

Uma Abordagem sobre o Dimensionamento de Filtros Passivos em Ambientes Industriais: Estudo de Caso

Luiz FERNANDO SOARES DE SOUZA
Engenharia de Aplicação
BREE
Quatro Barras, Brasil
luiz.souza@bree.com.br

Flavio RESENDE GARCIA
Engenharia de Aplicação
BREE
Quatro Barras, Brasil
flavo@bree.com

Patrick ROBERTO DE ALMEIDA
Engenharia de Aplicação
BREE
Quatro Barras, Brasil
patrick.almeida@bree.com.br

Ricardo GOMES DA SILVA
Engenharia de Aplicação
BREE
Quatro Barras, Brasil
ricardo.silva@bree.com.br

Resumo— É bem conhecido que a presença de harmônicos nas instalações elétricas, devido à utilização de cargas eletrônicas residenciais, comerciais e industriais, afeta o comportamento da tensão e corrente, prejudicando a vida útil e o funcionamento dos equipamentos das mesmas. Além disso, a forte sensibilidade destas cargas eletrônicas conectadas em sistemas de rede com distorções harmônicas podem levar ao desligamento ou a queima destas cargas sensíveis. Este artigo apresenta os efeitos e as soluções para problemas ocorridos com harmônicos para a correção do fator de potência e mitigação de harmônicos em um sistema industrial, onde as cargas são acionadas por inversores de frequência. Ademais, será ressaltado a importância de realizar um dimensionamento correto destes equipamentos.

Palavras chaves— Harmônicos, Qualidade da Energia Elétrica, Ressonâncias Harmônicas, Filtros Harmônicos Passivos.

I. INTRODUÇÃO

A partir da década de 1990, as cargas não-lineares começaram a ser comumente utilizadas em ambientes residenciais, comerciais e industriais, devido ao fato de que estas cargas geram mais economia e produtividade, principalmente em sistemas industriais [1]. Para cargas residenciais e comerciais, temos como exemplo os televisores, fontes chaveadas, lâmpadas fluorescentes, condicionadores de ar etc. Na indústria, além das cargas supracitadas, temos os equipamentos destinados a acionar motores de grandes potências, como soft-starter e inversores de frequência [2].

Em suma, a presença dessas novas topologias pode apresentar inúmeras vantagens, no entanto, com o grande crescimento das mesmas, novos estudos têm sido levantados, visando compreender melhor os impactos gerados por esses, que podem contribuir para o aumento das componentes harmônicas no sistema. Isso acontece porque muitas cargas elétricas industriais que utilizam as novas técnicas de eletrônica de potência, apresentam características altamente não-lineares, sendo, portanto, potencial geradora de efeitos danosos aos equipamentos conectados ao sistema, como por exemplo: aumento das perdas elétricas, atuação indevida da proteção e até mesmo mau funcionamento e/ou queima de equipamentos [3].

As soluções para problemas de distorção harmônica de tensão e fator de potência, visam atender os índices de qualidade de energia conforme [4] e [5], com equipamentos a serem instalados na baixa tensão ou média tensão, e que impactam o mínimo possível na dinâmica do sistema industrial conforme já explorado pela literatura [6] e [7]. Em geral, para se manter os níveis de qualidade de energia, sobretudo harmônicos e correção do fator de potência, em um sistema que se deseja aumentar cargas poluidoras é aquisição de bancos de capacitores, filtros harmônicos passivos ou ativos. Assim, a análise de impacto harmônico e de custo versus benefício define qual a melhor solução [6].

Este artigo tem como objetivo principal colocar em discussão os seguintes aspectos relativos à aplicação de filtros de harmônicos passivos em ambientes industriais: estudos de engenharia, simulações computacionais, limites de QEE do Módulo 8 do Prodist, definição dos equipamentos e seus componentes em termos de suportabilidade operativa.

II. FILTROS HARMÔNICOS PASSIVOS

O equipamento denominado filtro harmônico passivo consiste em reduzir a amplitude de correntes e tensões harmônicas de uma ou mais frequências, em uma determinada barra evitando que estas distorções de tensão e corrente se propaguem pelo sistema elétrico.

Todavia, visto que as instalações que apresentam problemas de perturbações harmônicas normalmente também necessitam de compensação reativa, os filtros harmônicos conectados em paralelo com o sistema e próximos às fontes harmônicas também suprem a potência reativa necessária à correção do fator de potência no ponto de instalação.

Dessa forma, a filtragem harmônica passiva atende dois aspectos importantes de uma instalação elétrica como a filtragem harmônica e a compensação reativa com seus benefícios diretos: controle de tensão, redução de perdas através da redução da corrente rms circulante nos circuitos elétricos.

O sistema elétrico brasileiro possui algumas diretrizes que devem ser respeitadas para manter um padrão de eficiência durante a operação. Dois dos principais índices que determina

a eficiência de um sistema elétrico é o Fator de Potência (FP) e a Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT).

A aplicação dos filtros de harmônicos nos sistemas elétricos ocorre quando da ultrapassagem dos limites de distorção harmônica total e individual de tensão nas barras de conexão com a rede básica, definidos pelos procedimentos de rede mostrados nos itens A e B.

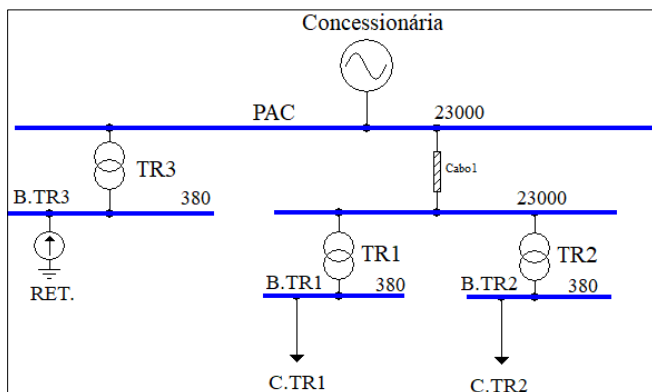
Para a definição de um filtro passivo, torna-se necessário a realização de estudos computacionais que envolvam Fluxo Harmônico e Fluxo de Carga [2], ou seja, existe uma necessidade da contratação de empresas especializadas nestes estudos que, em conjunto com fornecedores de equipamentos de compensação reativa. Entretanto, observa-se que existem dificuldades de definição dos valores nominais dos equipamentos de mitigação harmônica visando dos limites estabelecidos pelo Módulo 8 do Prodist [5]. Para o correto dimensionamento de filtros harmônicos passivos, torna-se essencial conhecer os níveis de distorções harmônicas de tensão e corrente no sistema elétrico, e bem como as demais características elétricas, tais como: nível de curto-circuito no PAC (Ponto de Acoplamento Comum), dados dos transformadores, dados dos cabos etc.

III. DADOS DO SISTEMA ELÉTRICO

A. Diagrama Unifilar

A Figura 1 apresenta o diagrama unifilar do sistema elétrico estudado no ponto de vista do PAC.

Figura 1 – Diagrama unifilar geral simplificado



B. Potência de Curto-Circuito no 23kV

Neste trabalho, foi considerado o nível de curto trifásico no PAC com módulo 2236,0 A e ângulo de 85°, conforme informado pelos estudos de curto-circuito da planta.

C. Dados dos Transformadores

A Tabela 1 mostra as características elétricas do transformador que foi modelado.

Tabela 1 – Características elétricas do Transformador.

Tag	Potência Trafo (kVA)	Tensão Nomina (kV)	Freq. Nominal (Hz)	Z (%)	Grupo de Ligação
TR1	225	23-0,38	60	5,0	Dyn1
TR2	300	23-0,38	60	5,0	Dyn1
TR3	1000	23-0,38	60	6,0	Dyn1

D. Injeção de Corrente Harmônica do Retificador

As correntes harmônicas utilizadas no retificador estão de acordo com as informações disponibilizada pelo fabricante, onde são apresentadas nas primeiras três colunas da Tabela 2.

IV. MODELAGEM EM SOFTWARE DE FLUXO DE CARGA E FLUXO DE HARMÔNICO

Para a execução das simulações, utilizou-se o programa PQF - *Power Quality Filtros*. Este programa utiliza técnicas no domínio da frequência para a solução do fluxo harmônico e fluxo de potência em sistemas elétricos de potência, com tratamento monofásico, ou seja, considerando o sistema elétrico em estudo equilibrado.

Sua metodologia de simulação consiste na solução linear da matriz admitância harmônica, onde, para cada frequência, o programa realiza o cálculo do fluxo harmônico, fornecendo como resultado as distorções harmônicas de tensão e corrente nas diversas barras e linhas do sistema em estudo. O programa PQF também realiza o cálculo do fluxo de potência determinando os valores de tensão, corrente e potências RMS em cada barra e circuitos as elas conectados.

O programa traz incorporados os diversos modelos de componentes elétricos que compõem um sistema elétrico tais como: transformadores, banco de capacitores, linhas de transmissão, motores de indução, cargas lineares, filtros harmônicos etc. As cargas não lineares são modeladas como fontes de correntes harmônicas, cujos dados (ordem harmônica, amplitude e ângulo de fase) podem ser oriundos de medições de campo ou a partir de soluções analíticas de modelos que representam a operação destas cargas em regime permanente.

Com base nos dados do sistema elétrico e nas correntes harmônicas disponibilizadas pelo fabricante do retificador (Tabela 2), procede-se com a modelagem do sistema elétrico sob o ponto de vista do PAC em 23 kV.

Tabela 2 – Espectro Harmônico informado pelo fabricante do retificador.

Ordem	Espectro Harmônico Informado	
	(A)	(%)
1	883,00	100,00
2	0,00	0,00
3	0,00	0,00
4	0,00	0,00
5	167,80	19,00
6	0,00	0,00
7	114,80	13,00
8	0,00	0,00
9	0,00	0,00
10	0,00	0,00
11	61,80	7,00
12	0,00	0,00
13	48,60	5,50
14	0,00	0,00
15	0,00	0,00
16	0,00	0,00
17	39,70	4,50
18	0,00	0,00
19	35,30	4,00
20	0,00	0,00
21	0,00	0,00
22	0,00	0,00
23	26,50	3,00
24	0,00	0,00

Ordem	Espectro Harmônico Informado	
	(A)	(%)
25	22,10	2,50
26	0,00	0,00
27	0,00	0,00
28	0,00	0,00
29	17,70	2,00
30	0,00	0,00
31	13,20	1,49

Serão apresentados os valores das distorções totais e individuais de tensão, e os espectros harmônicos de corrente, visando verificar o atendimento aos limites recomendados pelo Prodist – Módulo 8. Gráficos de variação da impedância própria da barra com a frequência $z(w)$ serão apresentados para as barras de 23 kV e 380 V de modo a prever possíveis ressonâncias produzidas pelos bancos de capacitores/filtros existentes/novos e eliminá-las/mitigá-las caso existam. A Tabela 3 apresenta sucintamente os casos a serem estudados.

Tabela 3 – Identificação dos casos simulados.

Caso	Descrição
CASO BASE	Operação Atual – Sem Equipamentos De Compensação Reativa
CASO 01	Cenário Recomendado – Condição de Operação com Filtros Passivos Sintonizados na 5ª e 7ª Ordem

V. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

A. Caso Base: Operação Sem Equipamentos de Compensação

O Caso Base refere-se à condição operativa com a carga do transformador TR3 modelado como fonte de corrente (carga não linear) e a carga dos transformadores TR1 e TR2 modelado com uma carga linear, conforme apresentado na Figura 1.

A Tabela 4 apresenta os resultados do fluxo de carga e fluxo harmônico provenientes da simulação computacional para este caso. Na sequência, as figuras 2 e 3 mostram os gráficos obtidos para Distorção Total de Tensão e Impedância $Z(w)$ das barras do sistema.

Tabela 4 – Resultados do Fluxo de Carga nas barras de 23 kV e 380 V para o Caso BASE

Local	P (kW)	Q (kvar)	D (kvad)	S (kVA)	FP	Vff (V)	DHTv (%)	S/Sn (%)
PAC	672,40	464,48	144,17	829,85	0,810	23.002,79	1,56	-
TR1	86,61	64,94	0,87	108,25	0,800	372,91	1,47	48,11
TR2	86,61	64,94	0,89	108,25	0,800	374,73	1,51	36,08
TR3	494,41	294,00	182,18	603,38	0,819	372,71	10,26	60,34

Figura 2 – Distorção Harmônica Total de Tensão nas barras de 23 kV e 380 V, para o Caso Base.

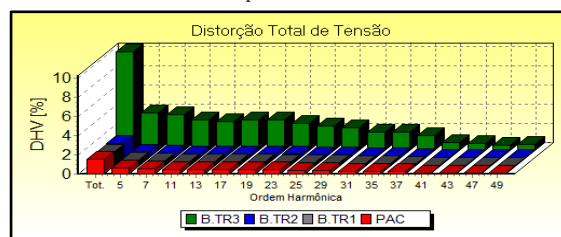
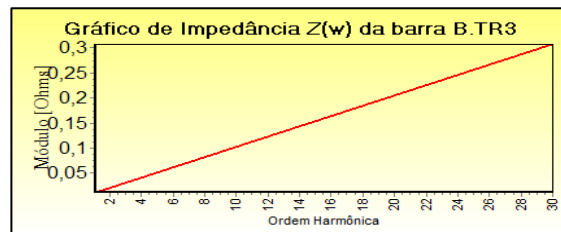
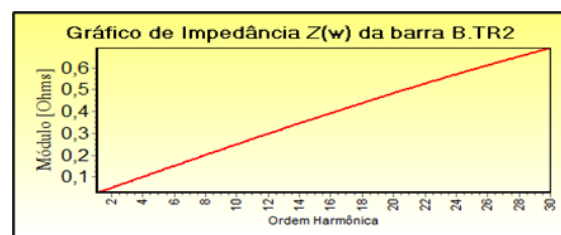
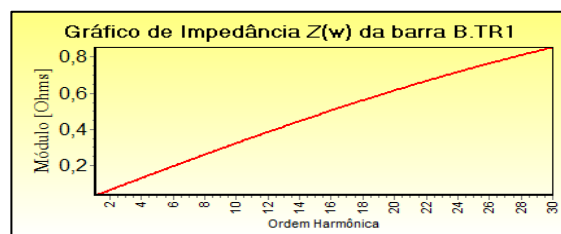
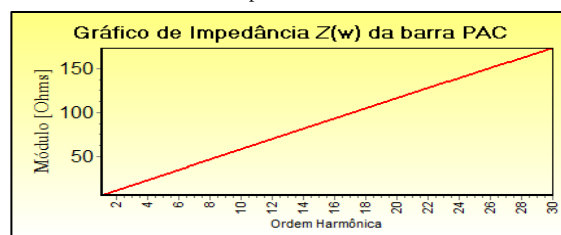


Figura 3 – Gráficos de Imp. Harmônica x Frequência nas barras de 23 kV e 380 V, para o Caso Base



Diante da Tabela 4, observa-se que os transformadores estão com carregamento dentro de suas capacidades nominais. De acordo com os resultados computacionais, a tensão no PAC atingiu 23,003kV, valor este que está ADEQUADO de acordo com o Prodist - Módulo 8 (0,95Vn a 1,05Vn). Olhando para os barramentos de baixa tensão, os valores de tensão encontrados estão ADEQUADOS de acordo com o Prodist – Módulo 8.

O fator de potência no PAC atinge aproximadamente 0,81 indutivo, ou seja, está FORA dos limites recomendados pela Resolução Normativa nº956/2021 da ANEEL. No secundário dos transformadores TR1, TR2 e TR3, o valor do fator de potência também se encontra FORA dos limites recomendados.

Segundo a Tabela 4 e a Figura 5, a distorção harmônica total de tensão (DHTv%) no PAC e nos secundários dos transformadores TR1 e TR2 se encontram DENTRO dos

limites recomendados pelo Prodist – Módulo 8. Apenas no barramento secundário do transformador TR3 a DHTv(%) está FORA, atingindo 10,26%.

Por fim, observa-se que as curvas de impedâncias encontradas para o PAC e para os barramentos de 380V (vide Figura 3) têm comportamento predominantemente indutivo, isto é, as impedâncias indutivas tendem a aumentar linearmente com a frequência devida à relação diretamente proporcional entre essas duas grandezas ($Z = 2\pi fL$). Não existem equipamentos de compensação reativa conectados neste caso. Logo, nenhuma das curvas de impedância encontradas apresentaram ressonâncias. Portanto, é possível concluir que torna-se essencial realizar a correção do fator de potência no PAC e mitigar os níveis de distorções harmônicas de tensão no secundário do TR3.

B. Caso 01: Condição de Operação Com Filtros Passivos Sintonizados na 5ª e 7ª Ordem

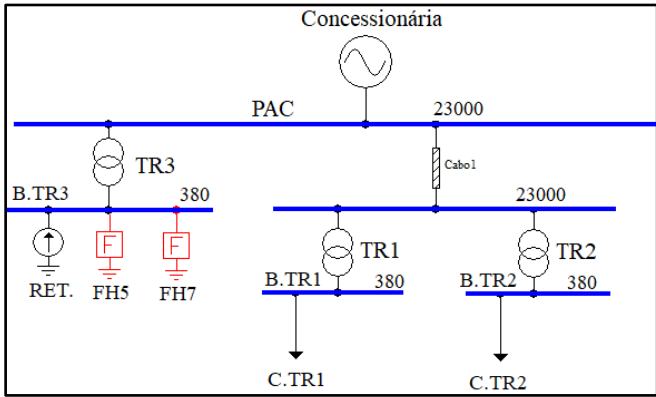
O Caso 01 refere-se às mesmas condições operativas do Caso BASE, considerando a instalação de dois filtros harmônicos com os dados citados na Tabela 5.

Tabela 5 – Potência e frequência de sintonia dos filtros harmônicos.

Local	Potência Efetiva (kvar)	Tensão Efetiva (V)	Frequência
Secundário do TR3	150	380	4,85 – 291,0Hz
Secundário do TR3	100	380	6,85 – 411,0Hz

A Figura 4 apresenta o unifilar geral para este caso.

Figura 4 – Diagrama Unifilar Geral para o Caso 01



A Tabela 6 apresenta os resultados do fluxo de carga e fluxo harmônico provenientes da simulação computacional para este caso. Na sequência, as figuras 5 e 6 mostram os gráficos obtidos para Distorção Total de Tensão e Impedância $Z(\omega)$ das barras do sistema no Caso 01 de simulação.

Tabela 6 – Resultados do Fluxo de Carga nas barras de 23kV e 380V para o Caso 01

Local	P (kW)	Q (kvar)	D (kvad)	S (kVA)	FP	Vff (V)	DHTv (%)	S/Sn (%)
PAC	672,29	211,31	46,44	706,24	0,952	23.000,74	0,80	-
TR1	86,59	64,94	0,45	108,24	0,800	372,88	0,74	48,11
TR2	86,59	64,94	0,47	108,24	0,800	374,70	0,77	36,08
TR3	495,59	58,97	56,96	502,33	0,987	377,04	5,22	50,23

Figura 5 – Distorção Harmônica Total de Tensão nas barras de 23 kV e 380 V, para o Caso 01.

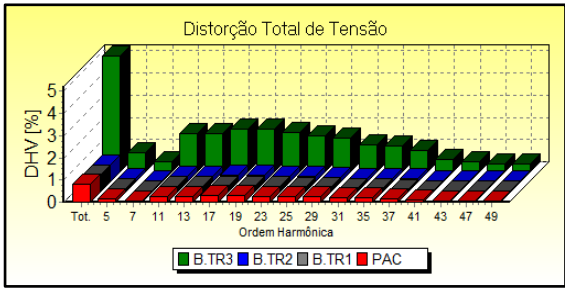
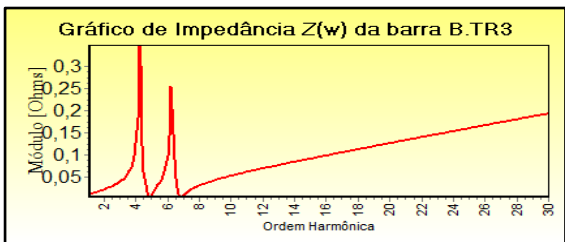
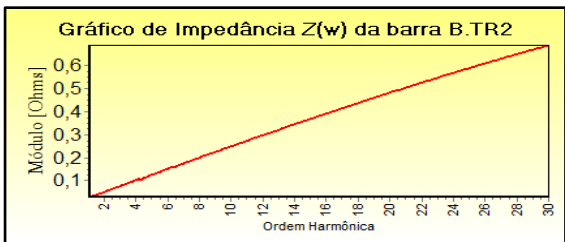
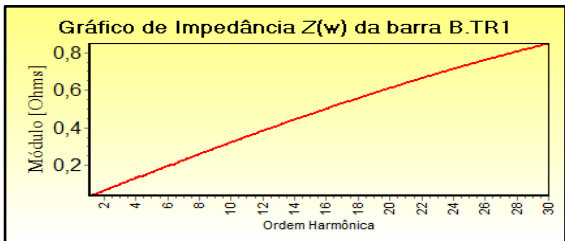
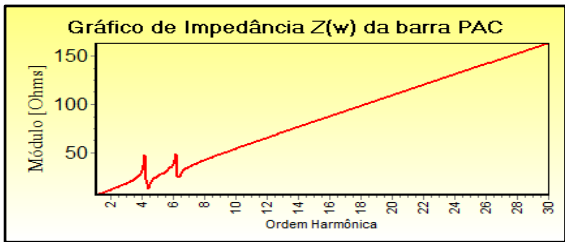


Figura 6 – Gráficos de Imp. Harmônica x Frequência nas barras de 23 kV e 380 V, para o Caso 01.



Diante da Tabela 6, observa-se o carregamento nos transformadores está dentro de suas capacidades nominais.

De acordo com os resultados computacionais, a tensão no PAC atingiu 23,007kV, valor este que está ADEQUADO de acordo com o PRODIST - Módulo 8 (0,95Vn a 1,05Vn). Olhando para os barramentos de 380V, a menor tensão atinge 372,88V no TR1, valor este que está ADEQUADO de acordo com o PRODIST - Módulo 8 (0,92Vn a 1,05Vn).

Em virtude da presença dos filtros harmônicos conectados no secundário do transformador TR3, o fator de potência no PAC atinge aproximadamente 0,952 indutivo, ou seja, está DENTRO dos limites recomendados pela Resolução Normativa nº956/2021 da ANEEL. No secundário dos transformadores TR1 e TR2, o valor do fator de potência

encontra-se FORA dos limites recomendados. Entretanto, ressalta-se que o fator de potência mais importante é no PAC, tendo em vista que este é o valor a ser analisado pela concessionária de energia para fins de regulamentação.

Segundo a Tabela 6 e a Figura 5, a distorção harmônica total de tensão (DHTv%) no PAC e nos secundários dos transformadores TR1 e TR2 se encontram DENTRO dos limites recomendado pelo Prodist – Módulo 8. Apenas no barramento secundário do transformador TR3 a DHTv(%) está ligeiramente fora, atingindo 5,22%.

Os gráficos da Figura 6 – Gráficos de Imp. Harmônica x Frequência nas barras de 23 kV e 380 V, para o Caso 01.Figura 6, revelam que a presença dos filtros no sistema causou picos de ressonância próximas à 4ª e 6ª na barra do transformador 3. Contudo essas harmônicas não são características do sistema, portanto as ressonâncias não preocupantes. Nas outras barras o comportamento da Curva $Z(\omega)$ manteve predominantemente indutivo.

Por fim, de acordo com os resultados das simulações computacionais, observa-se que os filtros passivos harmônicos de 5ª e 7ª ordem sugeridos corrigem o fator de potência no PAC e reduzem os níveis de distorções harmônicas de tensão e corrente no sistema elétrico.

VI. ANÁLISE TÉCNICA EM CAMPO

In loco, a equipe técnica da Bree realizou o comissionamento e *start-up* dos filtros harmônicos entre os dias 18/08/2024 a 19/08/2024 e foi identificado a proteção de distorção harmônica de corrente do estágio 01 do filtro de 5ª ordem atuou.

A equipe da Bree realizou um serviço de assistência técnica nos filtros no dia 31/08/2024 e foram feitos medições/testes realizados nos equipamentos e comparativos com os dados de fabricação. Será apresentado neste presente capítulo os resultados de medição de energia, aspectos termográficos e inconsistências encontradas em campo.

A. Capacitores

De acordo com os dados de projeto do equipamento, a capacitância nominal a ser aferida em 01 capacitor é de 442,097µF. A capacitância a ser medida pode chegar a valores entre **419,992 µF** e **486,307 µF**, conforme a norma ABNT NBR 5282/1998 [8].

A Tabela 8 apresenta as capacitâncias mensuradas nos capacitores.

Tabela 7 – Medições em campo e dados de fábrica dos capacitores.

Estágio	C (µF) Fases A-B	Erro	C (µF) Fases B-C	Erro	C (µF) Fases C-A	Erro
Estágio 01	446,0	0,88%	445,0	0,66%	445,0	0,66%
Estágio 02	446,0	0,88%	448,0	1,34%	446,0	0,88%
Estágio 03	442,0	-0,02%	443,0	0,20%	442,0	-0,02%
Estágio 04	442,0	-0,02%	439,0	-0,70%	440,0	-0,47%
Estágio 05	445,0	0,66%	445,0	0,66%	444,0	0,43%

Para o os capacitores dos filtros harmônicos, que possuem os mesmos dados nominais de 120kvar 600V (Ligação em

Delta), a capacitância dos capacitores em comparação com a capacitância nominal, atinge um erro máximo de 1,34% e -0,70%. Portanto, a capacitância dos capacitores está dentro da faixa de variação, conforme norma ABNT NBR 5282/1998 [8] (de -5% a +10%). Assim, em termos de capacitância, os capacitores estão aptos para o funcionamento.

Em geral, identificou-se também que o banco apresentou boas características de montagem e visual.

B. Medições de Harmônicos de Tensão e Corrente

A seguir, nas figuras 7 a 15 serão apresentados os resultados gráficos das medições de energia (tensão e corrente) realizadas nos estágios dos filtros harmônicos de 5ª e 7ª para cada cenário de medição identificado – itens a) e b).

a) Medição com Todos os Estágios Ligados

Figura 7 – Espectro Harmônico Típico do Estágio 01.

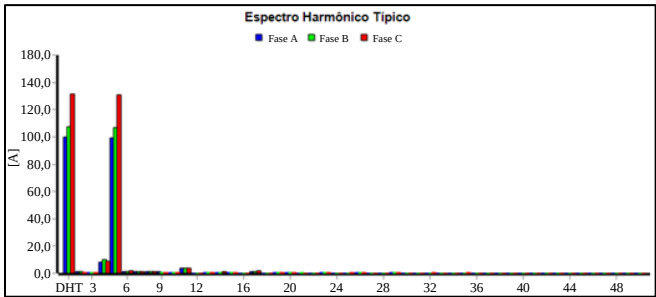


Figura 8 – Espectro Harmônico Típico do Estágio 02.

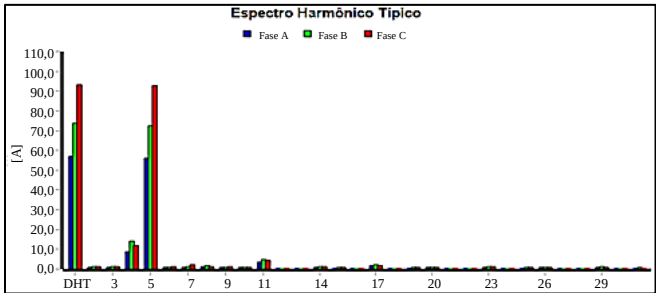


Figura 9 – Espectro Harmônico Típico do Estágio 03.

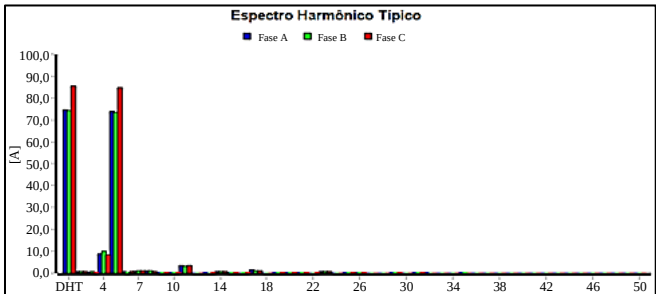


Figura 10 – Espectro Harmônico Típico do Estágio 04.

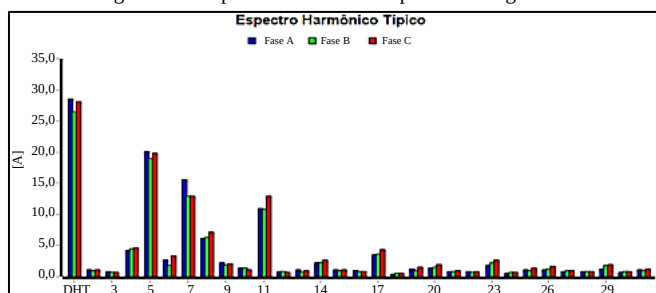
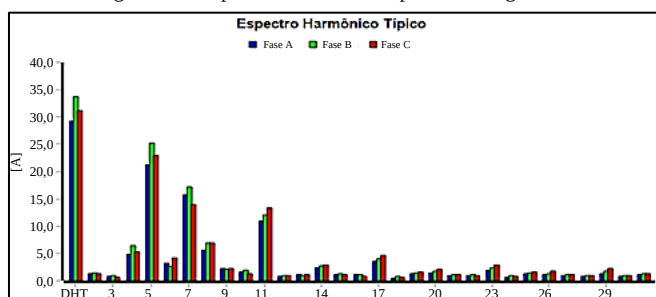


Figura 11 – Espectro Harmônico Típico do Estágio 05.



A Tabela 8 a seguir apresenta um resumo das principais grandezas mensuradas nos filtros harmônicos.

Tabela 8 – Principais grandezas mensuradas nos filtros harmônicos

Estágio	Fase	Corrente [A]	DHTi (%)	IhP95% de 5ª Ordem [A]	IhP95% de 7ª Ordem [A]
01	A	155,16	163,22	130,97	1,24
	B	134,78	134,90	108,81	1,06
	C	128,42	124,12	99,52	1,05
02	A	90,64	80,96	56,24	1,02
	B	114,1	85,16	72,64	1,43
	C	130,02	103,18	92,64	2,00
03	A	108,59	94,39	73,90	0,85
	B	106,91	97,00	73,62	1,26
	C	116,82	107,12	84,87	1,29
04	A	78,98	38,76	20,69	15,58
	B	72,09	39,38	19,80	12,96
	C	83,37	35,04	20,37	12,91
05	A	86,28	36,13	21,19	15,78
	B	96,68	37,31	25,61	17,16
	C	91,52	36,29	23,55	13,93

De acordo com as medições, observa-se que o estágio 01 apresentou uma maior drenagem de corrente harmônica de 5ª ordem. É possível notar também que os filtros de 7ª ordem apresentaram um conteúdo harmônico menor quando comparado com os de 5ª ordem.

b) Medição sem o Estágio 01

Figura 12 – Resultados das Medições de Energia no secundário do transformador TR3 – DHTi%.

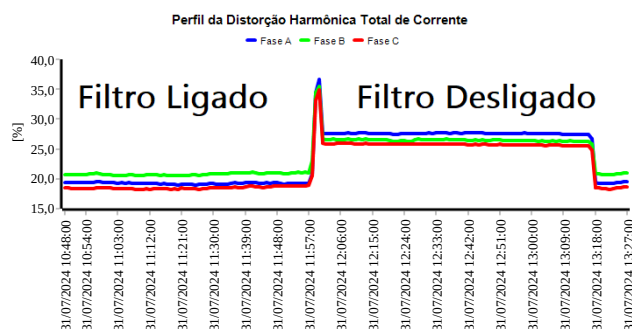


Figura 13 – Resultados das Medições de Energia no secundário do transformador TR3 – DHTv%.

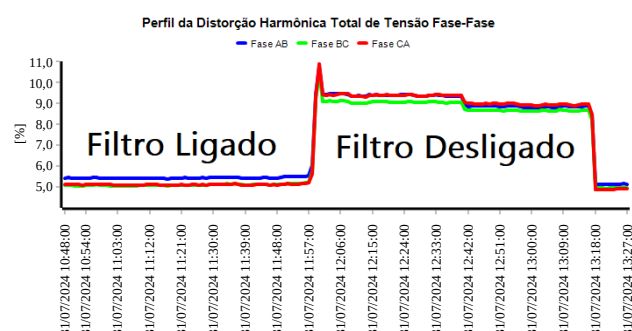
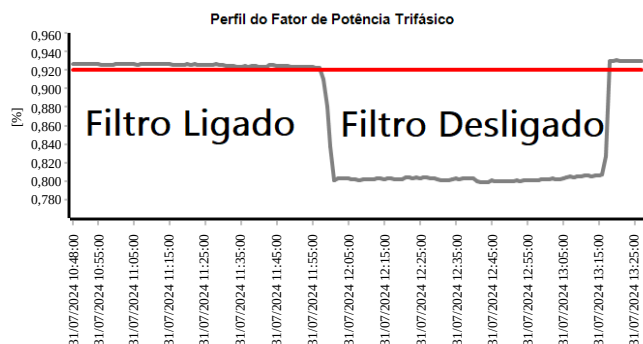
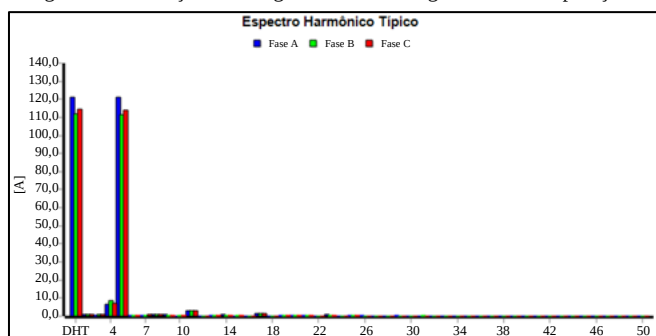


Figura 14 – Resultados das Medições de Energia no secundário do transformador TR3 – Fator de Potência.



De acordo com a medição no geral, observa-se que os filtros harmônicos de 5ª e 7ª ordens (sem o estágio 01 do filtro de 5ª ordem) corrige o fator de potência, reduz as distorções harmônicas de tensão e corrente e fornece um aumento de tensão no barramento. Tais efeitos citados seriam ainda mais eficazes se o estágio 01 estivesse ligado.

Figura 15 – Medição do Estágio 03 com o Estágio 01 fora de operação.



Na ausência do estágio 01, percebe-se que houve um aumento na corrente elétrica do estágio 03 e na distorção harmônica de corrente. Durante as medições, observou-se que houve uma oscilação na carga que, por sua vez, desencadeou em um desligamento pela proteção de distorção harmônica, conforme mostra a Figura 16.

Figura 16 – Registro fotográfico do desligamento dos filtros harmônicos pela proteção de distorção harmônica.



Assim, observa-se que o desligamento do filtro ocorre porque o mesmo está drenando mais corrente harmônica do que o projetado. O desligamento é essencial para que os reatores não sejam danificados. A seguir, será esclarecido o motivo do desligamento com as medições realizadas.

C. Comparativo de Harmônicos de Corrente Informados Versus Harmônicos de Corrente Real

De acordo com a medição realizada, podemos obter os resultados de harmônicos conforme mostra a Tabela 9.

Tabela 9 – Espectro Harmônico informado pelo fabricante do retificador.

Ordem	Espectro Harmônico Informado		Espectro Harmônico Mensurado	
	(A)	(%)	(A)	(%)
1	883,00	100,00	1299,30	100,00
2	0,00	0,00	48,66	3,75
3	0,00	0,00	19,44	1,50
4	0,00	0,00	18,57	1,43
5	167,80	19,00	302,78	23,30
6	0,00	0,00	4,69	0,36
7	114,80	13,00	27,64	2,13
8	0,00	0,00	20,51	1,58
9	0,00	0,00	8,26	0,64
10	0,00	0,00	10,54	0,81
11	61,80	7,00	62,53	4,81
12	0,00	0,00	5,22	0,40
13	48,60	5,50	32,80	2,52
14	0,00	0,00	13,33	1,03
15	0,00	0,00	5,61	0,43
16	0,00	0,00	10,10	0,78
17	39,70	4,50	28,35	2,18
18	0,00	0,00	5,61	0,43
19	35,30	4,00	18,07	1,39
20	0,00	0,00	8,67	0,67
21	0,00	0,00	5,06	0,39
22	0,00	0,00	7,75	0,60
23	26,50	3,00	11,05	0,85
24	0,00	0,00	5,02	0,39
25	22,10	2,50	10,83	0,83
26	0,00	0,00	5,47	0,42
27	0,00	0,00	4,79	0,37
28	0,00	0,00	5,73	0,44
29	17,70	2,00	6,93	0,53
30	0,00	0,00	4,37	0,34
31	13,20	1,49	5,90	0,45

Portanto, de acordo com os dados apresentados na Tabela 9, pode-se concluir que o espectro harmônico informado é menor que o espectro harmônico medido em campo, principalmente a 5ª ordem harmônica que está 80% maior, e assim, com um maior conteúdo harmônico de 5ª ordem, maior é a drenagem harmônica dos estágios de 5ª ordem, ocasionando sobrecarga harmônica. Ressaltamos que os filtros harmônicos foram projetados para suportar o espectro harmônico informado pelo fabricante do retificador.

D. Inspeção Térmica

Por fim, foi feita uma análise térmica filtros harmônicos, considerando o estágio 01 DESLIGADO. Os demais estágios permaneceram pela parte da manhã e atuou a proteção de distorção harmônica próximo ao meio-dia. No entanto, foi possível realizar uma termografia para obter a temperatura dos componentes dos filtros harmônicos. Os parâmetros de emissividade foram definidos de acordo com a Tabela 10. Os resultados das termografias estão apresentados nas Figuras 17 e 18 e na Tabela 11. Ressalta-se que a temperatura ambiente registrada foi de, aproximadamente, 20,8°C.

Tabela 10 – Parâmetros definidos na câmera térmica.

Emissividade	0,85
Temperatura Refletida	20,0 °C
Distância	0,3 m
Temperatura Ambiente	25 °C
Humidade Relativa	50,0%

Figura 17 – Imagem térmica nos reatores dos filtros harmônicos passivos de 5ª ordem.



Figura 18 – Imagem térmica nos reatores dos filtros harmônicos passivos de 7ª ordem.



Tabela 11 – Temperaturas máximas obtidas nos estágios dos filtros harmônicos.

Equipamento	Temperatura Máxima Registrada (°C)	
	Filtro de 5ª ordem	Filtro de 7ª ordem
Reator - Fase A	105,0	54,3
Reator - Fase B	106,0	57,8
Reator - Fase C	99,8	52,8
Capacitores	51,8	39,4
Conexões	40,0	~40,0

De acordo com as termografias realizadas, observa-se que, na ausência do estágio 01, os filtros de 5ª ordem apresentaram temperaturas maiores quando comparado com os filtros de 7ª ordem. Isto se dá por conta que o estágio 01

está desligado, indicando que os estágios 02 e 03 não possuem capacidade para filtrar todo o conteúdo harmônico do sistema elétrico deste presente estudo, na ausência do estágio 01.

VII. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou os resultados das simulações computacionais do sistema elétrico de uma indústria brasileira.

De acordo com as simulações computacionais, observa-se que houve uma necessidade de realizar a correção do fator de potência e mitigar as distorções harmônicas de tensão e de corrente. Para isto, sugeriu-se utilizar dois (02) filtros harmônicos passivos simples de 5ª e de 7ª ordem. Portanto, de acordo com os dados elétricos e o espectro harmônico do retificador informado, os filtros sugeridos se mostraram eficazes, promovendo uma boa folga de reativos e reduzindo os níveis de DHTv% e DHTi%.

Durante o serviço de assistência técnica, identificou-se que havia um maior conteúdo harmônico drenado nos estágios dos filtros harmônicos de 5ª ordem, tendo em vista que o retificador gera mais harmônicos do que o informado pelo fabricante. Tal fato resultou em um desarme dos filtros por aumento de DHTi% drenado e em aumento de temperatura nos reatores.

Outra solução seriam filtros ativos e filtros harmônicos passivos amortecidos. Porém não foram utilizados, uma vez que valor agregado mais elevado, inviabilizando a continuidade do projeto.

Portanto, conclui-se que, para fabricantes de filtros passivos, caso não seja possível realizar uma medição de qualidade da energia no sistema elétrico, o espectro harmônico da carga não-linear deve estar com aderência à realidade, tendo em vista que o projeto de filtros harmônicos exige o conhecimento do fluxo harmônico do sistema elétrico.

REFERÊNCIAS

- [1] Campos A., Joss G., Ziogas P. e Lindsay J. (1992). Analysis and design of a series voltage compensator for three-phase unbalanced sources. IEEE Transactions on Industrial Electronics, pp. 159-167, vol. 39. doi: 10.1109/41.166737.
- [2] GARCIA, F. R, “Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência”, IESA/Capacitores Inepar.
- [3] Deckmann, S.M. e Pomilio, J.A. (2017). Avaliação da qualidade da energia elétrica. 15 p. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. UNICAMP.
- [4] IEEE 519, “IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems”, 2014.”
- [5] PRODIST “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional”, 2018.
- [6] P, Almeida, “Correção do Fator de Potência e Filtragem Harmônica Passiva Em Baixa Tensão: Estudo de Caso”, CBQEE 2019
- [7] PRODIST – Módulo 8 – Qualidade do Fornecimento da Energia Elétrica, Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), revisão vigente
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - NBR 5282:1998 - Capacitores de potência em derivação para sistema de tensão nominal acima de 1 000 V. Rio de Janeiro, 1998.