical Differential Protection*, Nuremberg, 2005.
- [14] IEC 61869-9, *Instrument transformers - Part 9: Digital interface for instrument transformers*, 2016.
- [15] A. APOSTOLOV, "Test Systems Consideration in the Design of Communications Networks for Digital Substations," em *Cigré e-Session*, Paris, 2020.
- [16] G. LISBOA e R. KENZO, "SS Mata Norte 230/69kV: Expansion based on Process Bus," em *PAC World Conference*, 2021.
- [17] M. ZAPPELLA, C. PIMENTEL, G. SILVANO e R. HUNT, "Best practices and challenges on designing a LAN communication network for 61850 Digital Substations," em *Cigré e-Session*, Paris, 2020.

DADOS BIOGRÁFICOS



GUILHERMME JOSÉ LISBOA DOS SANTOS, natural de Curitiba/PR, 1983. Engenheiro Eletricista formado pela Universidade Federal do Paraná em 2008. Trabalha na TSEA desde 2008, atualmente como Gerente de Engenharia de área de Sistemas de Proteção e Controle e Telecomunicações. É membro do CIGRE Brasil – CE B5



(2) MATEUS DUARTE TEIXEIRA é professor doutor do curso de Engenharia Elétrica da UFPR. Foi gerente de P&D da Bree, pesquisador do LACTEC, gerente da UNCE na ARTECHE EDC, além de ter ocupado a presidência da SBQEE entre 2017 e 2019. É membro do IEEE e do Comitê de Estudos C4 do Cigre Brasil. Vem trabalhando em projetos de pesquisa e P&D ANEEL, orientação de alunos, estudos técnicos e consultorias para indústria e concessionárias, tendo publicado dezenas de artigos em revistas e congressos nacionais e internacionais.



(3) ANDRE MARIANO possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Paraná (2002), mestrado em Microeletrônica pela Université Bordeaux (2004) e doutorado em Eletrônica (especialidade Microeletrônica) pela Université Bordeaux (2008). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Telecomunicações e Microeletrônica, atuando principalmente nos seguintes temas: design e teste de circuitos integrados (ASICs), sistemas de comunicação sem fio, sistemas RFID (etiquetas e TAGs inteligentes), circuitos RF, mistos e digitais, eletromagnetismo, antenas, teoria eletromagnética