

Desenvolvimento de Plataforma de Testes Virtuais em Tempo Real para Dispositivos Eletrônicos Inteligentes com Função de Detecção de Falhas de Alta Impedância

Jhonatan A. Cassol* Aldair Wontroba* Isabella B. Pereira*
Ângelo F. Sartori* Fernando G. K. Guarda* Adriano P. de Moraes*

* Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência,
Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil,
(e-mail: cassol@ieee.org; aldair.wontroba@hormail.com;
isabella.basso@acad.ufsm.br; fernando.guarda@ufsm.br;
adriano@ctism.ufsm.br).

Abstract: This paper presents the development of a virtual real-time test platform for intelligent electronic devices (IEDs) with high impedance fault detection function. High impedance faults are very common events in overhead distribution systems, being difficult to detect due to its low current magnitude. Considering the difficulty of recording oscillographies of these faults, and the availability of real-time digital simulations, this paper proposes a test platform for protection devices. In order to accomplish this, a real-time simulation platform from Typhoon HIL Inc., equipped with a Typhoon HIL 604 is used. The elaboration and validation process of the high impedance fault model proposed by Gautam and Brahma (2013) is demonstrated, testing the parameters of three different surfaces. The results reflect what is expected for high impedance faults, with the tests occurring dynamically through the accesses of the low-level interface of the used IED.

Resumo: Este trabalho visa apresentar o desenvolvimento de uma plataforma de testes para dispositivos eletrônicos inteligentes (IED, do inglês intelligent electronic devices) com função de detecção de Falhas de Alta Impedância. As Falhas de Alta Impedância são eventos muito comuns em sistemas aéreos de distribuição, sendo também de difícil detecção visto a baixa magnitude de sua corrente de falta. Tendo em vista a baixa disponibilidade de oscilografias para este defeito, aliada às vantagens das simulações digitais em tempo real, é proposta uma plataforma de testes para os dispositivos de proteção de sistemas elétricos utilizando a plataforma de simulações da Typhoon HIL Inc., através do simulador Typhoon HIL 604. Para isso é demonstrado o processo de elaboração e validação do modelo virtual de Falhas de Alta Impedância proposto por Gautam e Brahma (2013), com posterior teste para os parâmetros de três superfícies diferentes. Os resultados obtidos se caracterizaram dentro do esperado para este tipo de defeito, com os ensaios ocorrendo de forma dinâmica através dos acessos da interface de baixo nível da IED utilizada.

Keywords: Protection of Power Systems; High Impedance Fault; Real-Time Simulation; HIF Detection; Intelligent Electronic Device; Low-Level Interface

Palavras-chaves: Proteção de Sistemas Elétricos; Falhas de Alta Impedância; Simulação em Tempo Real; Detecção de Falhas de Alta Impedância; Dispositivos Eletrônicos Inteligentes; Interface de baixo nível

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência (SEP) são constituídos pelos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica visando a transferência de energia das unidades geradoras para as unidades consumidoras (Gebran, 2014). Considerando o grande fluxo de potência que pode ser transferido pelo SEP, a sua proteção se torna fundamental para manter seu correto funcionamento. Para tal feito, há um ramo de estudo denominado proteção

de sistemas elétricos de potência (Horowitz and Phadke, 2014).

Dentre os eventos analisados pelo ramo de proteção do SEP, o curto-circuito é o de maior ocorrência, além de ser amplamente nocivo aos equipamentos do SEP e às unidades consumidoras (Mamede Filho and Mamede, 2011). Dentre as possíveis formas de ocorrência de curtos-circuitos estão as Falhas de Alta Impedância (FAI), que ocorrem quando o condutor energizado entra em contato com uma superfície de alta resistividade elétrica (Farias, 2013) (Farias, 2017) (Wontroba, 2020).

Uma vez que a superfície possui alta resistividade, há uma baixa magnitude da sua corrente de falta, muitas vezes permanecendo fora da região de proteção dos dispositivos de sobrecorrente (Wontroba, 2020). Sendo assim, é necessário o estudo destes eventos visando formatar métodos para a sua detecção, localização e classificação.

Ao desenvolver algoritmos para a detecção destas faltas, também há uma carência de formas de testagem dos mesmos em nível de hardware (Cassol, 2018). Visando esta lacuna, é proposta uma plataforma de testes para algoritmos de proteção e dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs, do inglês *Intelligent Electronic Devices*) com funções de detecção de FAIs, utilizando simulações digitais em tempo real com a possibilidade de simulação na metodologia de *hardware-in-the-loop*.

As simulações em tempo real consistem em uma poderosa ferramenta de desenvolvimento e operação de sistemas elétricos, sendo estratégicas para a garantia da segurança e confiabilidade dos sistemas simulados (Rueda, 2019). Com isto, é desenvolvida uma plataforma de testes para IEDs e algoritmos de proteção utilizando a plataforma de simulações da *Typhoon HIL Inc.* Para tal feito é utilizado o modelo de faltas de alta impedância proposto por Gautam e Brahma (2013), com validação de sua implementação através da análise comparativa com o simulador *ATP Draw* e atuações de uma IED sob testes.

2. FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

As Faltas de Alta Impedância (FAI) são eventos muito comuns em sistemas aéreos de distribuição de energia elétrica (Farias, 2013) (Farias, 2017) (Wontroba, 2020). Uma vez que estas ocorrem em uma superfície de alta resistividade, a corrente de falta ocorre com baixas magnitudes, sendo na maioria dos casos indetectável pelos dispositivos de proteção. Com isto há a possibilidade de que seres vivos entrem em contato com esta superfície energizada, podendo levar à eletrocussão dos mesmos (Farias, 2013).

Além dos riscos para os seres vivos, também há danos financeiros às concessionárias de energia. Isto se dá visto que há correntes de fuga, além de que no caso de rompimento dos condutores, há a paralização no fornecimento de energia para os consumidores alocados à jusante do ponto em falta (Farias, 2013).

Embora a magnitude da corrente de falta seja baixa quando comparada com os níveis de curto-circuito franco, sendo geralmente na faixa de até 100 A (Aucoin and Jones, 1996) (Hou, 2009), a forma de onda das FAIs possui características que a distingue das demais faltas. Conforme demonstrado na Fig. 1, algumas das características são a presença de harmônicos, em especial a 3ª harmônica (Liu, 2016), não linearidade, intermitência e assimetria, como efeitos do arco elétrico (Wontroba, 2020); além destes, o *build up* e *shoulder*, que são efeitos do crescimento e estabilização da corrente de falta.

As faltas de alta impedância podem ocorrer, conforme demonstrado na Fig. 2, de diferentes formas. Quando ocorre sem o rompimento do condutor, é denominada falta *shunt*; quando ocorre o rompimento, este pode entrar em contato com a superfície de alta impe-

dância através do lado da fonte, ao lado da carga ou com contato em ambos os lados (Farias, 2013) (Farias, 2017) (Wontroba, 2020). Para o caso do rompimento com contato do condutor no lado da carga, a detecção possui maior dificuldade, uma vez que a impedância de falta (Z_F) se soma à da carga.

Uma vez que há dificuldade na detecção destes eventos, também há pouca disponibilidade de registros oscilográficos. Com isto é necessária a modelagem das faltas de alta impedância para uso em simulações e validação de novos métodos de detecção destas faltas.

2.1 Modelagem de Faltas de Alta Impedância

No presente trabalho é escolhido o modelo apresentado por Gautam e Brahma (2013), composto por dois braços em antiparalelo contendo um diodo, fonte de tensão contínua e resistor em série (Fig. 3). Para este modelo, há a presença da variação randômica dos valores de tensão e resistência, conforme apresentado na Tabela 1.

Neste modelo as fontes de tensão em antiparalelo representam a tensão de ruptura do arco elétrico, enquanto os diodos separam as formas de onda de cada semiciclo. Estes dois componentes em série são responsáveis pelas características de não linearidade e assimetria do modelo (Gautam and Brahma, 2013). Por fim, as resistências

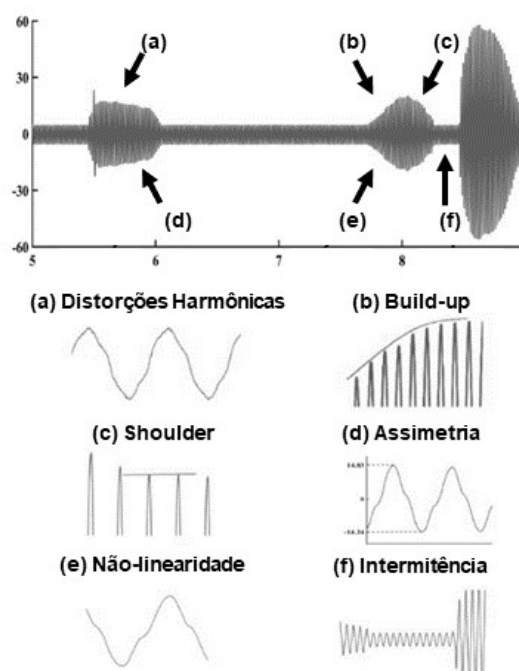


Figura 1. Características da forma de onda da corrente de falta de alta impedância. Adaptado de (Wontroba, 2020)

Tabela 1. Parâmetros de superfície introduzidos por Gautam e Brahma (2013)

Parâmetro	Valor	Varição
V_P	1000V	$\pm 10\%$
V_N	500V	$\pm 10\%$
R_P	100 Ω	0 Ω – 50 Ω
R_N	100 Ω	0 Ω – 50 Ω

representam a intensidade da corrente de falta, sendo a sua aleatoriedade responsável por representar o fator de aleatoriedade do contato do condutor energizado com a superfície a cada instante de tempo (Gautam and Brahma, 2013).

Dentre as diversas formas de simulação de sistemas elétricos, há a possibilidade de simular *offline*, através de simuladores que geralmente não são avaliados em tempo real, e *online*, onde há um simulador gerando os sinais

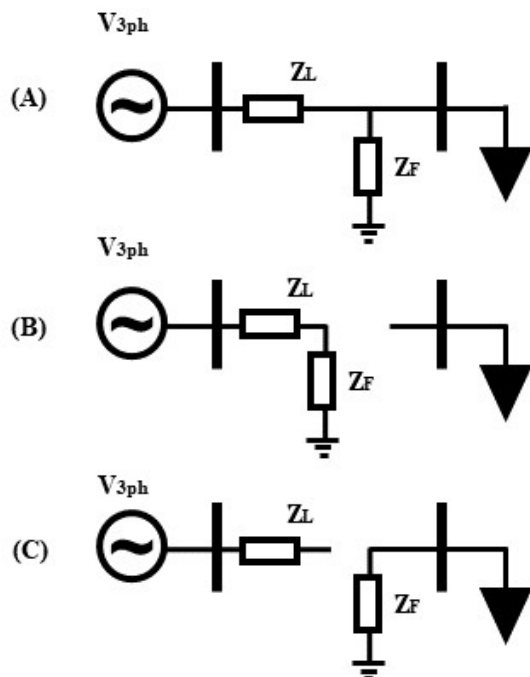


Figura 2. Tipos de Faltas de Alta Impedância. (A) FAI sem rompimento dos condutores; (B) FAI com rompimento do condutor e contato ao lado da fonte; (C) FAI com rompimento do condutor e contato ao lado da carga. Adaptado de (Farias, 2013)

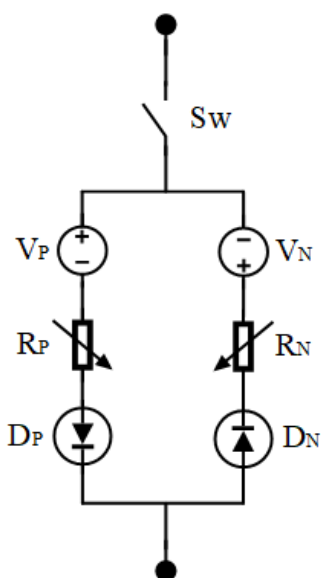


Figura 3. Modelo de Faltas de Alta Impedância segundo Gautam e Brahma (2013)

ao meio físico. As simulações online permitem a avaliação de um dispositivo (DUT, do inglês *Device Under Test*) em tempo real (Wontroba, 2020). Com isto, a utilização de simuladores em tempo real se tornam uma poderosa ferramenta na análise e operação de sistemas elétricos (Rueda, 2019).

Seu uso pode se dar de diversas formas; *software-in-the-loop* (SIL), onde a simulação ocorre somente ao nível de *software*, sem a conexão de um *hardware* externo (Wontroba, 2020); e *hardware-in-the-loop* (HIL), que pode ser do tipo *control hardware-in-the-loop*, quando há a conexão de um controlador externo para o sistema virtual e o *power hardware-in-the-loop* (PHIL), quando há a conexão de um amplificador externo operando em potências maiores (Lundstrom, 2016). Somente as duas últimas possuem conexão com hardware externo (Wontroba, 2020), onde as demais são utilizadas principalmente para correções de modelagem e programação do elemento a ser simulado.

Para o trabalho proposto, primeiramente é utilizada a técnica de simulação em SIL, com posterior simulação em HIL. Com isto, é utilizado o simulador Typhoon HIL 604 em sua configuração 02. Esta configuração disponibiliza oito núcleos de processamento para o sistema-teste.

Para a etapa em HIL, é feita a conexão às entradas da *low-level interface* do relé de proteção de alimentadores da *Schweitzer Engineering Laboratories*, SEL-751. Para isto são utilizadas sete saídas para os sinais de tensão e corrente do sistema na subestação. Além disto o sinal do contato de *trip* é retornado para o simulador, fechando a malha com o *hardware*.

3. DESENVOLVIMENTO DA PLATAFORMA DE TESTES

Para a implementação da plataforma de testes através do ambiente de simulações da *Typhoon HIL Inc.* foi necessário desenvolver um *script* em linguagem C, para a aleatoriedade dos sinais, através do bloco “*Advanced C Function*”. Para o modelo, conforme descrito pelos autores em (Gautam and Brahma, 2013), os valores das resistências e tensões variam a cada $100\mu s$.

Foi utilizado um sistema-teste mínimo para os testes iniciais. Este sistema utiliza duas barras, com um gerador conectado em cada uma, onde os geradores são defasados angularmente para permitir o fluxo de potência entre as barras. Estes geradores são conectados através de uma linha de distribuição, que conta também com uma carga conectada em seu ponto médio, além do modelo de FAI. A descrição dos valores para a linha de distribuição e a carga são demonstrados na Tabela 2.

A partir disso, são amostrados os valores para o modelo de faltas de alta impedância, conforme descrito por Gautam e Brahma (2013). Para os parâmetros apresentados na Tabela 1, é medida uma corrente eficaz de falta na ordem de $107A$.

Na Fig. 4 é demonstrada a corrente de falta no sistema-teste com os parâmetros descritos em Gautam e Brahma (2013), sendo a Fig. 5 a demonstração da

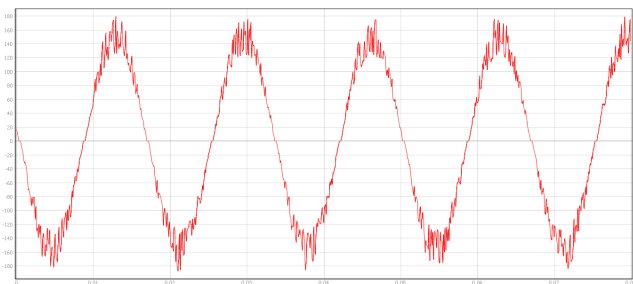


Figura 4. Corrente de falta vista através do osciloscópio virtual do simulador *Typhoon HIL Control Center*

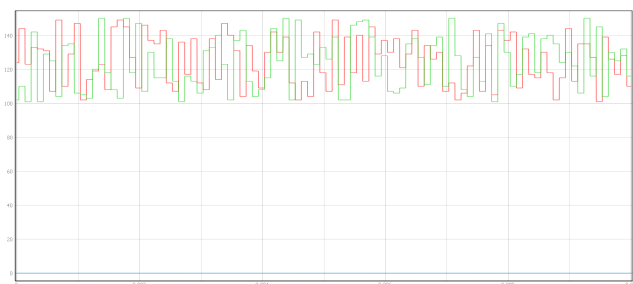


Figura 5. Aquisição através do osciloscópio virtual do simulador *Typhoon HIL Control Center* da aleatoriedade dos sinais de tensão no modelo de falta de alta impedância. Em vermelho o sinal de R_P e em verde o sinal de R_N

Tabela 2. Descrição da linha de distribuição e da carga do sistema-teste

Descrição	R [Ω]	L [mH]	C [nF]
Z_L	0,39539	11,35499	-
Z_{Carga}	10000,0	350,0	1,0

aleatoriedade dos sinais de comando para as resistências do modelo de FAI.

3.1 Validação do modelo virtual de Falta de Alta Impedância utilizando o simulador ATP Draw

Para o processo de validação do modelo de falta de alta impedância implementado no ambiente de simulações da *Typhoon HIL Inc.*, foi escolhido o simulador *ATP Draw*. Este simulador é amplamente difundido para aplicações em sistemas elétricos, sendo utilizado para o estudo de transitórios eletromagnéticos.

Uma vez que o objetivo é analisar as características da corrente de falta através de poucos períodos da rede, os simuladores de transitórios tornam-se grandes facilitadores do processo de validação do modelo para aplicações em tempo real. Com isto, após adquirir os valores para o mesmo sistema-teste, os mesmos são projetados e analisados no domínio do tempo e da frequência. A análise no domínio da frequência se dá devido a aleatoriedade dos sinais impossibilitar a comparação no domínio do tempo, conforme demonstrado na Fig. 6.

Para realizar esta análise, primeiramente é utilizada a transformada rápida de Fourier (FFT). A partir dos resultados retornados para esta, é feita a comparação dos valores de corrente de falta para as cinco primeiras

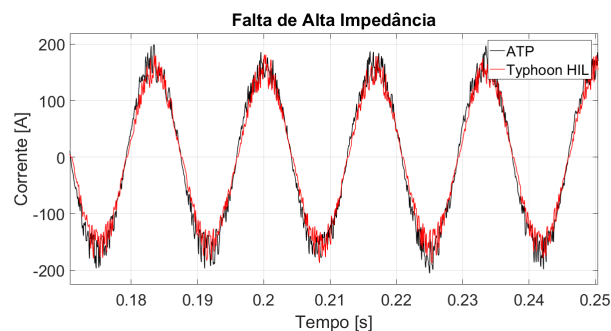


Figura 6. Comparação das correntes de falta utilizando os simuladores ATP Draw e Typhoon HIL604

componentes harmônicas ímpares, além das três primeiras harmônicas múltiplas de três.

A escolha pelas componentes múltiplas de três, como a 3^a, a 6^a e a 9^a harmônicas terem sua corrente com efeitos da corrente de sequência zero, o que sobrecarrega o condutor neutro. Já as componentes ímpares (3^a, 5^a, 7^a e 9^a) se dão visto que uma das características das FAIs é a não linearidade, onde ocorre a variação próximo à passagem por zero. Esta característica gera componentes ímpares, com destaque para a 3^a harmônica (Wontroba, 2020).

Na Fig. 7 é demonstrada a comparação espectral para a corrente de falta do sistema-teste entre os simuladores ATP Draw e Typhoon HIL604. Para validar o modelo implementado, é realizado, conforme (1), o cálculo da porcentagem da corrente de falta na componente de frequência, sendo seus valores indicados na Tabela 3. Nesta mesma tabela é demonstrada a diferença, conforme (2), para as componentes harmônicas indicadas. Para o cálculo da componente fundamental, foi utilizada como base a corrente eficaz total do sistema.

$$\%_{Frequencia}^{Simulador} = \frac{i_{RMS}^{@Freq}}{i_{RMS}^{@60Hz}} \quad (1)$$

$$Diferenca\% = \frac{|\%_{Frequencia}^{ATP} - \%_{Frequencia}^{Typhoon}|}{\%_{Frequencia}^{ATP}} \quad (2)$$

Tabela 3. Componentes harmônicas na corrente de falta para frequência fundamental de 60 Hz

Harmônica	ATP [%]	HIL [%]	Diferença [%]
Fundamental	70,4280	70,4113	0,0237
3 ^a	1,7230	1,7068	0,9364
5 ^a	0,8907	1,1986	34,5624
6 ^a	0,3911	0,1559	60,1490
7 ^a	0,6168	0,5780	6,2874
9 ^a	0,6257	0,6512	4,0770

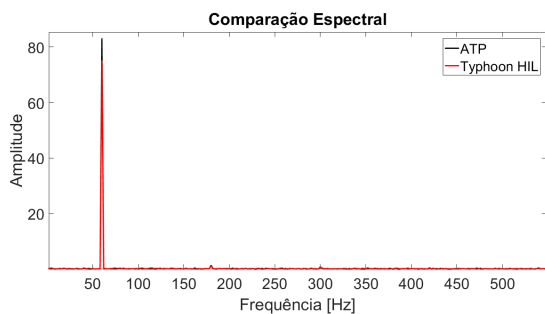


Figura 7. Comparação espectral para a corrente de falta utilizando os simuladores ATP Draw e Typhoon HIL604

3.2 Simulações com o Sistema-teste IEEE 33 Barras

Uma vez validado o modelo de forma virtual, o mesmo foi implementado no sistema-teste radial IEEE 33 Barras, conforme o diagrama esquemático demonstrado na Fig. 8.

A partir disto, foram escolhidos três pontos do sistema para alocar o modelo de FAI, sendo eles: barra 718, por ser o ponto mais distante da subestação; barra 725, por ser um final de ramal; e a barra 730, por ser na metade de outro ramal, sendo possível utilizar o modelo sem rompimento do condutor, com rompimento do lado da subestação e do lado da carga.

A partir disto, definiu-se o tipo de superfície para cada falta de alta impedância. Conforme apresentado por Kavi (2016) (2019), há a possibilidade de parametrizar as superfícies de contato apresentadas por Aucoin (1996). Com isto, foi definido o gramado seco como sendo a superfície de contato para a barra 718; para a barra 725 o concreto; já para a barra 730 a areia molhada. Na Tabela 4 são apresentados os parâmetros do modelo para cada superfície.

Tabela 4. Parâmetros de superfície para o modelo de Falta de Alta Impedância (Kavi, 2019)

Tipo	V_P [V]	V_N [V]	$R_P = R_N$ [Ω]	ΔR
Gramado seco	1200	1400	70	$\pm 10\%$
Concreto	1500	2000	23	$\pm 10\%$
Areia molhada	750	900	138	$\pm 10\%$

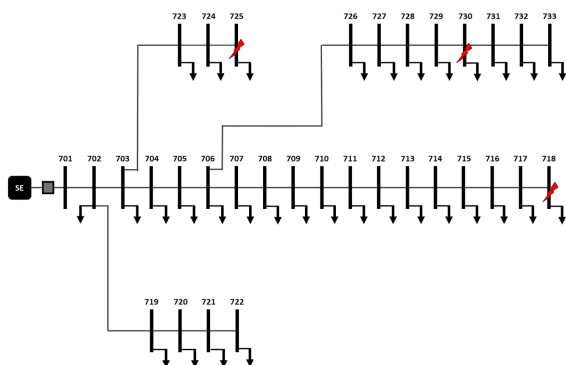


Figura 8. Sistema-teste radial IEEE 33 Barras, com pontos de FAI nas barras 718, 725 e 730

3.3 Parametrização da Função de Sobrecorrente Temporizada para o Sistema-teste IEEE 33 Barras

Além da análise das faltas de alta impedância, é parametrizada a função ANSI 51 (sobrecorrente temporizada) para comandar os disjuntores da subestação. A parametrização se dá a partir da menor corrente de curto-circuito franco monofásico-terra. Para o caso, esta corrente de curto-circuito ocorre na barra 718, onde a corrente lida pelo dispositivo de proteção aumenta de $1,0 p.u.$ ($193, 27A$) para $3,3086 p.u.$ ($638, 15A$). A partir disto, considerando uma curva C2 (muito inversa), define-se o dial de tempo para uma atuação em $0,15s$, conforme (3), o que resulta no ajuste em $0,1$. Na Tabela 5 são demonstrados os valores considerados para a determinação do tempo de operação da proteção de sobrecorrente temporizada.

$$td(I) = \frac{k}{\left(\frac{I}{I_{pickup}}\right)^\alpha - 1} * Dial \quad (3)$$

$$Dial = \frac{T}{\beta}$$

Tabela 5. Parâmetros para a proteção de sobrecorrente temporizada utilizando a curva muito inversa

Parâmetro	Valor
k	13,5V
α	1,0
β	1,5
$I_{nominal}$	193,27A
I_{pickup}	638,15A
Dial	0,1

Para realizar as simulações no ambiente da *Typhoon HIL*, são definidos os seguintes parâmetros de simulação: passo de $2\mu s$; taxa de execução do modelo de faltas de alta impedância em $100\mu s$; e simulador Typhoon HIL604 na configuração 02. A configuração 02 deste simulador possui: 8 núcleos, onde cada modelo de FAI foi alocado em um núcleo distinto.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As simulações com o sistema-teste IEEE 33 barras ocorreram em duas etapas: a primeira em *model-in-the-loop* (MIL) e a segunda em *hardware-in-the-loop* (HIL). Para a simulação em MIL foi analisada a atuação da função de sobrecorrente temporizada na ocorrência de faltas de alta impedância. Com isto foi possível verificar que em nenhuma das combinações possíveis para os três pontos de FAI resultou em atuação da função.

Conforme demonstrado na Fig. 9, ao somar-se as correntes de falta das três FAI, obtém-se $324,16A$. Isto quando adicionado à corrente nominal do sistema resulta em $517,43A$, valor inferior à corrente de *pickup* da proteção temporizada.

A partir disto é iniciado o processo de implementação do sistema em HIL. Primeiramente foram extraídos os valores para as três correntes de falta (Fig. 10) para monitoramento, além das três correntes e três tensões na

subestação. Na Fig. 11 são demonstradas as três correntes na subestação para a ocorrência simultânea das três FAIs.

Após isto, são definidos os valores dos transformadores de corrente (TC) e tensão (TP) para ofertar os sinais ao relé de proteção. Com isto foram escolhidas as relações de espiras para o TP em 115 e para o TC em 40. O relé utilizado é o SEL-751, da empresa *Schweitzer Engineering Laboratories* (Schweitzer Engineering, 2018). A sua utilização se deu considerando que o equipamento possui a função de detecção de faltas de alta impedância (Schweitzer Engineering, 2016).

Para a utilização do relé junto ao simulador em tempo real, foi necessária a utilização da *low-level interface*, com o sinal posteriormente retornando ao simulador conforme o diagrama da Fig. 12. Na Fig. 13 é apresentada a bancada de testes com o IED utilizada, o simulador e o osciloscópio.

Uma vez ativa a função de detecção de faltas de alta impedância no IED junto à função de proteção de sobrecorrente temporizada, a plataforma proposta é testada através da detecção pelo IED quando submetidas às combinações de FAI no sistema-teste. A partir disto, conforme demonstrado nas Tabelas 6 e 7, foram identificadas todas as ocorrências de falta de alta impedância testadas, com e sem rompimento dos condutores.

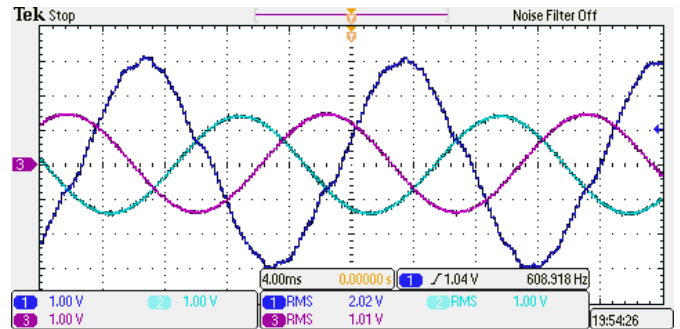


Figura 11. Três correntes (em p.u.) na Subestação para a ocorrência simultânea das três FAIs



Figura 12. Diagrama do sistema implementado

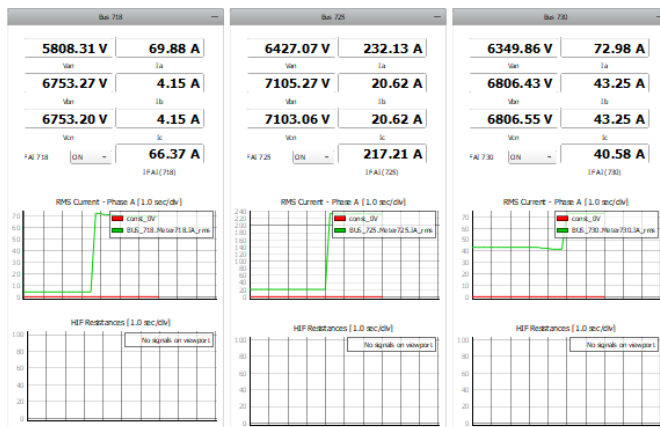


Figura 9. Painel SCADA para ativação das faltas de alta impedância

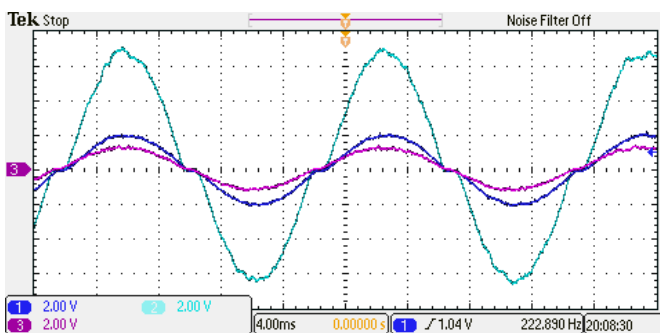


Figura 10. Correntes de Falta vistas através de osciloscópio de bancada. O Ch. 1 contém a FAI na barra 718; o Ch. 2 contém a FAI na barra 725; o Ch. 3 contém a FAI na Barra 730

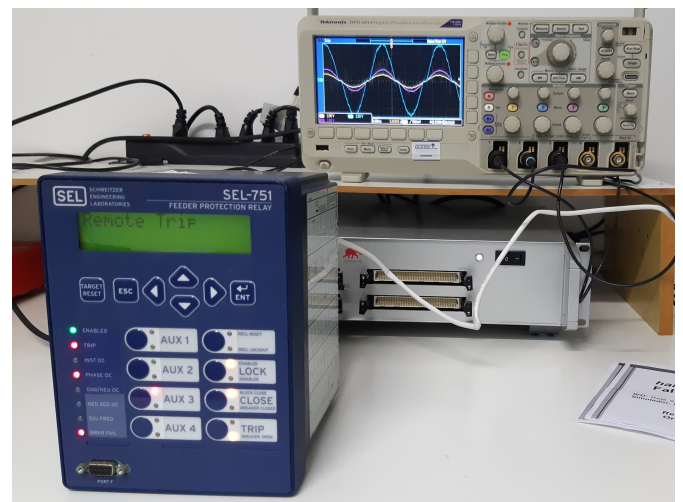


Figura 13. Bancada de testes com o relé SEL-751 e o simulador Typhoon HIL604

A detecção pelo IED se torna o principal meio de validação do modelo. Sendo um equipamento de amplo uso para a proteção de alimentadores em sistemas de distribuição, o modelo ter sensibilizado o mesmo em 100% das ocorrências torna a plataforma altamente confiável para uso em simulações em tempo real na metodologia de *hardware-in-the-loop*.

Tabela 6. Atuações do relé SEL-751 para as faltas de alta impedância nas barras 718, 725 e 730

B718	B725	B730	SEL-751
Normal	Normal	Normal	Não atuou
Normal	Normal	FAI	Atuou
Normal	FAI	Normal	Atuou
Normal	FAI	FAI	Atuou
FAI	Normal	Normal	Atuou
FAI	Normal	FAI	Atuou
FAI	FAI	Normal	Atuou
FAI	FAI	FAI	Atuou

Tabela 7. Hipóteses de rompimento do condutor na FAI da barra 730

Rompimento do condutor			SEL-751
Sem	Lado da SE	Lado da carga	
-	-	FAI	Atuou
-	FAI	-	Atuou
FAI	-	-	Atuou

5. CONCLUSÃO

No presente trabalho foi apresentado o desenvolvimento de uma plataforma de testes em tempo real para dispositivos de proteção que contém funções de detecção de Faltas de Alta Impedância. A partir da difusão de plataformas de testes virtuais, pode-se ampliar a implantação de algoritmos de detecção destes tipos de eventos, uma vez que há a possibilidade de testar os dispositivos e funções durante a sua fase de desenvolvimento.

Os resultados alcançados pela plataforma foram excelentes, sensibilizando o IED utilizado em 100% dos casos. Quando realizada a análise comparativa com o modelo implementado no simulador ATP Draw, os resultados foram satisfatórios. O modelo quando implementado também manteve todas as características da forma de onda da corrente de falta, estando de acordo com as características, com destaque para a 3ª harmônica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo aporte financeiro no desenvolvimento da presente pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

Aucoin, B. M., and Jones, R. H. (1996). High Impedance Fault Detection Implementation Issues. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, pp. 139-148

Cassol, J. A., et al (2018). Desenvolvimento de uma Plataforma de Testes Práticos de Algoritmos de Proteção para o SEP. *11th Seminar on Power Electronics and Control*. Santa Maria, RS.

Emanuel, A. E., and Gulachenski, E. M. (1990). High Impedance Fault Arcing on Sandy Soil in 15kV Distribution Feeders: Contributions to the Evaluation of the Low Frequency Spectrum. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, pp. 676-686.

Farias, P. E. (2013). *Detecção e Classificação de Transitórios em Redes de Distribuição para Identificação de Faltas de Alta Impedância*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

Farias, P. E. (2013). *Método para Estimação da Distância de Faltas de Alta Impedância em Redes de Distribuição de Energia Elétrica Considerando Diferentes Tipos de Solo*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

Gautam, S., and Brahma, S. M. (2013). Detection of High Impedance Fault in Power Distribution Systems Using Mathematical Morphology. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 28, pp. 1226-1234

Gebran, A. P. (2014). *Manutenção e Operação de Equipamentos de Subestações*. Bookman, Porto Alegre, RS.

Horowitz, S. H., and Phadke, A. G. (2014). *Power System Relaying*. 4th ed. John Wiley and Sons Ltd, Chichester, SXW.

Hou, D. (2009). High-Impedance Fault Detection - Field Tests and Dependability Analysis. *36th Annual Western Protective Relay Conference*. Spokane, WA, October 20-22, 2009.

Kavi, M., Mishra, Y., and Vilathgamuwa, M. D, (2018). High Impedance Fault Detection and Classification in Power System Distribution Networks using Morphological Fault Detector Algorithm. *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 12, pp. 3699-3710.

Kavi, M. (2019). *Smart Protection System for Future Power System Distribution Networks with Increased Distributed Energy Resources*. Ph.D Thesis, Queensland University of Technology, Brisbane City, QLD.

Liu, J. G., et. al (2016). *Fault Location and Service Restoration for Electrical Distribution Systems*. John Willey Sons, Nashville, TN.

Lundstrom, B. et. al (2016). Evaluation of System-Integrated Smart Grid Devices using Software and Hardware-in-the-Loop. *2016 IEEE Power Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*. Minneapolis, MN.

Mamede Filho, J., and Mamede, D. R. (2011). *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. Grupo GEN - LTC, Rio de Janeiro, RJ.

PROCOBRE (2001). *Harmônicas nas Instalações Elétricas*. Instituto Brasileiro do Cobre, São Paulo, SP.

Rueda, O. A. S. (2019). *Simulador em Tempo-Real Baseado na Integração de Módulo FPGA e CPUs para Avaliação de Controladores Embarcados de Conversores Eletrônicos de Potência*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

Schweitzer Engineering Laboratories (2016). *High-Impedance Fault Detection With SEL Arc Sense Technology (AST)*.

Schweitzer Engineering Laboratories (2018). *SEL-751 Relay: Feeder Protection Relay*. Instruction Manual

Wontroba, A. (2020). *Metodologia de Detecção e Classificação de Faltas de Alta Impedância em Redes de Distribuição: Implementação em Hardware e Validação por meio de Simulação Digital em Tempo Real*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.