

Transferência de Disparo Permissivo por Sobrealcance (POTT): Avaliação de Desempenho na Comunicação

Mayara H. Santos, Matheus F. Ayello, Paulo Pinheiro*
André Pinho, Angelo C. Colombini, Yona Lopes*

* *Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ*
e-mails: mayarahelena, matheus_felipe, paulopinheiro@id.uff.br.
e-mails: acpinho, acolombini, yonalopes@id.uff.br.

Abstract: This paper presents main communication requirements on teleprotection implementation and a study comparing different communication media used in these systems, based on state of art. After the requirements survey, it was identified the need to evaluate the media latency over teleprotection time restrictions, specially when network traffic competes with other services as video and voice streaming, or supervisory and control systems. This study also compares traditional teleprotection scenario with new communication networking scenario. The signals propagation achieved times were higher over the network media than the scenario with copper pilot wire cable as evaluated. There's a gradual impact on the teleprotection signals latency when the concurrent network traffic increases.

Resumo:

Este trabalho compara os diferentes meios de comunicação utilizados para teleproteção e os principais requisitos de comunicação necessários para a sua implementação com base no estado da arte. Após o levantamento de requisitos foi identificada a necessidade de avaliação da latência para envio de mensagens de teleproteção, mesmo com tráfego de serviços concorrentes, como vídeo, voz, supervisão e controle. O cenário de teleproteção tradicional também foi comparado com o cenário via rede de comunicação e os tempos alcançados via rede foram inferiores quando comparados ao cenário com fio piloto, conforme avaliação em laboratório. Verificou-se o impacto gradativo do aumento de tráfego concorrente na latência da teleproteção.

Keywords: Teleprotection; IEC 61850; GOOSE; Automation.

Palavras-chaves: Teleproteção; IEC-61850; GOOSE; Automação.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de teleproteção tem como objetivo principal reduzir o tempo ativo de uma falta na Linha de Transmissão (LT) e, conseqüentemente, os danos ocasionados por esta falta (Working Group 34/35.11 – Cigré Joint, 2001). O aumento da complexidade das redes elétricas traz a elevação dos níveis de exigências relativos à seletividade e a velocidade de teleproteção. Diante desse cenário, os sistemas de telecomunicação envolvidos devem possuir requisitos de latência, banda e disponibilidade capazes de atender às demandas impostas.

Dentre os esquemas de teleproteção, os de comparação de estado exigem requisitos menos rigorosos em relação aos sistemas de comunicação. Segundo Working Group 34/35.11 – Cigré Joint (2001), as mensagens enviadas entre terminais são: direcionalidade da corrente; status do disjuntor; bloqueio do religamento automático; trans-

ferência de disparo, entre outros. Apesar do tráfego ser caracterizado apenas por informações binárias, a integridade das mensagens deve ser assegurada, mesmo sob a presença de ruído e outras fontes de interferência, que podem corromper a comunicação entre os terminais. Um ponto crítico neste cenário é o compartilhamento do meio de comunicação com outros serviços como voz, vídeo, supervisão e controle,

A comunidade científica tem explorado a avaliação de sistemas de comunicação para teleproteção. Doležilek and Kalra (2017) apresentam um amplo panorama das soluções de comunicação considerando suas fraquezas e potencialidades. No entanto, há poucos artigos que estudam a comunicação para o esquema de proteção *Permissive Overreach Transfer Trip* (POTT) ou ainda que avaliem o impacto do aumento do tráfego de outros serviços que não o de teleproteção.

Este trabalho avalia o desempenho da comunicação para teleproteção (especificamente do esquema POTT) via *Generic Object Oriented Substation Event* (GOOSE) e via ligação direta com fio de cobre. A avaliação inclui a injeção de tráfego oriundo de serviços concorrentes como voz, dados, supervisão, etc. Para isso foi configurado um ambiente

* Os autores gostariam de agradecer a empresa Transmissora de Energia Elétrica S.A. — TAESA, pelo apoio financeiro durante o desenvolvimento deste artigo no âmbito do projeto de P&D — código ANEEL PD-07130-0053/2018. Os autores agradecem ainda a CAPES, o CNPq, a FAPESP, a FAPERJ e o INERGE.

de teste composto de dois *Intelligent Electronic Devices* (IEDs), SEL-421-3 e SEL-451-2, um switch e um servidor de sincronismo temporal. Os softwares utilizados para a configuração do cenário foram o Asclerator Quickset e Architect (Laboratories, Acesso 25/05/2020) .

O restante deste artigo está estruturado da seguinte forma. A Seção 2 descreve brevemente o embasamento teórico que fundamenta este trabalho. O contexto do esquema de comparação de estado POTT e a comparação dos meios de transmissão utilizados para teleproteção também são descritos nesta seção. Os trabalhos relacionados são discutidos na Seção 3 assim como o levantamento de requisitos de comunicação para o sistema de telecomunicação. A implementação do estudo de caso e sua análise é detalhada na Seção 4. Por fim, a Seção 5 conclui o trabalho.

2. TELEPROTEÇÃO

Devido à extensão, as LTs são mais vulneráveis à ocorrência de eventos prejudiciais ao sistema elétrico de potência. O tempo de permanência de uma falta em uma LT é crucial para o desempenho dos sistemas elétricos. Com isso, mecanismos que acelerem a velocidade de atuação são de suma importância. Temporizações altas, que passem de 20 ciclos de 60Hz, podem causar instabilidade no sistema. Por esse motivo, o Grupo de Trabalho 34/35.11 do Cigré (Working Group 34/35.11 – Cigré Joint, 2001) discorre sobre a utilização de sistemas de telecomunicações nos esquemas de proteção de linhas, afim de agilizar o comando de disparo, que pode ser executado entre 2 a 3 ciclos após a ocorrência da falta em qualquer ponto da linha.

Nestes esquemas, a saída de contato do relé — ou do *Intelligent Electronic Device* (IED) — é convertida em um sinal e enviada por um meio de transmissão até o outro terminal. Na extremidade receptora, o sinal é convertido em uma saída de contato, que é associada a uma entrada de controle no esquema lógico do relé receptor. Os meios de transmissão mais utilizados em esquemas de teleproteção, tanto como meio principal, como redundância, são:

- Fio Piloto (fio de cobre);
- Circuitos de telefonia privada;
- Enlaces micro-ondas;
- Ondas Portadoras em Linhas de Alta Tensão (OPLAT).
- Enlaces de fibra óptica.

O fio piloto foi, e ainda é, muito utilizado como canal de comunicação para os sistemas de teleproteção. Trata-se de um condutor físico utilizado para transmitir o sinal de comunicação entre as unidades de proteção localizadas nos terminais da área protegida. Os condutores podem ser fios telefônicos, cabos elétricos e fios nus. A comunicação é realizada por um par destes condutores utilizando corrente contínua ou alternada (60Hz) ou sinal de áudio. Quando sinal de áudio, sinais de telefonia de 300 a 3000 Hz de banda e os comandos de proteção são enviados por meio de tons de áudio. No entanto, a vulnerabilidade desse canal é elevada pois o mesmo é susceptível a uma série de intempéries ou inconformidades do sistema, tais como quedas de tensão, tensões induzidas e aumento da tensão no neutro durante a ocorrência de faltas. Em função disso, esta alternativa tem seu uso limitado a pequenas distâncias, geralmente 10 a 12 km. No estudo de Behrendt

(1996) o retardo total de propagação com o fio piloto ficou entre 13,6 e 17,6 ms.

Com OPLAT as próprias linhas de transmissão são utilizadas como canais de comunicação. A comunicação é feita por meio de uma onda portadora de alta frequência que, com a respectiva informação, é confinada na área de proteção através de bobinas de bloqueio. O sinal é capturado por filtros passa faixa e decodificado na unidade receptora. Não necessita de repetidoras para longa distância — alcançam 800km — e tem custo reduzido, o que fez com que fossem intensamente utilizados em linhas de alta tensão para a transmissão de voz, dados de controle e sinais de proteção (Working Group 34/35.11 – Cigré Joint, 2001). No entanto, o uso desse tipo de teleproteção pode não ser confiável devido às condições externas, como por exemplo, a capacidade de transmissão ser influenciada por condições atmosféricas.

A transmissão por micro-ondas é feita pelo ar numa faixa de frequência de 3GHz até 30GHz tornando o sistema sensível às condições atmosféricas. A distância máxima é limitada pela linha de visada e sua implementação é mais cara quando comparada a OPLAT. No entanto, possuem banda larga e o sistema de comunicação é independente do sistema de proteção. Desta forma, ao contrário do OPLAT, falhas na linha de transmissão não afetam o sistema de comunicação. Estes sistemas satisfizeram uma crescente demanda por capacidade de comunicação dentre muitas concessionárias (Working Group 34/35.11 – Cigré Joint, 2001). Antes da adoção da fibra óptica para aplicação em sistemas de proteção, os enlaces de micro-ondas representavam o único meio de transmissão em banda larga.

Enlaces de fibra óptica para o sistema de teleproteção são similares ao fio piloto onde ao invés do cabo metálico é utilizado o par de fibras. A distância de comunicação direta entre as unidades transmissora e receptora fica limitada as perda por emendas, conectores e tipo de fibra e pelo ganho das unidades geradoras e repetidoras utilizadas para cobrir distâncias maiores. A imunidade à interferência eletromagnética, banda larga, precisão, dimensões e peso reduzidos são vantagens conhecidas da fibra óptica.

O cabo *Optical Power Ground Wire* (OPGW) é um cabo metálico utilizado para proteção de descargas atmosféricas. Este cabo é utilizado como cabo guarda e é aterrado nas torres de transmissão, com isso, na ocorrência de uma descarga atmosférica, o raio é captado e conduzido até a torre mais próxima. Em seu interior o OPGW acomoda um conjunto de pares de fibras ópticas que não sofrem influência das descargas atmosféricas e possibilitam a transmissão de dados. Com a substituição dos cabos pára-raios convencionais por cabos OPGW os enlaces convencionais via rádio micro-ondas ou OPLAT gradativamente deram espaço para a utilização de fibra óptica e redes de comunicação, que possuem maior capacidade de transmissão e possibilidade de redundância em esquemas de comparação de estados.

2.1 Esquema de Comparação de Estado

Esquemas de comparação de estado — conhecidos também por esquemas de teleproteção por sinalização — utilizam canais de comunicação para compartilhar informações ló-

gicas de estados em ambos os terminais da linha. Assim, os IEDs são capazes de eliminar todos os tipos de falta na linha de transmissão de forma instantânea e seletiva (Working Group 34/35.11 – Cigré Joint, 2001). Informações que trafegam por esses canais de comunicação podem ser de direcionalidade da corrente; status do disjuntor; bloqueio do religamento automático; transferência de disparo e outros (Working Group 34/35.11 – Cigré Joint, 2001). No Brasil, o *Operador Nacional do Sistema* (ONS) recomenda (do Sistema Elétrico, 2011) que os esquemas de transferência de disparo devam ser redundantes e independentes entre si.

Segundo Meira et al. (2018), existem seis esquemas básicos de teleproteção, definidos de acordo com a característica da zona de impedância (subalcance ou sobrealcance) que fará a partida da transmissão do sinal no relé. Em Ordacgi (2010) as várias nomenclaturas comumente usadas na literatura técnica para descrição desses esquemas são descritas. Neste artigo, o enfoque é dado na Transferência Permissiva de Disparo por Sobrealcance (POTT).

2.2 Transferência Permissiva de Disparo por Sobrealcance

Para a configuração de um esquema POTT 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, abrirá o seu disjuntor e devolverá o sinal de abertura para terminal inicial, que irá igualmente operar. Essa devolução do sinal para o relé do terminal inicial é chamada de lógica de *Echo* (Héctor J. Altuve Ferrer, 2010).

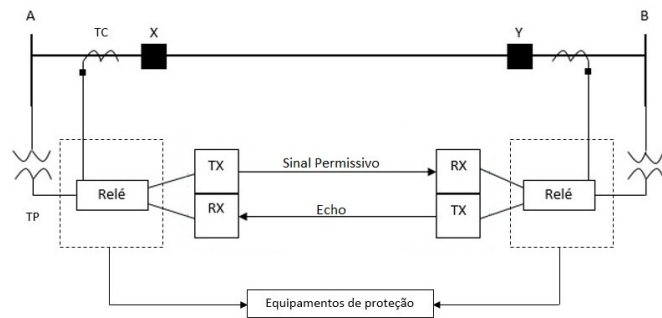


Figura 1. Esquema de transferência permissiva de disparo por sobrealcance.

A Figura 1 ilustra o esquema POTT. No instante em que o relé localizado no terminal A detecta uma falta, ele envia um sinal permissivo para o relé localizado no terminal B. O relé B, detectando a mesma falta e recebendo a confirmação que deve atuar do relé A, abrirá o disjuntor Y e enviará um sinal (lógica *Echo*) para o relé A, que também irá abrir seu disjuntor X. 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. Miveh and Mirsaedi (2012) resumiram as características básicas de um esquema POTT conforme Tabela 1.

Tabela 1. POTT – Características básicas

Vel. Operação	1.5 - 2 ciclos
Resistência de falta	Baixa
Linhas terminais (max.)	15
Banda	9.6 -38.4 kbps
Consequência da perda do sinal	Falha no trip

2.3 Teleproteção com GOOSE – IEC 61850

O protocolo GOOSE, definido na norma IEC 61850, permite a troca de dados entre relés de proteção IEC (2010). Sua parte 90-1 define seu uso para comunicação entre subestações. Esse protocolo faz uso do modelo *publish-subscribe* (publicador-assinante) com um endereçamento de destino *Media Access Control* (MAC) multicast.

Para garantir a entrega das mensagens, o protocolo funciona baseado em um mecanismo de retransmissão cíclica das mensagens, mesmo quando não há ocorrência de eventos na rede, conforme observa-se no tempo T0 ilustrado na Figura 2. Ao ser detectado um evento (transição binária de pelo menos uma das variáveis do conjunto de dados) pelo IED, ocorre uma rajada de retransmissões de mensagens GOOSE que crescem, seguindo um método como a progressão geométrica, até atingirem o tempo máximo de repetição T0, configurado pelo usuário (Oliveira and Lopes, 2018).

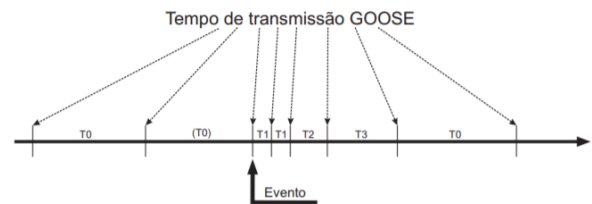


Figura 2. Mecanismo de retransmissão GOOSE (Oliveira and Lopes, 2018)

Os atrasos de tempo na transmissão das mensagens GOOSE podem variar de acordo com a prioridade do *frame* e volume de tráfego. Atrasos de processamento nos equipamentos intermediários, quantidade de equipamentos e quantidade de tráfego são exemplos de características que devem ser consideradas durante a realização dos testes.

3. TRABALHOS RELACIONADOS

A utilização da norma IEC 61850 para teleproteção tem sido amplamente discutida na literatura (Oliveira and Lopes, 2018), bem como o esquema POTT.

Bartosiewicz et al. (2013) realizaram testes em uma LT com equipamentos de proteção da General Electric, considerando diferentes esquemas de proteção, utilizando abordagens modernas para a comunicação com fio piloto. Para o esquema POTT, especificamente, os testes foram conduzidos de forma a se avaliar a coordenação entre dois IEDs L90 e também contemplaram a utilização de dois meios de comunicação, Ethernet utilizando GOOSE e conexão direta via fibra óptica. Entretanto esse trabalho não avalia a latência de operação em relação ao congestionamento da rede.

Tabela 2. Avaliação qualitativa dos requisitos de teleproteção: 1- Bartosiewicz et al. (2013) 2- Miranda et al. (2014) 3- Santos et al. (2018) 4- Bartman et al. (2019) 5- Dolezilek et al. (2015) 6- Villegas Guerrero (2011) 7- Dolezilek and Kalra (2017) 8- Oliveira and Lopes (2018) 9- Meira et al. (2018) 10- Fodero et al. (2018) 11- Ward et al. (2004) 12- Bachli et al. (2017) 13- do Sistema Elétrico (2011) 14- Scheer and Woodward (2001) 15- Schweitzer and Kumm (1998)

Requisitos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Confiabilidade						x							x		
Segurança				x		x					x	x	x	x	x
Tempo de transmissão	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Tempo de operação e de proteção	x					x			x				x		x
Tempo de propagação			x			x							x		
Redundância						x							x		

O artigo de Miranda et al. (2014) avaliou o comportamento do tráfego de mensagens GOOSE, em um canal ethernet, entre subestações de energia para o esquema POTT. Além disso, a perda de mensagens entre publicadores e assinantes foi cuidadosamente monitorada. Neste trabalho foram avaliados parâmetros como intensidade do tráfego e lógica de atuação. Cabe destacar que para o desenvolvimento destes experimentos, um laboratório foi equipado com três relés digitais, *switches* ethernet, conversores de mídia, computadores, 20 Km de fibra óptica e diversos softwares de suporte. Os resultados mostraram que as mensagens GOOSE podem ser aplicadas à comunicação entre subestações, considerando um tempo de transferência em torno de 4,4 ms. Além disso, os autores verificaram que as condições de tráfego e as configurações dos *switches* podem influenciar decisivamente na perda de mensagens GOOSE usadas para a coordenação de esquemas POTT.

Os autores de Gupta et al. (2017) destacaram que a viabilidade econômica da adoção da IEC 61850 na automação de subestações se daria pela redução dos custos referentes a implantação e manutenção relativas a uma infraestrutura de comunicação e controle bem mais simples.

Apesar de não ser um trabalho conduzido por experimentos em laboratório, o artigo de Santos et al. (2018) apresenta uma caracterização robusta acerca dos retardos em uma rede de comunicação operando com a IEC 61850 para coordenação entre subestações de energia. Os autores propõem uma metodologia analítica de cálculo para estimação dos retardos que envolvem processamento, transmissão de mensagens e atrasos de tempo na fila e de modo consequente, realizam simulações capazes de caracterizar o atraso do tráfego. O trabalho destaca que apesar dos retardos serem melhor estimados por meio de simulações estatísticas, encontrar o limite superior desse parâmetro pode ser computacionalmente custoso, além de tomar muito tempo, tornando a estimação analítica mais atrativa.

Bartman et al. (2019) analisaram o comportamento do tráfego GOOSE para esquemas de POTT. O estudo apresentou uma contribuição na configuração de dados da rede e do tráfego na transferência de mensagem GOOSE de acordo com parâmetros de teleproteção. Apesar das contribuições citadas, o artigo não possui uma avaliação para outros meios de comunicação para esquemas de POTT.

Em Dolezilek et al. (2015) é avaliada a comparação dos protocolos propostos neste artigo, contudo o trabalho não apresenta testes, sendo assim, é exposta uma avaliação

qualitativa com carência de um ambiente de implementação.

Com relação aos requisitos de comunicação, a implementação de um sistema de teleproteção deve assegurar a máxima disponibilidade do serviço e segurança das instalações IEC (2010). Com relação aos sistemas de comunicação aplicados à teleproteção, os principais atributos a serem avaliados são: segurança, tempo de transmissão, tempo de operação e de proteção, tempo de propagação, confiabilidade, redundância, entre outros (Working Group 34/35.11 – Cigré Joint, 2001), do Sistema Elétrico (2011). Cabe destacar que um dos componentes principais que impacta na latência total para o tempo de atuação é o tempo de transmissão.

O estudo de Villegas Guerrero (2011) avalia o impacto que a implementação da norma IEC 61850 causa no tempo de operação na teleproteção em relação ao uso de interfaces tradicionais. O resultado deste trabalho demonstra que a adoção da norma favoreceu o sistema de comunicação no sentido da diminuição da latência.

Dolezilek and Kalra (2017) também avaliam os requisitos temporais de diferentes tipos de comunicação. O trabalho fornece um comparativo dos métodos disponíveis para troca de sinais via mensagens digitais e apresenta o desempenho das mais populares tecnologias de comunicação. Além disso, os autores exploram os efeitos da sobrecarga do canal de comunicação no desempenho da teleproteção.

Em Oliveira and Lopes (2018) foi avaliado o tempo de comunicação via mensagens GOOSE. Nesse estudo foram realizados testes reais em um anel com cinco subestações, onde verificou-se uma latência média de 4,14 ms para transmissão entre duas subestações.

Meira et al. (2018) analisam a interoperabilidade entre relés via dois esquemas, POTT e *Directional Comparison Blocking* (DCB). O método para essa análise consiste no uso de um software CAPE e dois relés SEL. No estudo são aplicadas faltas em uma linha de transmissão protegida e em uma linha adjacente. O estudo correlaciona o tempo de atuação para esses dois cenários ratificando as vantagens do uso de esquemas de proteção já citados.

A Tabela 2 consolida a pesquisa feita acerca dos principais requisitos dos sistemas de comunicação avaliados por diversos autores. O presente artigo estudou estas contribuições acadêmicas relacionadas à comunicação para o esquema do POTT, e os requisitos de comunicação, constatando que latência é um fator crítico e que poucos trabalhos realizam o comparativo do uso de teleproteção

tradicional via cabo e GOOSE, avaliando o desempenho em termos de métricas de rede. Face ao exposto, este trabalho traz um enfoque diferencial para a avaliação em laboratório da velocidade das mensagens GOOSE sob diferentes condições de carga do canal de comunicação, além de comparar o meio de comunicação com fio piloto e via rede. Estas avaliações são especialmente importantes para decisões acerca das implicações do uso do compartilhamento do meio de comunicação utilizado pra teleproteção com outros serviços como voz, dados de controle e supervisão, vídeo, etc, que são preocupações atuais do ONS. Foram utilizados equipamentos reais encontrados em subestações para uma análise mais robusta conforme descrito na Seção 4.

4. IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DO ESTUDO DE CASO

O caso a ser estudado consiste na análise de uma linha de transmissão sob falta, onde haverá troca de mensagens entre os IEDs. Neste contexto, avalia-se a comunicação entre IEDs através de dois ambientes de implementação, comunicação via teleproteção tradicional e via GOOSE.

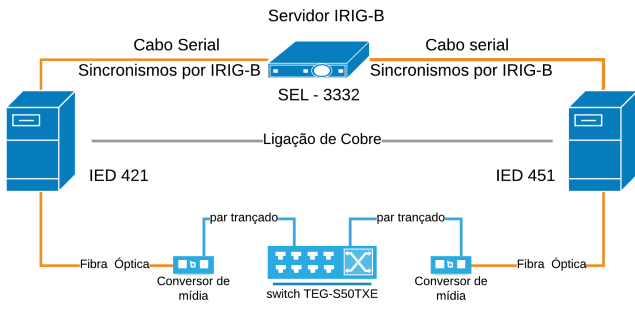


Figura 3. Arquitetura para implementação dos testes com os dois cenários de implementação: via ligação de cobre e via rede.

A arquitetura de ambos os cenários está ilustrada na Figura 3, composta por dois relés, modelos SEL-451-2 e SEL-421-3, servidor IRIG-B SEL-3332, um *switch* TEG-S50TXE e dois conversores opto-elétricos (fibra-par trançado)¹. Ressalta-se que, por mais que o sistema como um todo não estivesse sincronizado em relação a uma referência global, ambos relés estavam em sincronia relativa, o que é suficiente para o estudo aqui apresentado. Os softwares utilizados para para configurações dos cenários foram o AcSELeator Quickset e Architect.

Para o cálculo da latência, foram coletados no sequencial de eventos dos IEDs os tempos em que a variável no IED de destino foi ativada e desativada e, também, foram levantados os momentos em que a variável de saída no IED de origem foi ativada e desativada. A partir destes valores calculou-se a latência total ao subtrair o horário que a variável foi ativada no destino subtraindo o do horário que a variável foi ativada na origem. Com isso, o tempo de latência é total, incluindo o processamento nos IEDs de origem e destino. Os valores foram coletados através do *Sequential Events Register* (SER), via TELNET (Postel,

¹ Os vídeos com os testes realizados estão disponíveis em <http://bit.ly/39c1IGz>

1983). A latência entre mensagens foi calculada com intervalo de confiança de 95% em todos os casos.

4.1 Cenário com Esquema Tradicional

Para o ambiente baseado no esquema de teleproteção tradicional, foi utilizada a arquitetura da Figura 3, especificamente a interligação via cabo de cobre. A ligação feita entre os relés está detalhada na Figura 4. A comunicação

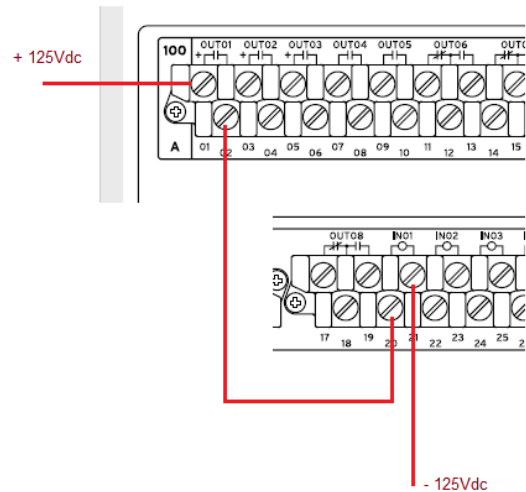


Figura 4. Ligações de cobre feitas no painel traseiro dos IEDs. (Figura adaptada do datasheet do IED)

via cabo de cobre foi configurada com uma ligação entre os relés e uma fonte externa, conforme mostra a Figura 5. Devido à ausência de uma fonte de corrente contínua com a magnitude necessária, foi feita uma retificação direta da rede, com o uso de um auto transformador a fim de se regular a tensão para $\pm 125V_{dc}$.

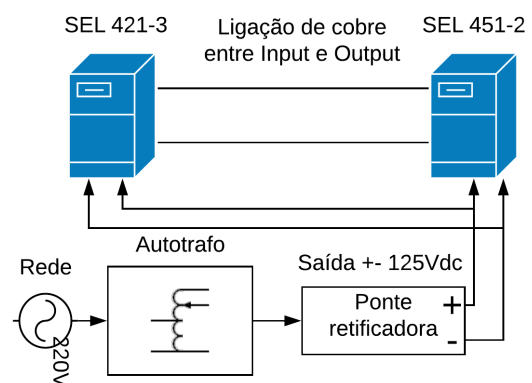


Figura 5. Cenário teste comunicação via cabo

A lógica configurada permitiu que o IED de origem comunicasse ao IED de destino a ocorrência de um trip de forma que ao receber esta mensagem permissiva, o IED de destino também execute o trip. O teste foi repetido 192 vezes a fim de garantir confiabilidade de 95% nos resultados. O tempo médio total de transmissão encontrado foi de 10 ms para este cenário.

4.2 Cenário com comunicação GOOSE

Para o segundo cenário utilizou-se o meio de comunicação via rede da Figura 3. O esquema POTT foi configurado através de mensagens GOOSE. Ressalta-se que a ligação anterior, com fio de cobre, era ponto-a-ponto e que no cenário com comunicação via GOOSE tem-se 3 dispositivos intermediários: um *switch* e dois conversores de mídia.

O teste para esse segundo estudo visa analisar a latência na mensagem permissiva entre IEDs para o caso de utilização do esquema com uma rede de comunicação. Esse cenário é especialmente importante pois permite que outros serviços tenham a possibilidade de compartilhar o mesmo meio de comunicação. Desta forma, além dos sinais de teleproteção, dados de voz, vídeo, controle, supervisão, dentre outros, poderiam utilizar a mesma infraestrutura.

No relé SEL-451, criou-se uma simples lógica de envio de mensagens GOOSE para a rede, de forma controlada. Ao acionar um *pushbutton*, um oscilador lógico era iniciado, e mantinha seu funcionamento habilitado durante 1 minuto. Durante esse período, a cada 200 ms o oscilador mudava o estado (ora de zero para um e ora de um para zero) da variável interna do relé. Cada transição dessa variável pode ser entendida como um novo evento, que é enviado via mensagem GOOSE para a rede. Após 1 minuto, cessa-se o envio de mensagens no teste, totalizando 300 mensagens disponíveis para estudo.

Os valores de latência obtidos nas simulações utilizando comunicação GOOSE se mostraram inferiores ao valor de latência utilizando uma comunicação via teleproteção tradicional conforme ressalta o gráfico da Figura 6. Essa fato deve-se ao tempo do contato de saída do IED transmissor, além das próprias características do meio de transmissão.

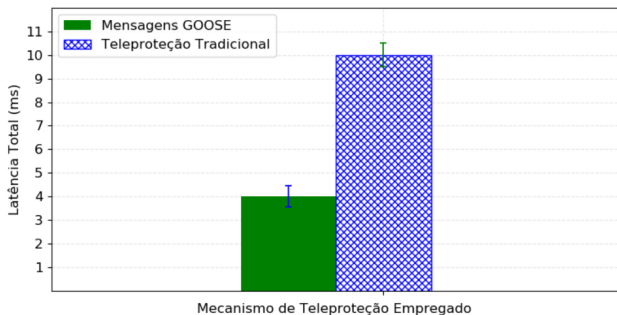


Figura 6. Histograma latência em transmissão de acordo com cada mecanismo de proteção empregado

4.3 Serviços Concorrentes com a Teleproteção

A fim de verificar o comportamento das mensagens de teleproteção, quando em concorrência com outros serviços foi realizado o último teste que avalia a latência das mensagens GOOSE em função do aumento de tráfego na rede. A arquitetura é a mesma da Figura 3, no entanto sem os conversores de mídia e com o *switch* SEL 2730M. A alteração foi realizada a fim de verificar se os dispositivos intermediários afetam também a latência.

Para tráfego de fundo na rede foi utilizado um computador com Core i7, 4 Gb de memória RAM, Windows 7 64 bits

e uma máquina virtual VMware Workstation com Ubuntu 16.04 LTS 64-bit. Para injeção e medição de tráfego foi utilizada a ferramenta iPerf.

A mesma lógica de envio de mensagens GOOSE do teste anterior foi reproduzida.

Os testes são definidos a seguir: o primeiro teste representa a injeção nula de tráfego de fundo, ou seja, não se acrescentou mensagens concorrentes na rede de comunicação. O segundo teste foi definido aplicando-se uma carga média de 30 Mbps de tráfego concorrente. O terceiro teste foi definido aplicando-se uma carga média de 60 Mbps de tráfego. O quarto e último foi definido com a maior carga gerada pelo software, cujo valor aproximado é de 100 Mbps. Em cada simulação, monitorou-se o tempo de tráfego entre as mensagens GOOSE na rede.

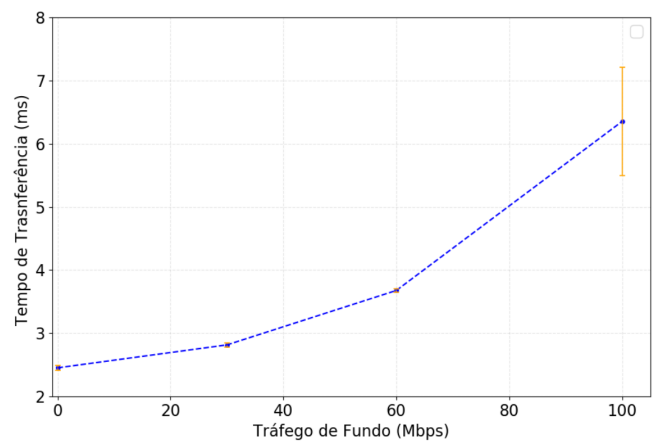


Figura 7. Comparativo da latência de mensagens GOOSE em relação a quantidade de tráfego concorrente ao de teleproteção na rede de comunicação.

A Figura 7 apresenta o comparativo dos tempos de transmissão das mensagens, em relação à quantidade de tráfego concorrente existente na rede. Verificou-se que o tempo de transmissão aumentou gradativamente com a quantidade de tráfego concorrente. Esse resultado indica que o compartilhamento do meio de comunicação utilizado para teleproteção com outros serviços deve ser avaliado com cautela, já que a latência aumenta com a quantidade de tráfego. Dependendo da quantidade de tráfego gerado, a latência encontrada pode não ser adequada aos esquemas de teleproteção. Ressalta-se que os testes foram feitos em laboratório, em rede local, e que a distância entre as subestações tende a aumentar consideravelmente esta latência.

5. CONCLUSÃO

A norma IEC 61850 trouxe possibilidades de melhorias para esquemas tradicionais de proteção, principalmente no desempenho dos canais de comunicação entre os IEDs. Nesse artigo, foi avaliado o desempenho do envio de mensagens permissivas entre os relés a partir de duas formas distintas, via rede de comunicação através de mensagens GOOSE e via ligação direta com fio de cobre entre contatos metálicos nos IEDs.

No decorrer do trabalho foi possível avaliar a escassez de contribuições acerca das novas tecnologias de proteção

para o setor elétrico. Com as demandas avaliadas na norma IEC 61850 e requisitos intrínsecos à teleproteção, ainda prevalece uma carência de estudos quantitativos no ramo.

O estudo discorrido na Seção 3 mostrou o impacto da latência em sistemas de teleproteção e, a partir dos testes executados, foi possível mensurar os tempos de transmissão das mensagens de teleproteção em diferentes cenários, com diferentes volumes de tráfegos de serviços concorrentes, como voz, vídeo e supervisão. Com isso pode ser comprovado que o aumento do tráfego de serviços concorrentes na rede de comunicação interfere diretamente no tempo de transferência das mensagens de teleproteção.

Além disso, verificou-se que a transmissão tradicional apresentou uma latência maior do que a transmissão via GOOSE, mesmo considerando os atrasos causados pelos equipamentos de rede (*switch* e conversores de mídia). Esses atrasos foram verificados quando da substituição do *switch* utilizado, resultando em uma diminuição na latência de 4 ms para 2,5 ms. Tal constatação demonstra que assim com a característica do meio, a arquitetura da rede também influencia diretamente a velocidade de transmissão. Arquiteturas mais simples e com menos dispositivos tendem a ser mais rápidas. No caso dos testes discutidos na seção 4, a sensibilização direta conta com o tempo de sensibilização dos contatos do relé, que pode ter agregado ao valor da latência avaliada. Ademais, foi possível observar que todos os valores respeitaram o limiar de temporizações abaixo de 20 ciclos, como mencionado na seção 2.

Para os cenários descritos, não foi possível configurar o tempo de transferência na comunicação, pois é diretamente dependente dos equipamentos utilizados. No entanto é possível configurar a priorização da teleproteção fazendo uso do campo de prioridade do frame Ethernet (Priority Code Point - PCP), alocado no campo de VLAN para mensagens GOOSE. Deste modo, sugere-se a avaliação do desempenho de diferentes priorizações no serviço de teleproteção em relação ao cenário de serviços concorrentes.

REFERÊNCIAS

- Bachli, R., Hausler, M., and Kranich, M. (2017). Teleprotection solutions with guaranteed performance using packet switched wide area communication networks. *70th Annual Conference for Protective Relay Engineers*.
- Bartman, T., Rowland, B., and Rogers, L. (2019). Expanding Protection and Control Communications Networks with Wireless Radio Links. *Papers Presented at the Annual Conference - Rural Electric Power Conference*, 2019-April, 39–45.
- Bartosiewicz, E., Januszewski, M., and Rasolomampionona, D. (2013). Results of modern pilot schemes tests for general electric line protection devices. In *2013 IEEE Grenoble Conference PowerTech, POWERTECH 2013*.
- Behrendt, K. (1996). Relay-To-Relay Digital Logic Communication for Line Protection, Monitoring, and Control. *Proceeding of 23rd Annual Western Protective Relay Conference Spokane*, (November 1997), 1–30.
- do Sistema Elétrico, O.N. (2011). *Submódulo 2.6 - Requisitos mínimos para os sistemas de proteção e de telecomunicações*, volume 0.
- Dolezilek, D. and Kalra, A. (2017). Lessons Learned : Benefits of Using Standardized Protocols to Replace Substation Copper Field Wiring With Digital Communications.
- Dolezilek, D., Gordon, C., Anderson, D., McCreery, S., and Jr, W.C.E. (2015). Simplifying teleprotection communications with new packet transport technology. *5th International Scientific and Technical Conference: Actual Trends in Development of Power System Relay Protection and Automation*, (June).
- Fodero, K., Huntley, C., and Robertson, P. (2018). Deterministic communications for protection applications over packet-based wide-area networks. *2018 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers*, 1–6.
- Gupta, S., Ali, I., Thomas, M.S., and Hussain, S. (2017). Recent advancements in substation automation systems based on information and communication technologies. *Commun. Comput. Syst.*, 1019–1024.
- Héctor J. Altuve Ferrer, Edmund O. Scheitzer, I. (2010). *Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electric Power Systems*.
- IEC (2010). Communication networks and systems for power utility automation, Part 90-1: Use of IEC 61850 for the communication between substations. Technical report, International Electrotechnical Commission.
- Laboratories, S.E. (Acesso 25/05/2020). URL <https://selinc.com/products/5030>---<https://selinc.com/products/5032/>.
- Meira, R.N., Pereira, R.L.A., Nascimento, J.P., Brito, N.S.D., Silva, H., and Souza, B.A. (2018). Analysis of interoperability of relays via teleprotection. In *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, 1–6.
- Miranda, J.C., Chemin Netto, U., Coury, D.V., and Oleskovicz, M. (2014). Behaviour evaluation of GOOSE message traffic between power substations: A POTT scheme case study. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*.
- Miveh, M.R. and Mirsaeidi, S. (2012). Introduction and Evaluation of Teleprotection Systems in Micro-Grids. *Researchgate.Net*, (5), 448–452.
- Oliveira, W. and Lopes, Y. (2018). Teleprotection over sonet based on iec 61850. *SBSE 2018 - 7th Brazilian Electrical Systems Symposium*, 1–6.
- Ordacgi, J. (2010). Proteção de Linhas de Transmissão: Teleproteção. *CEPSE 2010 Campinas*.
- Postel, J. (1983). Telnet protocol specification. In *RFC 854, ISI*.
- Santos, A.D., Soares, B., Fan, C., Kuipers, M., Sabino, S., Grilo, A.M., Pereira, P.R.B., Nunes, M.S., and Casaca, A. (2018). Characterization of substation process bus network delays. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(5), 2085–2094.
- Scheer, G.W. and Woodward, D.A. (2001). Speed and Reliability of Ethernet Networks for Teleprotection and Control. *Wpdac*.
- Schweitzer, E.O. and Kumm, J.J. (1998). Statistical Comparison and Evaluation of Pilot Protection Schemes. (72), 1–20.
- Villegas Guerrero, C.A. (2011). Uso do RTDS em testes de esquemas de teleproteção aplicando o Padrão IEC 61850. 157.
- Ward, S., Dahlin, T., and Ince, B. (2004). Pilot protection communication channel requirements. *Annual Conference for Protective Relay Engineers*, 350–391.
- Working Group 34/35.11 – Cigré Joint (2001). Protection using telecommunications. Technical Report August.