

SIMULADOR COMPUTACIONAL APLICADO NO ENSINO DE PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

Marcelo Costa Lima – marcelo8736@hotmail.com

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica
Caixa Postal 6001 - Campus do Pici
60.455-760 – Fortaleza – CE

João Paulo Barros Figueiredo – jpb91@hotmail.com

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica
Caixa Postal 6001 – Campus do Pici
60.455-760 – Fortaleza – CE

Lucas Martins Belmino – lucas.belmino@hotmail.com

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica
Caixa Postal 6001 – Campus do Pici
60.455-760 – Fortaleza – CE

Giovanni Cordeiro Barroso – gcb@fisica.ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Física
Caixa Postal 6030 – Campus do Pici
60.455-970 – Fortaleza – CE

Raimundo Furtado Sampaio – rfurtado@dee.ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica
Caixa Postal 6001 – Campus do Pici
60.455-760 – Fortaleza - CE

Ruth Pastôra Saraiva Leão – rleao@dee.ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica
Caixa Postal 6001 – Campus do Pici
60.455-760 – Fortaleza - CE

Resumo: *O transformador de potência é um dos equipamentos mais importantes em todos os setores do sistema de potência, desde a geração até a utilização da energia elétrica. A ausência desse ativo em função de manutenção ou de falta no sistema elétrico, até mesmo por curto período, pode resultar em problemas de larga escala, sobretudo no que diz respeito à integridade das pessoas e dos demais equipamentos em funcionamento. Visando garantir a máxima confiabilidade do sistema, os transformadores de potência são protegidos por meio de proteções intrínsecas, relés que fazem parte do seu projeto, e proteções externas, entre os quais estão relés de sobrecorrente e relé diferencial. A proteção diferencial do transformador é mais cara, mais confiável e mais complexa do ponto de vista de métodos de cálculo, instalação e operação. Por esse motivo, o entendimento dos fatores que influenciam no método de cálculo dos ajustes da proteção diferencial é essencial para garantir a confiabilidade do sistema elétrico. O objetivo desse artigo é apresentar um simulador de proteção diferencial de transformador, desenvolvido em JAVA. O simulador proposto vem sendo utilizado como ferramenta de apoio ao ensino de proteção, apresentando-se como um agente facilitador no aprendizado da função de proteção diferencial.*

Palavras-chave: *Transformador de potência. Proteção. Simulador de proteção. Ensino de Engenharia Elétrica.*

1 INTRODUÇÃO

Com a expansão de complexidade dos sistemas elétricos de potência (SEP), a necessidade de suprimento de energia elétrica de forma confiável e contínua, exige a aplicação de sistemas de proteção mais seguros que possam acompanhar as evoluções tecnológicas associadas ao setor.

Uma das maiores provas disso está no processo irreversível de substituição de tecnologias de proteção associadas a relés eletromecânicos para relés digitais. Esta transição provocou mudanças em paradigmas antigos de ensino de proteção, traduzidos em laboratórios obsoletos e ementas defasadas às exigências de profissionais do mercado de trabalho. Visando reduzir os altos custos com equipamentos laboratoriais e a modernização do ensino de proteção, os *softwares* de simulação são amplamente utilizados (BRITO, 2012).

Nos últimos anos muitas ferramentas de simulação têm sido desenvolvidas para apoio ao ensino de proteção de sistemas elétricos (BEZERRA, 2008), (SILVA et al. 2011), (PAIVA, 2014), (KHALIL, 2014). O uso dessas ferramentas, já presentes na prática docente, sobretudo na área tecnológica, oportuniza um aprendizado mais significativo e instiga os alunos na construção de novos conhecimentos.

Em Silva et al. (2011) e Bezerra et al. (2008), os autores apresentam simuladores para treinamento de proteção de sistemas elétricos de subestação distribuidora de energia, desenvolvidos em DELPHI e JAVA, respectivamente. Em Paiva et al. (2014) os autores apresentam o desenvolvimento de um sistema simulador de treinamento de proteção de subestação da rede básica.

No complexo cenário do SEP, o transformador de potência, responsável pela conversão dos níveis de tensão de operação do sistema e pelo suprimento de uma grande quantidade de consumidores de média e baixa tensão, é o equipamento mais caro e mais importante de uma subestação distribuidora de energia. A retirada desse equipamento de serviço, em razão de falhas internas ou externas, causa ausência do fornecimento de energia elétrica a todo o bloco de carga alimentado, gerando incontáveis prejuízos aos agentes consumidores (ALSTOM, 2011).

Os transformadores de potência são protegidos por meio de proteções intrínsecas, que fazem parte do projeto como relé de gás, válvula de alívio de pressão, temperatura do óleo, temperatura do enrolamento e nível de óleo, e por meio de proteções externas, entre as quais estão relés de sobrecorrente e diferencial. De acordo com o submódulo 2.6 dos Procedimentos de Rede, o sistema de proteção unitário ou restrito (diferencial) é destinado a detectar e eliminar, seletivamente e sem retardo de tempo intencional, falhas que ocorram somente no elemento protegido (ONS, 2011). A função de proteção diferencial é identificada, segundo o *American National Standards Institute* (ANSI), com o número 87.

Por esse motivo, o domínio dos fatores que influenciam no método de cálculo dos ajustes e na instalação da proteção diferencial é essencial para garantir a confiabilidade do SEP e para o efetivo processo de ensino e aprendizagem nas aulas de proteção de sistemas elétricos. Entre estes fatores que influenciam na confiabilidade do sistema de proteção diferencial estão: as ligações primária e secundária, deslocamento angular, corrente de magnetização e comutador de derivação sob carga do transformador de potência, bem como as ligações, relações nominais e erros dos transformadores de corrente (LEONEL; MANTOVANI, 2014).

Dentro desse contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar um simulador de proteção diferencial de transformador, desenvolvido em JAVA, e utilizado como ferramenta de apoio ao ensino de proteção.

Este artigo está organizado da seguinte forma: na seção 2, é apresentada uma explanação sobre o funcionamento da proteção diferencial, na seção 3 é apresentada a descrição das etapas

de modelagem e implementação do simulador de proteção diferencial proposto, na seção 4 são apresentadas as etapas de entrada de dados e resultados da simulação da função diferencial do transformador com estudo de caso e por último, na seção 5, são apresentadas as considerações finais e as perspectivas de aprimoramento da ferramenta no suporte ao ensino de proteção.

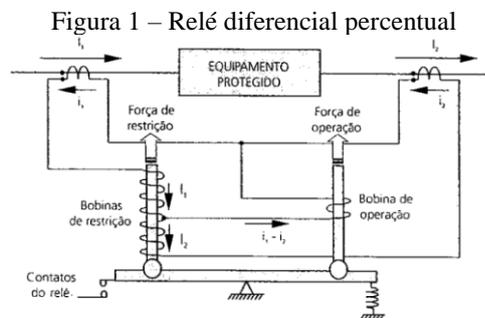
2 PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

A lógica de operação da proteção diferencial do transformador de potência é baseada na diferença entre as correntes de seus terminais primário e secundário, refletidas através de transformadores de corrente (TC) para níveis menores, compatíveis com a suportabilidade de relés. Uma vez que essa diferença alcance valores acima do patamar pré-definido e parametrizado no relé, a ação da proteção deve ser sensibilizada. Entretanto, TCs reais estão sujeitos a diferentes erros de medição que podem ser introduzidos por diferenças nas características das faltas, na construção do equipamento e nas suas curvas de saturação.

Para mitigar estes erros, utilizam-se relés com dois tipos de enrolamentos, denominados enrolamento de operação e enrolamento de restrição. Correntes no enrolamento de operação são monitoradas para atuação da proteção em condições de falta, enquanto correntes no enrolamento de restrição bloqueiam essa atuação (KINDERMANN, 2014).

Fisicamente, em relés eletromecânicos, esta característica é identificada nos circuitos magnéticos, considerando que a força magnetomotriz dos enrolamentos de operação e restrição está disposta de maneira a gerar um equilíbrio de torques em condições normais. Relés com esse princípio de operação, abordados neste trabalho, são nomeados de relés diferenciais percentuais.

Na Figura 1 é apresentado um diagrama esquemático que ilustra o princípio de funcionamento do relé diferencial percentual.



Fonte: (LIGHT, 2007)

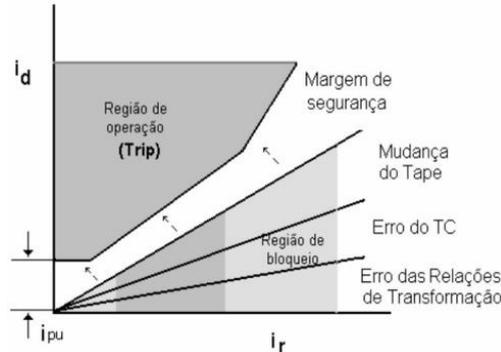
Para facilitar a identificação do ponto de atuação da proteção diferencial, a curva de operação pode ser utilizada como referência. A corrente necessária para sensibilizar o relé cresce linearmente ao passo que a corrente de falta também cresce. Esse aumento também é influenciado pelos erros dos TCs, pela mudança de *TAPE* relacionada ao nível de tensão de operação do transformador de potência e por erros na relação de transformação do transformador de potência.

Visando definir a curva de operação, são necessários dois ajustes. O primeiro deles é direcionado à inclinação da curva (*slope*) e possui valores típicos de 10% a 45% para transformador de potência. O segundo ajuste faz referência à definição da corrente mínima de atuação (*pick-up*), tolerando-se uma pequena corrente diferencial para evitar operação indevida da proteção. Em geral, este valor é definido pelo fabricante do relé (KINDERMANN, 2014).

Na Figura 2 é apresentada a curva típica de operação da proteção diferencial. Conforme pode ser observado na Figura 2, na abscissa é representada a corrente de restrição (i_r) e na

ordenada é representada a corrente diferencial (i_d). É possível notar também a influência dos erros na região de bloqueio.

Figura 2 – Curva de operação da proteção diferencial percentual



Fonte: (BERNARDES, 2006)

3 METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL PERCENTUAL

Para implementar a metodologia de desenvolvimento da proteção diferencial no simulador, utilizou-se a linguagem de programação JAVA. Esta linguagem possui como vantagens a execução em multiplataformas, a portabilidade, a orientação a objetos e a livre distribuição, permitindo que melhorias sejam feitas constantemente (SILVA, 2011). Dessa forma, o simulador tem característica modular e está apto à inclusão de outros algoritmos da função 87 de diferentes fabricantes.

Na versão atual, a modelagem matemática implementada no simulador teve como base o procedimento de ajuste estabelecido no manual de um relé numérico da ABB (2009), sendo apresentada a seguir:

- 1) Determinam-se as correntes de carga máxima dos lados de alta (Equação (1)) e de baixa (Equação (2)) do transformador de potência. V_{AT} e V são as tensões de linha dos lados de alta e de baixa, respectivamente. S representa a potência elétrica do transformador.

$$I_{cmaxAT} = \frac{S_{max}(MVA)}{\sqrt{3} \cdot V_{AT}} \quad (1)$$

$$I_{cmaxBT} = \frac{S_{max}(MVA)}{\sqrt{3} \cdot V_{BT}} \quad (2)$$

- 2) Determinam-se as máximas correntes de falta passante para os lados de alta (Equação (3)) e baixa tensão (Equação (4)), respectivamente. $Z\%$ é a impedância percentual do transformador de potência.

$$I_{FPAT} = \frac{S (MVA)}{\sqrt{3} \cdot V_{AT} \cdot Z\%} \quad (3)$$

$$I_{FPBT} = \frac{S (MVA)}{\sqrt{3} \cdot V_{BT} \cdot Z\%} \quad (4)$$

- 3) Escolhe-se a relação de transformação dos TCs (RTC) para dar aproximadamente 5 A de corrente secundária na máxima corrente de carga, mantendo a corrente máxima de falta externa em menos de 100 amperes no secundário.
- 4) Calculam-se as correntes de carga, Equação (5) e Equação (6), nos secundários dos TCs.

$$I_{cmaxATS} = \frac{I_{cmaxAT}}{RTC_{AT}} \quad (5)$$

$$I_{cmaxBTS} = \frac{I_{cmaxBT}}{RTC_{BT}} \quad (6)$$

- 5) Calculam-se as correntes secundárias dos TCs, Equação (7) e Equação (8), que passam pelos terminais do relé diferencial:

$$IHR = I_{cmaxATS} \cdot FMCEAT \quad (7)$$

$$ILR = I_{cmaxBTS} \cdot FMCEBT \quad (8)$$

$FMCEAT$ e $FMCEBT$ são os fatores de multiplicação do Quadro 1 para a compensação externa do efeito das ligações dos TCs.

- 6) Calculam-se as correntes de restrição usadas dentro do relé após aplicada a compensação interna de fase:

$$IHAR = IHR \cdot FMCIAT \quad (9)$$

$$ILAR = ILR \cdot FMCIBT \quad (10)$$

$FMCIAT$ e $FMCIBT$ são os fatores de multiplicação para a compensação interna do Quadro 1.

Quadro 1 – Fatores de compensação interna e externa da função 87 por meio das ligações dos TCs

Ligação do Transformador		Ligação de TC		Fator de Multiplicação de Compensação Interna		Fator de Multiplicação de Compensação Externa	
Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa
Estrela	Estrela	Triângulo	Triângulo	1	1	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$
		Estrela	Estrela	1	1	1	1
Triângulo	Triângulo	Estrela	Estrela	1	1	1	1
		Estrela	Triângulo	$\sqrt{3}$	1	1	1
Triângulo	Estrela	Triângulo	Estrela	1	1	$\sqrt{3}$	1
		Estrela	Triângulo	1	1	1	$\sqrt{3}$
Triângulo	Estrela	Estrela	Estrela	1	$\sqrt{3}$	1	1
		Estrela	Triângulo	1	1	1	$\sqrt{3}$

Fonte: (ABB, 2009)

- 7) Selecionam-se os ajustes de derivação dos lados de alta e de baixa arredondando IHR e $ILAR$, respectivamente ao valor mais próximo de 0,1 A. Se cada valor for maior ou menor que a faixa de derivação disponível, nesse caso, forma-se a relação de dois valores e ajustam-se as derivações na mesma relação.
- 8) Seleciona-se a curva característica diferencial percentual (*slope*) em valores de 15% a 60% com incrementos de 5%.
- 9) Seleciona-se a corrente mínima de operação entre 0,2 e 1 por unidade.
- 10) Seleciona-se o Ajuste Diferencial Instantâneo de Ajuste Alto sem Restrições de maneira que o relé de proteção não irá disparar com a corrente de energização do transformador. Se a corrente de energização do transformador não for conhecida, pode-se utilizar um valor entre 6 e 20 múltiplos da corrente de operação por unidade.

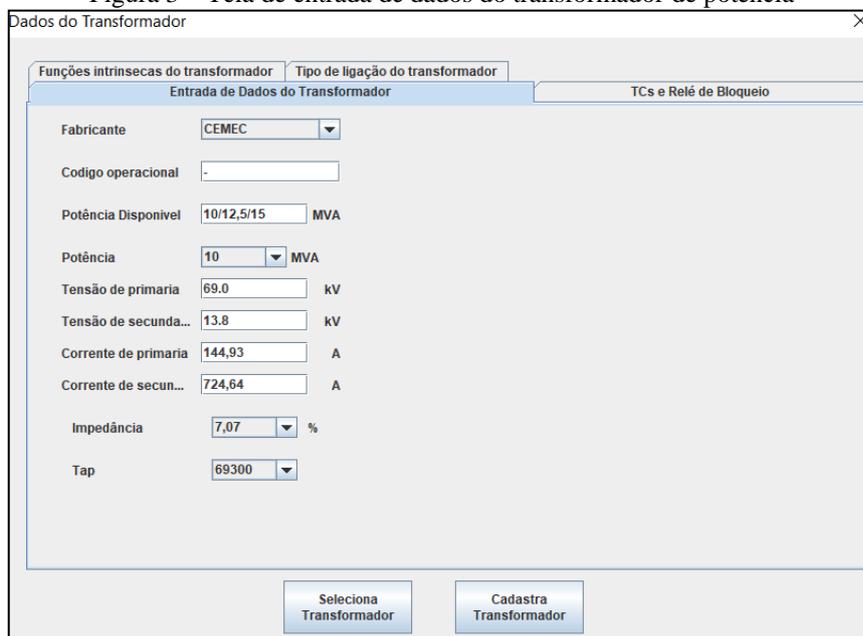
4 SIMULADOR DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL DO TRANSFORMADOR

Nesta seção é apresentado o simulador com suas respectivas telas de entradas de dados para simulação da atuação da proteção diferencial do transformador de potência, a tela da curva da proteção diferencial gerada pelo simulador e as telas dos resultados de simulação para as faltas interna e externa à zona de proteção diferencial.

O simulador permite ao usuário a definição dos parâmetros da proteção diferencial de transformador de potência para subestações de distribuição nas classes de tensão primária e secundária, respectivamente, de 72,5 kV e de 15 kV. Para fins de exemplificação de simulação, considera-se o estudo de caso de uma subestação com as seguintes características: a potência do transformador é de 10/12,5/15 MVA, sendo as tensões nominais primária de 69 kV (ligação em delta) e secundária de 13,8 kV (ligação em estrela). A impedância percentual do transformador de potência é de 7,07% e o *TAPE* de operação é de 69,3 kV. Além disso, os TCs possuem RTC nos terminais primário e secundário do transformador de potência, respectivamente, de 400-5 e 1200-5. Por fim, a proteção diferencial tem uma corrente de atuação mínima de 0,4 por unidade (pu) (40%), uma corrente de pico máxima de 8 por unidade (80%) e uma inclinação de 30%.

Na Figura 3 é ilustrada a tela de configuração de dados do transformador de potência para o estudo de caso. Nela o usuário pode selecionar entre fabricantes típicos, bem como escolher a potência nominal entre as disponíveis. Além disso, o simulador exibe as tensões e correntes nominais primária e secundária para o transformador selecionado. Os valores de impedância percentual e *TAPE* também podem ser selecionados de acordo com as opções disponíveis.

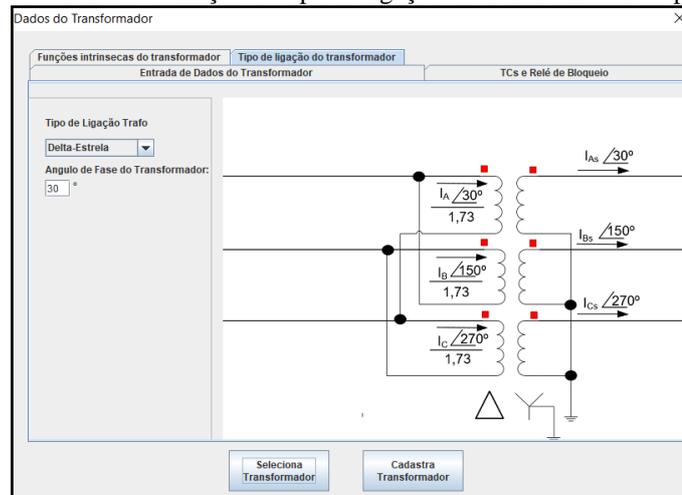
Figura 3 – Tela de entrada de dados do transformador de potência



Fonte: (FIGUEIREDO, 2016)

Em seguida, define-se o tipo de ligação do transformador. O *software* permite a seleção nas topologias estrela-estrela, estrela-delta, delta-delta e delta-estrela. Para subestações com as características apresentadas na Figura 3, o transformador de potência é ligado na configuração delta-estrela e apresenta um defasamento angular de 30°. Na Figura 4 é apresentada a tela de definição do tipo de ligação do transformador de potência.

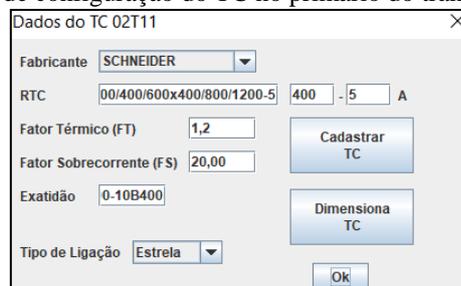
Figura 4 – Tela de definição do tipo de ligação do transformador de potência



Fonte: (FIGUEIREDO, 2016)

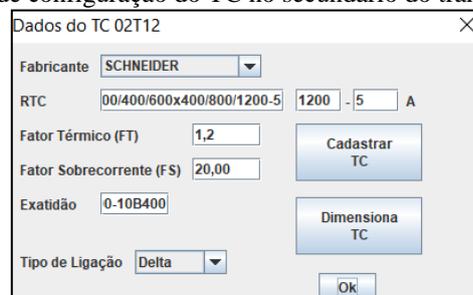
Após selecionados os dados de entrada do transformador de potência, clica-se na aba “TCs e Relé de Bloqueio” para a escolha dos TCs referentes aos terminais do transformador de potência definido na Figura 3. Nas Figuras 5 e 6 são representadas, respectivamente, as telas de configuração dos TCs dos lados de tensão primária e secundária do transformador de potência. Nestas telas o usuário pode definir o fabricante, a RTC e os fatores térmico (FT) e de sobrecorrente (FS) para garantir que o TC opere sem saturar. Além desses parâmetros, é possível definir a classe de exatidão e o tipo de ligação do TC.

Figura 5 – Tela de configuração do TC no primário do transformador de potência



Fonte: (FIGUEIREDO, 2016)

Figura 6 – Tela de configuração do TC no secundário do transformador de potência

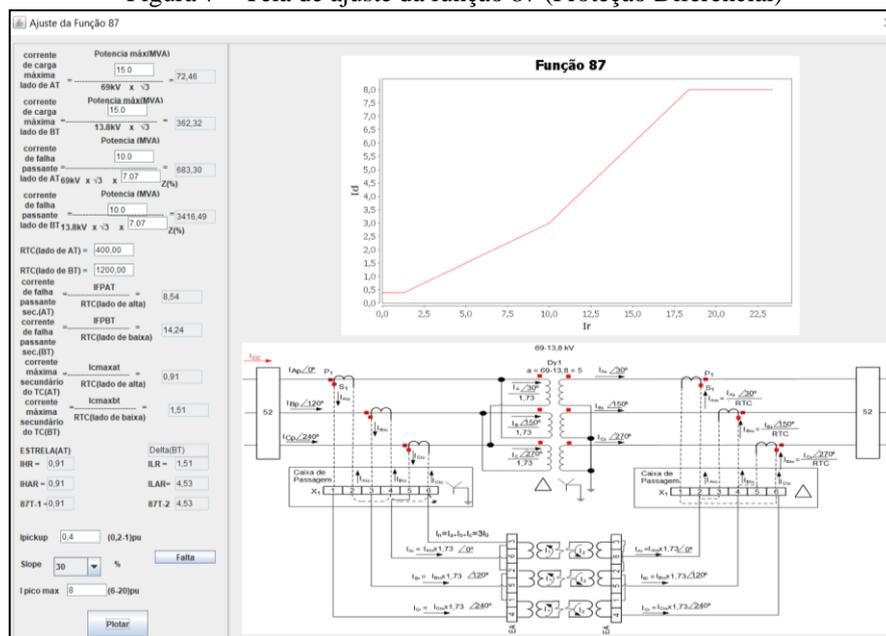


Fonte: (FIGUEIREDO, 2016)

É importante observar que, para um transformador de potência de ligação delta-estrela, o fechamento dos TCs deve ser em estrela-delta por motivo de compensação do erro ocasionado pela defasagem angular do próprio transformador de potência.

Concluída a configuração do transformador de potência e dos TCS, procede-se à plotagem da curva de operação da proteção diferencial percentual. A tela apresentada na Figura 7 mostra todos os parâmetros necessários à modelagem da curva de operação e que foram demonstrados anteriormente na seção 3. Nesta tela, além do usuário identificar os valores de corrente utilizados na proteção pelo relé, é possível observar o esquema trifilar de ligação do transformador de potência, dos TCs e elementos disjuntores. A curva de operação considera os parâmetros de corrente mínima de atuação (*pick-up*), inclinação (*slope*) e corrente de pico máxima para a plotagem, sendo definidos pelo usuário na tela. Os valores e a curva apresentada nesta tela são referentes ao transformador de potência da Figura 3.

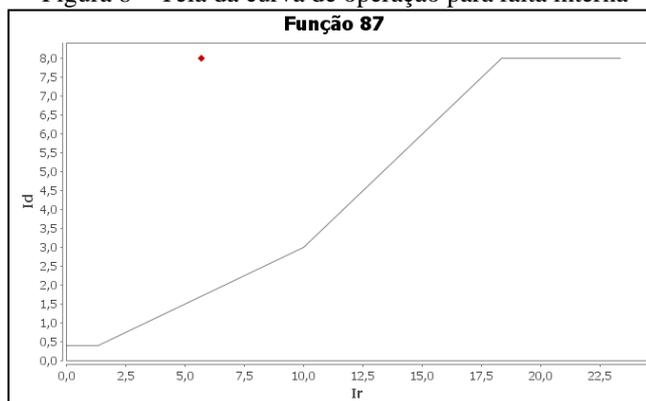
Figura 7 – Tela de ajuste da função 87 (Proteção Diferencial)



Fonte: (FIGUEIREDO, 2016)

Por fim, para verificar o comportamento da proteção diferencial percentual na curva de operação, o *software* permite ao usuário a seleção do tipo de falta, clicando-se no botão “Falta” presente na tela da Figura 7. As opções apresentadas são para simulação de falta dentro da zona de operação da proteção diferencial (interna ao transformador de potência) e fora da zona de operação (externa ao transformador de potência). As curvas plotadas nas Figuras 8 e 9 demonstram, respectivamente, os pontos da curva de operação para faltas internas e externas.

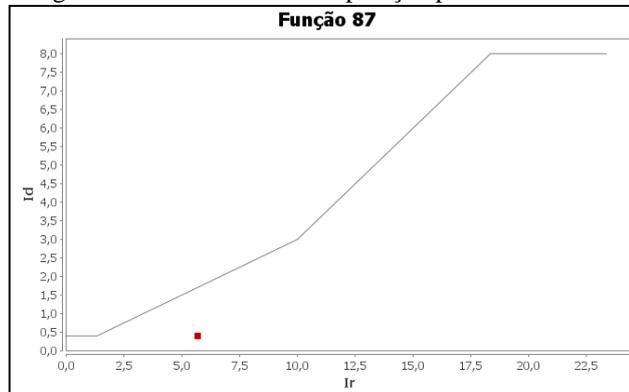
Figura 8 – Tela da curva de operação para falta interna



Fonte: (FIGUEIREDO, 2016)

Como esperado, para a falta interna ao transformador de potência, o ponto na curva de operação está localizado na região de operação, fazendo com que o relé acione a abertura dos disjuntores e isole o equipamento da falta.

Figura 9 – Tela da curva de operação para falta externa



Fonte: (FIGUEIREDO, 2016)

Por outro lado, na simulação de falta externa ao transformador de potência, o ponto na curva de operação está situado na região de restrição, evitando a abertura dos disjuntores. Nesse caso, as proteções externas ao transformador de potência deverão avaliar a operação de acionamento dos elementos de disjunção.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentado um simulador desenvolvido em JAVA para utilização como apoio ao ensino da proteção diferencial de transformadores de potência. Para tanto, foram apresentados inicialmente conceitos fundamentais acerca da operação da proteção diferencial.

Em seguida, o modelo de cálculo da proteção diferencial percentual foi demonstrado, tomando como base o relé ABB 2000R. Após a modelagem, o simulador foi apresentado juntamente com um estudo de caso. No simulador, demonstrou-se a parametrização das características de operação do transformador de potência e dos transformadores de corrente. Ao final, foram simuladas faltas de origem interna e externa ao transformador de potência, permitindo avaliar o comportamento da proteção diferencial em conformidade com a curva de operação.

Dessa forma, conclui-se que o simulador proposto explora todo o conteúdo necessário para o domínio de proteção diferencial, tornando-se uma importante ferramenta didática para o ensino. O uso do simulador proposto oportuniza ao aluno o desenvolvimento de pensamento crítico em razão de oferecer liberdade de experimentação. Além disso, a utilização de ferramentas virtuais elimina custos elevados com equipamentos físicos, proporcionando um ensino acessível e de qualidade. O simulador abordado neste trabalho vem sendo utilizado em curso de instituição de ensino superior e é prevista a implementação de novos parâmetros de proteção diferencial para outros equipamentos do SEP como geradores e linhas de transmissão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB. **ABB Unidade de Proteção de Transformador 2000R**. 2009. Disponível em: <<https://library.abb.com/share?dk=Software&dk=Software>>. Acesso em: 28 abr. 2019.

ALSTOM. **Networking protection & automation guide**. 2. ed. Saint-Ouen: Alstom Grid, 2011. 508 p.

BEZERRA, H. et al. **Sistema Simulador para Treinamento Presencial e a Distância de Operação da Proteção de Sistemas Elétricos**, Universidade Federal do Ceará – UFC, 2008.

BRITO, N. S. D. et al. **Proposição do uso de softwares de simulação em proteção de sistemas elétricos**. XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia - COBENGE, 2012.

FIGUEIREDO, J. P. B. **Desenvolvimento de novas funcionalidades para o simulador de treinamento presencial e a distância em operação e proteção de sistemas elétricos**. 2016. 73 f. TCC - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

KINDERMANN, G. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 2. ed. Florianópolis: UFSC, 110 p. 2014.

LEONEL, P. H. G.; MANTOVANI, J. R. S. Belo Horizonte. **Proteção diferencial de transformadores utilizando a transformada Wavelet**. Belo Horizonte: XX Congresso Brasileiro de Automática, 8 p. 2014.

LIGHT. **Proteção de Sistemas Elétricos. Manual para treinamento do corpo de operadores de subestação**. 2007.

PAIVA, A. T. S. **Ferramenta de suporte ao ensino em proteção de sistemas elétricos de potência**. Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia - COBENGE. 2014.

SILVA, C. H. et al. **Desenvolvimento de um laboratório virtual para capacitação tecnológica a distância em proteção de sistemas elétricos**. XXXIV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia - COBENGE, 2011.

COMPUTER SIMULATOR APPLIED IN EDUCATION OF POWER TRANSFORMER DIFFERENTIAL PROTECTION

Abstract: *The power transformer is one of the most important components in all sectors of the power system, from generation to the use of electric power. Long-term performance does not have to be performed in function of physical performance. To ensure maximum system reliability, power transformers are protected through intrinsic protections, the programs that are part of your design, and external protections, which are related to overcurrent and differential. Transformer differential protection is more expensive, more reliable and more complex from the point of view of calculation, installation and operation methods. For this reason, understanding the factors that influence the method of safety adjustment is essential to ensure the reliability of the electrical system. The purpose of this paper is to show a transformer differential memory simulator developed in JAVA. The simulator that has been used as a tool to support the teaching of activation, presenting itself as a non-learning facilitating agent of the differential protection function.*

Key-words: *Power transformer. Protection. Protection simulator. Electrical engineering teaching.*