

Tipos de Compensadores e Estratégias de Compensação para Cargas Lineares e Não-Lineares

H. K. Morales P.

F. P. Marafão

S. M. Deckmann

L. C. P. da Silva

Resumo – Neste trabalho são apresentadas e discutidas diferentes topologias de compensadores (passivos e ativos) para a melhoria das condições de fornecimento de energia elétrica. Neste sentido é demonstrado que um mesmo tipo de compensador pode ser eficiente em uma determinada condição e ineficiente em outras, dependendo da instalação e do tipo de carga a ser compensada. Estas discrepâncias entre compensadores foram confirmadas através de simulações computacionais.

Palavras chaves – cargas lineares, cargas não lineares, compensadores passivos, compensadores ativos.

I. INTRODUÇÃO

Durante muito tempo, as companhias de distribuição de energia elétrica têm imposto aos consumidores industriais limites apenas para a potência reativa consumida. A solução normalmente adotada pelas indústrias tem consistido na utilização de bancos de capacitores para correção do fator de potência da instalação.

Mais recentemente, os problemas relacionados as componentes harmônicas de corrente que circulam na rede elétrica têm levado a aplicação de outras técnicas. Como consequência, a correção do fator de potência não se limita só a conexão de capacitores, mas adquire características muito mais complexas.

Neste sentido, considerando possíveis soluções para minimização dos impactos causados por não-linearidades e assimetrias do sistema polifásico, destaca-se as propostas dos chamados condicionadores (compensadores) de energia, sejam eles equipamentos baseados em componentes passivos (bancos de capacitores, filtros sintonizados), chaveados (CCT – capacitor chaveado por tiristores, RCT – reator chaveado por tiristores), ativos (filtros ativos de potência série e paralelo, UPS, restauradores dinâmicos de tensão, nobreaks, etc.) ou topologias híbridas (ativo-passivo). Tais equipamentos vêm sendo desenvolvidos e empregados para manter os indicadores de QEE dentro de limites pré-estabelecidos [1-10].

H.K. Morales P., L.C. P. da Silva e S.M. Deckmann são doutorando e professores na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, SP-Brasil. (e-mail: hmorales.sigmar@dsce.fee.unicamp.br, lui@dsee.fee.unicamp.br).

F. P. Marafão é professor no Departamento de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Estadual Paulista - UNESP, Sorocaba, SP – Brasil. (e-mail: fmarafao@sorocaba.unesp.br).

Assim, considerando as discussões e definições em torno do fator de potência nas condições atuais, com a presença de distorções e/ou desequilíbrios [7, 11-15], e possíveis tipos de compensadores para melhoria das condições de fornecimento e consumo de energia, este trabalho traz uma discussão de diversas topologias de compensadores, passivos e ativos, os quais podem apresentar melhores ou piores resultados em função do tipo de instalação e carga a ser compensada. O estudo visa demonstrar que um mesmo tipo de compensador pode ser extremamente eficiente em uma determinada condição e ineficiente em outras. As discussões apresentadas foram confirmadas através de simulações computacionais.

II. SOLUÇÕES PARA OS PROBLEMAS DE COMPENSAÇÃO DE DISTÚRBIOS

A seguir são apresentadas as soluções tradicionais (compensadores passivos) e modernas (compensadores eletrônicos – filtragem ativa) para o problema da compensação em equipamentos e instalações elétricas.

A. Compensadores passivos

Considerando sua atuação como compensador de reativos, os efeitos da compensação serão associados às perdas de transmissão pela razão da corrente do sistema (I_S) e a corrente ativa (I_R):

$$\frac{I_S}{I_R} = \frac{I_L}{I_L \cos \varphi} = \frac{1}{\cos \varphi} = \frac{1}{FP} \quad (I_H = 0)$$

$$\left(\frac{I_S}{I_R}\right)^2 = \frac{1}{FP^2}$$

Fig. 1. Sistema alimentando carga linear.

TABELA 1: RELAÇÃO ENTRE FP E AUMENTO DE PERDAS DE TRANSMISSÃO.

FP	I_S/I_R	$(I_S/I_R)^2$	Acréscimo de Perdas %
1.0	1.0	1.0	0
0.95	1.05	1.11	11
0.9	1.11	1.23	23
0.85	1.18	1.38	38

Nesta tabela verifica-se que com $FP = 0.85$ há um acréscimo de 38% nas perdas da rede. Isso já seria uma boa razão para se tentar maximizar o FP.

Considerando, carga mais compensador derivação ($I_h=0$).

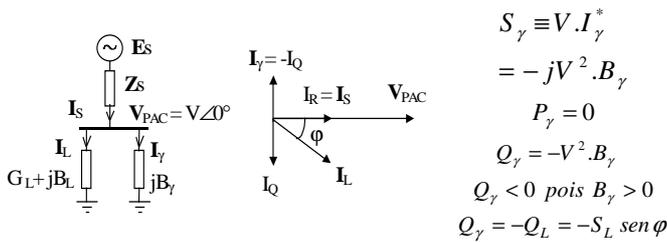


Fig. 2. Carga e compensador reativo em derivação (B_γ).

TABELA 2: RELAÇÃO ENTRE FP E CAPACIDADE LIBERADA.

FP= $\cos\phi$	$Q_\gamma/S_L=\text{sen}\phi$	$Q_\gamma\%$ de S_L
1.0	0	0
0.95	0.312	31
0.9	0.436	44
0.85	0.527	53

Neste caso nota-se que corrigir um FP de 0.85 significa dispor de 53% da capacidade dos VA que a carga demanda. Em um forno a arco, por exemplo, cujo FP é da ordem de 0.7 na condição de máxima potência, o consumo de reativos representa 71% da capacidade do forno. Fica evidente que os reativos devem ser compensados localmente para não sobrecarregar o alimentador.

O compensador reativo pode atuar como regulador de tensão, para o qual é preciso obter uma relação funcional entre variação de tensão e a variação de reativos. Tal relação pode ser a própria característica de regulação de tensão no ponto onde a carga esta conectada. Essa característica mede a rigidez elétrica com relação às variações de carga e é função do nível de curto-circuito local.

Também pode atuar como estimativa da variação da tensão com a carga, podendo ser estimada pela relação entre a potência reativa da carga e a potência de curto-circuito no ponto. Uma outra aplicação do compensador reativo é para balancear as fases, isto se consegue mediante a associação passiva de susceptâncias tais que, ligadas em paralelo com a carga, demandem potência total balanceada da fonte de suprimento.

Finalmente a compensação de reativos também pode ser feita na presença de harmônicas de corrente, neste caso a corrente do compensador deve incluir as componentes harmônicas:

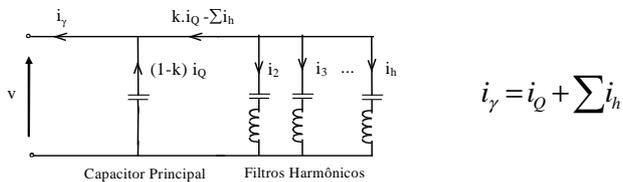


Fig. 3. Filtros passivos sintonizados nas harmônicas.

Uma fração $k.i_Q$, com $k \leq 1$, é suprida pelos filtros na frequência fundamental (60 Hz). Logo, o banco principal pode ser reduzido para $(1-k) Q_\gamma$, uma vez que os filtros fornecem kQ_γ na frequência fundamental. Pela figura seguinte pode-se notar que cada filtro harmônico tem característica predominante capacitiva na frequência fundamental ($X_{C1} > X_{L1}$).

Notar que a contribuição capacitiva do filtro na fundamental tende a crescer com a ordem da harmônica sintonizada.

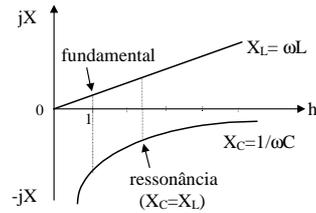


Fig. 4. Impedâncias indutiva e capacitiva em função da ordem harmônica.

Portanto, a instalação de filtros harmônicos passivos permite reduzir a necessidade de instalação de bancos capacitivos na rede, aliviando os custos desse tipo de compensação reativa.

Efeitos indesejados associáveis com a compensação passiva.

Sobretensões sustentadas sob carga leve: Nesta condição pode violar o limite máximo da tensão, prevista pela regulamentação 505 da ANEL. Portanto não é recomendável a concentração de bancos capacitivos com capacidade maior que 2% da capacidade de curto local;

Surtos de sobretensão transitória durante manobras: A manobra de banco de capacitores pode causar transitórios de tensão com picos de até 300% em relação a tensão nominal;

Ressonâncias sustentadas em frequências harmônicas: Na condição de ressonância, devido ao cancelamento das reatâncias indutivas e capacitivas podem ocorrer sobretensões devido a ressonância paralela e sobrecorrentes devido a ressonância série nos elementos do circuito.

Contudo, a solução de filtros passivos apresenta várias desvantagens: filtragem apenas para as quais foram sintonizados, precisam frequentemente ser sobre-dimensionados, uma vez que como não é possível limitar a sua operação a uma certa carga, o dimensionamento deve ser coordenado com as necessidades de potência reativa da carga, sendo difícil fazê-lo de forma a evitar-se que o conjunto opere com fator de potência capacitivo em algumas condições de funcionamento. Para ultrapassar estas desvantagens, esforços têm sido direcionados no sentido de desenvolver filtros ativos de potência.

B. Compensadores eletrônicos (filtragem ativa)

Compensadores com tal finalidade vêm recebendo cada vez mais a atenção dos especialistas em qualidade de energia elétrica, devido aos avanços nas técnicas de controle aplicados a dispositivos de eletrônica de potência, bem como em função do aprimoramento das técnicas de fabricação de chaves semicondutoras de potência. Atualmente já é possível através do controle eletrônico, atender praticamente a todas as necessidades de um compensador ideal:

- Ter resposta rápida, para compensar variações bruscas da tensão ou da corrente;
- Não apresentar perdas, para maximizar a eficiência na compensação;
- Apresentar ampla faixa de atuação, para atuar sobre as harmônicas superiores.

Além disto, há que se considerar as limitações dos compensadores discutidos até a seção anterior. De forma resumida, pode-se dizer que a partir de uma determinada referência idealizada, por exemplo, correntes senoidais e em

fase com a tensão, o compensador deve ser capaz de identificar o erro entre tal referência e a corrente do PAC e através de controladores em malha fechada, deve sintetizar através do conversor CC-CA a corrente necessária a ser injetada no sistema para que ele siga a referência determinada.

Compensadores deste tipo são muito mais efetivos do que os compensadores passivos baseados nos conceitos de compensação reativa descritos anteriormente, no entanto, ainda representam dispositivos de custo agregado maior, especialmente em países onde a tecnologia de semicondutores ainda não é dominada, como é o caso do Brasil. Dentre os principais compensadores eletrônicos propostos nos últimos anos, podemos generalizá-los em função da sua topologia de conexão com a rede.

Compensador eletrônico Paralelo: O filtro ativo de potência do tipo paralelo tem como função compensar os harmônicos e inter-harmônicos das correntes nas cargas, podendo ainda compensar a potência reativa (corrigindo o fator de potência) e equilibrar as correntes nas três fases (eliminando a corrente no neutro). Como resultado da atuação do filtro ativo paralelo, a corrente nas linhas torna-se senoidais, e a sua amplitude diminui, reduzindo as perdas nos condutores, e evitando distorções nas tensões de alimentação. A Figura 5 apresenta o esquema elétrico de um filtro ativo paralelo trifásico.

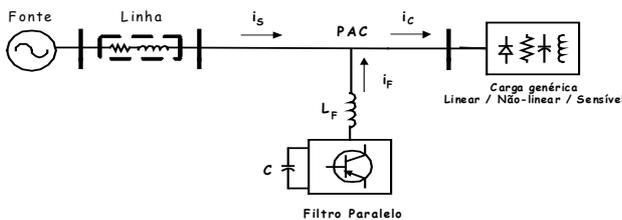


Fig. 5 – Compensador eletrônico em paralelo com a rede.

Compensador eletrônico Série: O filtro ativo de potência do tipo série (Fig. 6) é o dual do filtro ativo paralelo. A sua função é compensar as tensões da rede elétrica, para os casos em que estas contenham harmônicos, de forma a tornar as tensões na carga sinusoidais. Em certos casos, dependendo da duração dos fenômenos e da energia que o filtro ativo puder disponibilizar, é ainda possível compensar sobretensões, subtensões ou mesmo interrupções momentâneas.

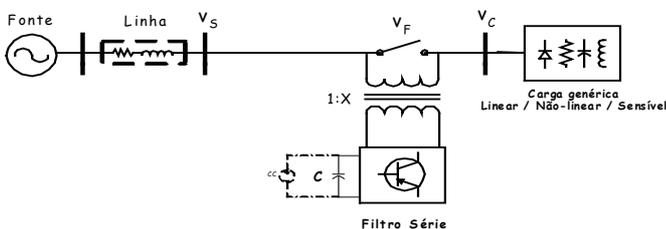


Fig. 6 – Compensador eletrônico em série com a rede.

Compensador eletrônico série – paralelo: Uma outra topologia bastante discutida, mas sem dúvida alguma a de maior custo de instalação, é a topologia de compensador eletrônico ou filtro ativo série-paralelo (vide Fig.7). Em tal topologia, os dois compensadores descritos anteriormente são projetados para trabalharem em conjunto, de forma que o

equipamento seja capaz de minimizar tanto os distúrbios de corrente, quanto os distúrbios da tensão em um determinado PAC.

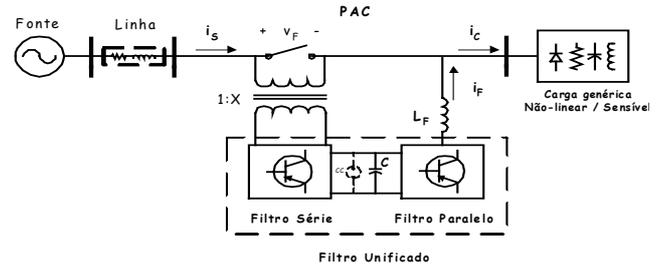


Fig. 7 – Compensador eletrônico série-paralelo.

Benefícios associáveis com compensação passiva e/ou eletrônica:

Considerando as observações e discussões das seções anteriores, poderíamos identificar os principais benefícios da compensação do fator de potência de uma instalação como:

Para o consumidor:

- Aumento do nível de tensão junto à carga;
- Melhora do fator de potência da instalação;
- Redução do carregamento do transformador de entrada;
- Evita aplicação de multas por baixo FP;
- Redução da distorção de corrente.

Para a concessionária:

- Melhoria do perfil de tensão na rede;
- Redução da corrente no alimentador;
- Redução das perdas ativas e reativa no alimentador;
- Melhora do fator de potência nas fontes de energia;
- Aumento da capacidade de suprimento de potência ativa pelo alimentador;
- Redução dos investimentos em expansão da rede;
- Melhora na relação fornecedor-consumidor.

Na abordagem que iremos adotar nas próximas seções, trataremos de quatro situações de especial interesse:

- Caso 1: Cargas lineares fixas;
- Caso 2: Cargas lineares variáveis;
- Caso 3: Cargas não-lineares fixas;
- Caso 4: Cargas não-lineares variáveis.

Em alguns destes casos, a tensão de alimentação do PAC foi considerada como senoidal, simétrica e equilibrada e em outros, foi imposta a presença de distorções.

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos com o auxílio do simulador MatLab/Simulink, onde foram implementadas distintas situações de carga e de tensão de alimentação para averiguar o comportamento de alguns dos compensadores descritos. Na Fig. 8, o bloco nomeado de “Medição” foi implementado com a função do Matlab de interpretar algoritmos em linguagem C (S-Function Block) e em tal bloco, foram implementados os cálculos de potência e fator de potência, como propostos em [7,12].

III. COMPENSAÇÃO REATIVA DE CARGAS LINEARES

A. Carga Linear Balanceada Indutiva – tensões senoidais:

A primeira simulação trata do sistema descrito na Fig. 8, com uma carga considerada do tipo RL e balanceada. A TABELA 3 apresenta os dados do sistema simulado.

TABELA 3 – DADOS DO SISTEMA ELÉTRICO SIMULADO PARA O CASO 1.

Fonte	Linha	Carga (Y)
$V_a=220\angle 0^\circ$	$R=21\text{m}\Omega$ $L=55\mu\text{H}$	$R_a=1.089\Omega$ $L_a=2.5\text{mH}$
$V_b=220\angle -120^\circ$	$R=21\text{m}\Omega$ $L=55\mu\text{H}$	$R_b=1.089\Omega$ $L_b=2.5\text{mH}$
$V_c=220\angle 120^\circ$	$R=21\text{m}\Omega$ $L=55\mu\text{H}$	$R_c=1.089\Omega$ $L_c=2.5\text{mH}$
Impedância do neutro: $R=21\text{m}\Omega$ $L_n=140\mu\text{H}$		

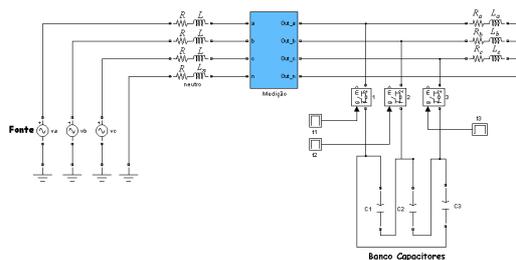


Fig. 8. Sistema Elétrico Simulado para Carga Linear Balanceada – Com Entrada do Banco de Capacitores (Caso 1).

Neste caso, o projeto do banco de capacitores deveria elevar o FP para 0,95, o que resultou em $C=0,25\text{ mF}$.

TABELA 4 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA O CASO 1.

	Antes da Compensação	Após Compensação
$S_c =$	96825,3185 VA	77931,0274
$P =$	73212,5647 W	74074,3466
$Q_1 =$	63653,1468 var	24212,315 var
$I_c =$	149,70 A	119,7929
$V_e =$	215,59 V	216,8492
$FP =$	0,7561	0,9505

Com a entrada do banco de capacitores o fator de potência é corrigido para 0,9505, o que pode ser observado pela comparação dos valores da TABELA 4, obtida através do bloco de medição mencionado.

Outro efeito interessante de ser observado é o aumento da potências ativa ($P - 1,2\%$) consumida, em função da redução da queda de tensão na impedância da linha e consequente aumento da tensão sobre o PAC da carga. Além dos benefícios ao consumidor em função de redução de multas ou tarifação correspondente a um baixo fator de potência, tal acréscimo de potência ativa consumida, de uma forma geral, pode vir a representar um incentivo para as próprias concessionárias de energia no que diz respeito a políticas e estratégias de compensação de reativos.

B. Carga Linear Balanceada Indutiva – tensões não-senoidais: Utilizando o mesmo sistema elétrico da Fig.8, porém, com 5% de sétima harmônica na fonte de alimentação, uma nova simulação foi realizada para verificar o comportamento do banco na presença de harmônicos vindos da fonte. Com o mesmo banco de capacitores do caso anterior verifica-se que o fator de potência é corrigido, mas, não para o valor calculado como no caso anterior (0,95), conforme demonstra a TABELA 5.

Além disso, é importante observar que neste caso, a distorção da tensão da rede excitou a ressonância LC formada entre o banco de capacitores e a carga indutiva, o que resultou em tensões e correntes com taxas de distorção (DHT) mais elevadas após a compensação. Isto ocorre em virtude da circulação da sétima harmônica pelo banco de capacitores.

TABELA 5 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA O CASO 1.

	Antes da Compensação	Após Compensação
$S_c =$	96945,3375 VA	80120,4204 VA
$P =$	73217,6033 W	74083,7144 W
$Q_1 =$	63599,76 var	24339,54 var
$I_c =$	149,70 A	122,8768
$V_e =$	215,86 V	217,346 V
$FP =$	0,7552	0,92465
$DHT_v =$	4,99 %	6,89 %
$DHT_i =$	1,12 %	22,86 %

Em seguida, um novo caso foi gerado, alterando-se agora a ordem harmônica. O caso seguinte é composto de 5% de terceira harmônica na fonte de alimentação.

Utilizando o mesmo banco de capacitores do caso anterior, verifica-se que o fator de potência é corrigido para um valor ainda inferior ao de projeto, mas superior ao caso com sétima harmônica (TABELA 6). Observar que as distorções de tensão e corrente também são muito menores do que no caso anterior. Isto se deve ao fato de que as componentes de terceira harmônica de corrente circularem pelo condutor de retorno (neutro) e não pelo banco capacitivo.

TABELA 6 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA O CASO 1.

	Antes da Compensação	Após Compensação
$S_c =$	96947,06 VA	78060,99 VA
$P =$	73240,27 W	74096,09 W
$Q_1 =$	63599,55 var	24340,00 var
$I_c =$	149,82 A	119,946
$I_n =$	9,261 A	9,261 A
$V_e =$	215,69 V	216,93 V
$FP =$	0,7552	0,9492
$DHT_v =$	3,07 %	3,05 %
$DHT_i =$	4,14 %	5,158 %

IV. COMPENSAÇÃO REATIVA DE CARGAS LINEARES VARIÁVEIS

A. Carga Linear Balanceada Indutiva Variável – tensões senoidais:

Neste caso, o sistema simulado inicia com uma carga de $(3R + 3L)$, em seguida no instante 0,2 s entram mais duas cargas $(3R + 3L)$ em paralelo, com o fechamento da chave T1 e T2. No instante 0,8 s sai uma carga $(3R + 3L)$ com a abertura da chave T2, restando apenas duas cargas $(3R + 3L)$ até o instante 1s. Tal simulação configura uma situação semelhante a ilustrada nas Fig. 8 e pode ser representada pela Fig. 9.

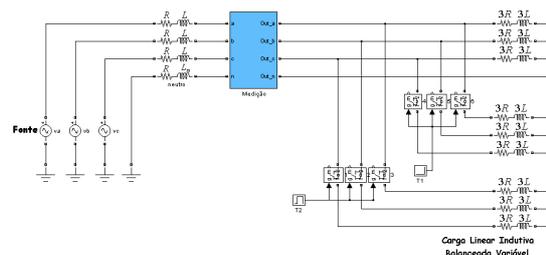


Fig. 9 – Sistema Elétrico Simulado para Carga Linear Indutiva Balanceada Variável (caso 2).

A Tabela 7 apresenta os valores de potência, fator de potência, tensão e corrente, antes e após a compensação. Observar a diferença de valores entre os três intervalos definidos.

TABELA 7-RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA O CASO 2.

	0 – 0,2 s		0,2 – 0,8 s		0,8 – 1 s	
	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após
P (kW)	25,07	25,17	73,20	74,05	49,43	49,85
S (kVA)	33,15	26,48	96,80	77,90	65,25	52,44
FP	0,7562	0,9505	0,7562	0,9506	0,7576	0,9505
Q1+ (kVar)	22	8,40	63,50	24,20	42,70	16,36
Ve (V)	218,51	218,93	215,59	216,83	217,04	217,87
Ie (A)	50,58	40,32	149,67	119,76	100,21	80,23

No caso de carga indutiva variável, algumas possibilidades podem ser consideradas. Por exemplo, poder-se-ia projetar um único banco de capacitores, pela média da potência reativa, tomando-se o cuidado de averiguar se nos períodos de maior carga, o fator de potência não estaria abaixo dos 0,92 e se nos períodos de menor carga, se a sobre-compensação não estaria resultando em um acréscimo da tensão nominal para fora dos limites permitidos.

Outra possibilidade é o projeto de bancos de capacitores variáveis (chaveados), com base no perfil da potência. Esta foi a estratégia adotada para as simulações. Desta forma, conhecendo-se a característica de variação das cargas ao longo do tempo (diária, por exemplo), pode-se variar o valor dos capacitores do banco, em função de garantir o FP desejado ao longo de um dia. Com a entrada dos capacitores o fator de potência é corrigido em todos os intervalos de tempo para 0,9505, conforme indica a TABELA 7

V. COMPENSAÇÃO REATIVA DE CARGAS NÃO-LINEARES FIXAS

A. Carga Não-Linear Balanceada: A Fig. 10 mostra o sistema simulado para carga não-linear balanceada. Os dados deste sistema encontram-se descritos na TABELA 8.

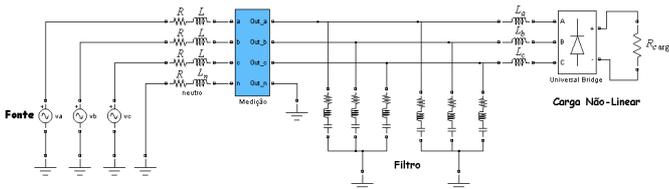


Fig. 10 – Sistema Elétrico Simulado para Carga Não Linear – Filtragem passiva de corrente em carga não-linear (Caso 3).

A carga não-linear é composta por uma ponte retificadora a diodos trifásica com indutâncias na entrada da ponte. Esta ponte retificadora alimenta uma resistência de 1,95 Ω (R_{carga}).

TABELA 8 – DADOS SISTEMA ELÉTRICO SIMULADO PARA O CASO3.

Fonte	Linha	Carga Não-Linear
$V_a=220\angle 0^\circ$	$R=21m\Omega$ $L=55\mu H$	$L_a=1.5mH$
$V_b=220\angle -120^\circ$	$R=21m\Omega$ $L=55\mu H$	$L_b=1.5mH$
$V_c=220\angle 120^\circ$	$R=21m\Omega$ $L=55\mu H$	$L_c=1.5mH$
Impedância do neutro: $R=21m\Omega$ $L_n=140\mu H$		

Para corrigir o fator de potência da carga, foram instalados filtros passivos sintonizados conectados em derivação, Fig. 10. Na frequência fundamental, os diferentes filtros apresentam a mesma reatância capacitiva, de modo que contribuem para a correção do fator de potência de forma igualitária.

TABELA 9 – PARÂMETROS DO FILTRO CASO 3.

	Quinto Harmônico	Sétimo Harmônico
R =	0,0314 Ω	0,0330 Ω
L =	0,34 mH	0,1726 mH
C =	0,832 mF	0,832 mF

TABELA 10 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA O CASO 3.

	Antes da Compensação	Após Compensação
$S_c =$	100771,97 VA	92120,41 VA
P =	82722,05 W	85553,98 W
$Q_1^+ =$	56926,49 var	34170,21 var
$I_c =$	155,87 A	140,65 A
$V_{c=} =$	215,51 V	218,31 V
FP=	0,8209	0,9287
DHT _v	0,92 %	0,3862 %
DHT _i	9,70 %	3,276 %

A TABELA 10 apresenta os dados referentes as potências, tensões, correntes e taxas de distorção para o sistema simulado, antes e após a conexão dos filtros sintonizados. Observar a elevação do fator de potência para dentro do limite permitido pela norma brasileira, bem como a redução da DHT de tensão e corrente após a instalação dos filtros.

A TABELA 11 por sua vez, indica a redução da corrente que circula da rede para o PAC onde a carga e os filtros estão instalados.

TABELA 11 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA O CASO 3.

h	Antes da compensação	Após a compensação
I_1	155,12 A	140,58 A
I_5	13,95 A	3,95 A
I_7	5,00 A	1,52 A

B. Carga Não-Linear Balanceada – tensões não-senoidais: Para o caso seguinte, foi inserida uma distorção de 2 % de quinto harmônico na fonte de alimentação. Os filtros continuam sintonizados para o 5ª e 7ª harmônico, conforme a TABELA 9. Tal distorção da tensão é suficiente para excitar a ressonância do filtro sintonizado no quinto harmônico, resultando em correntes ainda mais distorcidas do que no sistema não-compensado, conforme ilustrado na TABELA 12.

Considerando uma “dessintonia” de 5% abaixo do 5ª harmônico, ocorre uma redução deste componente na corrente, conforme indicado nas TABELA 12 e 13. Entretanto, como pode ser observada, nos casos onde tais ressonâncias são excitadas, a distorção da corrente ainda pode resultar bastante elevada.

TABELA 12 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA O CASO 3.

	Filtro Sintonizado	Filtro Dessintonizado
$S_c =$	96166,88 VA	94037,27 VA
P =	85745,43 W	85599,39 W
$Q_1 =$	34299,57 var	34425,44 var
$I_c =$	146,83 A	143,57 A
$V_{c=} =$	218,32 V	218,33 V
FP=	0,8916	0,9103
FP _i =	0,9281	0,9275
DHT _v =	0,554 %	0,844 %
DHT _i =	29,69 %	20,64 %

TABELA 13 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA O CASO 3.

h	Filtro Sintonizado	Filtro Dessintonizado
I_1	140,76 A	140,60 A
I_5	41,71 A	28,92 A
I_7	1,06 A	1,06 A

VI. COMPENSAÇÃO REATIVA DE CARGAS NÃO-LINEARES VARIÁVEIS

A. Filtro Ativo Paralelo: Considerando-se 3% de 7ª harmônica e 4% de desequilíbrio entre as tensões das fases B e C, observe que se o filtro ativo tiver seu controle projetado para eliminar, por exemplo, a parcela de corrente de dísturbio (id), garantindo assim que a corrente compensada resulte senoidal e equilibrada, o FP após a compensação pode ser praticamente unitário e o desequilíbrio da corrente eliminado.

Tal estratégia de controle é usualmente denominada “Síntese de Corrente Senoidal (SCS)” e os resultados podem ser observados na Fig. 11. Considerando as curvas de cima para baixo, notar que independentemente da distorção da tensão e do comportamento não-linear da carga, após a conexão do filtro em 50ms, as correntes compensadas passam a ser senoidais e equilibradas, bem como a potência não-ativa (qabc) é minimizada e conseqüentemente, o FP é elevado a unidade (pf_med).

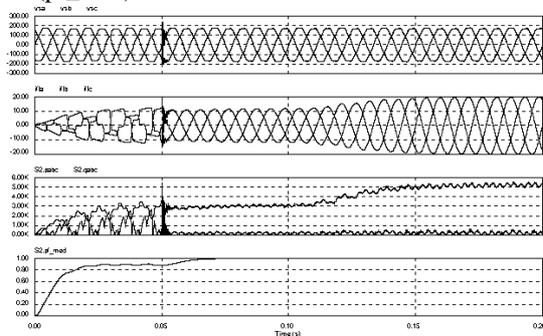


Fig. 11 – Filtro Paralelo com estratégia de compensação SCS (caso 4).

Consideremos agora uma situação onde uma a carga indutiva, estivesse conectada no mesmo PAC e para sua compensação, tivesse sido acrescentado um banco de capacitores de tal forma que a frequência de ressonância do sistema fosse próximo a 7ª harmônica presente na tensão.

Neste caso, considerando o mesmo filtro ativo da simulação anterior, o resultado da compensação pode ser observado na Fig. 12. Notar que o filtro ainda é capaz de garantir uma corrente senoidal para o PAC compensado, bem como elevar o fator de potência. Entretanto, não é capaz de melhorar o perfil das tensões do FAP, em virtude da ressonância excitada.

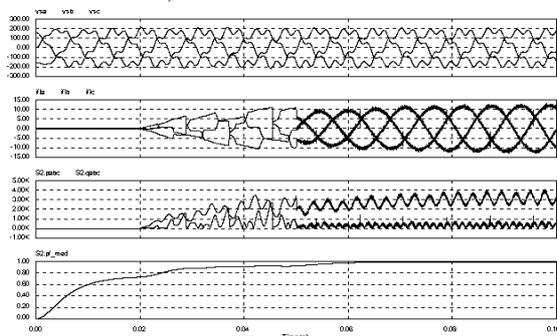


Fig. 12 – Filtro Paralelo com estratégia de compensação SCS e PAC com ressonância na 7ª harmônica (caso 4).

Nesta situação, se o controle do filtro ativo for alterado para uma estratégia, como por exemplo, “Síntese de Carga Resistiva (SCR)” [3], a qual garante que a corrente no PAC deve possuir a mesma forma de onda da tensão, como no caso

de um resistor linear, o resultado da compensação pode ser observado na Fig. 13 a seguir:

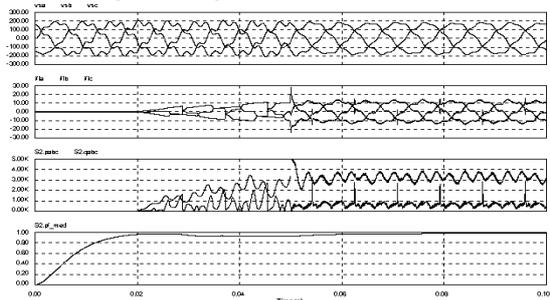


Fig. 13 – Filtro Paralelo com estratégia de compensação SCR e PAC com ressonância na 7ª harmônica (caso 4).

Notar que neste caso, além de elevar o fator de potência, o filtro ativo é capaz de reduzir, através de um efeito de amortecimento eletrônico, as oscilações da tensão em função da ressonância mencionada. É claro que neste caso, a distorção da corrente fica vinculada a distorção da tensão do PAC.

Estas duas simulações de filtros ativos com estratégias de compensação distintas servem para ilustrar que não basta a escolha de uma topologia [1], mas também, a escolha da estratégia de compensação e controle para garantir resultados ótimos para cada instalação a ser compensada [2,3]. A boa notícia é que como atualmente, grande parte destes dispositivos podem ser controlados digitalmente, não deve ser extremamente difícil alterar os códigos que definem as características de interesse, alterando assim os resultados da compensação.

B. Filtro Ativo Série: A Fig. 14 ilustra o funcionamento do filtro série em um PAC onde as tensões eram desequilibradas em 2% e distorcidas em 5% de 3ª e 5ª harmônicas. Além disto, no instante 75ms foi imposto um afundamento de 40% em uma das tensões de fase. Observar que o filtro ativo é capaz de injetar a tensão necessária para eliminar os harmônicos o desequilíbrio e até mesmo o afundamento de tensão, garantindo assim, tensões limpas e constantes para as cargas sensíveis (v1a, v1b, v1c).

Na Fig. 15, condições semelhantes de desequilíbrio e distorção foram impostas, entretanto, foi inserido um afundamento trifásico no PAC. Notar que o filtro é capaz de eliminar os distúrbios da mesma forma do que no caso anterior. Para estas duas simulações, a estratégia de compensação do filtro ativo série foi baseada na eliminação da tensão de dísturbio (vd) (vide [16]).

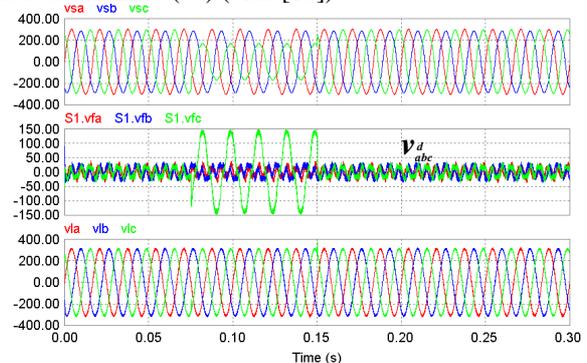


Fig. 14 – Filtro Série para – desequilíbrio, distorções e afundamento monofásico (caso 4).

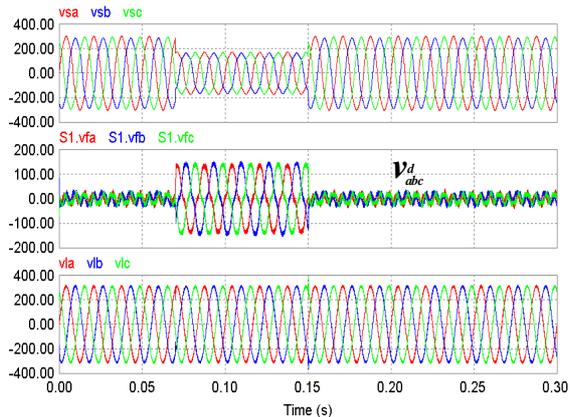


Figura 15 – Filtro Série para – desequilíbrio, distorções e afundamento trifásico (caso 4).

VII. CONCLUSÕES

Conforme discutido nas seções anteriores, são várias as possibilidades e os tipos de compensadores capazes de elevar o fator de potência, equilibrar ou reduzir as distorções das tensões e correntes. Entretanto, em algumas situações específicas, um determinado compensador que seria perfeitamente aplicável para uma situação, pode ser prejudicial ou menos efetivo em outra, como no caso dos filtros passivos sintonizados com tensões distorcidas ou no caso do filtro ativo paralelo, com síntese de corrente senoidal, em um PAC com algum tipo de modo ressonante.

Além disto, vale ainda destacar que cada tipo de compensador, em virtude de suas características construtivas e tecnologia empregada, pode possuir custos de instalação bastante diferenciados.

Por fim, apesar de não terem sido abordados neste trabalho, destaca-se a importância dos estudos relativos as topologias híbridas (compensadores passivos em conjunto com compensadores eletrônicos), como uma alternativa à melhoria da qualidade de compensação dos compensadores passivos, aliados a redução de custo se comparados a compensadores tipicamente eletrônicos (ativos).

VIII. REFERÊNCIAS

- [1] F. Peng and D. Adams. "Harmonic sources and Filtering approaches", *IEEE Industry Application Society Conference*, pp. 1-8, 1999.
- [2] F.P. Marafão, S.M. Deckmann, A. J. Pomilio, and R. Q. Machado. "Selective disturbance compensation and comparisons of active filtering strategies", *IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2002. ISBN 0-7803-7672-2.
- [3] T. E. N. Zuniga and J. A. Pomilio: "Shunt Active Power Filter Synthesizing Resistive Load", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 17, no. 2, March 2002.
- [4] A. Ghosh, G. Ledwich. *Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices. Power Electronics And Power Systems*. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [5] M. Aredes, R.M. Fernandes, U.A. Miranda, J.L.S Neto and A.A. Cordeiro, "Simulation study of a low-cost series compensator for voltage sags, harmonics and unbalances applied to a practical system", *Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, 2003.
- [6] V. Staudt and H. Wrede. "Compensation strategies for four-conductor systems", *Sixth International Workshop on Power Definitions and Measurements under Non-sinusoidal Conditions*, pages 139- 146, 2003. Milan-Italy.
- [7] F.P. Marafão, "Análise e Controle da Energia Elétrica através de Técnicas de Processamento Digital de Sinais", Tese de Doutorado, FEEC/UNICAMP, 2004.
- [8] S.M. Deckmann, J.A. Pomilio, E.A. Mertens e L.F.S. Dias, "Uso de Filtros Passivos em redes de distribuição com cargas não-lineares", *Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*, Gramado, 2004.

- [9] S.M. Deckmann, J.A. Pomilio, E.A. Mertens e L.F.S. Dias, A.R. Aoki, M.D. Teixeira, e F.R. Garcia, "Capacitive Compensation in Distribution with Non-linear Voltage Type Loads", *Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência (COBEP)*, Recife, 2005.
- [10] J. A. Pomilio, S.M. Deckmann, "Characterization and compensation for harmonics and reactive power of residential and commercial loads", *Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência (COBEP)*, Recife, 2005.
- [11] Czarnecki L.S., Lasicz A. "Active, Reactive and Scattered Currents in Circuits with non-periodic Voltage of a finite Energy". *IEEE Trans. on Instrument. Measurements*. IM-37, no.3, 1988.
- [12] IEEE Std 1459-2000. "IEEE Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions", 2000.
- [13] M. Depenbrock, "Quantities of a Multi-Terminal Circuit Determined on the Basis of Kirchhoff Laws", *Fourth International Workshop on Power Definitions and Measurements Under Nonsinusoidal conditions*, pp. 29-36, Milan-Italy, 1997.
- [14] P. Tenti, P. Mattavelli, "A time-domain approach to power term definitions under non-sinusoidal conditions", *Sixth International Workshop on Power Definitions and Measurements under Non-Sinusoidal Conditions*, Milan, 2003.
- [15] J. L. Willems, J. A. Ghijselen, A. E. Emanuel, "The apparent Power Concept and the IEEE Standard 1459-2000," *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 20, n. 2, April 2005.
- [16] M.S. Pádua, S.M. Deckmann and F.P. Marafão, "Frequency-Adjustable Positive Sequence Detector for Power Conditioning Applications," *IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, Recife, Brazil, 2005.

IX. BIOGRAFIA



Helmo Kelis Morales Paredes, nascido em 08/09/1979 em Puno-Perú, é engenheiro eletricista (2002) pela Universidade Nacional São Agustín de Arequipa (UNSA) e mestre (2006) em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Atualmente é Doutorando na UNICAMP. Áreas de interesse: Instrumentação, qualidade de energia, e definições de potência na presença de distorções e assimetrias.



Fernando Pinhabel Marafão, nascido em 26/09/1975 em José Bonifácio (SP), é engenheiro eletricista (1997) pela Universidade Estadual Paulista, mestre (2000) e doutor (2004) pela Universidade Estadual de Campinas. Em 2002, foi pesquisador visitante no Departamento de Engenharia de Informação da Universidade de Pádua (Itália). Atualmente é Professor Assistente na Universidade Estadual Paulista (Campus Sorocaba), onde integra o grupo de Engenharia de Controle e Automação. Áreas de interesse: técnicas de processamento e controle digital aplicadas em eletrônica de potência e sistemas de energia, filtros ativos de potência, qualidade de energia e definições de potência na presença de distorções e assimetrias. Dr. Marafão é membro da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP), da Sociedade Brasileira de Automática (SBA) e do IEEE.



Sigmar Maurer Deckmann, nascido em 06/04/1946 em Cruz Alta (RS), é engenheiro eletricista (1973), mestre (1976) e doutor (1980) pela Universidade Estadual de Campinas. É professor da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas desde 1974. De 1986 a 1988, foi chefe do Departamento de Sistemas e Controle de Energia. De 1999 a 2003, foi vice-diretor da faculdade. Também tem liderado diversos projetos sobre Flicker, monitoração de qualidade de energia e instrumentação digital. Suas principais linhas de pesquisa têm sido: dinâmica do sistema de potência, instrumentação, qualidade de energia, monitoração de distúrbios, estudos sobre a propagação de harmônicos e Flicker e filtros ativos de potência. Dr. Deckmann é membro do IEEE.



Luiz Carlos Pereira da Silva, nascido em 30/10/1972 em Guarái (TO), é engenheiro elétricista (1995) pela Universidade Federal de Goiás, mestre (1997) e doutor (2001) pela Universidade Estadual de Campinas. É professor da FEEC/UNICAMP desde 2002, seus projetos de pesquisa são dedicados à transmissão e distribuição de energia elétrica.