

## Metodologia para aplicação de filtros de harmônicas em Religadores SEV e KF

E. Santos, S. Nosaki, A. G. C. Conceição, E. Serra - ELEKTRO

E-mail: [eliezer.santos@elektro.com.br](mailto:eliezer.santos@elektro.com.br)

**Palavras-chave** – Filtro de Harmônicas, Melhoria, Proteção, Religador

**Resumo** - A rede de distribuição das Concessionárias, de uma forma geral, vem registrando nos últimos anos um sensível aumento no nível de poluição harmônica devido a presença de cargas não lineares (fonte chaveada, pontes retificadoras) bem como devido à influência de cargas monofásicas com retorno pela terra (Sistema MRT). Equipamentos de proteção instalados na década de 80 e parte da década de 90, ainda em operação nas redes de distribuição, tem os seus controles eletrônicos sensibilizados, causando em diversas ocasiões atuações indevidas da proteção de neutro de tais equipamentos.

O objetivo do trabalho é apresentar a metodologia utilizada no desenvolvimento e aplicação de filtro de harmônicas para utilização em religadores SEV e KF, com resultados obtidos após a aplicação dos referidos filtros.

### 1. INTRODUÇÃO

A proteção de redes de Distribuição contam com os seguintes equipamentos de proteção, à partir da saída da Subestação:

- Relés de Proteção de fase e neutro, associados a religamento automático;
- Religadores e Seccionalizadores;
- Elos fusíveis

Quando da atuação das proteções com tentativas de religamento sem sucesso, seja pelo conjunto de proteção da saída da Subestação como pelo Religador, há a necessidade de inspeção da rede através de equipe de eletricitas, para localização do trecho defeituoso. Na maioria dos casos, este trecho de rede é na saída de área urbana e início da área rural.

Entretanto, em parte destas ocorrências, ocorria o bloqueio de religadores sem a causa do desligamento ser determinada pelos procedimentos de inspeção. A análise mais aprofundada de alguns casos detectou que tais desligamentos ocorriam em horários de baixo carregamento, sem a ocorrência de descargas atmosféricas ou a existência de componentes de rede avariados. Foram efetuadas medições em pontos críticos do sistema de distribuição (locais onde havia presença significativa de transformadores MRT) e através destas medições [1] constatou-se a presença de correntes harmônicas, notadamente 3ª, 5ª e 7ª harmônicas (180 Hz, 300 Hz e 420 Hz, respectivamente), que em horários de baixo carregamento ultrapassavam a componente

fundamental. A somatória das correntes de neutro (fundamental + harmônicas) extrapolava o ajuste da proteção de terra, fazendo com que o religador atuasse de forma indesejada.

A metodologia adotada será apresentada a seguir, desenvolvida para utilização em religadores do tipo KF (McGraw Edison) e SEV (Westinghouse).

### 2. FILTRO PARA RELIGADOR TIPO KF

#### 2.1. Análise do circuito sensor

O sensor de corrente de terra deste religador consta de três transformadores de corrente, ligados em paralelo (constituindo desta forma um detetor de seqüência zero), acoplado a um retificador em cuja carga é medida uma tensão proporcional à corrente de terra, conforme mostra a figura 1. O circuito eletrônico fica então responsável de comparar esta tensão com uma referência interna. Se a tensão medida for superior à referência o circuito enviará um sinal de desligamento ao religador, causando sua atuação. O ajuste é efetuado através de um resistor, o qual é substituído de acordo com o ajuste desejado.

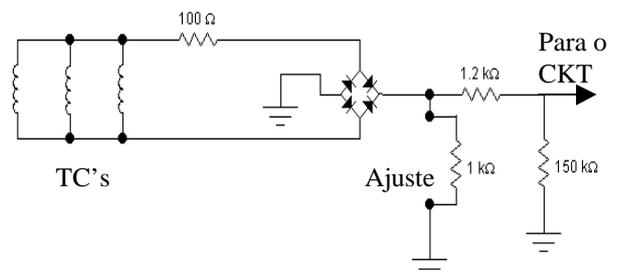


Figura 1 – Parte do sensor de corrente de neutro do religador KF

A resposta em frequência deste circuito apresenta uma característica de maior sensibilidade para frequências acima de 60 Hz, conforme levantado em ensaios de laboratório [2].

De posse destas informações iniciou-se o estudo para determinar a melhor forma de dotar este tipo de religador com um filtro para as componentes de corrente com frequências superiores à fundamental.

#### 2.2. Premissas Básicas

O filtro deverá atender às seguintes condições:

- a) A redução da componente de 3ª harmônica deverá ser, no mínimo, da ordem de 40% e acima deste valor para as harmônicas superiores à 3ª;

- b) A interferência na componente fundamental deverá ser, no máximo, de 10%;
- c) O filtro obrigatoriamente deverá ter rigidez mecânica às vibrações decorrentes da operação do equipamento, ser capaz de trabalhar sob temperaturas de aproximadamente 60°C e operar imerso em óleo isolante.

### 2.3. Metodologia adotada

A metodologia adotada para o desenvolvimento do filtro fundamentou-se em:

- 1) Levantamento da curva de resposta do sensor de terra do religador (considerando os TC's acoplados ao circuito eletrônico de controle);
- 2) Levantamento da impedância característica do circuito de controle para os diversos ajustes aplicados ao sensor de terra;
- 3) Determinação do filtro;
- 4) Definição de procedimentos para instalação, com orientações para a área técnica;
- 5) Implantação da melhoria em três unidades;
- 6) Avaliação dos resultados e definição de estratégias de aplicação a todos os Religadores KF da Empresa .

### 2.4. Determinação da curva de resposta e impedância característica

Para o levantamento da curva de resposta típica e da impedância característica do circuito em questão, montou-se o circuito ilustrado na Figura 2. O capacitor Cx é uma capacitância conhecida e Zload representa o circuito de disparo de terra. Para o ensaio de resposta em frequência considerou-se Cx desconectado e comparando-se as tensões na saída do gerador e sobre Zload.

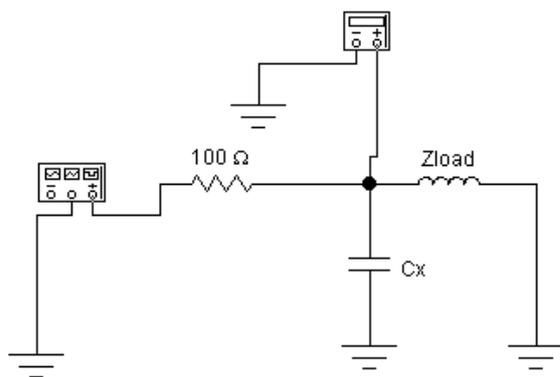


Figura 2 – Ensaio para determinação de impedância e curva característica

O circuito de ensaio constou de um gerador de sinais, algumas unidades de circuitos eletrônicos de disparo de terra e de um voltímetro digital.

Aplicando-se um sinal senoidal e medindo-se a tensão nos terminais do capacitor Cx, de capacitância conhecida,

verificou-se o grau de atenuação interposto para diversas frequências e para cada resistor de pick-up.

A tabela I ilustra o resultado obtido para um resistor de pick-up Rx e um capacitor Cx , utilizados como base para cálculos do filtro para as diversas possibilidades de ajustes do religador.

TABELA I  
DETERMINAÇÃO DE IMPEDÂNCIA CARACTERÍSTICA PARA O CIRCUITO DE DISPARO DE TERRA – RELIGADOR KF

Frequência (Hz)	Vo	VCx	Atenuação (%)
10	5,40 V	5,40 V	0
20	5,40 V	5,40 V	0
30	5,40 V	5,35 V	1
40	5,40 V	5,27 V	2
50	5,40 V	5,17 V	4
60	5,40 V	5,03 V	7
80	5,40 V	4,72 V	13
100	5,40 V	4,38 V	19
150	5,40 V	3,66 V	32
180	5,40 V	3,29 V	39
<b>240</b>	<b>5,40 V</b>	<b>2,70 V</b>	<b>50</b>
300	5,40 V	2,26 V	58
360	5,40 V	1,93 V	64
420	5,40 V	1,67 V	69
480	5,40 V	1,48 V	73
540	5,40 V	1,33 V	75

Onde:

Vo = tensão em Zload sem Cx

VCx = tensão em Zload com Cx

Considerando-se o circuito abaixo, teremos:

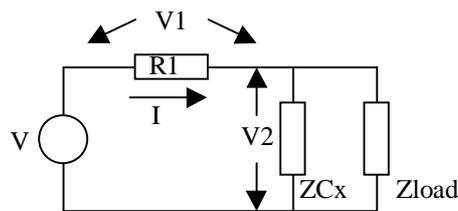


Figura 3 – Circuito simplificado

Pela segunda Lei de Kirchhoff, temos:

$$V = V1 + V2 \quad (1)$$

onde

$$V1 = I.R1 \quad (2)$$

$$V2 = I.(ZCx // Zload) \quad (3)$$

Se em (3) considerarmos  $Z_{Cx} = \infty$ , teremos:

$$V_2' = I \cdot Z_{load} \quad (4)$$

Fazendo  $Z_{load} = Z_{Cx}$ , teremos:

$$V_2'' = \frac{I \cdot Z_{load}}{2} \quad (5)$$

Desta forma, pode-se concluir que quando  $V_2''$  for igual à metade de  $V_2'$ , teremos  $Z_{Cx} = Z_{load}$  e desta forma teremos determinada a impedância característica do circuito de disparo de terra.

Na tabela I, conhecendo-se  $C_x$  e sabendo-se a frequência onde a atenuação é igual a 50%, encontra-se a impedância característica, que no exemplo é 240 Hz, através de (5):

$$Z_{Cx} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C_x} \quad (6)$$

Considerando-se que a impedância do circuito de disparo de terra é fortemente indutiva e que  $Z_{Cx} = Z_{load}$ , determina-se  $L_{eq}$  por:

$$L_{eq} = \frac{Z_{load}}{2\pi \cdot f} \quad (7)$$

onde  $L_{eq}$  é a impedância indutiva equivalente ao circuito de disparo de terra. Com o valor de  $L_{eq}$  levanta-se a curva de resposta em frequência para o circuito de disparo de terra. Sabendo-se que uma indutância  $L$  aumenta sua impedância à medida que a frequência aumenta e que esta impedância é uma carga para a fonte  $V$ , conclui-se que a atenuação vai diminuindo à medida que a frequência aumenta. Desta forma, o circuito de disparo de terra tem uma maior sensibilidade para frequências superiores à fundamental.

Para o cálculo do filtro, escolhe-se uma frequência  $f_x$  para a qual se espera uma atenuação de 50%. Esta escolha deve obedecer às premissas descritas em 2.2. Para esta determinada frequência calcula-se  $Z_{load}$  através de (8):

$$Z_{load} = 2\pi \cdot f_x \cdot L_{eq} \quad (8)$$

De posse do valor de  $Z_{load}$ , considera-se  $Z_{load} = Z_{Cx}$  e calcula-se  $C_x$  através de (9):

$$C_x = \frac{1}{2\pi \cdot f_x \cdot Z_{load}} \quad (9)$$

O filtro deveria atender também às premissas básicas para todas as possibilidades de ajuste do religador. Assim, sendo, o procedimento de determinação de  $C_x$  foi refeito para as diversas condições de ajuste. Desta forma, teríamos uma faixa de valores possíveis para  $C_x$  de acordo com a faixa de ajustes desejados.

### 2.5. Implantação e resultados

Para aferições e validação dos cálculos foram instalados inicialmente três unidades e aplicados ensaios

operacionais. Para os ensaios foram utilizados os seguintes equipamentos:

- 3 un. Religadores KF
- Fonte de corrente SMC modelo PTE50-CET
- Analisador de harmônicos Fluke mod. 41-B
- Filtro de harmônicos

A tabela II mostra um resumo dos principais resultados obtidos nos ensaios.

TABELA II  
ENSAIOS DE VALIDAÇÃO DO FILTRO DE HARMÔNICOS – RELIGADOR KF

Ih%	I2h			I3h			I5h		
	S (A)	C (A)	At %	S (A)	C (A)	At %	S (A)	C (A)	At %
50	6,4	9,4	31,9	7,9	16,0	50,6	5,9	18,7	68,5
80	9,5	14,1	32,6	9,2	20,5	55,1	8,4	31,6	73,4

Onde:

Ih% = % de harmônicos em relação à fundamental

I2h = corrente de 2º harmônico

I3h = corrente de 3º harmônico

I5h = corrente de 5º harmônico

S = corrente de atuação sem filtro

C = corrente de atuação com filtro

At% = atenuação percentual

O ajuste de terra para este ensaio foi de 10 A, com os seguintes pick-up's:

Sem filtro = 10,17 A

Com filtro = 10,72 A

Erro devido ao filtro = 5,1%

Após verificada a eficácia do filtro, os equipamentos foram instalados na rede para verificação de performance.

Os pontos escolhidos para instalação dos religadores com os filtros de harmônicos foram localidades com grande presença de cargas monofásicas e onde já se havia verificado atuações indevidas de religadores.

O procedimento foi então homologado para aplicação em todos os religadores tipo KF da Empresa e enviado às Equipes de Manutenção e de Estudos de Proteção dos procedimentos necessários para instalação.

## 3. FILTRO PARA RELIGADOR TIPO SEV

### 3.1. Análise do circuito sensor

Diferentemente do encontrado no religador KF, o sensor de terra do religador SEV detecta a corrente residual de três transformadores de correntes de cada uma das fases, conforme mostra a Figura 4, através de um transformador com quatro derivações (T7), o qual em conjunto com os módulos de ajustes permite toda gama de ajustes, de acordo com tabela descrita no manual do fabricante.

Deve-se ressaltar também que os transformadores de corrente da proteção de sobrecorrente de fase (T4, T5 e T6) estão em série com o sensor de terra e que também estes transformadores possuem derivações para permitir os diversos ajustes de fase. O bloqueio de terra é feito através de uma chave ligada a T8.

Desta forma, a impedância característica do circuito sensor de terra varia de acordo com:

- O ajuste do transformador T7
- O ajuste de terra
- O ajuste de fase

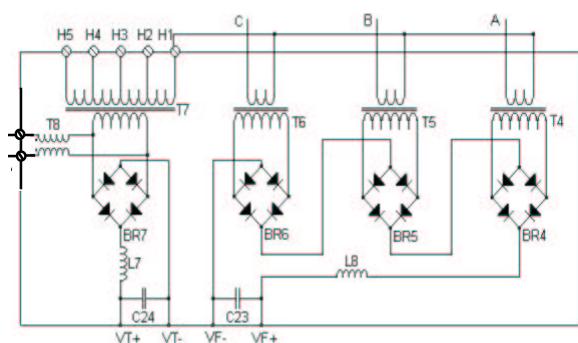


Figura 4 – Parte do sensor de corrente de terra do religador SEV

Semelhantemente ao observado quando da análise do circuito de disparo de terra do religador KF, a resposta em frequência deste circuito apresenta uma característica de maior sensibilidade para frequências acima de 60 Hz, conforme levantado em ensaios de laboratório [3].

### 3.2. Premissas Básicas

O filtro deverá atender às seguintes condições:

- A redução da componente de 3ª harmônica deverá ser, no mínimo, da ordem de 50% e acima deste valor para as harmônicas superiores à 3ª;
- A interferência na componente fundamental deverá ser, no máximo, de 10%;
- O filtro obrigatoriamente deverá ter rigidez mecânica às vibrações decorrentes da operação do equipamento, ser capaz de trabalhar sob temperaturas de aproximadamente 60°C;
- Ser multi-ajustável.

### 3.3. Metodologia adotada

A metodologia adotada para o desenvolvimento do filtro fundamentou-se em:

- Levantamento da curva de resposta do sensor de terra do religador, para os diversas possibilidades de ajuste de fase e terra;
- Determinação do filtro;

- Definição de procedimentos para instalação, com orientações para a área técnica;
- Implantação da melhoria em três unidades;
- Avaliação dos resultados e definição de estratégias de aplicação a todos os Religadores SEV da Empresa .

### 3.4. Determinação da curva de resposta e do filtro

Para o levantamento da curva de resposta típica e da impedância característica utilizou-se uma fonte de corrente acoplada aos terminais do religador. Através de ensaios de atuação, para frequências fundamental e harmônicas, pode-se levantar a curva característica de resposta em frequência.

Baseando-se na experiência anterior com o filtro de harmônicas para o religador KF, o passo seguinte foi determinar o melhor ponto para inserção do filtro. Observando-se a chave de bloqueio de terra acoplada ao transformador T8, chegou-se à conclusão que se o filtro fosse instalado em paralelo com esta chave ele faria o efeito de uma chave de bloqueio ativada a partir de uma determinada frequência.

Para determinação do filtro foi adotado o seguinte procedimento:

- Levantamento da curva de resposta com o auxílio de uma capacitância conhecida;
- Determinação da frequência onde  $Z_{Cx} = Z_{load}$ ;
- Determinação de  $L_{eq}$ , conforme (7);
- Cálculo de  $Z_{Cx}$  considerando  $Z_{Cx} = Z_{load}$  e redução de 50% para  $f = 180$  Hz, conforme (8);
- Cálculo de  $C_x$ , conforme (9).

O procedimento foi repetido para cada ajuste de fase e ajuste de terra normalmente utilizados.

### 3.5. Implantação do filtro

A necessidade de que este filtro fosse multi-ajustável levou à elaboração de uma placa de circuito impresso contendo 5 capacitores de diversos valores comerciais associados a cinco micro-chaves (dip-switch). Este dispositivo foi projetado para ser fixado na caixa do controle eletrônico do religador.

A escolha dos capacitores foi o resultado otimizado para atingir a todas as possibilidades de aplicação, associado à uma tabela de ajustes. Desta forma, quando da elaboração de Estudos de Proteção para estes religadores, a Ordem de Ajustes enviada para as equipes de campo passa a incluir o ajuste de filtro de harmônicas. As equipes de campo foram orientadas para a instalação dos filtros e seus respectivos ajustes. Na tabela III mostramos o exemplo de alguns ajustes.

TABELA III  
EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE FILTRO DE HARMÔNICAS – RELIGADOR SEV

Ajuste de Fase	Relação de T8	Módulo calibrador	Ajuste do Filtro
$X3-X5 = 70 A$	H1-H3	8 (13 Amp)	2 + 5
$X3-X5 = 70 A$	H1-H4	9 (10 Amp)	1 + 3
$X1-X2 = 80 A$	H1-H4	10 (9 Amp)	1 + 4
$X1-X2 = 80 A$	H1-H4	11 (7 Amp)	1 + 3 + 5
$X1-X2 = 80 A$	H1-H4	12 (5,5 Amp)	1 + 3 + 5
$X2-X5 = 90 A$	H1-H3	8 (16 Amp)	3 + 5
$X2-X5 = 90 A$	H1-H4	9 (13 Amp)	1 + 5
$X2-X5 = 90 A$	H1-H4	12 (6 Amp)	1 + 5
$X1-X3 = 100 A$	H1-H3	8 (18 Amp)	2
$X1-X3 = 100 A$	H1-H4	9 (14 Amp)	1
$X5-X6 = 110 A$	H1-H3	8 (20 Amp)	3
$X5-X6 = 110 A$	H1-H4	12 (8 Amp)	2 + 3 + 5
$X1-X4 = 130 A$	H1-H4	9 (18 Amp)	2 + 4
$X1-X4 = 130 A$	H1-H4	12 (9 Amp)	2 + 3
$X1-X4 = 130 A$	H1-H4	13 (6,5 Amp)	2 + 3

Na tabela III as indicações 1, 2, 3, 4 e 5 referem-se às micro-chaves de ajuste, de duas posições (ligado e desligado). Quando mais de uma delas tiver que ficar na posição “ligado”, os números correspondentes aparecem juntamente com o sinal “+”.

### 3.6. Implantação e avaliação de resultados

Seguindo procedimento adotado quando da implantação de filtro de harmônicos em religadores KF, inicialmente foram instalados filtros em cinco unidades de religadores SEV e observado o desempenho dos equipamentos durante o período de um ano.

Após verificar que os religadores sob teste não mais apresentaram problemas operacionais de atuação indevida, a procedimento foi ampliado para os demais religadores em operação. Ficou estabelecido que os equipamentos retirados da rede para manutenção em oficina, além das verificações, ajustes e ensaios de rotina também seriam dotados do filtro antes de retornarem à operação normal.

## 4. CONCLUSÕES FINAIS

A metodologia aqui apresentada permitiu a concepção de dispositivo de baixo custo, de aplicação imediata e de fácil implementação, sendo bem assimilada pelas equipes de Estudos e de Manutenção.

A implementação de filtros de harmônicos possibilitou:

- Melhoria no desempenho dos equipamentos;
- Diminuição dos índices de desligamento;
- Diminuição nos deslocamentos de plantão;
- Postergação de investimentos para substituição de RL's com baixa performance.

Salientamos que o procedimento adotado também foi aplicado com sucesso em Seccionalizadores GN3e, os quais possuem sensor de terra análogos ao utilizado em religadores KF.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Nosaki, S.; Mizutani, T.; S/E's Itapeva, Itaporanga e Angatuba – Medição de Distorção Harmônica – Relatório Técnico TTC/047/95 – CESP. 1995.
- Santos, E.; Aplicação de Filtros de Harmônicas em Religadores KF – Relatório Técnico OEE/013/99 – ELEKTRO. 1999
- Santos, E. ; Determinação de Filtro de Harmônicas para Religador SEV – Relatório Técnico EP/022/00 – ELEKTRO. 2000.
- Carta QX-10871-B rev. 5 - Schematic Diagram of Ground Fault Sensing Accessory for Type "KF"Recloser - Mc Graw Edison, 1984.