

# Implementação de um relé virtual de proteção diferencial de transformadores: Avaliação de cenários de curtos-circuitos, inrush e saturação de TCs

Ramon J. N. Silva \*. Aurélio L. M. Coelho\*

*\*Instituto de Ciências Tecnológicas, Universidade Federal de Itajubá – Campus de Itabira  
Itabira, Brasil (e-mail: ramonjuliononato@gmail.com, aurelio.coelho@unifei.edu.br)*

**Abstract:** The transformer is one of the main pieces of equipment in the electrical system, being of vital importance for the delivery of electrical energy to consumer centers. Therefore, care must be taken, and these equipment's must be carefully protected. One way to protect it against internal faults is to apply the differential protection function. The response of this function must be carefully analyzed for internal short circuit conditions, for which it is designed, and for conditions that can cause it to act improperly, such as external short circuits, current transformer saturation and transformer energization. Thus, in this work the implementation of a virtual transformer differential protection relay to evaluate such conditions is presented. For this, Matlab software is used to elaborate all the processing steps that make up a numerical relay. The main results are presented and confronted with the state of the art related to the theme.

**Resumo:** O transformador é um dos principais equipamentos do sistema elétrico, sendo de vital importância para a entrega de energia elétrica aos centros consumidores. Portanto, deve-se zelar e proteger estes equipamentos de forma criteriosa. Uma maneira de protegê-lo contra faltas internas é a aplicação da função de proteção diferencial. A resposta desta função deve ser criteriosamente analisada para condições de curtos-circuitos internos, para a qual a mesma é designada, e para condições que podem fazê-la atuar de forma indevida, como curtos-circuitos externos, saturação de transformadores de corrente e energização do transformador. Assim, neste trabalho é apresentada a implementação de um relé virtual de proteção diferencial de transformador para avaliar tais condições. Para isso, é utilizado o software Matlab para elaborar todas as etapas de processamento que compõem um relé numérico. Os principais resultados são apresentados e confrontados com o estado da arte relacionado ao tema.

*Keywords: Protection Relay; Differential Function; Matlab Simulation; CT Saturation; Inrush.*

*Palavras-chaves: Relé de Proteção; Função Diferencial; Simulação no Matlab; Saturação de TC, Inrush.*

## 1. INTRODUÇÃO

O transformador é um dos equipamentos mais utilizados nas redes elétricas, responsáveis por elevar o nível de tensão para a transmissão e diminuir para distribuição e consumo. A cada dia, a sociedade se torna mais dependente de energia elétrica, sendo então, cada vez mais importante a disponibilidade dela, de forma confiável e com qualidade. Sendo o transformador vital para a entrega de energia elétrica aos consumidores, este se torna um equipamento o qual deve-se zelar e proteger para seu correto funcionamento. Portanto, os estudos referentes a proteção de transformadores em sistemas elétricos são essenciais para a melhora dos índices de disponibilidade de energia aos consumidores (Flach, 2008).

Como descrito por (Kindermann, 1999), a proteção de sistemas elétricos, tem como objetivo salvaguardar a integridade física dos operadores e usuários do sistema, reduzir ou evitar danos materiais, retirando de operação equipamentos ou parte do sistema que se apresente defeituoso e garantindo a continuidade do serviço. Desta forma, a proteção de transformadores deve ser empregada para que o mesmo, um ativo tão importante no sistema elétrico, seja preservado e possa operar de forma segura por mais tempo (Fagundes, 2016). Além disso, é importante destacar que, o dimensionamento adequado dos equipamentos e instalações que compreendem o Sistema Elétrico de Potência (SEP) e, a correta operação dos mecanismos

de proteção são fatores essenciais para que o caminho da energia elétrica desde a geração até a carga consumidora de energia tenha o mínimo possível de falhas e interrupções.

Uma das tecnologias mais empregadas para proteção elétrica de transformadores geralmente acima de 10MVA, são os relés de proteção de corrente diferencial (ANSI 87T). Estes, conforme apresentado por (Kindermann, 1999) têm seu funcionamento baseado na comparação das correntes de entrada e saída dos transformadores.

Segundo (Vieira, 2013) e (Bernardes, 2006) as formas de onda das correntes no primário e secundário são constantemente monitoradas, sendo obtidas por transformadores de corrente (TC) conectados em série com o primário e secundário do transformador. Assim, estes sinais são verificados pelos relés de proteção, os quais devem analisá-los e, caso ocorra uma falta, devem isolar o transformador do sistema. Para as condições normais de funcionamento, as correntes de ambos os lados do transformador devem ser iguais nos secundários dos TCs (Bernardes, 2006). Caso ocorra um desbalanço entre as correntes lidas pelos TCs, representará a existência de uma falta interna ao transformador, fazendo com que a função 87T envie um sinal de TRIP para que o transformador seja isolado.

Neste contexto, diversos trabalhos propõem modelos, simulações e análises das funções e relés de proteção, para melhor estudá-las, tendo em vista a importância dos mesmos para

funcionamento do sistema elétrico de forma ininterrupta. Quanto a simulações, em (Tavares, 2013) é apresentado, a aplicação de simulação da função diferencial de fase, sequência negativa e falta a terra restrita utilizando a ferramenta ATP. A partir da simulação dos blocos internos ao relé virtual utilizando a linguagem MODELS, avalia-se então a resposta da simulação para diversos casos de curtos-circuitos e inrush. Em (Rocha et al, 2018), é apresentada a simulação de um sistema onde se aplica a proteção diferencial no ATP, possibilitando assim a aplicação dos sinais de correntes. Já em (Oliveira, 2012) são avaliados os algoritmos de estimação de fasores quanto a componentes DC e decaimento exponencial, trazendo como resultado a comparação entre diversos métodos, dentre outros, o método do filtro cosseno modificado, utilizado no presente trabalho, que é também avaliado. Em (Etingov e Fedosov, 2019) apresenta a simulação utilizando-se do Matlab para casos de curtos-circuitos externos, avaliando um algoritmo de restrição, desenvolvendo um esquema lógico para especificar condições de atuação da proteção diferencial.

O presente trabalho tem por finalidade implementar um modelo da função 87T no software Matlab, impondo as condições de curtos-circuitos internos e externos, saturação de TCs e inrush para avaliar esta função de proteção.

Os sinais de corrente para os casos estudados neste presente trabalho foram obtidos a partir da base de dados geradas em (Rocha et al, 2018) no ATP, os quais foram carregados no software Matlab como dados de entrada para o relé virtual implementado com a função ANSI 87, onde os blocos de algoritmos de processamento de sinais internos, típicos de um relé de proteção diferencial, são implementados no Matlab. Com isso, serão utilizadas curvas obtidas via *ATP Draw* neste modelo, buscando assim verificar a atuação do sinal de TRIP do modelo.

## 2. FUNDAMENTOS BÁSICOS

### 2.1 Função ANSI 87T – Proteção Diferencial de Transformadores

Sucintamente, a função de proteção diferencial tem como método comparar os sinais de corrente que entram e saem de determinados equipamentos. Como descrito por (Tavares, 2013) o elemento diferencial deve operar baseado em uma corrente de operação ( $I_{op}$ ) em comparação com uma corrente de restrição ( $I_{res}$ ). A proteção diferencial percentual apresenta um ajuste considerando os possíveis erros de relação de transformação de TCs. Esses erros podem ser causados por características construtivas dos equipamentos e ajustes indevidos do *slope*, o qual indica a inclinação da curva de operação (Bernardes, 2006), de modo que, quanto maior esta inclinação, menor é a sensibilidade (Rocha et al, 2018). Também existe um parâmetro relacionado a corrente máxima de operação, em que, a partir deste valor, o relé atua e envia o sinal de TRIP. Além disso, existe o parâmetro relacionado a corrente de operação mínima para atuação do relé (Tavares, 2013). Assim, é feita uma comparação entre as correntes de restrição e de operação para determinar se o relé irá atuar ou não, o que pode ser visualizado na Fig. 1, onde, caso a combinação de correntes esteja na região de cor cinza, o relé irá atuar, caso contrário, permanecerá em bloqueio.

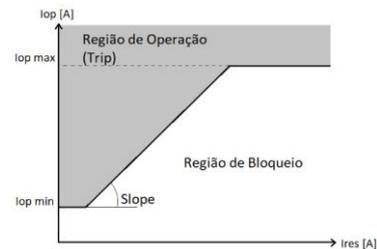


Fig.1 Característica de operação da função 87T.

### 2.2 Saturação de TC

De acordo com (Coelho, 2011) o TC é composto basicamente de um núcleo de ferro, os enrolamentos primários e secundários e podem ser utilizados para medição e proteção. Os TCs utilizados para proteção devem apresentar erros relativamente pequenos para as condições de falta. Quando as correntes de falta são acima dos níveis esperados, o núcleo do TC pode saturar de modo a apresentar uma distorção na forma de onda de corrente secundária. Em (Santos, 2011) é evidenciado que a saturação dos TCs pode prejudicar o desempenho dos relés de proteção.

É descrito por (Coelho, 2011) alguns fatores que podem influenciar a proteção diferencial aplicada a transformadores, dentre eles, o fenômeno da saturação dos TCs surge apresentando dois efeitos. Um deles uma falsa corrente de operação devido as ondas distorcidas no secundário do TC saturado devido a faltas externas elevadas, fazendo assim, a função 87T operar de forma indevida. O outro efeito é o retardamento do envio do sinal de TRIP devido a existência de harmônicos gerados em faltas internas. Em (Coelho, 2011) também é exposto que a saturação de TCs é um fator que pode influenciar no surgimento de correntes diferenciais indesejadas, o que possibilita atuações indevidas da função diferencial.

### 2.3 Corrente de Inrush

A corrente de *inrush* é um fenômeno associado a transformadores, em que a polaridade e a amplitude do fluxo residual não concordam com a polaridade e amplitude esperados do fluxo (Vieira, 2013). Geralmente esse fenômeno ocorre durante a energização de transformadores, energização em paralelo de um transformador com outro em operação e após extinção de curtos-circuitos externos (Tavares, 2013).

Uma característica da corrente de *inrush* é a forte presença de correntes harmônicas de 2ª ordem, sendo esta uma condição para sua determinação (Vieira, 2013), (Tavares, 2013), (Rocha et al, 2018).

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Sistema Analisado

O sistema analisado consiste em uma linha de transmissão de 150km situada entre os barramentos B1 e B2 e uma linha de 50km entre os barramentos B3 e B4, conforme Fig. 2. Entre os barramentos B2 e B3 existe um transformador de potência com

relação de transformação de 138-13,8kV, potência nominal de 25 MVA e conexão Delta/Estrela aterrada, Dy1. Além disso, o sistema em análise possui uma carga RLC de potência aparente de  $S = 18,15 \text{ MW} + j7,73 \text{ MVAr}$ . Vale destacar que, este sistema, bem como suas curvas foram utilizados em (Rocha et al, 2018), tornando-se base para este trabalho.

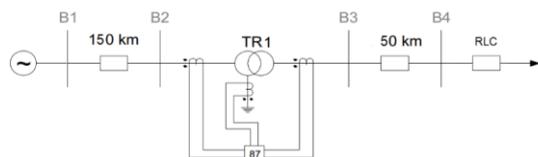


Fig.2 Sistema elétrico utilizado para aquisição dos dados (Rocha et al, 2018).

O sistema utilizado neste trabalho apresenta os valores de corrente nominal de primário  $I_{PN}$ , secundário  $I_{SN}$ , relação de transformação no primário  $RTC_P$  e relação de transformação no secundário  $RTC_S$ , cargas *burden* do primário ( $R_P$  e  $L_P$ ) e secundário ( $R_S$  e  $L_S$ ), conforme Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros do sistema analisado.

$I_{PN}$	104,59 [A]
$I_{SN}$	1045,9 [A]
$RTC_P$	20
$RTC_S$	200
$R_P$	0,5 [ $\Omega$ ]
$L_P$	2,3[mH]
$R_S$	2,0 [ $\Omega$ ]
$L_S$	9,188[mH]

### 3.2 Determinação de Parâmetros

Para a simulação a ser executada, deve-se primeiro determinar os parâmetros de proteção da função diferencial de acordo com o sistema proposto. Estes parâmetros servirão de base para montagem da curva de proteção diferencial. O TAP da função é então determinado por (1), conforme (Rocha et al, 2018).

$$TAP = \frac{MVA \cdot 1000}{V_L \cdot RTC \cdot \sqrt{3}} = 5,23 \quad (1)$$

Os demais parâmetros são apresentados na Tabela 2, calculados de acordo com (Vieira, 2013),(Tavares, 2013),(Rocha et al, 2018) e (Tavares e Silva, 2014).

Tabela 2. Parâmetros da Proteção Diferencial

<i>Slope</i>	art. (0,7) = 35°
$I_{opmin}$	0,2
$I_{opmax}$	1,5
$K_2$	25%
$K_5$	25%

### 3.2 Aquisição dos Sinais de Corrente

Os sinais de corrente provenientes do sistema apresentado na seção 3.1 foram obtidos da base de dados geradas no ATP no trabalho (Rocha et al, 2018). Estes, foram exportados do ATP como extensão “.m” e assim importados no Matlab para alimentarem a simulação do relé virtual.

O arquivo “.m” consiste em sete vetores, sendo 6 deles o valor de amplitude de cada uma das correntes de fase e o tempo de simulação de cada amostra.

### 3.3 Implementação do Relé Virtual

Nesta seção serão descritos as funções internas ao relé que foram simuladas via Matlab. Todos os blocos apresentados nesta seção foram desenvolvidos em linhas de código no ambiente Matlab, sendo para cada um deles criado um bloco de *function* para execução das etapas propostas. A Fig. 3 apresenta a estrutura do código executado.

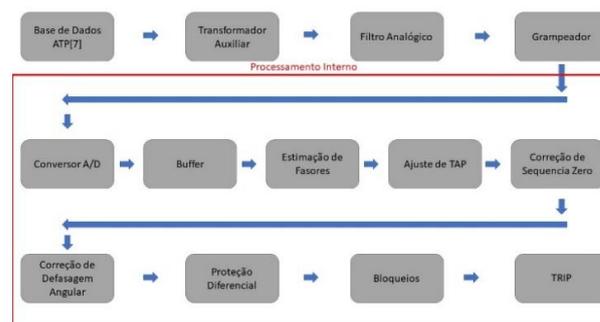


Fig.3 Estrutura em blocos do relé implementado.

#### 3.3.1 Transformadores Auxiliares

Para leitura dos valores de corrente pelo relé, o sinal de corrente deve ser condicionado em tensão. Este processo é feito via um transformador auxiliar, o qual, além de condicionar, provoca a isolamento do circuito de potência e do Relé (Tavares, 2013). A representação deste transformador é feita a partir de um transformador ideal com uma resistência, o qual deve-se ater a valores de saída entre  $\pm 10V$  para a corrente de curto-circuito máxima do sistema. O sinal de tensão é proveniente de (2).

$$V_{out} = I_{TC} \cdot R_T \quad (2)$$

A resistência pode ser definida por (3).

$$R_T = \frac{RTC \cdot V_{out}}{I_{TCp}} \quad (3)$$

#### 3.3.2 Filtro Analógico

O filtro analógico utilizado nesta simulação é do tipo Butterworth passa baixa de segunda ordem com frequência de corte de 480Hz, permitindo assim as frequências fundamental (60Hz) e 2ª harmônicas, as quais são necessárias para a função diferencial. A função de transferência deste filtro é apresentada em (4).

$$H(s) = \frac{9,0958 \cdot 10^6}{s^2 + 4,2652 \cdot 10^6 s + 9,0958 \cdot 10^6} \quad (4)$$

#### 3.3.3 Grampeador

Esta parte da simulação é necessária para limitar o valor de tensão à faixa dinâmica de operação do conversor A/D. Sendo implementado de acordo com a Fig. 4.

```

if abs(V)>10
    Vout = 10 * sing(V);
else
    Vout = V;
end
    
```

Fig.4 Algoritmo do Grampeador.

Onde, caso o módulo do valor de tensão V seja maior que 10, a função *sing* do Matlab irá retornar os seguintes valores dependendo de V: 1 se V>0; 0 se V=0 e -1 se V<0. Sendo assim, o valor fica limitado a ±10V.

### 3.3.4 Processamento Interno

Esta seção da simulação refere-se ao processamento interno do relé de proteção, ou seja, todas as funções listadas a seguir devem respeitar a frequência de processamento dele.

#### A) Sample Holder

A utilização do *Sample Holder* auxilia na etapa de conversão A/D, pois a mesma retém o valor de leitura por determinado tempo. Neste projeto foi aplicada a retenção em cada passo de processamento do relé de 960 Hz, ou seja, o sinal fica retido por 1,04ms.

#### B) Conversor A/D

A conversão analógica digital consiste em transformar o valor analógico proveniente do grampeador em uma palavra digital. A metodologia aplicada é a de aproximações sucessivas, apresentada em (Silva et al, 2007). A equação (5) apresenta a definição da resolução (Res) deste conversor.

$$Res = \frac{Y}{2^b - 1} \quad (5)$$

Onde Y representa a excursão simétrica do sinal de entrada, b será o tamanho em bits da palavra (Tavares, 2013),(Tavares e Silva, 2014),(Silva et al, 2007). Assim, para os valores de entrada, o valor digitalizado é dado pela equação (6) (Tavares, 2013),(Silva et al, 2007).

$$Z_{10} = \text{ROUND}\left(\frac{x \cdot (2^b - 1)}{Y}\right) \quad (6)$$

Em (6), x é o sinal de entrada da função. A função ROUND arredonda o resultado entre parênteses. Assim, para os valores de entrada, a resposta entregue pelo conversor é representada pela equação (7) caso o sinal de entrada seja positivo e pela equação (8) caso o sinal seja negativo.

$$x_{out} = Z_{10} \cdot Res \quad (7)$$

$$x_{out} = [Z_{10} - 2^{b-1}] \cdot Res \quad (8)$$

#### C) Buffer

O *buffer* é utilizado para armazenar os sinais para auxílio da etapa de estimação de fasores, sendo assim, aplica-se um vetor

para armazenamento de 17 amostras dos sinais. Este vetor é alimentado em forma de fila com os sinais de entrada, sendo assim, após os 17 primeiros sinais, deve-se deletar o primeiro inserido, e assim deslocar todos os demais para a posição anterior, podendo-se assim adicionar mais um sinal na última posição.

#### D) Estimação de Fasores

O processo de estimação de fasores utilizado nesta simulação foi feito utilizando-se de uma melhoria do filtro cosseno, o filtro cosseno modificado (Hart, 2000). Este filtro apresenta um atraso de apenas uma amostra para estimação de fasores (Oliveira, 2012), (Hart, 2000). Este filtro é definido pelas equações (9) e (10).

$$Y_{c1}(k) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \quad (9)$$

$$Y_{s1} = \frac{Y_{c1}(k-1) \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) - Y_{c1}(k) \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right)}{\sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right)} \quad (10)$$

Os sinais de saída de (9) e (10) serão os valores reais e imaginários das correntes.

#### E) Ajuste de TAP

O ajuste de TAP irá retornar os valores da saída da estimação de fasores para valores do sistema em pu.

#### F) Correção de Sequência Zero

Devido ao tipo de conexão do transformador, sendo o primário ligado em delta já o secundário em estrela, deve-se utilizar uma correção de sequência zero, tendo em visto que a sequência zero é inexistente na ligação em delta. Isto é necessário para que não haja a existência de TRIP indevido por motivação desta diferença entre as correntes em sequência nos momentos de curto-circuito fase-terra no lado estrela. Assim, as correntes de sequência zero serão subtraídas das correntes no lado estrela, seguindo então a operação matricial (11), (Tavares, 2013),(Tavares e Silva, 2014),(WG B5, 2011).

$$\begin{bmatrix} \hat{I}'_A \\ \hat{I}'_B \\ \hat{I}'_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{I}_A \\ \hat{I}_B \\ \hat{I}_C \end{bmatrix} - \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \hat{I}_A + \hat{I}_B + \hat{I}_C \\ \hat{I}_A + \hat{I}_B + \hat{I}_C \\ \hat{I}_A + \hat{I}_B + \hat{I}_C \end{bmatrix} \quad (11)$$

#### G) Correção de Defasagem Angular

Devido a configuração do transformador em estudo, existe uma defasagem de 30° entre os sinais de corrente de primário e secundário. Para que não haja a possibilidade de atuação indevida da proteção diferencial, faz-se necessário a aplicação de uma correção na defasagem angular destas correntes aplicando-se a equação matricial (12) (WG B5, 2011).

$$\begin{bmatrix} \hat{I}'_a \\ \hat{I}'_b \\ \hat{I}'_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 120) & \cos(\theta - 120) \\ \cos(\theta - 120) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 120) \\ \cos(\theta + 120) & \cos(\theta - 120) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{I}_A \\ \hat{I}_B \\ \hat{I}_C \end{bmatrix} \quad (12)$$

Onde a defasagem angular entre correntes de primário e secundário é dada por  $\theta$ .

### 3.3.5 Lógica de Proteção Diferencial

Assim, com sinais das correntes previamente adequados e corrigidos, é possível então aplicar a filosofia da proteção diferencial nos mesmos, possibilitando determinar as correntes de operação e restrição, por fim aplicar o sinal de TRIP nas condições corretas. Para isso, calcula-se então os módulos das correntes de fase e seus harmônicos.

Nesta etapa, tem-se como resultado a amplitude de correntes de 2ª harmônica bem como os sinais de operação e restrição, que irão ser avaliados de acordo com os níveis de bloqueio definidos pelo usuário, podendo então originar um sinal de TRIP.

Como a saída do bloco de estimação foi de valores reais e imaginários, é necessário realizar a soma quadrática deles para obter o valor de módulo das correntes, o mesmo é feito para as correntes harmônicas. Com estes valores, utilizando-se das equações 1 e 2, é possível então determinar as correntes de operação e restrição.

Assim, aplica-se o algoritmo apresentado na Fig. 5, para determinação de iminência de TRIP para cada uma das fases. Onde  $I_{comp}$  representa o limiar de corrente de operação,  $I_{op\ max}$  representa a condição de atuação sem restrição e  $I_{pkp}$  é a corrente de operação mínima de pick-up.

```

Icomp = slope * Ires;
if (Iop > Iop max)
    TRIPU = 1;
else
    TRIPU = 0;
end

if ((Iop > Icomp) AND (Iop > Ipkp))
    TRIPF = 1;
else
    TRIPF = 0;
end
    
```

Fig.5 Algoritmo de determinação de TRIP.

### 3.3.6 Bloqueios

Por fim, deve-se avaliar a aplicação de bloqueio de TRIP. O bloqueio por amplitude de segundo harmônico é representado por  $Bloq_{2H}$ . Este passo é de extrema importância para que não haja atuações indevidas na energização de transformadores, onde surge a corrente de inrush. Para determinação deste bloqueio, segue-se o algoritmo da Fig. 6 para cada uma das fases.

```

if (Bloq2H > K2)
    BLK2H = 1;
else
    BLK2H = 0;
end

if (Bloq2H == 0 AND TRIPF == 1) OR TRIPU == 1
    TRIP = 1;
else
    TRIP = 0;
end
    
```

Fig. 6 Algoritmo de determinação de bloqueios.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Condição normal do circuito (Regime Permanente)

Primeiramente, simulou-se uma condição normal do sistema. Neste caso, com uma corrente de carga correspondente a aproximadamente 0,79 pu. A Fig. 7 apresenta a corrente no secundário dos TCs. Constata-se então, a defasagem angular entre as correntes de primário e secundário de  $-30^\circ$ , referente a configuração Dy1 e  $180^\circ$  devido a conexão dos TCs, resultando assim em uma defasagem de  $150^\circ$ .

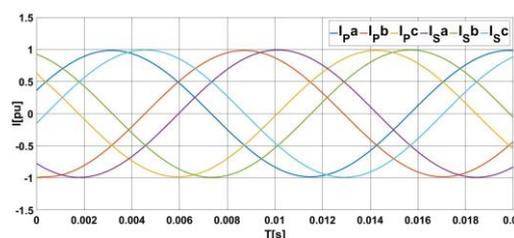


Fig. 7. Corrente nos secundários dos TCs.

A Fig. 8 apresenta a conversão dos valores de corrente para tensão como resultado das etapas de transformador auxiliar, filtro analógico e grameador. Constata-se que o valor de tensão fica restrito a  $\pm 10V$ . Para este nível de corrente não ultrapassou 0.2V.

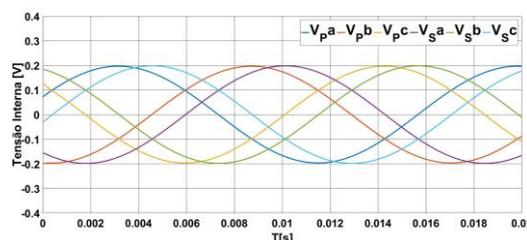


Fig. 8. Sinais de tensão internos ao relé.

A partir desta etapa, o sinal fica condicionado a frequência de amostragem do relé simulado. Na Fig. 9 é possível verificar a saída do bloco de conversão A/D. Devido a frequência de amostragem dele, obtêm-se 16 amostras por ciclo.

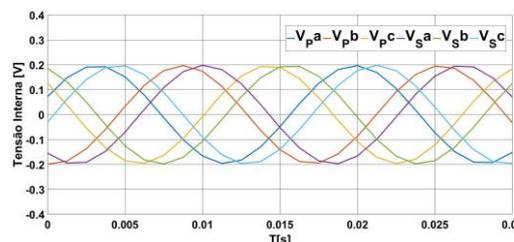


Fig. 9. Saída do bloco de conversão A/D.

Após passagem pelo buffer, é aplicada então a estimação de fasores. A Fig. 10 apresenta o resultado desta etapa para os sinais da fase A de primário e secundário. Deve-se atentar que o ajuste de TAP ainda não foi aplicado, sendo assim, este fasor é em relação ao sinal de corrente de entrada. Conforme (Oliveira, 2012) o sinal apresenta uma oscilação mesmo em regime permanente.

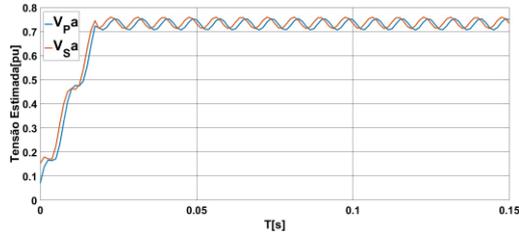


Fig. 10 Estimação de fasores.

A Fig. 11 apresenta os valores com a conversão de TAP aplicada. Verifica-se então que o algoritmo retorna um valor aproximado a 0,79 pu conforme sinal de corrente de entrada.

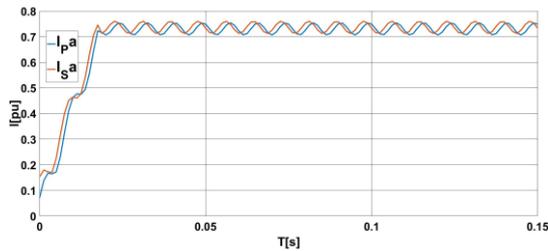


Fig. 11 Conversão de TAP.

Com isso, aplica-se as etapas de correção de sequência zero e de defasagem. Na Fig. 12 são apresentadas então as correntes de primário e secundário. Com a aplicação destas etapas, mesmo com a defasagem de  $30^\circ$  proveniente da configuração do transformador, as correntes ficam sobrepostas.

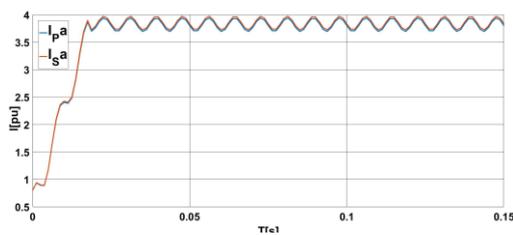


Fig. 12 Correção de defasagem.

Por fim, observa-se as saídas do bloco de algoritmo da função diferencial. Verifica-se então, na Fig. 13, que as correntes de operação se aproximam de 0 e a corrente de restrição apresenta o valor da corrente de entrada.

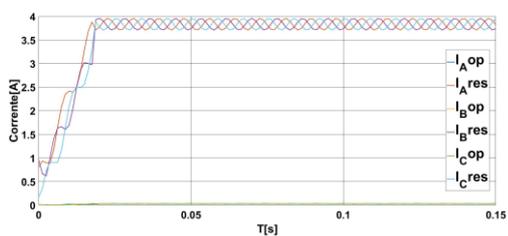


Fig. 13 Correntes de operação e restrição da função 87T.

#### 4.2 Curto-circuito externo

Para o caso de curto-circuito externo ao lado Y, aplicado em 0,3s de simulação, a expectativa é que não haja atuação do relé de proteção. O curto-circuito é externo ao elemento protegido pela função diferencial, ou seja, ambas correntes de primário e

secundário irão perceber esta oscilação de forma proporcional. O sinal de corrente aplicado é apresentado na Fig. 14.

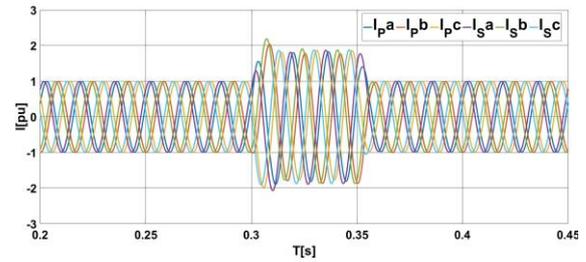


Fig. 14 Correntes de fase para o caso de curto-circuito externo - lado Y.

Neste caso, a Fig. 15 apresenta as correntes de restrição e operação do sistema. Verifica-se que, como no caso de regime permanente, a corrente de operação se aproxima de zero. Isso se dá devido a percepção do curto-circuito nos TCs de primário e secundário acontecerem de forma proporcional. Outra observação a ser feita é o transitório na corrente de operação quando há mudança significativa nos valores de amplitude da corrente de entrada. Isso ocorre devido ao algoritmo de estimação de fasores. Como visto no caso de corrente em regime permanente, existe um atraso para a determinação do novo valor estimado. Este atraso corresponde ao tempo de transição dos valores inseridos no buffer. Conforme esperado, o relé não atua a proteção neste caso.

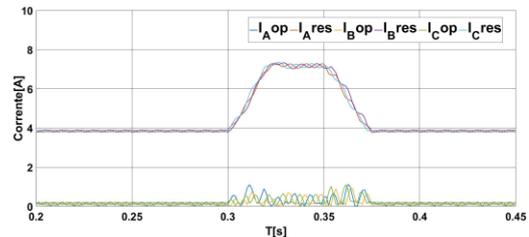


Fig. 15 Correntes de operação e restrição para o caso de curto-circuito externo - lado Y.

Para o caso de curto-circuito externo ao lado delta, se tem a mesma expectativa de não atuação, pois, assim como o caso de curto-circuito no lado Y, ambos TCs de primário e secundário irão perceber proporcionalmente este evento. A Fig. 16 apresenta os sinais de corrente primário e secundário para este caso. O curto-circuito foi aplicado entre 0,3 s e 0,6 s.

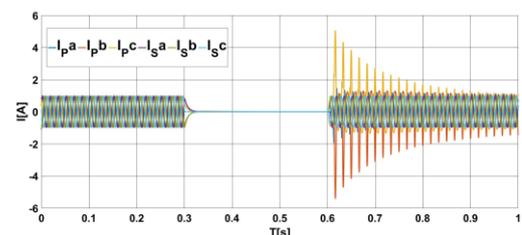


Fig.16 Correntes de fase para o caso de curto-circuito externo - lado delta.

Uma observação referente ao curto-circuito externo ao lado delta, apresentada na Fig. 17, é que neste caso a corrente de restrição irá diminuir no momento do curto-circuito. Isso se dá

devido à configuração deste sistema, tendo em visto que o curto-circuito ocorre a montante ao transformador mais próximo a fonte. Após a remoção do curto-circuito, surge a corrente de inrush. Esta condição será avaliada em tópicos seguintes.

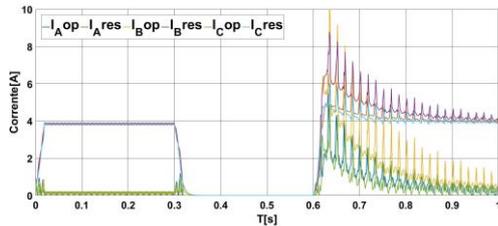


Fig.17 Correntes de operação e restrição para o caso de curto-circuito externo - lado delta.

### 4.3 Curto-circuito interno

No caso do curto-circuito do lado interno do lado delta do transformador, o qual foi aplicado em 0.1s, a corrente lida pelo TC no primário será superior a corrente lida no secundário. Assim, caso os valores de amplitude de corrente de operação ultrapassem a relação estabelecida pelo *slope* e a corrente de restrição será gerado o sinal de TRIP. A Fig. 18 apresenta as correntes de primário e secundário. O ponto em vermelho apresenta o instante que o relé de proteção externou o sinal de TRIP, sendo assim, o mesmo atuou em 3.8 ms.

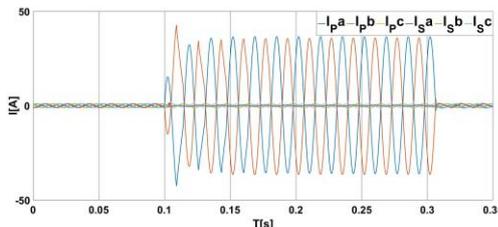


Fig. 18 Correntes de fase para o caso de curto-circuito interno - lado delta.

Na sequência, foi aplicado um curto-circuito trifásico no lado Y. A Fig. 19 apresenta as correntes lidas pelos TCs. O ponto em vermelho apresenta o instante do TRIP, sendo assim, ele atuou em 2,5 ms.

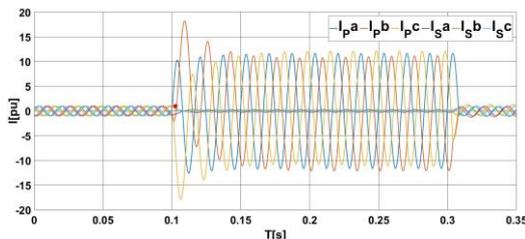


Fig.19 Correntes de fase para o caso de curto-circuito interno lado Y.

### 4.4 Corrente de Inrush

Para os casos de corrente de inrush, os níveis de harmônicos ultrapassam os valores limites aplicados, sendo assim, no momento de energização, caso não ocorra curtos-circuitos internos, o Relé deve ser capaz de identificar esta condição, bloqueando assim sua atuação.

#### 4.4.1 Curto-circuito externo durante Inrush

Para condição de inrush, as correntes simuladas são apresentadas na Fig. 20.

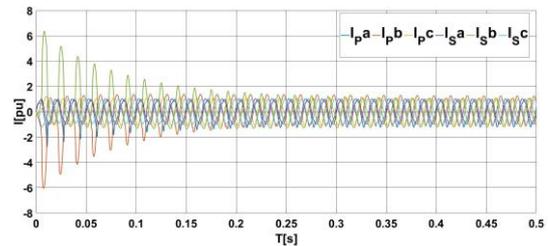


Fig.20 Correntes de fase para o caso de Inrush durante curto-circuito externo.

Como esperado, o relé não atuou. Isso se deve aos níveis de harmônicos apresentados na Fig. 21. A partir da Fig. 21, é possível observar que durante o inrush o valor de amplitude de 2º harmônico ultrapassa o limite de 2º harmônico para bloqueio, demarcado pela reta vermelha. Durante a energização, os pulsos em verde apresentam os instantes em que este limite de harmônico foi excedido.

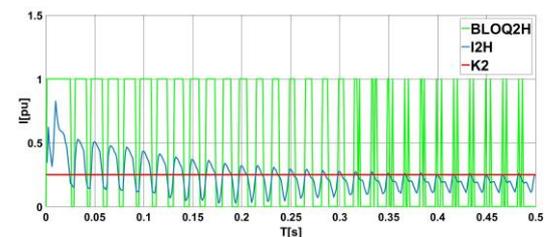


Fig. 21 Bloqueio por segundo harmônico.

#### 4.4.2 Curto-circuito interno durante Inrush

Para este caso, as correntes simuladas são apresentadas na Fig. 22. Neste caso, o relé de proteção atuou em 1ms, conforme marcação. A justificativa é que os sinais de corrente ultrapassaram o limite máximo de corrente de operação.

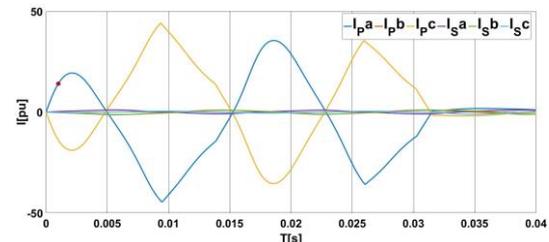


Fig.22 Correntes de fase para o caso de Inrush durante curto-circuito interno.

### 4.5 Saturação do TC

Para simulação dos casos de saturação de TC, foi elevado os valores de resistência de *burden* conectadas aos TCs de primário. Foi aplicada uma carga *burden* em todos os TCs de primário sendo  $R_p = 50 \Omega$  e  $L_p = 230mH$ . Com esta alteração, obteve-se os sinais de corrente representados na Fig. 23.

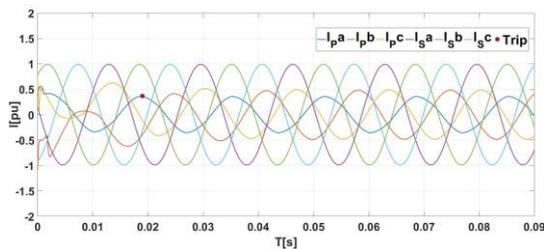


Fig.23 Saturação dos TCs primários.

Neste caso, o relé de proteção atuou em 19 ms. Pode-se observar com a Fig. 23 que com os TCs com carga de burden superior, apresentam correntes de primário com valores inferiores às correntes medidas no secundário.

## 5. CONCLUSÃO

Neste presente trabalho, foi implementada uma metodologia de simulação de um relé de proteção aplicado à função diferencial, onde foi avaliada a resposta desta simulação para diversos casos em que estes relés são expostos.

Primeiramente, foram apresentados os blocos internos do relé de forma detalhada. Como resultados da simulação em regime permanente, foi possível acompanhar passo a passo o que acontecia com os sinais internos ao relé. Com isso, verificou-se ao final do bloco da função diferencial, o esperado para as correntes de operação e restrição para este caso.

Logo após, foram impostos curtos-circuitos externos aos TCs. Com isso, possibilitou-se avaliar a percepção do algoritmo a esta condição, pois como visto, as correntes de operação se mantiveram próximas a zero. Constatando-se que os TCs percebiam de forma proporcional estes curtos-circuitos.

Foram então aplicados curtos-circuitos internos, condições as quais o relé é concebido para proteção do elemento em sua zona de atuação. Como apresentado, o algoritmo foi capaz de perceber de maneira satisfatória estas condições, tendo visto que sua atuação foi em menos de 2 ciclos após a incidência dos curtos-circuitos circuitos.

Para o caso da corrente de inrush, foi possível observar a atuação dos bloqueios por nível de harmônico, onde, no momento de energização com curto-circuito externo, o nível de corrente harmônica garantiu a não atuação.

Assim, conclui-se que a metodologia aplicada para simulação do relé de proteção diferencial utilizada neste trabalho apresentou resultados satisfatórios, tendo em vista as expectativas para cada caso imposto ao mesmo.

## REFERÊNCIAS

BERNARDES, Alexandre Paciencia. Esquema completo de proteção diferencial de transformadores para testes em um relé digital. Dissertação de Mestrado. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.

COELHO, Aurélio Luiz Magalhães. Análise da resposta transitória de transformadores de corrente de proteção e o

impacto em relés de sobrecorrente numéricos. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá. 2011.

ETINGOV D. A. and FEDOSOV D. S.. Development of Restraint Algorithm for Improvement of Reliability of Transformer Differential Protection During External Short Circuits. 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019, pp. 388-393, doi: 10.1109/URALCON.2019.8877653.

FAGUNDES, Arian Rodrigues. Análise do desempenho da proteção diferencial sob influência dos transformadores de corrente em condições de saturação. 2016.

FLACH, E. Desempenho da proteção diferencial de transformadores em sistemas de potência. 2008. 109f. Dissertação de Mestrado - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

HART, David G.; NOVOSEL, Damir; SMITH, Robert A. Modified cosine filters. US. Patent, v. 6154687, 2000.

KINDERMANN, G. Proteção de sistemas elétricos de potência. Florianópolis: UFSC, 1999.

OLIVEIRA, Nelson LS; SOUZA, B. A. Análise da resposta no tempo de algoritmos para estimação de fasores utilizados em relés digitais. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Goiânia, 2012.

ROCHA, Danielly C. G.; BATISTA, Wesley H.; COELHO, Aurélio L. M., ARAUJO, Marcos R. - Practical approach to testing the transformer differential protection for internal and external faults, CT saturation and inrush transients. The Journal of Engineering, v. 2018, n. 15, p. 1239-1244, 2018.

SANTOS, Eduardo Machado dos et al. Métodos para correção das distorções da forma de onda secundária causadas pela saturação de transformadores de corrente para serviço de proteção. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul. 2011.

SILVA, K. M.; NEVES, W. L. A.; SOUZA, B. A. Emtp applied to evaluate three-terminal line distance protection schemes. In: International Conference in Power System Transients (IPST'07) in Lyon, France. 2007. p. 1-6.

TAVARES, K. A. (2013). Modelagem e Simulação da Proteção Diferencial de Transformadores de Potência no ATP. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGEE.DM - 545/2013, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 91p.

TAVARES Karla A. and SILVA Kleber M. Evaluation of Power Transformer Differential Protection Using the ATP Software. in IEEE Latin America Transactions, vol. 12, no. 2, pp. 161-168, March 2014, doi: 10.1109/TLA.2014.6749533.

WG B5.05 Report: Modern Techniques for Protecting, Controlling and Monitoring Power Transformers. Cigré, Jun. 2011.

VIEIRA, Cristiano Texeira. Ferramentas Inteligentes Aplicadas À Proteção Diferencial de Transformadores de Potência. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2013