

Análise dos Efeitos dos Harmônicos na Performance de Relés Numéricos para Proteção de Motor de Indução

Geraldo Rodrigues Silveira Neto; Jader Filipe Braga de Sousa; Ícaro Oliveira Viana; Aurélio Luiz Magalhães Coelho; José Eugênio Lopes de Almeida; Frederico de Oliveira Passos

Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira

netosilveira20@gmail.com; jaderfilipe@gmail.com; icaro.viana@ymail.com; aurelio.coelho@unifei.edu.br; j.eugenio@unifei.edu.br;

fredericopassos@unifei.edu.br

Resumo — Ao longo dos anos, as cargas que compõem os sistemas elétricos industriais vêm evoluindo em seus aspectos construtivos, sendo em sua maioria composta de circuitos eletrônicos que lhes conferem características não lineares. Devido a esta particularidade, surgem correntes e tensões com componentes múltiplas da frequência fundamental, também conhecidas como componentes harmônicas, deformando e modificando a amplitude do sinal resultante que alimenta os dispositivos de proteção. Neste sentido, este trabalho apresenta os resultados da análise dos efeitos de diferentes ordens harmônicas no desempenho de um relé numérico de proteção comercial para motor industrial. Algumas funções de proteção são avaliadas, como: sobrecorrente instantânea (ANSI 50), desequilíbrio de corrente (ANSI 46), sobretensão (ANSI 59) e subtensão (ANSI 27). Para isso, um simples sistema industrial com um motor de indução trifásico é modelado no Simulink/Matlab. Os sinais de tensão e correntes resultantes dessa simulação são convertidos para o formato COMTRADE para serem injetados em um relé de proteção comercial a fim de verificar a resposta dessas funções de proteção frente a diversos cenários.

Palavras-chaves — Desequilíbrio de corrente, distorção harmônica total, proteção de motor, relé numérico, sobrecorrente instantânea, sub/sobretensão.

I. INTRODUÇÃO

Existem vários tipos de relés, direcionados para monitoramento de variáveis diversas, visando prover a proteção de dispositivos elétricos. Dentre os equipamentos que estão sujeitos aos distúrbios inerentes aos sistemas elétricos industriais, destacam-se os motores de indução. Os relés para motores são utilizados para monitorar as principais causas de falhas, tais como sobrecorrentes, sub/sobretensões, desequilíbrios de corrente, além de efeitos térmicos e oscilações de frequência.

O advento da eletrônica de potência trouxe grande avanço e flexibilidade na construção de equipamentos que até então eram limitados pelas características dos componentes passivos. Desde então, o número de cargas não lineares presentes no sistema elétrico vem aumentando gradativamente. Entretanto estas cargas possuem a característica de gerar componentes múltiplas da frequência fundamental do sistema, denominadas componentes harmônicas, as quais deformam o sinal de interesse, alterando sua forma e amplitude [1], [2].

Em sistemas industriais, onde há presença de motores de indução e cargas não lineares, torna-se então importante avaliar o impacto das componentes harmônicas na atuação da proteção de motores, uma vez que o sinal que alimenta o motor pode apresentar deformação.

Com o advento dos relés numéricos, foram desenvolvidas técnicas de filtragem para minimizar a influência dos distúrbios de qualidade da energia elétrica (QEE) na atuação do equipamento de proteção. Sinais com distorção harmônica podem afetar a operação do relé, fazendo com que este atue de maneira indevida, causando problemas de interrupções ou atuações desnecessárias. Portanto, durante a medição de corrente e tensão é desejável que o relé filtre as componentes harmônicas e realize seu monitoramento considerando somente o valor eficaz da componente fundamental do sinal [1], [3].

Nesse sentido, verifica-se a necessidade de realizar testes em relés impondo vários níveis de distorção harmônica total (THD – *Total Harmonic Distortion*) de modo a verificar o quão imune o equipamento de proteção se apresenta frente a este distúrbio. Nesse contexto, esse trabalho apresenta os resultados da resposta de um relé numérico de proteção de motor diante desse cenário. O trabalho é dividido da seguinte forma: na Seção 2, uma breve fundamentação teórica necessária para compreensão do estudo é abordada; na Seção 3, os materiais e métodos utilizados para realização dos testes no relé são apresentados; na Seção 4, são expostos os resultados e discussões dos mesmos e por fim, na Seção 5, são listadas as principais conclusões do trabalho.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordados os conceitos gerais acerca de distorção harmônica, filtragem de relés e sobre os distúrbios que serão analisados para avaliar as funções de proteção do motor quando há presença de harmônicos, necessários para compreensão do trabalho.

A. Harmônicos

Um harmônico é um componente senoidal com forma de onda periódica, que é múltiplo da frequência fundamental. Por exemplo, na frequência de 60 Hz, 120 Hz é o segundo harmônico (2×60 Hz) e 180 Hz é o terceiro harmônico (3×60 Hz) [4].

Níveis de distorção harmônica são descritos pelo espectro harmônico completo, com magnitude e ângulo de fase de cada componente harmônico individual. Também é comum o uso de uma medida única, distorção harmônica total, relativa ao valor eficaz de distorção harmônica em relação à componente fundamental. De acordo a norma 519-1992 do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) [5], a distorção harmônica total de corrente é calculada como:

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots}}{I_1} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (1)$$

sendo I_1 a componente de 60 Hz e I_h a harmônica múltipla da fundamental de ordem h ($h = 2, 3, \dots, \infty$).

B. Filtragem de Sinais

Para evitar atuações indevidas em razão de sinais ruidosos ou compostos por componentes harmônicos, é necessário que os relés de proteção filtrem os sinais em sua entrada, a fim de obter apenas as grandezas dos sinais de interesse.

A filtragem de sinais deve preservar a componente fundamental e rejeitar as distorções harmônicas, que podem interferir no processo de coordenação da proteção devido a interpretações errôneas na lógica de atuação dos dispositivos.

São encontrados diferentes tipos de filtros digitais, analógicos, ou composições de ambos, nos relés numéricos (depende do fabricante), como os filtros CAL, cosseno, Fourier, IIR e FIR [6]. Testes realizados com diferentes tipos de filtros em [6] constataram que o filtro cosseno possui uma boa relação entre velocidade de processamento e rejeição de distúrbios e, por essa razão, é um dos mais utilizados nos relés. Na referência [6], os autores ressaltam também que o filtro cosseno apresenta alto desempenho na atenuação de componentes CC e rejeição de harmônicos, se comportando como um filtro passa-banda.

C. Distúrbios Analisados para Avaliação da Proteção do Motor

Neste trabalho, os distúrbios analisados para avaliação da proteção, quando há presença de componentes harmônicas, são: desequilíbrio de corrente, sobrecorrente, subtensão e sobretensão. A seguir uma breve descrição de cada um.

1) Desequilíbrio de Corrente

O desequilíbrio de corrente causado por um desbalanço de tensão é um problema de qualidade de energia que altera as condições de operação do motor de indução. Dentre as várias consequências deste distúrbio, apresentadas em [7] e [8], destaca-se o surgimento da corrente de sequência negativa que ocasiona um torque em sentido contrário ao do giro do motor. Como consequência deste novo esforço, ocorre uma elevação na temperatura da máquina em decorrência do aumento das perdas por histerese e *Foucault*, causando vibração excessiva e reduzindo sua vida útil.

Um desequilíbrio na tensão de alimentação de um motor assíncrono causa um desequilíbrio na corrente de elevada magnitude. Visando demonstrar este efeito, são apresentados os dados contidos na Tabela I.

TABELA I
RELAÇÃO DOS PERCENTUAIS DE DESEQUILÍBRIO

Deseq. Tensão	Deseq. Corrente
1%	6%
2%	12%
2,5%	15%
3,3%	20%

2) Sobrecorrente

A sobrecorrente é um distúrbio muito comum nos sistemas elétricos. Como o próprio nome diz, caracteriza-se por um valor de corrente que excede os valores nominais e são geralmente causadas por sobrecarga, curto-circuito ou partida de grandes motores.

A sobrecorrente causa esforços térmicos e dinâmicos, elevação da temperatura dos cabos e enrolamentos dos motores devido à magnitude da corrente ali percorrida, além de alguns problemas mencionados no item desequilíbrio de corrente. Em um sistema de proteção, ao ocorrer uma sobrecorrente, o relé deverá atuar de acordo com os valores pré-ajustados em sua parametrização [10].

3) Subtensão e Sobretensão

Uma redução no valor *rms* da tensão com magnitude entre 0,1 e 0,9 p.u., com duração de 0,5 ciclo a 1 minuto, é caracterizado como um afundamento de tensão. Quando a duração do evento é superior a 1 minuto, com amplitude entre 0,8 e 0,9 p.u., este passa a ser classificado como uma subtensão [11].

As principais causas de subtensões são entrada de cargas, saída de bancos de capacitores e sobrecarga em alimentadores. A ocorrência desse fenômeno é recorrente, visto que suas causas são intrínsecas à operação do sistema elétrico.

A proteção de motores contra subtensões é necessária, uma vez que sua operação nestas condições pode provocar aquecimentos acima dos seus valores nominais.

Quando ocorre um aumento no valor *rms* da tensão, com magnitude de 1,1 a 1,8 p.u., a norma IEEE 1159-1995 [11] caracteriza esse evento como elevação de tensão para períodos de 0,5 ciclo a 1 minuto. Já quando a duração do evento é superior a 1 minuto, com amplitude entre 1,1 e 1,2 p.u., este passa a ser classificado como uma sobretensão.

As sobretensões não são tão recorrentes quanto as subtensões. Suas principais causas são a saída temporária de grandes cargas, inserção de banco de capacitores na rede e ajuste incorreto no *tap* de transformadores.

A proteção de motores contra sobretensões é necessária, uma vez que sua operação nestas condições pode provocar oscilações de potência e torque.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

A realização dos testes no relé de proteção foi baseada na metodologia proposta por [12]. A Fig. 1 apresenta o esquemático dessa metodologia adaptada para os fins deste trabalho.

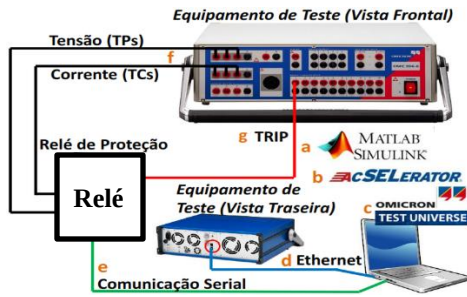


Fig.1. Arquitetura do sistema de testes (adaptada) [12].

As etapas “a” a “g” expostas na Fig. 1 foram implementadas em laboratório para a realização dos testes, como descritas a seguir:

- a. Inicialmente, foi simulado um modelo de alimentação trifásica de um motor de indução de 100 HP, 460 V, 111.5 A e 1784 rpm no *software* Matlab/Simulink, estando o mesmo com carga nominal. O transformador de corrente (TC) e o transformador de potencial (TP), utilizados na simulação para adequarem os valores de corrente e tensão ao relé, possuem relações ideais de transformação de 150/5 e 460/115, respectivamente. Em seguida, o motor foi alimentado com tensão somente na frequência fundamental (60 Hz). Posteriormente, na fonte de alimentação foram inseridas, juntamente com a frequência fundamental, componentes de terceira (180 Hz), quinta (300 Hz) e sétima (420 Hz) harmônicas, sendo estas as componentes harmônicas mais comuns nos sistemas industriais, causadas geralmente por cargas não lineares trifásicas e monofásicas. Os sinais de tensão e corrente simulados foram convertidos para o formato COMTRADE conforme o padrão [13], para que possam ser carregados na mala de teste da Omicron CMC 356, a qual teve atribuída a função de reproduzir os sinais simulados no Matlab/Simulink (ver item c) para injetá-los no relé de proteção (ver item f).
- b. Parametrização das funções de proteção do relé numérico. As funções ajustadas foram: sobrecorrente instantânea (ANSI 50), desequilíbrio de corrente (ANSI 46) e sub/sobretensão (ANSI 27/59);
- c. Uma vez realizada a comunicação do *software* da mala de teste com o computador (item d), os arquivos COMTRADE são carregados no módulo de reprodução de sinais *Advanced Transplay* do *software* Omicron Test Universe;
- d. Realização da comunicação entre o computador e a mala de testes via cabo *ethernet*;
- e. Envio dos dados da parametrização (item b) para o relé via cabo serial;
- f. Seleção dos sinais secundários de tensão (TP) e corrente (TC) reproduzidos na mala de teste e ligação do cabeamento dos mesmos com as respectivas entradas do relé;
- g. Ligação da saída do sinal *trip* do relé com uma entrada digital da mala de testes para medir o tempo total da atuação da proteção em resposta aos distúrbios aplicados.

A partir da realização dos procedimentos supracitados, foi possível comparar a atuação do relé de proteção de motor, inicialmente alimentado por um sinal puramente senoidal na frequência industrial e posteriormente na presença de componentes harmônicas.

Na análise dos resultados foram considerados os tempos de atuação da função de proteção, bem como as oscilografias filtradas e não filtradas coletadas no relé.

A. Desequilíbrio de Corrente (ANSI 46)

O teste para verificar o impacto da distorção harmônica na atuação da função de desequilíbrio de corrente teve início com a parametrização no *software* do fabricante do relé de proteção. No manual de instruções do equipamento, são descritos o modo de funcionamento e os cálculos que são realizados pela função 46, informando ainda que o *pickup* pode ser configurado para a grande maioria das aplicações para atuar com um desequilíbrio de corrente de 20%, com duração maior que 5 segundos [8]. Entretanto, como somente é desejado verificar a atuação do relé, este tempo foi reduzido para o mínimo possível, sendo este de 0,1 s.

A metodologia deste teste consistiu em simular o funcionamento do motor de indução em regime permanente na presença de distorção harmônica e desequilíbrio de corrente. A partir dos testes realizados foram gerados arquivos COMTRADE dos sinais com duração dos últimos 500 ms da simulação, para posteriormente serem aplicados ao relé por meio da caixa de testes. Nos primeiros 100 ms o motor é alimentado por um sinal equilibrado e no restante do tempo é submetido a um desequilíbrio causado pela redução na tensão em uma das fases, sendo que durante os 500 ms a máquina esteve alimentada por um sinal com distorção harmônica.

Em um primeiro momento foram gerados sinais de teste com diferentes níveis de desequilíbrio de corrente sem a presença harmônica, visando constatar a atuação do relé. Em seguida foram gerados sinais com diversas configurações de módulo e ângulo de distorção harmônica envolvendo combinações em duplas entre o terceiro, quinto e sétimo harmônicos, para verificar se a presença deste distúrbio causaria alguma alteração na atuação do relé em relação aos sinais sem distorção.

B. Sobrecorrente Instantânea (ANSI 50)

Assim como na função 46 anteriormente descrita, o teste visando avaliar o impacto da distorção harmônica na atuação da função de sobrecorrente instantânea iniciou-se com a parametrização do relé de proteção do motor com ajuste de *pick-up* de 495 A. O elemento de sobrecorrente de fase instantâneo é ajustado levando-se em consideração a corrente nominal e a de rotor travado, de modo que seja sensível ao curto-circuito trifásico simétrico conforme recomendado em

A metodologia utilizada nos testes para gerar o sinal de sobrecorrente consistiu em inserir, na simulação do motor de indução, curtos-circuitos monofásicos e bifásicos em sua alimentação. Posteriormente, foram inseridos os sinais com a presença de diversos níveis de THD. Dos sinais gerados, foram aproveitados apenas os 500 ms finais de simulação, onde o curto-circuito foi inserido após 100 ms, estando o motor em regime permanente.

C. Subtensão e Sobreensão (ANSI 27 e ANSI 59)

O relé numérico é dotado das funções 27 e 59 que tratam, respectivamente, das proteções de sub e sobreensão. Como mencionado anteriormente, o padrão IEEE 1159-1995 caracteriza as variações no valor eficaz da tensão a partir de 10% (0,1 p.u.) acima ou abaixo de seu valor nominal. Este valor foi estipulado na parametrização das funções de sub/sobreensão para atuação instantânea do relé, conforme descrito nos manuais do equipamento.

Para avaliar o efeito das distorções harmônicas na resposta do relé quando submetido à sub/sobreensão, estas condições foram simuladas usando duas fontes independentes em paralelo na alimentação do motor: uma para simular uma operação nominal a 460V/60Hz e a outra para simular uma operação com valores de tensão de 0,05 a 0,15 p.u. abaixo ou acima do valor eficaz da tensão a 60Hz, contendo harmônicos de 3ª, 5ª e 7ª ordem. Para simular o momento do evento, foi utilizada uma lógica de chaveamento a fim de remover a fonte saudável e inserir a fonte contendo a sub/sobreensão, bem como a distorção harmônica.

Como mencionado anteriormente, dos sinais gerados foram aproveitados apenas os 500 ms finais de simulação. Isto ocorreu também para os testes da função 59, onde o instante da remoção da fonte sã e inserção da fonte contendo a variação de tensão ocorreu após 100 ms.

Para o teste da função 27 foi necessária a realização de algumas alterações no tempo de aquisição do sinal de tensão ao qual o relé é submetido. Para estes testes foram necessários tempos de simulação de 8 s, onde a inserção da fonte contendo a sub/sobreensão ocorreu após 7 s. Este procedimento ocorreu após a verificação de *trip* da função 27 sem aplicação de nenhum sinal (0 V é visto como subtensão). Portanto, os 7 s contendo o sinal de tensão nominal, isento de subtensão e harmônicos, foi necessário a fim de remover o sinal de *trip* inicial no “repouso” do relé e assim ser possível realizar o teste de subtensão. Desse modo, para se obter resultados concisos, primeiramente foram aplicados sinais de tensão sem a presença de distorções harmônicas, a fim de verificar a eficiência de operação do relé. Após a efetuação destes testes, foi repetido todo o procedimento com a presença de distorções harmônicas, conforme proposto em [14].

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados e discussões dos testes realizados considerando os distúrbios descritos nas seções anteriores com vários níveis de distorção harmônica. A norma IEEE 519-1992 recomenda níveis máximos de THD para tensão de 5% para sistemas elétricos em geral e 10% para sistemas dedicados, e apresenta valores limites de distorção de corrente de 20% [5]. Entretanto, o relé foi testado com níveis superiores aos estipulados devido à possibilidade de sistemas com baixa potência de curto circuito apresentarem alto nível de distorção harmônica e também a necessidade de validar o dispositivo de proteção em relação ao que é especificado pelo fabricante.

A. Desequilíbrio de Corrente (ANSI 46) e Sobrecorrente Instantânea (ANSI 50)

Os resultados obtidos nos testes tanto da função de desequilíbrio de corrente quanto de sobrecorrente instantânea mostraram que não houve mudança nas condições de atuação ou não atuação entre um sinal puro e distorcido pelas componentes harmônicas, não tendo também ocorrido diferença significativa no tempo de atuação do relé mesmo quando submetido a sinais com alto nível de THD de corrente. A pequena diferença de tempo entre as atuações ocorre em muitos casos pela própria variabilidade na atuação do equipamento de proteção, fato este comprovado com testes consecutivos utilizando um mesmo sinal.

Na função de sobrecorrente, o relé sob teste possui uma combinação de filtro cosseno com um filtro detector de pico, assim denominado filtro adaptativo cosseno-pico. Ele incorpora as vantagens dos dois filtros, o cosseno tendo um excelente desempenho com relação ao offset DC e a remoção dos harmônicos e o detector de pico fornecendo a melhor aquisição da magnitude de formas de ondas com elevadas saturações. Com esta combinação, o relé responde com mais confiabilidade nas situações de sobrecorrente [6], Subtensão e Sobreensão (ANSI 27 e ANSI 59).

Os valores para as distorções harmônicas indicadas na Tabela II servem para referência do planejamento elétrico no Brasil em termos de QEE [15]. Logo, a norma vigente estabelece que distorções harmônicas de tensão acima de 10% fogem dos critérios pré-estabelecidos de QEE do sistema elétrico nacional.

TABELA II
VALORES DE REFERÊNCIA GLOBAIS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS TOTAIS
(EM PORCENTAGEM DA TENSÃO FUNDAMENTAL) [15]

Tensão Nominal no barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (THD)
$V_N \leq 1\text{kV}$	10%
$1\text{kV} < V_N \leq 13,8\text{kV}$	8%
$13,8\text{kV} < V_N \leq 69\text{kV}$	6%
$69\text{kV} < V_N \leq 230\text{kV}$	3%

Para os testes das funções de sub/sobreensão o relé foi submetido a distorções acima dos 10% estabelecidos a fim de verificar a robustez de seu filtro. Esta análise serviu também para determinação de possíveis comprometimentos em sua atuação caso opere em locais onde ocorram eventos de elevada distorção harmônica como, por exemplo, em sistemas de geração eólica que trabalham com conversores de frequência.

Tanto para a função de subtensão quanto de sobreensão foi verificada uma atuação equivocada do relé para níveis de variação de tensão menores que 0,1 p.u., como indicam as Tabelas IV (função 27) e V (função 59). Nenhum caso de não atuação do relé em momentos onde a variação ultrapassou os 0,1 p.u. foi verificado.

O comprometimento do motor por sub ou sobreensão não ocorreria em nenhum momento, visto que a variação de tensão verificada na proteção ocorreu apenas para níveis abaixo do parametrizado (menores que 0,1 p.u.), o que acarretaria em um desligamento ou alarme do motor para níveis de variação de tensão abaixo do valor previsto.

A Tabela III representa os casos onde não ocorreu a atuação do relé para as funções 27 e 59. Os dados para as duas funções foram dispostos em uma mesma Tabela devido ao fato

de apresentarem o mesmo resultado. Os níveis de variação de tensão para a não atuação do relé foram de 0,07 e 0,08 p.u. de sub/sobretensão (níveis relativamente distantes dos ajustes determinados para o relé). Para condições de distorção harmônica nula até níveis de THD de 10,52%, não foi constatado nenhuma anormalidade na atuação do relé.

TABELA III
COMPARAÇÃO DOS CASOS DE NÃO ATUAÇÃO DAS FUNÇÕES 27 E 59

Teste	Variação [%]	Harmônico	Modulo [p.u.]	Ângulo [°]	Harmônico	Modulo [p.u.]	Ângulo [°]	THD V [%]	Atuação [ms]
1	7	-	-	-	-	-	-	-	Não atuou
2	8	-	-	-	-	-	-	-	Não atuou
3	7	3°	0,03	90	5°	0,02	60	3,63	Não atuou
4	8	3°	0,03	90	5°	0,02	60	3,63	Não atuou
5	7	3°	0,042	60	5°	0,067	90	7,98	Não atuou
6	8	3°	0,042	60	5°	0,067	90	7,98	Não atuou
7	7	3°	0,08	120	5°	0,067	30	10,52	Não atuou
8	8	3°	0,08	120	5°	0,067	30	10,52	Não atuou
9	7	5°	0,042	45	7°	0,067	90	7,98	Não atuou
10	8	5°	0,042	45	7°	0,067	90	7,98	Não atuou
11	7	5°	0,08	100	7°	0,067	30	10,52	Não atuou
12	8	5°	0,08	100	7°	0,067	30	10,52	Não atuou

A Tabela IV demonstra alguns testes onde ocorreu a atuação do relé ajustado para operar na função 27. Para os mesmos níveis de variação, onde anteriormente o relé não havia atuado (0,07 p.u. e 0,08 p.u.), foi constatada uma atuação indevida do relé para níveis de distorção harmônica superior a 25%. Para o caso de inexistência de distorção, o relé atuou de forma desejada para níveis de subtensão superiores a 0,1 p.u. Foi verificado que mesmo com a existência de distorções harmônicas, sempre que o relé se encontrou sob variações superiores a 0,1 p.u., a sua atuação ocorreu como esperado.

TABELA IV
COMPARAÇÃO DOS CASOS DE ATUAÇÃO DA FUNÇÃO 27

Teste	Variação [%]	Harmônico	Modulo [p.u.]	Ângulo [°]	Harmônico	Modulo [p.u.]	Ângulo [°]	THD V [%]	Atuação [ms]
1	12	-	-	-	-	-	-	-	26,5
2	15	-	-	-	-	-	-	-	21,1
3	8	3°	0,1	90	5°	0,23	60	25,3	20,5
4	7	3°	0,4	90	5°	0,2	60	45,15	27,3
5	8	3°	0,4	100	5°	0,2	30	45,15	23,2
6	8	3°	0,2	60	5°	0,25	90	32,27	22,1
7	7	5°	0,4	90	7°	0,2	60	45,15	31,4
8	8	5°	0,4	90	7°	0,2	60	45,15	28,4
9	8	5°	0,1	45	7°	0,23	90	25,3	24,0
10	8	5°	0,25	45	7°	0,2	90	32,27	19,8
11	12	3°	0,03	90	5°	0,02	60	3,63	20,8
12	15	5°	0,08	120	7°	0,06	30	10,52	23,1

Já a Tabela V apresenta a operação do relé quando ajustado para operar na função 59. Assim como para as demais funções, quando não existiram distorções harmônicas, o relé operou como esperado para valores acima do ajuste pré-definido. Porém, assim como para a função 27, o relé passou a operar de forma indevida para distorções harmônicas superiores a 25%.

Nos dados coletados, destacou-se o fato de que para esta função, o relé atuou para níveis de variação de tensão inferiores a 0,08 p.u. uma única vez, que se encontra em destaque na Tabela IX.

Os valores em destaque nas Tabelas IV e V indicam casos onde o relé operou esporadicamente, ou seja, hora operava, hora não operava.

TABELA V
COMPARAÇÃO DOS CASOS DE ATUAÇÃO DA FUNÇÃO 59

Teste	Variação [%]	Harmônico	Modulo [p.u.]	Ângulo [°]	Harmônico	Modulo [p.u.]	Ângulo [°]	THD V [%]	Atuação [ms]
1	12	-	-	-	-	-	-	-	24,9
2	15	-	-	-	-	-	-	-	20,0
3	8	3°	0,1	90	5°	0,23	60	25,3	27,2
4	8	3°	0,4	90	5°	0,2	60	45,15	19,5
5	8	3°	0,4	100	7°	0,2	30	45,15	26,4
6	8	3°	0,2	60	5°	0,25	90	32,27	23,5
7	7	5°	0,4	90	7°	0,2	60	45,15	27,5
8	8	5°	0,4	90	7°	0,2	60	45,15	28,6
9	8	5°	0,1	45	7°	0,23	90	25,3	23,4
10	8	5°	0,25	45	7°	0,2	90	32,27	19,5
11	12	3°	0,03	90	5°	0,02	60	3,63	23,9
12	15	5°	0,08	120	7°	0,06	30	10,52	22,1

Como citado na análise das outras funções de proteção, o filtro cosseno possui uma eficiência singular na eliminação de distorções harmônicas. O filtro cosseno tem os seus coeficientes uniformemente amostrados de um ciclo de uma forma de onda cosseno [6]. Quando o filtro faz a aproximação dos sinais distorcidos amostrados em ondas cossenoidais, há a atuação indevida do relé para alguns pontos próximos ao limiar de atuação, que é de 0,1 p.u. A constatação desta limitação do filtro, quando trabalha em níveis próximos ao limiar, foi observada quando ocorreu a atuação esporádica do relé para alguns níveis de distorção.

Para “enxergar” o erro causado pela aproximação realizada pelo filtro cosseno, observou-se que, enquanto para níveis de subtensão de 0,07 p.u. o relé media 61,23 V_{RMS} , para o caso onde não existiam distorções harmônicas, a oscilografia filtrada do relé apresentava uma leitura de 60,75 V_{RMS} para o caso onde existe uma THD 45,15%. Um erro relativo de menos de 1% que custou a atuação indevida do relé. A oscilografia do sinal em questão, obtida no teste 4 da Tabela IV, antes e depois da atuação do filtro cosseno é ilustrada na Fig. 2. Foi convencionado que as fases A, B e C foram plotadas respectivamente nas cores preta, vermelha e azul.

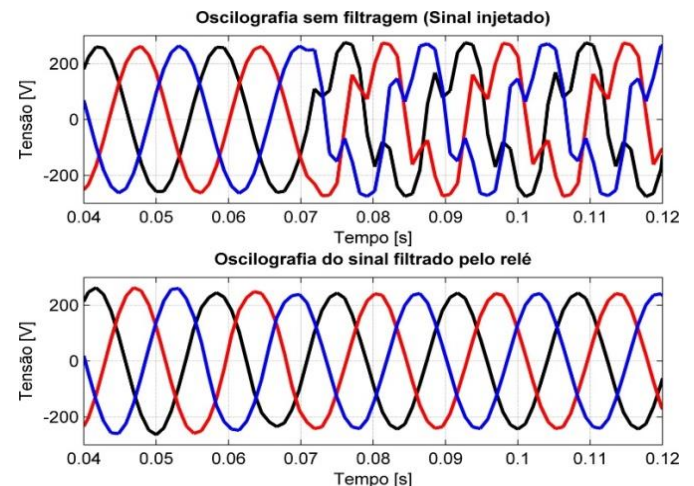


Fig.2. Oscilografias filtrada e não filtrada do teste 4 da Tabela IV

A oscilografia da sobretensão ocorrida no teste 7 da Tabela V é mostrada na Fig. 3. Da mesma forma como foi convencionado anteriormente as fases A, B e C foram plotadas respectivamente nas cores preta, vermelha e azul.

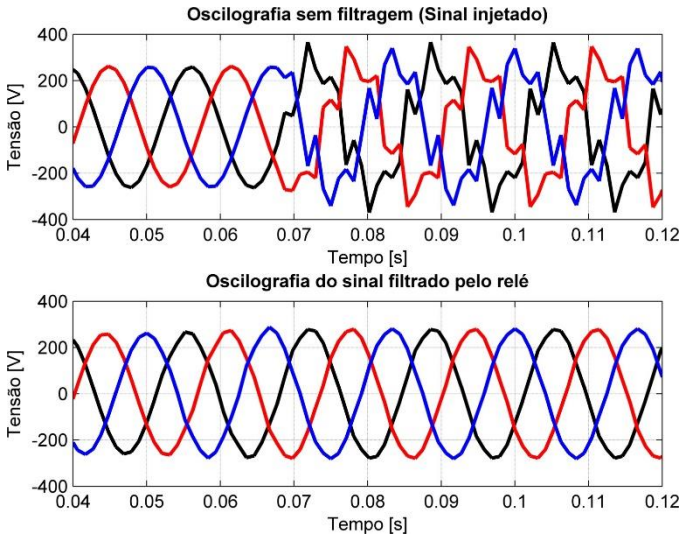


Fig.3. Oscilografias filtrada e não filtrada do teste 7 da Tabela V.

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizado um estudo sobre a influência da distorção harmônica na operação de um relé de proteção de motor. O foco da análise consistiu na comparação de casos de atuação e não atuação do dispositivo quando submetido a distúrbios de desequilíbrio de corrente, sobrecorrente instantânea, subtensão e sobretensão. As funções de proteção foram inicialmente testadas com um sinal apresentando o respectivo cenário somente com a componente fundamental e posteriormente, o mesmo evento com a adição em vários níveis de distorção harmônica total envolvendo o terceiro, quinto e sétimo harmônicos.

Os resultados apresentados nos testes das funções baseadas na medição de sinais de corrente, sendo estas o desbalanço de corrente e a sobrecorrente instantânea, não apresentaram influência na condição de atuação ou não atuação do sinal de *trip*, em eventos afastados do limiar de atuação. Portanto, pode-se concluir que a filtragem e estimação fasorial do relé foram confiáveis, atuando corretamente para todos os distúrbios designados a operar e não operando de modo incorreto para qualquer cenário.

Para os testes das funções de sub/sobretensão constatou-se um pequeno erro de aproximação gerada na filtragem do sinal distorcido pelo filtro cosseno, que ocasionou a atuação indevida do relé para valores de sub/sobretensão abaixo do estipulado em sua parametrização. A aproximação feita pelo relé ocorreu de modo a oferecer um erro relativo de menos de 1%, onde a classificada “atuação indevida” não ocasionaria nenhum dano por atraso da proteção no motor ou perda de produção por uma atuação equivocada, visto que os valores se encontram próximos do limiar. Dessa forma, pode-se atribuir um bom desempenho do filtro e do estimador fasorial.

A conclusão deste artigo é que o relé numérico para proteção de motores mostrou-se bastante eficiente em sua

operação, apresentando pouca ou nenhuma alteração quando submetido a elevados níveis de distorção harmônica. Deve-se apenas observar que os valores de ajuste possuem um erro relacionado à aproximação da filtragem de $\pm 1\%$, que na prática chega a ser insignificante.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pelos recursos concedidos para elaboração desta pesquisa.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] I. Zamora, A. J. Mazón, V. Valverde, J. I. San Martin, G. Buigues, A. Dysko, “Influence of Power Quality on the Performance of Digital Protection Relays,” *Power Tech, 2005 IEEE Russia*, pp. 1-7.
- [2] W. A. Elmore, S. E. Zocholl, C. A. Kramer, “Effect of Waveform Distortion on Protective Relays,” *Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record of the 1991 IEEE*, vol. 2, pp. 1802-1811.
- [3] F. Wang, M. H. J. Bollen, “Evaluating the Effect of Measured Power Disturbances on Protective Relay Operation,” *Proceeding of International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring, and Power Technologies 2000*, IEEE, pp. 232-237.
- [4] R. D. Henderson, P. J. Rose, “Harmonics: The Effects on Power Quality and Transformers,” *Fiber and Film Industry Technical Conference 1993*, IEEE, pp 4/1-411.
- [5] *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, IEEE Standard 519-1992, Apr. 1993.
- [6] E. O. Schweitzer, D. Hou, “Filtering for Protective Relays,” *WESCANEX 93. Communications, Computers and Power in the Modern Environment Conference Proceedings*, IEEE, pp. 15-23, May 1993.
- [7] A. L. Ferreira Filho, “Análise do Comportamento do Fator de Desequilíbrio Frente à Variação da Amplitude e do Ângulo da Tensão,” DSc. dissertation, ElectricalEngineeringDepartment, Brasília University, Brasília, 2008.
- [8] A. H. P. Medeiros, “Análise de Desempenho da Proteção de Motores de Indução de Média Tensão Utilizando Simulação Digital em Tempo Real,” MSc. dissertation, ElectricalEngineeringDepartment, Itajubá Federal University, Itajubá, 2015.
- [9] A. L. M. Coelho, F. O. Passos, G. R. Silveira Neto, I. O. Viana, J. F. B. Sousa, J. E. L. Almeida, “Análise dos efeitos dos harmônicos na performance de relés numéricos para proteção de motor de indução”, *Book of Abstract – CLAGTEE 2015*, São José dos Campos (SP).
- [10] G. Kinderman, “Proteção de Sistemas Elétricos de Potência,” 2 ed. Florianópolis: Labplan, 2005.
- [11] *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, IEEE Standard 1159-1995, Jun. 1995.
- [12] A. L. M. Coelho, “Análise da resposta transitória de transformadores de corrente de proteção e o impacto em relés de sobrecorrente numéricos”, *Dissertação de Mestrado*, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, 118 pag., Itajubá, 2011.
- [13] *IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems*, IEEE Std. C37.111-1999, Oct. 1999.
- [14] O. Gencer, S. Ozturk, K. Karaarsklan, “Performance of an over/under voltage relay at non-sinusoidal conditions,” *Mediterranean Electrotechnical Conference 2006*, IEEE, pp. 1102-1105.
- [15] ANEEL, “PRODIST Módulo 8 – Qualidade de Energia,” [Online]. Available: www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Módulo8_Revisão_6_Retificação_1.pdf. 2015.