

ESTUDO DE UTILIZAÇÃO DE FILTROS PASSIVOS DE HARMÔNICAS EM SISTEMAS DE EXTRA BAIXA E BAIXA TENSÃO

Marconi Januário*
William Leonard Scarpim**

Resumo

O presente trabalho aborda estudos de implantação de filtros passivos de harmônicas, com topologia RLC série, em cargas não lineares de dois sistemas distintos. Para cada sistema são projetados filtros sintonizados em diferentes frequências, visando atenuar os níveis de distorção harmônicas de acordo com os limites estabelecidos por norma nacional e recomendação internacional. O primeiro sistema estudado é uma carga fixa de um retificador monofásico de onda completa, de baixa potência, alimentado em extra baixa tensão. Neste sistema é possível verificar que, em razão da potência da carga ser baixa, os níveis de harmônicas de corrente são próximos aos níveis da componente fundamental. Isso resulta em uma maior quantidade de filtros para que a distorção harmônica de corrente do sistema seja atenuada aos níveis tabelados na recomendação. O segundo sistema estudado possui uma carga fixa de um retificador trifásico de onda completa (Ponte de Graetz), de potência na ordem de dezenas de quilo Watts, alimentada em baixa tensão. Os filtros projetados para os sistemas são simulados por meio do programa Matlab/Simulink. Com os resultados obtidos pelas simulações são verificados os níveis de harmônicas, a distorção harmônica total (tensão e corrente) do sistema e a demanda no PCC (Ponto de Conexão de Carga).

Palavras-chave: Harmônicas. Filtros passivos. Cargas não lineares. Qualidade de energia.

1 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico brasileiro possui frequência fundamental normalizada com tensão senoidal em 60 Hz. Ao conectar uma carga linear no Ponto de Conexão de Carga (PCC), as formas de onda de tensão e corrente apresentam um formato senoidal puro. Ao conectar uma carga não linear no PCC, isto é, um dispositivo onde a tensão não é proporcional à corrente que por ele circula, a corrente e a tensão apresentarão formas de onda resultantes diferentes de uma senoidal pura. Nas formas de onda resultantes estarão presentes ondas senoidais com frequência fundamental (60 Hz) e suas múltiplas, denominadas harmônicas. A deformação no sinal resultante ocorre porque o sinal em frequência fundamental é somado vetorialmente com as demais harmônicas (LATHI, 2007).

A presença de harmônicas em uma instalação pode resultar em alguns problemas, como o aquecimento excessivo de condutores, aumento de perdas em transformadores, disparo anormal de disjuntores e chaves, diminuição da vida útil de equipamentos, ressonância em bancos capa-

* Doutorando e Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina; Professor na Universidade do Oeste de Santa Catarina; marconi.januario@unoesc.edu.br

** Graduando em Engenharia Elétrica na Universidade do Oeste de Santa Catarina; williamscarpim@gmail.com

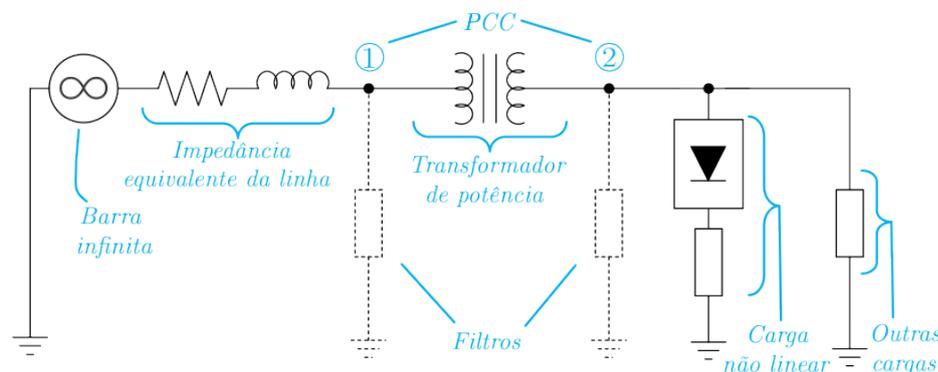
citivos, redução no rendimento de motores, valores incorretos apresentados pelos instrumentos de medição, entre outros (KASSICK, 2008). Dessa forma, é imprescindível estudar o comportamento das harmônicas e projetar filtros para as instalações, tendo como objetivo a redução ou eliminação das componentes harmônicas, aumentando, assim, a qualidade da energia elétrica disponibilizada no PCC.

Segundo Herman e Publishers (2004), cada harmônica possui um nome e frequência. O nome diz respeito à ordem da harmônica e está relacionado com uma frequência. Por exemplo, a segunda harmônica opera a 120 Hz (duas vezes a frequência fundamental), a terceira em 180 Hz (três vezes a frequência fundamental), a quarta em 240 Hz (quatro vezes a frequência fundamental) e assim por diante.

2 FILTROS PASSIVOS

Os filtros passivos são utilizados para realizar a atenuação de níveis harmônicos. Tais filtros geralmente são instalados paralelos às cargas. O PCC pode ser, por exemplo, uma barra de alta tensão existente em um sistema de transmissão de energia elétrica. O PCC também pode ser o barramento primário ou secundário de um transformador de potência que alimenta as cargas, como é apresentado no diagrama unifilar do Esquema 1, respectivamente pelos números 1 e 2.

Esquema 1 – Locais práticos de instalação de filtros de harmônicas



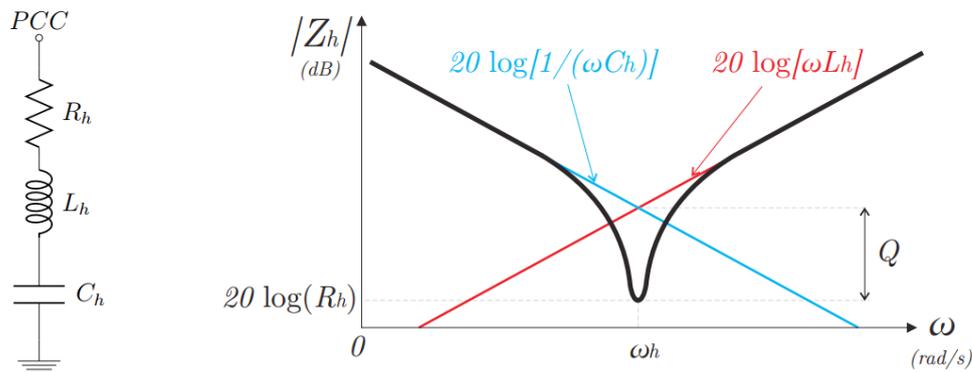
Fonte: adaptado de Phipps (1997).

Conforme Dugan et al. (2002) e Kassick (2008), os filtros passivos são constituídos por resistências, indutâncias e capacitâncias de diferentes topologias, por exemplo RLC série e RLC amortecido. Cada filtro é projetado individualmente e sintonizado em uma determinada frequência com o objetivo de atenuar certa quantidade de nível harmônico.

A topologia mais utilizada em projeto de filtros passivos é a RLC série, apresentada no Esquema 2 (a), por ser um modelo simples e de baixo custo. A característica desse tipo de filtro consiste em criar um caminho de baixa impedância para reter as componentes harmônicas de corrente, impedindo que sejam injetadas no sistema (DUGAN et al., 2002). O filtro também pode ser utilizado para correção do fator de deslocamento do sistema (KASSICK, 2008). O Esquema 2 (b) exhibe o comportamento do módulo da impedância Z_h de um filtro em razão da frequência angular w . Onde h é a ordem da harmônica atenuada, w_h é a frequência de ressonância

do filtro ou frequência da harmônica h , e Q é o fator de qualidade do filtro. De acordo com Irwin (2000), quando a frequência angular é menor do que a frequência de ressonância, isto é, $\omega < \omega_h$, a impedância do filtro possui uma característica capacitiva. A ressonância ocorre quando a frequência angular for igual a frequência de ressonância ($\omega = \omega_h$). Na frequência angular ω_h , a impedância do filtro possui apenas parcela real em virtude da resistência R_h , e a parcela imaginária da impedância do filtro é nula em decorrência da soma das reatâncias indutiva e capacitiva. Nesta frequência, o ramo RLC é percorrido com sua corrente máxima. Quando a frequência angular é maior do que a frequência de ressonância ($\omega > \omega_h$), o filtro possui impedância com característica indutiva.

Esquema 2 – Filtro passivo de segunda ordem RLC série



(a) Circuito

(b) Característica da impedância

Fonte: adaptado de Phipps (1997).

Para calcular os componentes R_h , L_h e C_h , e de cada filtro, utilizam-se, respectivamente, as Equações (1), (2) e (3). Onde, $I_{h_{ef}}$ é a corrente eficaz da harmônica de ordem h , K_h é o limite por unidade (em pu) adotado para a nova amplitude da corrente harmônica $I_{h_{ef}}$, R_s e L_s são, respectivamente, a resistência e a indutância interna da fonte de alimentação (KASSIC, 2008). Os valores calculados servem como um ponto de partida e podem ser reprojatados para valores comerciais, conforme necessidade.

$$R_h = \frac{K_h I_{1_{ef}}}{(I_{h_{ef}}^2 - K_h^2 I_{1_{ef}}^2)} \left[R_s K_h I_{1_{ef}} + \sqrt{(R_s I_{h_{ef}})^2 + (h\omega L_s)^2 (I_{h_{ef}}^2 - K_h^2 I_{1_{ef}}^2)} \right] \quad (1)$$

$$L_h = \frac{R_h Q}{h\omega} \quad (2)$$

$$C_h = \frac{1}{h^2 \omega^2 L_h} \quad (3)$$

3 NORMAS E RECOMENDAÇÕES

A recomendação IEEE 519 (1992) estabelece para plantas industriais típicas os limites percentuais para qualquer componente harmônico de corrente. Os limites percentuais são base-

ados em relação à corrente fundamental. Na Tabela 1, constam os limites de distorção harmônica de corrente no PCC, denominados de $K_{h\ max}$. Onde, h é a ordem harmônica analisada e $THDi$ é o total de distorção harmônica de corrente. Para determinar os limites $K_{h\ max}$ de um sistema em estudo, deve-se utilizar o fator I_{sc}/I_1 . Onde, I_{sc} é a corrente de curto-circuito no PCC e I_1 é a corrente eficaz em frequência fundamental. A recomendação IEEE 519 (1992) estabelece o limite de 3% de THD_v (total de distorção harmônica de tensão) para aplicações especiais, como hospitais e aeroportos, 5% para sistemas comuns, e 10% para sistemas dedicados, exclusivos para alimentação de conversores estáticos.

Tabela 1 – Limites $K_{h\ max}$ para correntes harmônicas de ordem ímpar, em porcentagem da corrente fundamental

I_{sc}/I_1	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	THD_i
< 20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
$20 \leq I_{sc}/I_1 < 50$	7	3,5	2,5	1	0,5	8
$50 \leq I_{sc}/I_1 < 100$	10	4,5	4	1,5	0,7	12
$100 \leq I_{sc}/I_1 < 1000$	12	5,5	5	2	1	15
≥ 1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Fonte: IEEE 519 (1992).

A resolução normativa n. 469, de 2011 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aprova a revisão 4 do módulo 8 do Prodlist (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), relacionado à qualidade de energia elétrica. No módulo 8, não há informações sobre o limite dos níveis de correntes harmônicas, apenas de tensão. Os limites de referência para as distorções harmônicas totais de tensão (THD_v) são apresentados na Tabela 2. Os limites são estipulados por meio da tensão nominal do barramento, denominada V_n . Os limites de distorção de tensão para cada ordem harmônica normalizada pelo Prodlist são mostrados na Tabela 3.

Tabela 2 – Valores de referência das distorções harmônicas totais de tensão

Tensão nominal do barramento	Distorção harmônica total de tensão THD_v (%)
$V_n \leq 1$ kV	10
1 kV $< V_n \leq 13,8$ kV	8
$13,8$ kV $< V_n \leq 69$ kV	6
69 kV $< V_n \leq 230$ kV	3

Fonte: Aneel – Prodlist Módulo 8 (2011).

Tabela 3 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão

Ordem harmônica	Distorção harmônica individual de tensão (% da fundamental)				
	$V_N \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_N \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_N \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_N \leq 230 \text{ kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	>25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

Fonte: Aneel – Prodist Módulo 8 (2011).

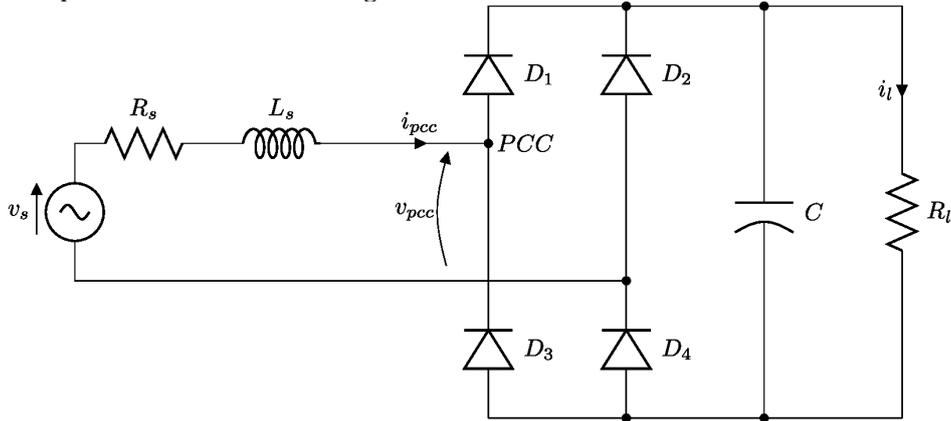
4 ESTUDO EM EXTRA BAIXA TENSÃO

4.1 CIRCUITO ESTUDADO

Os sistemas em extra baixa tensão com carga não linear são comumente encontrados em equipamentos eletrônicos (RASHID, 1999). Neste estudo, foi utilizado como experimento um retificador monofásico de onda completa com carga fixa, de baixa potência. O retificador foi montado e alimentado, e as formas de onda foram medidas por meio de instrumento que disponibilizou os espectros de frequência das harmônicas de tensão e corrente.

O Esquema 3 exibe o circuito do retificador de onda completa a diodos, o qual alimenta uma carga resistiva R_L . A resistência R_s e a indutância L_s são componentes internas da fonte de alimentação v_s . A fonte v_s é o secundário de um transformador 220/14 V. Os valores de R_s e L_s foram obtidos realizando um ensaio de curto circuito no transformador e estão mostrados na Tabela 4, assim como os demais componentes. O capacitor C , presente na saída do retificador, é encarregado de filtrar as ondulações em baixa frequência.

Esquema 3 – Circuito com carga não linear utilizado



Fonte: os autores.

Tabela 4 – Valores dos componentes utilizados no circuito de carga não linear

Componente	Valor
v_s	14 Vrms
f	60 Hz
R_s	0,1424 Ω
L_s	40,297 μ H (60 Hz)
D_1, D_2, D_3 e D_4	1N5406: $R_d = 0,166 \Omega$; $V_d = 0,55$ V
C	4700 μ F
R_l	8,5 Ω

Fonte: os autores.

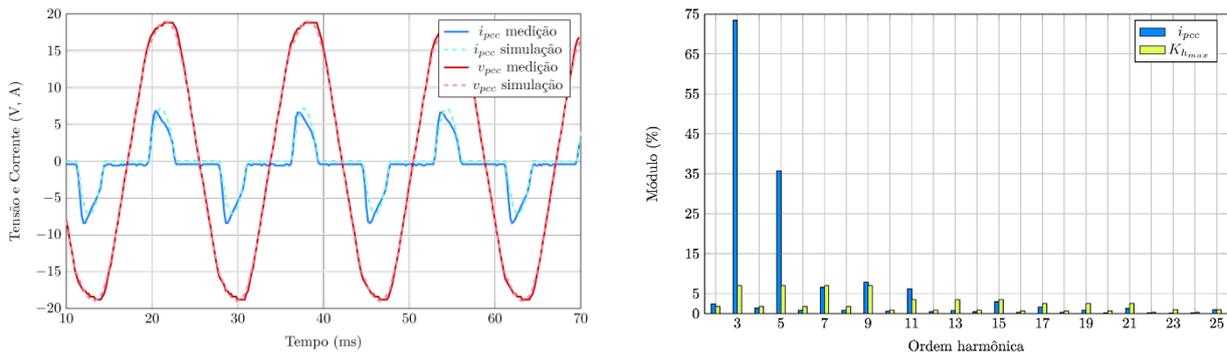
Por meio de dados reais, de componentes utilizados no experimento, foram realizadas simulações deste sistema. As formas de onda e os espectros de frequência obtidos na simulação foram comparados com os experimentais. Após montagem do experimento e simulação, os filtros foram projetados para atenuar os níveis harmônicos excedentes.

4.2 COMPORTAMENTO DO CIRCUITO ANTES E APÓS A INCLUSÃO DOS FILTROS

As formas de onda experimental e simulada da tensão, v_{pcc} , e da corrente, i_{pcc} , no PCC do sistema em estudo (Esquema 3) são apresentadas no Gráfico 1 (a). Os valores de pico das formas de onda experimental de tensão e de corrente são, respectivamente, 18,8 V e 6,8 A. Na simulação os valores de pico são de 18,95 V e 7,14 A. Uma diferença próxima a 1% para a tensão e de 5% para a corrente, o que valida a simulação.

Os níveis individuais das componentes harmônicas de tensão do sistema são inferiores aos limites estipulados na Tabela 3. Porém, alguns níveis das harmônicas de corrente estão acima dos limites recomendados. No Gráfico 1 (b) é exibido o módulo do espectro de frequências da corrente simulada no PCC, com os limites K_{hmax} recomendados ao sistema. Os limites K_{hmax} foram obtidos por meio da Tabela 1, em que primeiramente, foi calculado o fator I_{sc}/I_l por meio da Equação (4) e pelos valores mostrados na Tabela 4. O valor de $I_{l\ ef}$ utilizado foi de 2,547 A.

Gráfico 1 – Comparação das formas de onda de tensão (v_{pcc}) e da corrente (i_{pcc}) no PCC, e o espectro de amplitudes de i_{pcc} simulada com os limites K_{hmax} recomendados para o sistema



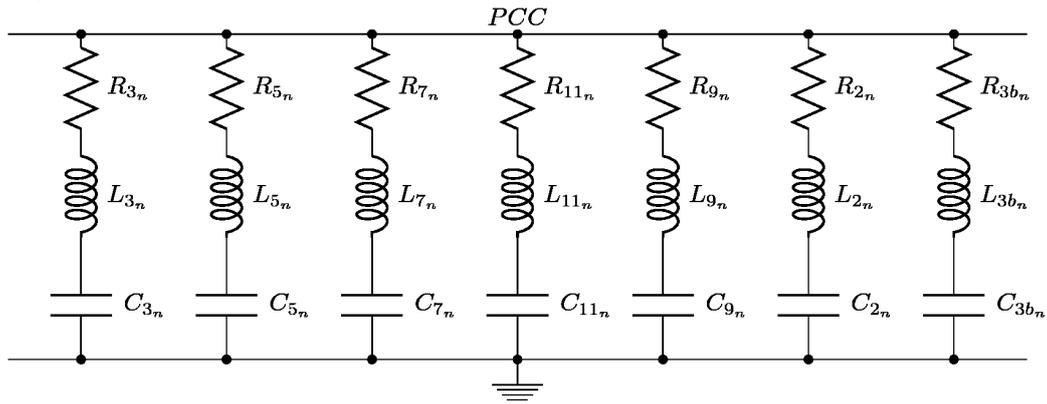
(a) Comparação da tensão e da corrente no PCC, sem filtros (b) Espectro do módulo de i_{pcc} em porcentagem do componente fundamental, e limites K_{hmax}

Fonte: os autores.

$$\frac{I_{sc}}{I_1} = \frac{\left(\frac{v_s}{\sqrt{R_s^2 + (2\pi f L_s)^2}} \right)}{I_{1ef}} = 38,38 \quad (4)$$

Após a comparação mostrada no Gráfico 1, os filtros são projetados para as correntes harmônicas que possuem amplitudes excedentes aos limites estipulados pela recomendação, baseando-se no espectro de frequência do sistema simulado. O primeiro filtro projetado foi o de 3ª harmônica. Depois, foram projetados, em sequência, o de 5ª, 7ª, 11ª, 9ª, 2ª, e o segundo filtro de 3ª, denominado 3bª. Todos os filtros foram conectados em paralelo, conforme exibido no Esquema 4. Os valores dos componentes utilizados em cada filtro são apresentados na Tabela 5. Onde, h é a ordem harmônica filtrada, K_{hmax} é o limite recomendado pela IEEE 519 (1992), K_h é o limite adotado para atenuação, Q é o fator de qualidade utilizado para calcular os valores iniciais dos componentes R_h , L_h , e C_h . Os termos K_{hn} , R_{hn} , L_{hn} , C_{hn} , e Q_n são os valores dos componentes reprojeto. O reprojeto foi realizado para que o filtro consuma pouca corrente na frequência fundamental. Os valores são mostrados na Tabela 5 em razão da sequência adotada durante o projeto. Os valores de K_{hn} não são iguais aos de K_h em virtude do reprojeto, que alterou os valores dos componentes de cada filtro. Os altos valores utilizados em Q_n serviram para realizar a simulação, porém, experimentalmente, tais valores podem dificultar a sintonia do filtro.

Esquema 4 – Circuito dos filtros instalados no PCC



Fonte: os autores.

Tabela 5 – Valores calculados para os filtros projetados

Ordem h	K_{hmax} (%) IEEE 519	K_h (%)	R_h (m Ω)	L_h (μ H)	C_h (μ F)	Q	K_{hn} (%)	R_{hn} (m Ω)	L_{hn} (mH)	C_{hn} (μ F)	Q_n
3	7,0	6,0	13,25	585,97	1334,19	50	0,49	1,0	5,21	150	5894,63
5	7,0	3,0	14,60	387,17	726,93	50	0,87	4,0	4,02	70	1894,70
7	7,0	1,0	16,88	319,88	448,91	50	0,61	10,0	2,39	60	631,57
11	3,5	0,5	20,53	247,59	234,86	50	0,10	4,0	3,88	15	4019,06
9	7,0	1,0	46,60	686,66	126,51	50	1,06	50,0	9,65	9	654,96
2	1,75	0,2	16,51	1094,70	35,34	50	0,50	50,0	51,74	34	780,17
3b	7,0	1,0	35,68	1577,28	495,66	50	1,30	50,0	31,27	25	707,36

Fonte: os autores.

Na Tabela 6, é exibido os módulos das harmônicas de correntes em porcentagem em relação a corrente fundamental de i_{pcc} e na Tabela 7 são mostrados os valores da corrente eficaz no PCC, $i_{pcc e P}$ e os valores das distorções harmônicas totais de tensão e corrente, respectivamente, THD_i e THD_v . Os dados da Tabela 6 e 7 estão apresentados conforme os filtros reprojados e foram conectados ao PCC do circuito de simulação, seguindo a ordem apresentada no Esquema 4. Nas Tabelas, são destacados com a cor vermelha os valores que estão acima dos limites recomendados e na cor verde os valores que sofreram atenuação e ficaram abaixo dos limites após a inclusão dos filtros.

Analisando os resultados da Tabela 6 percebe-se que ao longo da inserção dos filtros, as componentes harmônicas que possuíam módulo superior ao limite recomendado foram atenuadas e seus valores (destacado pela cor verde) ficaram abaixo dos limites K_{hmax} .

Na Tabela 7, percebe-se um pequeno aumento na corrente $i_{pcc e P}$ que passou de 3,18 A para 3,44 A. O valor da THD_i diminuiu de 82,67% para 7,73%, ficando abaixo do limite de 8%. A THD_v , antes da inserção dos filtros, possuía um valor de 2,41%, com a inserção dos filtros, o valor foi alterado para 0,45%. Em ambos os casos, os valores de THD_v são inferiores aos limites estabelecidos pelo Prodist 08 e IEEE 519, respectivamente, 10% e 5%.

Tabela 6 – Módulo das harmônicas de i_{pcc} conforme os filtros são conectados no PCC da simulação

Ordem h	K_{hmax} (%) IEEE 519	Módulo (%) sem filtros	Módulo (%) após conectar o filtro sintonizado na harmônica de ordem						
			3	5	7	11	9	2	3b
0	-	2,832	2,684	2,557	2,408	2,389	2,385	2,457	2,385
1	-	100	100	100	100	100	100	100	100
2	1,75	2,384	2,242	2,121	2,007	1,973	1,963	0,732	0,712
3	7,00	73,420	6,722	6,272	5,824	5,434	5,376	5,143	4,511
4	1,75	1,329	1,304	1,233	1,197	1,159	1,146	1,178	1,141
5	7,00	35,747	35,850	6,679	5,925	3,379	3,140	2,986	2,900
6	1,75	0,790	0,730	0,618	0,659	0,649	0,650	0,652	0,636
7	7,00	6,527	8,907	11,354	2,384	1,159	1,036	0,979	0,954
8	1,75	0,850	0,794	0,707	0,639	0,623	0,637	0,599	0,587
9	7,00	7,856	6,317	4,733	4,553	5,015	2,390	2,259	2,192
10	0,88	0,550	0,526	0,466	0,469	0,457	0,471	0,432	0,428
11	3,50	6,200	6,648	6,308	5,686	2,519	2,403	2,269	2,206
12	0,88	0,482	0,449	0,398	0,409	0,370	0,382	0,355	0,355
13	3,50	0,730	1,743	2,597	2,518	2,883	3,003	2,872	2,806
14	0,88	0,421	0,395	0,341	0,364	0,337	0,351	0,315	0,323
15	3,50	2,918	2,448	1,772	1,634	1,545	1,525	1,471	1,433
16	0,63	0,291	0,273	0,239	0,264	0,241	0,253	0,227	0,236
17	2,50	1,591	2,287	2,371	2,180	2,167	2,202	2,116	2,067
18	0,63	0,289	0,260	0,229	0,250	0,234	0,243	0,224	0,228
19	2,50	0,776	0,168	0,762	0,805	0,913	0,941	0,917	0,902
20	0,63	0,243	0,210	0,187	0,190	0,178	0,184	0,169	0,169
21	2,50	1,255	1,273	0,924	0,788	0,765	0,766	0,732	0,705
22	0,25	0,230	0,195	0,183	0,173	0,166	0,167	0,153	0,151
23	1,00	0,121	0,766	1,011	0,924	0,953	0,983	0,941	0,918
24	0,25	0,231	0,194	0,185	0,162	0,163	0,156	0,151	0,140
25	1,00	0,953	0,413	0,100	0,163	0,243	0,270	0,263	0,262

Fonte: os autores.

Tabela 7 – Comparação dos resultados finais de distorção harmônica

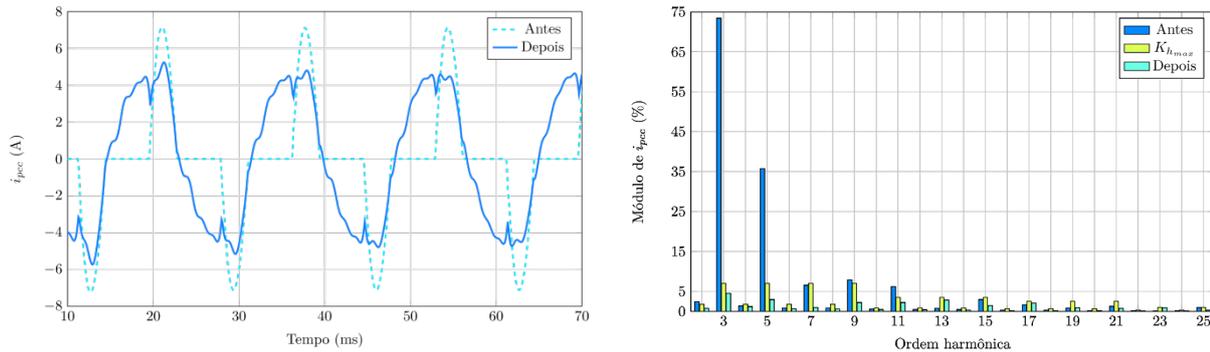
	Limites do PRODIST 08	Limites da IEEE 519	Sem filtros	Após conectar o filtro sintonizado na harmônica de ordem						
				3	5	7	11	9	2	3b
$i_{pcc\ ef}$ (A)	-	-	3,18	2,91	2,95	3,11	3,16	3,19	3,34	3,44
THD_i (%)	-	8	82,67	39,01	17,39	12,32	9,97	8,82	8,25	7,73
THD_v (%)	10	5	2,41	1,36	0,76	0,61	0,51	0,46	0,46	0,45

Fonte: os autores.

No Gráfico 2 (a), são mostradas as formas de onda sem filtros (antes) e com todos os filtros inseridos no sistema simulado (depois). Percebe-se que a forma de onda de corrente obtida com todos os filtros inseridos tende a uma característica senoidal. Este fato mostra a eficácia da filtragem. No Gráfico 2 (b) são apresentados os módulos dos espectros de frequência das formas de onda do Gráfico 2 (a) e os módulos limites K_{hmax} . Os módulos do espectro de amplitudes do Esquema 6 (b) podem ser

obtidos pela Tabela 6. Nota-se que após a aplicação dos filtros, os módulos (depois) são menores que os de K_{hmax} .

Gráfico 2 – Comparação da corrente simulada no PCC após a inserção dos filtros



(a) Corrente no PCC (i_{pcc})

(b) Espectro do módulo da corrente, i_{pcc} , em porcentagem da componente fundamental

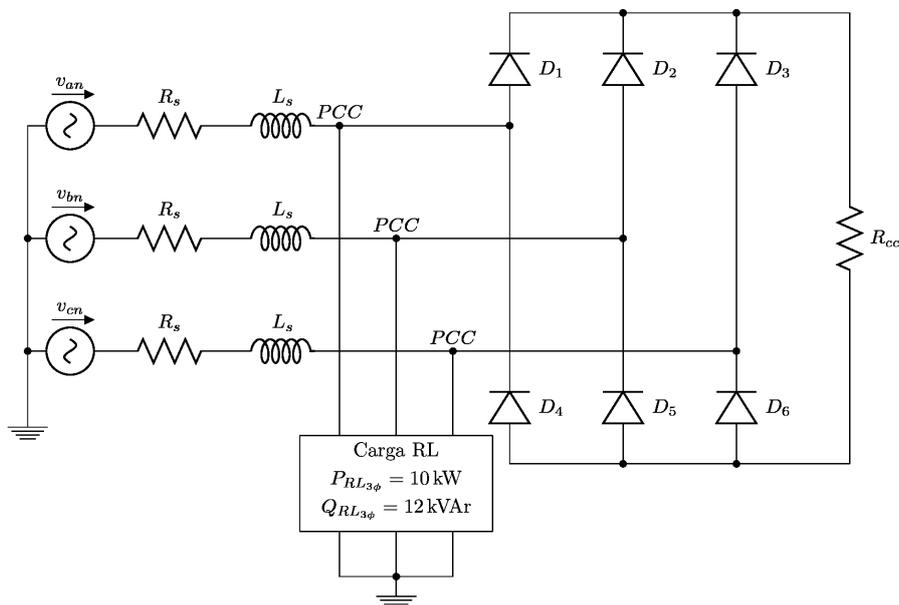
Fonte: os autores.

5 ESTUDO EM BAIXA TENSÃO

5.1 CIRCUITO ESTUDADO

O sistema estudado é trifásico e alimentado em baixa tensão pelo secundário de um transformador, conforme apresentado no Esquema 5. O sistema possui um conjunto de cargas indutivas, representado, em cada fase, por uma resistência R e por uma indutância L . Além da carga indutiva, há uma carga não linear constituída pela Ponte de Graetz e por uma resistência equivalente R_{CC} . A fonte de alimentação representa o secundário de um transformador de potência que possui uma resistência R_s e uma indutância L_s , correspondentes ao enrolamento utilizado por Kassick (2008). Os valores dos componentes utilizados em simulação estão disponíveis na Tabela 8.

Esquema 5 – Instalação trifásica utilizada no estudo em baixa tensão



Fonte: os autores.

Tabela 8 – Valores dos componentes utilizados no estudo em baixa tensão

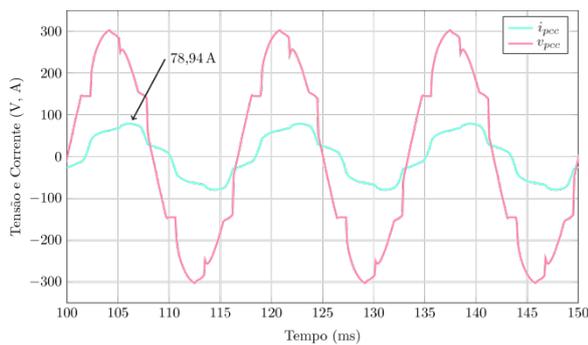
Componente	Valor
v_{an}, v_{bn} e v_{cn}	220 Vrms
f	60 Hz
R_s	0,1 Ω
L_s	1 mH
D_p, D_2, D_3, D_4, D_5 e D_6	$R_d = 0,166 \Omega; V_d = 0,55 V$
R_{cc}	10 Ω

Fonte: os autores.

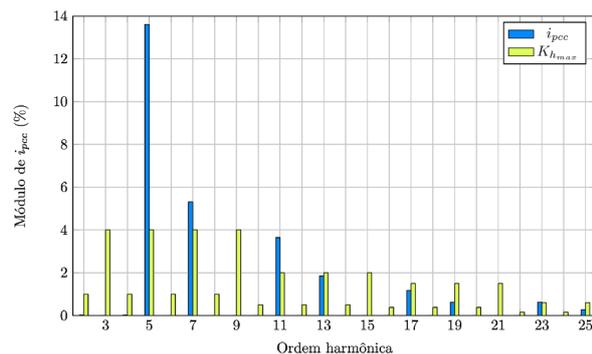
5.2 COMPORTAMENTO DO CIRCUITO ANTES E APÓS A INCLUSÃO DOS FILTROS

No Gráfico 3 (a) são apresentadas as formas de onda da tensão e corrente no PCC do circuito simulado (Esquema 5). No Gráfico 3 (b) são apresentados os módulos do espectro de frequência de corrente da forma de onda (i_{pcc}) mostrada no Gráfico 3 (a). O valor da corrente eficaz na frequência fundamental é de 54,28 A sem filtros, resultando em um fator I_{sc}/I_l de 10,39. Com base neste fator e na Tabela 1, as harmônicas de ordem 5, 7 e 11 estão acima dos limites recomendados e devem ser atuadas.

Gráfico 3 – Comparação da corrente simulada no PCC após a inserção dos filtros



(a) Tensão e corrente no PCC



(b) Espectro do módulo da corrente, i_{pcc} , em porcentagem da componente fundamental

Fonte: os autores.

O primeiro filtro projetado foi o de 5ª harmônica, pois possui maior nível, conforme Gráfico 3 (b). Em seguida, foram projetados, na seguinte ordem, os filtros de 7ª e 11ª harmônica. Os valores componentes dos filtros projetados são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores calculados para os filtros projetados

Ordem h	K_{hmax} IEEE 519 (%)	K_h (%)	R_h (m Ω)	L_h (mH)	C_h (μF)	Q	K_{hn} (%)	R_{hn} (m Ω)	L_{hn} (mH)	C_{hn} (μF)	Q_n
5	4,0	1,0	139,62	3,70	75,99	50,0	1,11	154,65	8,21	34,30	100
7	4,0	1,0	554,51	10,51	13,67	50,0	1,24	700	37,79	3,80	142,46
11	2,0	0,5	581,52	7,01	8,29	50,0	0,43	500	15,30	3,80	126,92

Fonte: os autores.

Na Tabela 10 são exibidos os níveis das ordens harmônicas das correntes sem e com a inserção dos filtros. Na cor vermelho são exibidos os níveis acima dos limites recomendados e na cor verde são mostrados os níveis atenuados. Nota-se que, com a aplicação do último filtro, todos os níveis individuais foram corrigidos para valores inferiores aos recomendados.

Tabela 10 – Módulo das harmônicas de i_{pcc} conforme os filtros são conectados no PCC da simulação

Ordem h	K_{IEEE}^{hmax} (%) 519	Módulo (%) sem filtros	Módulo (%) após conectar o filtro sintonizado na harmônica de ordem		
			5	7	11
0	-	0,002	0,022	0,029	0,034
1	-	100,000	100,000	100,000	100,000
2	1,00	0,015	0,040	0,046	0,054
3	4,00	0,010	0,031	0,037	0,038
4	1,00	0,013	0,071	0,076	0,079
5	4,00	13,609	1,408	1,396	1,422
6	1,00	0,003	0,036	0,024	0,027
7	4,00	5,305	4,902	1,728	1,784
8	1,00	0,008	0,011	0,018	0,023
9	4,00	0,006	0,018	0,018	0,019
10	0,50	0,008	0,009	0,010	0,016
11	2,00	3,639	3,520	3,614	0,516
12	0,50	0,002	0,011	0,015	0,009
13	2,00	1,845	1,880	1,926	1,878
14	0,50	0,005	0,017	0,021	0,016
15	2,00	0,003	0,004	0,005	0,006
16	0,38	0,004	0,012	0,016	0,015
17	1,50	1,176	1,188	1,284	1,333
18	0,38	0,002	0,006	0,007	0,004
19	1,50	0,616	0,699	0,785	0,867
20	0,38	0,002	0,007	0,008	0,007
21	1,50	0,001	0,002	0,005	0,002
22	0,15	0,002	0,007	0,009	0,007
23	0,60	0,621	0,521	0,507	0,463
24	0,15	0,001	0,002	0,002	0,002
25	0,60	0,267	0,219	0,252	0,331

Fonte: os autores.

A Tabela 11 mostra os valores da corrente eficaz no PCC, $i_{pcc\ e\ p}$ e os valores das distorções harmônicas totais de tensão e de corrente, respectivamente, TDH_i e THD_v , sem e com a inclusão dos filtros. Percebe-se que após a inserção dos filtros, os valores totais de distorção estão abaixo dos recomendados.

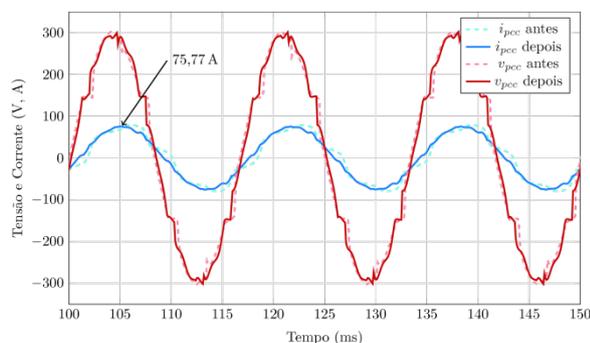
Tabela 11 – Comparação dos resultados finais de $i_{pcc\ e\ f}$, THD_i e THD_v no PCC

	Limites do PRODIST 08	Limites da IEEE 519	Sem filtros	Após conectar o filtro sin- tonizado na harmônica de ordem		
				5	7	11
				$i_{pcc\ e\ f}$ (A)	-	-
THD_i (%)	-	5	15,25	6,67	4,96	3,47
THD_v (%)	10	5	9,59	6,38	5,73	4,29

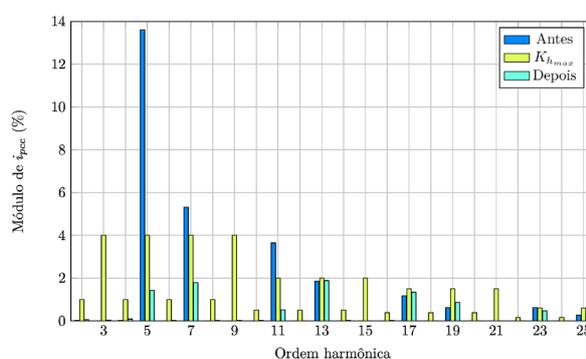
Fonte: os autores.

O Gráfico 4 (a) mostra as formas de onda de tensão e de corrente do PCC sem (antes) e com (depois) filtros. Percebe-se que a forma de onda da corrente com filtros tende a um formato senoidal com frequência próxima a fundamental. No Gráfico 4 (b) são apresentados os módulos dos espectros de frequência das formas de onda de i_{pcc} do Gráfico 4 (a) e os espectros limites K_{hmax} . Os valores dos módulos das correntes após a inserção dos filtros são inferiores aos de K_{hmax} .

Gráfico 4 – Comparação dos valores obtidos na simulação do PCC utilizando filtros harmônicos



(a) Tensão e corrente no PCC

(b) Espectro do módulo da corrente i_{pcc} em porcentagem da componente fundamental

Fonte: os autores.

7 CONCLUSÃO

Os filtros passivos são sintonizados em sistemas em que não há variação de carga. Para projetá-los é preciso conhecer detalhadamente a instalação, como os tipos de carga, as impedâncias de linhas, de proteções e do alimentador. Caso algum desses dados seja desconsiderado, a corrente de curto-circuito será diferente. Como os limites das correntes harmônicas são recomendados e normalizados com base na corrente de curto-circuito, diferentes limites podem ser atribuídos à instalação, alterando os valores dos componentes dos filtros.

Ao projetar os filtros de topologia RLC série, existe a dificuldade em garantir que o filtro atenua uma componente em uma ordem específica de harmônica sem que haja o aumento da corrente eficaz e da corrente na frequência fundamental. O projeto físico do indutor também deve ser cuidadosamente realizado, já que a resistência dos filtros possuem valores baixos, e, caso haja uma variação em seu valor, o fator de qualidade é alterado, dificultando a sintonia do filtro ou perdendo a sintonia.

A utilização de filtros no sistema de extra baixa tensão atenuou as harmônicas existentes. Porém, a corrente eficaz drenada no PCC ($i_{pcc\ ef}$) após a inserção dos filtros é de 3,44 A (Tabela 7), superior em 8,1% da corrente eficaz sem filtros.

Os resultados obtidos por meio da instalação dos filtros harmônicos no estudo em baixa tensão são satisfatórios, pois os níveis harmônicos excedentes foram atenuados, melhorando a qualidade de energia elétrica. Além disso, a corrente $i_{pcc\ ef}$ foi reduzida de 54,92 A para 53,13 A (Tabela 11), aliviando uma parcela de carga que antes era suprida pelo transformador do sistema, podendo ser utilizada em outros equipamentos.

REFERÊNCIAS

DUGAN, R. et al. **Electrical Power Systems Quality**. [S.l.]: McGraw-Hill Companies, Incorporated, 2002. (McGraw-Hill Professional Engineering Series).

HERMAN, S.; PUBLISHERS, D. **Delmar's standard textbook of electricity**. 3. ed. Thomson/Delmar Learning, 2004. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=wjQrN3rHVwQC>>. Acesso em: 17 ago. 2013.

IRWIN, J. D. **Análise de circuitos em engenharia**. 4. ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 2000. 848 p.

INSTITUTO DE ENGENHEIROS ELETRICISTAS E ELETRÔNICOS. IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electrical power systems. **Ansi**, New York, 1992. 100 p.

KASSICK, E. V. **Harmônicas em sistemas industriais de baixa tensão**. Florianópolis: Ed. UFSC, 2008.

LATHI, B. P. **Sinais e Sistemas Lineares**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2007.

PHIPPS, J. K. A transfer function approach to harmonic filter design. **IEEE Industry Applications Magazine**, p. 68-82, mar./abr. 1997.

RASHID, M. **Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações**. [S.l.]: Makron, 1999.