

Projeto e Análise de Filtros Harmônicos para utilização em Subestação da UFRN

Ênio Vale de Oliveira Cunha

Programa de Pós-Graduação em Energia Elétrica

UFRN

Natal – RN, Brasil

enio_vale@hotmail.com

Crisluci Karina Souza Santos Cândido

Max Chianca Pimentel Filho

Programa de Pós-Graduação em Energia Elétrica

UFRN

Natal -RN, Brasil

Resumo — O presente trabalho trata da implementação e simulação no software PSIM® dos três mais comuns tipos de filtros para harmônicos de corrente, que são o filtro passivo, ativo e Híbrido, na subestação do CTEC (Complexo Tecnológico de Engenharia) na UFRN a fim de melhorar os resultados obtidos na análise de harmônicos registrados em equipamentos analisadores de energia e baseando-se nesses resultados escolher o melhor tipo de filtro para essa determinada situação. Além disso é feito o dimensionamento dos compensadores do filtro ativo e passivo, e uma análise geral do sistema abordado com o intuito de se simular o sistema mais realista possível.

Palavras-Chave— *Corrente, Dimensionamento, Filtros Harmônicos, Simulação.*

I. INTRODUÇÃO

Com o decorrer do tempo os avanços científicos e tecnológicos estão se intensificando consideravelmente, principalmente na área da eletrônica. Porém, esse avanço trás consigo um aumento da quantidade de cargas não-lineares em todo o sistema elétrico, tal fato restringe a certeza da confiabilidade do sistema como um todo, pois acaba acarretando, por exemplo numa correção de fator de potência mais elaborada, em consequência, principalmente, da distorção harmônica de tensão e corrente [1]. Além dos harmônicos de tensão e corrente existem outros tipos de distorções [4]:

- Offset (deslocamento CC): Ocorre pela presença de tensões e correntes de valor médio diferente de zero;
- Inter-harmônicos: São perturbações causadas por componentes de corrente que não estão relacionados com a fundamental. Essas podem ser geradas por fornos a arco, por exemplo [3].
- Notching: Perturbações periódicas com conteúdo harmônico em alta frequência que ocorre sobre a tensão devido a operação dos dispositivos semicondutores [1].

Para a elucidação de problemas envolvendo harmônicos, comumente, são utilizadas as mitigações passivas, ativas ou híbridas. As passivas resumem-se a apenas indutores e capacitores instalados no sistema, as ativas aplicam filtros ativos séries ou paralelos, as quais utilizam como principal elemento o conversor CC/CA controlado e, por último, as híbridas que são a junção do filtro passivo e do ativo[2].

Com base nisso esse trabalho tem como objetivo realizar um estudo a respeito do nível de harmônicos em todo o Campus Natal Central da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). O estudo foi realizado com o auxílio de um analisador de energia da YOKOGAWA®, cujo modelo é o CW500, o qual coletou todos os dados de harmônicos nos mais variados pontos da universidade. Com os dados coletados, constatou-se que a subestação do CTEC (Complexo Tecnológico de Engenharia) apresentou uma alta taxa de distorções harmônicas de corrente (THDi). Para a solução dessa situação foram simulados no sistema reduzido do Campus Central da UFRN os três tipos de filtros citados anteriormente através software PSIM® a fim de se comprovar a eficiência de tais filtros na mitigação de harmônicos e a partir dos resultados coletados escolher qual o melhor tipo de filtro para essa situação.

A escolha dos tipos de filtros teve como base o fato de tais filtros serem os mais utilizados no mercado, sendo um filtro passivo RLC série Shunt, um de 3ª e outro de 5ª ordem, o filtro ativo, composto por um inversor de tensão com três braços e um filtro híbrido composto pelos os filtros ativo e passivos citados.

II. DEFINIÇÃO DAS TOPOLOGIAS DOS FILTROS

A. Filtro Passivo

Os filtros passivos são os mais empregados para a mitigação de harmônicos devido a sua simples composição, pois têm um custo inferior quando comparado aos outros métodos de filtragem e são de fácil dimensionamento. Eles podem ser classificados como filtros sintonizados ou amortecidos de 1ª, 2ª, 3ª ordem e do tipo C [5]. Além disso, existe ainda a forma de conexão com a rede que pode ser em série, o que funciona como um circuito de bloqueio para um certo nível de harmônicos, ou em paralelo, que atua como um caminho de baixa impedância para uma determinada faixa de frequência. A preferência pela a utilização fica pela a topologia em paralelo, pois o filtro série tende a ser mais robusto por passar toda a corrente do circuito por ele e consequentemente acaba ficando com um custo mais elevado [1].

B. Filtro Ativo

Os filtros ativos são assim chamados por serem formados por um conversor chaveado, na maioria dos casos um inversor

de frequência, o qual emite uma onda de tensão ou de corrente contendo harmônicas. Eles agem emitindo harmônicos que impedem que estas fluam pelo sistema tanto a jusante como a montante. Podem ser dispostos tanto em série como em paralelo [1].

Estes componentes têm desvantagens operacionais menores quando comparado com os filtros passivos, porém são bem mais complexos, principalmente por causa da sua estrutura de controle. Além de mitigar harmônicos, eles podem corrigir fator de potência e balancear cargas e tensões da instalação [6].

Os filtros ativos podem ser série ou paralelo, o filtro ativo paralelo, como é mostrado na Figura 1, que será a tipologia utilizada neste trabalho, é o mais comum entre os dois tipos e atua como uma fonte de corrente de harmônicos, através do conversor, com a intenção de compensar a corrente distorcida drenada pela carga [7]. Desta maneira a fonte acaba enxergando a carga como sendo linear e não prejudica outras cargas ligadas a essa mesma fonte.

C. Filtro Híbrido

O filtro híbrido apresenta uma solução alternativa para o uso de filtros passivos e ativos. Tais filtros são constituídos pelos elementos passivos ressonantes e por conversores eletrônicos. Este equipamento é o mais apropriado no quesito eficiência quando comparado com os outros dois tipos de filtros, pois apresenta um bom comportamento em relação à mitigação dos harmônicos com um investimento não tão elevado [8].

Será realizada na simulação a modelagem do filtro híbrido formado pela junção do filtro ativo paralelo e pelo filtro passivo RLC série shunt.

III. ESTRATÉGIA DE CONTROLE – FILTRO ATIVO

A mitigação harmônica ativa abordada nesse trabalho é fundamentada no método baseado no sistema de eixos de referência síncrona (Método SRF-Synchronous Reference Frame Method), onde as grandezas estacionárias das coordenadas a-b-c são transformadas para um referencial síncrono d-q-0. Esse tipo de compensação é composto basicamente por duas transformações invariantes em relação a potência. A primeira é conhecida como transformada de Clarke e a segunda de transformada de Park que são mostradas nas equações (1) e (2), respectivamente.

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ X_{ALFA} \\ X_{BETA} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_A \\ X_B \\ X_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{ALFA} \\ X_{BETA} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Para a aplicação da transformada de Park é necessário calcular as coordenadas do vetor unitário $\cos\theta$ e $\sin\theta$. O ângulo θ pode ser obtido da rede via um circuito PLL (Phased-Locked Loop), no qual se baseia na teoria da potência reativa instantânea. O resultado dessa estratégia é a obtenção de um sistema de referência síncrono, composto por dois eixos síncronos denominados eixo direto d e eixo em quadratura q, além da componente homopolar (sequência zero). As parcelas das componentes fundamentais dos eixos d e q podem ser obtidas através de filtros passa-baixa.

A figura 1 mostra o diagrama unifilar de blocos de um compensador SRF de corrente aplicado a um filtro ativo de potência onde as correntes, que são usadas para mitigar os harmônicos, são obtidas a partir de correntes de carga. Segundo uma análise feita por [10] este arranjo apresenta características superiores quando comparado com um filtro ativo convencional.

Um ponto importante para implementação do compensador SRF é a escolha da frequência de corte do filtro passa baixa (FPB). Ela é escolhida com base em sistemas desbalanceados, como o da UFRN por exemplo, onde a componente de sequência negativa ($n=2,5,8,11,$ etc.) fundamental de corrente está presente nas correntes da carga. Essa componente é responsável pelo aparecimento de componentes de 120 Hz no eixo síncrono d-q do compensador. Para garantir a filtragem destas componentes o filtro deverá possuir uma frequência de corte de 12 Hz, que representa uma década abaixo da menor frequência a ser filtrada [10].

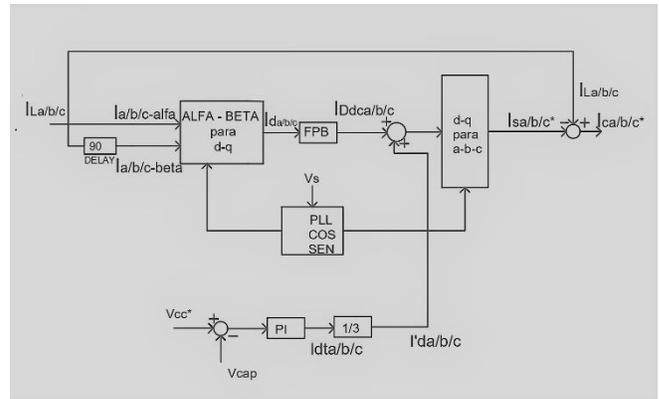


Fig. 1. Diagrama de blocos do algoritmo SRF para a topologia split capacitor.

Outro ponto de grande relevância é o controle da tensão no barramento cc do inversor do filtro ativo, o qual, devido às perdas inerentes ao inversor, tende a diminuir. Portanto existe a necessidade de se incluir uma malha de controle de tensão no circuito de controle do filtro. A malha atua compensando as perdas e mantendo a tensão no barramento CC desejada. Neste método uma parcela cc proveniente do controlador de tensão é adicionada a potência P_h fazendo com que o filtro drene a potência ativa da rede compensando as perdas. A figura 1 mostra um que a saída do compensador deve ser adicionada à parcela oscilante da corrente I_d , como também mostra que a saída do controlador de tensão é dividida por três

antes de se somar a corrente I_d de cada fase. Desta forma a potência ativa drenada das fases é dividida em parcelas iguais entre cada fase [11].

IV. ANÁLISE MATEMÁTICA

Para a implementação do sistema de controle do filtro ativo de potência é necessária toda a modelagem do sistema físico do filtro ativo, além do dimensionamento dos controladores do sistema e dos filtros passivos que serão simulados no trabalho.

Com base nisso, serão abordados os seguintes pontos para o cálculo dos filtros utilizados na simulação:

- Dimensionamento do Filtro passivo RLC série shunt de 3ª e 5ª ordem;
- Modelagem dos sistemas de corrente e tensão.

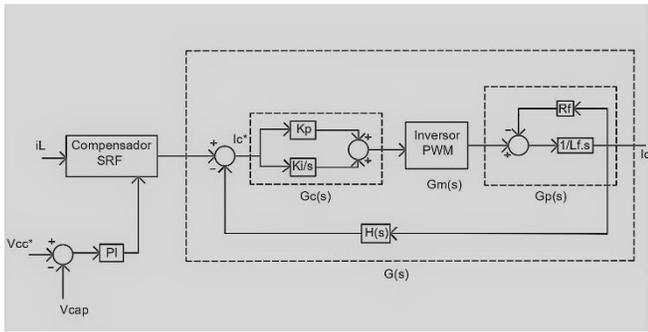


Fig. 2. Diagrama de blocos da malha de controle de corrente do filtro ativo de potência.

A. Modelagem dos sistemas de corrente e tensão

O diagrama de blocos da malha de corrente do filtro ativo paralelo está representado pela a figura 2. Partindo do pressuposto de que o ganho do inversor PWM seja unitário, ou seja, se desconsidera a não linearidade e possíveis perdas, com isso a função de transferência do inversor passa a valer $G_m(s) = 1$ [10].

Já a função de transferência do controlador PI em paralelo é dada pela equação (3).

$$G_c(s) = \frac{K_p \cdot s + K_i}{s} \quad (3)$$

O modelo da planta, ou seja, do sistema físico, é composto por uma indutância em série com uma resistência conforme a figura 2. A equação (4) representa a função de transferência da planta considerada na malha de corrente do filtro ativo de potência, onde L_f é igual a 0,1 mH e R_f é igual a 0,05 Ω .

$$G_p(s) = \frac{1}{L_f \cdot s + R_f} \quad (4)$$

Considerando o sensor de corrente unitário, ou seja, $H(s)=1$. A função de transferência de malha aberta e fechada são dadas pelas as equações (5) e (6).

$$G_{MA}(s) = \frac{K_p \cdot s + K_i}{L_f \cdot s^2 + R_f \cdot s} \quad (5)$$

$$G_{MF}(s) = \frac{K_p \cdot s + K_i}{L_f \cdot s^2 + (R_f + K_p) \cdot s + K_i} \quad (6)$$

Já a modelagem do sistema de controle de tensão do barramento cc será realizada segundo [10], em que o diagrama de blocos da malha de tensão do filtro ativo está ilustrado na figura 4. Onde $(G_c(s) = K_p + K_i/s)$ representa o controlador PI e $(G_{inv}(s)=1)$ representa a função de transferência do inversor.

A função de transferência em malha fechada do diagrama de blocos da figura 3 é dada pela a equação (7).

$$G_{MF}(s) = \frac{\frac{K_i \cdot v_d}{C_{cc} \cdot V_{cc}} \cdot \left(\frac{K_p}{K_i} \cdot s + 1 \right)}{s^2 + \frac{K_p \cdot v_d}{C_{cc} \cdot V_{cc}} \cdot s + \frac{K_i \cdot v_d}{C_{cc} \cdot V_{cc}}} \quad (7)$$

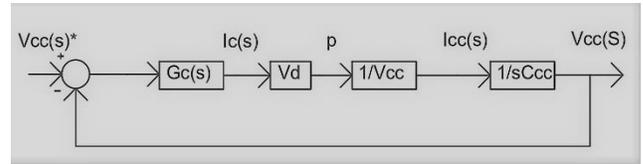


Fig. 3. Diagrama de blocos da malha de tensão do filtro ativo

B. Dimensionamento do filtro RLC série shunt de 3ª e 5ª ordem

Através dos resultados coletados das simulações, constatou-se que os harmônicos de 3ª e 5ª ordens são os que estão em maior evidência no espectro de frequência, por esse motivo eles foram os escolhidos para a implementação dos filtros passivos.

Para o dimensionamento foram utilizadas as equação (8), a qual resulta no valor da resistência, juntamente com as equações (9) e (10) que resultam nos valores de indutância e capacitância desse tipo de filtro.

$$R = \frac{K \cdot I_1}{(I_1^2 - k^2 \cdot I_1^2)} \cdot \left[R_s \cdot K \cdot I_1 + \sqrt{(R_s \cdot I_1)^2 + (h \cdot w \cdot L_s)^2 \cdot (I_1^2 - k^2 \cdot I_1^2)} \right] \quad (8)$$

$$L = \frac{R \cdot Q}{h \cdot W} \quad (9)$$

$$C = \frac{1}{h \cdot w \cdot R \cdot Q} \quad (10)$$

Em que o Q é o fator de qualidade do filtro cujo valor é 50, o K é a constante de distorção cujo valor foi escolhido em 0,12 para 3ª ordem e 0,0025 para 5ª ordem, h a ordem do harmônico que foi escolhido para ser filtrado [9].

V. SISTEMA UTILIZADO NA MEDIÇÃO

A. Caracterização do sistema utilizado

Para a medição dos harmônicos foi utilizado um analisador de qualidade de energia da YOKOGAWA do modelo CW500, cuja medição foi realizada na subestação do CTEC na UFRN.

A fim de chegar na impedância equivalente vista pela a subestação do CTEC, coletou-se diversos dados do sistema como o equivalente de Thévenin vista pela a subestação central da UFRN, a impedância da linha de 13,8 kV que liga à subestação central à subestação do CTEC e a impedância dos transformadores tanto da SE do CTEC como da SE central, o que resultou em uma impedância equivalente de valor $0,000962977 + j 4,576799 \times 10^{-4} \Omega$.

B. Medição e valores dos harmônicos de corrente no sistema

A medição foi feita no lado de baixa tensão dos transformadores da subestação do CTEC, pois foi o local onde teve o maior nível de harmônicos de correntes, no horário comercial, dentre todos os outros pontos coletados na universidade, esses dados foram coletados às 12:11 do dia 21/03/2019.

Os valores dos harmônicos de corrente, de potência ativa em cada fase e o fator de potência estão representados pela a tabela I.

TABELA I. Valores dos Harmônicos de Corrente

	Fase A	Fase B	Fase C
N	Corrente	Corrente	Corrente
1ª	103,99 A	106,3 A	119 A
2ª	8,678 mA	7,36 mA	81,4 mA
3ª	9,0456 A	15,07 A	11,38 A
4ª	0 A	0 A	0 A
5ª	12,065 A	10,90 A	12,0 A
6ª	0 A	1,2 mA	0 A
7ª	12,502	13,25 A	12,18 A
8ª	0 A	0 A	0 A
9ª	4,6632 A	5,85 A	4,539 A
10ª	0 A	0 A	0 A
11ª	422,5 mA	1,264 A	733 mA
12ª	0 A	0 A	0 A
13ª	2,8320 A	2,289 A	2,53 A
THD	19,72%	22,35%	17,94%
P (Kw)	23,657	24,050	26,790
F.P.	0,9216	0,9152	0,9243

VI. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Para o presente trabalho é utilizado a topologia de filtros ativos Split-Capacitor de três fios, mostrada na figura 4 juntamente com os filtros passivos, ela faz uso de dois capacitores com um ponto médio ligado a um ponto comum e mais três braços de inversores. Essa topologia é uma escolha apropriada quando se trata de sistemas de média e baixa potência por apresentar um número reduzido de chaves. Em outras aplicações que envolvem alta potência essas topologias não são as mais adequadas [10].

Para uma melhor apresentação dessa topologia será apresentado na tabela II os valores da resistência, capacitância e indutância dos filtros passivos, os valores dos ganhos dos controladores de corrente e tensão; e o valor dos capacitores

utilizados no inversor e a tensão aplicada nos mesmos, cuja valor vai se situar entre 25% a 50% do valor de pico da tensão da fonte, neste trabalho utilizou-se o valor de 40% maior que a tensão de pico, portanto 450 V [12].

Com base no sistema apresentado, a primeira situação consiste no sistema sem nenhum tipo de filtro, onde as figuras 5 e 6 ilustram as formas de onda nas três fases e no neutro respectivamente, já a figura 8 mostra as formas de onda da tensão nas três fases.

Com base nos gráficos que foram mostrados, primeiramente será utilizado no sistema os filtros passivos de 3ª e 5ª ordens, onde a figura 8 ilustra as formas de onda na carga e na fonte, além da figura 9 que mostra a corrente do neutro no sistema.

Ademais foi feito também a coleta dos resultados com apenas o filtro ativo onde as figuras 10 e 11, mostram, respectivamente, as formas de onda da corrente em todas as fases na fonte, filtro e carga e a forma de onda da corrente do neutro da fonte.

Por último será implementado o filtro híbrido, o qual é a combinação do filtro passivo com o filtro ativo de potência, os resultados desta implementação são as formas de onda das correntes das fases a, b e c, da fonte e carga na figura 12. Já a corrente de neutro demonstra forma de onda muito próxima a do filtro ativo.

Para uma melhor compreensão dos resultados pode-se relacionar os resultados da tabela III com a I e constatar a melhora que o sistema teve com a execução dos filtros harmônicos. Além também da eficiência que tanto o filtro passivo como o filtro ativo mostraram nas simulações.

TABELA II. Valores dos ganhos dos controladores e dos componentes dos filtros passivos.

Controlador Corrente	Kp	31,41
	Ki	1570
Controlador Tensão	Kp	0,4018
	Ki	18,3763
Filtro Passivo – 3ª Ordem	L	3,44 mH
	C	241 uF
	R	0,077Ω
Filtro Passivo – 5ª Ordem	L	1,1338 mH
	C	263 uF
	R	0,042Ω

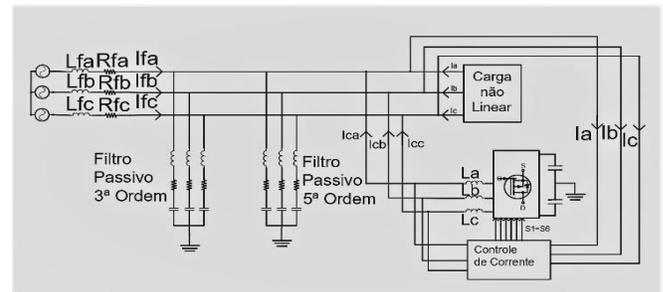


Fig. 4. Sistema da Simulação

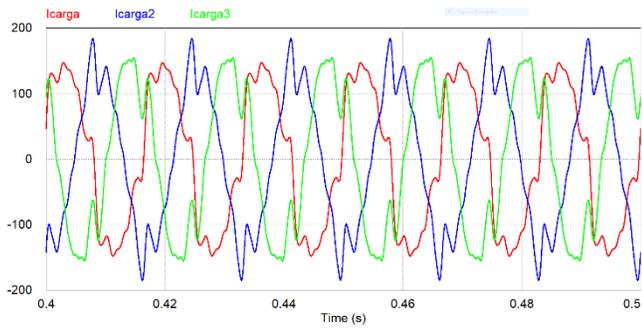


Fig. 5. Correntes a,b e c sem filtro

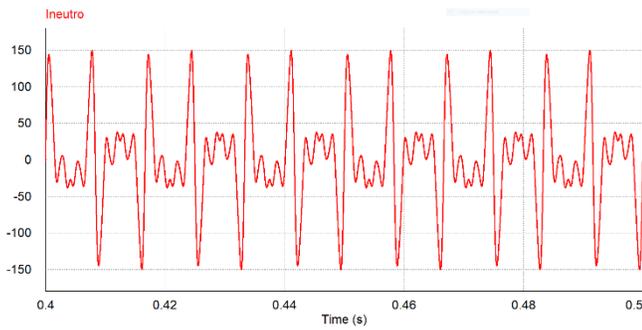


Fig. 6. Corrente de neutro sem filtro

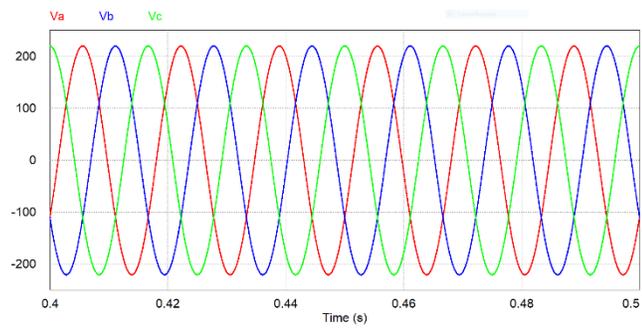


Fig. 7. Formas de onda de tensão das fases a,b e c

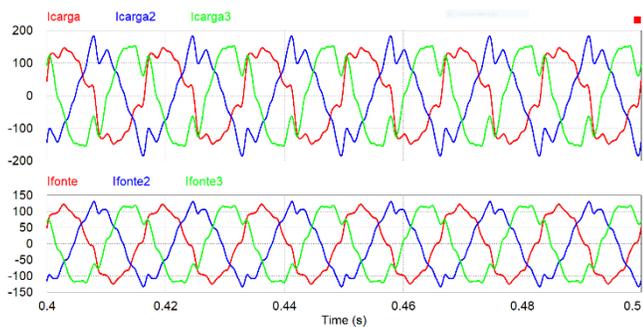


Fig. 8. Formas de onda da corrente nas fases a, b e c, na fonte e na carga, com o filtro passivo.

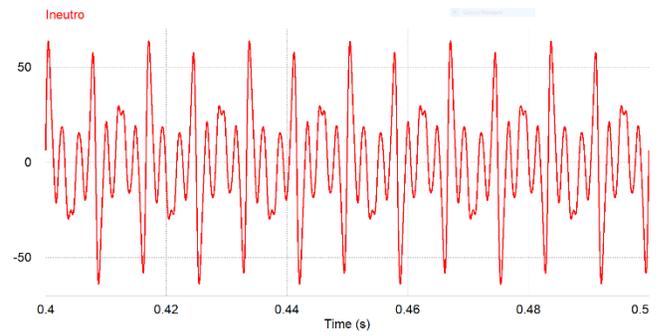


Fig. 9. Corrente do neutro com filtro passivo

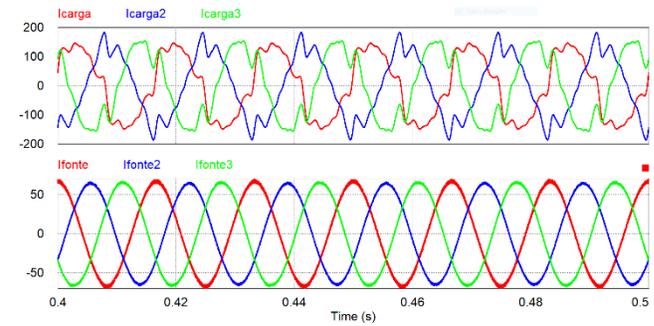


Fig. 10. Formas de onda da corrente nas fases a, b e c, na fonte e na carga, com o filtro ativo

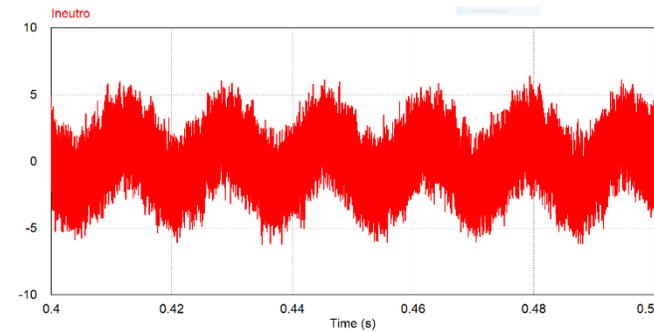


Fig. 11. Formas de onda da corrente no neutro com o filtro ativo.

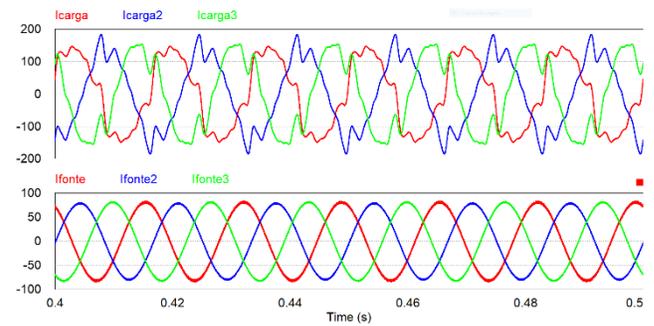


Fig. 12. Formas de onda da corrente nas fases a, b e c, na fonte e na carga, com o filtro híbrido

Com base nos resultados expostos acima foi feito a tabela IV para expor os resultados de índices de distorções harmônicas antes da implementação dos filtros e depois da

implementação, assim como o fator de potência e os valores das correntes de neutro nessas duas situações.

Pelos os resultados coletados na tabela IV, pode-se notar a sensível melhora nos índices de distorções harmônicas com a aplicação dos filtros, em especial com o filtro ativo e híbrido, assim como pode-se observar uma melhora significativa da corrente de neutro mostrando a correção que foi feita no desequilíbrio das correntes de fase. A respeito do fator de potência houve uma pequena e grande melhora com o filtro passivo e ativo, respectivamente, porém no filtro híbrido, quando comparado com o filtro ativo, ocorreu uma piora no fator de potência, devido a implementação do filtro passivo, mesmo assim um resultado melhor que a simulação sem filtro.

Tabela III. Módulo da corrente em cada fase e ordem em relação a cada filtragem implementada

	Ordem	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª
Filtro Passivo	Ia -A	80,29	0,23	2,60	0	1,21	0	6,51
	Ib -A	54,73	1	2,23	0	1,16	0	4,65
	Ic -A	73,04	0,96	5,70	0	1	0	6,94
Filtro Ativo	Ia -A	39,8	0,95	0,30	0	0,12	0	0,12
	Ib -A	44,05	0,39	0,67	0	0,30	0	0,14
	Ic -A	40,75	0,95	0,57	0	0,37	0	0,22
Filtro Híbrido	Ia -A	57,27	0,09	0,21	0	0,01	0	0,32
	Ib -A	55,98	0,07	0,16	0	0,04	0	0,03
	Ic -A	57,55	0,03	0,23	0	0,03	0	0,03

Tabela IV. Resultados das implementações dos filtros ativo, passivo e híbrido

		Sem Filtro	Filtro Passivo	Filtro Ativo	Filtro híbrido
THD	Fase A	19,60%	10,2%	1,4955%	0,093%
	Fase B	21,39%	11,66%	1,5701%	0,092%
	Fase C	17,41%	10,38%	1,4777%	0,090%
	Neutro (A)	63,68 Arms	27,33 Arms	1,90 Arms	1,75 Arms
Fator de Potência	Fase A	0,9216	0,9236	0,996	0,96
	Fase B	0,9152	0,9189	0,998	0,96
	Fase C	0,9243	0,9265	0,996	0,96

VII. CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi abordado a implementação de filtros harmônicos em uma subestação da UFRN. Através do simulador PSIM® foi possível verificar a eficiência da mitigação realizada. Antes verificava-se uma distorção harmônica considerável, no local, a qual poderia causar, no futuro, defeitos nos equipamentos, mas ao inserir os filtros a distorção foi reduzida consideravelmente.

Desta forma como o principal objetivo era constatar a eficiência da mitigação e dentre as medições feitas a que teve o pior resultado foi a subestação da CTEC.

Além da eficiência observada, é interessante salientar também que o trabalho possui um papel inovador para a UFRN a qual nunca foi feito nenhum trabalho do tipo na instituição, projeto no qual pode ser ampliado por todo o

campus buscando pontos de grandes distorções e afim de procurar solucioná-los, além de sua implementação na prática.

Para trabalhos futuros pretende-se implementar outras topologias de filtros com o objetivo de comparar os resultados e escolher a melhor topologia para esse tipo de instalação, além disso poderá fazer uma análise de custos para reforçar a escolha do melhor filtro ativo para o CTEC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LEÃO, Ruth Pastôra Saraiva; SAMPAIO, Raimundo Furtado; ANTUNES, Fernando Luiz Marcelo. **Harmônicos em Sistemas Elétricos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 354 p.
- [2] AKAGI, H.; Modern Active Filters and Tradicional Passive Filters. **Bulletin of Polish Academy of Sciences**, vol. 54, n° 3, 2006.
- [3] YACAMINI, R. Power System Harmonics. Part 3: Problems caused by distorted supplies. **Power Engineering Journal**, v. 9, n. 5, p. 233–238, 1995.
- [4] Institute of Electrical and Electronic Engineers. **IEEE 1159: Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality**. New York: Ieee, 2009.
- [5] ELETROBRAS DISTRIBUIÇÃO PIAUÍ. **Estudo Sobre Métodos de Filtragem Harmônica e Correção de Fator de Potência em Rede de Distribuição de Baixa Tensão**. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2013.
- [6] Sasaki, h.; Machida, t.. A New Method to Eliminate AC Harmonic Currents by Magnetic Flux Compensation-Considerations on Basic Design. **Ieee Transactions On Power Apparatus And Systems**, [s.l.], v. -90, n. 5, p.2009-2019, set. 1971. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tpas.1971.292996>.
- [7] Eletrobras distribuição PIAUÍ. **Especificação do Filtro Híbrido de Potência**. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2014.
- [8] Nogueira, Mozart Daniel Oliveira. **Projeto de filtro híbrido a quatro fios para aplicação em rede de distribuição: um estudo de caso**. 2018. 94 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-ce, 2018.
- [9] MORAES, Ernande Eugenio Campelo. **Estudo e projeto de filtros passivos para atenuação de harmônicos em instalações elétricas industriais**. 2011. 137 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011. Disponível em: <<http://www.dee.ufc.br/anexos/TCCs/2011.1/ERNANDE%20EUGENIO%20CAMPELO%20MORAIS.pdf>>. Acesso em: 08 out. 2018.
- [10] Feracin Neto, Angelo **Filtros Ativos Paralelos Aplicados a Sistemas Elétricos Trifásicos a Quatro Fios**. 2009. 149 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica, Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, 2009.
- [11] Silva, Sérgio Augusto de Oliveira **Sistemas de energia ininterrupta line interactive trifásicos com compensação ativa de potência série e paralela**. Tese de doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de pesquisa e desenvolvimento em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2001.
- [12] KHADKIKAR, V.; CHANDRA, A.. An independent control approach for three-phase four-wire shunt active filter based on three H-bridge topology under unbalanced load conditions. **2008 Ieee Power Electronics Specialists Conference**, [s.l.], p.300-325, jun. 2008. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/pesc.2008.4592699>.