

# Filosofia de Proteção de Filtros de Harmônicos

Eduardo Brandi, Sérgio Iasbeck e Denise Borges, *Eletróbrás Furnas*  
Ricardo Abboud, *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

**Resumo**—A proteção de filtros harmônicos é uma das áreas de proteção de sistemas elétricos com poucos recursos literários, inclusive em termos de padronização internacional. Este artigo apresenta uma discussão sobre a proteção de filtros harmônicos; um filtro de dupla sintonia, 3° e 5° harmônicos, é usado como exemplo. Os filtros de harmônicos são constituídos de capacitores, reatores e resistores, necessitando de funções de proteção específicas para cada elemento. As aplicações atuais de proteção não consideram este fato e não fornecem uma proteção abrangente e confiável. O artigo apresenta uma proposta de proteção, a qual tem como base a experiência de Furnas na operação de filtros harmônicos.

## I. INTRODUÇÃO

A proteção de filtros harmônicos é uma das áreas de proteção de sistemas elétricos com poucos recursos literários, inclusive em termos de padronização internacional. A referência [1] traz uma breve discussão sobre este tópico, porém não faz uma discussão abrangente.

A SE Ibiúna pertencente ao Sistema FURNAS, é composta de seis linhas de transmissão 345 kV em corrente alternada, quatro compensadores síncronos, duas linhas em corrente contínua  $\pm 600$  kV que se interligam via a SE Foz do Iguaçu ao Sistema de Transmissão de Itaipu, dezoito filtros de harmônicos, contendo ramos de HP (High Pass), 11°/13° harmônicos, e 3°/5° harmônicos, dois bancos de capacitores shunts, três linhas em 500 kV, além de dois bancos de capacitores séries.

O projeto original do sistema CCAT (Corrente Contínua em Alta Tensão) contemplou inicialmente 2 ramos de filtros de dupla sintonia de 3° e 5° harmônicos. Estes filtros foram projetados para reduzir a influência do 3° harmônico que foi observado nos casos simulados durante os estudos de recuperação do elo CCAT após falta trifásica na rede de corrente alternada, considerando-se o sistema receptor com baixa relação de curto-circuito (SCR). Estes também têm a função de reduzir a distorção de 5° harmônico produzida pela operação em regime permanente do elo CCAT em condições de máximo desbalanceamento dos parâmetros que produzem os harmônicos não característicos.

Considerando que o 5° harmônico gerado pelas cargas não lineares do sistema elétrico vem aumentando, progressivamente, superando os harmônicos produzidos pela operação do elo CCAT, e visto que têm sido observados alarmes de sobrecarga harmônica nos filtros em operação, nestes últimos anos, foi solicitado a FURNAS pelo ONS e aprovado pela ANEEL a instalação de mais dois filtros de dupla sintonia de 3° e 5° harmônicos na SE Ibiúna, visando aliviar a sobrecarga dos filtros existentes e aumentando a confiabilidade e disponibilidade do sistema receptor de CCAT.

Diante da necessidade de confecção destes novos filtros de harmônicos de dupla sintonia de 3° e 5° harmônicos na SE Ibiúna, FURNAS apresentou ao mercado uma especificação técnica para estes novos filtros que robustecesse as características elétricas de seus elementos, preservando a mesma potência reativa dos filtros existentes, bem como, decidiu propor uma nova metodologia de proteção mais abrangente em sua especificação, tendo em vista se ter observado ao longo de sua experiência operativa os problemas ocorridos não só nos bancos de filtros instalados na SE Ibiúna, bem como os problemas ocorridos em banco de capacitores pertencentes ao seu sistema. Nesta especificação procurou-se avançar, não só nos aspectos de detecção de perda de sintonia dos filtros, mas também, em particular nas funções de desbalanço e sobrecarga térmica dos mesmos, bem como na função de detecção de elemento aberto. Outra funcionalidade relevante que foi implementada foi à possibilidade de operação do banco com uma de suas fases fora de operação, por este motivo foi implementado um esquema de disparo monopolar na proteção.

O esquema de proteção de filtros harmônicos, aqui proposto, se baseia nos requisitos de FURNAS, em função da experiência na operação e manutenção de filtros harmônicos, adquiridas em vários anos de trabalho.

A proposta de proteção de filtros harmônicos engloba todos os elementos do filtro, aplicando proteção para as unidades capacitivas, através da detecção de queima de unidades por uma função de desbalanço, proteção térmica dos reatores, proteção de sobrecarga para o resistor, proteção de perda de sintonia, proteção de elemento aberto, além das proteções de sobrecorrente, sobretensão, subtensão, etc.

O comportamento do filtro para diferentes condições anormais de operação e faltas internas é analisado e também cada elemento de proteção e sua atuação para diferentes situações. É mostrado como as funções de sobrecorrente RMS são ineficientes para detecção de faltas internas e condições de sobrecarga no filtro.

## II. NECESSIDADE DE FILTROS HARMÔNICOS

Os filtros das Estações Conversoras de Corrente Contínua (ECCC) são dimensionados para garantir a qualidade da energia, considerando a injeção harmônica das conversoras e uma parcela adicional proveniente do sistema interliga-do.

As ECCC utilizam para a sua conversão CA-CC ou CC-CA em um processo de conversão de pontes conversoras de 12 pulsos, onde, temos os seguintes harmônicos característicos, que são os harmônicos gerados pela conversão:

$$\text{HARM} = 12 \cdot n \pm 1 \quad (1)$$

Onde 12 é o número de pulsos da ponte conversora,  $n$  são números naturais (1, 2, 3, etc.), o que gera as seguintes ordens de harmônicos 11°, 13°, 23°, 25°.

Nota-se que o 3° e 5° harmônicos não são característicos, e, portanto não são gerados pela Conversora de Corrente Contínua. Esses harmônicos são denominados de “harmônicos não característicos”.

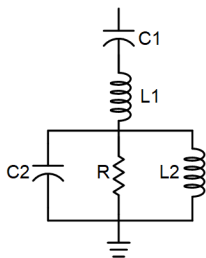
Contudo, pelo fato das conversoras estarem integradas ao Sistema Interligado Nacional (SIN), filtros de 3ª e 5ª ordem são incorporados ao projeto, pois a presença desses harmônicos, em grande quantidade, pode afetar e interferir nos Sistemas de Controle dos Conversores de Corrente Contínua.

Esses harmônicos de 3° e 5° ordem, não são gerados pela conversão CC-CA, e sim pelas cargas não lineares do Sistema Interligado Nacional (SIN), e que vêm aumentando, sistematicamente, ao longo dos tempos, podendo vir a provocar sobrecargas nos filtros de 3ª e 5ª ordem, causando a atuação dos sistemas de proteção e ocasionando sérios riscos para a operação do elo de transmissão em corrente contínua, por este motivo, o sistema de proteção de tais filtros deve apresentar índices de confiabilidade e segurança elevados.

Hoje existem algumas empresas interessadas em realizar pesquisas e medições diversas de harmônicos no SIN com o objetivo de se ter mais conhecimento sobre a origem desses harmônicos, para que se tenha uma melhor definição de se fazer a filtragem desses harmônicos, o mais próximo possível da geração, evitando assim sobrecargas nos equipamentos e linhas de transmissão do SIN.

### III. COMPOSIÇÃO DO FILTRO HARMÔNICO

Para a discussão do esquema de proteção, será usado como exemplo o filtro de dupla sintonia (3° e 5° harmônicos) mostrado na Fig. 1, a qual mostra a configuração do filtro de maneira simplificada e os valores de projeto de cada componente, sendo a tensão de operação de 345 kV.



Componente	Valor
Conjunto de capacitores C1	1,2 $\mu\text{F}$
Reator L1	391 mH
Conjunto de capacitores C2	4,43 $\mu\text{F}$
Reator L2	106,29 mH
Resistor R	3379,60 $\Omega$

Fig. 1. Arranjo do Filtro de Dupla Sintonia, 3° e 5° Harmônicos

A impedância equivalente do filtro, isto é a impedância total, para diferentes frequências é mostrada na Tabela I.

TABELA I  
IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE DO FILTRO EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA

Freq.	$Z_{eq}$
60	2.75360214638346 - j2020.15827757505
180	31.3333390662931 + j4.71991434787202
300	28.6886722999278 - j0.28400265618501

A Fig. 2 mostra a relação entre o módulo da impedância equivalente do filtro em função da frequência, pode ser visto que existem mínimos no 3° e 5° harmônicos.

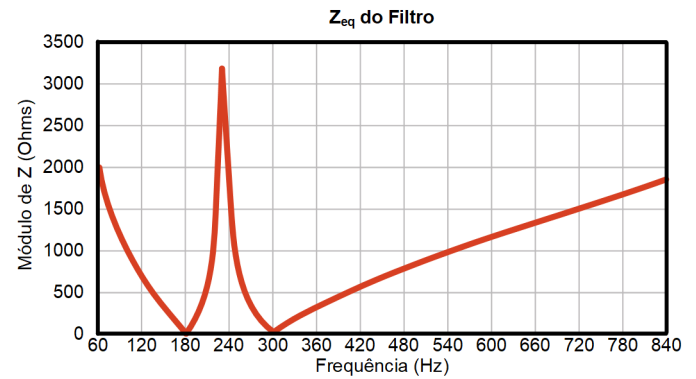


Fig. 2. Impedância Equivalente do Filtro em Função da Frequência

### IV. REQUISITOS DO SISTEMA DE PROTEÇÃO

Este projeto, por ter a característica do modo de operação monopolar, é o primeiro a ser concebido em um sistema de potência de extra alta tensão para bancos de filtros CA.

Por essa razão, a especificação teve que exigir certas particularidades, dentre as quais, listamos abaixo algumas:

- Consistir de dois sistemas independentes e redundantes;
- Possibilidade de coleta automática de dados e acesso remoto;
- Operar sem nenhuma restrição, com proteção degradada, e uma das proteções fora de operação;
- Proteções alimentadas por diferentes enrolamentos secundários de transformadores;
- Capaz de identificar e isolar as falhas individuais por fase ou seja, realizar disparo monopolar ou tripolar quando selecionado;
- Quando em disparo monopolar, identificar a fase defeituosa, isolando-a e mantendo as demais em operação, bem como alterando as funções internas dos relés e do disjuntor de forma a permitir a operação com duas fases energizadas;
- A proteção deve ser capaz de identificar as flutuações naturais dos elementos capacitivos, bem como, dos transdutores de medidas, sem perda da sua capacidade de discernimento do estado da tensão sobre os elementos capacitivos, que possam vir a mascarar esta informação, de forma a causar a recusa ou a operação indevida do mesmo;
- Todas as proteções deverão ser providas de níveis de ajuste de alarme e de disparo (instantâneo e/ou temporizado);
- Todos os elementos dos filtros devem ser protegidos de modo a assegurar que nenhum deles permaneça em operação fora da sua suportabilidade, seja ela térmica ou dielétrica;
- Identificar perda de sintonia do filtro;
- Deve proteger os elementos do filtro contendo pelo menos as funções descritas a seguir.

Ter as seguintes proteções:

1. Proteção contra sobretensão nas unidades capacitivas.
2. Proteção contra sobrecarga térmica e dielétrica nos elementos individuais dos filtros.
3. Proteção contra perda de sintonia dos filtros.
4. Proteção para falhas à terra.
5. Proteção de sobrecorrente.
6. Proteção de trecho morto (stub bus).
7. Proteção de elemento aberto.

Este conjunto de funções de proteção é impossível de ser aplicado com um único ponto de medição de corrente e tensão na entrada do filtro, é necessário que o filtro seja provido de vários transformadores de corrente e tensão com o intuito de efetuar medidas nos diferentes elementos do filtro e propiciar a implementação de um sistema de proteção completo e seletivo, capaz de fornecer dados para uma rápida identificação do defeito.

A Fig. 3 mostra o sistema de proteção proposto para o filtro. O agrupamento mostrado das funções de proteção não significa, necessariamente, o número de dispositivos de proteção.

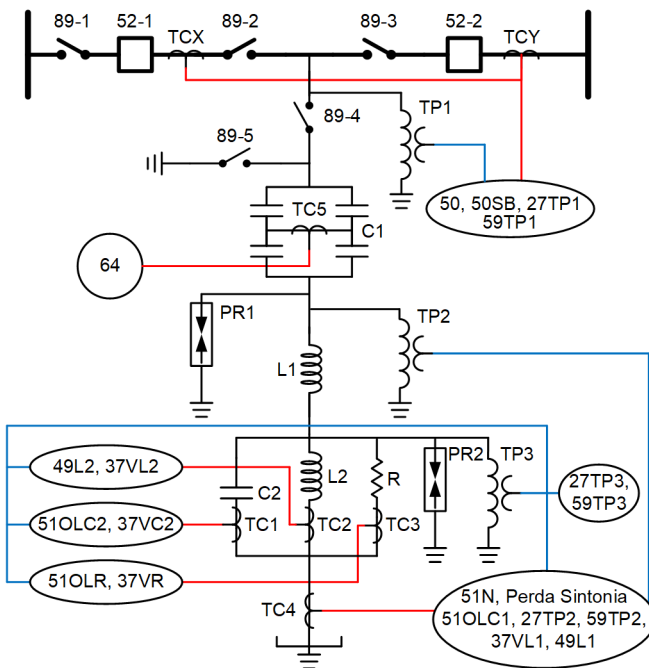


Fig. 3. Conjunto de Funções de Proteção do Filtro

#### A. Descrição das Funções de Proteção

**50**—Sobrecorrente, o propósito é detectar faltas na entrada do filtro. Deve operar com base na medição da corrente fundamental (60 Hz).

**50SB**—Stub Bus, o propósito é detectar faltas no vão quando o filtro está fora de operação com a seccionadora 89-4 aberta e os disjuntores 52-1 e 52-2 fechados. Deve operar com base na medição da corrente fundamental (60 Hz).

**27TP1/59TP1**—Sub e sobre tensão na barra, o propósito é detectar condições anormais da tensão do sistema. Deve operar com base na medição da tensão fundamental (60 Hz).

**27TP2**—Subtensão entre C1 e L1, o propósito é detectar faltas à terra entre C1 e L1, pois na condição que uma fase esteja fora de operação a função 51N é desabilitada. Deve operar com base na medição da tensão fundamental (60 Hz).

**59TP2**—Sobretensão no reator L1, e tensão medida por esta função de proteção é a queda de tensão no reator L1, por este motivo o dispositivo de proteção que executa esta função deve receber as tensões TP2 e TP3 e efetuar as operações necessárias para calcular a subtração TP2-TP3, o propósito é verificar se o reator L1 estará operando dentro da sua suportabilidade dielétrica. Deve operar com base na medição da tensão RMS.

**51OLC1**—Sobrecarga no conjunto de capacitores C1, o propósito é detectar uma sobrecorrente em C1 que caracterize uma sobrecarga. Deve operar com base na medição da corrente RMS.

**51N**—Sobrecorrente de neutro, o objetivo é detectar faltas à terra no filtro. Esta função é bloqueada quando uma das fases está fora de operação. Deve operar com base na medição da corrente fundamental (60 Hz).

**49L1**—Sobrecarga térmica do reator L1, o propósito é detectar sobrecarga no reator L1 que levem a uma temperatura de operação acima da máxima permitida. Deve operar com base na medição da corrente fundamental e harmônicas de maneira independente, não na corrente RMS, como veremos mais adiante.

**37VL1**—Subcorrente controlada por tensão, o propósito é detectar um conexão aberta no reator L1. Deve operar com base na medição da corrente e tensão fundamentais (60 Hz).

**Perda de Sintonia**—O propósito é detectar uma condição que faça com que o filtro saia da sintonia e deixe de filtrar os harmônicos esperados. Deve operar com base na medição da corrente fundamental e harmônicas.

**27TP3**—Subtensão entre L1 e C2//L2//R, o propósito é detectar faltas à terra entre L1 e C2//L2//R, pois na condição que uma fase esteja fora de operação a função 51N é desabilitada. Deve operar com base na medição da tensão fundamental (60 Hz).

**59TP3**—Sobretensão nos elementos C2//L2//R, o propósito é verificar se os elementos C2//L2//R estarão submetidos a uma tensão que não ultrapasse suas suportabilidades dielétricas. Deve operar com base na medição da tensão RMS.

**49L2**—Sobrecarga térmica do reator L2, o propósito é detectar sobrecarga no reator L2 que levem a uma temperatura de operação acima da máxima permitida. Deve operar com base na medição da corrente fundamental e harmônicas de maneira independente, não na corrente RMS, como veremos mais adiante.

**37VL2**—Subcorrente controlada por tensão, o propósito é detectar um conexão aberta no reator L2. Deve operar com base na medição da corrente e tensão fundamentais (60 Hz).

**51OLC2**—Sobrecarga no conjunto de capacitores C2, o propósito é detectar uma sobrecorrente em C2 que caracterize uma sobrecarga. Deve operar com base na medição da corrente RMS.

**37VC2**—Subcorrente controlada por tensão, o propósito é detectar um conexão aberta no conjunto de capacitores C2. Deve operar com base na medição da corrente e tensão fundamentais (60 Hz).

**51OLR**—Sobrecarga no resistor R, o propósito é detectar uma sobrecorrente em R que caracterize uma sobrecarga. Deve operar com base na medição da corrente RMS.

**37VR**—Subcorrente controlada por tensão, o propósito é detectar um conexão aberta no resistor R. Deve operar com base na medição da corrente e tensão fundamentais (60 Hz).

**64**—Desbalanço conjunto de capacitores C1, o propósito é detectar a queima de elementos capacitivos e que podem levar as unidades remanescentes a uma condição de sobretensão.

### B. Proteção de Desequilíbrio

Neste exemplo, o conjunto de capacitores C1 utiliza a configuração em H, na qual a montagem para cada uma das fases se assemelha à forma da letra H. A Fig. 4 mostra o arranjo para uma das fases do banco de capacitores. Existe um TC conectado entre as duas “pernas” do H. Os valores de C11, C12, C21 e C22 são escolhidos de tal maneira que, em uma condição normal de operação, a corrente que circula pelo TC é igual, ou melhor, é próxima de zero.

Para isto, os valores das capacitâncias equivalentes são escolhidos para atender a seguinte relação de reatâncias:

$$\frac{XC11}{XC21} = \frac{XC12}{XC22} \quad (2)$$

As unidades capacitivas (UC) são distribuídas, sobre a plataforma, em quatro semi-ramos. Os pontos centrais dos semi-ramos são conectados através do transformador de corrente de desbalanço (TC5), formando assim a ponte-H. O semi-ramo central também é chamado de semi-ramo de desbalanço.

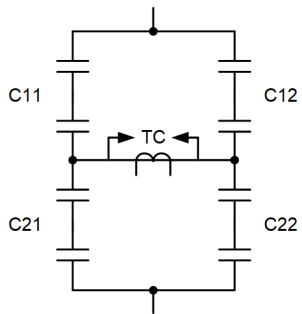


Fig. 4. Arranjo em Ponte-H, Somente Uma Fase Mostrada

Caso haja falha de um dos capacitores (elemento), haverá circulação de corrente pelo TC5, desta maneira, um relé de sobrecorrente conectado no secundário deste TC pode detectar esta corrente e conseqüentemente a queima do elemento capacitivo. A corrente que irá circular pelo secundário do TC é proporcional ao número de elementos falhos. Um dos problemas desta configuração é a possibilidade de falhas sucessivas e simétricas que causem a eliminação da corrente de desequilíbrio, este problema pode ser contornado com modernos relés de proteção de bancos de capacitores que conseguem identificar a seção da ponte H que está em falha, esta característica em associação com a habilidade de

programação de lógicas nestes relés, permite o desenvolvimento de uma lógica para contar o número de falhas, desta maneira, toda vez que ocorrer uma diminuição na contagem de falhas, sem que tenha havido uma manutenção do banco, indica a possibilidade de falha simétrica.

### C. Proteção Térmica Reatores

O filtro de harmônicos deve ser provido de proteção de modo a assegurar que os reatores operem dentro de sua suportabilidade térmica (sobrecarga).

Como os reatores a ar possuem valor de resistência ôhmica diferente para cada frequência, a proteção através de uma função de sobrecorrente RMS não é adequada, para prover uma proteção adequada deve ser utilizado um modelo térmico capaz de reproduzir a condição térmica do reator em função da temperatura ambiente e das correntes, fundamental e harmônicas, medidas.

O modelo térmico a ser implementado é mostrado na Fig. 5, e se constitui de um modelo de 1ª ordem, cuja implementação em relés numéricos é extremamente simples. O modelo térmico assegura que os reatores estarão operando dentro dos limites de projeto.

Para a aplicação do modelo térmico é necessário que o relé efetue a medição das componentes harmônicas de maneira individualizada, com o objetivo de se aplicar a equação (3).

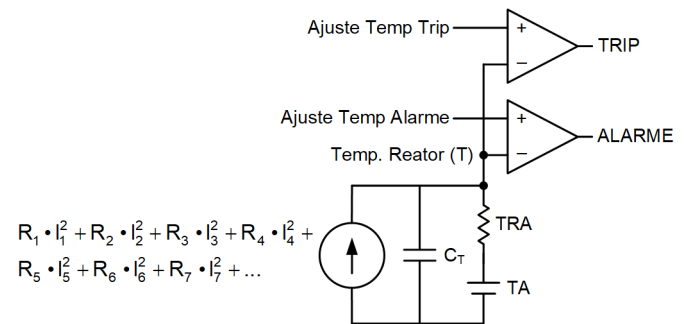


Fig. 5. Modelo Térmico Para proteção dos Reatores de Núcleo de Ar

A temperatura do reator será calculada de acordo com a equação:

$$TC_n = (R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2 + R_3 \cdot I_3^2 + R_4 \cdot I_4^2 + R_5 \cdot I_5^2 + R_6 \cdot I_6^2 + R_7 \cdot I_7^2) \cdot \frac{1}{C_T} \Delta t + T_{n-1} - \frac{T_{n-1} - T_A}{TRA \cdot C_T} \Delta t \quad (3)$$

Onde:

- R<sub>1</sub>—Resistência para frequência de 60 Hz
- I<sub>1</sub>—Corrente de 60 Hz
- R<sub>2</sub>—Resistência para frequência de 120 Hz
- I<sub>2</sub>—Corrente de 120 Hz
- R<sub>3</sub>—Resistência para frequência de 180 Hz
- I<sub>3</sub>—Corrente de 180 Hz
- R<sub>4</sub>—Resistência para frequência de 240 Hz
- I<sub>4</sub>—Corrente de 240 Hz
- R<sub>5</sub>—Resistência para frequência de 300 Hz
- I<sub>5</sub>—Corrente de 300 Hz
- R<sub>6</sub>—Resistência para frequência de 360 Hz
- I<sub>6</sub>—Corrente de 360 Hz

$R_7$ —Resistência para frequência de 420 Hz

$I_7$ —Corrente de 420 Hz

TRA—Resistência térmica ao ambiente

$C_T$ —Calor específico

$T$  = Temperatura do reator

$T_{n-1}$  = Temperatura do reator no ciclo de processamento anterior

$\Delta t$  = Intervalo de processamento (25 ms)

TA = Temperatura ambiente

As correntes (fundamental e harmônicos) do reator L1 serão obtidas através do TC4 e do reator L2 através do TC2. Como exemplo, são apresentados os dados fornecidos pelo fabricante do reator para que se possa fazer a modelagem térmica do mesmo:

**Valor da constante TRA**—O valor da constante TRA é de 2.02 °C/kW.

**Curvas de valor da resistência efetiva do enrolamento em função da temperatura do enrolamento para as frequências harmônicas**—A resistência efetiva do enrolamento ( $R_{AC}$ ) foi levantada através do cálculo separado da resistência  $R_{DC}$  do enrolamento e de uma resistência adicional  $R_{AD}$  causada pelas perdas próprias no condutor. Não foi considerada a resistência adicional devido a perdas induzidas nas cruzetas suporte, uma vez que estas perdas não se caracterizam como fonte de calor no enrolamento. As equações de reta para cálculo de  $R_{AC}$  em função da temperatura do enrolamento do reator ( $T$ ) nas frequências solicitadas são apresentadas a seguir:

- Equação para  $R_{AC}$  em 60 Hz ( $R_{AC-60}$ )  $R_{AC-60} = 0.002729 * T + 0.805463$
- Equação para  $R_{AC}$  em 120 Hz ( $R_{AC-120}$ )  $R_{AC-120} = 0.002265 * T + 0.977170$
- Equação para  $R_{AC}$  em 180 Hz ( $R_{AC-180}$ )  $R_{AC-180} = 0.001494 * T + 1.262457$
- Equação para  $R_{AC}$  em 240 Hz ( $R_{AC-240}$ )  $R_{AC-240} = 8.9 * 10^{-6} * T^2 - 0.00092 * T + 1.693$
- Equação para  $R_{AC}$  em 300 Hz ( $R_{AC-300}$ )  $R_{AC-300} = 1.36 * 10^{-5} * T^2 - 0.003 * T + 2.22$
- Equação para  $R_{AC}$  em 360 Hz ( $R_{AC-360}$ )  $R_{AC-360} = 1.93 * 10^{-5} * T^2 - 0.0056 * T + 2.87$
- Equação para  $R_{AC}$  em 420 Hz ( $R_{AC-420}$ )  $R_{AC-420} = 2.6 * 10^{-5} * T^2 - 0.0086 * T + 3.63$

**Calor específico total do reator**—O calor específico total do reator, obtido pela relação (massa x calor específico) dos componentes do enrolamento (condutor, isolamento e fibra de vidro) resulta no valor  $C_T = 2423.7$  kJ / °C

**Temperatura máxima de operação**—As perdas totais geradas no enrolamento do reator devem ser calculadas como o somatório das perdas geradas por cada corrente harmônica, a partir dos valores de resistência total do enrolamento para cada frequência.

$$P_T = \sum_{i=1}^n R_{AC-i} \cdot I_i^2 \quad (4)$$

Para cada reator, temos uma temperatura *média* máxima que ele pode atingir, que por sua vez resultará em um ponto quente com o valor máximo permitido para o isolamento. Temperaturas médias superiores a este limite implicam em uma perda acentuada de vida útil do enrolamento. Um segundo limite deve definir a temperatura média que colocaria o reator no limiar de uma queima.

Estes valores são apresentados na Tabela II a seguir para o reator L1 (391 mH):

TABELA II  
TEMPERATURA MÉDIA MÁXIMA DO REATOR L1

Reator	$T_{m1}$	$T_{m2}$
391.0 mH	100.7°C	122.8°C

$T_{m1}$ —Temperatura média máxima do enrolamento, que corresponde à máxima temperatura do reator para manter a sua vida útil dentro dos padrões normalizados. Valores de temperatura média superiores a este limite implicam em uma perda acentuada de vida útil do equipamento.

$T_{m2}$ —Temperatura média máxima do enrolamento, que corresponde à máxima temperatura do reator que coloca em risco imediato a sua operação.

**Temperatura de operação esperada**—Os valores projetados de temperatura de operação em regime permanente para o reator sob o espectro de harmônicas nominal e temperatura ambiente de 40 °C e 50 °C estão a seguir:

- Correntes nominais:  $I_{60Hz} = 107$  A,  $I_{180Hz} = 32.6$  A,  $I_{360Hz} = 58.5$  A.
- Temperatura ambiente = 40°C  $\Rightarrow$  Temperatura média do enrolamento = 82.7°C.
- Temperatura ambiente = 50°C  $\Rightarrow$  Temperatura média do enrolamento = 93.8°C.

Conforme já mencionado anteriormente, a utilização de função de sobrecorrente RMS com o intuito de se obter proteção de sobrecarga para todos os elementos do filtro não é adequada, como exemplo podemos citar que para o caso de um aumento de 25% da tensão harmônica no barramento teremos que a corrente RMS medida na entrada do filtro aumenta em torno de 7.5%, contudo as correntes de 3° e 5° harmônicos no reator L2 aumentam 28% e 24%, respectivamente. É sabido que o reator possui resistência que varia diretamente com o valor da frequência, portanto este reator estará submetido a um aquecimento que não é possível de ser representado pela corrente RMS medida na entrada do filtro, é necessário ter proteções térmicas que representam o aquecimento atual do reator, como o modelo térmico aqui apresentado.

#### D. Proteção de Subcorrente Controlada por Tensão

Durante os 20 anos operando e dando manutenção em bancos de filtros, verificou-se que quando ocorre o rompimento físico de qualquer dos componentes do banco de filtros, não há proteção que atue, pois não ocorrem sobrecorrentes e os filtros antigos não possuem TP's no seu interior. Por exemplo, a corrente fundamental (60 Hz) medida na entrada do filtro em uma condição normal de operação é  $I_{60Hz} = 98$  A, caso ocorra o rompimento da conexão do capacitor C2, esta corrente permanece inalterada, não sendo possível a detecção desta

anormalidade através da medição desta corrente. Devido a essa experiência adquirida, uma nova filosofia de proteção foi desenvolvida com o objetivo de proteger o banco de filtros para o caso de rompimento físico de qualquer elemento que compõe o filtro. Neste artigo denominamos esta função como sendo 37 V, uma função de subcorrente controlada por tensão.

A proteção tem como objetivo medir a corrente em cada um dos elementos do filtro e caso a mesma esteja abaixo de um valor mínimo enquanto a tensão esteja acima de um determinado valor, há a indicação de que houve rompimento da conexão do respectivo elemento. A Fig. 6 apresenta a lógica implementada para a detecção de rompimento da conexão do capacitor C2 (37VC2, veja Fig. 3).

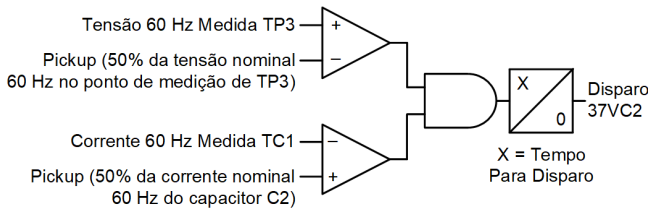


Fig. 6. Lógica da Função de Subcorrente Controlada por Tensão

A lógica para os demais elementos é similar, obviamente utilizando as medições de corrente e tensão respectivas.

#### E. Detecção de Perda de Sintonia

Por ser um Filtro de Harmônicos de dupla sintonia somente deverão passar pelo circuito componentes de corrente de 3ª e 5ª ordem, além da componente fundamental de 60 Hz. Esta prevista a circulação de uma pequena quantidade de harmônicos de outras ordens, em torno de 4,5 A, como a corrente fundamental é em torno de 100 A, isto significa que teremos em torno de 4,5% de harmônicos de outras ordens em relação à fundamental.

Para se verificar a perda de sintonia do filtro será considerada a soma do percentual individual de todas as outras harmônicas em relação á fundamental até a 15ª ordem, se o valor resultante for maior que determinado limite um alarme é emitido.

- Se:  $I_{120\text{Hz}}(\%) + I_{240\text{Hz}}(\%) + I_{360\text{Hz}}(\%) > 2,5\%$  Então: Alarme
- Se:  $I_{420\text{Hz}}(\%) + I_{480\text{Hz}}(\%) + I_{540\text{Hz}}(\%) + I_{600\text{Hz}}(\%) + I_{660\text{Hz}}(\%) + I_{720\text{Hz}}(\%) + I_{780\text{Hz}}(\%) + I_{840\text{Hz}}(\%) + I_{900\text{Hz}}(\%) > 2\%$  Então: Alarme

Deve haver um valor mínimo de corrente fundamental no TC4 (veja Fig. 3) para que a função de perda de sintonia entre em operação. O cálculo é feito por fase.

#### F. Disparo Monopolar

A experiência de Furnas mostrou que é possível operar o filtro de harmônico, de maneira provisória, com apenas duas fases em operação, desta maneira foi implementado um esquema de proteção que possibilita o disparo monopolar. Todas as funções de proteção, com exceção da função de sobrecorrente de neutro (51N), possibilitam, intrinsecamente, a seleção de fase defeituosa, por este motivo a função 51N não é utilizada como a principal função de proteção para detecção de faltas à terra no filtro, as funções de subtensão 27TP2 e 27TP3

(veja Fig. 3) são utilizadas como principal proteção para detecção de faltas à terra, portanto, possuem tempos de disparo menores que a função 51N.

Como o filtro de harmônicos poderá operar com somente duas fases, esta proteção deve ser desabilitada caso o filtro de harmônicos esteja operando com uma das fases fora de serviço, neste caso, as faltas à terra são detectadas pelas funções de proteção de subtensão.

A Fig. 7 mostra a lógica de disparo monopolar implementada nos dispositivos de proteção utilizados neste projeto.

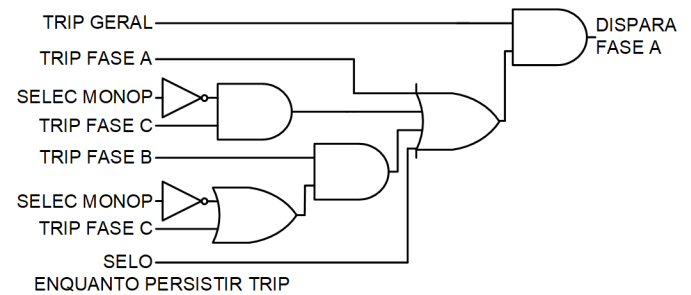


Fig. 7. Lógica Disparo Monopolar Fase A (Similar Para as Fases B e C)

## V. CONCLUSÃO

A filosofia de proteção de filtros harmônicos para extra alta tensão, aqui proposta, permite uma proteção abrangente para o mesmo, permitindo a rápida identificação do elemento defeituoso e do ponto de falta, facilitando a operação e acelerando a recomposição.

Os modernos dispositivos de proteção são flexíveis o suficiente para permitirem a implementação de funções de proteção não convencionais com segurança e confiabilidade.

A proteção não deve impor restrições desnecessárias à operação do filtro, evitando o desligamento precoce em condições de sobrecarga.

Funções de proteção de sobrecorrente baseadas na medição de corrente RMS são ineficazes para a proteção de sobrecarga de reatores de núcleo de ar do filtro, pois os mesmos possuem diferentes valores de resistência ôhmica para diferentes valores de frequência, é necessária a utilização de uma função térmica capaz de levar em conta este fato.

## VI. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] IEEE Std C37.99-2000, IEEE Guide for the Protection of Shunt Capacitor Banks.