XVIII ERIAC
DÉCIMO OITAVO ENCONTRO
REGIONAL IBERO-AMERICANO DO CIGRE

Foz do Iguaçu, Brasil

19 a 23 de maio de 2019

CE-NN

Comitê de Estudos B5 – Proteções e Automação

AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DE UMA PROTEÇÃO DE LINHA IMPLEMENTADA COM BARRAMENTO DE PROCESSO (IEC-61850-9-2) ATRAVÉS DE ENSAIOS EM MALHA FECHADA

P. S. P. Junior*
Conprove Indústria
Brasil

G. S. Salge
Conprove Indústria
Brasil

M. J. B. B. Davi
Conprove Indústria
Brasil

C. M. Martins
Conprove Indústria
Brasil

P. S. Pereira
Conprove Engenharia
Brasil

G. E. Lourenço
Conprove Engenharia
Brasil

Resumo *– Este trabalho objetiva apresentar uma experiência da utilização do barramento de processos (GOOSE e Sampled Values) na implementação de uma função de proteção diferencial de linha (87L). Durante a realização dos testes foi empregada uma ferramenta nacional com características operativas equivalentes às dos sistemas de simulação em tempo real, possibilitando que todas as etapas de avaliação dinâmica dos IED's fossem feitas. Todos os ensaios foram realizados em malha fechada incluindo, além dos testes no universo da norma IEC 61850, testes convencionais utilizando cabeamento rígido para envio e recebimento de sinais, para posterior comparação dos resultados obtidos.*

Palavras-chave: Diferencial de Linha - IEC 61850 - Sampled Values – GOOSE - Malha Fechada - PS Simul.

1 INTRODUÇÃO

A IEC 61850 está cada vez mais presente nas novas subestações e *retrofits* de antigas subestações ao redor do mundo. Este padrão, basicamente, define como enviar/receber informações de três diferentes formas: Cliente-Servidor, GOOSE (*Generic Object Oriented Substations Events*) e SV (*Sampled Values*). A comunicação de relatório (Cliente-Servidor) através de MMS (*Manufacturing Message Service*) e a troca de mensagens GOOSE, em alta velocidade, já estão consagradas e sendo amplamente utilizadas. Contudo, o tráfego de informação de corrente e tensão digitalizadas através da Rede Ethernet (*Sampled Values*) ainda é algo relativamente novo para os profissionais da área. A aplicação do Barramento de Processo (*Process Bus*) fascina alguns membros da comunidade e causa desconfiança a outros. Isto se deve justamente ao fato deste tópico da norma tratar de uma mudança de paradigma, o que significa abandonar o método tradicional, empregado há décadas, que utiliza tensões e correntes secundárias obtidas dos transformadores de instrumento.

Com sua primeira versão lançada em 2003, a norma IEC 61850 padroniza a troca de informações entre os diversos IED's (*Intelligent Eletronic Devices*) de uma ou mais subestações, permitindo a implementação do SAS (*Substation Automation System*) [1]. A arquitetura da norma é baseada no modelo de dados de orientação a objetos, abstraindo atributos e funções dos IED's, denominados como *Physical Devices*. Cada *Physical Device* possui um conjunto de *Logical Devices* que são as diversas funcionalidades que o IED apresenta (*System*, *Control*, *Protection*, entre outros). Cada *Logical Device* possui um conjunto de *Logical Nodes* que são os elementos funcionais do *Logical Device* em questão, por exemplo, são *Logical Nodes* de proteção: PDIS (proteção de distância), PTOC (proteção de sobrecorrente), PDIF (proteção diferencial) e outras. Por fim, cada *Logical Node* possui um conjunto de *Functional Constraints* com seus *Data Objects* e *Data Attributes*.

* Rua Visconde de Ouro Preto, nº 75, CEP 38.405-202, Uberlândia, MG, Brasil – conprove@conprove.com.br

Como já ressaltado, os três principais protocolos de comunicação que a norma traz são: GOOSE, *Sampled Values* e MMS. As mensagens GOOSE trafegam na rede Ethernet na arquitetura *Publisher-Subscriber*, *multicast*, tendo como funções: envio de informações de status (valores booleanos, vetores de bits ou enumerações) ou analógicos (valores *float* ou inteiros) entre IED's ou para o sistema supervisório. Já as mensagens *Sampled Values* também trafegam na rede Ethernet na arquitetura *Publisher-Subscriber*, *multicast*, mas que levam valores amostrados de corrente e tensão para os IED's. Tanto as mensagens GOOSE quanto *Sampled Values* possuem exigências de tempo crítico, trafegando, portanto, apenas na segunda camada da rede Ethernet. Por fim, as mensagens MMS são do tipo *Client-Server*, *unicast*, e são utilizadas na comunicação vertical da subestação, ou seja, do bay para a estação, com a finalidade de levar informações de medição e status dos IED's para o supervisório. Tais mensagens trafegam na camada de aplicação da rede Ethernet por TCP/IP.

A norma trata a subestação em três níveis hierárquicos: processo, bay e estação. No nível de processo se encontram todos os dispositivos de entrada e saída de dados como sensores, atuadores, TC's, TP's e disjuntores. No bay se encontram os IED's para desempenhar funções de proteção, medição e controle. E, por fim, na estação é onde se concentra o sistema supervisório para monitoramento geral da subestação. O barramento de processo interliga o nível de processo ao nível de bay e o barramento de estação interliga o nível de bay ao nível de estação.

Um dos pilares importantes da norma é a interoperabilidade de IED's de diferentes fabricantes, através da estrutura de dados e padronização dos protocolos de comunicação. Além da interoperabilidade, a norma traz mais três importantes vantagens: segurança, economia e simplicidade. Segurança, pois agora se lidam com sinais da rede Ethernet e não mais com valores de corrente e tensão secundários. Economia e simplicidade, pois todos os cabos de cobre utilizados, agora são substituídos por cabos de rede óptica e não óptica.

Além das implementações de novos protocolos, as empresas fabricantes de IED's estão aprimorando a cada dia mais as funções de proteção e muitas soluções que antes eram inviáveis passaram a ser adotadas nos modernos IED's. Dessa forma, para que o desempenho dos relés seja completamente avaliado, são necessários, além dos testes estáticos de precisão, testes dinâmicos de tal forma a verificar o comportamento dos IED's frente às condições reais do sistema. Os testes transitórios são os que mais se aproximam da realidade e podem ser realizados através de duas metodologias: malha aberta e malha fechada. Para que esta modelagem seja realizada com sucesso, deve-se utilizar um simulador digital que esteja apto a trabalhar com diversos modelos fiéis de componentes do sistema elétrico.

2 DESENVOLVIMENTO

Na metodologia de testes em malha aberta, é necessário primeiramente que se realize a simulação do sistema em um software para estudos de transitórios eletromagnéticos. Posteriormente, para que as formas de onda obtidas sejam reproduzidas nos IED's, é necessária a exportação dos sinais em formato padronizado (formato COMTRADE, por exemplo). Com isso, pode-se importar tais arquivos em softwares que controlam as malas de teste. As malas são responsáveis por amplificar e injetar os sinais dos arquivos no IED, possibilitando ao usuário a verificação de seu comportamento. Tal metodologia não considera a resposta dos IED's no sistema e demanda muito tempo, organização e esforço no processo de realização de múltiplos casos e repetições.

Atualmente, descobrir apenas a atuação do IED frente a uma perturbação não basta, é obrigatório averiguar a influência do IED no comportamento do restante do sistema e a influência deste comportamento no IED novamente. Por possuir uma realimentação, esta metodologia é denominada de teste em malha fechada e permite a avaliação de funções mais complexas e esquemas de proteção.

As principais concessionárias de energia da rede básica utilizam, nos dias de hoje, para os testes em malha fechada os sistemas de simulação em tempo real. No entanto, o custo para aquisição destes equipamentos é muito elevado, já que devem ser adquiridos, além do sistema de simulação, amplificadores de sinais capazes de reproduzir com fidelidade os valores de saída do simulador, uma vez que os sistemas de simulação em tempo real reproduzem em suas saídas sinais de baixa amplitude.

Diante disso, foi desenvolvida no Brasil uma ferramenta que engloba em um único software e em um único hardware todas as etapas do processo avaliativo de um IED ou de um esquema completo de proteção em condições transitórias, permitindo a realização de testes em malha fechada. O software possibilita, além da modelagem e simulação de sistemas complexos, a conexão direta com um hardware composto pelos mais

avançados recursos tecnológicos, capaz não só de injetar simultaneamente vários sinais analógicos de corrente e tensão com elevadas amplitudes por canal, como também realizar testes no universo na norma IEC 61850 através do barramento de processos [2, 3].

A fim de comprovar a eficiência da proteção 87L implementada com o barramento de processos será realizada uma comparação entre a proteção instalada utilizando o método convencional (cabeamento rígido) e no ambiente da norma IEC 61850 (cabo Ethernet). O artigo apresentará resultados de um teste em malha fechada onde, através da modelagem de um sistema em extra-alta tensão, serão simulados cenários com diversos tipos de contingências, considerando variações como, por exemplo: tipo da falta, localização, faltas evolutivas, variação da resistência de falta e falha de comunicação. A proteção diferencial de linha (87L) será o foco principal nas avaliações dos resultados.

2.1 Ferramenta desenvolvida

A ferramenta desenvolvida para testes em malha fechada reproduz as formas de onda obtidas das simulações de software através de um testador universal que injeta os sinais a níveis secundários ou *Sampled Values* nos dispositivos de proteção e interfaceia com os mesmos através da aquisição de sinais binários ou GOOSE. A Figura 1 demonstra os procedimentos executados pela tecnologia de forma esquemática.

Fig. 1. Simulação de sistemas em malha fechada através do método iterativo.

2.1.1 Software

O software PS Simul, desenvolvido no Brasil desde o ano de 2009, teve sua primeira versão lançada no ano de 2014, sendo disponibilizado pelo site da empresa em uma versão *FREE* (gratuita). Este programa, criado com a finalidade principal de permitir ao usuário a modelagem de complexos sistemas de potência e de controle e simular transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos, trabalha com uma interface bastante amigável, com uma série de recursos que facilitam a obtenção e avaliação de resultados, entrada de dados, visualização de erros, entre outros. A fim de possibilitar a criação de qualquer sistema de potência e/ou controle, são disponibilizados mais de 400 modelos de dispositivos do sistema, inclusive vários destes não contemplados por nenhum outro software de simulação transitória. Além de realizar as simulações, o software irá permitir a reprodução/aquisição dos sinais pela mala de testes.

Dentre os diversos recursos do software, podemos destacar: resolução das equações diferenciais por método híbrido (Trapezoidal + Interpolação + Euler) que evita a ocorrência de oscilações numéricas diante de chaveamentos; possibilidade de declaração de variáveis globais (constantes) que possibilitam ajustes comuns a vários blocos em um único ponto; recurso de testes múltiplos automatizados, com a alteração de uma ou mais constantes do sistema; aplicação de faltas sem a necessidade de se dividir a linha de transmissão manualmente; realização de curto entre espiras do transformador através do acesso aos seus enrolamentos; medições internas de diversas grandezas dos blocos de potência; avaliação automática de resultados por lógicas parametrizadas pelo usuário; proteção de arquivos com senha; entrada de dados facilitada; criação de relatórios completos; entre outros.

Para que a interface com o hardware seja reconhecida pelo PS Simul, são disponibilizados na biblioteca do software os blocos de entrada binária, entrada GOOSE, saída analógica, saída binária, saída GOOSE e saída *Sampled Value*. Os componentes de saída são utilizados para que os resultados obtidos no ambiente de simulação possam ser reproduzidos em dispositivos reais. Já os componentes de entrada serão utilizados para possibilitar que os sinais aquisicionados pelos canais das malas de testes sejam utilizados no programa.

Os sinais de entrada são utilizados pelo processo iterativo e esse procedimento é identificado para quaisquer alterações de níveis lógicos ou apenas para as bordas de subida ou descida. Com a iteração, o sinal é utilizado, por exemplo, para modificar a simulação de forma a comandar a abertura e fechamento de disjuntores ou em quaisquer outros pontos dos circuitos que envolvam lógica digital booleana. Este processo de geração e aquisição de sinais ocorre por sobreposições automáticas de etapas com a realimentação do circuito, configurando assim um sistema em malha fechada em etapas com excelentes resultados. É válido enaltecer que essa metodologia só é possível devido à repetibilidade na atuação dos IED's que possuem grande precisão na aquisição e processamento de sinais. Além disso, a eficácia do método iterativo para realização de testes em malha fechada já foi confrontada com a metodologia utilizada pelos sistemas de simulação em tempo real [4, 5], onde comprovou-se que os resultados para aplicações de testes em dispositivos de proteção são os mesmos.

2.1.2 Hardware

Para atender a essa aplicação, existem as gerações de testadores universais das linhas CE-6710, CE-7012 e CE-7024. Para o estudo em questão foi escolhido o hardware CE-6710, que permite realizar tanto testes no universo da IEC 61850, com 16 canais de envio e 44 de recebimento GOOSE, além de 24 canais de envio e 24 de recebimento de *Sampled Values*, quanto com entradas e saídas binárias e canais analógicos, sendo 6 canais de corrente, com a capacidade de geração de 32 Arms e 210 VA por canal, e 4 canais de tensão com 300 Vrms e 100 VA de capacidade cada.

2.1.3 Processo Iterativo

Para exemplificar o processo iterativo, supõe-se o teste da proteção de sobrecorrente instantânea de um IED ajustada em 0s. Para tal, um circuito foi modelado possuindo uma entrada binária com iteração na borda de subida, responsável por reproduzir o sinal de trip aquisitado do relé, conectada a um disjuntor. As duas etapas do processo iterativo são mostradas na Figura 2.

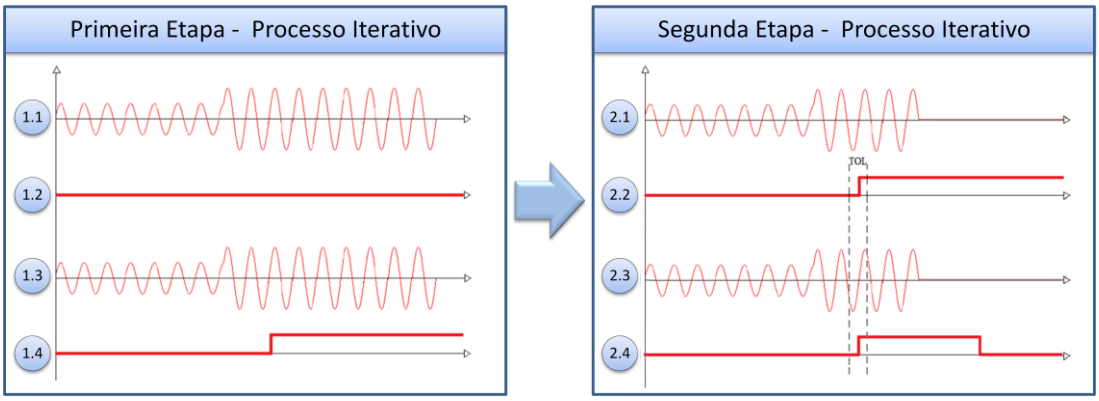

Fig. 2. Etapas do Processo Iterativo

Primeiramente é realizada a simulação sem considerar nenhum sinal de comando para o disjuntor (Figura 2 – 1.1 e 1.2) e o intuito é obter a forma de onda que será gerada. Na primeira geração é feita a aquisição da resposta do relé. Após a primeira geração (Figura 2 – 1.3), o sinal que foi aquisitado do relé (Figura 2 – 1.4) é inserido na modelagem do sistema para uma próxima simulação, dessa maneira é possível modificar o comportamento do sistema simulado através de um sinal externo. Como esse sinal está conectado ao comando de trip do disjuntor, o que se espera é que na próxima simulação (Figura 2 – 2.1 e 2.2), a corrente de falta seja extinta após o tempo de abertura do disjuntor que representa a segunda etapa do processo iterativo. Em seguida, o sinal resimulado será reproduzido (Figura 2 – 2.3) e espera-se que o relé apresente o mesmo comportamento para seu sinal de trip (Figura 2 – 2.4), respeitando uma faixa de tolerância escolhida pelo usuário, que pode ser definida tanto por um valor percentual quanto absoluto.
O comportamento final do IED frente ao defeito aplicado pode ser analisado na Figura 2 – 2.4 e resumido da seguinte maneira: ao identificar a falta o relé comanda o sinal de trip para o disjuntor que após três ciclos abre o circuito e com a eliminação do defeito o relé para de enviar o comando de trip após alguns

milissegundos. A simulação só é finalizada quando a atuação do relé em análise ocorrer no mesmo intervalo de tempo definido pela tolerância parametrizada, caso contrário, a geração é repetida até que a condição seja satisfeita. Se por ventura ocorrerem novas atuações, o processo iterativo será realizado em cascata.
Em suma, o processo iterativo opera em função da repetibilidade das atuações dos IED's quando solicitados ao mesmo defeito. A cada passo iterativo a ferramenta, através de um algoritmo inteligente, aprende com o comportamento do IED e utiliza isso posteriormente para interagir com o sistema de potência, possibilitando uma alteração da sua resposta deste ponto em diante. Toda essa metodologia combinada com a repetibilidade do relé propicia que o comportamento final da interação entre sistema e IED seja construído por etapas até que todas as atuações sejam mapeadas e revalidadas dentro do espaço de tempo determinado pelo usuário.

3 ESTUDO DE CASO

3.1 Descrição dos Casos

A fim de realizar as comparações, foram feitos testes com ambas as metodologias (método convencional e norma IEC 61850), nos esquemas de proteção implantados a um sistema com características similares à de um pertencente à rede básica nacional no que tange a níveis de tensão, geometria típica da linha de transmissão e níveis de curto-circuito, com foco na proteção diferencial de linha (87L). O circuito modelado segue representado na Figura 3 e irá contemplar duas subestações representadas por seus sistemas equivalentes. Entre as subestações foi modelada uma linha de transmissão (classe de 500 kV) e, nos terminais da linha, inclusos grupos de transformadores de instrumentos (TP's e TC's) e disjuntores, que neste estudo foram comandados externamente por relés SIEMENS - SIPROTEC 5 modelo 7SL.

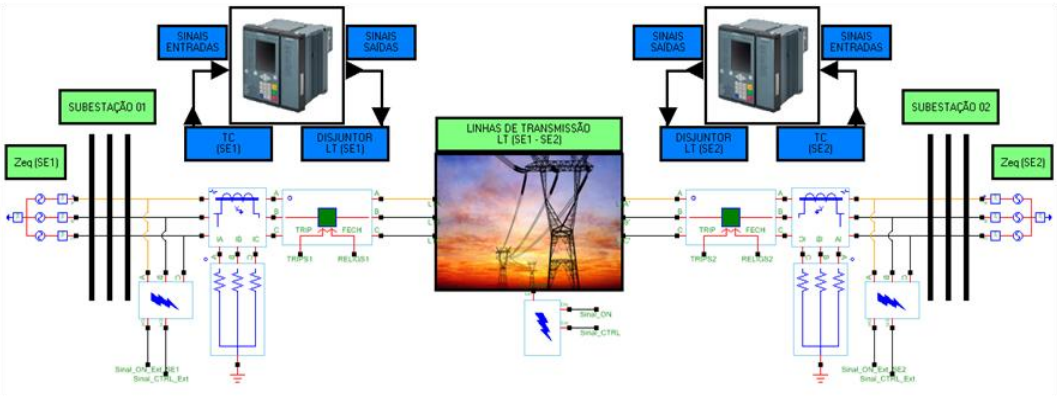

Fig. 3. Circuito de potência modelado no software PS Simul.

No teste convencional, o PS Simul realiza a simulação do sistema modelado, enviando os sinais analógicos e digitais, direcionados para tal fim no ambiente do software, à mala de testes. Feito isso, a mala irá reproduzir os sinais (tensões, correntes e binárias) e aplicá-los nos relés 7SL. Ao mesmo tempo é feita a aquisição das binárias de saída dos IED's para que sejam consideradas (na abertura ou fechamento de disjuntores, por exemplo) na iteração posterior. Todas as conexões entre a mala de testes e os relés são feitas, nesta metodologia, através de cabeamento rígido. A Figura 4 ilustra o fluxo de sinais deste método.

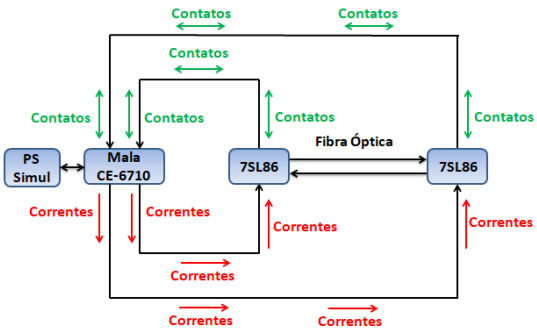

Fig. 4. Metodologia convencional com sinais analógicos e contatos binários

Já no ambiente da norma IEC 61850, o cabeamento rígido é substituido por um cabo Ethernet e os sinais analógicos e digitais tradicionais, substituídos por mensagens GOOSE e *Sampled Values*. O fluxo de sinais ocorre de forma similar ao método convencional, como mostra a Figura 5.

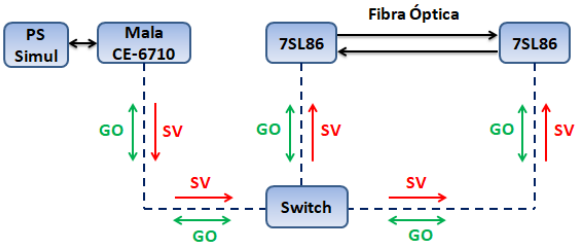

Fig. 5. Process Bus com GOOSE e *Sampled Values*.

O sistema elaborado foi submetido a um total de 260 cenários de teste, onde foram simuladas diversas condições de faltas com variação do tipo de defeito, ângulo de incidência e localização, visando comprovar o correto funcionamento do sistema de proteção. A Tabela I descreve resumidamente os cenários avaliados.

TABELA I. DESCRIÇÃO DOS TESTES REALIZADOS.

Casos	Descrição dos casos
50	Faltas internas com ângulo de incidência de 0º e 90º e religamento tripolar com e sem sucesso. Serão simuladas faltas a: 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de SE1-SE2. Em cada local serão simulados diferentes tipos de falta.
50	Faltas internas evolutivas com ângulo de incidência de 0º e 90º e religamento tripolar com e sem sucesso. Serão simulados casos de falta a: 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de SE1-SE2. Em cada local serão simulados diferentes tipos de falta. A evolução ocorre 1 ciclo após o início da falta.
30	Faltas internas com variação da resistência de falta, no meio da linha, para verificar a influência na atuação da proteção diferencial. Será considerado ângulo de incidência de falta de 0º e 90°, ajustando a resistência de falta com valores que variam de 5 Ω a 200 Ω. Para este caso deverá ser verificado religamento tripolar com sucesso.
10	Faltas externas nas entradas de SE1 e SE2, com ângulos de incidências de 0° e 90°. Para estes casos, deve-se verificar a não atuação da função 87L. Em cada subestação serão simulados diferentes tipos de falta.
40	Faltas externas nas entradas de SE1 e SE2, com saturação e com ângulos de incidências de 0° e 90°. Para estes casos, deve-se verificar a não atuação da função 87L. Em cada subestação serão simulados diferentes tipos de falta, para diferentes valores de resistência de burden, visando provocar saturações leves e pesadas.
10	Faltas externas seguidas de faltas internas, com ângulos de incidências de 0° e 90°. Para estes casos, deve-se verificar o religamento tripolar sem sucesso. Em cada subestação serão simulados diferentes tipos de falta, sendo a falta interna iniciada após 6 ciclos do início da falta externa.
40	Faltas externas com saturação seguidas de faltas internas, com ângulos de incidências de 0° e 90°. Para estes casos, deve-se verificar o religamento tripolar sem sucesso. Em cada subestação serão simulados diferentes tipos de falta, sendo a falta interna iniciada após 6 ciclos do início da falta externa. Serão provocadas saturações leves e pesadas variados os valores de resistência de burden visando provocar saturações leves e pesadas.
12	Faltas internas na condição de "switch on to fault". Para estes casos deve-se verificar a atuação da função SOTF após a tentativa de energização da linha. As condições testadas serão: SOTF com terminal da SE1 Aberto: 0% e 100% de SE1 e SOTF com terminal da SE2 Aberto: 0% e 100% de SE1.
10	Verificar a resposta do relé para sub e sobrefrequências (57 Hz e 72 Hz). Aplicar faltas de tipos variados a 50% com ângulo de incidência de falta de 0º e 90º. Para este caso deverá ser verificado religamento tripolar no modo sem sucesso.
8	Faltas sem comunicação, internas nas posições 0% e 100%, além de faltas externas. Aplicar faltas com ângulo de incidência de 0º e 90º. Para este caso deverá ser verificado a atuação da proteção de sobrecorrente (emergência) e religamento no modo sem sucesso.

4 COMPARAÇÕES

Para fins de exemplificação das comparações realizadas, foram utilizados os resultados obtidos no caso de uma falta AT a 0% da linha de transmissão, com ângulo de incidência de 0º, simulando um religamento sem sucesso. Neste caso os IED's identificam a falta interna e ambos comandam o sinal de trip (eB1-7SL86_1-TRIP e eB2-7SL86_2-TRIP). Após a atuação dos disjuntores das subestações, a falta é eliminada e, ultrapassando o tempo morto do religamento (1s), ambos os IED's comandam o religamento dos disjuntores (eB1-7SL86_1-REC_79 e eB2-7SL86_2-REC_79). Após o religamento, como a falta ainda se mantém no sistema (religamento sem sucesso), ambos os IED's (7SL86_1 e 7SL86_2) operam pelo SOTF (eB1-7SL86_1-SOTF e eB2-7SL86_2-SOTF) e pelo diferencial (eB1-7SL86_1-DIF_87 e eB2-7SL86_2-DIF_87).

A Figura 6 ilustra as formas de onda obtidas para o caso supracitado através da metodologia de testes no ambiente da norma IEC 61850, equivalente ao resultado obtido com a metodologia convencional. A figura mostra as correntes medidas no secundário dos TC's das subestações 1 e 2, assim como todas as funções de proteção monitoradas em cada relé.

Fig. 6. Formas de onda obtidas no software PS Simul para um dos casos simulados.

A Tabela II demonstra uma comparação entre as duas metodologias, através dos resultados obtidos na realização de testes de repetibilidade (20 repetições), no que tange aos tempos de atuação das funções de

proteção dos relés, comprovando a equivalência de ambas nesse quesito. Com a análise da tabela, pode-se perceber que as diferenças dos tempos médios das atuações que ocorrem antes do religamento não ultrapassam o tempo de 0,9 milissegundos que, considerando a repetibilidade do IED, é um tempo que pode ser desprezado. Já após o religamento, a diferença máxima observada foi de 2,79 milissegundos nas atuações. Tal acréscimo se justifica pela menor precisão do IED para a contagem do tempo de religamento que, apesar de resultar em diferenças de tempo pequenas, estas irão implicar em diferentes momentos de religamento gerando transitórios de reenergização distintos, ou seja, outros níveis de correntes transitórias serão lidos pelo IED resultando então em tempos de atuações díspares.

TABELA II. COMPARAÇÕES DOS TEMPOS DE ATUAÇÃO EM MILISSEGUNDOS DAS FUNÇÕES DE PROTEÇÃO DOS IED'S

SISTEMA / **SINAL**		**ANALÓGICO**				**PROCESS BUS**				**Δ Tméd.**
		Tmín.	**Tméd.**	**Tmáx.**	**σ**	**Tmín.**	**Tméd.**	**Tmáx.**	**σ**	
TRIP (7SL86_1)	AR	11,800	**14,182**	17,250	1,59	11,350	**13,707**	15,450	1,36	0,475
	DR	12,450	**16,480**	20,800	2,64	11,400	**14,885**	19,900	2,61	1,595
DIF_87 (7SL86_1)	AR	11,900	**14,307**	17,350	1,58	11,350	**13,700**	15,450	1,37	0,607
	DR	12,550	**17,135**	22,600	3,23	11,400	**16,037**	22,400	2,85	1,098
SOTF (7SL86_1)	AR	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	DR	14,200	**20,100**	26,200	2,88	11,650	**17,310**	27,950	3,66	2,790
OC_50/51 (7SL86_1)	AR	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	DR	-	-	-	-	-	-	-	-	-
REC_79 (7SL86_1)		1032,4	**1035,6**	1039,9	2,25	1027,6	**1033,1**	1043,9	6,04	2,500
TRIP (7SL86_2)	AR	12,600	**14,540**	17,600	1,54	10,900	**13,707**	16,000	1,49	0,833
	DR	13,100	**17,157**	23,150	3,38	11,800	**15,960**	22,250	2,92	1,197
DIF_87 (7SL86_2)	AR	12,250	**14,190**	17,250	1,54	11,050	**13,837**	16,150	1,49	0,353
	DR	12,750	**17,122**	23,050	3,48	11,950	**16,345**	22,400	2,95	0,777
SOTF (7SL86_2)	AR	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	DR	15,750	**22,950**	29,950	4,19	14,400	**20,605**	29,350	4,46	2,345
OC_50/51 (7SL86_2)	AR	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	DR	-	-	-	-	-	-	-	-	-
REC_79 (7SL86_2)		1031,3	**1033,1**	1035,2	1,16	1028,1	**1031,7**	1040,6	3,33	1,400

Tmín. Menor tempo de atuação do sinal entre todas as repetições;
Tmáx. Maior tempo de atuação do sinal entre todas as repetições;
TMéd. Média dos tempos de atuação do sinal entre todas as repetições;
σ Desvio padrão dos tempos de atuação do sinal entre todas as repetições;
Δ*TMéd.* Diferença entre as médias obtidas no simulador em tempo real e no simulador iterativo;
AR Ocorrência antes do religamento; **DR** Ocorrência depois do religamento;

A Figura 7 mostra as montagens dos sistemas utilizados para realização dos testes, tanto com a metodologia convencional (a), quanto no ambiente da norma IEC 61850 (b). Nesta figura constata-se a portabilidade da ferramenta desenvolvida, o que possibilita a realização de testes em campo.

Fig. 7-(a).Metodologia convencional.

Fig. 7-(b) Ambiente da norma IEC 61850.

5 CONCLUSÕES

O estudo apresentou, através da simulação de 260 cenários de contingências, os resultados dos testes de IED's comerciais, visando comprovar o correto funcionamento destes quando inseridos a um esquema de proteção de uma linha de transmissão.

Foi utilizado o conceito de subestação digital, trabalhando com o barramento de processos através das mensagens GOOSE e SV. Além disso, o mesmo sistema foi testado através da metodologia convencional, onde o cabo Ethernet que transmite as mensagens no ambiente da norma IEC 61850 foi substituído por cabeamento rígido para envio dos sinais analógicos e binários.

Através da comparação dos resultados obtidos com ambas as metodologias, no que tange aos tempos de atuação observados, pode-se concluir que as variações foram mínimas, o que ressalta que a implementação da proteção diferencial de linha (87L) com barramento de processos, obteve performance equivalente à do cabeamento rígido tradicional.

Por fim, além de demonstrar e utilizar uma ferramenta portátil de extrema eficiência para testes em malha fechada, com baixo custo se comparada aos sistemas de simulação em tempo real, o artigo apresentou o correto comportamento dos IED's quando testados sob as condições da IEC 61850.

6 REFERÊNCIAS

[1] Standard IEC 61850 – Communication Networks and Systems in Substation – Todas as Partes.

[2] Pereira Junior, P. S., Bernardino, R. C., Pereira, P. S., Martins, C. M., Lourenço, G. E. Experiência do Barramento de Processo da IEC 61850 Utilizando Redundância de Link Conforme Versão 2 da Norma: Uma Comparação Entre os Protocolos RSTP, PRP e HSR; STPC 2016; Brasil.

[3] Pereira Junior, P. S., Bernardino, R. C., Pereira, P. S., Martins, C. M., Lourenço, G. E., Salge, G. S. Experiência de Interoperabilidade no Barramento de Processo (Process Bus) da IEC 61850/IEC 61869-9 e as Questões Relativas à Sincronização; SNPTEE 2017; Brasil.

[4] Pereira, P. S., Pereira Junior, P. S., Martins, C. M., Salge, G. S., Lourenço, G. E., Da Silveira, P. M., Davi, M. J. B. B., Guerrero, C. A. V., Reis Filho, F. A. Testes em Malha Fechada: Uma Comparação Entre Tempo Real e Método Iterativo; SNPTEE 2017; Brasil.

[5] Pereira, P. S., Pereira Junior, P. S., Martins, C. M., Salge, G. S., Lourenço, G. E., Reis Filho, F. A., Davi, M. J. B. B. Testes Transitórios de Dispositivos de Proteção em Malha Fechada; STPC 2016; Brasil.