

Solução de Baixa Complexidade para Proteção de Linha de Circuito Duplo de Três Terminais em 69kV

Tema: Sistemas de Controle, Automação e Proteção

Autores: Bernardo Margotto Rosa Gonçalves - ELFSM, Edson Diego Mathias - ELFSM, Elielço Hungaro de Brito - ELFSM

Co-Autores: Camila Oliveira - SEL, Caio Maganhini Lopes - SEL

Empresa: Empresa Luz e Força Santa Maria S/A

Resumo

Apesar da sua facilidade e baixo custo de implantação, circuitos de três terminais não possuem uma proteção trivial e vem exigindo de concessionárias de energia alguns esquemas de proteção normalmente envolvendo comunicação. Este trabalho apresenta uma solução simples de solução de teleproteção por comparação direcional através do esquema DCB (*Directional Comparison Blocking*) para fazer a proteção completa e seletiva de uma linha de circuito duplo de três terminais, confiável para faltas em todos os trechos. O esquema opera com poucos equipamentos e possui um monitoramento ativo da comunicação no intuito de garantir disponibilidade. No trabalho serão expostas a arquitetura, lógicas do esquema de teleproteção, lógicas adicionais e tratativas de testes e implementação.

1. Introdução

O projeto Colatina 2 objeto deste estudo contempla a construção da linha de circuito duplo 138 kV João Neiva 2 – Colatina 2 (28,2 km) a partir da subestação Colatina 2, e da linha de circuito duplo 69 kV Colatina 2 – Duas Vendinhas (15,6 km). O projeto tem por objetivo estabelecer uma nova conexão da Empresa de Luz e Força Santa Maria (ELFSM) com a Rede Básica (RB), esta em 138 kV na SE João Neiva 2 de 345/138 kV. Com a nova conexão à RB, dessa vez em um ponto não radial e com previsão de múltiplas interligações em 500 e 345 kV, o sistema de Alta Tensão da ELFSM passa a ter agora mais robustez. A SE Henrique Coutinho 138/69 kV, até então a única da Santa Maria que fazia interligação à RB, terá uma subestação sobressalente, capaz de manter o sistema em sua falta, agregando confiabilidade ao sistema. O nível de tensão 69 kV foi o escolhido para integrar o Projeto ao sistema existente da ELFSM, visto que a SE Colatina 1, a ser suprida pela nova SE Colatina 2, opera com essa tensão primária, bem como a linha Henrique Coutinho – Colatina 1, que a atende até então, e que é o elemento geograficamente mais próximo ao novo sistema, na localidade de Duas Vendinhas. Considerando essa condição geográfica e o fato de que a linha poder ser alcançada sem passagem pela área urbana do município, ficou decidido que a conexão da nova linha 69 kV que vem de Colatina 2 seria feita através daquela linha 69 kV Henrique Coutinho – Colatina 1. Foram analisados 3 arranjos alternativos para a interligação:

Arranjo 1) Seccionamento da linha Henrique Coutinho – Colatina 1 e construção de uma subestação de manobra com 3 entradas de linha:

- Henrique Coutinho – Duas Vendinhas;
- Duas Vendinhas – Colatina 1;
- Colatina 2 – Duas Vendinhas.

Arranjo 2) Abertura de 1 dos circuitos existentes da linha Henrique Coutinho – Colatina 1, ocasionando um rearranjo do sistema, com 3 circuitos simples, sendo:

- Henrique Coutinho – Colatina 1;
- Colatina 2 – Colatina1;
- Colatina 2 – Henrique Coutinho.

Arranjo 3) Interligação da linha nova com a linha existente por tap, formando uma linha de circuito duplo de 3 terminais:

- SE Henrique Coutinho, a 6,3 km do tap;
- SE Colatina 1, a 2,4 km do tap;
- SE Colatina 2, a 15,6 km do tap.

A primeira opção é a mais adequada tecnicamente, mas seu alto custo previsto inviabilizou a solução. As outras duas opções não acrescentariam valor significativo à construção da linha 69 kV. Nesses casos, o maior orçamento seria para a terceira opção, com projeto de torre de chaveamento e instalação de chaves seccionadoras na torre a montante do ponto do tap. Mesmo assim, o valor não chegaria a 5% do previsto para a subestação de chaveamento. Dentre as alternativas com custo viável, a de formar uma linha com 3 terminais através de tap foi a escolhida (Arranjo 3). Ela se alinha melhor com a nova configuração do Sistema de Alta Tensão, onde a SE Colatina 2 supre a SE Colatina 1, e a SE Henrique Coutinho supre as outras subestações de distribuição sem que haja, em regime normal de operação, interligação entre as subestações da Rede Básica através das linhas da ELFSM. Em contingência, tanto a SE Colatina 2 quanto a SE Henrique Coutinho podem alimentar sozinhas todas as cargas. E para todos esses casos estariam disponíveis circuitos duplos.



Figura 1. Arquivo KMZ com a linha de três terminais sob estudo Colatina 2 – Colatina – Henrique Coutinho

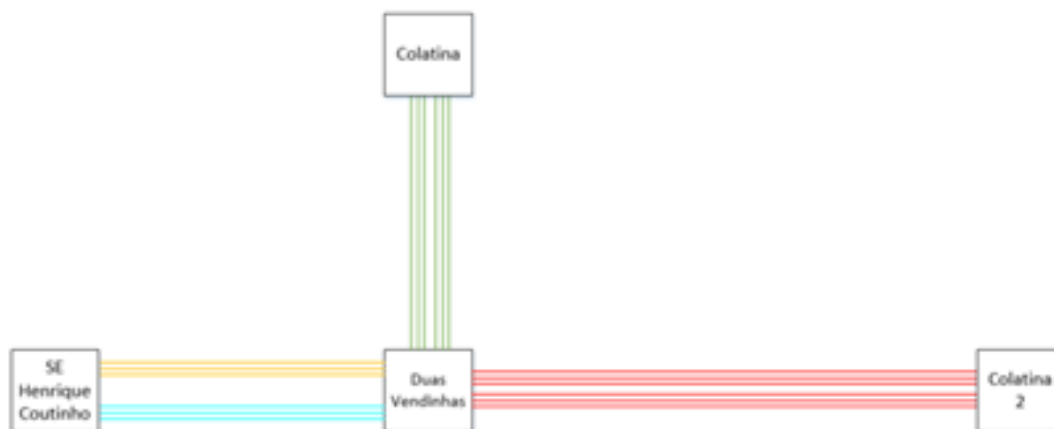


Figura 2. Representação da linha de três terminais sob estudo Colatina 2 – Colatina – Henrique Coutinho Definida a forma de interligação do Projeto Colatina 2 ao sistema existente da Santa Maria, pouco foi acrescido ao escopo de construção das linhas e da subestação, restando como maior desafio a proteção da linha de 3 terminais, que será discutido neste trabalho.

A linha 69 kV Henrique Coutinho – Colatina 1 conta com proteção mais atual apenas no terminal SE Henrique Coutinho. Os relés utilizados até então na SE Colatina 1 acabam por limitar a aplicação de esquemas mais seletivos, assim as faltas que ocorrem em apenas 1 circuito da linha resultam na abertura dos dois circuitos, ficando a SE Colatina 1 desenergizada nesses casos. Entre 2019 e 2024 ocorreram 03 falhas desse tipo, ocasionando falta de energia para cerca de 28 mil unidades consumidoras (23% dos consumidores da distribuidora) durante um período total de 1 hora e 20 minutos. Antes da entrada em operação do Projeto Colatina 2, a SE Henrique Coutinho era fonte única de 3 subestações de distribuição, com um total aproximado de 85 mil unidades consumidoras (68% do total da distribuidora). No mesmo período de 2019 a 2024 essa subestação ficou indisponível em 6 oportunidades, acumulando 2 horas e 24 minutos de falta de energia (sendo 2 horas e 12 minutos por indisponibilidade da subestação da rede básica, em 4 eventos), num cenário com recursos relativamente limitados de transferência de carga através das redes de média tensão. Assim, as proposições de melhorias trazidas pelo Projeto Colatina 2 trazem uma melhor flexibilidade de distribuição de energia nesta importante região, deixando o sistema mais robusto e preparado para possíveis falhas no sistema.

2. Desenvolvimento

2.1 Desafios de Proteção Em Linhas de Três Terminais

Ocasionalmente, as linhas de transmissão podem ser derivadas para a conexão de cargas ou para reforçar a rede de subjacente, conforme ilustrado no Projeto Colatina 2. Esse tipo de operação normalmente é uma condição provisória ou de custo reduzido que visa atender cargas de uma região de importância para a concessionária. As linhas de transmissão de três terminais geralmente oferecem vantagens econômicas, técnicas e ambientais consideráveis [1], e podem reduzir o custo relativo a novas subestações além de encurtar a distância entre pontos de carga. Porém, esta aplicação impõe severos desafios à proteção a de distância [2].

A presença de um terceiro terminal de origem faz com que o relé de distância opere de forma ineficaz para faltas na linha além do ponto de derivação. Isso ocorre devido ao fluxo de corrente de falta de um terceiro

terminal, afetando a tensão e as correntes presentes nos outros dois terminais [3]. No caso da proteção de linha com base em distância, a impedância aparente calculada até o ponto de falta (Z_{APARENTE} da Equação 1) depende da tensão e corrente medida, porém, a corrente medida só é a que realmente passa pelo circuito até o ponto de derivação, após o ponto de derivação, a real corrente que passa pelo circuito passa a ser somada com a contribuição do terceiro terminal. Isso faz com que o relé veja na verdade uma impedância aparente maior do que a real (Z_{REAL} da Equação 2), podendo trazer problemas de subalcance. Este efeito adicional causado pela contribuição do terceiro terminal para a falta é conhecido como efeito infeed.

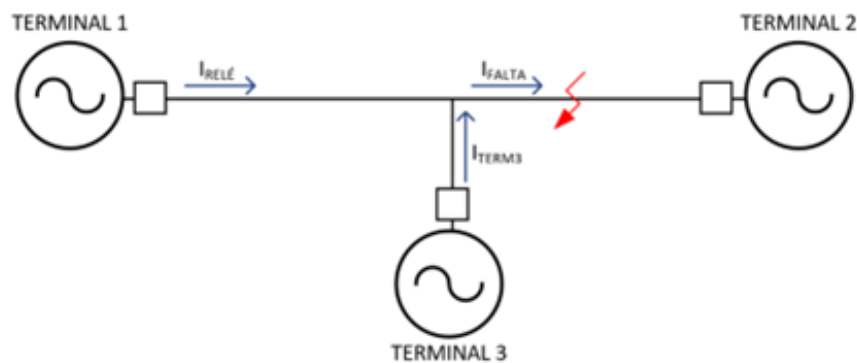


Figura 3. Efeito Infeed causado pela adição de um terceiro terminal de linha

$$Z_{APARENTE} = \frac{V_{RELÉ}}{I_{RELÉ}} \quad \text{Equação 1}$$

$$Z_{REAL} = \frac{V_{RELÉ}}{I_{RELÉ}} + \frac{V_{RELÉ}}{(I_{RELÉ} + I_{TERM3})} \quad \text{Equação 2}$$

$$Z_{APARENTE} > Z_{REAL} \quad \text{Equação 3}$$

Este efeito infeed faz com que o relé enxergue uma impedância maior que a real, deixando de operar para faltas após a derivação dependendo do alcance ajustado na proteção de distância. Uma opção adotada em alguns casos é aumentar o alcance de atuação da zona de proteção da linha para passar a alcançar todo comprimento da mesma além da derivação, porém, aumentar a extensão do alcance deste ajuste pode limitar a capacidade de carga e ainda aumenta a probabilidade de operação em oscilações de potência estáveis, impactando diretamente na confiabilidade e segurança do sistema [4]. Adicionalmente, esta ação pode gerar um sobrealcance nos casos de faltas em momentos que o Terminal 3 está fora de operação. Uma opção mais confiável para a proteção de linhas de três terminais é a aplicação de esquemas de teleproteção por comparação direcional. Este esquema consiste na comunicação entre os relés de cada

um dos terminais, baseada na troca de informações sobre a direcionalidade da falta. Com informações conjuntas a respeito de um determinado evento, fica mais confiável para o relé tomar a decisão de abertura ou não. Este tipo de esquema exige poucos requisitos do canal de comunicação, pois a informação enviada de um terminal para o outro se trata apenas de um bit de informação (bit de atuação de um elemento direcional). Este elemento direcional pode ser formado por elementos de distância intrinsecamente direcionais ou simplesmente elementos de sobrecorrente direcionais, disponíveis em muitos relés de mercado.

Um dos esquemas por comparação direcional muito usado é o esquema de bloqueio por comparação direcional (*Directional Comparison Blocking* - DCB). Este esquema utiliza um elemento de direcionalidade reversa para enviar um sinal de bloqueio para o relé do terminal remoto, conforme ilustrado na Figura 4. O relé terá um elemento a frente ativo que permitirá o TRIP a não ser que um sinal de bloqueio seja recebido do terminal remoto, assim, deverá haver uma temporização para o TRIP do relé para aguardar a recepção do sinal de bloqueio de acordo com o tempo do canal de comunicação. Este atraso é conhecido como um intervalo de coordenação (*Coordination Time Delay* – CTD) [5].

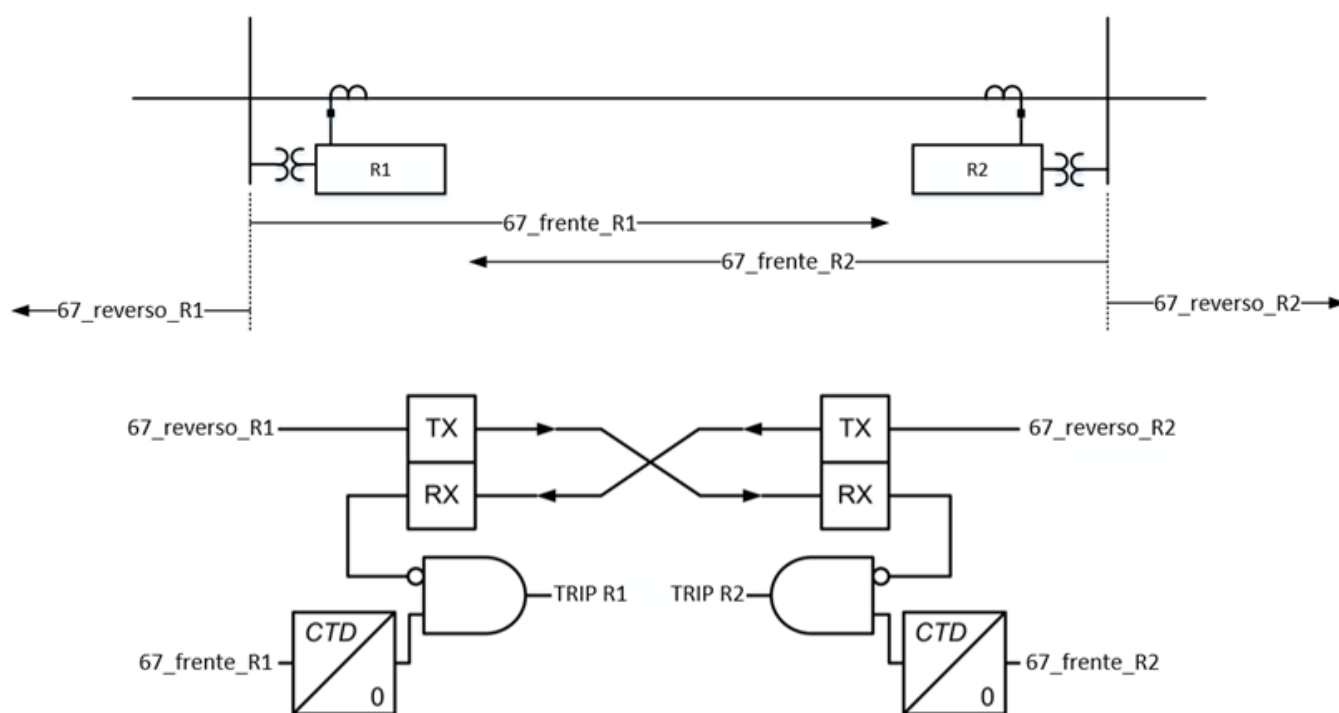


Figura 4. Esquema de Comparação Direcional Tipo DCB

2.2 Solução Proposta

O esquema proposto para ser implementado no Projeto de Colatina 2 foi um esquema DCB aplicado aos três terminais da linha de 69kV Henrique Coutinho, Colatina e Colatina 2. A arquitetura proposta foi a mostrada na Figura 5.

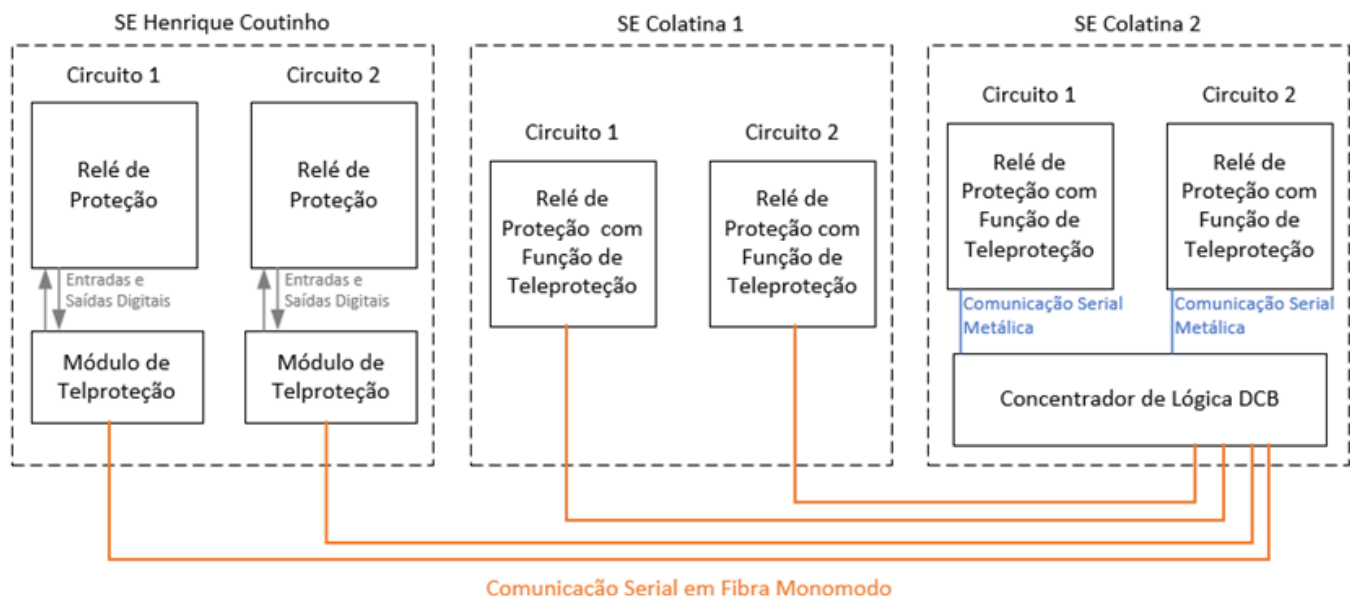


Figura 5. Arquitetura de Comunicação Implementada

A arquitetura de rede pode ser descrita pelas características abaixo:

- O protocolo de comunicação escolhido para fazer a troca de informações para o DCB foi um protocolo serial proprietário do fabricante envolvido no projeto, muito aplicado em esquemas de teleproteção [6]. Este protocolo envia e recebe 8 informações em cada sentido, sendo simples de configurar e seguro, sem necessidade de preocupação com questões de segurança cibernética.
- Em Henrique Coutinho, um módulo de teleproteção com este protocolo foi utilizado pois o relé de proteção do local não o possuía e não foi substituído. Este módulo se comunica com o relé local através de binárias físicas.
- Em Colatina 1 e 2 o relé de proteção escolhido já possuía o protocolo em questão e estava apto a trabalhar com esquemas de teleproteção, não havendo necessidade de um módulo adicional.
- Em Colatina 2, foi colocado um processador de lógicas para executar todo esquema de DCB. Este processador concentra as informações de elementos direcionais de todos os três terminais e executa a lógica conforme a Figura 4.
- Para a comunicação entre Henrique Coutinho e Colatina 1 com o processador de lógicas, foram utilizadas fibras de comunicação monomodo com capacidade de propagação para até 80km, atendendo as distâncias das linhas em questão.

Em cada relé de proteção, uma lógica de envio de bloqueio foi programada para enviar o bloqueio para o esquema DCB. Esta lógica pode ser vista na Figura 7.

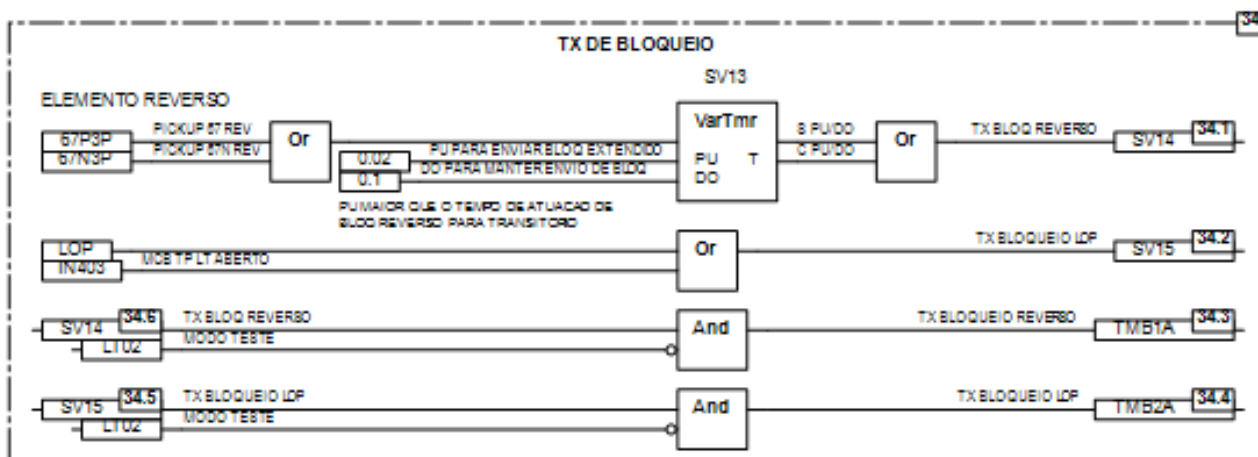


Figura 7. Lógica de Envio de Bloqueio para Esquema DCB

Podemos observar que:

- O envio do bloqueio é feito com dois tipos de elementos direcionais reversos: um 67P de fase e um 67N de neutro.
- A condição de perda de medição da tensão também envia o bloqueio, pois esta condição impede o bom funcionamento da lógica.
- Existe uma variável de modo teste associada ao envio do bloqueio, que impede o envio do sinal de bloqueio caso o relé esteva ativado em modo teste, para fins de análises locais da operação do relé, sem envio de bits por comunicação.

Já para o trip propriamente dito dado pelo esquema de teleproteção, temos a lógica demonstrada na Figura 8.



Figura 8. Lógica de Trip por Teleproteção

É importante ressaltar que a segurança do esquema de teleproteção é totalmente dependente da comunicação, portanto, um bom monitoramento dos canais se tornou imprescindível para a solução. Os equipamentos selecionados para o esquema possuem um processo de autodiagnose tanto do hardware quanto da disponibilidade do canal de comunicação, enviando bits de falha na ocorrência de qualquer problema. Este monitoramento é constante durante toda operação do equipamento, podendo ser monitorado a nível de supervisão.

Adicionalmente, alguns elementos lógicos foram incluídos para dar mais segurança para a operação da lógica. Estes elementos foram:

-

Elementos 67 de Emergência: estes elementos são habilitados nos relés de proteção em casos de perda de potencial ou falha no canal de comunicação de qualquer equipamento envolvido no esquema de teleproteção.

- Transferência Direta de Disparo: uma transferência direta de disparo é enviada a todos terminais no caso de um trip por teleproteção ser acionado, para garantir a abertura dos três terminais no caso de uma falta interna.

Por fim, um dos últimos pontos levantados como dificuldade para a operação do trecho do Projeto Colatina 2, além da própria proteção de uma linha de três terminais, era o fato do circuito ser um circuito duplo. Em relação a isso, o esquema desenvolvido acabou solucionando o problema, pois os esquemas foram implementados por circuito, assim, a atuação correta dos elementos direcionais permitiu sempre identificar de maneira correta o circuito sob falta desligando o mesmo de maneira seletiva. O desligamento apenas do circuito sobre falta terá um impacto considerável na disponibilidade deste trecho para a concessionária.

2.3 Testes e Implementação

Durante o período de teste em fábrica, a primeira etapa foi divulgar a lógica para os operadores da ELFSM para que a mesma fosse algo de conhecimento de todos e fácil aplicação e manutenção. Adicionalmente, foi dado um treinamento em relação a todos equipamentos aplicados. Em relação ao teste, foram realizadas simulações de faltas internas e externas através do uso de mala de testes em todos os terminais da linha para a verificação do desempenho da lógica, validando os esquemas implementados e as configurações de comunicação de cada um dos equipamentos.

Para o período de testes em campo, foram validadas as comunicações entre os terminais e os testes foram feitos com mala de teste a partir de um terminal único com o envio simulado dos sinais de teleproteção a partir dos demais terminais, garantindo a operação da transferência direta de disparo. A presença dos módulos de teleproteção permitiu uma integração facilitada dos IEDs existentes da SE Henrique Coutinho ao novo sistema de teleproteção.

3. Conclusão

A utilização de linhas com três terminais vem sendo uma opção interessante para concessionárias devido ao baixo custo e facilidade de aplicação, porém, gera dificuldades nos esquemas de proteção principalmente quando se tenta aplicar esquemas simples de proteção de distância. O trabalho mostrou que aplicando comunicação e elementos direcionais nos três terminais da linha, é possível prover uma proteção confiável e segura para faltas em todo o circuito, independente do ponto de falha. O esquema apresentado foi um esquema de baixo custo, com poucos equipamentos envolvidos, poucas lógicas implementadas e, portanto, de fácil manutenção. Todo monitoramento da comunicação foi ativado de modo a permitir a análise da disponibilidade do esquema a longo prazo. Por fim, o problema de falta de seletividade para os circuitos duplos envolvidos também foi solucionado aplicando um esquema para cada circuito.

Como trabalho futuro fica a verificação do desempenho deste esquema após a colocação do mesmo em operação, com análises de faltas internas e externas.

4. Referências bibliográficas

- [1] Chen, C. S., Liu, C. W., & Jiang, J. A. (2002). Three-terminal transmission line protection using synchronized voltage and current phasor measurements. *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, 3, 727–1732. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/tdc.2002.1177715>.
- [2] Nayak, P. K., Pradhan, A. K., & Bajpai, P. (2016). A Three-Terminal Line Protection Scheme Immune to Power Swing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 31, 999–1006. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2387873>.
- [3] Veiga, M.; Bencke, F.; Morais, A.; Cardoso, G.; Marchesan, G. Análise dos Métodos de Bloqueio do Relé de Distância Durante Oscilações de Potência em Linhas de Três Terminais. Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência, Universidade Federal de Santa Maria, Brasil.
- [4] IEEE Power and Energy Society, 2015. IEEE Power and Energy Society. (2015). IEEE Guide for Protective Relay Applications to Transmission Lines.
- [5] Abboud, R; Bell, J.; Smyth, B. Considerações e Benefícios de Utilizar Cinco Zonas para Proteção de Distância. Apresentado na 72nd Annual Conference for Protective Relay Engineers College Station, Texas, EUA 25–28 de março de 2019.
- [6] Kumm, J.J. Implementation of a New Communication-Aided Tripping Scheme Using the SEL-321 Relay Mirrored Bit Function. *Application Guide Volume 1 AG96-14*.