

Comparação entre o Diferencial Percentual e o Plano Alfa Aplicados à Proteção de Transformadores de Potência

Renan Barcelos dos Santos*. Fabiano Gustavo Silveira Magrin**

*A1 Engenharia, Araucária, PR 83707-090

Brasil (Tel: +55 (41) 3616-3616; e-mail: renan.santos@a1.com.br).

**Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR 80230-901 Brasil (e-mail: magrin@professores.utfpr.edu.br)

Abstract: The alpha plane consists of a geometric representation of the ratio of the currents entering and leaving a protection zone in a complex plane. The relay manufacturer Schweitzer Engineering Laboratories uses this plan in its line differential relays, but not for application in power transformers. Therefore, this paper presents a comparison between the alpha plane and the percentage differential applied to the protection of power transformers. The alpha plane was implemented in a SEL-451 protection relay through programming in the relay's proprietary language. The use of the differential element through the alpha plane resulted in a significant reduction in the protection actuation time. With this reduction in the operating time, it is expected to significantly decrease the electrical and mechanical damage caused to the transformer during faults, considering the reduction in the time the equipment is exposed to faults.

Resumo: O plano alfa consiste em uma representação geométrica da relação entre correntes entrando e saindo de uma zona de proteção em um plano complexo. A fabricante de relés *Schweitzer Engineering Laboratories* utiliza este plano em seus relés diferenciais de linha, mas não para aplicação em transformadores de potência. Portanto, este artigo apresenta a comparação entre o plano alfa e o diferencial percentual aplicados à proteção de transformadores de potência. O plano alfa foi implementado em um relé de proteção SEL-451 através de programação em linguagem própria do relé. A utilização do elemento diferencial por meio do plano alfa resultou em uma redução significativa no tempo de atuação da proteção. Com essa redução no tempo de atuação espera-se diminuir consideravelmente os danos elétricos e esforços mecânicos causados ao transformador sob falta. Tendo em vista a redução no tempo em que o equipamento fica exposto às faltas.

Keywords: Alpha plane, percentage differential, protection, power transformers.

Palavras-chaves: Plano alfa, proteção, diferencial percentual, transformadores de potência.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a demanda por energia elétrica está aumentando, o que requer garantia de fornecimento de alta qualidade (EPE, 2022). Devido ao tamanho do país, muitas usinas estão longe dos centros de consumo, o que torna necessário o uso de transformadores para elevar a tensão e reduzir perdas durante a transmissão. Os transformadores convertem a energia elétrica em diferentes níveis de tensão, permitindo a transmissão eficiente. Eles são compostos por bobinas enroladas em um núcleo ferromagnético e desempenham um papel vital nos sistemas elétricos.

Embora os transformadores de potência geralmente apresentem baixas falhas em comparação com outros equipamentos do sistema elétrico, quando estas falhas ocorrem de maneira intempestiva, acontecem desligamentos de determinadas linhas de transmissão, sobrecargas em outros transformadores, necessidade de substituição e/ou manutenção, paralisação de diversos setores na área afetada,

realização de manobras com o objetivo de contornar a contingência e a possibilidade de grande demora do retorno na operação do equipamento faltoso. Com isso, percebe-se que falhas em transformadores de potência são danosas, custosas e perigosas tanto para as concessionárias quanto para os consumidores. Portanto, é importante proteger adequadamente esses transformadores. Existem vários métodos de proteção, dependendo da potência do transformador. Para transformadores menores, podem ser utilizados fusíveis, enquanto para transformadores maiores, são comumente usadas proteções diferenciais de corrente, sobrecorrente instantânea e temporizada, entre outras. A escolha do método de proteção deve ser feita com base na análise cuidadosa do engenheiro de proteção, considerando a viabilidade técnica e econômica e a importância do transformador.

Para a proteção de transformadores, existe o Guia de Proteção de Transformadores do IEEE, C37.91 (IEEE STD. C37.91-2021, 2021) que apresenta vários tipos de proteção possíveis, mas como o próprio nome diz, o C37.91 apresenta um guia de

soluções e não possui a intenção de compará-las, portanto, cabe ao engenheiro de proteção realizar uma análise personalizada para cada aplicação, de acordo com a importância do transformador a ser protegido.

Este artigo realiza a comparação entre o diferencial percentual e o plano alfa. Para tanto, são simuladas faltas entre espiras e espira-terra, nas condições de plena carga e em vazio nos lados delta e estrela do transformador. O objetivo principal deste trabalho é comparar os dois métodos e verificar o comportamento para as faltas citadas anteriormente. O desempenho da proteção por meio do plano alfa foi superior ao diferencial percentual.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para uma melhor apresentação do que se trata o presente artigo, este capítulo apresenta uma fundamentação teórica sobre transformadores, funcionamento da proteção diferencial percentual e funcionamento do plano alfa.

2.1 Transformador

O transformador é um equipamento com grande importância para o funcionamento do sistema elétrico que conhecemos atualmente. Como descrito anteriormente, a grande parte das usinas geradoras estão há uma elevada distância dos centros consumidores. Portanto, torna-se necessário o uso de transformadores elevadores para possibilitar a transmissão e, conseqüentemente, ao se aproximar destes centros consumidores, o uso de transformadores abaixadores para níveis de tensões onde a distribuição da energia elétrica seja realizada de maneira técnica e economicamente viável.

O transformador possibilita a transmissão de energia elétrica por meio do princípio da indução eletromagnética, que converte a energia elétrica de uma certa frequência e nível de tensão em energia elétrica de mesma frequência, alterando apenas o nível de tensão, sendo este valor de tensão proporcional ao número de espiras dos enrolamentos, magnitude do fluxo mútuo e da frequência (CHAPMAN, 2013; FITZGERALD et al, 2014).

Quando comparado com outros equipamentos do sistema elétrico, o transformador é um dos mais simples e pode ser constituído de duas ou mais bobinas de condutores enrolados em volta de um núcleo ferromagnético. Com a exceção dos autotransformadores, estas bobinas não possuem conexão física entre si, sendo o fluxo magnético mútuo dentro do núcleo a única conexão entre estas bobinas (CHAPMAN, 2013).

2.2 Proteção de transformadores

Os transformadores de potência estão suscetíveis a diversos tipos de falhas, tais como (PAITHANKAR, Y.G. & BHIDE, S.R., 2003; RUSH, P., 2011):

- Falta fase-terra e fase-fase nos seus terminais;

- Faltas espira-terra e entre espiras nos seus enrolamentos;
- Faltas provocadas pela ruptura do óleo isolante;
- Faltas no comutador de taps sob carga;
- Faltas externas sustentadas ou não eliminadas.

O Guia de Proteção de Transformadores do IEEE, C37.91 (IEEE STD. C37.91-2021, 2021), traz quatro categorias de transformadores de potência, conforme mostrado abaixo:

- Categoria I: monofásicos de 5 a 500 kVA e trifásicos de 15 a 500 kVA;
- Categoria II: monofásicos de 501 a 1667 kVA e trifásicos de 501 a 5000 kVA;
- Categoria III: monofásicos de 1668 a 10000 kVA e trifásicos de 5001 a 30000 kVA;
- Categoria IV: monofásicos ≥ 10 MVA e trifásicos ≥ 30 MVA.

Ainda de acordo com o C37.91, existem diversos métodos para a realização da proteção de transformadores, considerando a sua potência nominal. Por exemplo, para transformadores de pequeno porte, trifásicos de até 5 MVA (categorias I e II), a proteção pode ser realizada por meio de fusíveis. Para transformadores trifásicos com potência superior a 5 MVA (categorias III e IV), a proteção mais utilizada é diferencial percentual de corrente (87T). Isso permite uma rápida detecção de faltas que, pode reduzir os danos causados pela corrente de falta e também proporciona a distinção entre faltas internas de outras condições de operação. As proteções de sobrecorrente instantâneo (50) e de sobrecorrente temporizado (51), geralmente, estas são utilizadas operando em conjunto com a proteção diferencial de corrente, como uma proteção de retaguarda (*back-up*). Ainda para os transformadores de grande porte, utiliza-se a proteção de falta à terra restrita (REF - *Restricted Earth Fault protection*). Além disso, a utilização em conjunto das denominadas proteções intrínsecas como relé de pressão, relé de nível de óleo, relé detector de gás (relé de *Buchholz*), relé térmico de sobre temperatura do enrolamento (49), entre outras.

Conforme citado por Magrin (MAGRIN, 2017) em sua tese de doutorado, a proteção diferencial percentual é a mais utilizada para o relé diferencial de transformador. Visto que esta proteção possui alta velocidade e uma sensibilidade razoável para a detecção e retirada de faltas em transformadores.

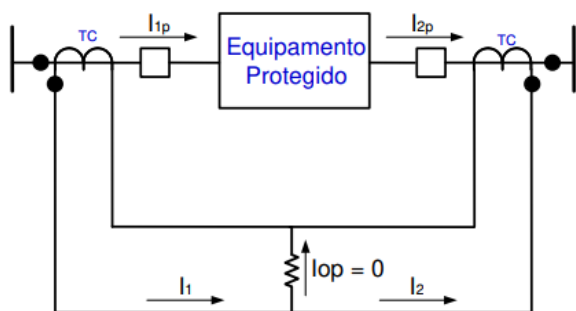
2.3 Funcionamento da proteção diferencial percentual

A proteção diferencial tem como princípio de funcionamento a comparação da corrente elétrica de entrada e saída, ou seja, a soma das correntes que entram na zona de proteção é igual à soma das correntes que saem desta zona, durante a condição normal de operação, isto é, a proteção diferencial atua com base na Lei de Kirchhoff das Correntes (LKC). A zona de proteção da função diferencial é delimitada pelos

transformadores de corrente (TCs), estes com o objetivo de medir as correntes elétricas em seus enrolamentos primários, e enviar estas correntes com valores proporcionais à relação nominal do TC (RTC) ao relé de proteção (BLACKBURN, J.L., & DOMIN, T.J., 2014). O relé ao receber estes valores de correntes, de acordo com a sua lógica de programação toma a decisão de restrição ou de operação, ou seja, de enviar ou não o sinal para a abertura dos disjuntores dentro de sua zona de proteção.

O princípio de funcionamento da proteção diferencial é ilustrado na Figura 1, a qual está operando em condições normais e, que para simplificar a explicação, apenas dois circuitos são mostrados, podem existir vários circuitos, mas o princípio é o mesmo, sendo os TCs os limites da zona de proteção. A soma das correntes que entram é basicamente igual à soma das correntes que saem durante a operação normal. As correntes são representadas em pu visto que as correntes ao passar pelo transformador não possuem a mesma magnitude.

Fig. 1 Esquema de funcionamento da proteção diferencial.



Fonte: Retirado de Magrin (2017).

Sendo I_{1p} e I_{2p} as correntes primárias que entram e saem da zona de proteção. I_{op} a diferença das correntes que entram e saem do transformador, a qual na condição normal é dada pela corrente de excitação do transformador.

Durante operação normal ou durante faltas externas a diferença entre as correntes que entram e saem da zona de proteção é dada pela corrente de excitação do transformador. Esta corrente é chamada de corrente de operação e pode ser expressa pela soma fasorial conforme a equação (1):

$$I_{op} = |\hat{I}_1 + \hat{I}_2| \quad (1)$$

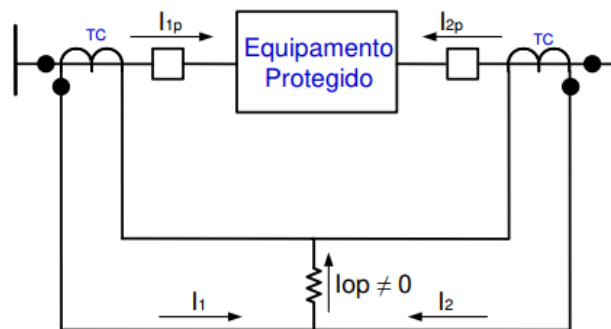
Onde \hat{I}_1 é a corrente no TC do primário e, \hat{I}_2 a corrente no TC do secundário.

Com o funcionamento do sistema sob carga ou durante uma falta externa, a corrente de operação deve ser desprezível, sendo que apenas uma pequena parcela se deve às perdas internas e as correntes de magnetização ocasionam um desequilíbrio. Em geral, estas correntes são menores que 3% da corrente nominal do transformador. Os relés diferenciais são bastante sensíveis a faltas internas quando as correntes nos enrolamentos de restrição estão em direções opostas ou uma

das correntes de restrição é zero (BLACKBURN, J.L., & DOMIN, T.J., 2014; MAGRIN, 2017; SEL, 2019).

Com a ocorrência de faltas internas, a Figura 2 mostra que a corrente de operação do relé diferencial é essencialmente a soma das correntes de entrada que alimentam a falta, I_{1p} e I_{2p} . Esta é a corrente total da falta no secundário e, por possuírem o mesmo ângulo, essas correntes vão circular pela bobina de operação do relé.

Fig. 2 Esquema de funcionamento da proteção diferencial.



Fonte: Retirado de Magrin (2017).

Por causa das características dos transformadores que ocasionam falsas correntes diferenciais, por exemplo, erros de relação e variação de tap, portanto, para fornecer uma alta sensibilidade a leves faltas internas com alta segurança, ou seja, alta restrição para faltas externas, a maioria dos relés diferenciais são do tipo diferencial percentual.

2.4 Funcionamento do plano alfa

O plano alfa foi apresentado por Warrington em 1968 (WARRINGTON, 1968), o qual apresenta os planos complexos alfa e beta com o objetivo de realizar a avaliação da proteção diferencial longitudinal dos relés piloto.

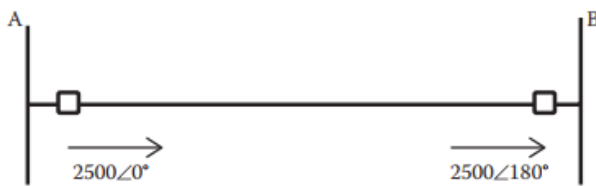
Warrington (1968), buscou, através do plano alfa, representar de melhor forma a relação entre as correntes fasoriais do elemento diferencial. Esta representação é dada através de um plano complexo, com base na seguinte equação.

$$\alpha = \frac{\hat{I}_A}{\hat{I}_B} \quad (2)$$

onde alfa α é a razão entre a corrente no terminal remoto \hat{I}_A e a corrente no terminal local \hat{I}_B .

Em Blackburn e Domin (BLACKBURN, J.L., & DOMIN, T.J., 2014), o plano alfa é primeiramente apresentado como conceito diferencial de relação de correntes, no qual os relés empregados na proteção diferencial de linhas de transmissão, calculam continuamente a razão entre as correntes fasoriais do terminal remoto e do terminal local. E que esta razão, ao ser plotada em um plano complexo, facilita a compreensão da característica e desempenho do elemento diferencial empregado. Considerando uma linha de transmissão que esteja em condições normais de operação, conforme Figura 3.

Fig. 3 Exemplo de uma LT operando em condições normais.



Fonte: Adaptado de Blackburn & Domin (2014).

Aplicando a equação 2, para obter α conforme apresentado por Warrington (1968), tem-se a seguinte resposta:

$$\alpha = \frac{\hat{I}_R}{\hat{I}_L} = \frac{2500e^{j180^\circ}}{2500e^{j0^\circ}} = -1 \quad (3)$$

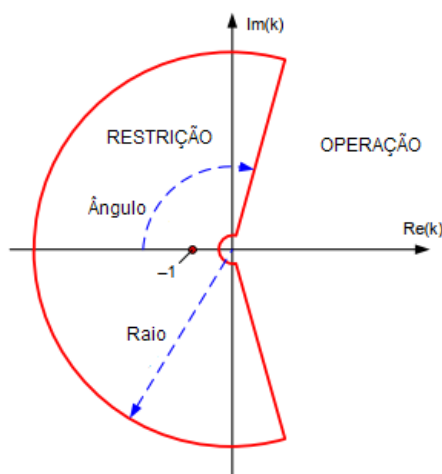
Ao realizar esta operação obtém-se o ponto onde o plano alfa representa total condição normal de operação, e este ponto permanece constante independentemente da magnitude da corrente que está passando pela linha. Como a linha está dentro da zona de proteção, em ocorrência de faltas externas e não havendo erros nos TCs, estas faltas também seriam plotadas no ponto -1. Caso exista erros nos TCs, seja por defasamento, saturação, ou outras causas de erros, o ponto de plotagem mudaria o ângulo e magnitude, entretanto, o gráfico permaneceria no lado esquerdo do plano alfa.

Para faltas internas à zona de proteção, a corrente flui das barras com direção ao ponto da falta, com isso, ao verificar com a equação 2 o ponto de plotagem será 1, ou seja, a falta estará no lado direito do plano alfa.

Na prática, devido as características do sistema, as correntes que fluem para o ponto de falta não são iguais, mas o ponto de plotagem ainda estará no lado direito do plano.

A área de restrição é definida pelo raio e o ângulo de extensão do círculo no plano. Estes são configuráveis no relé de proteção. Com o raio e ângulo devidamente ajustados, o plano alfa fica conforme a Figura 4.

Fig. 4 Característica do plano alfa.



Fonte: Adaptado de SEL (2014a).

Para faltas internas com contribuição de apenas um lado da zona de proteção, a razão entre as correntes será igual a zero. Para que neste caso haja a devida operação o raio interno do círculo no relé SEL-311L é igual ao inverso do raio externo (SEL, 2021a).

3. METODOLOGIA

O sistema de potência utilizado para elaboração deste artigo foi retirado da tese de doutorado do Professor Dr. Fabiano Magrin (MAGRIN, 2017). O qual consiste em um sistema simples com apenas uma fonte, o banco de transformadores e a carga. Este sistema foi utilizado para analisar a atuação ou não do relé diferencial de acordo com o comportamento das correntes e tensões do transformador durante a ocorrência de faltas internas e externas.

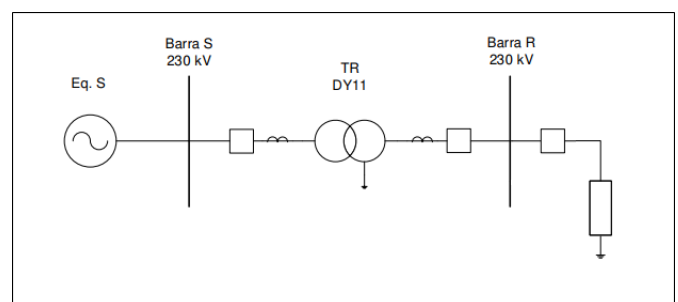
A Tabela 1 apresenta os dados para operação desde em vazio até a condição de plena carga, valores das impedâncias da fonte e tensões para manter o sistema operando com tensão de 1 pu na barra S na condição de pré-falta. A Figura 5 mostra o sistema de potência que foi desenvolvido pelo Professor Fabiano Magrin para sua tese. E para a elaboração deste artigo esse sistema foi utilizado para a análise do comportamento das grandezas elétricas do transformador sob falta. O sistema de potência estudado neste artigo foi desenvolvido em uma versão institucional do programa PS Simul, cedida de forma gratuita pela CONPROVE Engenharia à UTFPR.

Tabela 1 - Dados do sistema de potência.

Carga [%]	Z_{carga} [Ω]	Tensão Interna da Fonte [kV]
		$Z_{fonte} = 50 \Omega$
5	10 k	231
100	529	234

Fonte: Adaptado de Magrin (2017).

Fig.5 Sistema de potência de teste.



Fonte: Adaptado de Magrin (2017).

No sistema foram utilizados três transformadores monofásicos com 33,33 MVA de potência, cada, totalizando 100 MVA, 10% de reatância de dispersão e 0,1% de resistência, sendo que os valores percentuais estão na base do transformador. Para facilitar a comparação de tensões e correntes de ambos os lados, a relação de transformação escolhida foi de 1:1.

Com o objetivo de avaliar a detecção de faltas nos pontos críticos dos enrolamentos, onde de acordo com Magrin (2017),

os locais dos enrolamentos com menor sensibilidade para detecção de faltas através do diferencial são os seguintes:

- 1% a 10% no lado estrela para faltas entre espiras e espira-terra;
- 1% a 10% no lado delta para faltas entre espiras;
- 45% a 55% no lado delta para faltas espira-terra.

Para realização deste artigo, foram simulados alguns tipos de faltas no sistema de potência, sendo eles:

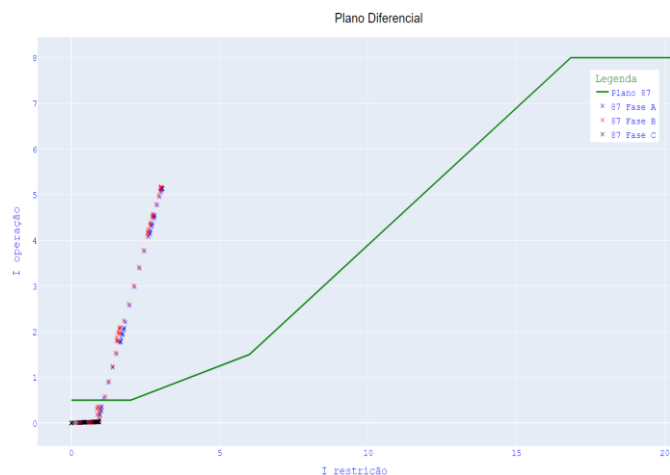
- Falta franca entre espiras e espira-terra no enrolamento delta nas condições de plena carga e em vazio;
- Falta franca entre espiras e espira-terra no enrolamento estrela nas condições de plena carga e em vazio.

4. COMPARAÇÃO ENTRE O PLANO ALFA E O DIFERENCIAL PERCENTUAL

Este capítulo apresenta a comparação entre o comportamento de ambos os planos e seus tempos de atuação, diferencial percentual nativo do relé SEL-387 e do plano alfa implementado por meio de lógicas internas no relé SEL-451.

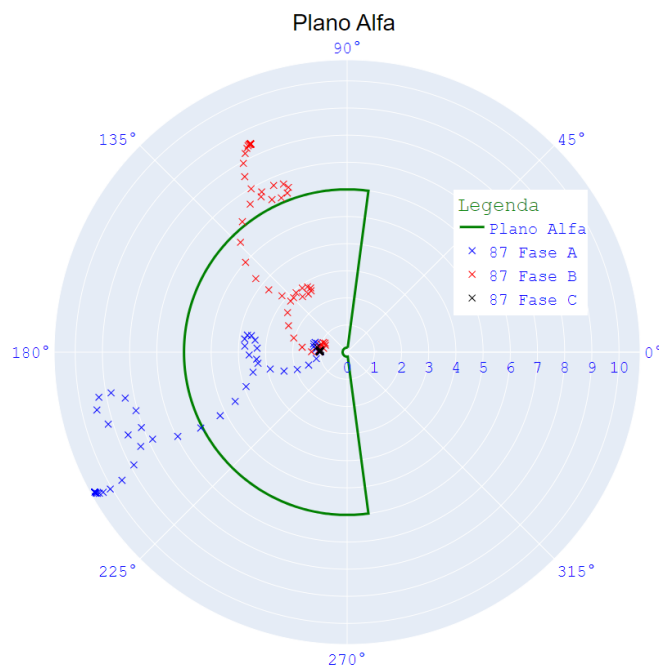
A Figura 6 mostra o comportamento de uma falta entre espiras no plano diferencial percentual, onde as correntes das fases A e B saem da região de restrição e vão para a região de operação, fazendo com que o relé dispare o sinal de *trip*. Já a Figura 7, mostra o comportamento das correntes para uma falta entre espiras no plano alfa. Verifica-se que para ambos os elementos diferenciais sob estudo houve atuação. Nota-se que, devido ao tipo de ligação do transformador, uma falta monofásica envolvendo a fase A ocasiona a sensibilização dos elementos das fases A e B sem a atuação do elemento da fase C. Isso ocorre pois, no caso do transformador conectado em delta-estrela, uma falta monofásica do lado estrela é vista pelo lado delta como uma falta bifásica.

Fig. 6 Comportamento das correntes no plano percentual.



Fonte: Os autores (2023).

Fig. 7 Comportamento das correntes no plano alfa.

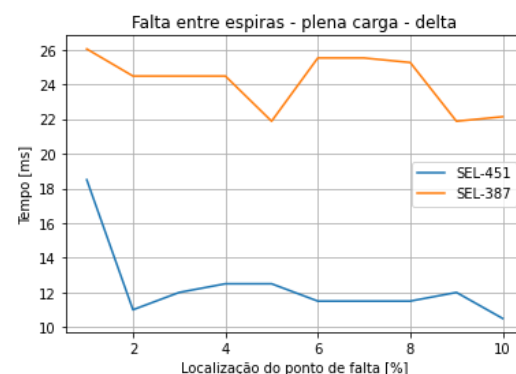


Fonte: Os autores (2023).

4.1 Faltas entre espiras

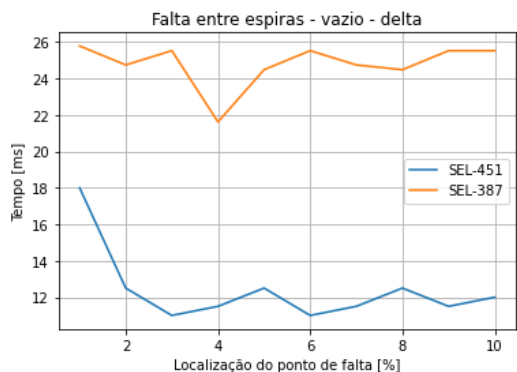
Para faltas entre espiras, ambos planos diferenciais atuaram para todas as simulações, ou seja, não houve diferença com a sensibilidade, mas com a utilização do plano alfa houve uma redução significativa no tempo de atuação. As Figuras 8, 9, 10 e 11 mostram a diferença nos tempos de atuação dos relés SEL-451 e SEL-387 para as mesmas simulações de faltas entre espiras.

Fig.8 Falta entre espiras no enrolamento delta em plena carga.



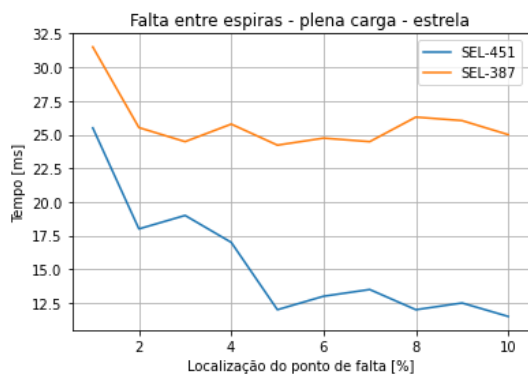
Fonte: Os autores (2023).

Fig.9 Falta entre espiras no enrolamento delta em vazio.



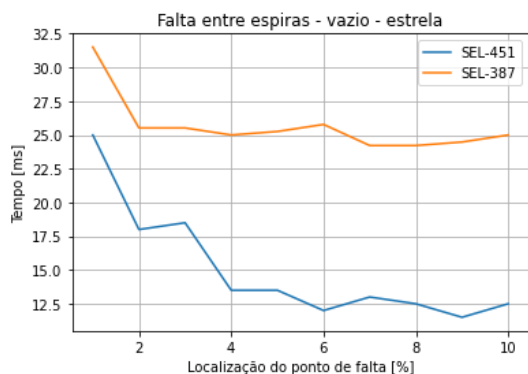
Fonte: Os autores (2023).

Fig. 10 Falta entre espiras no enrolamento estrela em plena carga.



Fonte: Os autores (2023).

Fig. 11 Falta entre espiras no enrolamento estrela em vazio.

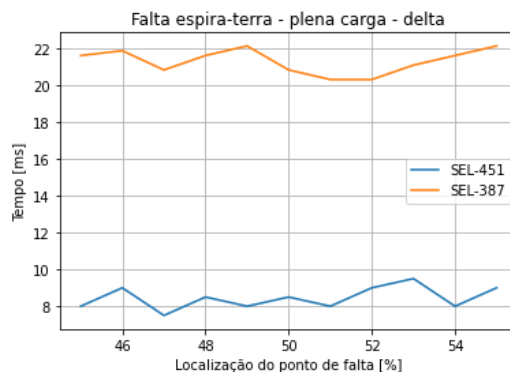


Fonte: Os autores (2023).

4.2 Faltas espira-terra

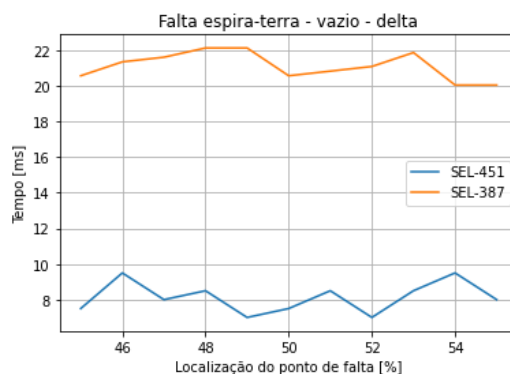
Para as simulações de faltas espira-terra, ambos planos diferenciais atuaram, isto é, não houve diferença com a sensibilidade dos relés, mas houve uma redução significativa tempo de atuação ao utilizar o plano alfa. As Figuras 12, 13, 14 e 15 mostram a diferença nos tempos de atuação dos relés SEL-451 e SEL-387 para as mesmas simulações de faltas espira-terra.

Fig. 12 Falta espira-terra no enrolamento delta em plena carga.



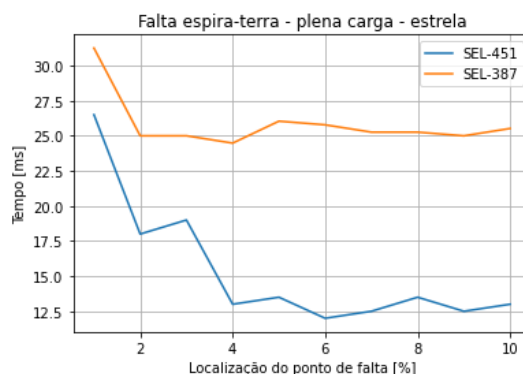
Fonte: Os autores (2023).

Fig. 13 Falta espira-terra no enrolamento delta em vazio.



Fonte: Os autores (2023).

Fig. 14 Falta espira-terra no enrolamento estrela em plena carga.



Fonte: Os autores (2023).

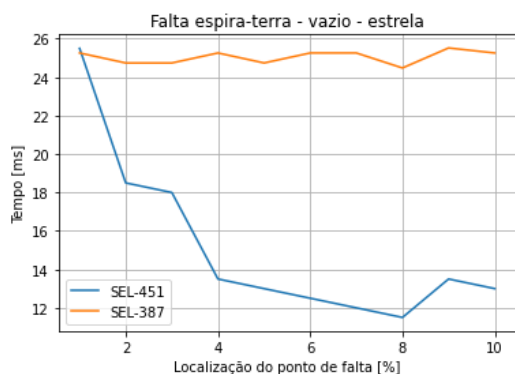
Fig.15 Falta espira-terra no enrolamento estrela em vazio.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido da empresa AI Engenharia.

REFERÊNCIAS

- BLACKBURN, J.L., & DOMIN, T.J. Protective Relaying: Principles and Applications, Fourth Edition (4th ed.). CRC Press, 2014.
- CHAPMAN, Stephen J. Fundamentos de Máquinas Elétricas. Porto Alegre: Grupo A, 2013.
- EPE. EPE-DEA-SEE-002/2022- NT-ONS DPL 0009/2022 – CCEE 00285/2022 - NT Previsão de carga para o Planejamento Anual da Operação Energética 2022-2026. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/revisoes-quadrimestrais-da-carga>. Acesso em: 24 maio 2022.
- H. J. A. Ferrer and E. O. I. Schweitzer, Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electrical Power Systems. Pullman, WA: Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2010.
- IEEE STD. C37.91 - 2021. IEEE Guide for Protecting Power Transformers. [s.l.] IEEE, 2021.
- MAGRIN, Fabiano G. S. Novas Funções para a Proteção de Transformadores. Orientador: Profa. Dra. Maria Cristina Dias Tavares. 2017. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.
- PAITHANKAR, Y.G. & BHIDE, S.R. Fundamentals of Power System Protection. New Delhi. Prentice-Hall of India, 2003.
- RUSH, P. Proteção e automação de redes: conceito e aplicação. Peter Rush; coordenação da tradução José Antonio Jardini - São Paulo: Editora Blucher: Schneider, 2011.
- SEL. Manual de Instrução SEL-311L: Line Current Differential Protection and Automation System. SEL, 2021. Disponível em: <http://www.selinc.com>. Acesso em: 23 mar. 2022.
- SEL. Manual de Instrução SEL-387: Current Differential Overcurrent Relay. SEL, 2021. Disponível em: <http://www.selinc.com>. Acesso em: 23 mar. 2022.
- SEL. Manual de Instrução SEL-451: Protection, Automation and Bay Control System. SEL, 2021. Disponível em: <http://www.selinc.com>. Acesso em: 23 mar. 2022.
- SEL. Modern Line Current Differential Protection Solutions. SEL, 2014. Disponível em: <http://www.selinc.com>. Acesso em: 15 nov. 2022.
- SEL. Proteção dos Transformadores Elevadores. SEL, 2019. Disponível em: <http://www.selinc.com>. Acesso em: 09 out. 2022.
- SEL. The Trajectories of Line Current Differential Faults in the Alpha Plane. SEL, 2014. Disponível em: <http://www.selinc.com>. Acesso em: 15 nov. 2022.
- SEN, P.C. Principles of electric machines and power electronics, Third Edition (3rd ed.). WILEY, 2013. p. 40-92.
- WARRINGTON, A.R VAN C. Protective relays: their theory and practice. Vol. 1. Chapman & Hall, 1968.



Fonte: Os autores (2023).

4.3 Falhas externas

Para as falhas externas, tanto o diferencial percentual do SEL-387 quanto o plano alfa implementado no SEL-451 não atuaram, operando conforme o esperado para a função diferencial.

6. CONCLUSÕES

Este artigo realizou a comparação entre o plano alfa e o diferencial percentual aplicados à proteção de transformadores de potência. A utilização da proteção diferencial através do plano alfa apresentou uma redução significativa no tempo de detecção e disparo do sinal de abertura pelo relé de proteção. Com essa redução no tempo de atuação espera-se diminuir consideravelmente os danos elétricos e esforços mecânicos causados ao transformador sob falta.

Pela importância do transformador no sistema elétrico e ao seu elevado custo, com a realização deste artigo foi possível verificar que ainda há algumas possibilidades a serem exploradas na proteção deste equipamento.

Algumas pesquisas podem ser realizadas a partir deste artigo.

- Teste com outros modelos de falhas internas;
- Teste com modelo de transformador na condição de *inrush*;
- Teste com modelo de transformador na condição de sobre-excitação;
- Teste na condição de energização de transformadores em paralelo;
- Teste com o plano alfa nativo de um equipamento SEL;
- Teste com oscilografias de casos reais;
- Teste com o plano alfa em campo.