DOI: 10.48011/sbse.v1i1.2303

Estudo de Caso de Ensaio em Sistema de Proteção Diferencial de Barras, uma Alternativa de Simulação em Malha Fechada

Wellter M. Sozin* Ozenir Farah da Rocha Dias**
Maria Cristina Tavares***

**Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil*
(Tel: +55 19-99739-9019; e-mail: wms.wellter@gmail.com)
***Universidade Federal do Estado do Amazonas, Manaus, Brasil*
(e-mail: ofdias@ufam.edu.br)
****Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil*
(e-mail: ctavares@unicamp.br)

Abstract: This paper proposes an alternative to the methodology hardware-in-the-loop for closed-loop simulation called software-in-the-loop for protection system testing and is exemplified by testing on a low impedance differential busbar protection system. The first methodology was implemented through the Real-Time Digital Simulator (RTDS) along with the physical relays, the second test was through ATP software and the relay model implemented in its MODELS language. In order to compare and validate this proposal, the test consisted of several cases simulated in both methodologies comparing the behavior of the protection system in each one of them.

Resumo: Esse artigo propõe uma alternativa à metodologia *hardware-in-the-loop* de simulação em malha fechada denominada de *software-in-the-loop* para ensaios de sistemas de proteção, sendo exemplificado com o ensaio de um sistema de proteção diferencial de barras de baixa impedância. A primeira metodologia foi implementada através do simulador digital em tempo real RTDS juntamente com os relés físicos, enquanto que na segunda utilizou-se o *software* ATP e o relé foi modelado com a linguagem MODELS. Para comparação e validação dessa proposta realizou-se o ensaio composto por diversos casos em ambas metodologias, comparando o comportamento do sistema de proteção em cada uma delas.

Keywords: ATP; Close-loop simulation; Differential busbar protection; Hardware-in-the-loop; MODELS; Protection system testing; RTDS; Software-in-the-loop.

Palavras-chaves: ATP; Ensaio em sistemas de proteção; Hardware-in-the-loop; MODELS; Proteção diferencial de barras; RTDS; Simulação em malha fechada; Software-in-the-loop.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de proteção utilizados nos sistemas elétricos de potência devem proteger as instalações e os equipamentos diante de contingências da rede (como defeitos ou anormalidades na operação), proteger as pessoas e garantir a máxima disponibilidade da energia elétrica de boa qualidade. Portanto, os relés de proteção devem ser capazes de identificar os casos de defeitos o mais rápido possível, atuando de modo a eliminar a condição anormal e deixar o menor número de consumidores sem energia (Kindermann, 2012).

Diante disso, os sistemas de proteção devem possuir basicamente as seguintes características: confiabilidade (garantindo que a proteção atue corretamente para a função projetada), seletividade (prezando pela máxima disponibilidade do serviço), velocidade (devendo atuar o mais rápido possível para que a duração da falta e os danos aos equipamentos sejam mínimos), simplicidade (utilizando o mínimo de equipamentos de proteção para atender às exigências) e economia (possuindo máxima qualidade no serviço de proteção com o menor custo).

Sendo assim, as características de confiabilidade, seletividade e velocidade dos sistemas de proteção provêm do desempenho dos equipamentos utilizados (sendo os algoritmos empregados nos relés responsáveis em grande parte por esse desempenho) e dos ajustes e parametrizações configuradas.

Portanto, diante das características expostas, é importante que os ajustes das proteções sejam aferidos antes da instalação em campo, possibilitando assegurar que a proteção irá atuar corretamente e na velocidade desejada, evitando a operação nos casos não desejados. Essa prática ajuda a evitar possíveis falhas de atuação das proteções e, consequentemente, desligamentos incorretos do sistema elétrico.

Estes ensaios de sistemas de proteção podem ser realizados através de duas principais metodologias: a simulação em malha aberta (*open-loop simulation*) e a simulação em malha fechada (*closed-loop simulation*). Segundo Marttila et al. (1996), a maior parte dos equipamentos de proteção podem

ser testados em malha aberta, visto que sua atuação em resposta a eventos no sistema simulado não irá interferir em uma provável resposta às mudanças subsequentes. Contudo, pode-se considerar que, em alguns casos específicos, a simulação em malha fechada aumenta a eficiência na condução dos testes, o que é fundamental para determinar adequadamente a resposta dos equipamentos (Marttila et al., 1996). Isso se dá principalmente para sistemas de proteção complexos ou localizados em barramentos estratégicos.

Dessa maneira, partindo do pressuposto de que a proteção de diferencial de barras é estratégica e deve ser testada em malha fechada, este artigo estuda um caso real de ensaio da proteção de diferencial de barras de baixa impedância através da simulação em malha fechada com o relé em *hardware-in-the-loop* (HIL) juntamente com o simulador digital em tempo real (*Real-Time Digital Simulator* – RTDS). Como alternativa, um modelo matemático do relé foi desenvolvido na linguagem MODELS do ATP e o mesmo sistema foi testado em *software-in-the-loop* (SIL).

2. CASO SOB ESTUDO

O sistema elétrico real sob estudo consiste numa subestação com barramentos de 230 kV e 69 kV. A Fig. 1 apresenta o diagrama elétrico modelado para simulações e estudos juntamente com seus principais dados.

O sistema de proteção sob ensaio consiste nas proteções diferenciais de baixa impedância das barras de 69 kV e 230 kV nas quais três transformadores estão conectados em paralelo. Devido às obras de expansão na subestação, esse sistema foi remodelado, passando a ser protegido pelo equipamento SIPROTEC 7SS52.

Por solicitação da concessionária responsável pela área foi realizado um minucioso ensaio do sistema de proteção em malha fechada com o RTDS antes de sua implementação em campo. Esse ensaio analisou as seguintes situações: regime permanente, energização em condições normais e sob falta, faltas evolutivas, faltas externas, faltas externas com saturação de transformador de corrente (TC), faltas internas, faltas internas com saturação de TC, faltas simultâneas e zona morta. Para cada uma dessas situações houve variação do tipo de falta, ângulo de sua incidência, resistência de falta e frequência de operação do sistema elétrico, sendo também considerada a rede íntegra e rede degradada sob contingência.

A Fig. 1 também exibe os pontos de incidência das faltas para realização dos testes tanto para a proteção diferencial do barramento de 69 kV quanto do barramento de 230 kV. Sendo assim, o ensaio totalizou 1791 casos.

3. ENSAIO HARDWARE-IN-THE-LOOP

O ensaio HIL é bastante utilizado tanto por parte dos pesquisadores do setor elétrico como das empresas, chegando em alguns casos até mesmo a ser adotado como convenção e hábito para validação e verificação dos ajustes de seus principais sistemas de proteção. Os artigos de Silva e Carvalho (2012), e Lellys (2007) são alguns exemplos dessa prática.

O ensaio com o RTDS foi adotado para validar e efetuar possíveis correções nos ajustes do novo sistema de proteção a ser implementado em campo. Para tal, foi realizada a modelagem minuciosa do sistema elétrico no *software* RSCAD® reproduzindo os níveis de curto-circuito fornecidos pela empresa. Foi elaborada uma lista contendo todos os eventos a serem testados para alimentar o *script* dos ensaios em massa e realizada a montagem do sistema HIL, utilizando o RTDS, as caixas amplificadoras e os relés de proteção, como apresentado na Fig. 2.

O ensaio foi dividido em blocos de testes executados automaticamente pelo *script*, sendo que ao final de cada bloco os resultados, como tempo de atuação da proteção e oscilografias, eram analisados para verificar a necessidade de alteração das parametrizações.

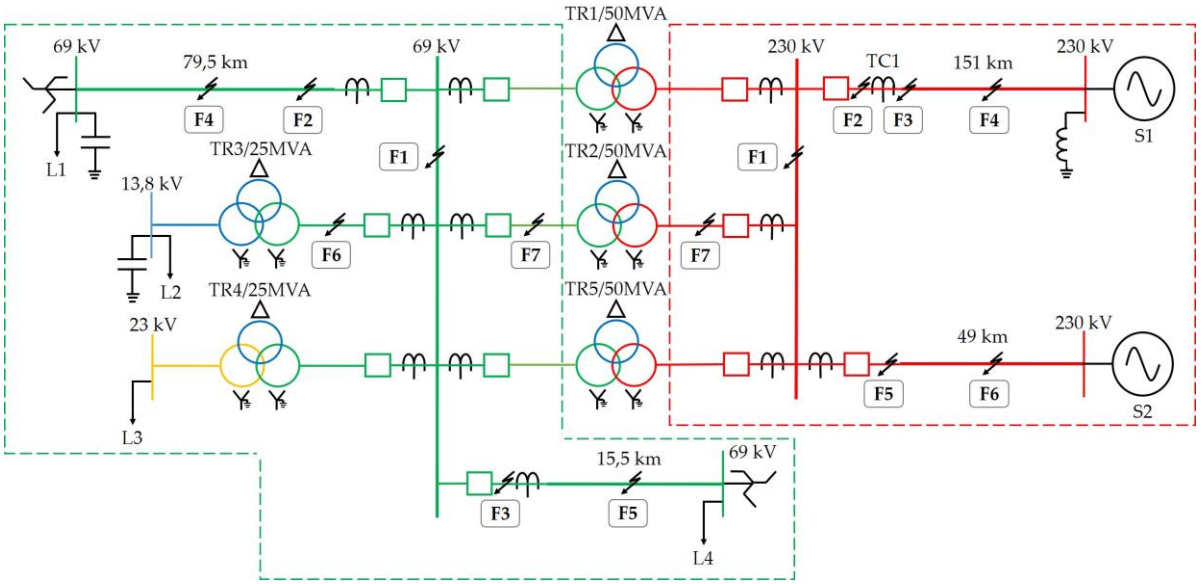


Fig. 1 Sistema elétrico real: Diagrama da modelagem para o ensaio.

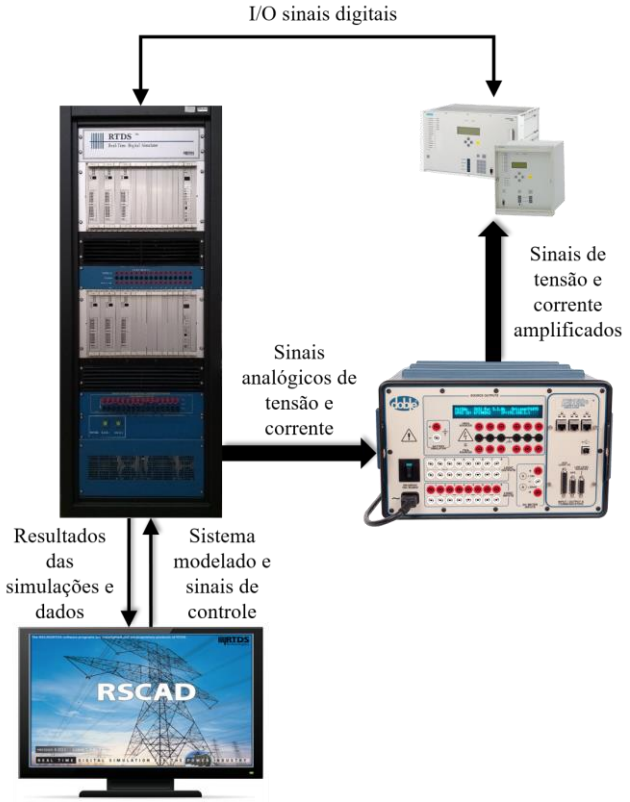


Fig. 2 Simulação *hardware-in-the-loop*: Esquema de montagem com o RTDS.

4. ENSAIO SOFTWARE-IN-THE-LOOP

Após a realização do ensaio completo utilizando o RTDS, foi estudada e elaborada uma alternativa à metodologia HIL. Essa alternativa consiste na metodologia SIL, que não necessita utilizar os relés fisicamente, mas trabalha com um modelo matemático do comportamento do relé implementado via *software* para possibilitar o ensaio em malha fechada. Dessa maneira, todo o processo de simulação e ensaio se dá virtualmente no *software*, conforme apresentado na Fig. 3.

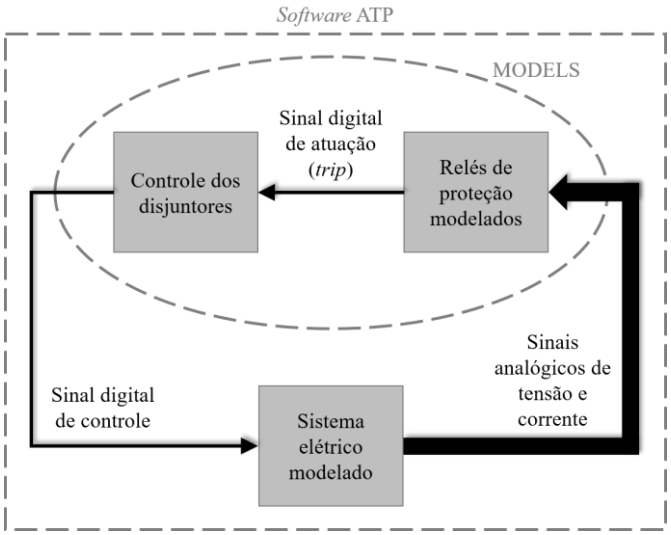


Fig. 3 Simulação *software-in-the-loop*: Esquema de implementação através do ATP.

Neste caso foi utilizado o *software* ATP, onde o sistema elétrico foi modelado, reproduzindo os mesmos níveis de curto-circuito simulados no RSCAD® e fornecidos pela empresa.

Tanto o sistema de controle dos disjuntores presentes no circuito quanto o modelo dos relés de proteção foram desenvolvidos na linguagem de programação própria do ATP denominada MODELS. Vale ressaltar que a modelagem dos relés foi feita de modo que as suas características construtivas, operativas e os algoritmos fossem aderentes aos existentes nos relés físicos a serem instalados em campo.

O modelo do relé foi dividido basicamente em duas grandes partes: a estimação dos fasores de corrente e o algoritmo da função de proteção em questão. Essa divisão se dá de maneira que cada *bay unit* de todos os vãos das barras sob proteção é responsável por estimar os fasores de corrente e enviá-los à *central unit*. Esta central, que possui o algoritmo de proteção, processa todas essas informações e envia o sinal de *trip*, em caso de atuação, para os disjuntores da barra.

Um esquemático dos principais blocos do modelo desenvolvido para o ensaio em questão é apresentado na Fig. 4, sendo fundamentado em informações disponíveis em diversas literaturas, sendo elas: Alvarenga, 2014; Alvarenga et al., 2013; Behrendt et al., 2010; Escudero et al., 2017; Ferrer and Schweitzer III, 2010; Hart et al., 2000; Magrin, 2014; Perez, 2006; Vianna, 2013; Ziegler, 2012. Vale ressaltar que foram realizadas as devidas adaptações para que a resposta do modelo reproduzisse o comportamento mais próximo possível dos equipamentos físicos sob ensaio.

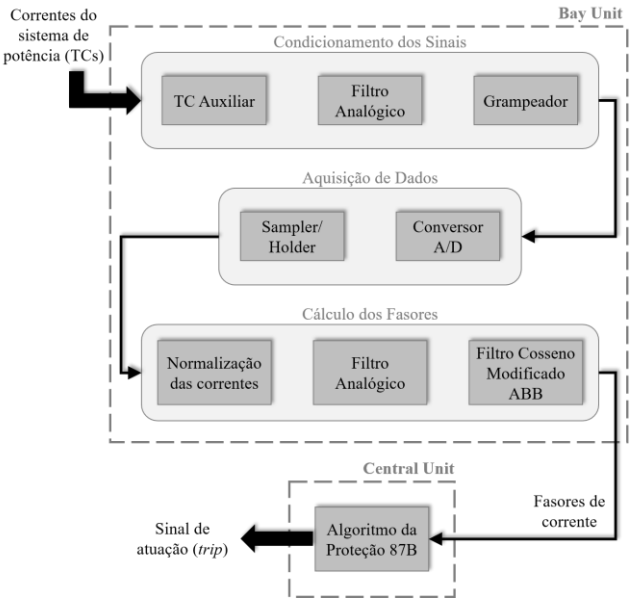


Fig. 4 Proteção diferencial de barras: Esquemático de sua modelagem.

De posse desse modelo, o usuário pode ajustar os seguintes parâmetros:

- A frequência de operação do sistema elétrico na qual o relé se encontra instalado (Hz);
- A taxa de amostragem utilizada para a obtenção dos fasores (amostras/ciclo);

- A taxa de processamento do relé (amostras de fasores/processamento);
- O atraso de fechamento do seu contato de trip (s);
- Corrente mínima de operação (*Ipick-up*) (pu);
- Inclinação do limiar de operação para Faltas Internas (*I_slope*);
- Inclinação do limiar de operação para Faltas Externas (*E_slope*);
- Mínima taxa de variação a partir do qual se detectam faltas (*pu/s*);
- Tempo no modo de operação de Falta Externa quando detectada (*s*).

Sendo assim, esses parâmetros receberam os mesmos ajustes implementados nos relés físicos para possibilitar a reprodução do ensaio e permitir a comparação das metodologias. Dessa maneira, os mesmos casos simulados no RTDS foram testados através do ATP com uma planilha automatizada, permitindo assim a reprodução sequencial e automática de todos os casos.

5. RESULTADOS

Como primeira etapa da validação do modelo implementado foram analisadas as oscilografias de alguns casos específicos para comparar o seu comportamento com o do relé físico.

O primeiro caso analisado é apresentado na Fig. 5, consistindo na situação de uma falta interna monofásica AT ao barramento de 230 kV, ou seja, interna à região de proteção. Esse defeito, localizado no ponto F1 (conforme indicado na Fig. 1), foi aplicado com ângulo de incidência de 90°, com uma resistência de 0,5 Ω e duração de 200 ms.

O primeiro conjunto de formas de ondas refere-se à corrente da fase A no secundário do TC1 obtida tanto na simulação através do ATP (SIL) quanto do RTDS (HIL). Abaixo são apresentadas as correntes de operação e restrição calculadas pelo modelo do relé na MODELS e, por fim, apresentam-se os principais sinais digitais do evento.

Nesse caso, para a metodologia SIL o *trip* ocorreu 13,10 ms após a aplicação da falta e a abertura dos disjuntores em 67,20 ms. Já para a metodologia HIL esses tempos foram de 19,10 ms e 68,50 ms, respectivamente.

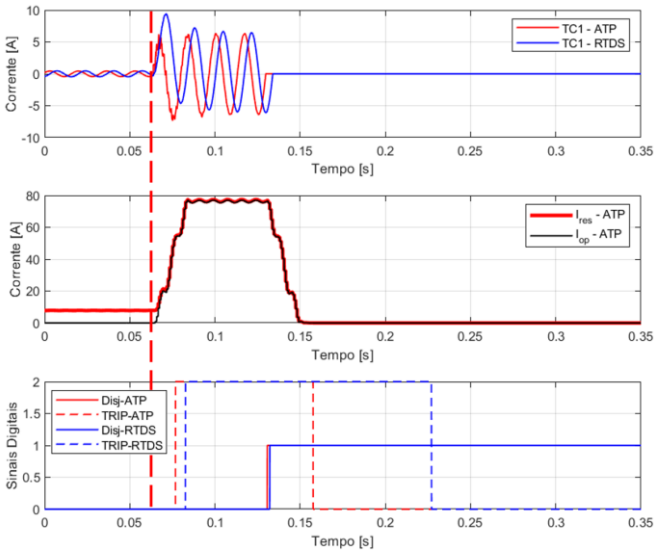


Fig. 5 Exemplo de Caso: Falta interna ao barramento.

Essa diferença entre as duas metodologias no tempo de *trip*, apesar de não ser muito elevada, se dá em grande parte pela impossibilidade de realizar uma modelagem perfeitamente igual ao relé físico, já que não são disponibilizados o algoritmo completo por parte do fabricante (o denominado código verdadeiro – *real* code) nem suas especificidades, incluindo o seu comportamento mecânico, como fechamento de contatos. Além do mais, podem ocorrer pequenas diferenças entre a execução das simulações em ambas metodologias.

No entanto, essa diferença é muito menor quando observado o tempo de abertura dos disjuntores, já que, para esse evento ocorrer, é necessário esperar o tempo de atraso mecânico dos seus contatos (considerado nesse ensaio de 50 ms) quanto que a corrente nos seus polos cruze por zero. Dessa maneira, mesmo que em uma das metodologias o *trip* ocorra um pouco antes da outra, a abertura será num instante muito próximo, que será o cruzamento por zero da corrente.

Isso somente não será válido no caso específico em que numa das metodologias o instante do *trip* somado ao atraso de 50 ms da abertura dos disjuntores se dê logo antes do cruzamento da corrente por zero e na outra metodologia se dê logo após esse mesmo cruzamento por zero. Sendo assim, a diferença no tempo de abertura dos disjuntores para as duas metodologias será neste caso extremo de aproximadamente meio ciclo (8,33 ms).

A Fig. 6 apresenta um caso de falta externa ao barramento, com as mesmas características do caso anterior, mas sendo aplicada no ponto F3.

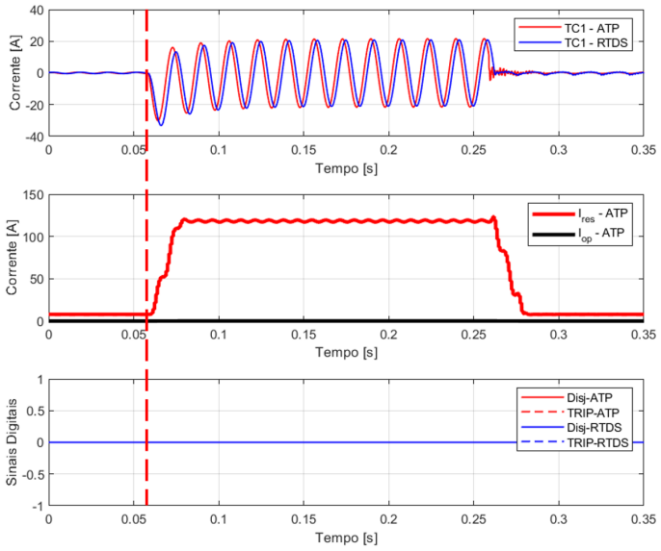


Fig. 6 Exemplo de Caso: Falta externa ao barramento.

Por se tratar de um defeito fora da zona de proteção não há o aumento da corrente de operação e, consequentemente, como esperado, tanto na metodologia SIL quanto na HIL não ocorreu a atuação da proteção e seu *trip*.

Após verificar que o modelo respondia de maneira semelhante aos relés foram então analisados os tempos de operação da proteção para todos os casos, ou seja, o tempo transcorrido entre a ocorrência da falta até a emissão do sinal de *trip*. Prezando pela segurança dos equipamentos e estabilidade do sistema elétrico, os Procedimentos de Rede estabelecem que o tempo máximo para a eliminação do defeito deve ser inferior a 100 ms (ONS, 2017), sendo esse tempo compreendido entre a ocorrência da falta até a abertura dos disjuntores e completo isolamento do barramento.

Sendo assim, a Tabela 1 e a Tabela 2 apresentam, respectivamente, para o barramento de 69 kV e de 230 kV, os tipos de casos ensaiados e a quantidade de testes realizados. Tanto para a metodologia SIL quanto para a HIL são exibidos os tempos médios de atuação da função de proteção diferencial de barras, o desvio padrão desses valores e a quantidade de atuações. Por fim, é apresentada a diferença percentual entre o tempo médio de atuação na metodologia SIL frente à HIL.

Tabela 1. Resultados do ensaio no barramento de 69 kV

Casos	Nº Testes	SIL			HIL			%
		t (ms)	σ (ms)	Atuações	t (ms)	σ (ms)	Atuações	
Energização	3	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,0%
Regime Permanente	6	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,0%
Energização sob Falta	12	12,29	0,32	12	22,64	2,62	12	-45,7%
Evolutivas	48	16,85	3,30	43	28,19	15,63	48	-40,2%
Internas	72	15,71	2,39	72	17,66	3,98	72	-11,0%
Internas Saturação TC	144	14,21	2,48	144	15,35	4,01	144	-7,4%
Simultâneas	144	23,76	5,90	97	29,15	12,00	112	-18,5%
Externas	216	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,0%
Externas Saturação TC	432	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,0%

Tabela 2. Resultados do ensaio no barramento de 230 kV

Casos	Nº Testes	SIL			HIL			%
		t (ms)	σ (ms)	Atuações	t (ms)	σ (ms)	Atuações	
Energização	6	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,0%
Regime Permanente	6	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,0%
Energização sob Falta	12	12,15	0,00	12	22,57	6,59	12	-46,2%
Zona Morta	24	14,46	1,60	24	23,78	4,10	24	-39,2%
Evolutivas	72	13,85	2,66	69	28,22	10,43	57	-50,9%
Internas	72	13,80	1,45	72	23,38	4,28	72	-41,0%
Internas Saturação TC	72	15,07	2,52	72	28,98	10,11	72	-48,0%
Simultâneas	72	19,79	2,54	61	23,77	4,94	39	-16,7%
Externas	108	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,0%
Externas Saturação TC	270	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,0%

Pode-se observar que o modelo do relé implementado para o estudo desse caso apresenta um tempo médio de atuação sempre inferior ao do equipamento físico. Isso deve-se, em grande parte, ao fato de o modelo não ser uma réplica fiel do algoritmo presente no relé a ser instalado em campo, já que suas principais características e lógicas não são disponibilizadas livremente. Sendo assim, por possuir lógicas mais complexas, com checagem de eventos e intertravamentos, a atuação do equipamento é um pouco mais demorada do que a do modelo matemático.

Nesse caso de estudo, o modelo possui uma resposta fixa, ou seja, dependente somente da execução de seu algoritmo via *software*, não sendo considerada dispersões em nenhuma etapa de seu processamento, apesar de ser considerado o atraso de fechamento do contato de *trip*, mas como um tempo fixo.

Por outro lado, o equipamento possui componentes complexos como filtros e processadores que causam atenuações dos sinais e atrasos randômicos, que também contribuem para que o seu tempo de atuação seja maior do que o do modelo, além de apresentar um desvio padrão maior, o que também pode ser observado na Tabela 1 e na Tabela 2.

Como analisado anteriormente, as maiores diferenças nos tempos de atuação situam-se em torno de ½ ciclo, e decorrem do relé modelado atuar num semi-ciclo e o relé físico somente atuar no semi-ciclo posterior, após o cruzamento da corrente por zero.

Além do mais, nota-se que somente nos casos de Faltas Evolutivas e de Faltas Simultâneas, tanto para o barramento de 69 kV quanto para o de 230 kV, ocorreram situações em que as proteções não atuaram conforme o esperado. Essas situações são extremas, raras na prática e de difícil identificação para os relés, estando em seu limiar de operação. Estes casos apresentaram um dos maiores tempos médios e desvio padrão.

Sendo assim, nessas situações existiram testes em que não houve a atuação tanto na metodologia SIL quanto na HIL e situações em que houve atuação na SIL enquanto não houve na HIL e vice-versa. Deve ser lembrado que o algoritmo implementado na MODELS não reproduz completamente o algoritmo do relé real, já que não se tem acesso completo aos seus limites internos.

Para que seja possível um ensaio SIL do sistema de proteção, avaliando mais detalhadamente e com maior confiabilidade o comportamento dos seus algoritmos, seria necessário que as

empresas desenvolvedoras dos relés disponibilizassem os modelos *real code*. Ou seja, o algoritmo do relé na forma de um componente fechado de *software* exatamente como o existente nos equipamentos relés físicos.

Por também ser uma simulação em malha fechada, a metodologia SIL possui vantagens frente à simulação em malha aberta, como a possibilidade de avaliar a resposta dinâmica do sistema elétrico e sua proteção, assim como permitir maior facilidade de refinar a parametrização dos relés, procurando otimizar o sistema de proteção e corrigir possíveis erros.

Em comparação com a HIL, a metodologia SIL apresenta as vantagens de possuir baixíssimo custo financeiro e de não necessitar da disponibilidade dos relés físicos para realização de testes e ensaios, permitindo testes de maneira simultânea ou não com diversos modelos de relés e funções de proteção.

No entanto, por não se reproduzir fielmente as características do algoritmo do relé e as especificidades de cada equipamento e de seu fabricante, em alguns casos as respostas do campo e do ensaio não serão idênticas.

6. CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentada a proposta de simulação em malha fechada através da metodologia *software-in-the-loop* (SIL), sendo uma alternativa à metodologia *hardware-in-the-loop* (HIL) para ensaios de sistemas de proteção.

Através da reprodução do ensaio do equipamento de proteção a ser instalado em campo foi observado que o comportamento do modelo do relé de proteção diferencial de barras implementado via MODELS no ATP se comporta de maneira muito semelhante a do relé físico ensaiado.

Visto isso, entende-se que a metodologia SIL é adequada para um primeiro teste de um determinado sistema de proteção. Esta prática pode ser realizada pela equipe da empresa concessionária para avaliar os ajustes calculados e até mesmo para estudar o comportamento do sistema elétrico como um todo frente à atuação das proteções.

Já num segundo momento, o ideal é a realização do ensaio HIL com os próprios equipamentos a serem instalados em campo com os ajustes já validados. Desta forma pode-se verificar as particularidades do equipamento e implementar possíveis aperfeiçoamentos nos ajustes.

Por fim, devido às características já citadas da metodologia SIL, ela se apresenta como um importante e acessível instrumento para o ensino de sistemas de proteção nas universidades e em cursos. É possível analisar o comportamento das funções de proteção e os alunos podem implementar os ajustes de maneira similar ao realizado com os relés físicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro concedido pelas instituições CAPES (001), CNPq e FAPESP (proc. 2017/20010-1, 2018/04174-7, 2018/06740-0).

REFERÊNCIAS

Alvarenga, M.T.S., 2014. Modelagem e Simulação da Proteção Diferencial de Alta Impedância de Barramentos no Software ATP. Universidade de Brasília.

Alvarenga, M.T.S., Vianna, P.L., Silva, K.M., 2013. High-Impedance Bus Differential Protection Modeling in ATP/MODELS. Engineering 05, 37–42. https://doi.org/10.4236/eng.2013.59B007

Behrendt, K., Costello, D., Zocholl, S.E., 2010. Considerations for Using High-Impedance or Low-Impedance Relays for Bus Differential Protection. 2010 63rd Annu. Conf. Prot. Relay Eng. https://doi.org/10.1109/CPRE.2010.5469509

Escudero, A.P., Vasquez, F.A.M., Melo e Silva, K., Lopes, F.V., 2017. Low-impedance busbar differential protection modeling and simulation using ATP/EMTP, in: 2017 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS). IEEE, pp. 1–4. https://doi.org/10.1109/WCNPS.2017.8252934

Ferrer, H.J.A., Schweitzer III, E.O., 2010. Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electric Power Systems. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., Pullman.

Hart, R.D.G., Novosel, D., Smith, R.A., 2000. Modified Cosine Filters. 6154687.

Kindermann, G., 2012. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência: Volume 1, 3rd ed. Florianópolis-SC.

Lellys, D., 2007. Experiência de Furnas na Elaboração das Especificações Técnicas, Estudo de Aplicação e Testes de Modelo no Simulador em Tempo Real (RTDS) para Modernização das Proteções de Linhas de 765kV, in: SNPTEE. Rio de Janeiro-RJ, p. 8.

Magrin, F.G.S., 2014. Modelagem de um Relé de Proteção Diferencial de Transformador no RTDS. Universidade Estadual de Campinas.

Marttila, R.J., Dick, E.P., Fischer, D., Mulkins, C.S., 1996. Closed-loop testing with the real-time digital power system simulator. Electr. Power Syst. Res. 36, 181–190. https://doi.org/10.1016/0378-7796(95)01030-0

ONS, 2017. Procedimentos de Rede - Submódulo 2.6: Requisitos Mínimos para os Sistemas de Proteção, de Registro de Perturbações e de Teleproteção.

Perez, S.G.A., 2006. Modeling Relays for Power System Protection Studies. Electr. Eng. University of Saskatchewan.

Silva, J.L., Carvalho, S.M., 2012. Ensaio de modelo utilizando simulador RTDS para validação dos ajustes das proteções das LIs de 500kV entre a Usina Hidrelétrica de Itaipu e a Subestação Foz do Iguaçu devido a alteração de configuração na Subestação de Foz do Iguaçu, in: SBSE. Goiânia-GO, p. 6.

Vianna, P.D.L., 2013. Modelagem e Simulação da Proteção Diferencial de Baixa Impedância de Barramentos no Software ATP. Universidade de Brasília.

Ziegler, G., 2012. Numerical Differential Protection: Principles and Applications, 2nd ed. Publicis Publishing, Erlangen.