

## Uma Bancada Experimental para Geração de Eventos em Transformadores de Potência

Rodrigo P. Medeiros\* Lucas D. Simões\*\* Flavio B. Costa\*\*\*

\* Centro Multidisciplinar de Carauabas, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, RN, (e-mail: rodrigo.prado@ufersa.edu.br).

\*\* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN (e-mail: lucassimoes.ee@gmail.com)

\*\*\* Electrical and Computer Engineering Department, Michigan Technological University, Michigan, USA, (e-mail: fbcosta@mtu.edu)

**Abstract:** This work presents an experimental test bench for generating representative disturbances in a transformer. The experimental configuration uses a 1 kVA three-phase transformer with accessible taps in its windings to generate turn-to-turn and turn-to-ground faults. Furthermore, external faults and transformer energizations in the presence and absence of permanent faults were also generated in this experiment. The records of the evaluated events are exported from the oscilloscopes to be evaluated in an *offline* way in a MATLAB® environment. The performance of the conventional differential protection unit (87T) is evaluated for these real cases. The consistent results highlight the feasibility of using the experimental setup as a valuable step for validating transformer differential protection schemes.

**Resumo:** Este trabalho apresenta uma bancada de testes experimental para gerar distúrbios representativos em um transformador. A configuração experimental usa um transformador trifásico de 1 kVA com derivações acessíveis em seus enrolamentos para gerar faltas entre espiras e entre espiras e a terra. Além disso, faltas externas e energizações de transformadores na presença e na ausência de falta permanente também foram geradas neste experimento. Os registros dos eventos avaliados são exportados dos osciloscópios para serem avaliados de maneira *offline* em ambiente MATLAB®. O desempenho da unidade de proteção convencional (87T) é avaliado para esses casos reais. Os resultados coerentes destacam a viabilidade de usar a configuração experimental como um passo valioso para validação de esquemas de proteção de transformadores.

**Keywords:** Experimental test bench; transformer differential protection; turn-to-turn faults; turn-to-ground faults; external faults; transformer energizations.

**Palavras-chaves:** Bancada de teste experimental; proteção diferencial do transformador; faltas entre espiras; faltas espiras à terra; faltas externas; energizações do transformador.

### 1. INTRODUÇÃO

Os transformadores de potência desempenham um papel vital para os sistemas elétricos de potência, permitindo a integração entre os setores de geração, transmissão, distribuição e consumo. Portanto, dada a sua importância, faltas envolvendo esse equipamento devem ser reparadas o mais rápido possível. Segundo Blackburn and Domin (2006), cerca de 70% dos curtos-circuitos em transformadores de potência ocorrem em seus enrolamentos. Por outro lado, este equipamento não deve ser desconectado do sistema durante curtos-circuitos externos à sua zona de proteção nem durante tais eventos como manobras de energização. Portanto, é de extrema relevância, a utilização de sistemas de monitoramento e proteção de transformadores que sejam seguros e confiáveis.

\* Este trabalho contou com o apoio do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e pela CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

A proteção diferencial do transformador é a mais utilizada como proteção primária para transformadores com potência nominal acima de 10 MVA (Elmore, 2003). Tradicionalmente, os relés de proteção diferencial de transformadores usam o conteúdo harmônico da corrente diferencial para aumentar a sua segurança operacional durante a ocorrência de eventos, tais como energização e faltas externas (Behrendt et al., 2011; Guzman et al., 2009).

A avaliação do desempenho de um esquema de proteção de transformadores em campo seria o ideal, porém, o acesso a tais equipamentos é geralmente restrito. Portanto, a maior parte da validação de esquemas de proteção ocorre com simulações digitais em *hardware-in-the-loop* operando em tempo real. Dessa forma, o desenvolvimento de uma bancada de testes experimental, dentro de um laboratório de engenharia e com custo relativamente baixo, para gerar eventos transitórios representativos em um transformador, tais como curtos-circuitos internos e externos, além de energizações, é uma etapa essencial para o desenvolvi-

mento e validação de esquemas de proteção e monitoramento de transformadores a serem utilizados em aplicações práticas.

Este trabalho propõe o desenvolvimento de uma bancada de testes experimental, para geração e análise de eventos transitórios relevantes e desafiadores para o desenvolvimento de funções de proteção de um transformador, tais como curtos-circuitos entre espiras e entre espiras e a terra, bem como curtos-circuitos externos à sua zona de proteção, além de energizações na presença e na ausência de curto-circuito entre espiras e entre espiras e a terra. A bancada experimental registra dados oscilográficos, com um alto nível de ruído, a serem avaliados *offline* por um algoritmo que implementa a unidade de proteção convencional baseada em fasores (87T), implementada de acordo com Peres and Silva (2015).

## 2. PROTEÇÃO DIFERENCIAL (87T)

De acordo com Peres and Silva (2015), o elemento diferencial de fase (87T) compara uma corrente de operação ( $I_{op}$ ) a uma corrente de restrição ( $I_{res}$ ), sendo estas calculadas como segue:

$$I_{op} = |\hat{I}_P + \hat{I}_S|, \quad (1)$$

$$I_{res} = k \cdot (|\hat{I}_P| + |\hat{I}_S|), \quad (2)$$

onde  $k$  é um fator de compensação, e  $\hat{I}_P$  e  $\hat{I}_S$  são os fasores fundamentais das correntes medidas nos lados primário e secundário do transformador. Um trip do elemento 87T é emitido quando as duas condições abaixo são simultaneamente satisfeitas:

$$I_{op} > I_{puT} \quad \text{e} \quad I_{op} > SLP \cdot I_{comp}, \quad (3)$$

em que  $I_{puT}$  e  $SLP$  correspondem, respectivamente, à corrente mínima de operação e à inclinação da curva diferencial;  $I_{comp}$  é a corrente compensada (corrente de restrição adicionada de conteúdo harmônico), sendo dada como segue:

$$I_{comp} = I_{res} + \frac{1}{SLP} \cdot \left( \frac{1}{k_2} \cdot I_2 + \frac{1}{k_5} \cdot I_5 \right), \quad (4)$$

onde  $I_2$  e  $I_5$  são os módulos das componentes harmônicas de segunda e quinta ordem, e  $k_2$  e  $k_5$  são constantes de proporcionalidade (Peres and Silva, 2015).

## 3. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

Na Figura 1 é ilustrado um diagrama de blocos representando a bancada experimental que foi desenvolvida em laboratório, para geração de faltas e eventos em um transformador de potência. O arranjo experimental é composto por um transformador trifásico com potência nominal de 1 kVA e relação de transformação 220/220 V, além de dois disjuntores trifásicos que conectam os enrolamentos primário e secundário deste transformador, respectivamente, a uma fonte de tensão de bancada e a uma carga RLC. Os blocos numerados de 1 a 6 na Figura 1 representam todos os componentes que integram o experimento, conforme ilustrado na Figura 2, os quais são descritos em detalhes ao longo desta seção.

### 3.1 Fonte de tensão de bancada (Bloco 1)

Uma fonte de tensão trifásica conectada à rede elétrica do laboratório, com tensão nominal 220  $V_{rms}$  e frequência

igual a 60 Hz, alimenta a bancada experimental. Durante a coleta de dados, esta fonte operou com um pequeno grau de desbalanceamento entre as fases, o que é uma circunstância interessante para avaliar eventos e faltas em transformadores.

### 3.2 Disjuntores (Bloco 2)

Foram utilizados dois disjuntores-motores do tipo WEG MPW25-3-D063 para conectar os terminais primário e secundário do transformador ao circuito, além de permitir a manobra de energização do transformador.

### 3.3 Sensores de corrente/tensão (Bloco 3)

Seis sensores de corrente/tensão do tipo Allegro ACS712-30 A foram utilizados para medir as correntes trifásicas primárias e secundárias do transformador. Esses sensores são alimentados por uma fonte de tensão externa de 5V Vdc. O sensor ACS712-30 A mede correntes entre -30 A a 30 A, e tem uma sensibilidade de 66 mV/A.

### 3.4 Transformador (Bloco 4)

O transformador trifásico de dois enrolamentos utilizado no experimento apresenta os parâmetros descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Dados do transformador

Parâmetro	Valor
Potência nominal ( $S_{nom}$ )	1 KVA
Relação de transformação ( $\alpha$ )	220/220 $V_{rms}$
Resistência do primário ( $R_p$ )	1,42 $\Omega$
Reatância do secundário ( $R_s$ )	1,01 $\Omega$
Impedância (%)	4,94%
Perdas em vazio ( $P_0$ )	27 W
Perdas em carga ( $P_c$ )	36 W

O transformador foi projetado com taps acessíveis, de forma a permitir a geração de faltas em seus enrolamentos, tais como faltas entre espiras e faltas espiras à terra. Para os dois enrolamentos, as bobinas em cada fase são particionadas nos seguintes taps: 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% e 90%. Na Figura 3 é ilustrado um dos enrolamentos do transformador, com as suas respectivas derivações.

### 3.5 Carga RLC (Bloco 5)

Uma carga RLC trifásica configurada em estrela foi conectada ao enrolamento secundário do transformador. Os parâmetros da carga  $R = 50 \Omega$ ,  $L = 300$  mH e  $C = 30.7 \mu F$ , foram escolhidos de forma que o transformador operasse em torno de 85% de sua potência nominal (transformador operando com carga pesada).

### 3.6 Aquisição dos dados (Bloco 6)

Para o monitoramento do transformador, escolheu-se gravar seis sinais de corrente (três correntes do lado primário e três correntes do lado secundário). Em aplicações práticas, essas correntes são usualmente medidas por transformadores de corrente instalados em esquemas de proteção de

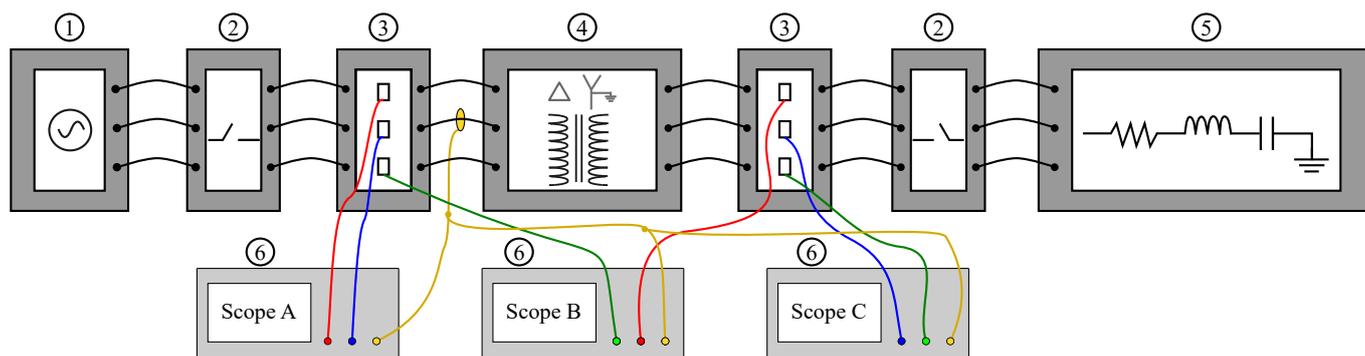


Figura 1. Diagrama de blocos para o arranjo experimental.

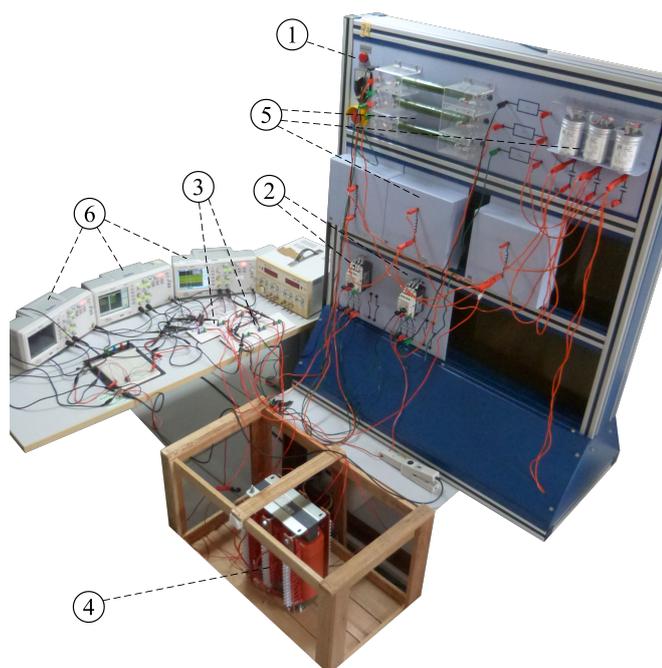


Figura 2. Bancada experimental.



Figura 3. Enrolamento delta do transformador com os taps acessíveis.

transformadores. Portanto, foram utilizados três osciloscópios idênticos do fabricante Agilent DSO1012A para gravar os registros medidos pelos sensores de corrente. Cada osciloscópio tem uma largura de banda de 100 MHz e 2 canais analógicos com uma profundidade máxima de memória de 10 kpts. Como diferentes correntes foram medidas por diferentes osciloscópios, as medições foram sincronizadas. Portanto, uma ponta de prova de corrente Keysight 1146B foi usada como trigger externo para os três osciloscópios, que mediam dois canais cada. Além disso, seis pontas de prova de tensão Siglent PP510, com largura de banda de 100 MHz cada uma, foram utilizadas para medir os sinais de saída dos sensores (bloco 3).

Com base em Medeiros et al. (2021), a frequência de amostragem de 15,36 kHz é suficiente para ser utilizada em métodos de monitoramento e proteção diferencial de transformadores baseados em componentes de alta frequência. No entanto, uma limitação dos osciloscópios usados é que nenhum deles fornece taxas de amostragem múltiplas de 60 Hz. Assim sendo, os osciloscópios registraram os sinais em 17,07 kHz, que é a frequência de amostragem mais próxima de 15,36 kHz disponível nos osciloscópios utilizados.

Os osciloscópios possuem uma porta USB 2.0 para exportação de dados para análises *offline*. As medições foram exportadas como pontos de dados XY, sendo X a contagem da amostra e Y a corrente medida naquele ponto, em formato de valores separados por vírgula (\*.csv).

#### 4. CASOS AVALIADOS

Seis registros reais representativos para a proteção de transformadores foram gerados na bancada experimental: uma falta externa (Figura 4), uma energização do transformador (Figura 5), dois casos de faltas internas (Figuras 6 e 7), além de dois casos de energizações do transformador na presença de faltas internas permanentes (Figuras 8 e 9). Os registros foram exportados dos osciloscópios para serem avaliados *offline* em ambiente do MATLAB®. O desempenho da unidade 87T foi avaliado para esses casos reais. A Tabela 2 apresenta os ajustes utilizados para o elemento 87T.

Tabela 2. Ajustes do elemento 87T (Peres and Silva, 2015)

87T			
$I_{puT}$	SLP	$k_2$	$k_5$
1,0	0,5	0,15	0,15

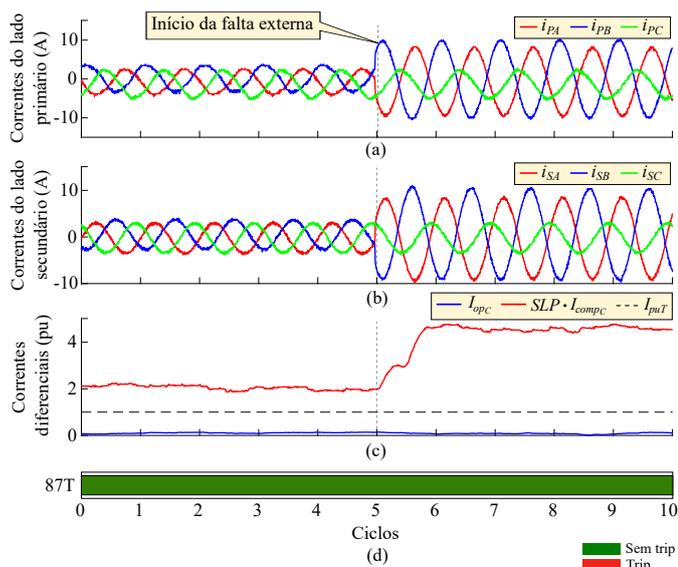


Figura 4. Falta externa: (a) Correntes do lado primário do trafo; (b) Correntes do lado secundário do trafo; (c) Correntes diferenciais da unidade 87T; (d) Trip da unidade 87T.

As Figuras 4-9 representam as formas de onda obtidas a partir dos registros coletados pelos osciloscópios no experimento, tais como: correntes do lado primário do transformador trifásico ( $i_{PA}$ ,  $i_{PB}$  e  $i_{PC}$ ); correntes do lado secundário do transformador trifásico ( $i_{SA}$ ,  $i_{SB}$  e  $i_{SC}$  e  $i_N$ ); as correntes de operação e compensada ( $I_{op}$  e  $I_{comp}$ ); e o estado lógico do elemento 87T convencional.

#### 4.1 Falta Externa

A falta externa à zona de proteção do transformador (Figura 4) corresponde a uma falta fase-terra ocorrendo na carga, portanto externa à zona de proteção do transformador, com uma resistência de falta de  $R_f = 16,67 \Omega$ . De acordo com a Figura 4, apenas a corrente compensada  $I_{comp}$  aumentou desde o início da falta, e a unidade 87T não emitiu um disparo conforme esperado. A relação  $I_{op}/I_{comp}$  foi menor que a inclinação para a falta externa, evitando assim, uma operação incorreta da unidade 87T, conforme descrito em Bo et al. (2000).

#### 4.2 Energização do Transformador

A energização do transformador (Figura 5) ocorreu no lado primário (enrolamento delta), com os terminais secundários abertos. De acordo com a Figura 5(b), a unidade 87T não emitiu trip porque  $I_{op} < SLP \cdot I_{comp}$  durante toda a manobra de energização. Conforme esperado, este evento apresentou um conteúdo harmônico considerável, então o aumento da corrente compensada manteve a segurança da unidade 87T, e nenhum falso trip foi emitido.

#### 4.3 Faltas internas

De acordo com Guzman et al. (2009), o elemento 87T pode não detectar faltas fase-terra próximas ao neutro do transformador ou faltas envolvendo poucas espiras ao longo do enrolamento. Nesses casos, a corrente de falta pode confundir-se com a corrente de carga do transformador, comprometendo a eficiência do esquema de proteção.

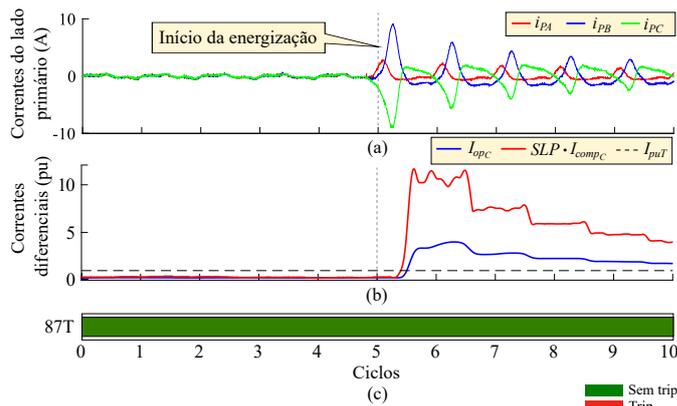


Figura 5. Energização do transformador: (a) Correntes do lado primário do trafo; (b) Correntes diferenciais da unidade 87T; (c) Trip da unidade 87T.

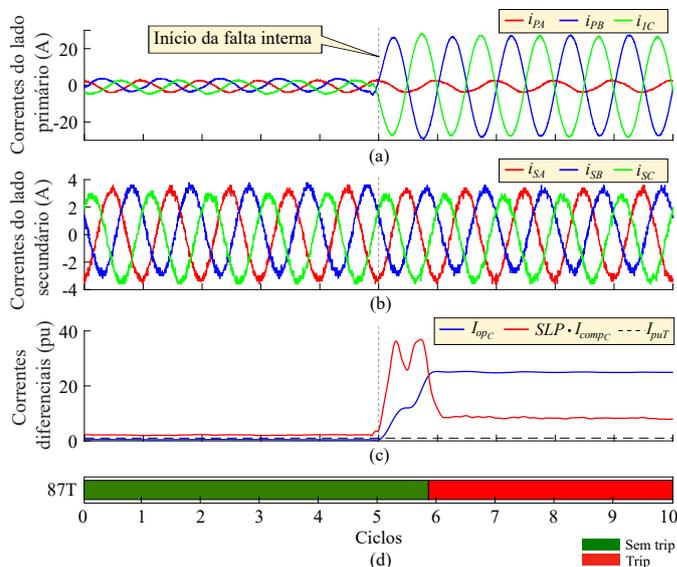


Figura 6. Falta espira-espira envolvendo os taps 10% e 30% da bobina entre as fases B e C do enrolamento delta: (a) Correntes do lado primário do trafo; (b) Correntes do lado secundário do trafo; (c) Correntes diferenciais da unidade 87T; (d) Trip da unidade 87T.

**Falta entre espiras (10%-30%):** A falta interna (Figura 6) é um curto-circuito entre espiras envolvendo os taps de 10% e 30% da bobina entre as fases B e C do enrolamento delta (falta BC). De acordo com a Figura 6(a), as correntes nas fases B e C medidas no enrolamento primário do transformador são bastante sensibilizadas pela falta. A operação da unidade 87T ocorreu com um atraso de 16,5 ms, que é cerca de um ciclo após o tempo de início da falta (Figuras 6(c) e (d)).

**Falta espira-terra (8%):** A falta interna ilustrada na Figura 7 é um curto-circuito envolvendo 8% da bobina da fase A do enrolamento em estrela para a terra. De acordo com as Figuras 7(a) e (b), houve um ligeiro aumento nas correntes trifásicas medidas no lado primário durante o início da falta, enquanto que as correntes trifásicas medidas no lado secundário do transformador permaneceram inalteradas. Ainda assim, a unidade 87T detectou a falta,

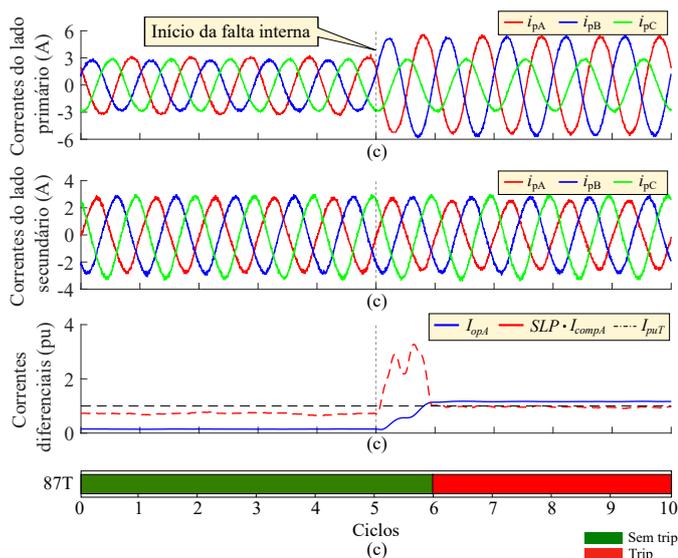


Figura 7. Falta espira-terra envolvendo 8% da fase A do enrolamento em estrela para a terra: (a) Correntes do lado primário do trafo; (b) Correntes do lado secundário do trafo; (c) Correntes diferenciais da unidade 87T; (d) Trip da unidade 87T.

emitindo um comando de trip com um tempo de atraso equivalente a 15,8 ms [Figura. 7(d)].

#### 4.4 Energização do transformador na presença de faltas internas

A detecção de faltas durante as manobras de energização do transformador é uma tarefa desafiadora para a proteção diferencial convencional, pois o alto conteúdo harmônico presente nas correntes de inrush pode causar atrasos no disparo do relé, o que é bastante prejudicial à saúde do transformador de potência (Ibrahim, 2011). Duas manobras de energização foram geradas no experimento com curtos-circuitos permanentes.

*Energização do transformador com falta espira-espira envolvendo os taps 10% e 30% da bobina entre as fases B e C do enrolamento delta:* A energização do transformador (Figura 8) ocorreu no lado primário (enrolamento delta) com os terminais secundários abertos. A falta interna permanente foi um curto-circuito entre os taps 10% e 30% da bobina entre as fases B e C do enrolamento delta. A operação da unidade 87T foi restringida por cerca de um ciclo após o início da energização porque  $I_{op} < SLP \cdot I_{comp}$  [Figura 8(b)]. Dessa forma, o trip é emitido com um atraso de 15,2 ms após o início do evento [Figura 9(c)].

*Energização do transformador com falta espira-terra envolvendo 8% da bobina da fase A do enrolamento em estrela para a terra:* A energização (Figura 9) ocorreu no lado primário (enrolamento delta) com o enrolamento estrela aterrado aberto. A falta interna permanente foi um curto-circuito envolvendo 8% da bobina da fase A do enrolamento em estrela para a terra. Quando o transformador de potência é energizado, a corrente de falta flui do terra do sistema em direção ao ponto neutro do transformador. Apesar da falta ocorrer no enrolamento secundário, as correntes nas fases A e B medidas no enrolamento

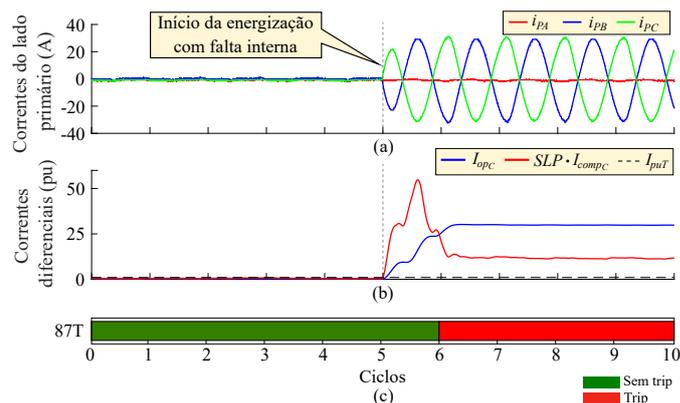


Figura 8. Energização com falta entre espiras envolvendo os taps 10% e 30% da bobina entre as fases B e C do enrolamento delta: (a) Correntes do lado primário do trafo; (b) Correntes diferenciais da unidade 87T; (c) Trip da unidade 87T.

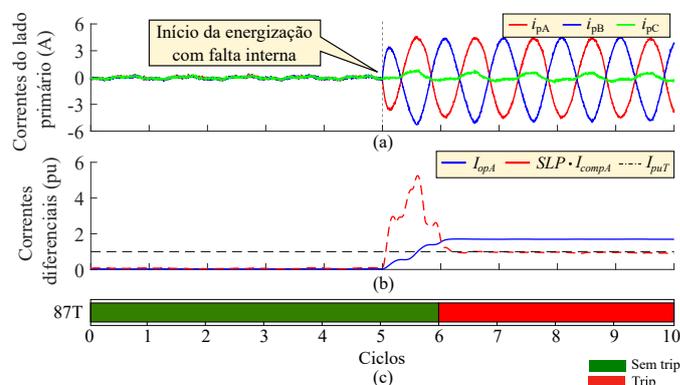


Figura 9. Energização com falta espira-terra envolvendo 8% da fase A do enrolamento em estrela para a terra: (a) Correntes do lado primário do trafo; (b) Correntes diferenciais da unidade 87T; (c) Trip da unidade 87T.

primário do transformador foram bastante sensibilizadas, apresentando um comportamento praticamente senoidal [Figura 9(a)]. Já as correntes medidas no enrolamento secundário do transformador foram praticamente nulas uma vez que este terminal está desconectado da rede elétrica. De acordo com a Figura 9(b), a operação do elemento 87T foi restringida por cerca de um ciclo após o início do evento porque  $I_{op} < SLP \cdot I_{comp}$ . O trip foi emitido com um atraso de 18,36 ms [Figura 9(c)].

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma bancada de testes experimental para geração de eventos transitórios representativos em transformadores de potência, tais como faltas internas, faltas externas e energizações do transformador na presença e na ausência de faltas. Os registros gerados através da bancada foram exportados via osciloscópios para serem avaliados *offline* por um algoritmo de proteção que implementa a unidade 87T.

Os resultados obtidos com a bancada experimental foram coerentes e, apesar de alguns problemas como alto nível de ruído, o esquema de proteção considerado operou de maneira coerente para os casos avaliados. De fato, o ele-

mento 87T apresentou bastante imunidade ao ruído, uma vez que o seu cálculo depende apenas de componentes de baixa frequência, tais como a fundamental e as harmônicas de segunda e quinta ordem.

O próximo passo para este experimento é avaliar *offline* o desempenho de algoritmos de proteção baseados em componentes de alta frequência, para fins de comparação de desempenho com o elemento convencional 87T. Além disso, pretende-se implementar todos esses algoritmos de proteção em um processador digital de sinais, o qual estará integrado à bancada desempenhando o papel do relé de proteção, para permitir a validação dos seus desempenhos em tempo real.

## REFERÊNCIAS

- Behrendt, K., Fischer, N., and Labuschagne, C. (2011). Considerations for using harmonic blocking and harmonic restraint techniques on transformer differential relays. *Journal of Reliable Power*, 2(3), 36–52.
- Blackburn, J.L. and Domin, T.J. (2006). *Protective Relaying: Principles and Applications, Third Edition*. Taylor & Francis.
- Bo, Z., Weller, G., and Lomas, T. (2000). A new technique for transformer protection based on transient detection. *IEEE Trans. Power Del.*, 15(3), 870–875.
- Elmore, W. (2003). *Protective Relaying: Theory and Applications*. No Series. Taylor & Francis.
- Guzman, A., Fischer, N., and Labuschagne, C. (2009). Improvements in transformer protection and control. In *62nd Annual Conference for Protective Relay Engineers*, 563–579. doi:10.1109/CPRE.2009.4982542.
- Ibrahim, M. (2011). *Disturbance Analysis for Power Systems*. Wiley.
- Medeiros, R.P., Costa, F.B., Silva, K.M., Popov, M., Chavez Muro, J.d.J., and Lima Junior, J.R. (2021). A clarke-wavelet-based time-domain power transformer differential protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1–1. doi:10.1109/TPWRD.2021.3059732.
- Peres, L. and Silva, K.M. (2015). Análise de sensibilidade paramétrica da proteção diferencial de transformadores de potência.