



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ANÁLISE DAS DISTORÇÕES PROVOCADAS POR CARGAS NÃO
LINEARES EQUILIBRADAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS E
SOLUÇÕES APLICÁVEIS

TÚLIO ALBUQUERQUE DIAS

Campina Grande – PB

Setembro de 2013

TÚLIO ALBUQUERQUE DIAS

ANÁLISE DAS DISTORÇÕES PROVOCADAS POR CARGAS NÃO
LINEARES EQUILIBRADAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS E
SOLUÇÕES APLICÁVEIS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande como parte
dos requisitos necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Elétrica.*

ORIENTADOR: Eurico Bezerra de Sousa Filho, D. Sc.

Campina Grande – PB

Setembro de 2013

TÚLIO ALBUQUERQUE DIAS

ANÁLISE DAS DISTORÇÕES PROVOCADAS POR CARGAS NÃO
LINEARES EQUILIBRADAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS E
SOLUÇÕES APLICÁVEIS

Aprovado em / /

Túlio Albuquerque Dias
Aluno

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Eurico Bezerra de Sousa Filho, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

*Dedico este trabalho aos meus queridos pais e irmãos.
A minha namorada pela força, apoio e compreensão.
Aos amigos, pelo apoio e companheirismo.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus primeiramente, por ter me dado forças para vencer mais uma etapa da vida com discernimento e sabedoria;

Aos meus pais, Maria de Fátima e José Dias, por terem me apoiado nos momentos mais difíceis, sempre me incentivando a continuar com determinação;

Aos meus irmãos, Bruno e Gustavo, a minha prima Márcia Pereira e a todos meus familiares que sempre me apoiaram e me acompanharam desde sempre me incentivando em todas as etapas da vida as quais passei;

A minha namorada, Amanda, que me apoiou em todos os momentos. Por ser compreensiva nos momentos em que a minha ausência foi necessária.

Agradeço à equipe da Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica, em especial a Adail e Tchai por estarem sempre dispostos a ajudar e aos amigos que fiz ao longo dessa caminhada.

Ao professor, Eurico Bezerra, por ter se disponibilizado a me orientar, além de todo o conhecimento que me foi repassado.

Aos demais professores da unidade acadêmica de engenharia elétrica, com os quais tive a oportunidade de aprender e adquirir conhecimentos não só na área acadêmica, mas também para a vida.

Aos membros da banca examinadora por terem aceitado o convite;

RESUMO

Em função do desenvolvimento da eletrônica de potência, do avanço tecnológico dos dispositivos semicondutores, microprocessadores e microcontroladores, atualmente estão sendo introduzidas, cargas não lineares nos setores industriais, comerciais e residenciais, de modo que elas têm se destacado em relação àquelas de características lineares. Uma das principais características dessas novas cargas é que elas distorcem as formas de onda de corrente e tensão deixando-as não senoidal. Esse fato acarreta grandes preocupações com a qualidade da energia elétrica e com a eficiência dos métodos tradicionalmente utilizados para o gerenciamento do sistema elétrico. Tais métodos, em função das distorções harmônicas, podem não se mostrar tão eficientes como antes, uma vez que a forma de onda distorcida não senoidal é composta de diversas formas de onda senoidal com frequências múltiplas da fundamental, cuja denominação é frequência harmônica. Dessa forma, o presente trabalho tem o objetivo de fazer uma análise das distorções provocadas por cargas não lineares equilibradas, bem como as possíveis soluções para eliminar tais distúrbios. O mesmo aborda ainda um estudo realizado em uma das plantas da Fábrica de baterias Moura.

Palavras-chave: Fator de Potência. Distorções harmônicas. Filtros de Potência. Eficiência energética.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Triângulo de Potência.	13
Figura 2 – Tetraedro de Potência.....	14
Figura 3 – Filtro passivo de baixa impedância.	16
Figura 4 – Conversor fonte de corrente (CVC) (a); Conversor fonte de tensão (VSC).(b)	17
Figura 5 – Conversor trifásico com três braços a quatro fios (a); Conversor trifásico com quatro braços a quatro fios (b)..	18
Figura 6 – Filtro ativo tipo série(a); Filtro Ativo tipo paralelo(b)	18
Figura 7 – Filtro híbrido: Ativo paralelo combinado com passivo paralelo.	19
Figura 8 – Filtro híbrido: Ativo série combinado com com passivo paralelo.....	19
Figura 9 – Filtro híbrido: Ativo série em serie com passivo paralelo.....	20
Figura 10 – Filtro híbrido: Ativo série combinado com ativo paralelo.	20
Figura 11 – activer filter.sch.....	21
Figura 12 – (a) Formas de onda da tensão da rede; (b) Formas de onda da corrente na rede..	22
Figura 13 – (a) Formas de onda da tensão da rede	23
Figura 13 – (b) Formas de onda da corrente na rede com conversor com três braços a quatro fios	23
Figura 13 – (c) Formas de onda da corrente na rede com conversor com quatro braços a quatro fios	23
Figura 14 – (a) Espectro de corrente na fase A sem compensação.....	23
Figura 14 – (b) Espectro de corrente na fase A com compensação conversor três braços a quatro fios.....	23
Figura 14 – (b) Espectro de corrente na fase A com compensação conversor quatro braços a quatro fios.....	23
Figura 15 – Gráfico da impedância em função da frequência.	27
Figura 16 – Compensação reativa em tempo real.....	31
Figura 17 – Registro da influencia da lâmpada incandescente na rede elétrica [CATERPILLAR].	32
Figura 18 – Esquema da instalação utilizando transformado elevador.....	33
Figura 19 – Potência ativa e reativa em uma turbina.....	35
Figura 20 – Tensão na rede com e sem a compensação em tempo real.....	35
Figura 21 – Fluxo de carga sem o filtro.....	37
Figura 22 – Espectro das distorções de tensões harmônicas sem filtro.	37
Figura 23 – Fluxo de carga com reator antiressonante	38
Figura 24 – Espectro das distorções de tensões harmônicas com reator antiressonante.....	39
Figura 25 – Espectro de harmônicas de tensão com filtro sintonizado.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites de distorção harmônica individual e total em percentual da razão entre a corrente de curto-circuito ($I_{c.c.}$) e a corrente nominal (I_L).....	15
Tabela 2 – Valores I_{RMS} , I_1 , FP e THD antes da compensação de harmônicos.....	22
Tabela 3 – Comparação dos valores I_{RMS} , I_1 , FP e THD com a compensação de harmônicos.....	24

SIGLAS

ANEEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica

CRTR – Agencia

CSC – Conversor Fonte de Corrente

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

IEC – *International Eletrotechnical Commission*

PLC – Power Line Conditioner

RTPF – *Real Time Power Factor Compensation*

SCR – SiliconControlledRectifier

TC– Transformador de Corrente

TDD – *Total DemandDistortion*

THDI -Total Harmonic Distortion Current

THDV -Total Harmonic Distortion Voltage

VSC-Conversor Fonte de Tensão

SUMÁRIO

1	Introdução.....	11
1.1	Desenvolvimento histórico	12
1.2	Análise da potência na rede elétrica.....	13
2	Compensação da potência reativa e distorções harmônicas	16
2.1	Filtro Passivo	16
2.2	Filtro Ativo	17
2.3	Simulação do filtro ativo com conversor fonte de tensão com quatro braços e quatro fios	20
2.4	Vantagens e desvantagens entre o filtro passivo e ativo	24
3	Cargas não lineares.....	25
3.1	Compensação da potência reativa e a ressonância	26
3.2	A sintonia e a dissintonia	28
4	Compensação de reativos em tempo real.....	28
5	Soluções aplicáveis.....	29
6	Estudo realizado em uma das plantas da fábrica de baterias Moura.....	36
6.1	Metodologia aplicada.....	36
6.1	Resultados.....	37
7	Considerações Finais	40
8	Referências bibliograficas	41
9	Anexos.....	43

1. INTRODUÇÃO

Nos dias de hoje, as cargas elétricas alimentadas por sistemas elétricos de potência não possuem as mesmas características elétricas de tempos atrás, quando praticamente todas elas eram lineares e não geravam tantas irregularidades na forma de onda fornecida pelas concessionárias de energia. Atualmente os métodos utilizados para correção desses impactos têm como principal objetivo a isenção do pagamento de energia reativa excedente, junto às concessionárias que suprem essas instalações. Contudo, antes do início das cobranças desta energia reativa por parte das concessionárias, a correção de fator de potência e a correção das distorções harmônicas estavam sendo aplicadas com a finalidade de melhorar a qualidade de energia de alimentação das cargas. Com isso uma análise cuidadosa deve ser feita para utilização e implementação dos métodos para correção desses distúrbios.

Segundo Starosta et al. (2009) o principal aspecto refere-se às cargas ligadas ao sistema elétrico que são classificadas de acordo com as seguintes características:

- Cargas não lineares:

As cargas não lineares são aquelas que operam com correntes de diversas frequências além da frequência fundamental (no Brasil 60 Hz). Por exemplo, o acionamento de um motor por inversor de frequência 6 pulsos, apresenta correntes em 60 Hz (frequência fundamental), 300 Hz (5ª Harmônica), 420 Hz (7ª Harmônica), 660 Hz (11ª Harmônica) e outras harmônicas com menos intensidade.

- Cargas com curto ciclo de operação:

Quando as cargas operam em curtos ciclos de operação elas promovem oscilações na rede fazendo com que aspectos como fator de potência e as distorções harmônicas geradas não sigam um padrão, sendo necessário adequar os métodos de correções de acordo com a interferência das cargas na rede.

- Cargas nas quais o produto final depende da qualidade de energia:

Cargas cujo princípio de operação depende de controladores e acionadores micro processados ou cargas associadas à transformação da energia em que a qualidade final do produto depende da qualidade de energia de entrada. Sistemas com esse tipo de demanda devem prever redes elétricas com bons índices de qualidade de energia.

- Eficiência energética e redução de perdas:

A redução da corrente elétrica das cargas nos circuitos e em transformadores devido à corrente de compensação dos capacitores reduz as perdas no efeito Joule. A manutenção da tensão operacional próxima da nominal reduz as perdas nos circuitos magnéticos, ou seja, conseguiu-se reduzir a corrente fornecendo uma energia “limpa” reduzindo significativamente as perdas.

1.1 Desenvolvimento histórico

A injeção de reativos tem sido nas últimas décadas uma valiosa ferramenta, importante para a regulação de tensão, redução de perdas, da corrente elétrica e para eficiência do sistema. Sua popularização do ponto de vista do consumidor ocorreu em maiores proporções quando as concessionárias passaram a multar os consumidores que apresentassem valores médios mensais de fator de potência menores que um valor fixo definido. (inicialmente 85%).

A portaria 1569 (1993) mudou não só o valor de referência do fator de potência para 92% como mudou o período de medição deste valor que passou a ser definido pela média horária com um grau maior de sofisticação de avaliação permitido pelos medidores eletrônicos que chegaram ao mercado. Esta mudança que ocorria no Brasil na primeira metade da década de 90 seguiu uma tendência mundial presente até hoje.

Esta mudança de critério de compensação trouxe consigo a necessidade de ajuste fino da injeção de reativos, pois diversas instalações que estavam incólumes ao critério anterior, passaram a ser sobretaxadas. Então começou uma verdadeira corrida pela adequação do fator de potência e correções das distorções harmônicas devido às cargas não lineares.

O que ocorre na maioria dos casos, é que os consumidores, consideram o faturamento de energia reativa como sendo uma cobrança normal de energia, tal qual a energia ativa é, e não tem a mínima ideia de seu potencial em “gerar” sua própria energia reativa com a correta aplicação de capacitores.

Boas partes dos consumidores ainda absorvem os custos, pois consideram a inexistência de tecnologia para adequação do fator de potência da instalação e compensação reativa. Poucas são as concessionárias que alertam os consumidores para a situação, e a possibilidade de evitar o faturamento adicional.

1.2 Análise da Potência na rede elétrica

Os principais aspectos na análise e projeto da transmissão e distribuição da corrente alternada no final do século XIX e utilizado até hoje, foi baseado em tensão constante e equilibrada com frequência constante. Nesse conceito foi determinado que a potência elétrica, seria mais eficiente se a corrente da carga estivesse em fase com a tensão, ou seja, a corrente e a tensão teria a mesma onda senoidal sem haver deslocamento entre ambas. Dessa forma, quando ocorrer o deslocamento da corrente de modo que esta se adiante em relação à tensão irá gerar o que chamamos hoje de potência reativa.

A potência reativa não contribui para a transferência de energia entre a fonte e a carga, é uma potência que está no sistema, mas hora está sendo recebida e hora está sendo fornecida entre a fonte e a carga. Com isso surgiu conceito de potência aparente e fator de potência. A potência aparente é a soma fasorial das duas potências, ativa e aparente, a potência aparente dá uma ideia de quanto pode ser fornecido ou consumido quando as correntes forem sinusoidais e estiverem em fase.

O fator de potência convencional ou fator de potência de deslocamento, mostrado na fig. 1.1 considera apenas a defasagem entre a tensão e a corrente correspondente a componente fundamental, enquanto o fator de potência considera os ângulos de fase de cada ordem harmônica e é normalmente calculado como sendo a razão entre a potência ativa e a potência aparente (Stevenson, 1982). Com a evolução da tecnologia e a utilização de equipamentos sofisticados, o fator de potência está diminuindo gerando assim mais potência reativa sendo necessária a instalação de bancos capacitivos ou na maioria dos casos reatores em paralelo com a carga, para que o fator de potência de deslocamento se mantenha próximo à unidade reduzindo a zero a potência reativa do sistema.

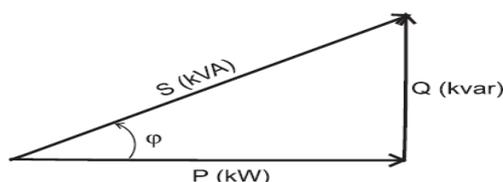


Figura 1 – Triângulo de potência.

$$fp = \cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (1.1)$$

Com a grande utilização dos conversores estáticos, nas mais diversas áreas, um elevado conteúdo harmônico de corrente é injetado no sistema elétrico e com isso o fator de potência convencional, chamado inicialmente de fator de potência de deslocamento, também é reduzido pela distorção na forma de onda da corrente e tensão conceito esse chamado de distorção harmônica.

$$fp = \cos \phi \frac{1}{\sqrt{(1 + THD_v^2)} \sqrt{(1 + THD_c^2)}} \quad (1.2)$$

O novo fator de potência (equação 1.2) que considera a contribuição das taxas de distorções harmônicas totais de corrente e tensão é conhecido como fator de potência total (Watanabe et al., 1993). Com esta distorção harmônica no sistema de potência, o triângulo de potência (fig.1) sofre uma alteração, recebendo uma terceira dimensão provocada pelo fator de distorção harmônica (fig.2).

A potência aparente com fator de distorção harmônica é dada por:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (1.3)$$

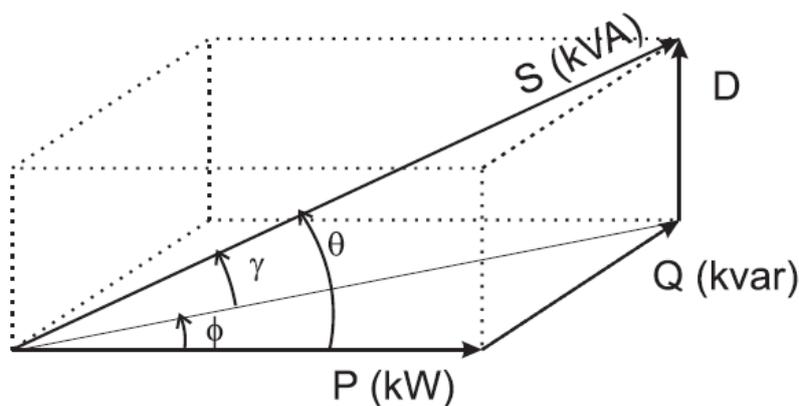


Figura 2 – Tetraedro de potência.

Com a inserção do fator de distorção harmônica (equação 1.2), dependendo da sua contribuição para o deslocamento de fator de potência total não se pode corrigir o fator de potência total apenas com banco de capacitores ou em alguns casos reatores em paralelo.

A norma IEEE 519-1992 estabelece limites das distorções harmônicas individuais e totais de corrente no sistema elétrico e não em cada carga com ocorre no IEC. Os limites diferem de acordo com o nível de tensão e com o nível de curto-circuito

do sistema e a grandeza TDD (*Total Demand Distortion*) é definida como sendo a distorção harmônica total da corrente, em % da máxima demanda da corrente de carga (demanda de 15 ou 30 minutos), conforme indicado na tabela 1.1.

Tabela 1.1: Limites de distorção harmônica individual e total em percentual da razão entre a corrente de curto-circuito ($I_{c.c.}$) e a corrente nominal (I_L)

$V_n \leq 69kV$						
I_{cc}/I_L	h	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h \leq 35$	TDD
	< 11					
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 – 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 – 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 – 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
< 1000	15,0	7,0	6,5	2,5	1,4	20,0
$69kV < V_n \leq 160kV$						
< 20	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20 – 50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50 – 100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
100 – 1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
< 1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0
$V_n > 160kV$						
< 50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
≥ 50	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75
<i>Harmônicas pares são limitadas a 25% dos limites das harmônicas ímpares</i>						
$I_{c.c.} = \text{corrente máxima de curto – circuito}$						
$I_L = \text{demanda máxima de corrente de carga}$						

Dessa forma podemos observar que quanto menor a tensão nominal do sistema maior será a razão entre a corrente de curto-circuito ($I_{c.c.}$) e a corrente de demanda máxima (I_L) e maior o impacto gerado pela inserção das cargas não lineares nos mesmo, sendo assim, se a carga não linear for inserida em um sistema cuja tensão nominal seja elevada, a taxa de distorção de tensão será inferior se a mesma fosse implantada num sistema cuja tensão nominal fosse menor.

2. Compensação da potência reativa e distorções harmônicas

Como descrito anteriormente à compensação da potência reativa, pode ser realizada apenas com bancos de capacitores ou reatores em paralelo, mas quando envolve distorções harmônicas se faz necessária a utilização de filtros de potência, que podem ser passivos, ativos ou a combinação dos dois, dependendo das características do sistema e o tipo de correção exigida.

Os filtros de potência permitem o isolamento ou cancelamento das harmônicas geradas pelas cargas não lineares, emulando para o sistema uma carga resistiva sem a necessidade de substituição das mesmas. Estes filtros possuem enumeras configurações, as quais serão descritas a seguir.

2.1 Filtro Passivo

Os filtros passivos são constituídos basicamente por estruturas LC série, podendo ser empregados tanto como filtro de bloqueio criando caminhos de alta impedância entre o alimentador e a carga, bem como filtros de confinamento que consistem basicamente na criação de caminhos de baixa impedância para a circulação das harmônicas de corrente, como mostra a fig.3. Os filtros de confinamento são colocados em paralelo com a carga apresentando uma pequena impedância na sua frequência de ressonância, atuando como curto-circuito para harmônica de corrente em questão. Pode-se utilizar “n” filtros sintonizados em frequências diferentes de maneira a cancelar “n” harmônicas.

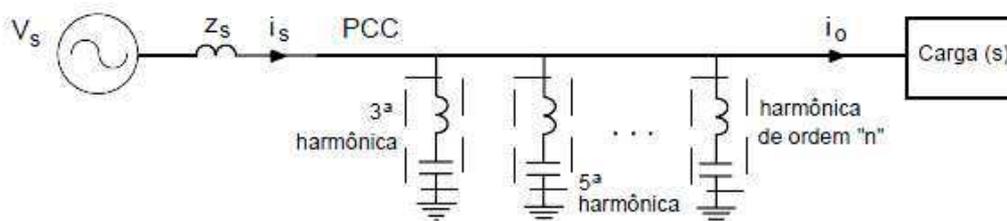


Figura 3 – Filtro passivo de baixa impedância.

Apesar de o filtro passivo atuar como caminho de baixa impedância para as harmônicas, pode ocorrer ressonâncias em outras frequências, elevando os níveis de harmônicos que não causam perturbações antes da sua instalação. Um estudo criterioso da planta deve ser feito antes da instalação do filtro passivo e também toda vez que

houver um aumento de carga, pois o filtro apresenta características de compensação fixa. Além dos problemas de ressonância podemos citar como desvantagem dos filtros passivos o seu volume significativo e o fato de que as características de filtragem dependem da impedância da rede. Como vantagem eles apresentam um baixo custo em relação aos filtros ativos e uma boa resposta na frequência sintonizada. (Souza, 2000)

2.2 Filtro Ativo

Com a finalidade de eliminar as desvantagens dos filtros passivos de potência, foram estudados e desenvolvidos os filtros ativos de potência. Com diversas configurações, desde a década de 70 os filtros ativos passaram a ser reconhecidos como uma solução viável para os problemas criados pelas cargas não lineares. No entanto na década de 80 os filtros ativos se tornaram mais populares quando apresentaram uma nova teoria de compensação em tempo real.

Os filtros ativos de potência são equipamentos conectados com a rede elétrica, com o objetivo de eliminar distorções da tensão da rede, corrigir o fator de potência e como principal corrigir as harmônicas geradas por cargas não lineares na rede. Os filtros ativos podem se classificados quanto ao numero de fases estrutura do conversor e a topologia. (Singh et al., 1999)

A classificação quanto ao numero de braços depende do tipo de compensação a ser realizada, pode ser monofásico ou trifásico. No nosso caso, como são cargas equilibradas que corresponde ao sistema trifásico à compensação dos distúrbios são realizadas com um conversor trifásico com três braços a três condutores, como apresentado na fig. 5.

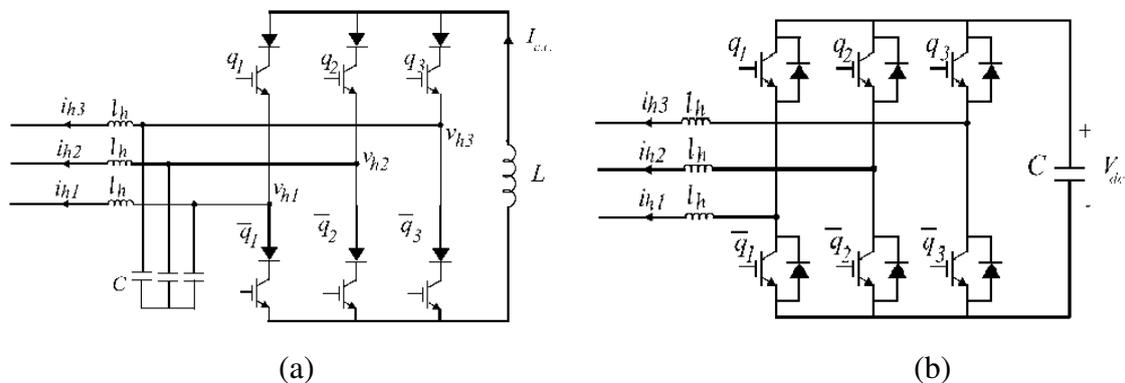


Figura 4 – (a) Conversor fonte de corrente (CVC) e (b) Conversor fonte de tensão (VSC).

Porém se o sistema trifásico apresenta desequilíbrio na tensão e na corrente, a compensação dos distúrbios será realizada com conversores trifásicos com três braços a quatro fios e quatro fios fig. 5.

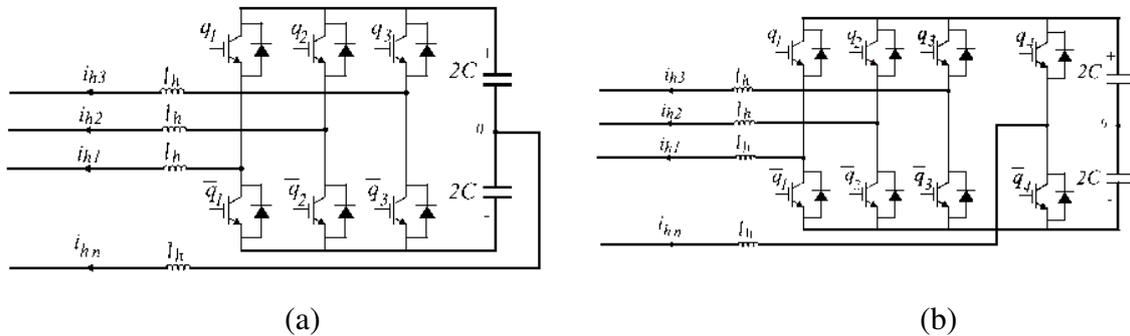


Figura 5 – (a) Conversor trifásico com três braços a quatro fios e (b) Conversor trifásico com quatro braços a quatro fios.

Quanto à estrutura os filtros ativos podem ser projetados classificados como um conversor fonte de corrente (CSC) ou um conversor fonte de tensão (VSC), como mostrado na fig. 4(a). No conversor CSC, a corrente no barramento c.c. (I_{cc}) é modulada e injetada na rede. A corrente I_{cc} deve ser maior que a corrente de pico que deverá ser compensada pelo filtro (Yunus e Bass, 1996), o que leva a perdas significativas no indutor e um elevado peso e volume para o armazenamento dessa energia.

No conversor VSC, a tensão no barramento c.c. (V_{cc}) é controlada e mantida constante fornece para rede a corrente necessária através do indutor de acoplamento fig. 4(b). Para compensação das harmônicas de corrente, o valor médio da tensão deve ser maior do que o valor de pico da tensão da rede. O conversor VSC dominou o mercado da eletrônica de potência, por ser mais leve e mais barato do que os conversores CSC (Singh et al., 1999).

No que se refere à topologia do filtro ativo de potência tem-se filtros série, paralelo, universal ou híbrido. O filtro ativo série elimina as distorções na tensão na rede e o filtro ativo paralelo elimina as distorções harmônicas de corrente.



Figura 6 – (a) Filtro ativo tipo série e (b) Filtro Ativo tipo paralelo

Os filtros ativos tipo série isolam a carga contra perturbações na tensão da rede, tais como flutuações de tensão, distorções harmônicas e afundamentos de tensão comumente chamados de "*notching*". O filtro ativo do tipo paralelo funciona como um caminho de baixa impedância para as harmônicas de corrente emulando uma carga linear. Se controlados adequadamente, podem compensar também a defasagem entre a tensão de rede e a corrente da carga de maneira que o conjunto carga e filtro absorvam da rede uma corrente senoidal e em fase com a tensão da rede.

Os filtros híbridos são uma combinação entre filtros ativos e passivos, inicialmente propostos para diminuir a potência dos filtros ativos e seu custo inicial, bem como melhorar o desempenho.

No caso de um filtro passivo paralelo combinado com um filtro passivo paralelo fig. 7, o filtro ativo compensa as harmônicas de corrente de baixa ordem e o filtro passivo às harmônicas de corrente de alta frequência. Como o filtro ativo não compensa todas as harmônicas na sua faixa de frequência, a potência é reduzida.

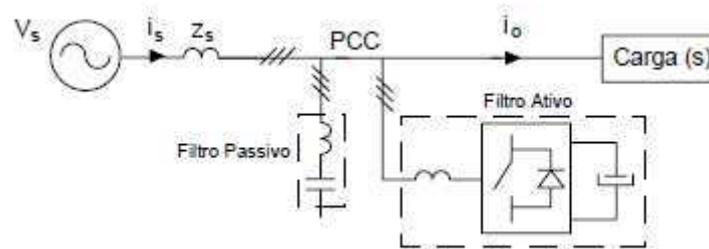


Figura 7 – Filtro híbrido: Ativo paralelo combinado com passivo paralelo

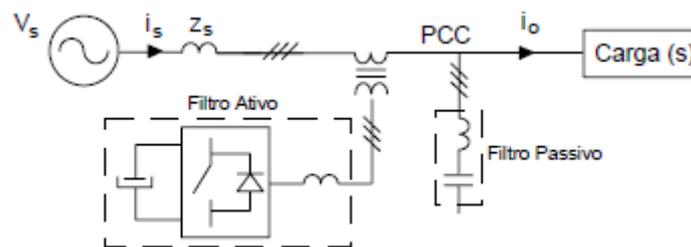


Figura 8 – Filtro híbrido: Ativo série combinado com passivo paralelo

Na fig. 8 é apresentado o filtro ativo série combinado com o filtro passivo paralelo. Neste caso o filtro ativo série atua como uma impedância variável de maneira que o filtro passivo passa a ter um comportamento praticamente ideal, porém desejasse que a impedância da rede seja elevada para que o filtro passivo em paralelo se torne um caminho de menor impedância para harmônica de corrente em questão. De outro modo deseja-se que a impedância da rede seja mínima para que não haja queda de tensão.

Esses dois critérios distintos são atendidos com a inserção de uma impedância ativa “filtro ativo” em série com a rede, para que assim possamos evitar que o sistema entre em ressonância.

A fig.9 apresenta o filtro ativo conectado em série com o filtro passivo paralelo no qual a combinação confere um comportamento praticamente ideal ao filtro passivo.

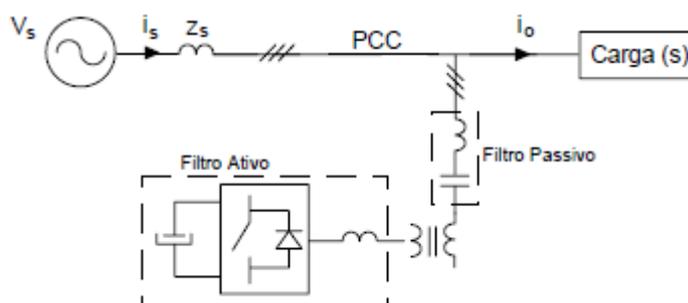


Figura 9 – Filtro híbrido: Ativo série em série com passivo paralelo

A combinação dos filtros ativos série e paralelo em uma única topologia denominada PLC (powerlineconditioner) fig. 10 contempla as características de compensação do filtro série com as do filtro paralelo. O filtro série compensa as distorções da rede, suas flutuações, afundamentos de tensão chamados comumente de "notching" e também funciona como isolador de harmônicas. O filtro paralelo apresenta um caminho de baixa impedância para as harmônicas. Desta maneira, cargas que necessitam de uma energia “limpa”, podem operar em instalações seguramente.

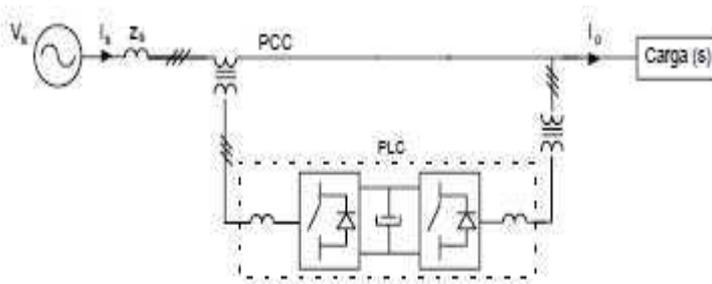


Figura 10 – Filtro híbrido: Ativo série combinado com ativo paralelo

2.3 Simulação de filtro ativo com conversor fonte de tensão com quatro braços e quatro fios.

Com o objetivo de fazer uma análise entre os filtros ativos trifásicos tipo (VSC) em paralelo com a carga, foi realizado uma simulação através do *software* PSIM® versão 9.0. visando comparar e discutir as vantagens e desvantagens entre o filtro ativo com conversor trifásico três braços a quatro fios e o filtro ativo com conversor trifásico,

quatro braços a quatro fios fig.5. Para isto é utilizado como base para esse projeto o arquivo “activer filter.sch” fig.11 que é um exemplo de aplicação fornecido pelo desenvolvedor do PSIM®. O sistema apresentado pode ser dividido em duas partes: a primeira é o circuito de potência composto por fonte, carga não linear, chaves, conversor e por filtro passa-faixa de quarta ordem. A segunda parte que corresponde ao circuito de controle que utiliza a técnica de Modulação por Limites de Corrente.

Abaixo segue o circuito:

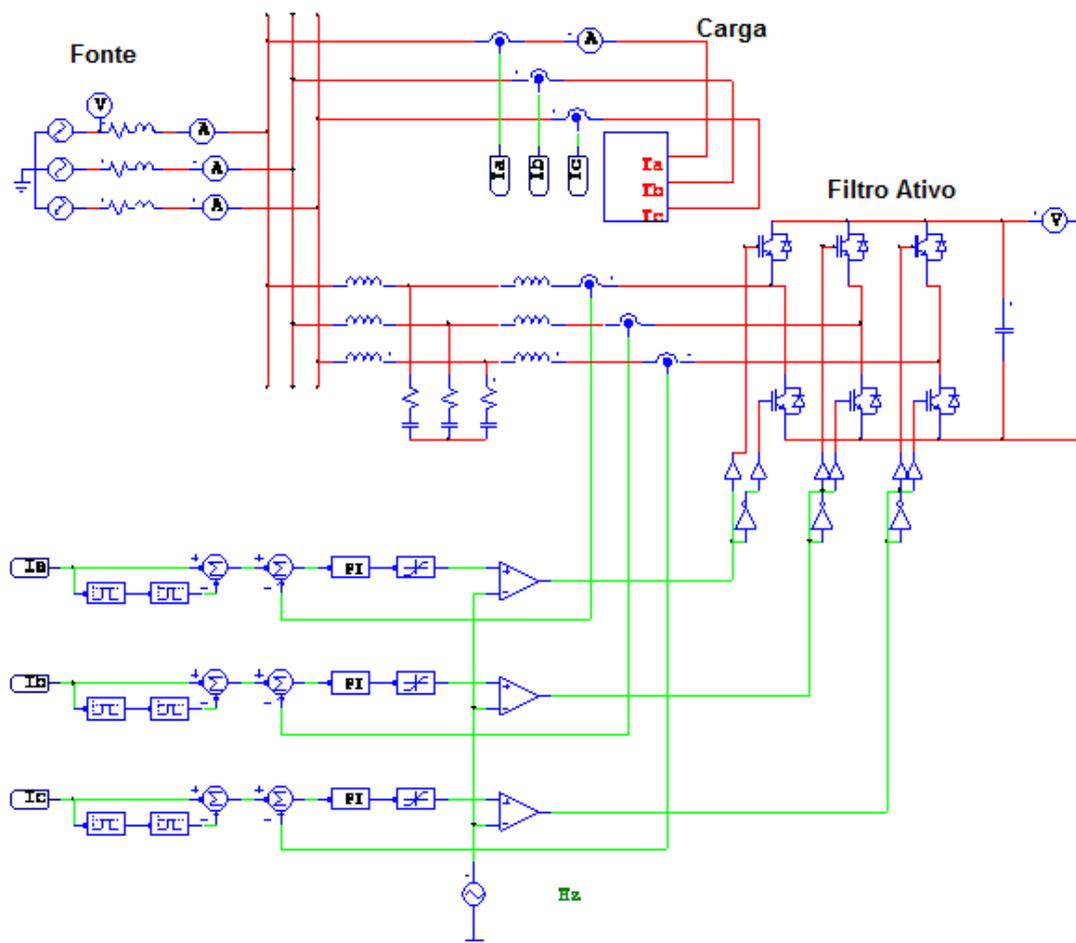


Figura 11 – activer filter.sch

Para iniciar a simulação foi implementado uma carga não linear que simula o comportamento da carga até a nona harmônica sendo inserida no sistema com a fonte de tensão, sem a compensação de harmônicos mostrada na fig.12.

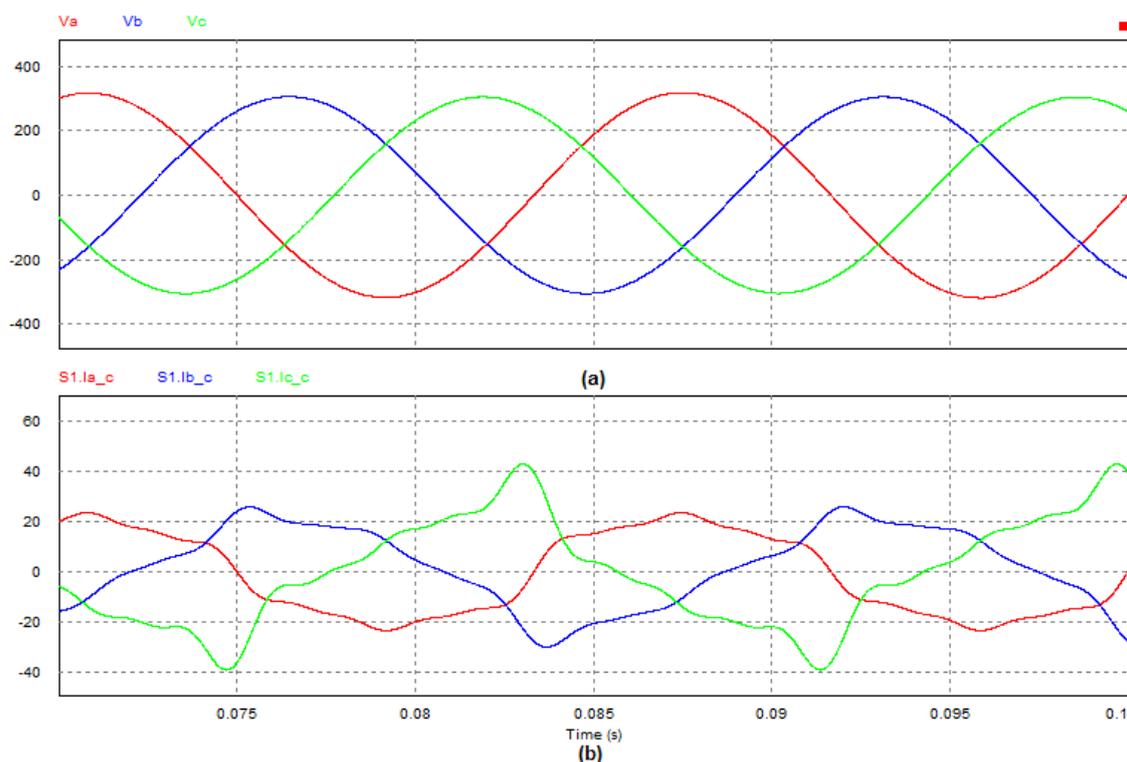


Figura 12 – (a) Formas de onda da tensão da rede; (b) Formas de onda da corrente na rede

Tabela 2 – Valores I_{RMS} , I_1 , FP e THD sem a compensação de harmônicos.

	$I_{RMS}(A)$	I_1	FP	THD(%)
I_a	16,37	22,7	0,98	17,05
I_b	20,30	27,24	0,95	32,76
I_c	15,27	22,40	0,98	19,96

Após a análise do comportamento da carga não linear sem compensação, foi simulado o comportamento das tensões e correntes de rede após a compensação de harmônicos com os dois tipos de filtros.

O conversor do tipo fonte de tensão utilizado na simulação é apresentado pela fig.5 (a) possui três braços com quatro fios com capacitor no ponto central. O conversor da fig. 5 (b) do mesmo tipo fonte de tensão possui quatro braços com uma derivação, constituindo assim um sistema a quatro fios. Para ambos foi colocado um filtro passivo conectado a saída do conversor que tem objetivo de eliminar as harmônicas de alta frequência.

Os Diagramas Elétricos das simulações encontram-se na seção de anexos.

Na fig.13 são apresentados as tensões e correntes da rede com a compensação de harmônicos para o filtro com conversor do tipo fonte de tensão com três braços a quatro fios e quatro braços a quatro fios.

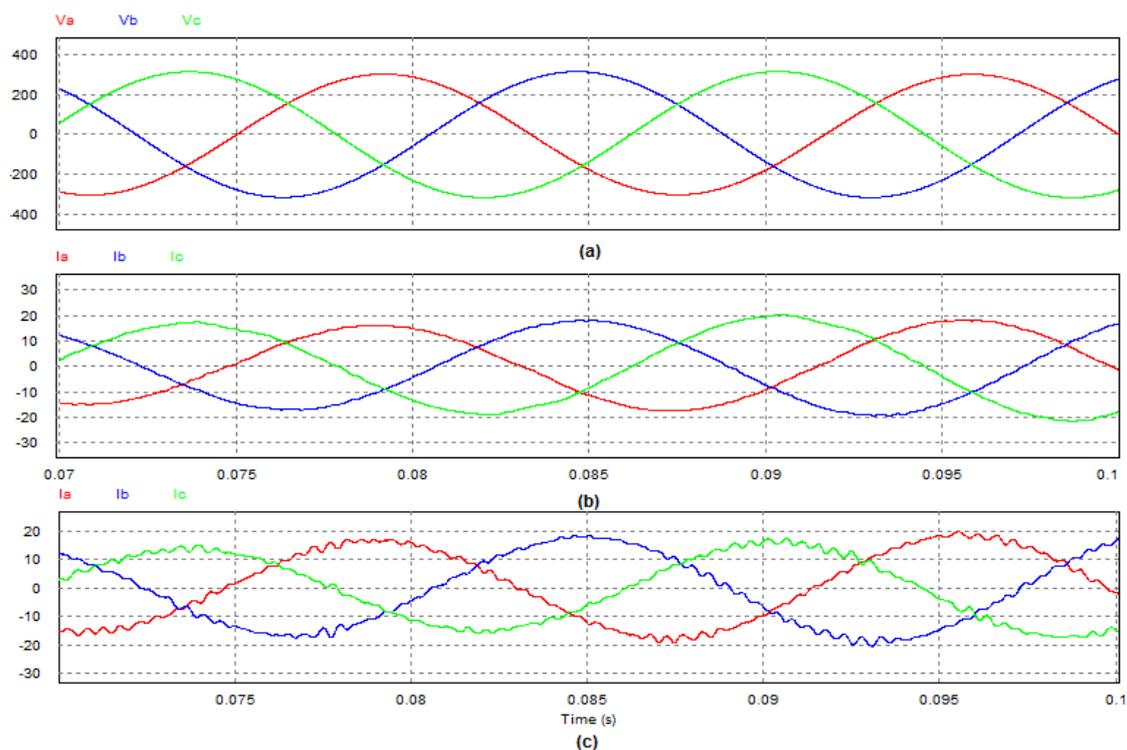


Figura 13 – (a) Formas de onda da tensão da rede;
 (b) Formas de onda da corrente na rede com conversor com três braços a quatro fios
 (c) Formas de onda da corrente na rede com conversor com quatro braços a quatro fios

Na fig. 14 é exibido o espectro de frequência da corrente na fase A antes, após a compensação dos harmônicos com o conversor com três braços com quatro fios e com o conversor com quatro braços a quatro fios.

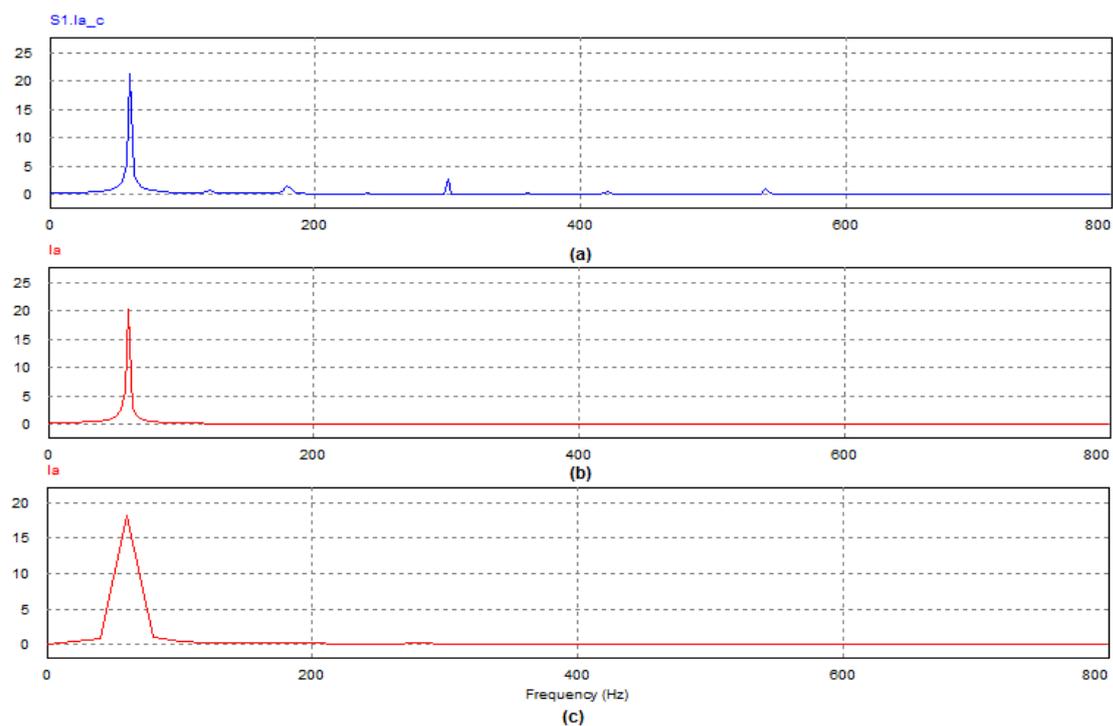


Figura 14 –(a) Espectro de corrente na fase A sem compensação
 (b) Espectro de corrente na fase A com compensação conversor com três braços a quatro fios
 (c) Espectro de corrente na fase A com compensação conversor com quatro braços a quatro fios

Na Tabela 3 são apresentados os valores RMS e THD das tensões e correntes de linha, também é apresentado o FP de potência para cada fase da rede, para as duas formas de compensação dos harmônicos.

Tabela 3 – Comparação dos valores I_{RMS} , I_1 , FP e THD com a compensação de harmônicos

	Conversor três braços com quatro fios			Conversor quatro braços com quatro fios		
	RMS	THD(%)	FP	RMS	THD(%)	FP
V_a	213 V	0,12	0,99	216 V	0,12	0,99
I_a	12,7 A	2,00		12,3 A	4,80	
V_b	223 V	0,15	0,99	213 V	0,18	0,99
I_b	13,6 A	1,80		12,1 A	5,40	
V_c	223 V	0,09	0,99	229 V	0,10	0,99
I_c	14,3 A	2,50		11,4 A	6,3	

Pode-se observar que a compensação para ambos os casos é bastante semelhante, porém nota-se que o filtro ativo com conversor com quatro braços a quatro fios apresenta algumas vantagens e desvantagens em relação ao filtro com conversor com três braços a quatro fios.

Com a adição do quarto braço no conversor e conseqüentemente a injeção da corrente de neutro o potencial de minimização das ondulações das correntes é muito pequena isto decorre em função do tipo de modulação e principalmente devido à injeção da componente de sequência zero.

Por outro lado, citasse algumas vantagens substanciais da injeção da componente de sequência zero:

- Melhor utilização do barramento CC
- Redução da possibilidade de ocorrência de sobremodulação
- Redução da possibilidade de operação com pulso estreito
- Facilidade na implementação de malhas de controle no sistema de coordenadas trifásicas (RSTN) evitando-se a transformação de coordenadas e os acoplamentos entre variáveis.

2.4 Vantagens e desvantagens entre o filtro passivo e ativo.

A aplicação do filtro ativo ou passivo dependerá das suas vantagens e desvantagens levando em consideração a situação em que o mesmo será aplicado. Os filtros passivos resolvem vários problemas das harmônicas causadas por cargas não

lineares e apresentam como vantagens o baixo custo em relação aos filtros ativos e uma boa resposta na frequência sintonizada. Entretanto, os filtros passivos apresentam as seguintes desvantagens (Moránet al., 1995) e (Peng et al., 1990):

- A impedância do sistema influencia nas características do filtro passivo, que geralmente não é conhecida com precisão e varia com a configuração do sistema;
- Podem ocorrer fenômenos de ressonância ou antirressonância entre o sistema de potência e o filtro passivo;
- A compensação é realizada para uma frequência fixa, não pode existir variação de carga no sistema;

Comparando com os filtros passivos, os filtros ativos apresentam um volume menor, sem apresentar problemas de ressonância com a rede e tem a capacidade de se adaptar as modificações de carga, ou seja, não possuem características de compensação fixa. Além disso, não há necessidade de um conhecimento prévio da planta antes da sua instalação.

Os filtros ativos possuem ainda algumas variações para se adaptar a frequência de faixa e a variações das cargas desequilibradas. As variações citadas referem-se à topologia, estrutura e número de braços. A única desvantagem do filtro ativo é o custo elevado devido aos semicondutores de alta potência utilizado no filtro.

3. CARGAS NÃO LINEARES

As cargas não lineares são aquelas em que a relação tensão versus corrente gerada na rede não apresenta linearidade, em outras palavras, cargas não lineares são aquelas que ao serem acionadas geram correntes de diferentes frequências além da frequência fundamental. A maioria dos equipamentos eletrônicos, não é composta apenas de resistências ôhmicas, indutores e capacitores, mas também por semicondutores como diodos e transistores, ou ainda chaves manuais se tornando equipamentos completamente não lineares.

Com a aplicação da série de Fourier é possível decompor a onda senoidal distorcida em várias senóides puras, tendo cada uma delas componentes típicas de amplitude e frequência. A partir desse conceito de decomposição senoidal é possível

estabelecer o *espectro harmônico* que é composto por harmônicas de varias ordens, múltiplas da frequência fundamental. Dessa forma as cargas não lineares podem ser classificadas com relação à faixa no espectro na qual ela mais se encaixa.

No primeiro grupo encontram-se os conversores, fontes chaveadas monofásicas, e sistemas de aplicação de circuitos de eletrônica de potencia. No segundo grupo estão os sistemas de iluminação e fornos a arco, cuja distribuição apresenta maior aleatoriedade que o grupo anterior.

3.1 Compensações da potência reativa e a ressonância

Quando se trata de sistemas no qual as cargas possuem estas características se torna inadequado o uso apenas de bancos capacitivo, pois isto pode causar um fenômeno chamado ressonância harmônica. A ressonância ocorre quando a impedância do capacitor é similar (em módulo) a impedância da rede de alimentação. O valor da impedância da fonte pode ser estimado através da impedância do transformador ou gerador do circuito e pode ser estimado a partir da equação 2.1.

$$h_r = \sqrt{\frac{P_{cc}}{kVAr}} \quad \text{ou} \quad f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.1)$$

Em que:

f_r é a frequência de ressonância

L é a indutância típica da rede

C é a capacitância total dos capacitores

h_r é a ordem da harmônica cuja frequência é a de ressonância

P_{cc} é a potência de curto-circuito trifásico na barra em que os capacitores são instalados.

$kVAr$ é a potência dos capacitores em operação

Na ocorrência da ressonância, as correntes harmônicas provocadas pela característica não linear da carga irão circular pelo caminho que oferece menor impedância, ou seja, pelos capacitores, ocorrendo assim sobre tensões de valores significativos gerando uma situação extremamente perigosa para todo o sistema elétrico.

Tal situação pode causar significativos danos à infraestrutura elétrica da instalação. Normalmente a parte mais sensível são os capacitores que não suportam a corrente e chegam a queimar. No caso em que os capacitores chegam a suportar essas correntes, a consequência é mais severa, chegando a danificar transformadores ou até mesmo as cargas.

A análise quantitativa das correntes harmônicas dependerá da divisão de corrente que será estabelecida no circuito, considerando a análise do sistema elétrico em cada uma das frequências. As correntes estarão presentes no espectro, próximos a frequência fundamental fig.15.

A circulação de corrente nos capacitores não ocorre somente na frequência de ressonância, mas este é o ponto onde teoricamente a penetração das correntes harmônicas no capacitor é a máxima e limitada somente pela componente resistiva do circuito.

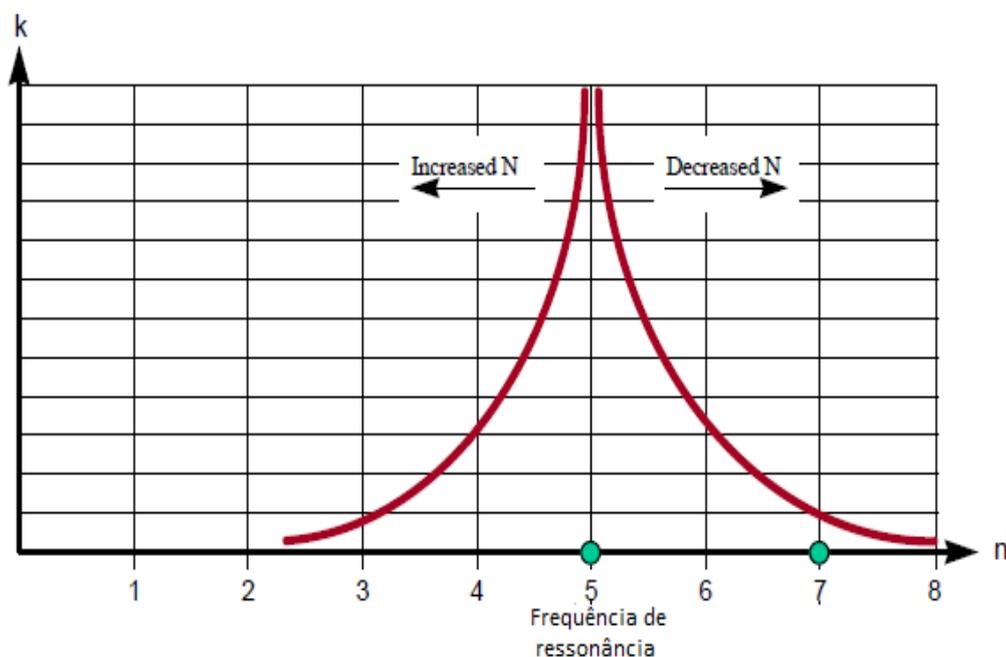


Figura 15 – Gráfico da impedância em função da frequência

Em alguns casos verificam-se que a circulação de correntes harmônicas não ocorre exatamente na frequência harmônica presentes nas cargas, mas sim nas proximidades. Esta ocorrência é justificada pela divisão das correntes harmônicas da carga para a rede para os capacitores em função de suas impedâncias. Portanto a circulação de corrente nos capacitores não ocorre somente na situação exata do ponto de ressonância calculada, mas nas circunvizinhanças deste ponto.

3.2 A sintonia e a dissintonia

De forma a evitar a ressonância paralela, os capacitores dos sistemas de compensação de energia reativa são associados normalmente em série a indutores, dessa forma chega-se a solução de sintonia ou dissintonia.

A sintonia ocorrerá quando a impedância equivalente ao novo circuito formado pela impedância do indutor associado aos capacitores apresentam valores significativamente baixos para uma das frequências características do espectro de corrente de uma carga não linear ligada a este circuito. Dessa forma a parcela da corrente da carga distorcida que possua a frequência características não fluirá para a rede, mas buscará o caminho de menor impedância que é o filtro, caracterizado a sintonia da corrente. Neste caso os indutores e capacitores são dimensionados para suportar essa condição e a carga não linear é tida como conhecida.

Já a dissintonia prevê que a associação da impedância da rede e do conjunto indutor/capacitor possua valores máximos e frequências diferentes daquelas típicas do espectro harmônico das cargas. Nessa condição tem-se a garantia de que os capacitores operarão em condições seguras não levando o sistema a condição de ressonância.

4. COMPENSAÇÃO DE REATIVOS EM TEMPO REAL

O desenvolvimento da tecnologia denominada RTPFC (*Real Time Power Factor Compensation*) que pode ser traduzida como “Compensação de Fator de Potência em Tempo Real”, trouxe ao mercado a possibilidade de compor as instalações com sistemas automáticos que efetuam a compensação reativa em tempos extremamente rápidos, desempenhado importante papel na alimentação das cargas rápidas.

Operacionalmente os conjuntos de compensação reativa, capacitores e indutores, são manobrados individualmente ou em conjunto através de SCR's ou tiristores, que são comandados por controladores. Esse controlador tem a função de receber as informações da carga que são transmitidas através de TC's de medição, um para cada fase. Dessa forma, a informação quantitativa da necessidade de injeção de reativos dos TC's da carga para o controlador, a tomada de decisão do mesmo, o disparo dos tiristores pelo controlador e a inserção dos capacitores na rede ocorrem em tempo menores que um ciclo de rede (16ms).

As manobras dos capacitores são definidas no momento da passagem da corrente por zero, evitando assim os surtos de manobra típicos de conjuntos de capacitores

manobrados por contadores ou outros dispositivos de manobra eletromecânica. Como os capacitores são mantidos carregados, sua inserção também é imune a transientes.

A disponibilização da tecnologia RTPFC torna possível implantar nas instalações que possuem cargas críticas: tais como sistemas de solda a ponto, guindaste, carga eletro médicas pulsantes, fornos a arco e de indução, grupos de elevadores em grandes prédios comerciais; sistema de refrigeração, sistemas de misturas com carga variável, injetoras de plástico entre outras cargas, fazendo com que a energia reativa originada pelas cargas seja compensada, mantendo os níveis de tensão adequados, isentado a cobrança, pela concessionária, da tarifação de energia reativa e principalmente reduzindo significativamente as perdas elétricas da instalação com o aumento substancial da qualidade de energia.

5. SOLUÇÕES APLICÁVEIS

Compensação de reativos na partida de motores

A forma mais comum e prática da aplicação de compensação reativa em tempo real é a compensação de reativos na partida de motores. Como boa parte da elevação da corrente de partida e queda de tensão estão relacionadas à partida de motores, com a compensação em tempo real teríamos maior eficiência no controle desses distúrbios, evitando o desligamento intempestivo de cargas ligadas ao barramento, ou até da própria carga que está tentando colocar em regime de operação. Um detalhe que deve ser percebido é se não existe restrição mecânica em função da partida com o torque máximo.

Soldas a ponto

Os sistemas de soldas a ponto de larga aplicação são de vasta aplicação principalmente nas industriais automobilísticas e de bem duráveis. Estes sistemas possuem linhas elétricas que alimentam diversas estações de solda. Como o uso das estações é aleatório a tensão no equipamento nem sempre é adequada, devido a aleatoriedade do sistema. Nesta situação podem ocorrer situações em que o próprio

sistema realize varias ações simultaneamente para que não afete a qualidade de energia ou até mesmo uma má qualidade do produto final.

As quedas de tensão temporárias frequentemente denominadas por sag's, são originados da solda simultânea em várias estações ocasionando perda na qualidade da solda como mostra na eq. 3.1 em que a mesma representa a perda na ponta de solda devido à redução da tensão de alimentação.

$$\Delta P = (1 - \Delta V(\%))^2 \quad (5.1)$$

Em que:

ΔP Redução da potência entregue

ΔV Queda de tensão percentual na estação da solda

A compensação reativa convencional não possui velocidade para responder no período que a solda é executada que é de vinte a trinta ciclos. Existem mudanças bruscas no consumo de reativos na rede e consequentes afundamentos. Simultaneamente os valores da taxa de distorção harmônica de corrente (THDI) sobem consideravelmente. A inserção de bancos fixos poderia elevar drasticamente a tensão em determinados instantes levando a queima prematura dos capacitores ou ainda comprometendo as estações de solda em operação, bem como os dispositivos de controle associados. Com o tempo de operação extremamente rápido sistemas comumente usados entre duas fases, fazem com que ocorra o desbalanceamento do sistema e a consequente necessidade de injeção de reativos por fase. Nessa conjuntura ocorre a não linearidade com a presença de ondas na frequência da terceira harmônica, considerando-se assim o aumento da impedância de dissintonia.

Na fig. 16 é ilustrado o comportamento das variáveis elétricas de soldas a ponto com e sem a inserção da compensação reativa em tempo real.

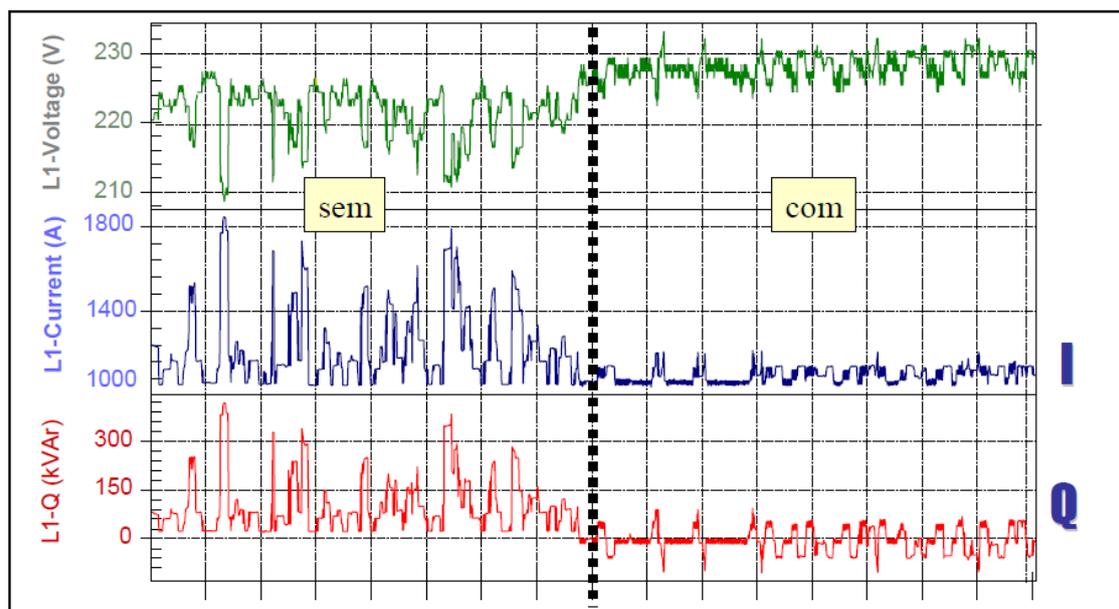


Figura 16 – Compensação reativa em tempo real

Podemos observar o quanto às variações em termos de corrente, tensão e potência se estabilizam, garantindo melhor qualidade e eficiência energética para o sistema.

Compensação de energia reativa no uso de geradores

O principal requisito para operação adequada de geradores em instalações elétricas comerciais e industriais é o cuidado com o fator de potência da carga. Recentemente geradores a diesel bastante utilizados em geração suplementar se desligavam devido a esse aspecto e somente após algum tempo os mantenedores e operadores de instalações elétricas detectaram o problema e conseguiram evitar esses distúrbios.

Com a atual tendência das plantas de geração localizada em consumidores com capacidade para autoprodução, torna-se altamente viável e lucrativo o ganho com estas aplicações tecnológicas.

Afundamento de tensão (sag's)

Os afundamentos de tensão podem ser causados por motivos internos, da própria planta devido ao comportamento das cargas ou por motivos externos que estão relacionados à concessionária de energia. O principal motivo dos afundamentos de origem interna é a operação das cargas com alto consumo de energia reativa na partida e mesmo durante o regime de operação. Algumas destas cargas são as de transporte vertical e horizontal como os elevadores, guindastes, esteiras e pontes rolantes.

Por definição da IEEE 1159 os sag's ou afundamentos ocorrem em tempos que duram desde $\frac{1}{2}$ ciclo (8ms) ate um minuto com variação de tensão desde 0,1 a 0,9 pu; portanto caso se deseje prevenir os afundamentos com a compensação de reativos, a manobra dos capacitores deve estar adequada a estes tempo típicos, caso contrario haverá sobre compensação de reativos e seus efeitos decorrentes, com o comprometimento da qualidade de energia.

Compensação de flicker

Além da denominação flicker o fenômeno também conhecido por cintilação, ocorre quando a tensão de um sistema varia sucessivamente em tempos considerados curtos. Este fenômeno considera o valor do afundamento em porcentagem da tensão de alimentação e o numero de vezes que ocorre numa determinada base de tempo.

Estas ocorrências são então comparadas a valores aceitáveis. Na fig.17 segue um registro da ocorrência de flicker em um sistema alimentado por um gerador a diesel. Devido à variação da tensão e do fluxo de energia das lâmpadas incandescentes ligadas na instalação pode-se observar essa variação apenas com a variação da intensidade luminosa da lâmpada incandescente.

Neste caso existe uma forte dependência da qualidade do processo industrial em relação à qualidade de energia de alimentação das cargas. A energia passa a ser um insumo do produto final.

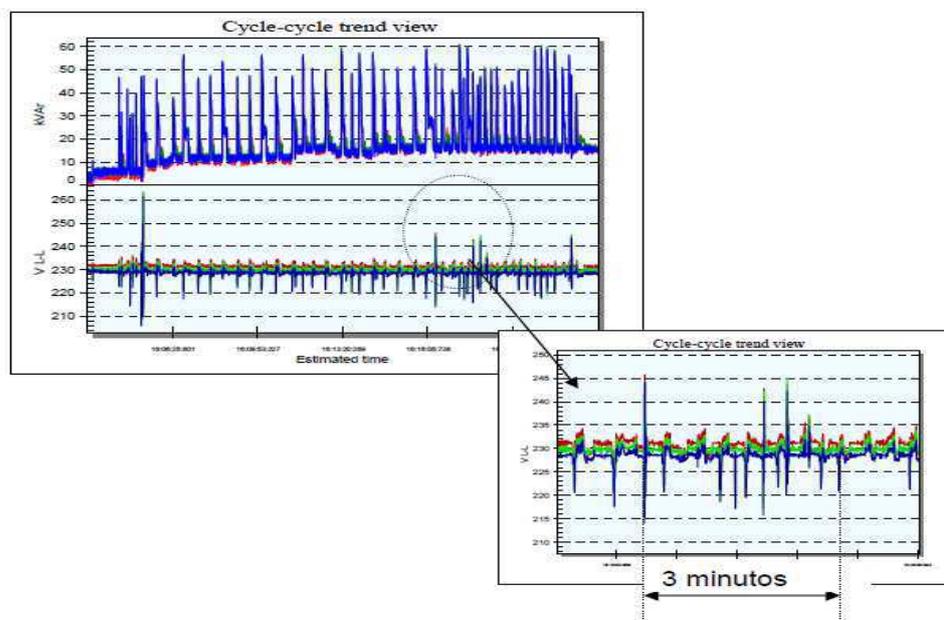


Figura 17 – Registro da influencia da lâmpada incandescente na rede elétrica [CATERPILLAR]

Compensação reativa em tempo real em Média/Alta Tensão com o uso de transformadores elevadores

A compensação reativa em média tensão prevê em geral o uso de transformadores junto ao sistema de compensação fig. 18. O ajuste fino de injeção de reativos nestas situações fica comprometido. As aplicações mais frequentes consideram um banco fixo na media tensão e um ajuste fino na baixa tensão.

O uso de transformadores em conjunto com sistemas de compensação reativa em tempo real, permite uma compensação reativa com ajuste fino na média/alta tensão com as mesmas vantagens de sistemas na baixa tensão.

A justificativa técnica para esta especificação consiste em:

- Compensação de grupo de motores de Média Tensão
- Compensação de grupo de transformadores com primário em média/alta tensão
- Sistemas de geração eólica
- Sistemas espaciais, ferroviários e outros

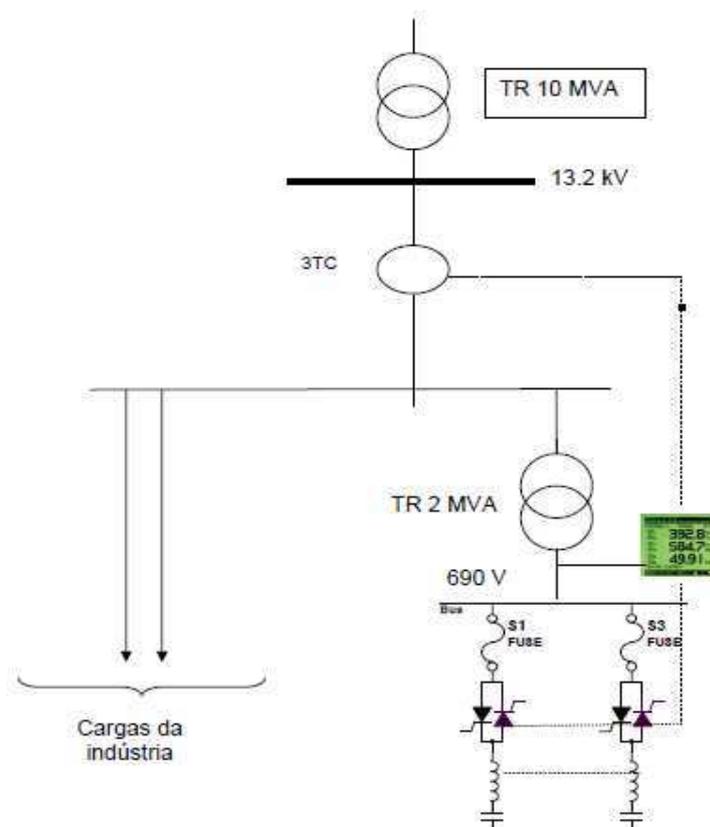


Figura 18 – Esquema da instalação utilizando transformado elevador

Compensação em tempo real em sistemas de geração eólica

A compensação de energia reativa nos turbogeradores eólicos construídos com geradores assíncronos é também um importante ponto de aplicação para a CRTR, pois estes equipamentos consomem energia reativa sob todas as condições de carga principalmente durante as partidas que ocorrem em qualquer instante do período de operação. Os valores da energia reativa de partida são extremamente altos, sendo proporcional a três ou quatro vezes a própria potência nominal da turbina em kW. Essa energia reativa é sempre importada da rede e não produzida pelo gerador.

Durante o regime de partida, de forma a reduzir o impacto da conexão do gerador à rede, o procedimento de “start-up” da turbina é extremamente controlado. Depois da liberação dos rotores, existe um intervalo de tempo até que a rotação suficiente seja alcançada. Neste momento os tiristores de partida da turbina começam a disparar em uma condição de partida suave, reduzindo os impactos mecânicos e elétricos quando da conexão do gerador a rede. Neste período de ordem de 30 a 35 ciclos de rede, a distorção de corrente é extremamente alta, com baixa presença ou até inexistência da corrente fundamental.

O sistema de compensação de reativos próprio da turbina é desabilitado neste período, de forma a prevenir a amplificação da distorção e proteger o sistema de compensação de danos inevitáveis. Quando os tiristores completam a sequência de conexão com tempo de 2 segundos, o contacto principal fecha, assumindo a operação no lugar dos tiristores, conectando a turbina a rede. O sistema de compensação de energia reativa da turbina é então habilitado.

Dessa forma o impacto do alto consumo de energia reativa de partida na rede é considerável porém a tensão da rede cai drasticamente. O consumo de energia da turbina eólica depende, sobretudo, do nível de carga da saída do gerador. Os geradores podem operar em todas as condições de carga, o fator de potência varia inversamente com a potência de geração, isto é, nos períodos de baixa carga o sistema opera com baixo fator de potência.

A compensação destes reativos nas condições clássicas com contadores manobrando capacitores possui além das limitações já consideradas, a limitação própria do sistema convencional as flutuações de carga, e a necessidade dos capacitores serem descarregados para um novo ciclo de operação.

É normal considerar que durante operação nominal, o sistema de compensação convencional não consegue compensar as flutuações típicas da carga, obtendo-se uma sequência de sobre e sub-compensação de energia reativa e seus reflexos diretos na tensão de fornecimento.

A fig. 19 mostra o registro das potências ativas e reativas de uma turbina de 1,3 MW operando em condições normais de regime, sem compensação de reativos.

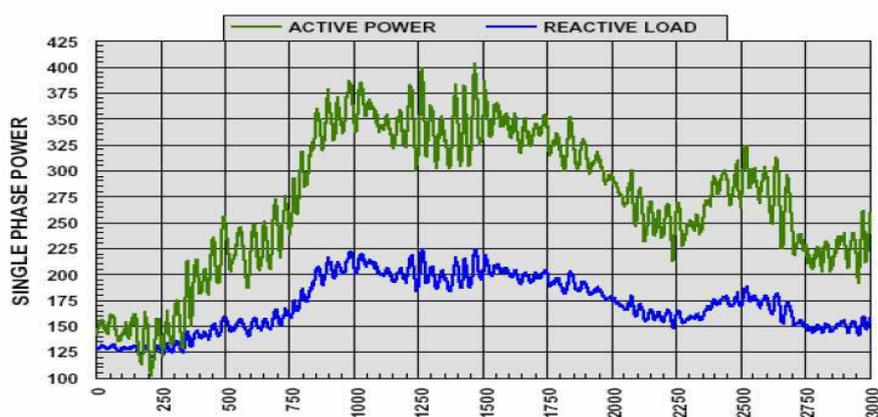


Figura 19 – Potência ativa e reativa em uma turbina

A situação ideal, que é promovida pela compensação em tempo real, possibilita a compensação reativa ciclo a ciclo, mantendo o fator de potência em 100%. A corrente no transformador passa a ser devido à potência ativa do gerador, não consumindo reativos da rede.

Para a mesma turbina de 1,3 MW com sistema de compensação em tempo real com chaveamento via tiristores e banco capacitivo de 660 kVar conectado ao secundário do transformador em “loop-fechado” usando somente as medições próprias para controle de operação pode-se observar que a tensão não varia bruscamente com relação ao sistema sem a compensação em tempo real. Fig 20.

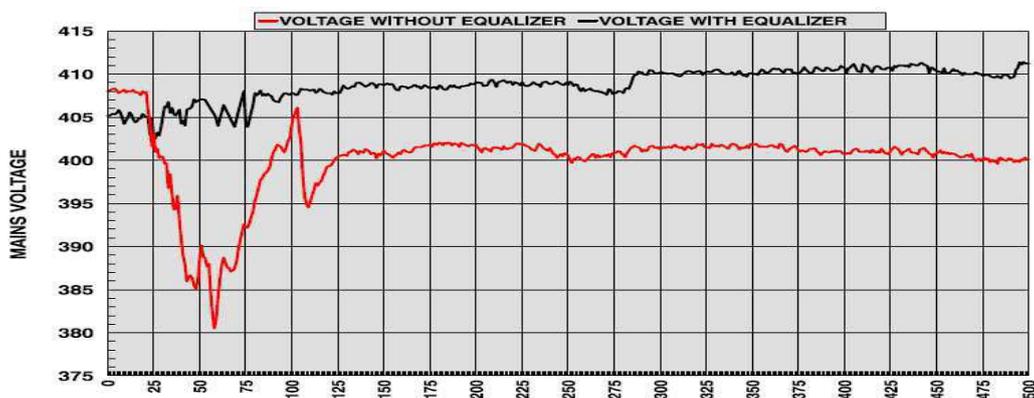


Figura 20 – Tensão na rede com e sem a compensação em tempo real

6. Estudo realizado em uma das plantas da fábrica de baterias Moura

Durante o mês de novembro de 2012 foram realizadas medições elétricas na mais nova unidade da empresa Acumuladores Moura S/A, responsável pela fabricação de baterias industriais. Tais medições foram realizadas especificamente na planta composta por cargas que correspondem à formação de baterias, ou seja, cargas compostas na sua maioria por retificadores e descarregadores.

Por serem retificadores e descarregadores que transformam corrente alternadas em corrente contínua e vice-versa, os mesmos apresentam componentes semicondutores responsáveis pelo chaveamento dos conversores, ou seja, tiristores que fazem com que sejam inseridos uma grande quantidade de harmônicos. De uma forma geral, essas cargas possuem correntes distorcidas da ordem de 30% de distorção total harmônica de corrente, com predominância da 5ª harmônica e fator de potência da ordem de 70%.

Diante disto se fez necessário compensar a energia reativa consumida pela carga e manter as distorções harmônicas dentro dos parâmetros definidos pela norma IEEE 519 na qual especifica que a THDV deve ser no máximo de 5% e em casos mais gerais e até 10% em casos específicos, quando a fonte alimenta somente um tipo de carga, como é este caso. A norma IEC 61000 e o prodist módulo 8, documento este emitido pela ANEEL apresenta limites entre 8% e 10% para a distorção de tensão.

6.1 Metodologia

As medições foram feitas em transformadores com potenciais menores daqueles que efetivamente existiram no projeto em implantação, a simples leitura dos resultados da distorção de tensão atual não seria reproduzida na condição futura. Então se fez necessário tomar o espectro de correntes harmônicas das cargas atuais conhecidas e medidas, simulando o comportamento da distorção de tensão em um trafo de 2000 kVA. Diante destas situações foram efetuadas algumas simulações baseadas nos métodos e soluções aplicáveis estudados até então.

6.2 Resultados

1. Fluxo de carga e espectro das tensões harmônicas

A planta sem a compensação de reativos apresentava uma demanda de carga de 1,7 MVA e fator de potência no secundário do trafo da ordem de 70%, consumindo aproximadamente 1200 kvar conforme fig.18. A distorção total de tensão (THDV) no secundário era da ordem de 10% fig.22.

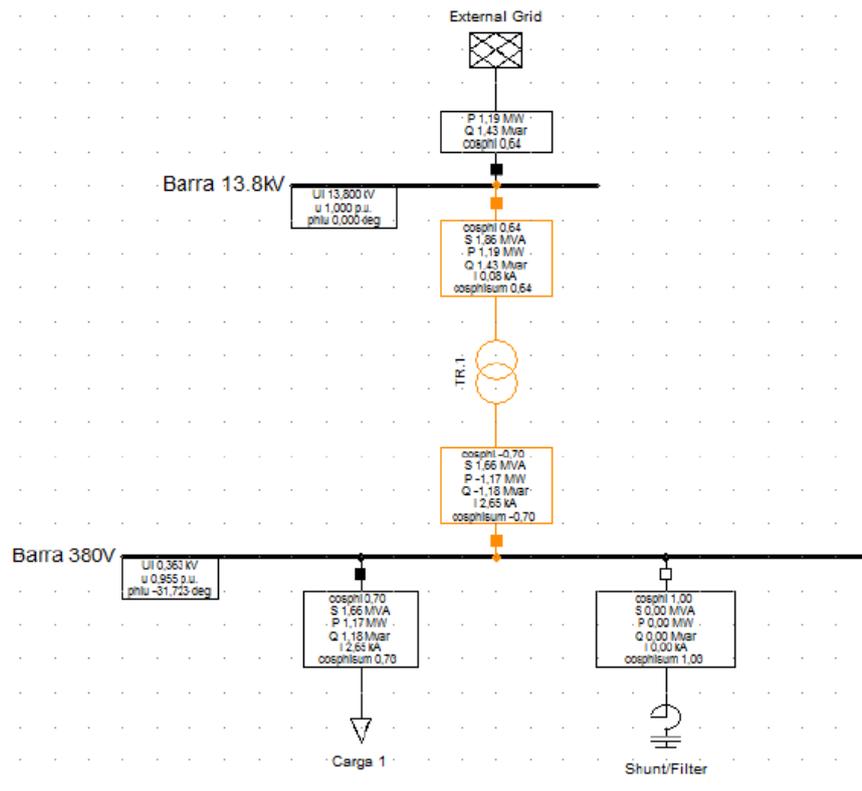


Figura 21 – Fluxo de carga sem o filtro sem filtro

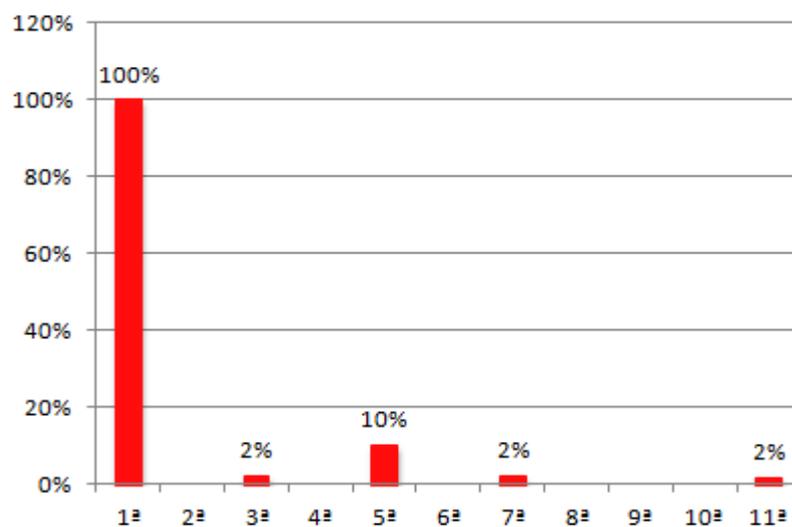


Figura 22 – Espectro das distorções de tensões harmônicas sem filtro

2. Compensação de reativos com banco capacitivo e reator antiressonante

Para a compensação de reativos neste caso foi realizada a simulação utilizando um banco capacitivo de 1440 kvar com reator antiressonante. O uso do reator se faz presente neste caso devido ao tipo de carga da planta, em que apenas o uso do banco capacitivo faria com que o mesmo entrasse em ressonância em algum momento. Então apresenta-se uma nova demanda de carga no transformador com cerca de 1,3 MVA e um novo fator de potência no secundário e no primário do trafo da ordem de 99%, porém a THDV da ordem de 6,5%, ou seja, houve uma queda na distorção total de tensão devido a correção do deslocamento de fase, mas não tão considerável para efeito de escolha dessa solução, o que comprova que as cargas são realmente não-lineares.

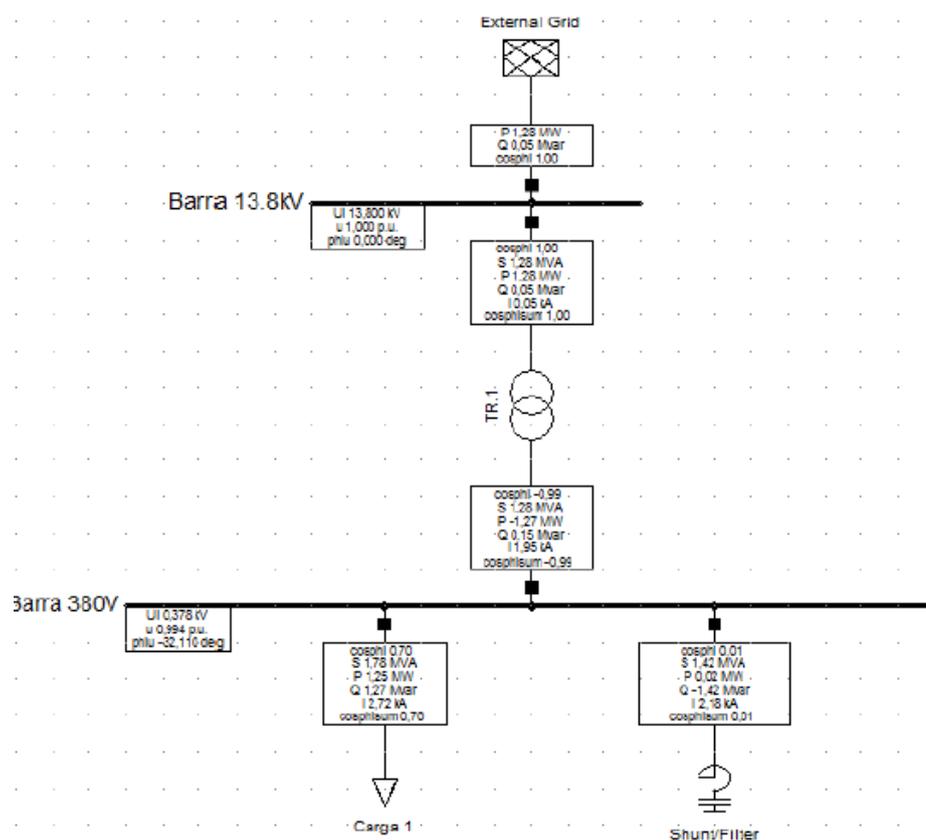


Figura 23 – Fluxo de carga com reator antiressonante

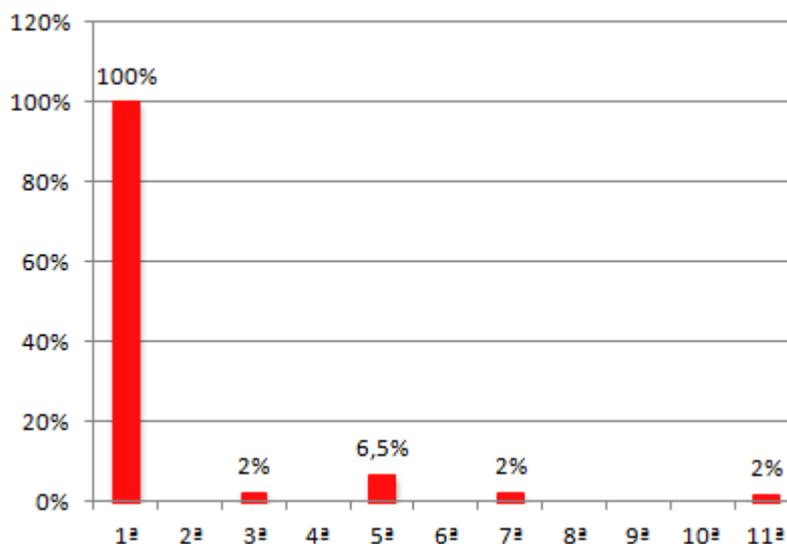


Figura 24 – Espectro das distorções de tensões harmônicas com reator antiressonante

3. Compensação de reativos com banco capacitivo e reator sintonizado na 5ª harmônica

Utilizando a solução adotada no item anterior, porém com o uso de reatores com impedância adequada à sintonização da 5ª harmônica pode-se observar na fig. 25 que a solução promove outro cenário de resultados quanto à distorção de tensão, assumindo valores de THDV da ordem de 1%.

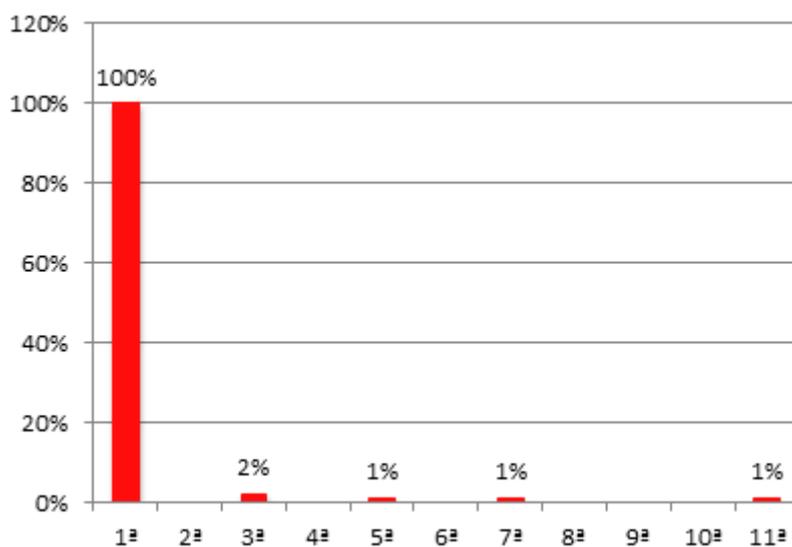


Figura 25 – Espectro de harmônicas de tensão com filtro sintonizado

4. Solução mista: compensador de energia reativa antiressonante e filtro ativo.

A solução mista promove a eliminação das correntes harmônicas pelos filtros e da energia reativa pelo compensador e se apresenta na maioria das vezes como uma boa

relação de custo benefício em relação à solução somente para filtros ativos; notar que o uso de capacitores sem reatores antiressonantes nesta aplicação não é recomendado, uma vez que caso o filtro ativo deixe de operar por alguma razão, os capacitores poderão entrar em ressonância com consequências imprevisíveis.

Os resultados são semelhantes aos da solução do item “3”; com redução ainda maior da distorção de tensão em torno de 1%.

5. Compensação de reativos com o uso de filtro ativo

Nesta aplicação o filtro de harmônicas deve compensar tanto a defasagem da corrente fundamental para a compensação reativa como para filtrar as harmônicas gera um fator ordem de 99% com a THDV da ordem de 0,2%.

7. Considerações finais

O trabalho proposto apresenta estudos, teórico, prático com embasamento em simulações referente à análise das distorções harmônicas e correção de fator de potência, abordando os principais métodos para solucionar os distúrbios provocados por cargas não lineares equilibradas. O conhecimento e aprofundamento deste tema é fundamental, para que grandes consumidores de energia elétrica cujo controle da qualidade de energia é de responsabilidade da mesma e não da concessionária de energia, usem esse conhecimento para reduzir o consumo de energia elétrica e evitem a penalização por não cumprirem as normas impostas pelas agências regulamentadoras.

Com o estudo foi expostos neste trabalho os vários tipos filtros para as mais diversas aplicações sendo demonstrado a partir do embasamento teórico as vantagens e desvantagens do filtro ativo em relação ao passivo. Em seguida foi realizada uma simulação comparando os filtros ativos com conversor fonte de tensão, um com três braços e quatro fios e outro com quatro braços e quatro fios, sendo a modulação por limite de corrente.

Concluindo o trabalho foi apresentado um estudo realizado em uma das plantas da fábrica de baterias Moura para compensação do fator de potência e distorções harmônicas demonstrando que embora os filtros ativos apresentem maior eficiência o mesmo não justifica o custo benefício dos filtros passivos com reator sintonizável que foi a escolha para correção dos distúrbios na planta da fabrica de baterias Moura.

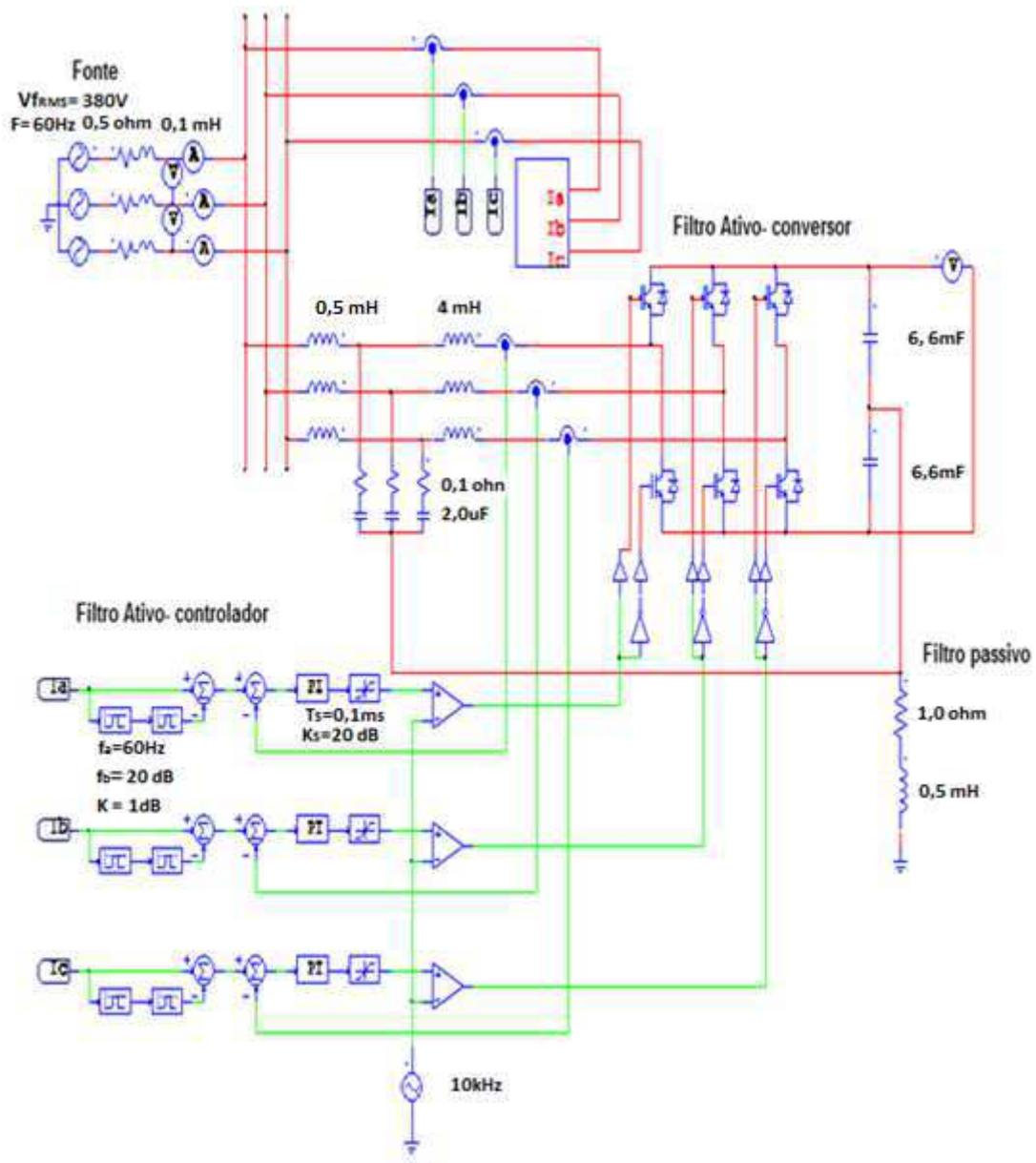
8. Referencias bibliográficas

- [1] FARIA, T. L. Filtro ativo paralelo trifásico para sistemas de baixa potência. Campina Grande, 2009. (Dissertação de mestrado- Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica/UFCG).
- [2] JÚNIOR, W. P. S. Conversores do tipo fonte de tensão trifásico em quatro fios: Proposta de implementação e estratégia de modulação por largura de pulso, São Paulo, 2007. (Dissertação de mestrado- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo).
- [3] INSTITUTE OF AND ELECTONICS ENGINEERS, IEEE Recommended Practices for Harmonic Contol in Electric Power System, IEEE 529 1992
- [4] NEGRETI, J. F. R. *et. al.* Desenvolvimento e simulação de um filtro ativo paralelo monofásico em Psim. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Sorocaba.
- [5] PROCEDIMENTO de Distribuição de Energia Elétrica – PRODIST, MÓDULO 8, Disponível em http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1877, Acesso em 21 jan. 2013.
- [6] *Software* PSIM® versão 9.0.
- [7] SOUZA, F. P. Correção do fator de potência para instalações de baixa potência empregando filtros ativos. Florianópolis, 2000, 210 folhas. (Tese de doutorado- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica/ UFSC).
- [8] STAROSTA, J. Compensação de energia reativa em tempo real. São Paulo, 31 folhas. (Ação engenharia).Disponível em <http://www.acaoenge.com.br/>, Acesso em 21 jun. 2013.
- [9] STAROSTA, J. Para que servem os capacitores em instalações elétricas de baixa tensão. São Paulo, 20 folhas. (Ação engenharia). Disponível em <http://www.acaoenge.com.br/>, Acesso em 21 jun. 2013.

9. Anexos

A. DIAGRAMA ELÉTRICO DO FILTRO ATIVO

Conversor fonte de tensão 3-braços 4-fios



B. DIAGRAMA ELÉTRICO DO FILTRO ATIVO

Conversor fonte de tensão 4-braços 4-fios

