

Implementação em Hardware de Funções de Proteção Aplicadas a Transformadores de Potência

Ivo S. S. Filho, Kleber M. Silva

Resumo—Neste artigo apresenta-se o desenvolvimento de hardware para implementação de algoritmos numéricos de proteção diferencial de transformadores de potência. Para tanto, foi utilizado o processador ARM1176JZF-S de 700 MHz, em conjunto com microcontroladores ATMEGA 328p. Com o uso de casos simulados no software ATP, foram testados os comportamentos das funções diferenciais de fase (87T), de sequência negativa (87Q), de falta restrita à terra (87REF), assim como a função direcional restrita à terra (67REF) e uma lógica de detecção de faltas externas, implementada com base na função diferencial instantânea. Os resultados obtidos indicam desempenho satisfatório no que concerne à velocidade e robustez verificados em dispositivos disponíveis no mercado internacional.

Palavras Chave — Proteção de Transformadores, proteção diferencial, ATP, Hardware de proteção digital.

I. INTRODUÇÃO

Em busca de crescimento econômico sustentável, a sociedade brasileira tem empreendido constantes investimentos na expansão e modernização das instalações elétricas do Sistema Interligado Nacional (SIN).

Dentre os elementos do sistema de potência, os transformadores têm 10% de probabilidade de falta [1]. Esta alta porcentagem, juntamente com a importância desse equipamento em sistemas de potência, justifica a necessidade de um conjunto de funções de proteção sobrepostas e adequadas para este tipo de equipamento. O reparo ou substituição de transformadores, em caso de falhas, implicam em longo tempo fora de serviço e custos elevados.

Este artigo apresenta o estágio de desenvolvimento de um hardware microprocessado que detecta faltas internas em transformadores de potência, por meio de algoritmos que implementam funções de proteção diferencial.

No estado da arte dos algoritmos de proteção diferencial, muitos trabalhos têm aplicado abordagens eficientes para detecção de faltas internas ao mesmo passo em que se garante maior segurança operativa que minimiza a possibilidade de atuações indevidas que ocasione desligamentos desnecessários do equipamento.

No começo do século XX, relés com esquemas de proteção diferencial começaram a ser usados em grandes transformadores e, 1938, a introdução da restrição por harmônicos permitiu que a proteção não operasse de forma errônea frente a correntes de excitação durante a energização. [2]. Desde então, em busca de uma maior sensibilidade, seletividade e velocidade de operação da proteção diferencial

de transformadores, diversos métodos vêm sendo sugeridos e utilizados para evitar situações que podem causar a má operação dos relés. Essas situações geralmente estão relacionadas à [3]: saturação de transformadores de corrente (TCs), compensação de defasagem, comutação de *tap* sob carga, corrente de magnetização, corrente de *inrush* e energização solidária.

Em 1983, Phadke e Thorp [4] desenvolveram uma técnica que utiliza a relação corrente-fluxo do transformador para obter a função de restrição para o relé diferencial. Eles mostram que esta técnica requer menor esforço computacional quando comparada à técnica que utiliza a restrição por harmônicos.

De acordo Gajic *et al.* [5], a corrente de *inrush* e a sobre-excitação dos transformadores podem produzir falsas correntes diferenciais que podem levar a má operação dos relés. Várias técnicas já foram e são utilizadas para evitar a operação errônea do relé diferencial nessas condições: atraso intencional da operação, dessensibilização da função durante o período de *inrush*, reconhecimento do conteúdo harmônico da corrente, dentre outros. Os relés mais modernos usam a restrição e o bloqueio por harmônicas, mas eles podem não funcionar em casos onde o conteúdo harmônico da corrente de operação é muito baixo. Outra alternativa que distingue a corrente de *inrush* de faltas internas é a de reconhecimento da forma de onda, que pode não identificar a condição de sobre-excitação.

Em termos de desenvolvimento de hardware para testes de algoritmos de proteção de transformadores, em [6] os autores apresentam os resultados da implementação no microprocessador de 8 bits M68HC11E9, da família Motorola 6800. O sistema desenvolvido incluiu dentre outras funções, a distinção entre faltas internas ao transformador e correntes de *inrush*.

Diante desta revisão bibliográfica, os autores propõem o desenvolvimento de hardware capaz de executar algoritmo que combine métodos de bloqueio e restrição por harmônicos, com funções de detecção de faltas internas e externas à região protegida, bem como de funções de proteção diferencial especializadas em determinados tipos de eventos como o diferencial de sequência negativa e de faltas restritas à terra, de modo similar às simulações executadas em [7].

II. PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES

O princípio básico de funcionamento da proteção diferencial numérica consiste em, a partir da leitura das correntes nos lados primário e secundário do transformador, aplicar a Lei de Kirchhoff dos nós. Ou seja, considera-se o

transformador como um nó, no qual o somatório das correntes que chegam e partem deste nó tem que ser idealmente nulo, em condições normais de operação.

A proteção diferencial de transformadores é exclusivamente dependente da qualidade da medição dos sinais de correntes que compõem a malha diferencial. Visto que existem diversos fatores que podem tornar imprecisa a medições destes valores, opta-se normalmente por empregar a técnica de proteção diferencial percentual, que se dá pela composição e comparação de correntes denominadas corrente de operação e corrente de restrição.

As formulações (1) e (2) são as mais utilizadas em algoritmos de proteção diferencial de transformadores.

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

$$I_{res} = \left| \hat{I}_1 \right| + \left| \hat{I}_2 \right| \quad (2)$$

A detecção de uma falta interna na região de proteção diferencial ocorre quando são atendidos conjuntamente os critérios definidos em (3) e (4).

$$I_{op} > I_{pickup} \quad (3)$$

$$I_{op} > SLP \cdot I_{res} \quad (4)$$

Em (3) o valor da corrente I_{pickup} leva em consideração erros de medição dos TCs e de relações de transformação do equipamento protegido. O valor de SLP pode ser ajustado de forma a tornar a atuação da proteção diferencial mais sensível ou mais restritiva.

Os critérios de detecção de faltas internas definem o plano de operação-restrição ilustrado na Fig. 1. Neste plano são definidas as regiões de operação, para a qual o elemento de proteção atua, e de restrição, para qual ele não deve atuar.

Tendo definido os critérios de detecção de faltas, faz-se necessário estabelecer um método para adequação dos sinais de corrente que compõem a malha diferencial, uma vez que, devido às características dos transformadores de potência, as correntes primárias e secundárias possuem diferentes ordens de grandeza e defasagem angular (a depender das ligações dos polos do equipamento).

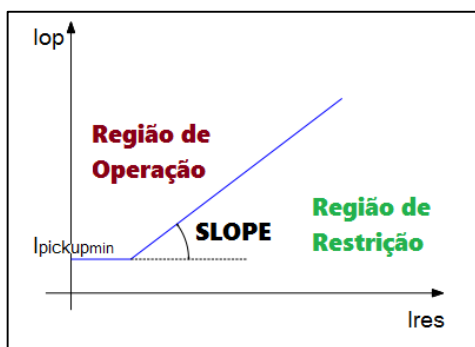


Figura 1. Plano de Operação – Restrição da Proteção Diferencial.

Neste sentido, os seguintes ajustes e correções devem ser efetuados: (a) Correção das relações de transformação; (b) Correção da defasagem angular; (c) Compensação da sequência zero; e (d) Restrição/bloqueio por harmônicos.

A correção das relações de transformação normalmente é efetuada por intermédio de grandezas de normalização (TAPs). Este processo consiste em converter todas as correntes para o sistema pu, cuja base é a corrente nominal do transformador.

Já a compensação de sequência zero se faz necessária, quando algum dos enrolamentos do transformador for ligado em delta. Neste caso, a corrente de sequência zero deve ser suprimida do cálculo das correntes que compõem a malha diferencial.

Seguindo a mesma linha de raciocínio, deve ser implementada a correção da defasagem em função do ângulo de entre as correntes do enrolamento primário e as correntes do enrolamento secundário do transformador, conforme formulado detalhadamente em [7].

A Restrição ou Bloqueio por harmônicos evita a atuação indevida da proteção diferencial durante energização ou sobreexcitação do transformador. Basicamente, calculam-se no algoritmo as correntes de 2ª harmônica e, caso estes valores superem 75% da corrente fundamental, pode ser tomada a decisão de bloquear a atuação da proteção, ou restringir sua atuação aumentando o valor do SLP .

O método de restrição por harmônico discutido em [7] foi empregado neste trabalho, de forma a aplicar um modo mais restritivo e imune a atuações indevidas promovidas em situações fortemente marcadas por componentes de 2ª harmônica.

Além dos elementos de proteção diferencial de fase, identificados por 87TA, 87TB e 87TC, os relés digitais disponíveis no mercado dispõem de outras funções de proteção, a saber: diferencial de sequência negativa (87Q) e diferencial de falta restrita à terra (87REF) e direcional de falta restrita à terra (67REF).

A proteção diferencial de sequência negativa tem como especialidade a identificação de forma rápida e precisa das faltas que ocorrem entre espiras, inclusive em situações em que o transformador está com sua carga nominal e os efeitos deste tipo de curto circuito nas correntes de linha são mínimos e não sensibilizam os elementos de proteção diferencial de fase.

Vale ressaltar que este elemento é bastante sensível a desbalanços de corrente entre fases. Isso significa que o 87Q deve ser bloqueado durante a energização do transformador, ou quando da detecção de grande percentual de 2ª harmônica, que é o caso de saturação de TCs.

O método de implementação deste algoritmo é similar ao aplicado nos elementos de fase, sendo aplicadas as formulações (5) e (6). Os critérios para sensibilização deste elemento diferencial são os apresentados em (7) e (8).

$$I_{opQ} = \left| \hat{I}_{1Q} + \hat{I}_{2Q} \right| \quad (5)$$

$$I_{resQ} = \max(|\hat{I}_1|, |\hat{I}_2|) \quad (6)$$

$$I_{opQ} > I_{pickupQ} \quad (7)$$

$$I_{opQ} > SLP_{87Q} \cdot I_{resQ} \quad (8)$$

O elemento 87REF atua comparando as correntes de sequência zero calculada e a corrente de neutro medida por TC específico conectado no neutro do enrolamento estrela do transformador. Sua aplicação se justifica principalmente por atuar de forma mais rápida e precisa durante faltas próximas ao neutro. Este elemento atua também com bastante segurança em situações de faltas que envolvam a terra. O método de implementação deste algoritmo se dá por (9) e (10), devendo ser atendidos os critérios (11) e (12).

$$I_{opREF} = |\hat{I}_N| \quad (9)$$

$$I_{resREF} = K_r \cdot (|\hat{I}_N - 3\hat{I}_0| + |\hat{I}_N + 3\hat{I}_0|) \quad (10)$$

$$I_{opREF} > I_{pickupREF} \quad (11)$$

$$I_{opREF} > SLP_{87REF} \cdot I_{resREF} \quad (12)$$

O elemento 67REF atua comparando a direcionalidade das correntes de sequência zero e a corrente medida no neutro do transformador. Caso estas correntes possuam pequena diferença angular, identifica-se a ocorrência de falta interna ao transformador.

Além dos algoritmos relacionados anteriormente, pode ser utilizado o elemento de proteção diferencial instantâneo, de modo a garantir maior proteção contra atuações indevidas. Este elemento não trabalha com fasores calculados por meio de filtros (Cosseno, Fourier de um Ciclo, Fourier de Meio Ciclo etc.), mas sim faz puramente uso das amostras das correntes da malha diferencial.

O método utilizado para detecção de faltas externas ou internas consiste em verificar se a derivada da corrente de restrição instantânea (em função do tempo) é superior a um limiar previamente definido. Caso este critério seja atendido, o algoritmo passa a tentar identificar se a falta detectada é interna ou externa à malha diferencial. Se os critérios definidos em (3) e (4), calculados para os valores instantâneos das correntes da malha diferencial, forem atendidos, entende-se que a falta detectada é interna à região protegida. Por outro lado, caso as condições definidas em (3) e (4) não sejam satisfeitas durante um intervalo de 4 ms após a detecção da falta, a mesma é declarada como externa, o que implica no bloqueio dos elementos diferenciais de sequência negativa e de falta restrita à terra. Há ainda a opção de aumentar o SLP dos elementos de fase 87TA, 87TB e 87TC, o que tem sido implementado em alguns relés numéricos em escala comercial.

III. HARDWARE UTILIZADO

O dispositivo utilizado para o desenvolvimento do protótipo de um relé de proteção diferencial de transformadores de

potência, representado de modo simplificado na Fig. 2, consiste na Plataforma Raspberry Pi, modelo B, associada a dois microcontroladores ATMEGA 328p, um display LCD de 16 colunas por 2 linhas e um par de relés de acionamento das bobinas de abertura dos disjuntores associados ao transformador protegido.

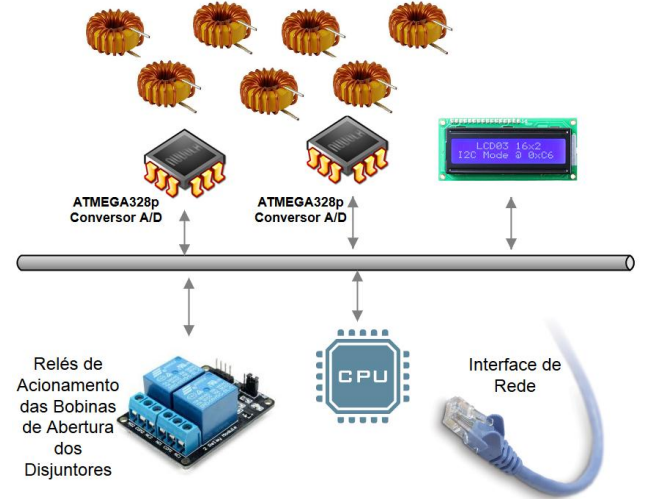


Figura 2. Estrutura do Relé Digital desenvolvido.

O processador ARM1176JZF-S de 700 MHz, disponível na placa de prototipagem Raspberry Pi [8] dispõe de 512 MB de memória RAM, portas USB, Ethernet e GPIOs, dentre outras interfaces. Ao operar na frequência de 700 MHz, este dispositivo oferece um desempenho equivalente a 41 MFLOPS (10^6 operações de ponto flutuante por segundo). O sistema operacional escolhido para o dispositivo é o *Raspbian*, versão variante da distribuição Linux *Debian Wheezy*, otimizada para operar com o conjunto de instruções ARMv6.

Os dois microcontroladores ATMEGA 328p utilizados têm como função principal realizar a conversão analógico-digital (A/D) dos sete sinais de corrente (dois de cada fase e um do neutro) a uma taxa de 136 amostras por ciclo. Contudo, esses dois controladores poderão ser utilizados durante a evolução do desenvolvimento do hardware para diversas funções adicionais, como, por exemplo, filtragem digital e acomodação dos sinais de entrada do relé. Ao operarem na frequência de 12 MHz, a atividade de amostragem e digitalização dos sinais de corrente a uma taxa aproximada de 8kHz, em cada canal de corrente, não se ocupa 50% da capacidade de processamento destes dispositivos.

Como método de entrada dos sinais de corrente, em alternativa à conversão A/D, podem ser fornecidos arquivos gerados em simuladores diversos como, por exemplo, o ATP, via interface de rede do hardware.

O display LCD tem como função principal sinalizar as proteções atuadas, quando da detecção de faltas no transformador e, em regime permanente de operação, apresenta os valores das correntes nas fases e os valores das correntes de operação e restrição calculadas durante a execução do algoritmo.

Os relés de acionamento das bobinas de abertura, quando da detecção de falta interna à zona diferencial do transformador, recebem sinais em nível lógico de 5 V e fecham o circuito de

TRIP dos disjuntores, normalmente operados no nível de tensão de 125 V.

IV. MODELAGEM EM SOFTWARE DAS FUNÇÕES DE PROTEÇÃO DIFERENCIAL

A Fig. 3 apresenta diagrama de blocos do núcleo do software desenvolvido em C++ que desempenha as funções de proteção diferencial de transformadores.

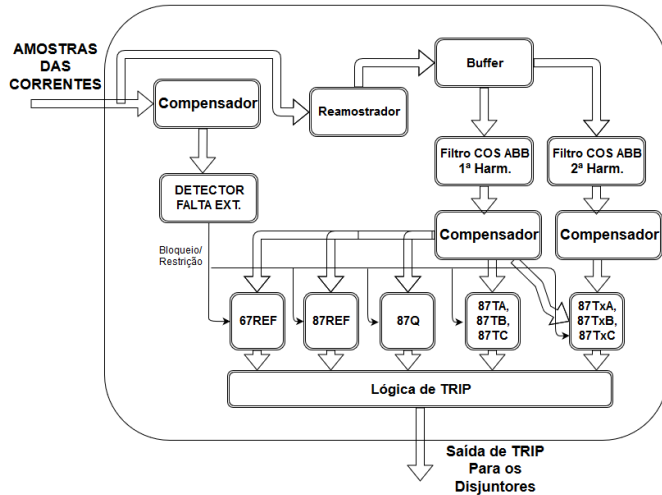


Figura 3. Diagrama descritivo do sistema modelado e implementado.

Para evitar atrasos provocados pelo escalador de processos do sistema operacional, o algoritmo foi desenvolvido e integrado ao ambiente Linux sob a forma de “kernel module” [9] para operar nas chamadas de interrupção de alta prioridade.

A. Compensador

Os módulos compensadores foram projetados para empreender a normalização das amostras de corrente ou dos fasores de corrente para pu da corrente nominal do transformador. Além disso, os compensadores efetuam correções de defasagem angular entre os enrolamentos primário e secundário do transformador, bem como podem proceder à eliminação da corrente de sequência zero.

B. Detector de Falta Externa

O elemento denominado Detector de Falta Externa trabalha diretamente com amostras das correntes a uma taxa de amostragem normalmente superior à utilizada pelos elementos filtrados. Sua principal função é a detecção rápida de defeitos externos à região protegida, enviando sinais de restrição e bloqueio para os elementos filtrados 87T, 87Tx, 87Q, 87REF e 67REF. Ao se habilitar esta função, torna-se o relé mais seguro quanto a operações indevidas.

C. Reamostrador

O módulo Reamostrador seleciona amostras de correntes a uma taxa menor predefinida que serão utilizadas pelos elementos que trabalham com correntes fasoriais. Normalmente, o hardware projetado trabalha com 136 amostras por ciclo para o elemento Detector de Falta Externa, subamostrando-as a uma taxa de 8 amostras por ciclo.

D. Buffer

O objetivo deste módulo é armazenar uma janela móvel de 8 amostras, no qual a amostra mais antiga é descartada. As amostras são disponibilizadas ao estimador de fasores.

E. Filtro Cosseno ABB 1ª Harmônica e 2ª Harmônica

Este módulo implementa o algoritmo do filtro cosseno modificado da ABB, proposto em [10], com base na janela de amostras obtida no módulo Buffer, a fim de realizar a estimação dos fasores na frequência fundamental e na frequência harmônica de segunda ordem.

F. 87TA, 87TB e 87TC

Estes módulos são responsáveis pela detecção de faltas internas à região protegida, empregando as formulações e critérios indicados em (1), (2), (3) e (4).

G. 87TxA, 87TxB e 87TxC

Estes módulos são responsáveis pela detecção de faltas internas à região protegida de modo similar aos elementos 87TA, 87TB e 87TC, empregando adicionalmente o método de restrição por harmônico discutido em [7].

H. 87Q, 87REF e 67REF

Estes módulos são responsáveis por implementar as proteções diferenciais de sequência negativa, restrita à terra e direcional restrita à terra.

V. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a demonstração dos resultados apresentados neste artigo, optou-se por enviar as correntes ao relé digital implementado por meio de arquivos resultantes de simulações no software ATP. Para tanto, antes de se obter os resultados no relé desenvolvido, simulou-se um sistema composto por um Banco de Transformadores 230/69 kV, de 50 MVA, YNd1, conforme indicado na Fig. 4, cujos enrolamentos foram seccionados de modo a possibilitar a simulação de faltas internas ao equipamento entre espiras e espira à terra em qualquer percentual. Para simulações de curtos internos, particionaram-se os enrolamentos internos do transformador em estudo, conforme apresentado em [7].

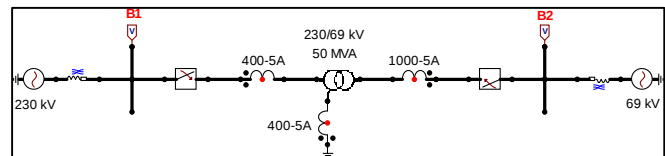


Figura 4. Sistema simulado.

No esquema implementado, as correntes secundárias de todos os TCs utilizados no sistema são condicionadas por meio de biblioteca Models implementada para o ATP em [7] e salvas em arquivo digital de acordo com a taxa de amostragem definida, que, por sua vez, são lidas pelo relé desenvolvido.

A fim de verificar o desempenho das funções 87T, 87Tx, 87Q, 87REF, 67REF e Detecção de Falta Externa na proteção do transformador simulado no sistema indicado na Fig. 4, foram geradas diferentes bases de dados, a saber: curtos-circuitos internos e externos à região protegida, curtos-circuitos espira-

terra nos enrolamentos estrela e delta; curtos-circuitos espira-espira nos enrolamentos estrela e delta; e energizações pelos lados primários e secundários do transformador.

Concluídas as simulações, ajustou-se o relé desenvolvido com os parâmetros indicados na Tabela I.

TABELA I - PARAMETRIZAÇÃO DO RELÉ DESENVOLVIDO

Parâmetro	87T	87Tx	87Q	87REF
Corrente de Pickup	1,0 pu	1,0 pu	0,02 pu	0,2 pu
Slope	0,4	0,4	1,0	1,0
Slope Restritivo	0,8	0,8	Bloqueio	Bloqueio
Percentual de Restrição de 2ª Harmônica	-	25%	-	-
Ângulo entre $\hat{I}_n$ e $\hat{I}_0$ na função 67REF	8°			

A Tabela II apresenta os principais casos simulados no ATP e o que foi verificado quanto à atuação ou não das funções implementadas em hardware.

Propositadamente, inibiu-se durante os testes realizados o sinal de bloqueio por harmônicas associado ao elemento 87Q de modo a ficar caracterizada a real necessidade desta sinalização durante energizações do transformador. Observa-se, neste contexto, que o elemento 87Q atuou indevidamente durante as energizações testadas.

Observa-se também o desempenho mais seguro dos elementos de fase com restrição por harmônicas (87Tx), proposto em [7] em relação aos elementos de fase 87T, durante situações de energização de transformadores.

Dentre os casos indicados na Tabela II, foram selecionados aqueles cujos comportamentos transitórios apresentam aspectos a serem destacados.

A. Curto Monofásico Fase-Terra, dentro da Região Protegida, 230 kV

A Fig. 5 possibilita comparar o comportamento transitório das funções 87T e 87Tx durante uma falta fase-terra no lado de 230 kV, dentro da zona protegida. É possível averiguar que a função 87T, por calcular a corrente de restrição diretamente conforme indicado em (2), identifica rapidamente a falta interna à região protegida, conforme indicado na Fig. 5(a). Já os elementos de proteção 87Tx permanecem por um maior número de amostras na região de restrição até que sejam atendidas as condições de detecção de faltas internas à região protegida. Esta situação é retratada pela Fig. 5(b). Por outro lado, indica-se nas Fig. 5(c) e (d) que as funções 87Q e 87REF atuam praticamente em conjunto com os elementos 87T.

B. Energização do Transformador pelo lado de 230 kV

A Fig. 6 apresenta o comportamento das funções de proteção durante o processo de energização do transformador pelo lado primário. Ao se comparar o desempenho do elemento 87T, Fig. 6(a), com o elemento 87Tx, indicado na Fig. 6(b), observa-se que o primeiro atua indevidamente motivado pela forte presença de componentes harmônicas que compõem as correntes de *inrush*, enquanto que os elementos 87Tx permanecem na região de restrição do plano operacional.

TABELA II. PRINCIPAIS CASOS SIMULADOS E TESTADOS

Caso	87T	87Tx	87Q	87REF	67REF
Regime Permanente	-	-	-	-	-
Curto Monofásico Externo na Barra de 230 kV ^a	-	-	-	-	-
Curto Monofásico Externo na Barra de 69 kV ^b	-	-	-	-	-
Curto Monofásico dentro da Região Protegida, lado Primário	A B C	A B C	☒	☒	☒
Curto Monofásico dentro da Região Protegida, lado Secundário	A - C	A - C	☒	-	-
Curto interno Espira-Terra, em 0,5% do enrolamento, no lado Estrela	-	-	☒	☒	☒
Curto interno Espira-Terra, em 1% do enrolamento, no lado Estrela	A - -	A - -	☒	☒	☒
Curto interno Espira-Terra, em 50% do enrolamento, no lado Estrela	A B C	A B C	☒	☒	☒
Curto interno Espira-Espira, em 1% do enrolamento, no lado Estrela	-	-	☒	-	☒
Curto interno Espira-Espira, em 50% do enrolamento, no lado Estrela	A B C	A B C	☒	-	☒
Curto interno Espira-Terra, em 1% do enrolamento, no lado Delta	A B -	A B -	☒	-	-
Curto interno Espira-Terra, em 50% do enrolamento, no lado Delta	-	-	☒	-	-
Curto interno Espira-Espira, em 1% do enrolamento, no lado Delta	-	-	-	-	-
Curto interno Espira-Espira, em 50% do enrolamento, no lado Delta	A - -	A - -	☒	-	-
Energização pelo lado de 230 kV	A B C	-	☒	-	-
Energização pelo lado de 69 kV	-	-	☒	-	-

^a Neste caso, o elemento de Detecção de Falta Externa detectou a falta em 1,618 ms após sua ocorrência.

^b Neste caso, o elemento de Detecção de Falta Externa detectou a falta em 6,029 ms após sua ocorrência.

VI. CONCLUSÕES

Neste artigo, analisou-se o desempenho da proteção diferencial implementada no processador ARM1176JZF-S de 700 MHz. Foram testadas diversas situações às quais transformadores de potência podem ser submetidos, verificando que o relé numérico desenvolvido responde às faltas de modo similar aos dispositivos disponíveis no mercado

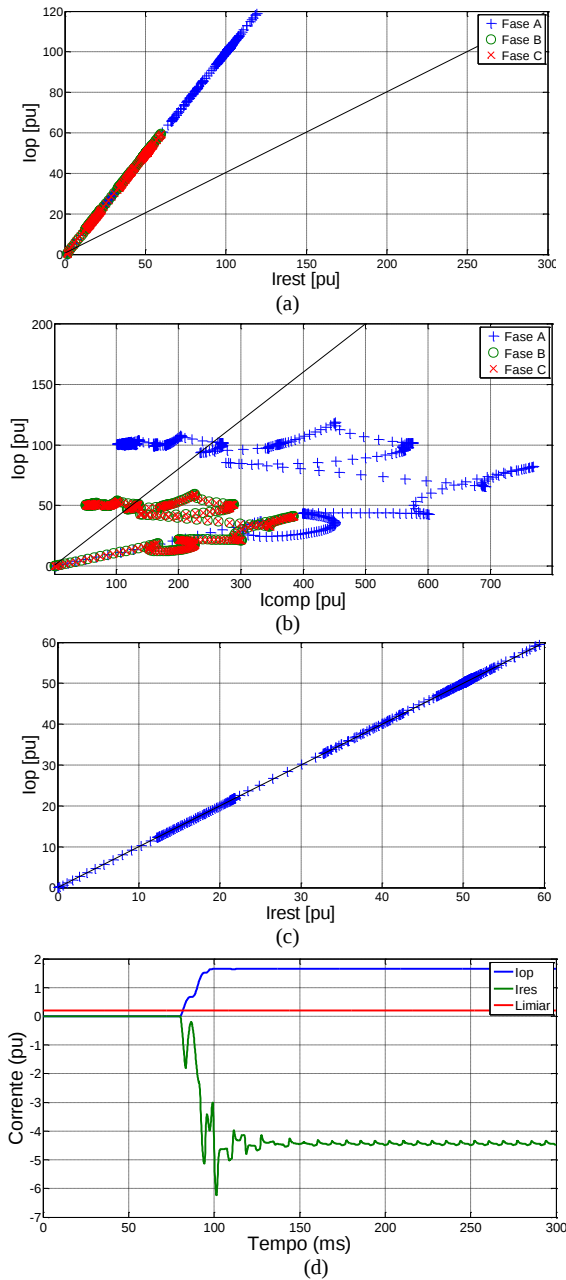


Figura 5. Comportamento transitório das funções de proteção durante faltas fase-terra no lado de 230 kV dentro da região protegida: (a) 87T; (b) 87Tx; (c) 87Q; (d) 87REF.

internacional. Os tempos de resposta de cada elemento de proteção implementado são da ordem de 9 μ s, não impondo atrasos consideráveis à detecção e extinção de defeitos em transformadores. Desta forma, a resposta do relé depende unicamente do atendimento às condições de detecção de falta.

Como contribuição deste trabalho, entende-se que foi desenvolvida uma plataforma que pode ser utilizada em ambiente acadêmico para comparar simultaneamente o desempenho de diversos algoritmos de proteção, não se restringindo somente aos de proteção diferencial de transformadores.

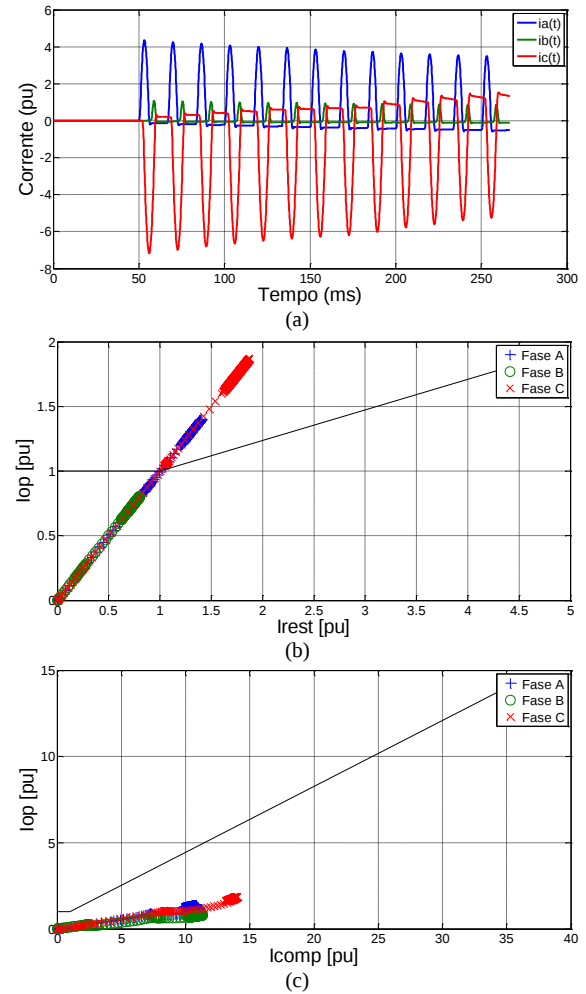


Figura 6. Comportamento transitório das funções de proteção durante energização do transformador pelo lado de 230 kV: (a) correntes de *inrush* no primário do transformador (b) 87T; (c) 87Tx.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] Y. G. Paithankar e S. R. Bhide. *Fundamentals of Power System Protection*. Prentice-Hall of India Pvt. Ltd, 2004.
- [2] C. Christopoulos e A. Wright. *Electrical Power System Protection*. 2ª Edição, Kluwer Academic Publishers, 2010.
- [3] *Transformer Protection Application Guide*. Basler Electric Company, 2003.
- [4] A. G. Phadke e J. S. Thorp. A New Computer-Based Flux-Restrained Current-Differential Relay for Power Transformer Protection. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1983.
- [5] Z. Gajic, I. Ivankovic, B. Filipovic-Grcic e R. Rubesa. New General Method for Differential Protection of Phase Shifting Transformers. *International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*, Coreia do Sul, 2007.
- [6] A. Rafa, S. Mahmood, N. Mariun, W.Z. Wan Hassan. Protection of Power Transformer Using Microcontroller-Based Relay. *Student Conference on Research and Development Proceedings*, Shah Alam, Malásia, 2002.
- [7] TAVARES, K. A. (2013). *Modelagem e Simulação da Proteção Diferencial de Transformadores de Potência no ATP*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília - DF.
- [8] Raspberry Pi. Disponível em: www.raspberrypi.org
- [9] J. Corbet, A. Rubini, G. Kroah-Hartman (2005). *Linux Device Drivers*.
- [10] D. G. Hart, D. Novosel e R. A. Smith. Modified Cosine Filters. Patent Number 6154687, Nov. 2000.