

GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA - GPC

EXPERIÊNCIA DE INTEGRAÇÃO DE TECNOLOGIAS E LÓGICAS DE PROTEÇÃO NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DA ENEL SÃO PAULO UTILIZANDO O CONCEITO DE EDGE COMPUTING

DIOGO VINICIUS JOAO(1);JOÃO PAULO ASSUNÇÃO DE SOUZA(2);RODRIGO LIMA DE ARAÚJO(2);DANIEL FILGUEIRAS(3);KENNEDY ALVES MARTINS(4);MARCOS AURELIO IZUMIDA MARTINS(1);HAMILTON GUILHERME BUENO DE SOUZA(4);FELIPE THOMAZI MOREIRA(2) FUNDAÇÃO CERTI(1);CONCERT TECHNOLOGIES S.A.(2);ENEL SP(3);ENEL DISTRIBUIÇÃO SÃO PAULO(4)

RESUMO

Este trabalho aborda o desenvolvimento de uma solução integrada de funcionalidades de proteção, baseada no conceito de Edge Computing e centralização de tomadas de decisão. O desenvolvimento é dividido em dois blocos: Gateway Físico (SGG - Smart Grid Gateway); Sistema Central em Nuvem (SCP – Sistema Central de Proteção). Este trabalho tem o enfoque na apresentação dos conceitos implementados de Seletividade Lógica e de Self-Healing. Ambas trabalham de modo integrado com sistemas legados do Setor Elétrico. O maior diferencial desta solução está na forma de comunicação sem fio, por meio de rede LTE, e na unificação de protocolos de comunicação dos equipamentos de proteção.

PALAVRAS-CHAVE

Sistemas de Proteção, Seletividade Lógica, Self-Healing, Edge Computing

1.0 INTRODUÇÃO

O avanço de diversas tendências tecnológicas, principalmente as relacionadas ao sensoriamento e análise de dados em nuvem, carregam em si grandes benefícios para a indústria [1]. Para o setor elétrico, a precisão e velocidade das coletas de dados almejada por estas tecnologias trazem benefícios que afetam não apenas o setor e a rede elétrica, como também a qualidade de energia e seu provimento para os consumidores do sistema de energia [2]. Em especial, nos sistemas de proteção da rede elétrica, os quais agem decisivamente na operacionalização da rede mediante informações coletadas da própria rede, precisão e velocidade são cruciais para as tomadas de decisão adequadas e otimizadas nas ações da proteção [3], [4]. Desta maneira, a ENEL Distribuição São Paulo, através da execução da Fundação CERTI em parceria com a Concert Technologies, vem desenvolvendo uma aplicação baseada em hardware, software e firmware para análise de dados em tempo real do sistema de proteção. Assim, visa-se o desenvolvimento de um produto inteligente, inovador e inédito, para canalizar e unificar os sistemas de comunicação. Tal produto é denominado de Smart Grid Gateway (SGG).

O SGG, consiste na aplicação do conceito de Edge Computing, levando o processamento de dados a um patamar local. Ou seja, as informações coletadas em campo do sistema elétrico, são processadas imediatamente no hardware local e retornam com resposta de tomada de decisão diretamente no local de aplicação. A alta disponibilidade de comunicação é viabilizada pela implementação de um protocolo proprietário definido neste projeto como SWPRP (Smart WAN Parallel Redundancy Protocol), inspirado no conceito PRP de redundância de redes. Este protocolo garante o funcionamento simultâneo de dois meios de comunicação distintos e operando de forma paralela. Assim, a solução SGG recebe as informações processadas em tempo real de sistemas legados como SCADA, GIS, etc, e complementam-nas com informações em tempo real de campo. Isto é realizado com duas redes de telefonia celular diferentes, formando um duplo canal LTE de comunicação, garantindo conceitualmente 99,8% de disponibilidade da rede.

Uma ilustração geral da solução SGG é apresentada na Figura 1, onde os IEDs (Intelligent Electronic Devices) instalados diretamente na rede elétrica de distribuição realizam comunicação com o hardware SGG. Este por sua vez, realiza a comunicação com o SCP, em nuvem através de uma conexão Dual LTE. A solução também tem aplicabilidade em redes subterrâneas, onde a comunicação neste caso é realizada via fibra ótica. As integrações da solução via SCP contemplam os sistemas SCADA, GIS e DataLake.

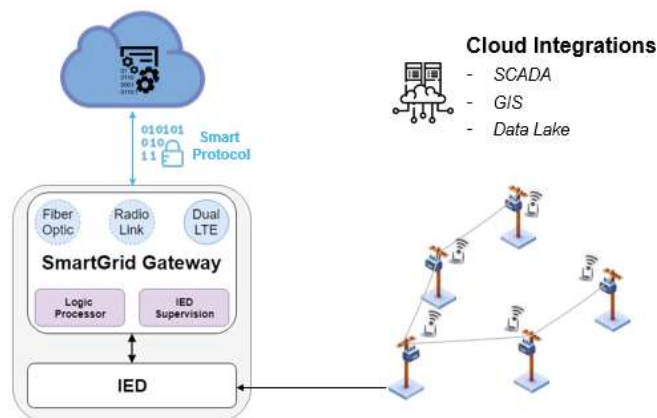


Figura 1: Visão Geral da Aplicação SGG na Rede Elétrica de Distribuição

De modo geral o produto SGG divide-se em dois blocos: o gateway físico, ou seja, o SGG; e o Sistema Central de Proteção, o SCP. O SGG é encarregado de realizar a comunicação efetiva entre os IEDs e o SCP, agindo com tomadas de decisão em campo. Já o SCP é o software responsável pela interação com os sistemas legados SCADA, GIS, Data Lake, etc., e pela implementação das filosofias de proteção. Para atuação do SGG em termos de funcionalidades e ações, são elaboradas e aplicadas no sistema três filosofias de proteção. Estas são: Proteção Adaptativa (PA), Seletividade Lógica (SL), e Self-Healing (SH).

Devido a diversidade de condições operativas que o sistema de distribuição apresenta decorrente da mudança do perfil de consumo, da inserção de geração distribuída entre outros fatores, os métodos tradicionais de coordenação não estão sendo suficientes para se obter a melhor eficiência no aspecto da proteção e seletividade da rede [5]. Nesse contexto a PA ajusta periodicamente a proteção da rede de acordo com as diferentes condições de operação do sistema [6]. A filosofia da SL se dá pela indicação de comandos logicamente efetivos para se promover o isolamento de uma falta na rede através da atuação apenas de dispositivos imediatamente adjacente à falta, diminuindo o número de clientes desconectados. Em termos de SH, esta filosofia promove um rápido e automático reestabelecimento da rede pós isolamento da falta. Assim, o desligamento da rede afeta apenas os consumidores próximos à falta [8].

Com a implantação do SH na rede, a confiabilidade do sistema é aumentada, uma vez que essa tecnologia reduz o número de consumidores afetados por uma falta, além de promover melhorias nos indicadores da rede junto com a filosofia de SL [9]. De fato, estas funcionalidades tem o potencial de afetar positivamente os índices de DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), que são parâmetros de avaliação da confiabilidade do sistema [7].

Este artigo, portanto, propõe apresentar o desenvolvimento realizado no produto SGG, em especial a especificação das filosofias de SL e SH, apresentando os modos de comunicação e lógicas estruturais para a efetivação e factibilidade da solução no setor elétrico de distribuição de energia. Detalhamento da lógica de PA não contempla o escopo deste artigo, porém, pode ser encontrada em [10]. O trabalho aqui apresentado é fruto do projeto de P&D ANEEL Urban Futurability da ENEL Distribuição São Paulo, o qual tem o objetivo de digitalizar a rede elétrica, tanto aérea quanto subterrânea, incorporando ao sistema as mais modernas técnicas e tendências de automatização da rede, provendo o conceito de living-lab na área de maior densidade elétrica de sua concessão.

2.0 METODOLOGIA

O sistema de proteção integrada, baseado no SGG e no SCP, aplica 3 filosofias de proteção: Proteção Adaptativa (PA); Seletividade Lógica (SL); e Self-Healing (SH). Toda a inteligência de processamento e algoritmos de tomadas de decisão, tanto para PA, SL e SH, reside no sistema central da proteção em uma plataforma na nuvem. O resultado desta decisão é transmitido por meio de um duplo canal LTE, via protocolo SWPRP, para o hardware SGG. Todas as informações provenientes dos IEDs são transmitidas para o SGG através dos protocolos de comunicação nativos de cada equipamento. Assim, o hardware SGG promove uma unificação dos diversos protocolos existentes nos equipamentos de proteção da rede elétrica, e os envia para o SCP realizar análises inteligentes baseadas na integração com os sistemas legados da distribuidora, como por exemplo SCADA e GIS.

Em caso de falha de comunicação de algum IED com o SCP, o algoritmo age de forma estratégica mediante as tomadas de decisões para cada filosofia. À exemplo da proteção adaptativa, a filosofia automaticamente retoma a lógica convencional localmente, bloqueando a atuação do IED pela PA. Para a filosofia de SL, é realizado o bloqueio desta filosofia em todos os IEDs à montante do IED com falha, retornando-os para a seletividade cronológica. Já o caso da filosofia de SH, os comandos de atuação são bloqueados no IED com falha e o algoritmo de restituição da rede tenta recuperar a rede apenas com os IEDs com comunicação ativa no sistema.

Para todas as funcionalidades aplicadas, a arquitetura de comunicação é um aspecto crítico e, portanto, bem estruturada na solução SGG, garantindo a correta performance dos sistemas de proteção, principalmente na questão da SL. Neste sentido, os blocos apresentados na Figura 2 ilustram a arquitetura do sistema SGG e seus protocolos

de comunicação para cada etapa do sistema. O intuito deste sistema é garantir uma baixa latência de comunicação, e uma disponibilidade de 99,8% da rede de comunicação por meio de um duplo canal LTE-SWPRP.

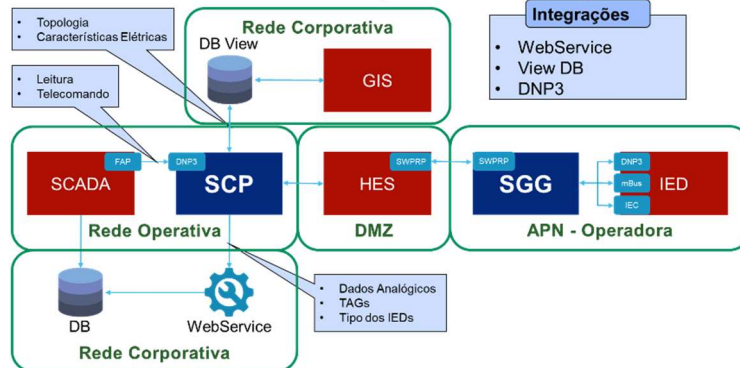


Figura 2: Visão geral e condensada da arquitetura de comunicação do SGG

2.1 Seletividade lógica

Para a implantação da SL, são elaborados 2 grupos de proteção para cada IED abrangido pelo sistema de proteção integrado pelo SGG. Um destes grupos apresenta a mesma curva de atuação para todos os IEDs de seu respectivo alimentador. Desta maneira, após a detecção de uma falta, todos os IEDs a montante da falta são sensibilizados igualmente. Com isso, cada IED sensibilizado emite um sinal de bloqueio da proteção para o SCP. Neste momento, o SCP realiza a análise da rede e seleciona os IEDs que devem atuar de maneira inteligentemente seletiva. A imagem da Figura 3 ilustra o processo de atuação da SL diante da ocorrência uma falta entre os IEDs 5 e 6. Nesta situação, os IEDs 1, 2, 3, 4 e 5 mandam um sinal de falta para o SCP, que por sua vez analisa a rede e manda um comando liberando a atuação de TRIP para o IED 5, abrindo-o juntamente com o IED 6.

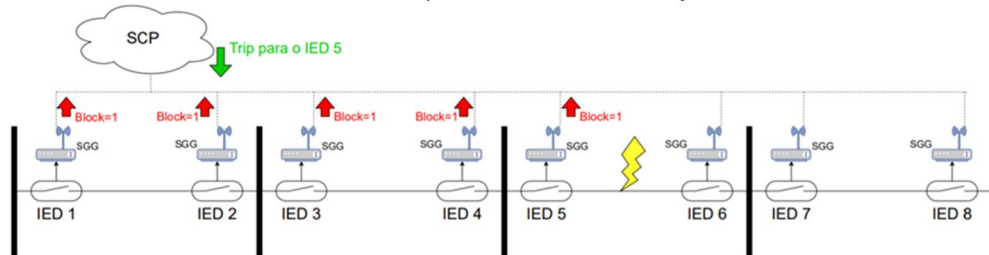


Figura 3: Ilustração do processo de SL

O segundo grupo de proteção programado em cada IED, refere-se a configurações de curvas de modo tradicional, ou seja, baseia-se na coordenação temporal e cronológica de cada IED do alimentador. Com este segundo grupo de ajustes, em caso de falhas na comunicação ou má atuação da SL, o IED volta para o sistema de seletividade cronológica tradicionalmente empregado nos sistemas de distribuição. Assim, este grupo age como um backup para o sistema de seletividade desenvolvido para atuar na solução SGG. A Figura 4 apresenta um exemplo das curvas dos dois grupos de ajustes previstos para serem incorporados em cada IED da rede.

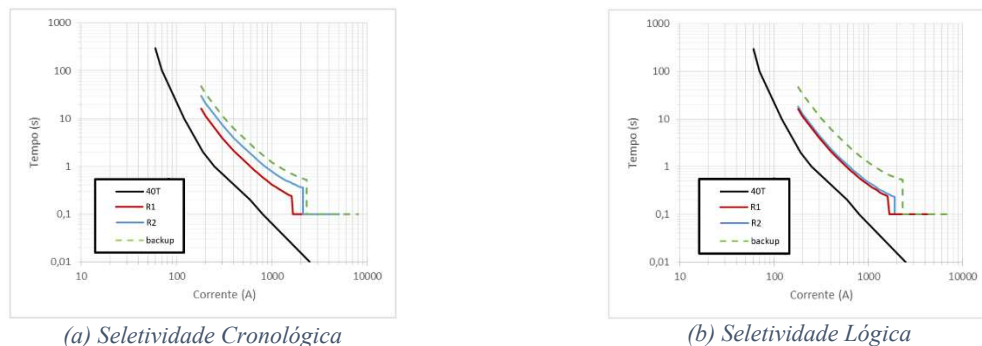


Figura 4: Exemplo de curvas para configuração da SL

Os gráficos da Figura 4 são coordenogramas e representam o tempo necessário para atuação do dispositivo de proteção em função da corrente de falta que o sensibiliza. Para o item (a), tem-se representada as principais características de sistemas projetados para operar em seletividade cronológica. Nesse sistema, é interessante que haja uma separação temporal (graficamente, na direção vertical) entre todas atuações da proteção (tempo de

coordenação), de forma que o dispositivo mais próximo a falta atue mais rapidamente que os demais equipamentos a montante, isolando o menor trecho possível de circuito. Essa separação é claramente percebida pela distância vertical entre o fusível 40T, os relés R1 e R2 e a curva de backup, que garante que os dispositivos operem de maneira sequencial e minimizam chances de atuação simultânea e desliguem grande parte da rede. Esse comportamento não é observado no item (b) da Figura 4, em que atua a SL. Nesse esquema de coordenação, não é requisitado distância entre as curvas de operações do sistema, como visto para os relés R1 e R2, pois nessa situação a atuação dos equipamentos é habilitada ou desabilitada segundo lógicas e comunicações entre os dispositivos e o sistema central. Assim, a coordenação é decidida de forma lógica pela atuação do equipamento mais próximo à falta e o bloqueio dos dispositivos à montante. Ou seja, toda a coordenação da proteção não depende de definições de tempo sequenciais (a exceção dos intervalos de comunicações e processamento), diferindo da seletividade cronológica. Para efeitos de curvas programadas nos Relés, todos apresentam a mesma curva no caso de SL.

Em se tratando das curvas do grupo de ajustes 1, é necessário que a SL leve em considerações os equipamentos fusíveis da rede. Ou seja, a atuação temporal da SL deve resguardar tempo suficiente para que uma falta além fusível atue antes de iniciar o processo da SL. Este fato justifica a utilização de curvas de atuação inversa para o envio de comandos de bloqueio dos IEDs sensibilizados por uma falta, uma vez que fusíveis não se comunicam com o sistema de proteção. Assim, após o primeiro religamento, o sistema não coordena mais com o fusível, apresentando uma curva inversa rápida (STI).

Mediante os grupos de ajustes configurados, a SL apresenta restrições de atuação em tempo menor que 200ms. A realização da atuação nesta faixa de tempo é factível através de um robusto sistema de comunicação. Neste sentido, o tempo de 200ms deve contemplar o tempo do IED se comunicar com o SGG via protocolo particular de cada IED, ou seja, ModBus, DNP3 ou IEC61850, o tempo do SGG se comunicar com o SCP via canal LTE, o tempo do processamento da lógica pelo SCP, e o retorno da decisão fazendo o caminho de volta até o IED. Caso este tempo seja ultrapassado, o IED comuta automaticamente do grupo responsável pela seletividade lógica para o grupo de seletividade cronológica.

2.2 Self-Healing

Considerando a implantação da filosofia de SH, as manobras são calculadas a partir das informações de alarmes dos IEDs e da topologia dos alimentadores. O sequenciamento do processo segue o fluxo de informações ilustrado na Figura 5. Neste processo, o SH inicia-se com um IED entrando em lockout e informando sua situação ao SGG via protocolo DNP3, Modbus ou IEC61850, dependendo do fabricante do IED. Com base nestas informações, o SGG encaminha uma mensagem via protocolo SWPRP para o servidor HES/DMZ. Deste ponto em diante, a mensagem é decodificada e encaminhada ao SCP em formato JSON. Munido das informações de campo, o SCP faz solicitações ao sistema GIS (Geographical Information System), o qual responde com informações base de topologia e características dos alimentadores. Medições de corrente e potência também são requisitadas ao webservice do sistema SCADA via protocolo SOAP, pois são considerados nos critérios de decisão do SH. Com estas informações, o SCP calcula as manobras necessárias para operar o SH, encontrando uma solução factível e ponderando a necessidade de corte de carga mínimo da rede, sendo que as manobras realizadas são informadas diretamente ao sistema SCADA via protocolo DNP3.

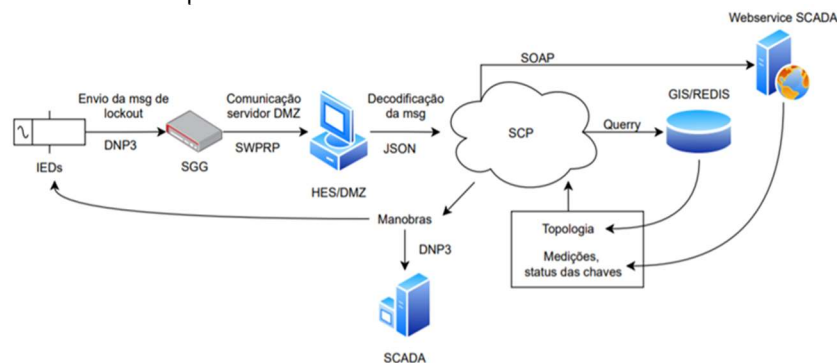


Figura 5: Fluxo de Informações para SH

Mediante as manobras admissíveis pelo SH, o algoritmo considera as conexões de recursos que interligam os trechos radiais da rede e rearranjam a radialidade do sistema após uma falta. O intuito é recuperar o máximo número de consumidores que não foram impactados diretamente pela falta que desligou o sistema. Assim, resume-se as manobras resultantes de acordo com as transferências de carga elencadas como:

- **Transferência Direta:** Representa uma transferência de carga do alimentador em falta para um alimentador imediatamente adjacente, utilizando um único caminho de recurso.
- **Transferência por N Vizinhos Diretos:** Representa uma transferência de carga do alimentador em falta com suporte de N alimentadores adjacentes, utilizando mais de um caminho de recursos para suprir as cargas desenergizadas do alimentador que não estão conectadas diretamente à falta.
- **Transferência Indireta:** Representa uma transferência de carga do alimentador com falta sendo suportado por um alimentador subadjacente (através de saltos), utilizando mais de um caminho de recurso.

- **Transferência com descarte de carga:** Representa uma transferência de parte da carga do alimentador com falta para outro alimentador, resultando na necessidade de corte de carga para respeitar os limites técnicos da rede, e mesmo assim, recuperar o máximo de consumidores possíveis.

Estas transferências são realizáveis por meio dos religadores de recursos, localizados em cada caminho de recurso da rede. Geralmente, estes religadores têm configuração Normalmente Aberto (NA), enquanto que os religadores do ramo radial têm configuração Normalmente Fechado (NF). Para efeitos de elucidação dos casos de transferência, a Figura 6 traz um exemplo ilustrativo para cada cenário admissíveis para o SH. Nesta imagem os blocos vermelhos representam os IEDs NF, os verdes NA e o triângulo inferior de cada bloco representa o status inicial do religador.

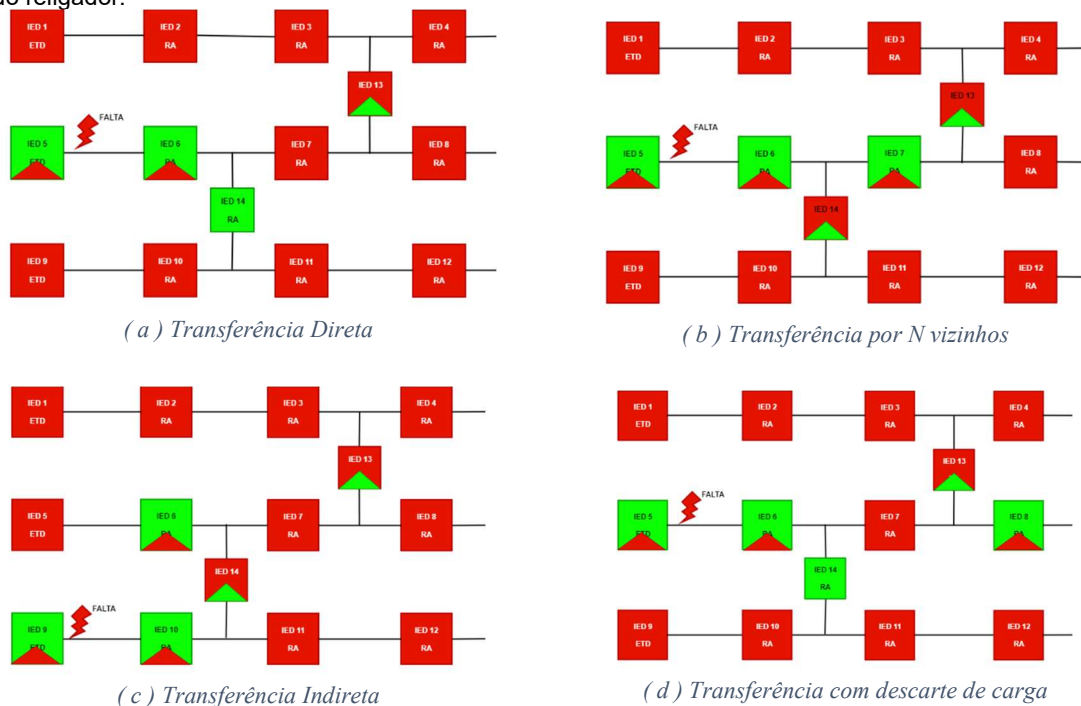


Figura 6: Ilustração das manobras da filosofia de SH

De modo geral, a lógica de SH segue um fluxograma bem definido com base nas informações coletadas nos sistemas legados do setor elétrico e com as restrições impostas pelo algoritmo para definição das manobras de operação. A tomada de decisão sobre qual manobra realizar para a recomposição das cargas é feita seguindo a seguinte lógica: primeiro é feito a tentativa de executar uma transferência direta pois representa o menor número de manobras e a maior quantidade de cargas restabelecidas. Em seguida é estimado a potência do alimentador que recebe a transferência de carga e as correntes nos seus IEDs. Caso as correntes estimadas sejam menores que a corrente de pick-up dos IEDs e que o carregamento estimado do alimentador seja menor que a sua capacidade, a transferência direta de cargas é realizada. Caso contrário, é feita a tentativa de executar a transferência por N vizinhos, pois representa a maior quantidade de cargas restabelecidas e a abertura apenas de IEDs que já estavam desenergizados. As restrições são checadas e caso sejam atendidas, a manobra é realizada. Caso contrário, é feito a tentativa de transferência indireta de cargas, pois representa o maior número de cargas restabelecidas. As restrições são então checadas e caso sejam atendidas, a manobra é realizada. Caso contrário, é feita a transferência com descarte de cargas, priorizando o cenário com o maior número de consumidores restabelecidos. Caso seja possível, a manobra é realizada, caso contrário não é executado nenhuma manobra. O fluxograma da Figura 7 ilustra o processo da lógica do SH.

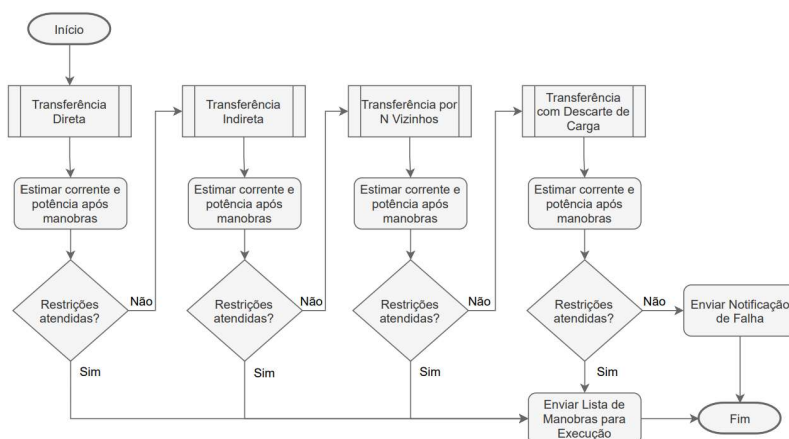
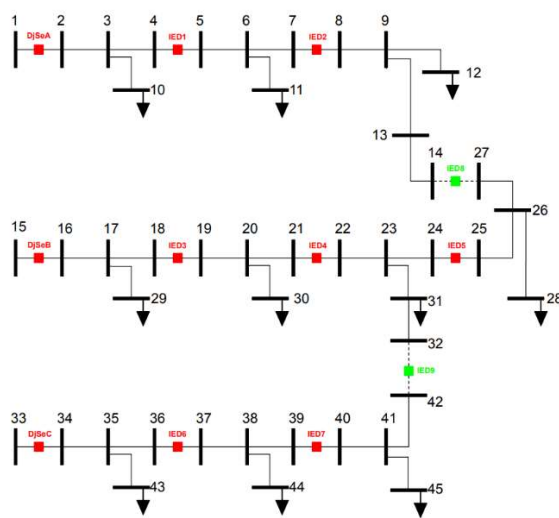


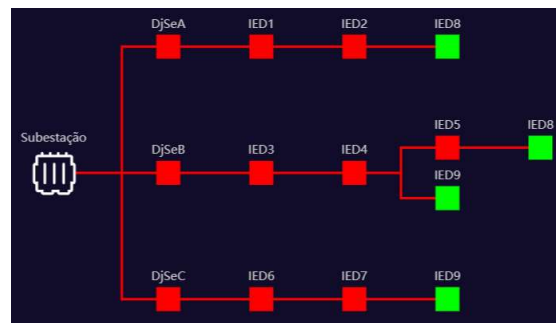
Figura 7: Fluxograma completo da lógica SH

3.0 RESULTADOS

Para avaliar o desenvolvimento, os resultados foram divididos em 3 agrupamentos de testes. Os dois primeiros relacionados ao obtido com a aplicação da lógica de SL e SH, e o terceiro relacionado ao tempo de comunicação do sistema LTE da solução. O sistema de testes para avaliação da lógica de SL e SH é apresentado na Figura 8, onde a Figura 8 (a) traz uma visão do geral do sistema e a Figura 8 (b) apresenta a visão do diagrama unifilar do sistema obtido pela plataforma SCP do mesmo circuito de testes. Este sistema contempla 3 circuitos alimentadores de operação radial com interconexões realizadas por meio de Religadoras de Recurso (RR) em estado Normalmente-Aberto (NA). Os IEDs representados ao longo dos alimentadores representam Religadoras Automáticas (RA) com estado Normalmente-Fechado (NF).



(a): Representação do sistema testes



(b): Diagrama unifilar da plataforma SCP

Figura 8: Representação do sistema de testes

Para a análise da funcionalidade de Seletividade Lógica, os testes foram realizados no segundo circuito, onde estão presentes os IEDs 3, 4 e 5. Os testes de destaque da funcionalidade de Seletividade Lógica estão apresentados na Tabela 1, onde é mostrado a porcentagem de corrente, em relação ao pick-up configurado, para cada IED. O indicador "A" aponta os dispositivos que apresentaram alarme de sobrecorrente, que é responsável por iniciar o processo de seletividade.

Tabela 1: Casos de testes para Seletividade lógica

| Circuito | IED | Pré- Status | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | Caso4 |
|----------|-------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 2 | Dsj-B | Fechado | Dsj | Dsj | Dsj | A – 110% |
| | 3 | Fechado | A – 110% | A – 110% | A – 110% | 60% |
| | 4 | Fechado | A – 110% | A – 110% | 60% | 60% |
| | 5 | Fechado | A – 110% | 60% | 60% | 60% |

Os resultados obtidos para os casos estudados são apresentados na Tabela 2. Percebe-se que, para cada uma das situações apresentadas, o equipamento que apresentou alarme de sobrecorrente mais à jusante foi o que atuou. Enquanto isso, os equipamentos à montante tiveram a proteção bloqueada durante o tempo de processamento, ou seja, a proteção foi impedida de atuar para os equipamentos que não se relacionaram diretamente com a falta.

Tabela 2: Resultados dos casos de Seletividade lógica

| Circuito | IED | Pré- Status | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | Caso4 |
|----------|-------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 2 | Dsj-B | Fechado | Bloqueado | Bloqueado | Bloqueado | Abertura |
| | 3 | Fechado | Bloqueado | Bloqueado | Abertura | Fechado |
| | 4 | Fechado | Bloqueado | Abertura | Fechado | Fechado |
| | 5 | Fechado | Abertura | Fechado | Fechado | Fechado |

Para a análise da lógica de Self-Healing, o sistema da Figura 8 é utilizado integralmente com suporte das chaves NA para reestrutura da rede. Os testes de destaque do SH são apresentados na Tabela 3, representando 8 casos. Em cada coluna relacionada a um caso, descreve-se o carregamento dos IEDs antes da falta e indica qual IED foi sensibilizado pela falta. Os indicadores de falta F(aj) representa uma falta identificada à jusante, enquanto que uma indicação F(am) relaciona uma falta a montante do dispositivo destacado.

Tabela 3: Casos de testes do Self-Healing

| Dados Ckto | | | Transferência Direta | | | Transferência Indireta | | | SE | N Cktos |
|------------|-------|------------|----------------------|--------------------|--------------------|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Ckt | IED | Pré Status | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | Caso 4 | Caso 5 | Caso 6 | Caso 7 | Caso 8 |
| 1 | dsj-A | Fechado | dsj | dsj | dsj | F(aj) - dsj | dsj | dsj | dsj | dsj |
| | 1 | Fechado | 80% | 65% | 70% | 50% | 25% | 35% | 80% | 75% |
| | 2 | Fechado | 60% | 60% | 60% | 30% | 20% | 20% | 60% | 60% |
| 2 | dsj-B | Fechado | dsj | dsj | dsj | dsj | dsj | dsj | F(am) - dsj | F(am) - dsj |
| | 3 | Fechado | F(aj) - 75% | F(aj) - 75% | F(aj) - 75% | 80% | 50% | 50% | 60% | 50% |
| | 4 | Fechado | 60% | F(aj) - 60% | F(aj) - 70% | 40% | 20% | 20% | 25% | 33% |
| | 5 | Fechado | 30% | 30% | F(aj) - 30% | 30% | 10% | 10% | 13% | 17% |
| 3 | dsj-C | Fechado | dsj | dsj | dsj | dsj | F(aj) - dsj | F(aj) - dsj | dsj | dsj |
| | 6 | Fechado | 35% | 40% | 60% | 5% | 50% | 50% | 35% | 58% |
| | 7 | Fechado | 30% | 35% | 30% | 8% | 20% | 20% | 25% | 25% |
| 1-2 | 8 | Aberto | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| 2-3 | 9 | Aberto | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |

Os resultados obtidos em cada caso da Tabela 3, são apresentados na Tabela 4. Estes resultados são melhores entendidos segregando-os em: caso de Transferência direta, onde uma falta na rede é suprida pelo alimentado imediatamente adjacente à falta; caso de Transferência Indireta, onde uma falta é suprida pelo alimentados além do imediatamente adjacente à falta; caso de falta na Subestação (SE), onde a falta se encontra à montante dos alimentadores; e caso de N circuitos, onde uma falta é suprida por dois alimentadores adjacentes.

Tabela 4: Resultado dos casos de Self-Healing

| Dados Ckto | | | Transferência Direta | | | Transferência Indireta | | | SE | N Cktos |
|------------|-----|------------|----------------------|----------------|---------------|------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Ckt | IED | Pré Status | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | Caso 4 | Caso 5 | Caso 6 | Caso 7 | Caso 8 |
| 1 | 1 | Fechado | Fechado | Fechado | Fechado | Aberto | Fechado | Fechado | Fechado | Fechado |
| | 2 | Fechado | Fechado | Fechado | Fechado | Fechado | Fechado | Fechado | Fechado | Fechado |
| 2 | 3 | Fechado | Aberto | Fechado | Fechado | Fechado | Fechado | Fechado | Aberto | Aberto |
| | 4 | Fechado | Aberto | Aberto | Fechado | Aberto | Aberto | Fechado | Fechado | Fechado |
| | 5 | Fechado | Fechado | Aberto | Aberto | Fechado | Fechado | Aberto | Fechado | Aberto |
| 3 | 6 | Fechado | Fechado | Fechado | Fechado | Fechado | Aberto | Aberto | Fechado | Fechado |
| | 7 | Fechado | Fechado | Fechado | Fechado | Fechado | Fechado | Fechado | Fechado | Fechado |
| 1-2 | 8 | Aberto | Aberto | Fechado | Aberto | Fechado | Fechado | Aberto | Aberto | Fechado |
| 2-3 | 9 | Aberto | Fechado | Aberto | Aberto | Fechado | Fechado | Fechado | Fechado | Fechado |

Nos 3 primeiros casos relacionados a Transferência direta, o algoritmo de SH atuou de maneira adequada, isolando a falta e recuperando a rede com alimentadores imediatamente adjacentes. No caso 1, a falta foi isolada abrindo os IEDs 3 e 4, e foi reestruturado a rede fechando o IED 9. Neste caso, a opção do IED 8 para socorrer a rede resultaria em sobrecarga do alimentador que estaria socorrendo a rede e poderia causar efeito cascata na atuação da proteção nestes alimentadores. No caso 2, a melhor opção avaliada corretamente pelo algoritmo foi o fechamento da IED8. Já o caso 3 resultou em impossibilidade de reestrutura da rede, sendo assim, o SH não atuou na reestrutura da rede e apenas isolou a falta.

O segundo grupo de casos de testes considerou cenários em que seria necessário a transferência indireta. No caso 4, a falta entre o disjuntor e o IED1 resultou na abertura deste e no fechamento dos IEDs 8 e 9. Como consequência, o IED 4 apresentou comando de abertura para evitar situação de paralelismo permanente de circuitos. O caso 5 trouxe resultados semelhantes ao caso 4, porém com o isolamento da falta no IED 6. Já o caso 7 a restituição da rede teve que ser realizada com corte de carga, ou seja, mesmo com a possibilidade de suporte de 2 alimentadores adjacentes, nenhum foi capaz de suprir toda a rede e, em consequência, a sistema isolou a falta

abrindo o IED 6 e promoveu desligamento das cargas entre o IED 6 e o IED 7 com a abertura do IED 7 e reposição de cargas com fechamento do IED 9.

Considerando falta em uma barra da subestação, o algoritmo se comportou corretamente abrindo apenas o IED 1 e recuperando a rede com o fechamento do IED 9. O último cenário apresentado, caso 8, se relaciona a uma falta que resultou em corte de carga e necessitou do suporte dos dois alimentadores adjacentes simultaneamente. Nesta situação, a falta foi isolada com a abertura do disjuntor e corte de carga entre o disjuntor e o IED 4. A restituição da carga se deu parcialmente com o fechamento do IED 8, suprindo as cargas a jusante do IED 5, e com o fechamento do IED 9, suprindo as cargas entre o IED 4 e o IED 5.

O terceiro agrupamento de testes, relacionado ao sistema de comunicação LTE, contemplou o envio de pacotes de dados de diferentes tamanhos, resultando na Tabela 5. Para cada caso, foram enviadas 60 mensagens em duas APNs distintas por região de acordo com os tamanhos descritos em cada coluna da tabela, e abstraiu-se os valores de tempo mínimo, máximo, médio e as perdas de dados.

Tabela 5: Testes de comunicação LTE (4G)

| APN | APN 1 (região SP) | | | | APN 2 (região RJ) | | | |
|--------|-------------------|---------|----------|---------|-------------------|----------|----------|----------|
| Bytes | 64B | 256B | 512B | 1024B | 64B | 256B | 512B | 1024B |
| Min | 20 [ms] | 24 [ms] | 28 [ms] | 28 [ms] | 32 [ms] | 40 [ms] | 40 [ms] | 40 [ms] |
| Média | 24 [ms] | 30 [ms] | 34 [ms] | 31 [ms] | 39 [ms] | 48 [ms] | 46 [ms] | 57 [ms] |
| Máx | 40 [ms] | 64 [ms] | 292 [ms] | 92 [ms] | 252 [ms] | 244 [ms] | 144 [ms] | 812 [ms] |
| Perdas | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Os resultados da comunicação LTE mostraram que o limite de dados para garantir o tempo da seletividade lógica é de 256B, onde se obtém tempo máximo de 64ms, considerando a região de SP. Para a região de RJ, não foi encontrado indicadores confiáveis de tempo com a tecnologia atual LTE (4G) com as APNs testadas. Contudo, vale destacar que avanços na tecnologia 5G já sendo considerados por várias operadoras telefônicas no Brasil, melhorará este tempo em todas as regiões de 5G, tornando a solução aqui apresentada ainda mais confiável.

Durante a execução dos algoritmos da solução apresentada, o tempo máximo obtido do processo computacional foi de 0,8ms para o sistema teste apresentado e 0,84ms para o caso de uma subestação real da concessão da ENEL/SP.

4.0 CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma solução baseada em Edge Computing para aplicação de lógicas de proteção como a proteção adaptativa, seletividade lógica e self-healing. O foco de apresentação se dá nas filosofias de seletividade lógica e *self-healing*, uma vez que estas apresentam aspectos críticos para o desenvolvimento. Com a nomenclatura de *Smart Grid Gateway*, SGG, a solução visa a atuação no sistema elétrico de maneira inteligente e diretamente em campo. A inteligência é concentrada no Sistema Central de Proteção, SCP, enquanto que o hardware fisicamente instalado em campo realiza análises locais e atua com determinação do SCP.

Para que o sistema atue adequadamente, o tempo de comunicação é a questão crítica principalmente para a questão da lógica de seletividade lógica. Para os testes realizados, verificou resultados que viabilizam a solução para a região de São Paulo com transferência de dados de até 256B. No entanto, a inclusão de 5G terá potencial de expandir a solução para qualquer região do país que contemplar esta tecnologia. Ademais, o tempo de processamento computacional dos algoritmos resultou em valores menores que 0,84ms para uma rede completa real da ENEL/SP.

Em termos das lógicas testadas, a seletividade lógica foi coerente com todos os casos de testes, isolando a falta detectada de modo inteligentemente seletivo e sem contar com a cronologia da proteção, finalizando sua performance em até 200ms. Semelhantemente, a lógica de *self-healing* implementada trouxe reestrutura da rede após isolamento da falta de modo a satisfazer todas as restrições operacionais e prover corte de carga de maneira inteligente para que o menor número de consumidores fique sem o serviço da distribuidora de energia elétrica.

5.0 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do setor elétrico, regulamentado pela ANEEL e pela Enel Distribuição São Paulo, pelo apoio financeiro ao projeto. Este trabalho está relacionado ao projeto "Rede Inteligente Subterrânea" sob PD-0390-1080 / 2017 ANEEL

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Hossein Motlagh, N., Mohammadrezaei, M., Hunt, J., & Zakeri, B. (2020). Internet of Things (IoT) and the Energy Sector. *Energies* (Basel), 494.
- (2) Horowitz, S. H. (1925- / 4th ed. / 2014). *Power system relaying*. Chichester, West Sussex: John Wiley and Sons.
- (3) Z Q Bo, M. H. (2009). A centralized protection scheme based on combined positional protection techniques. 2009 IEEE Power Energy Society General Meeting, 1-6.

- (4) Wang, Y., Lin, W., Zhang, T., & Ma, Y. (2012). Research on application and security protection of Internet of Things in Smart Grid. IET International Conference on Information Science and Control Engineering 2012 (ICISCE 2012), 1-5
- (5) E. Purwar, D. N. (Jan. de 2019). "A Novel Constraints Reduction-Based Optimal Relay Coordination Method Considering Variable Operational Status of Distribution System With DGs. IEEE Transactions on Smart Grid, pp. 889-898. doi:10.1109/TSG.2017.2754399
- (6) Lopes, V. F. (July de 2020). Dynamic Adaptive Protection based on IEC 61850. IEEE Latin America Transactions, pp. 1302-1310. doi:10.1109/TLA.2020.9099773
- (7) M. A. F. Boaski, M. S. (2017). Methodology for coordination and selectivity of protection devices with reliability assessment. 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC).
- (8) Josken, J. M. (2013). Implementing a self-healing system on an electric distribution system. IEEE Rural Electric Power Conference (REPC). doi:10.1109/REPCon.2013.6681846
- (9) R. Guo, C. Q. (2016). Implementing self-healing distribution systems via fault location, isolation and service restoration. IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE).
- (10) G. H. S. Costa, B. A. Pacheco, M. A. I. Martins and R. O. Brandão, "Adaptive Protection System Using Neutral Currents Studies and Load Estimation," 2020 Intermountain Engineering, Technology and Computing (IETC), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/IETC47856.2020.9249114.

DADOS BIOGRÁFICOS



Graduado em Engenharia Elétrica, Mestre em Sistemas de Proteção de Microrredes pela Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Atuou em projetos de pesquisas nas áreas de eletromagnetismo, manutenção preditiva de geradores em termelétricas, e segurança da operação da rede elétrica. Atualmente, atua como pesquisador no centro de pesquisa Fundação CERTI, coordenando projetos de inovação em sistemas proteção da rede de distribuição, digitalização da rede elétrica, segurança das equipes de trabalho do setor elétrico e digitalização de processos operacionais de campo.

(2) JOÃO PAULO ASSUNÇÃO DE SOUZA
Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Ouro Preto e mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais. Já atuou como professor no departamento de engenharia elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto. Atualmente é pesquisador na Concert Technologies, atuando em projetos de P&D aplicados no planejamento e operação de sistemas elétricos de potência. Suas áreas de interesse incluem modelagem e simulação de sistemas elétricos com ênfase em sistemas de distribuição com recursos energéticos distribuídos, smart grids, otimização e inteligência artificial aplicadas a engenharia elétrica.

(3) RODRIGO LIMA DE ARAÚJO
Engenheiro de Controle e Automação, graduado pela UFMG, Analista de Software no departamento de Pesquisa e Desenvolvimento da Concert Technologies tenho experiência com tecnologias de desenvolvimento de software e desenvolvimento ágil. Meus principais interesses envolvem Inteligência Artificial, Sistemas de Energia Elétrica, Programação em geral.

(4) DANIEL FILGUEIRAS
Formado em Ciência da Computação pela PUC/SP e Pós-Graduado pelo SENAC. Tenho mais de 19 anos de experiência na área atuando como Gerente de Projetos, Coordenador, Projetista e Desenvolvedor de Software. Como coordenador trabalhei elaborando propostas técnicas, gerenciando cronogramas e estimando custo de desenvolvimento. Projetei e desenvolvi software de alta escalabilidade e disponibilidade. Formação Acadêmica Graduação: Ciência da Computação - Pontifícia Universidade Católica, PUC/SP - 2001 Pós-graduação lato sensu: Tecnologia de Objetos - SENAC/SP - 2004 Experiência Profissional - ELETROPAULO/ENEL - 2017 a atualmente-V2COM - 2005 a 2017-SEAL - 2000 a 2004

(5) KENNEDY ALVES MARTINS
Graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica, MBA em Gestão de Tecnologia da Informação. Iniciei minha carreira profissional como técnico em eletrônica na área de assistência técnica para dispositivos de proteção, automação e telecomunicações, posteriormente trabalhei como engenheiro de desenvolvimento de dispositivos de proteção e controle para o setor de distribuição de energia, então na Eletropaulo trabalhei como gerente técnico em diversos projetos de modernização de redes de distribuição, e, há 7 anos trabalho com a definição, avaliação e

homologação de dispositivos Smart Grid, e atualmente sou responsável pelo Telecontrole das Aplicações de Campo & Cyber Security na ENEL Brasil.

(6) **MARCOS AURELIO IZUMIDA MARTINS**
Possui graduação, mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina. Atuou como engenheiro projetista da empresa Reivax - Automação e Controle. Atuou também como coordenador técnico na empresa Toshiba Infraestrutura America do Sul Ltda. Atualmente é gerente técnico na Fundação CERTI, responsável pelo gerenciamento dos projetos de implantação de redes elétricas inteligentes e mobilidade elétrica para diversas distribuidoras de energia elétrica no Brasil, através do programa de P&D ANEEL. Outras atividades realizadas nos últimos anos foram dedicadas a capacitação técnica nas áreas de energia solar fotovoltaica, redes elétricas inteligentes e gestão ágil de projetos.

(7) **HAMILTON GUILHERME BUENO DE SOUZA**
Formação Acadêmica Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: Mestrado em Sistemas de Potência (2007). Universidade Paulista: Graduação em Engenharia Elétrica-Eletrotécnica (1999). Experiência Profissional na Eletropaulo Metropolitana: Engenheiro desde Jul/2000: Estudos e análise em sistemas de proteção (subtransmissão e distribuição); Projetos de Energy Storage; Homologação de equipamentos de proteção; Gestão de sistemas self-healing; Projetos e estudos sistemas Volt-Var; Gerência de projetos P&D: Diagnóstico do Sistema de Proteção da Eletropaulo (Enerq); Sistema Detector de Falhas de Alta Impedância (USP); Melhoria da Qualidade de Energia pela Otimização de Sistemas de Aterramentos (Daimon); Coordenação de Isolamento na Distribuição (EFEI – Itajubá)

(8) **FELIPE THOMAZI MOREIRA**
Estudante de Engenharia Elétrica, na Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, com enfoque em Sistemas de Energia. Estagiário de Engenharia no departamento de Pesquisa & Desenvolvimento na Concert Technologies, com experiência em desenvolvimento de algoritmos de proteção relacionados ao Sistema Elétrico. A operação e confiabilidade dos sistemas de energia é a área de maior interesse.