XXIII SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

AB/XXX/YY
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

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

OS REQUISITOS E AS DIFICULDADES DOS ENSAIOS EM RELÉS DE DISTÂNCIA DE ACORDO COM A NOVA NORMA IEC 60255-121

Paulo Sergio Pereira Junior(*)
Conprove Indústria e Comércio

Gustavo Silva Salge
Conprove Indústria e Comércio

Cristiano Moreira Martins
Conprove Indústria e Comércio

Paulo Sergio Pereira
Conprove Engenharia

Gustavo Espinha Lourenço
Conprove Engenharia

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo discorrer sobre as principais definições da norma IEC 60255, especialmente a parte 121 que trata sobre a função 21/PDIS e apresentar uma nova ferramenta, constituída de hardware e software, com grande capacidade para testes e simulações, englobando inclusive os ensaios da norma.

Exemplificando o que dita a IEC 60255, serão realizados testes em um relé comercial, visando ratificar a importância da realização de ensaios e demonstrar as soluções desenvolvidas. Os ensaios serão realizados utilizando um IED Siemens 7SA, a mala de teste CE-7024 e os softwares desenvolvidos pela Conprove.

PALAVRAS-CHAVE

IEC 60255-121, PS Simul, Proteção, Distância, PDIS, Teste de Tipo, Testes e Comissionamento

1.0 - INTRODUÇÃO

O sistema interligado nacional (SIN), que devido ao seu grande porte pode ser considerado único em âmbito mundial, é um exemplo de interligação entre várias unidades geradoras, o que possibilita aproveitar melhor a sazonalidade do período chuvoso e de permutar os excedentes de energia elétrica durante o período das cheias em cada região. Porém para que a interligação seja eficaz, o fornecimento de energia se mantenha e os equipamentos elétricos sejam preservados, é indispensável que os dispositivos de proteção estejam funcionando corretamente. Para isso, os equipamentos devem passar por uma série de testes antes de serem colocados em serviço.

A realização de testes em equipamentos de proteção é de suma importância para o bom funcionamento do sistema elétrico de potência uma vez que qualquer não atuação ou atuação indevida, dependendo da localização e das condições de carga no momento, pode acarretar em desligamentos em cascata levando a um colapso do sistema. Tendo em vista o custo das unidades geradoras e o impacto econômico causado por interrupções no fornecimento, nota-se a importância de equipamentos para avaliação do desempenho dos IEDs mediante situações reais de defeito.

Os primeiros dispositivos de proteção que existiam eram rústicos, construídos por uma combinação de bobinas, molas, amortecedores, contatos, entre outros, sendo sua atuação dependente tanto da parte elétrica quanto da parte mecânica, por isso foram denominados de eletromecânicos. Com a evolução tecnológica os relés de proteção passaram a utilizar mais componentes eletrônicos em sua concepção, principalmente os transistores, por esse motivo eram comumente chamados transistorizados, mas foram popularmente denominados como estáticos. A terceira geração de relés, os microprocessados, surgiu com o advindo das novas técnicas de processamento de sinais e são equipamentos com alta precisão, rapidez e robustez.

(*) Rua Visconde de Ouro Preto, n° 75 – CEP 38.405-202 Uberlândia, MG, – Brasil
Tel: (+55 34) 3218-6800 – Fax: (+55 34) 3218-6810 – Email: conprove@conprove.com.br

Com esta crescente evolução das técnicas de processamento digital aplicadas à dispositivos de proteção, estes passaram a contemplar funções mais complexas, o que encadeou em modificações nos requisitos de testes. Todas essas modificações levaram o IEC a revisar uma série de normas pertinentes a relé e em especial as partes relacionadas aos testes visando especificar os requisitos mínimos para avaliação funcional dos IED's e a sua correta documentação.

2.0 - NORMA IEC 60255

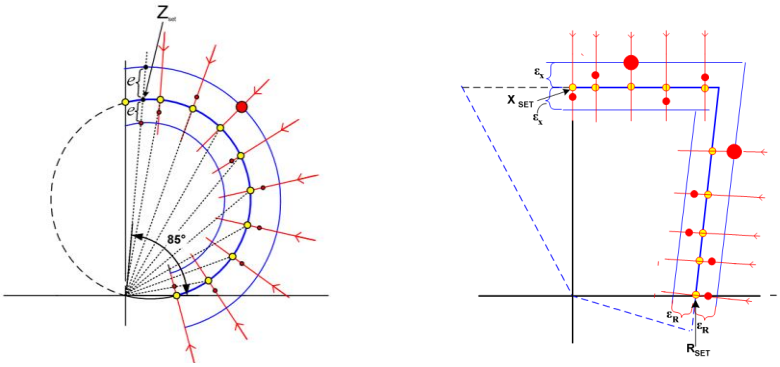
O conjunto de normas IEC 60255 define os requisitos gerais para os relés e equipamentos de proteção, além de definir as exigências de avaliação para algumas funções de proteção: sobre/subcorrente, sobre/subtensão, térmica, diferencial e distância. A parte 121 da norma, escopo de estudo deste artigo, trata sobre função 21/PDIS, incluindo as suas especificações, características de medição, seleção de fase, direcionalidade, partida e tempo de operação.

A IEC 60255-121 prevê que, para a correta avaliação dos IEDs, devem ser realizadas verificações de precisão da característica através de testes estáticos e também testes dinâmicos de desempenho. Dessa forma, a norma define também os fatores de influência que afetam a precisão em condições de regime permanente (testes estáticos) e o desempenho durante condições transitórias (testes dinâmicos), tais como: saturação de TCs, harmônicos, variações de frequência, etc.

A norma define todas as metodologias e procedimentos para realização de testes de tipos por parte dos fabricantes de tal forma a padronizar os resultados, permitindo assim a comparação das analises entre fabricantes distintos. Os testes da norma não são limitados apenas aos fabricantes e podemos extrapolar a aplicação da norma pelo usuário final em alguns casos, dentre os quais se destacam a alteração de firmware e a aquisição de um novo relé. Quando um IED novo (modelo ou fabricante) é adquirido, por não se conhecer o funcionamento e a precisão do mesmo, recomenda-se que os testes de tipo definidos na IEC 60255 sejam aplicados para a sua validação. Atualmente os relés são praticamente computadores que rodam um software embarcado (firmware), o qual contém toda a programação do dispositivo. Ao alterar o firmware, o IED torna-se praticamente um novo dispositivo, por esse motivo, o mesmo também deve ser ensaiado conforme a definição da norma.

2.1 Testes Estáticos

Os testes estáticos visam medir a precisão inerente do formato da característica para todas as zonas de operação em condições estáticas, sem o objetivo de verificar o desempenho do IED em condições transitórias. Para esta metodologia de teste, faz-se necessário um profundo conhecimento das parametrizações e da característica do IED.



(a) (b)

FIGURA 1 – (a) Testes Estáticos Mho; (b) Testes Estáticos Quadrilateral

2.2 Testes Dinâmicos

Os testes dinâmicos averiguam a resposta da proteção diante de várias condições do sistema de potência verificando o desempenho em situações reais/transitórias. O teste diante de situações reais faz com que não seja necessário o conhecimento aprofundado da característica do IED, pois o importante neste tipo de teste é a atuação correta e não a verificação da sua precisão. Com essa metodologia de teste apresentada pela norma, é possível comparar o desempenho da proteção de diferentes fabricantes, desde que os resultados estejam documentados de acordo com a definição da norma.

A norma define diversos testes transitórios, diferenciando testes para linhas curtas, linhas longas, linhas paralelas, topologias com TP capacitivo, influências harmônicas e variações de frequência. Para cada uma dessas topologias são definidas diferentes etapas de teste e maneiras de apresentação de resultados. Neste trabalho, serão

apresentados os resultados de simulações transitórias de sobrealcance para uma linha curta aplicadas à um IED comercial Siemens 7SA.

Para que os testes dinâmicos sejam realizados corretamente, faz-se necessário a modelagem do sistema elétrico em algum simulador digital, de tal forma a reproduzir com fidelidade os sinais de tensão e corrente durante um defeito real.

3.0 - SOLUÇÕES PARA TESTES DA NORMA IEC 60255-121

Os testes transitórios são os que mais se aproximam da realidade, desde que o sistema em estudo seja modelado criteriosamente. Para que esta modelagem e os testes dinâmicos sejam realizados com sucesso, deve-se utilizar um simulador digital que esteja apto a trabalhar com diversos modelos fiéis de componentes do sistema elétrico de tal forma a simular os transitórios eletromagnéticos.

Existem vários softwares de simulação capazes de realizar os testes transitórios tais como ATP, EMTP, etc. Todavia, a realização das simulações nestes programas mencionados ou similares, apresenta vários desafios pois existem averiguações descritas na norma que requerem milhares de condições de teste com variações de diversos parâmetros do sistema tais como: impedância da fonte, local da falta, ângulo da falta e tipo de falta, sendo necessária a automação dos testes para garantir a reprodutibilidade e confiabilidade dos mesmos.

Para viabilizar estes testes em softwares existentes no mercado demandaria muito tempo, organização e esforço, pois o usuário deveria executar cada um dos casos salvando-os em arquivos para posteriormente reproduzir cada um dos arquivos separadamente em um programa específico com a finalidade de injetar as correntes e tensões oriundas da simulação no IED e, somente após esse processo, organizar e combinar as respostas de cada teste visando apresentar os resultados conforme descrito na norma. Todo esse procedimento deve ser realizado com a máxima cautela e atenção, pois o desempenho do IED pode ser condenado caso ocorra algum erro durante a realização das seguintes etapas:

- Modelagem do sistema elétrico em uma ferramenta de simulação digital;
- Armazenamento dos sinais digitais provenientes da simulação em um arquivo, normalmente um arquivo no formato COMTRADE (Exportação);
- Importação do arquivo transitório em uma mala de testes apta a geração desses tipos de arquivo;
- Reprodução das formas de onda do arquivo;
- Repetição da reprodução por N vezes.

Por utilizar vários softwares de fabricantes distintos e durante os procedimentos necessitar de inúmeras exportações e importações para a troca de arquivo entre as diferentes aplicações, essa metodologia torna-se desvantajosa. Outra dificuldade do método é que para a interpretação dos resultados é necessário outra aplicação. Diante de tudo explicado anteriormente, o tempo é o grande “vilão” do procedimento, tornando-o inviável.

Além disso, nesse tipo de procedimento as tensões e correntes de teste não são influenciadas pelo comportamento do relé (teste em malha aberta) não sendo possível a modificação das grandezas dinamicamente, portanto, não permite que condições iterativas sejam analisadas.

Visando suprir todas as desvantagens apresentadas ateriormente e aprimorar as funcionalidades dos softwares mencionados, a Conprove desenvolveu um software de simulação transitória, capaz de automatizar os testes da norma IEC 60255-121, denominado PS Simul. A solução criada comunica-se com o novo hardware desenvolvido, o testador universal CE-7024, que reproduz os sinais simulados no IED e aquisiciona os sinais de trip, os quais são utilizados para interagir com o software.

3.1 Software – PS Simul (Power System Simulator)

O software desenvolvido, PS Simul, dispõe dos mais avançados recursos na simulação de transitórios eletromagnéticos, eletromecânicos e sistema de controle, possuindo uma interface amigável e intuitiva que facilita a montagem de projetos e análise de resultados. A solução permite que o usuário modele qualquer sistema de potência e/ou controle para simulação disponibilizando diversos modelos de dispositivos do sistema, inclusive vários destes não contemplados por nenhum outro software de simulação transitória. Além de simular, o PS Simul permite também a reprodução/aquisição dos sinais no hardware desenvolvido pela Conprove.

O PS Simul utiliza a integração trapezoidal para resolução das equações diferenciais e possui um grande benefício em relação aos outros simuladores digitais pelo fato de evitar oscilações numéricas em chaveamentos ao combinar o método de Euler com a integração trapezoidal.

O aplicativo permite ao usuário trabalhar e gerenciar variáveis globais, denominadas de constantes, que possibilitam a definição de um ajuste comum a vários blocos em um único ponto. Com esse recurso o usuário pode, por exemplo, definir a frequência de todas as fontes de seu sistema como uma constante e quando alterar o

valor dessa constante todas as fontes passarão a trabalhar com a nova frequência dentre outras inúmeras aplicações. O recurso de constantes permite também que sejam realizados testes múltiplos alterando uma ou mais constantes, ou seja, o usuário pode definir um loop para cada uma das constantes de tal forma a varrer uma infinidade de possibilidades. Ao configurar um loop, todos os resultados das simulações ficam armazenados podendo ser comparados, e também salvos em arquivo.

Dentre os diversos recursos do software, além dos já citados anteriormente, podemos destacar alguns deles, tais como, faltas em linhas de transmissão sem a necessidade de se dividir a mesma, curto entre espiras no transformador de maneira simples por permitir acesso aos enrolamentos, medições em todos os blocos de potência, avaliação de resultados, proteção de arquivos com senha, entrada de dados facilitada para os blocos, relatórios, geração em malha fechada com iteração entre outros.

O processo em malha fechada disponível no PS Simul, possibilita ao usuário modelar um sistema de tal forma que após a geração dos sinais um sinal aquisitado modifique a simulação, por exemplo, ao atribuir um sinal a um comando de abertura e fechamento de chaves ou em qualquer outro ponto que envolva lógicas digitais. Esse processo não acontece em tempo real e sim em sobreposições de etapas realimentando o circuito como pode ser analisado abaixo.

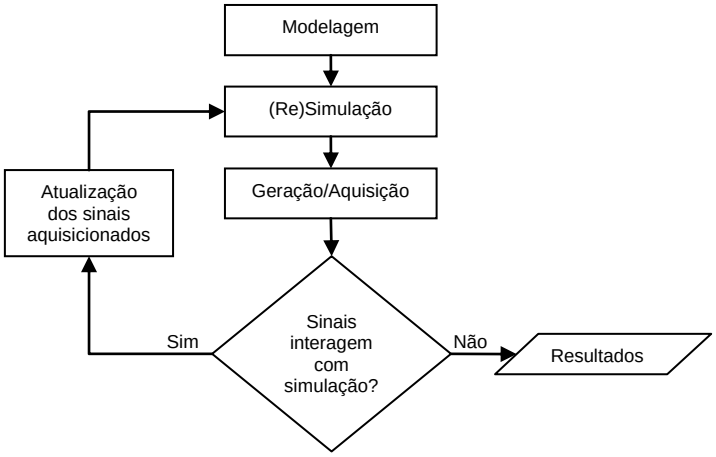


FIGURA 2 – Fluxograma simples da geração em malha fechada

Para modelar os circuitos a serem simulados são utilizadas as abas de Draft e Runtime. Na aba Draft é desenhado o esquema do circuito, barras, linhas, geradores, TCs, controles, etc. O Runtime é responsável por apresentar as formas de onda além dos mais variados tipos de gráfico, tais como: Trajetória de Impedância, Trajetória Idiff x Irest, Decomposição Harmônica em Gráfico de Barras, Fasores entre outos; dessa forma o usuário pode facilmente interpretar os resultados das simulações de forma mais visual. Na aba Runtime existem também componentes que permitem simular um painel de controle alterando os valores diretamente no circuito desenhado no Draft ou na lista de constantes.

Os testes de tipo definidos pela norma IEC 60255-121 podem ser realizados de maneira automática através de uma combinação de recursos disponíveis no PS Simul. O software pode ser aplicado em diversas outras funcionalidades, dentre as quais destacamos os estudos de descarga atmosférica, energizações de linhas e transformadores, partidas de motores, estudos de sobretensões, saturações de transformadores, eletrônica de potência, análise de distúrbios/oscilografia, estudos de qualidade de energia, tensões de reestabelecimento transitório, lógicas de controle entre outras.

3.2 Hardware

O hardware desenvolvido possui em uma mesma caixa 18 canais de corrente, podendo representar até 6 bays trifásicos ou 18 monofásicos, sendo que cada canal de corrente possui a capacidade de gerar 50A RMS e 500VA individualmente. O equipamento possui ainda mais 6 canais de tensão com 335V RMS e 100VA cada, capazes de serem agrupados em um único grupo monofásico de até 800A RMS e 2kV RMS, satisfazendo qualquer requisito de teste. Este produto é chamado CE- 7024 e faz parte da nova geração de testadores universais da Conprove.

Uma das grandes vantagens da utilização de fontes independentes é a possibilidade de se gerar o limite máximo de amplitude em todos os canais simultaneamente, independente do defasamento entre eles, permitindo também maior flexibilidade quando os canais são associados em série e/ou paralelo dependendo da necessidade circunstancial de cada teste.

Durante a realização dos testes da norma, verificou-se a necessidade de geração de correntes transitórias da ordem de 70A de pico, valor o qual em canais de geração com limites menores que 50A RMS é impossível de se

reproduzir. Como cada canal de saída do equipamento possui a capacidade de geração de 50A RMS podendo ser combinado em um sistema trifásico de 300A, todos os casos foram reproduzidos sem transtornos.

O equipamento permite também que os testes sejam realizados no universo da IEC61850, ou seja, enviando Sampled Values ao invés de reproduzir sinais analógicos e recebendo mensagens GOOSE ao invés do sinal de trip pelo cabeamento de cobre. Para isso o IED deve estar apto a receber sinais Sampled Values e a enviar mensagens GOOSE, ou seja, trabalhando na integra com o barramento de processos.

4.0 - TESTES EM LABORATÓRIO

Para a realização dos testes foram utilizados os softwares Distanc e PS Simul e a mala de teste modelo CE7024. A mala foi utilizada na geração de três tensões e três correntes, de forma a simular um sistema trifásico.

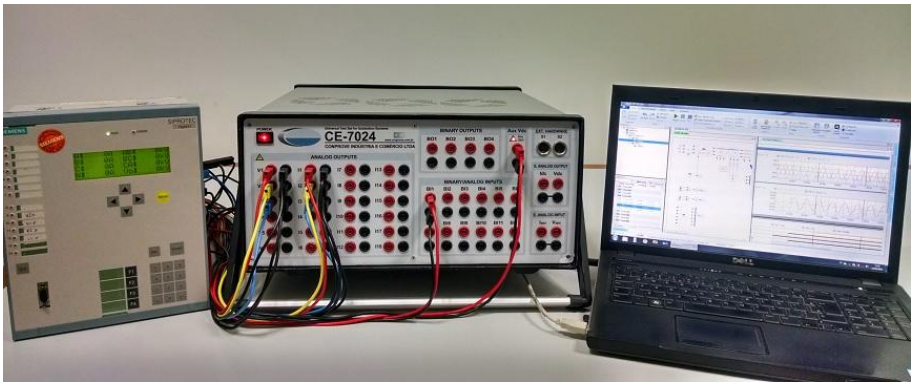
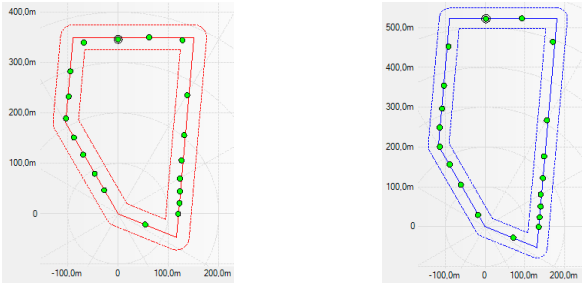


FIGURA 3 – Sistema testado: IED Siemens - 7SA, CE-7024 e PS Simul

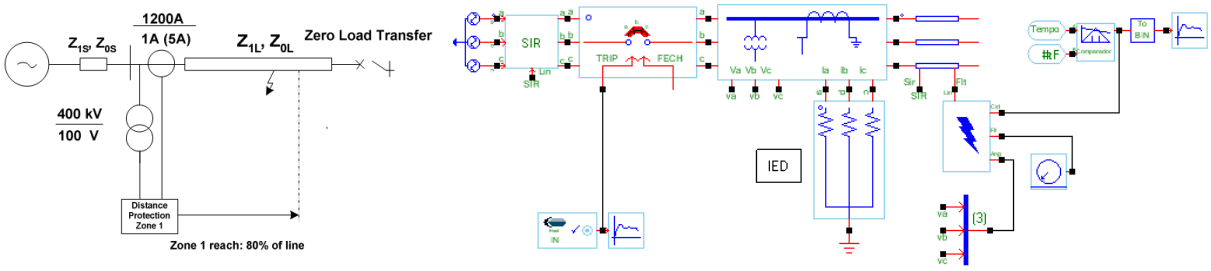
A análise da precisão do relé (estática) foi realizada para averiguar a caracteristica definida pelo fabricante utilizando o já consagrado software de testes da proteção de distância da Conprove. O detalhamento dos testes estáticos será suprimido tendo em vista que o foco principal do trabalho são os testes dinâmicos, porém segue abaixo os resultados dos testes de precisão no IED.



(a) (b)

FIGURA 4 – Testes de Precisão: (a) Zona 1; (b) Zona 2

Para avaliar a performace dinâmica do IED da Siemens 7SA, foram realizados testes considerando-se uma rede de alimentação radial com um disjuntor local fechado sem transferência de carga, conforme definido na norma e apresentado na figura abaixo.

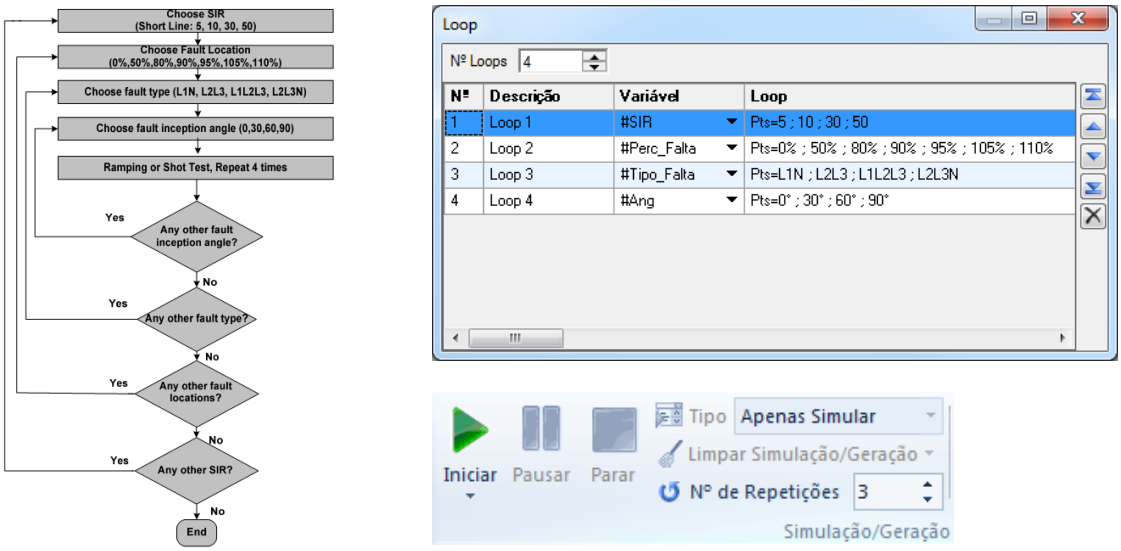


(a) (b)

FIGURA 5 – (a) Equivalente Norma; (b) Modelagem PS Simul

Para o estudo de caso apresentado foram realizados os testes de tempo de operação e sobrealcance transitório sem TPs capacitivos em conformidade com a norma (capítulo 6.3.2.2). Para esse caso em estudo, 1792 testes

foram realizados, pois para a modelagem proposta, deve-se variar a relação de impedância (SIR), o local da falta, o tipo de falta e o ângulo de inserção da falta, sendo que cada uma dessas combinações deve ser repetida 4 vezes. Para que todos esses casos fossem realizados de maneira automática no PS Simul, cada parâmetro a ser variado foi definido como uma constante e para essa constante foi definido um loop com os valores propostos na norma.



(a) (b)

FIGURA 6 – (a) Loop Norma; (b) Loop PS Simul

Ao final da simulação todos os resultados ficam disponíveis dentro do mesmo ambiente de trabalho facilitando a visualização e análise podendo também serem salvos em um mesmo arquivo. A imagem abaixo ilustra o resultado de um dos testes realizados.

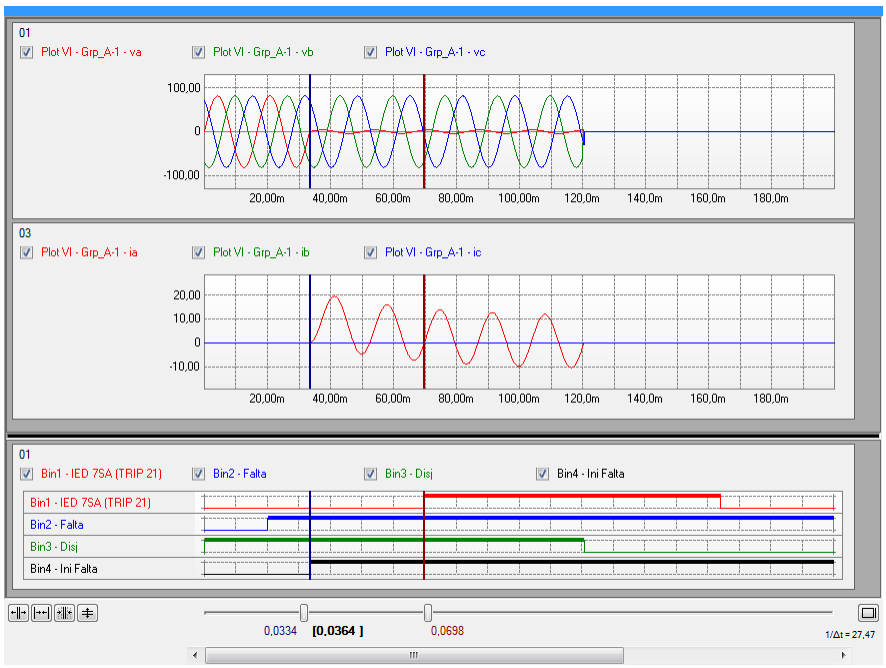


FIGURA 7 – Forma de Onda para: Falta L1N; SIR 10; Local 50%; Ang Falta 0°

A norma prevê que após a realização de todos os testes mencionados, de posse dos resultados, estes sejam apresentados em 3 gráficos para cada tipo de falta, totalizando neste caso, 12 gráficos pois é proposto que o teste seja realizado para 4 diferentes tipos de falta. Cada um dos gráficos deve conter um tempo de operação relacionado a um local de falta para as diferentes relações de impedância (SIR), ou seja, o total de curvas de cada gráfico é igual ao número total de relações de impedância (SIR) variadas. O tempo de operação deverá ser o tempo mínimo, médio e máximo encontrados, resultando portanto em 3 gráficos por tipo de falta. Abaixo são apresentados os resultados para a falta L1N.

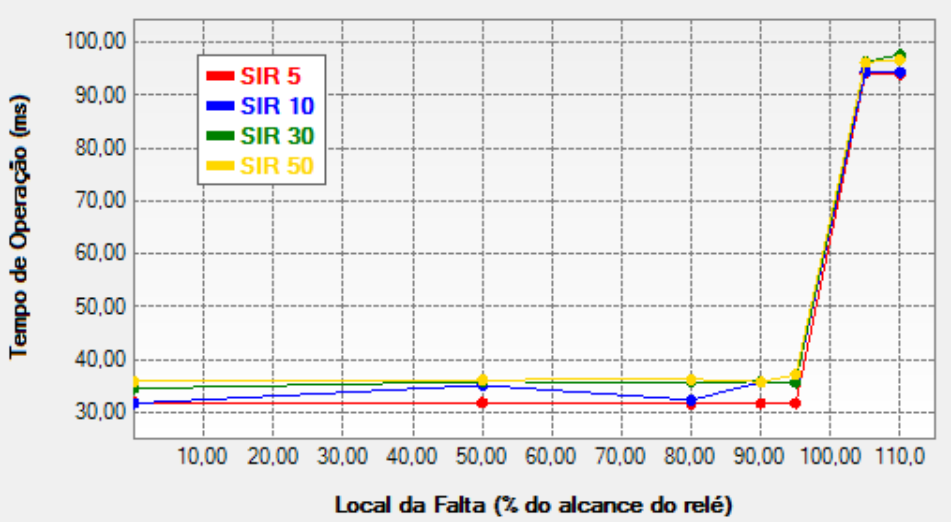


FIGURA 8 – Diagrama SIR para linha curta: tempo mínimo de operação (Falta L1N)

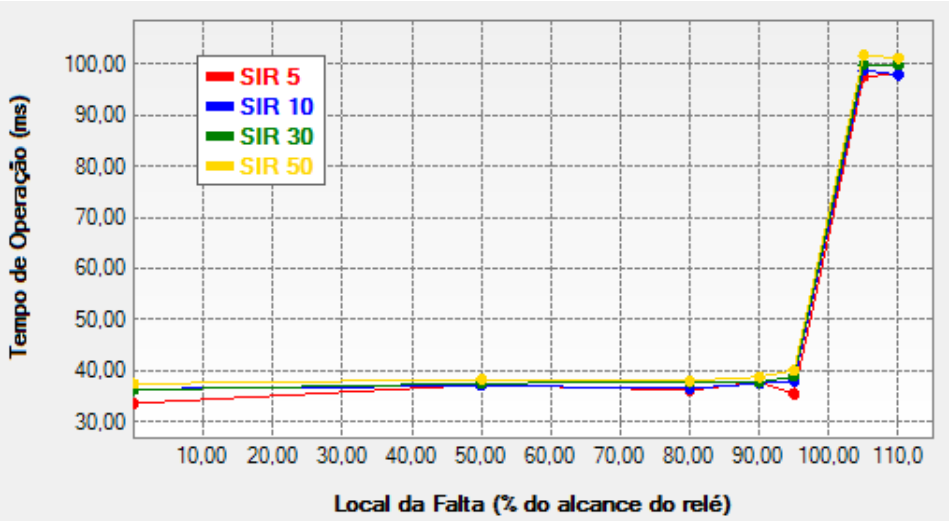


FIGURA 9 – Diagrama SIR para linha curta: tempo médio de operação (Falta L1N)

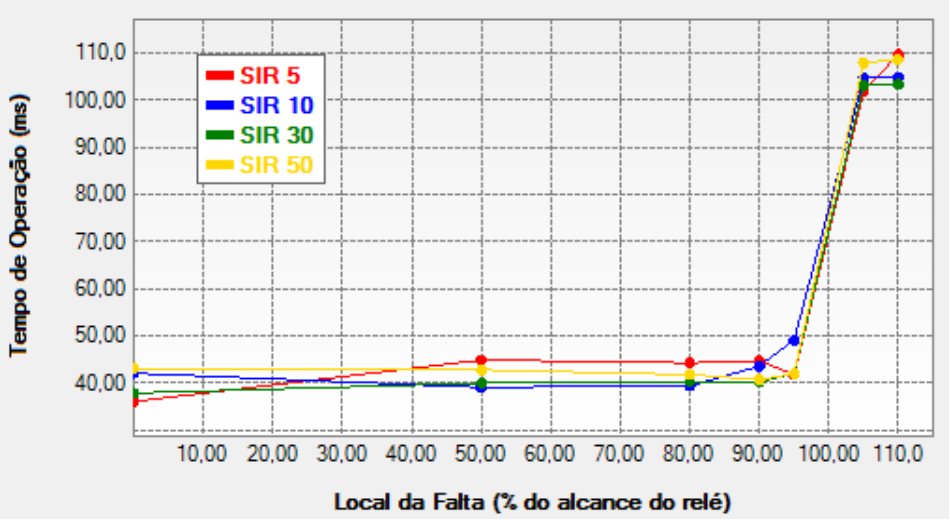


FIGURA 10 – Diagrama SIR para linha curta: tempo máximo de operação (Falta L1N)

Como pode ser visto pelos diagramas apresentados, o IED se comportou conforme esperado, ou seja, atuando de acordo o tempo parametrizado nas zonas de proteção e dentro das tolerâncias. As atuações acima do alcande da zona 1, ou seja, 100%, verificamos a atuação da zona 2.

O tempo total demandado para realização dos testes foi de 2h e 14min, incluindo simulação e geração dos sinais. Tendo em vista que foram gastas cerca de 2h e 30min para a modelagem do sistema e definição do escopo dos testes, totaliza-se aproximadamente um gasto de 5h para a realização de todo o procedimento descrito pela norma para linhas curtas no PS Simul. Tomando como base todas as etapas necessárias para a realização dos testes sem a utilização da ferramenta desenvolvida, estimamos que para a execução de cada teste e as suas repetições o usuário gaste em torno de 6min. Como são 448 testes (sem as 4 repetições pois foram consideradas nos 6min) totaliza-se um tempo de 44h e 48min que somado ao tempo da modelagem, considerado igual nos dois casos, chega-se a aproximadamente 47h.

A diferença entre as execuções mencionadas anteriormente é cerca de 42h, o que representa, se considerearmos 8h diárias de serviço, um pouco mais de uma semana de trabalho para um engenheiro e toda essa redução de tempo acaba, portanto, significando uma economida financeira. Com base nesses dados, a execução dos mesmos testes sem a ferramenta desenvolvida provocaria um aumento inviável de 940% no tempo total.

5.0 - CONCLUSÃO

Com o estudo, evidenciou-se a real necessidade de sistemas capazes de simular condições reais de defeito, possibilitando ao usuário modelar qualquer sistema de potência, variar parâmetros da simulação automaticamente realizando assim múltiplas simulações, além de reproduzir os sinais transitórios simulados e interagir com o IED. A solução desenvolvida mostrou-se capaz de realizar tais testes, proporcionando excelentes resultados.

Destaca-se para o sistema apresentado o seu automatismo na realização dos ensaios sem a necessidade de interferência humana nos testes, o que significa que as probabilidades de erro na execução dos mesmos caem drasticamente.

O tempo de execução dos testes é outro fator que ressalta a importância da ferramenta desenvolvida propiciando uma redução de aproximadamente 90% do tempo total demandado se comparado aos métodos antigos, ou seja, modelagem em um simulador digital, exportação de resultados, importação, reprodução dos sinais e armazenamento de resultados. Cada uma das etapas descritas anteriormente não é automatizada, ou seja, faz-se necessária interferência humana, o que significa que a automatização reduz a relação homem-hora, diminuindo consideravelmente o custo para a realização dos ensaios.

Para futuros trabalhos a sugestão é realizar os testes no universo da norma IEC 61850, comparando os resultados com os testes convencionais de todas as maneiras possíveis, ou seja, reproduzindo sinais analógicos e recebendo o sinal de trip por mensagens GOOSE, reproduzindo Sampled Values e recebendo o sinal de trip pelo cabeamento convencional e reproduzindo Sampled Values e recebendo o sinal de trip por mensagens GOOSE.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) IEC 60255-121: Measuring relays and protection equipment – Part 121: Functional requirements for distance protection

(2) Leitloff, V., Aupetit, S., Guibout, Ch., Jobert, M., Bertheau, Ch. Validation of Test Procedures for Generic Qualification of Distance Protections using a Real-Time Simulator; France.

(3) Pereira, P. S., Pereira Júnior, P. S., Martins, C. M., Salge, G. S., Lourenço, G. E. Requisitos, dificuldades e novas soluções para os testes de proteção diferenciais de barra; STPC 2014; Brasil.