

Efeito dos Harmônicos de Corrente na Atuação de Relés de Sobrecorrente Numéricos e Eletromecânicos

Gustavo L. Macieira, Filipe A. F. C. H. Fonsêca, Guilherme G. Faria, Aurélio L. M. Coelho,
José E. L. de Almeida, Marcos H. F. C. H. Fonsêca

Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira

gustafmacieira@gmail.com; filipeaugusto_figueiredo@hotmail.com; guilhermegoulartf@gmail.com; aurelio.eng@gmail.com;
jeugenioalmeida2012@gmail.com; marcos.henrique_fchf@hotmail.com.

Resumo — Devido ao avanço tecnológico e a busca por eficiência energética, cargas não lineares estão cada vez mais presentes dentro do sistema elétrico. Esses tipos de carga afetam a qualidade de energia, pois a corrente solicitada poderá ficar distorcida e apresentar alteração nos seus valores eficazes. Neste cenário, o sistema de proteção pode não estar preparado para trabalhar com sinais distorcidos, como é o caso de sistemas protegidos por relés eletromecânicos, que podem vir a atuar indevidamente na presença de fortes conteúdos harmônicos. Dessa forma, com auxílio de um equipamento de teste secundário de injeção de tensão e corrente, esse trabalho irá analisar a influência de alguns componentes harmônicos no tempo de atuação dos relés eletromecânicos e dos relés numéricos.

Palavras-chave — Harmônicos, Proteção, Relés.

I. INTRODUÇÃO

Com o crescente avanço tecnológico e o desenvolvimento das atividades econômicas ao redor do mundo, fez-se necessária a expansão do sistema elétrico, principalmente, nos âmbitos da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, acompanhada de uma maior interligação entre esses setores, deixando o sistema cada vez mais complexo e suscetível à ocorrência de falhas e interrupções.

Tendo em vista a importância de garantir a continuidade e qualidade do sistema elétrico, surge a necessidade de se implementar ferramentas e serviços direcionados a proteção das pessoas e dos equipamentos que os compõem.

Dentre os equipamentos responsáveis pela proteção do Sistema Elétrico de Potência (SEP), os relés exercem uma função muito importante. São eles que identificam anormalidades no sistema, bem como a localização destas, alertando ou sinalizando os operadores do sistema e, dependendo da situação, devem ser capazes de enviar sinais que permitam acionar dispositivos, tais como disjuntores, que atuem no isolamento das partes defeituosas. O problema é que com o advento da eletrônica de potência, as cargas não lineares estão cada vez mais presentes no sistema elétrico.

Devido a não linearidade dessas cargas, componentes harmônicas acabam sendo injetadas na rede e, consequentemente, provocam um aumento na corrente eficaz,

que por sua vez provoca o aquecimento dos dispositivos eletrônicos, podendo assim diminuir sua vida útil. Dessa forma, os dispositivos de proteção podem vir a atuar de maneira inadequada pela presença dos harmônicos, pois estes provocarão uma variação no tempo de resposta dos equipamentos em questão, fazendo com que o equipamento não funcione de acordo com suas características de operação pré-estabelecidas [1].

Assim, este trabalho tem o propósito de analisar a influência dos componentes harmônicos no tempo de atuação de um relé de tecnologia eletromecânica e outro numérico.

II. FUNÇÃO DE PROTEÇÃO ANSI 50/51

Os relés de proteção podem ser eletromecânicos, estáticos, ou numéricos e, seus modos de operação variam de acordo com a especificação necessária. Os relés eletromecânicos são mais antigos e robustos, enquanto os relés numéricos, que surgiram mais recentemente, são gerenciados por microprocessadores, permitindo a memorização de fatos ocorridos.

A operação dos relés é determinada conforme funções de proteção que são previamente configuradas. A ANSI (*American National Standards Institute*), visando a padronização das funções dos relés, criou uma tabela onde cada função de proteção é representada por um código numérico específico. Neste documento, serão abordadas as funções 50 e 51, que correspondem, respectivamente, a função de sobrecorrente instantâneo e sobrecorrente temporizado.

Os relés de sobrecorrente instantâneo (função 50) são acionados no momento que a corrente em questão atinge um valor pré-definido, como pode ser visto na Fig. 1. O $I_{pick\ up}$ representa o valor de corrente pré-estabelecido a partir do qual o relé deve atuar e o $t_{operação}$ indica o tempo mínimo que o relé levará para atuar.

Os relés de sobrecorrente temporizados (função 51) podem ser classificados em tempo definido ou tempo inverso. Nos relés de tempo definido é determinado um nível de corrente e o tempo que essa corrente deve permanecer no sistema para que o relé possa vir a atuar.

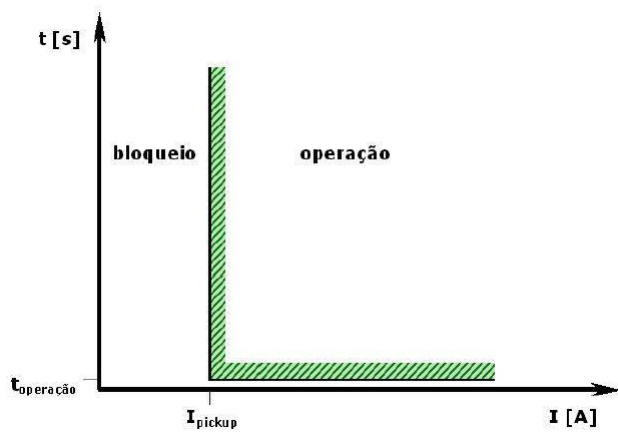


Fig. 1. Atuação de um relé de sobrecorrente instantâneo [2]

Já os relés de tempo inverso, operam com o tempo de atuação inversamente proporcional a corrente de falta, ou seja, quanto maior a corrente menor será o tempo de atuação e, quanto menor a corrente maior será o tempo de atuação. Dessa forma, os relés de tempo inverso podem ser classificados conforme a sua velocidade de atuação, podendo ser de característica inversa, muito inversa ou extremamente inversa Fig. 2.

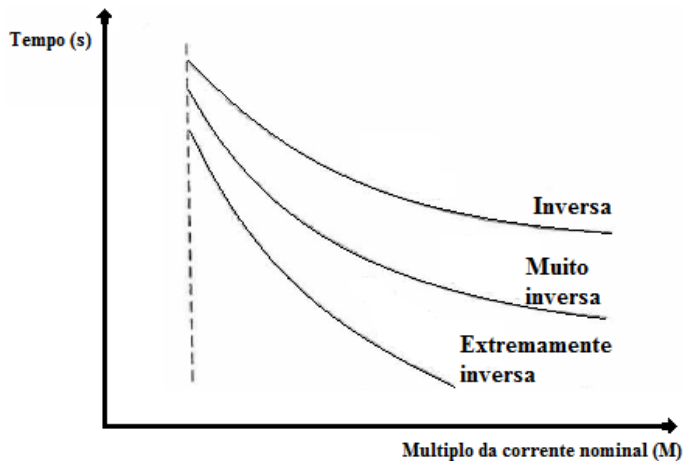


Fig. 2. Operação de um relé de tempo inverso [3].

III. COMPONENTES HARMÔNICOS

Os componentes harmônicos com maior presença no sistema elétrico podem ser interpretados como ondas senoidais de frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental. No caso do sistema elétrico brasileiro, a frequência fundamental é de 60 Hz, de tal forma que o 2º harmônico é um sinal senoidal de 120 Hz, 3º harmônico um sinal senoidal de 180 Hz, por exemplo. Os harmônicos são uma forma matemática de analisar a distorção de uma de onda, seja ela de tensão ou de corrente. Esta análise é feita através da decomposição de uma onda utilizando a série de Fourier [4].

Dessa forma, como os harmônicos são múltiplos da componente fundamental, eles terão uma influência no valor RMS (Root Mean Square), que pode ser calculado por (1), em que I_i é o valor eficaz de cada componente harmônico. Sendo que o sinal senoidal no domínio do tempo pode ser visto em (2).

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{i=1}^n I_i^2} \quad (1)$$

$$I(t) = I_{1i}\sqrt{2}\sin(\omega t) + I_{2i}\sqrt{2}\sin(2\omega t) + I_{3i}\sqrt{2}\sin(3\omega t) + \dots \quad (2)$$

Para analisar a influência dos harmônicos no valor eficaz do sinal, alguns sinais foram gerados através de uma rotina elaborada no *software Matlab*. A Fig. 3 apresenta o sinal de corrente apenas com a componente fundamental, em que se pode observar que o valor eficaz do sinal é de 25 [A], sendo que este valor foi calculado por meio de (3).

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) \cdot dt} \quad (3)$$

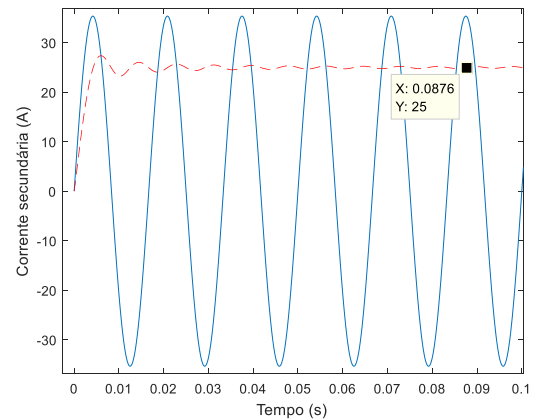


Fig. 3. Corrente fundamental.

No segundo caso a ser analisado é inserida uma componente de sequência zero no sinal, sendo sua amplitude $I_3 = I_1/3$. Tal sinal é da forma apresentada em (2). Essa componente de 3º harmônico pode ser observada na Fig. 4.

Vale ressaltar que, para a geração dos sinais das componentes harmônicas, a sua amplitude é gerada inversamente proporcional à sua ordem, ou seja, para a componente de 3º harmônico a amplitude será um terço da amplitude fundamental, para a de 5º harmônico será um quinto da fundamental, isso até o 7º harmônico, que é a maior componente a ser sintetizada nos testes. Assim, verifica-se que a amplitude relativa dos harmônicos utilizados é igual à amplitude da componente fundamental dividido pela ordem 'n' do harmônico.

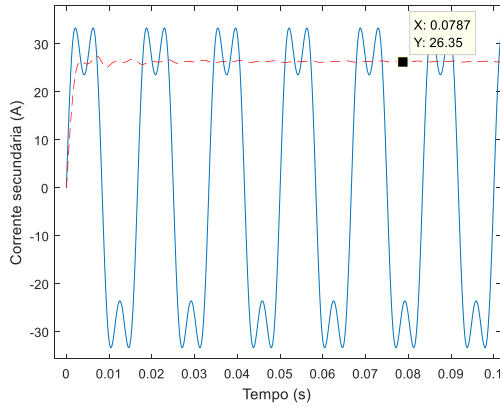


Fig. 4. Corrente fundamental com 3º harmônico.

Por meio da Fig. 4 é possível visualizar que ocorreu um incremento no valor eficaz da corrente, o que é coerente conforme (1). No terceiro caso foi inserida uma componente de sequência zero (3º harmônico com amplitude $I_3 = I_1/3$) e uma componente de sequência negativa (5º harmônico com amplitude $I_5 = I_1/5$). A Fig. 5 ilustra o sinal de corrente obtido nesse caso.

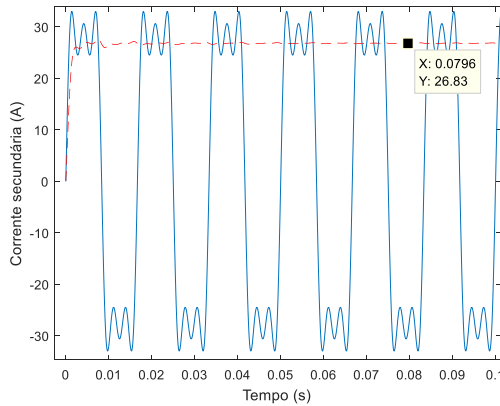


Fig. 5. Corrente fundamental com 3º e 5º harmônico

Na quarta situação, o sinal de corrente foi obtido por meio da componente fundamental com 3º harmônico (amplitude $I_3 = I_1/3$), 5º harmônico (amplitude $I_5 = I_1/5$) e 7º harmônico (componente de sequência positiva com amplitude $I_7 = I_1/7$). A Fig. 6 apresenta o sinal de corrente obtido.

Com as Figs. 3 a 6 é possível analisar como as componentes harmônicas distorcem o sinal, além disso, existe um incremento no valor RMS a medida que se aumenta os harmônicos na componente fundamental. Assim, como o valor eficaz é alterado, espera-se que o tempo de atuação do relé de proteção seja influenciado, como será apresentado a seguir.

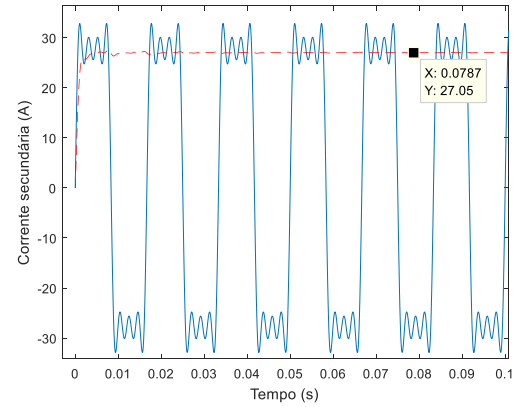


Fig. 6. Corrente fundamental com 3º, 5º e 7º harmônico.

IV. INFLUÊNCIA DAS COMPONENTES HARMÔNICAS NO SISTEMA DE PROTEÇÃO

Para analisar a influência das componentes harmônicas no tempo de atuação dos dispositivos de proteção, foram utilizados um relé de tecnologia numérica e um eletromecânico de sobrecorrente, ambos comerciais. Dessa forma, os sinais das Figs. 3 a 6 foram gerados no software *Matlab* e convertidos para o formato do tipo COMTRADE de tal forma que possam ser carregados no equipamento de teste CMC 356 da OMICRON. Assim, a mala de teste irá sintetizar um sinal idêntico ao criado pelo *Matlab* e o enviará para o relé. Esse sinal é mantido até que a corrente circulante atinja o valor mínimo para a atuação dos dispositivos de proteção e, em resposta, a mala de teste abre o disjuntor e posteriormente consegue-se ler o tempo de atuação dos equipamentos para cada etapa mencionada. A Fig. 7 apresenta um esquemático de ligação dos equipamentos utilizados. Este equipamento de teste gerará um sinal conforme está nas Figs. 3 a 6 para assim serem injetados no relé e ver o tempo de atuação para cada situação.

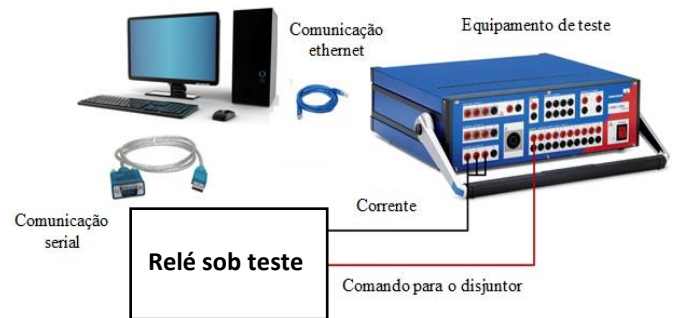


Fig. 9. Esquemático de ligação dos equipamentos para teste.

A primeira análise realizada foi o tempo de atuação instantâneo (função 50). Posteriormente, foi analisada a função

temporizada (função 51). Na função 50 foi utilizada como corrente de *pickup* o valor de 20 [A]. Essa corrente corresponde ao valor mínimo para o relé eletromecânico sensibilizar e atuar. Na função 51, o relé eletromecânico é caracterizado pela curva muito inversa e, como não é possível mudar essa característica para este equipamento, utiliza-se também no relé numérico essa curva muito inversa, além disso, foi utilizado um dial time de 0,2 e uma corrente $I_{t\grave{a}pe} = 8$ [A], sendo essa a corrente mínima necessária para o relé entrar em operação, de tal forma que após um determinado período ele irá atuar. Esse tempo de atuação do relé pode ser obtido por (4), conforme [3].

$$t_{atua\grave{c}\tilde{a}o} = T_{curva} \left(\frac{K}{\frac{I}{I_{ajuste}}^\alpha - 1} + L \right) \quad (4)$$

Em (4), T_{curva} é o múltiplo de tempo das curvas (*dial time*), $t_{atua\grave{c}\tilde{a}o}$ é o tempo de atuação do relé, I é a corrente real que entra no relé e I_{ajuste} corrente de ajuste do relé. Os valores de K , α , L e β são coeficientes que são disponíveis na Tabela I.

Norma	Tipo de curva	K	α	L
IEC	Curva inversa	0,14	0,02	0
	Moderadamente inversa	0,05	0,04	0
	Muito inversa	13,5	1	0
	Extremamente inversa	80	2	0
	Moderadamente inversa	0,515	0,02	1,14
IEEE	Muito inversa	196,1	2	4,91
	Extremamente inversa	282	2	1,217

A primeira análise realizada foi com o relé eletromecânico, no qual ele apresenta uma curva muito inversa segundo a IEC. A Tabela II apresenta o tempo de atuação do equipamento com a função 50 e 51, quando é injetada apenas a corrente fundamental (Fig. 3), sem distorção harmônica. Dessa forma, foram coletados três tempos de atuação para a mesma situação, para assim, calcular uma média aritmética desses tempos de forma a tentar diminuir os erros de medição.

TABELA II. TEMPO DE ATUAÇÃO DO RELÉ ELETROMECÂNICO (APENAS COMPONENTE FUNDAMENTAL)

Instantâneo (ms)	Valor médio (ms)	Temporizado (ms)	Valor médio (ms)
18	18,97	952,6	953,6
19,1		954,5	
19,8		953,7	

Na Tabela III é apresentado o tempo de atuação do relé para uma corrente com distorção do 3º harmônico, semelhante a Fig. 4.

TABELA III. TEMPO DE ATUAÇÃO DO RELÉ ELETROMECÂNICO (COMPONENTE FUNDAMENTAL E TERCEIRO HARMÔNICO)

Instantâneo (ms)	Valor médio (ms)	Temporizado (ms)	Valor médio (ms)
17,1 16,8 16,8	16,9	835,6 835,3 833,7	834,87

A Tabela IV mostra o tempo de atuação do relé eletromecânico para uma corrente com 3º e 5º harmônico e, a Tabela 5 possui o tempo de atuação para uma corrente de 3º, 5º e 7º harmônico, semelhante às Figs. 5 e 6, respectivamente.

TABELA IV. TEMPO DE ATUAÇÃO DO RELÉ ELETROMECÂNICO (COMPONENTE FUNDAMENTAL, TERCEIRO E QUINTO HARMÔNICO)

Instantâneo (ms)	Valor médio (ms)	Temporizado (ms)	Valor médio (ms)
17,5 17,5 17,9	17,63	793,3 808,3 808,2	803,27

TABELA V. TEMPO DE ATUAÇÃO DO RELÉ ELETROMECÂNICO (COMPONENTE FUNDAMENTAL, TERCEIRO, QUINTO E SÉTIMO HARMÔNICO)

Instantâneo (ms)	Valor médio (ms)	Temporizado (ms)	Valor médio (ms)
15,9 16,7 16,8	16,47	799,6 800,0 798,9	799,5

Por meio das Tabelas II a V é possível analisar o tempo de atuação do relé eletromecânico para as funções 50 e 51. Quanto ao tempo de atuação instantâneo, a presença dos componentes harmônicos não foi de grande influência, isso porque, após exceder um valor limite (neste caso 20 [A]), o dispositivo deveria atuar e assim a diferença de tempo é devida a própria oscilação que o dispositivo pode apresentar. Porém, isso pode ser resultado do próprio funcionamento do relé. Diferentemente do relé numérico, que devido a um próprio algoritmo interno calcula o valor eficaz do sinal, este relé eletromecânico analisa o próprio sinal instantâneo. Assim, como pode ser visualizado na Fig. 10, à medida que ocorre o incremento do componente harmônico, o tempo de subida do sinal diminui, o que pode ter contribuído para a variação no tempo de atuação do relé.

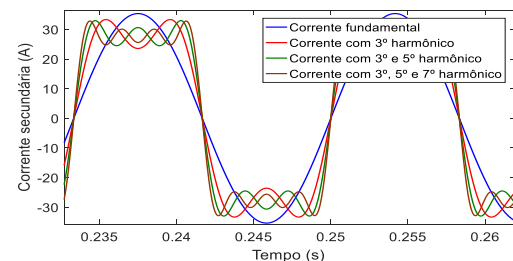


Fig. 10. Todas as corrente analisadas.

Análise similar aos sinais apresentados nas Tabelas II a V é realizada com o relé numérico. Do mesmo modo que o relé eletromecânico, os sinais foram carregados no dispositivo de teste da OMICRON, para assim as correntes serem injetadas no dispositivo de proteção numérico. No primeiro caso, foi injetada a corrente senoidal fundamental, sem distorção. Três tempos de atuação foram registrados de forma a obter uma média aritmética com o intuito de minimizar os erros de medição, como pode ser visualizado na Tabela VI.

TABELA VI. TEMPO DE ATUAÇÃO DO RELÉ NUMÉRICO (APENAS COMPONENTE FUNDAMENTAL)

Instantâneo (ms)	Valor médio (ms)	Temporizado (s)	Valor médio (s)
27,2		1,295	
26,7	26,87	1,298	1,296
26,7		1,294	

A Tabela VII apresenta o tempo de atuação do relé para uma corrente distorcida com terceiro harmônico.

TABELA VII. TEMPO DE ATUAÇÃO DO RELÉ NUMÉRICO (COMPONENTE FUNDAMENTAL E TERCEIRO HARMÔNICO)

Instantâneo (ms)	Valor médio (ms)	Temporizado (s)	Valor médio (s)
26,9		1,285	
25,7	25,53	1,296	1,291
24,0		1,293	

Na Tabela VIII e IX, foram registrados os tempos de atuação do relé para um sinal com distorção de 3° e 5° harmônico e para um sinal com 3°, 5° e 7° harmônico, respectivamente.

TABELA VIII. TEMPO DE ATUAÇÃO DO RELÉ NUMÉRICO (COMPONENTE FUNDAMENTAL, TERCEIRO E QUINTO HARMÔNICO)

Instantâneo (ms)	Valor médio (ms)	Temporizado (s)	Valor médio (s)
27,2		1,271	
27,0	27,2	1,291	1,286
27,4		1,295	

TABELA IX. TEMPO DE ATUAÇÃO DO RELÉ NUMÉRICO (COMPONENTE FUNDAMENTAL, TERCEIRO, QUINTO E SÉTIMO HARMÔNICO)

Instantâneo (ms)	Valor médio (ms)	Temporizado (s)	Valor médio (s)
25,3		1,267	
26,2	25,53	1,282	1,290
25,1		1,322	

Comparando o tempo de atuação do relé eletromecânico com o do relé numérico, existem diferenças tanto no tempo de atuação para a função 50 quanto para a função 51. Essa diferença ocorre por dois motivos. O primeiro motivo é devido ao relé eletromecânico estar descalibrado e isso pode ser

confirmado comparando a Tabela II com a Tabela VI. Para o caso do sinal apenas com a componente fundamental, os valores entre ambos os dispositivos deveriam ser próximos. Por essa razão, pode ser necessário realizar uma inspeção no relé eletromecânico quanto a sua calibração. O segundo motivo da diferença entre o tempo de atuação dos dispositivos é que o relé numérico filtra as componentes harmônicas injetadas nele. Assim, como pode ser observada nas Tabelas VI a IX, a inserção da distorção não causou impactos no tempo de resposta deste dispositivo. Além disso, para verificar o tempo de atuação do relé numérico, pode-se calcular o tempo de atuação teórico da função 51, através de (4). Considerando a Norma IEC e substituindo os valores da Tabela I em (4), obtém-se (5).

$$t_{atuação} = 0,2 \left(\frac{13,5}{\frac{25^1}{8} - 1} + 0 \right) = 1,27 \text{ (s)} \quad (5)$$

Assim, conforme pode ser visualizado em (5), o relé numérico atuou conforme o esperado, uma vez que ele filtra as componentes indesejadas do sistema e garante uma leitura mais limpa e eficaz quando comparado ao relé eletromecânico sem filtro.

V. CONCLUSÃO

Sabendo que os sistemas de proteção são de suma importância dentro do sistema elétrico, deve-se analisar a qualidade da energia que os relés de proteção estão expostos como, por exemplo, na presença de componentes harmônicos. Assim, este trabalho apresenta um método para avaliar a operação dos relés numéricos e eletromecânicos frente a distorções na forma de onda de corrente provocadas por componentes harmônicos. Como esperado, o relé numérico apresentou resposta similar com e sem a presença de conteúdo harmônico, uma vez que o mesmo é dotado de filtros que consideram apenas a componente fundamental na sua atuação. Com relação ao relé eletromecânico, apesar do avanço da tecnologia numérica, é possível encontrar um número considerável deles instalados nos sistemas de proteção, o que também motivou a verificação da sua resposta frente a sinais com conteúdo harmônico. Através dos resultados apresentados, verificou-se que a inserção de componentes harmônicos no sinal de corrente pode retardar o tempo de atuação do relé eletromecânico, uma vez que o sinal de corrente resultante é reduzido e o tempo de operação de sobrecorrente é inversamente proporcional à magnitude deste sinal. Portanto, em sistema de proteção com relés eletromecânicos, deve-se atentar ao tipo de sinal que chega aos mesmos, pois os componentes harmônicos influenciarão nos tempos de atuação e podem provocar descoordenação da proteção ao longo do sistema se filtros harmônicos não forem incorporados a estes relés.

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

- [1] "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems." Project IEEE-519. October 1991.
- [2] Notas de Aula do Professor Aurélio Luiz Magalhães Coelho, Princípio de Operação dos Relés de Proteção – UNIFEI (Itabira).
- [3] KINDERMANN, Geraldo, Proteção de sistemas elétricos de potência. Vol1, 2ª ed. Florianópolis, 2005.
- [4] BOLLEN, M. H. J., What is power quality?, Electric Power Systems Research, 66, 2003.